



HAL
open science

Les facteurs physiologiques associés à la performance en surf

Audrey Fleury

► **To cite this version:**

Audrey Fleury. Les facteurs physiologiques associés à la performance en surf. Médecine humaine et pathologie. 2018. dumas-01716583

HAL Id: dumas-01716583

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01716583>

Submitted on 23 Feb 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE DE BORDEAUX
COLLEGE DES SCIENCES MEDICALES

Année 2018

Thèse N° 3

Thèse pour l'obtention du
DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN MEDECINE

Présentée et soutenue publiquement

Le 3 janvier 2018

Par Audrey FLEURY

Née le 28 Août 1987 à Toulouse (31)

LES FACTEURS PHYSIOLOGIQUES ASSOCIES A LA
PERFORMANCE EN SURF

Directeur de thèse

Docteur Jean-Didier LAFITTE

Jury

Monsieur le Professeur François TISON

Président

Monsieur le Professeur Frédéric BAUDUER

Rapporteur

Monsieur le Professeur Hervé DOUARD

Juge

Monsieur le Docteur Julien LABORDERIE

Juge

Madame Caroline MONCHAUX

Juge

REMERCIEMENTS

A mon directeur de thèse

Monsieur le Docteur Jean-Didier Lafitte

Docteur en médecine

Praticien hospitalier urgentiste à l'hôpital de Pau

Ancien médecin des équipes de France de surf

Ta compréhension des spécificités de la physiologie du sport appliquée au surf m'a apporté des connaissances indispensables. Merci.

A notre rapporteur

Monsieur le Professeur Frédéric Bauduer

Docteur en médecine et en anthropologie biologique

Service d'hématologie du CH de Bayonne et Professeur à l'université Bordeaux 2

Membre du comité scientifique de l'association Biarritz Sport Santé

Je vous remercie de vos encouragements, votre enthousiasme, vos conseils et votre disponibilité qui m'ont beaucoup aidé.

A notre Président du jury

Monsieur le Professeur François Tison

Professeur des universités et Praticien hospitalier neurologue

Responsable de l'unité « centre mémoire, recherche et ressources » à l'Institut des Maladies

Neurodégénératives affiliée au CNRS et à l'université de Bordeaux

Merci de présider ce jury, votre présence est un honneur.

A nos juges

Monsieur le Professeur Hervé Douard

Professeur des universités et Praticien hospitalier cardiologue

Responsabilité de l'unité « maladies coronaires, épreuves d'effort et réadaptation » à l'Hôpital cardiologique du Haut-Lévêque de Pessac – Bordeaux.

Je vous remercie d'avoir accepté de siéger dans le jury de cette thèse. Vous avez ma profonde reconnaissance.

Mme Caroline Monchaux

Physiologiste en médecine du sport au CH de Bayonne.

Merci pour ta gentillesse et ta disponibilité.

Monsieur le Docteur Julien Laborderie

Docteur en médecine

Praticien hospitalier cardiologue au CH de Bayonne

Merci d'avoir accepté de me juger et d'être présent aujourd'hui.

A mon papa, coach de tennis puis coach de vie, professeur de nature et de musique... Tu m'as fait découvrir des passions sans lesquelles je m'ennuierais bien aujourd'hui. Fièvre d'être une Fleury.

A maman, à qui je dois mon grain de folie, mon esprit scientifique et bien d'autres qualités excepté l'orthographe, merci ma relectrice !

A Talou et Tietie qui agrandissent la famille, je n'aurais pas pu espérer mieux.

A mon frère, ma fierté, qui me fait tellement rire et me renvoie toujours une image positive. Merci d'être comme tu es, mets tes talents à profit et sois heureux.

A mami, j'espère que tu dormiras mieux à présent... Je te taquine, merci pour ton soutien depuis le début.

A papi, il est loin le temps où on faisait du tracteur et des boutures. Merci de m'avoir toujours gâtée et transmis tes passions, promis cet hiver... je fléchis !

A papi Tony, le 3e papi mais non le moindre, je pense fort à toi.

A mami Jo, tu serais fière.

A papi Riri, allez Cognac !

A Guillaume, je t'aime. Toi aussi un jour tu seras docteur. Big up à la poulie.

A ma soeur, doudou. Je crois que tout est dit dans le titre. Je suis très chanceuse.

A Elo, tu peux partir aussi loin que tu veux je ne te lâcherai jamais meuf.

A Cisco... Feu !

A Jacquette, que de moments intenses partagés, je cours me préparer pour le Népal.

A Mélanie, j'espère que tu seras aussi fière de moi que je le suis de toi.

A mes amies, la belle Gaëlle, Florence la folie bretonne, mon acolyte Lisa, mon amie Anne... Hâte de vous voir !

A Marie, on en aura traversé des époques ensemble, fofolle ou sage maman, je t'aime toujours autant.

A Camille, reviens un peu pour voir qu'il ne fait pas que pleuvoir au pays basque. Et puis au pire, ya le Xurasko !

A la Big family, je vous kiffe les copains.

Au Docteur Hervé Dubois, merci d'avoir été l'initiateur de ce projet et de m'avoir fait confiance.

Si je deviens docteur, je me mets au surf.

TABLE DES MATIERES

Liste des figures	10
Liste des tableaux	11
Liste des annexes	12

INTRODUCTION 14

I. APPROCHE PHYSIOLOGIQUE DE LA PERFORMANCE EN SPORT14

A. L'adénosine triphosphate (ATP)14

B. Métabolismes énergétiques de resynthèse de l'ATP15

1. Le système des phosphagènes : la voie anaérobie alactique	15
2. La glycolyse : la voie anaérobie lactique	16
3. Le métabolisme aérobie	18
4. Sollicitation des métabolismes : le continuum biologique	20
5. Effets de l'entraînement sur les modifications physiologiques	22
a) Modifications métaboliques en fonction des filières sollicitées	22
1) Adaptation à l'entraînement anaérobie	22
2) Adaptation à l'entraînement aérobie	23
b) Modifications hémodynamiques	24
c) Modifications respiratoires	25
d) Modifications de la typologie musculaire	26

II. PRESENTATION DE LA DISCIPLINE27

A. Historique27

B. La pratique du surf en France28

C. Le haut niveau28

D. Le surf en compétition29

E. Analyse physiologique de la discipline : un effort intermittent29

1. Durée des différentes phases	30
2. Analyse de la fréquence cardiaque	31
3. Analyse des vitesses et distances parcourues	32
4. Synthèse	33

III. MATERIEL ET METHODES	34
A. Populations étudiées	34
B. Protocole de suivi des sportifs de haut niveau	34
1. L'examen morphologique et fonctionnel	34
a) Mensurations et mesure de l'indice de masse corporelle	34
b) Le pourcentage de masse grasse	34
c) La souplesse	37
2. L'épreuve d'effort maximale	37
a) Test de VO ₂ max des membres supérieurs.....	37
b) Variables mesurées	38
1) La consommation maximale d'oxygène (VO ₂ max)	38
2) Les seuils ventilatoires	39
3) La fréquence cardiaque	40
4) La puissance maximale aérobie (PMA)	40
3. Le test de détente verticale	40
4. Suite du bilan médical	41
a) L'examen médical bi-annuel	41
b) Le bilan psychologique	41
c) Les examens complémentaires	41
C. Méthodes d'analyse	42
1. Étude descriptive transversale : analyse du profil moyen d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et de son évolution en 10 ans	42
2. Étude analytique observationnelle : recherche des paramètres physiologiques associés à la performance en surf	43
IV. RESULTATS	44
A. Analyse du profil moyen d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et de son évolution en 10 ans	44
1. Age et caractéristiques biométriques	44
2. Caractéristiques physiologiques à l'effort	45
a) La consommation d'oxygène maximale (VO ₂ max) et aux seuils SV1 et SV2	45
b) La puissance maximale aérobie (PMA) et aux seuils SV1 et SV2	46
c) Les pourcentages de fréquence cardiaque aux seuils SV1 et SV2	47
d) Détente verticale : évaluation de la puissance maximale anaérobie alactique des membres inférieurs	48
B. Recherche des paramètres physiologiques associés à la performance en surf	49
1. Age et caractéristiques biométriques	49
2. Caractéristiques physiologiques à l'effort	50
a) La consommation d'oxygène maximale (VO ₂ max) et aux seuils (SV1 et SV2)	51
b) La puissance maximale aérobie (PMA) et aux seuils SV1 et SV2	51
c) Les pourcentages de fréquence cardiaque aux seuils SV1 et SV2	51
d) Détente verticale : évaluation de la puissance maximale anaérobie alactique des membres inférieurs	51

V. DISCUSSION 52

PARTIE I : ANALYSE CRITIQUE DES RESULTATS ET REVUE DE LA LITTERATURE

A. Age et caractéristiques biométriques52

1. Analyse du profil moyen d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et évolution en 10 ans 52
2. Données comparatives52
3. Recherche des paramètres physiologiques associés à la performance en surf54

B. Caractéristiques physiologiques à l'effort55

1. La consommation d'oxygène maximale (VO₂max) et aux seuils SV1 et SV255
 - a) Analyse du profil moyen d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et de son évolution en 10 ans55
 - b) Données comparatives56
 - c) Recherche des paramètres physiologiques associés à la performance en surf57
 - d) Facteur influençant l'évolution de la consommation maximale d'oxygène : âge, profil hormonal et entraînement58
2. PMA et puissances aux seuils (p/m SV1 et p/m SV2)61
 - a) Analyse du profil moyen d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et de son évolution en 10 ans61
 - b) Données comparatives61
 - c) Recherche des paramètres physiologiques associés à la performance en surf
3. Les pourcentages de fréquence cardiaque aux seuils SV1 et SV262
 - a) Analyse du profil moyen d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et de son évolution en 10 ans62
 - b) Données comparatives62
 - c) Recherche des paramètres physiologiques associés à la performance en surf
4. Détente verticale : évaluation de la puissance maximale anaérobie alactique des membres inférieurs63
 - a) Analyse du profil moyen d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et de son évolution en 10 ans63
 - b) Données comparatives63
 - c) Recherche des paramètres physiologiques associés à la performance en surf

C. Synthèse64

1. La biométrie64
2. Les paramètres physiologiques65
3. Particularités de l'adolescent66

PARTIE II : ANALYSE CRITIQUE DE LA METHODE	67
A. Populations étudiée	67
B. Protocole de suivi des sportifs de haut niveau	67
1. Évaluation morphologique et fonctionnelle	67
a) La composition corporelle	67
b) La souplesse du rachis : rotation thoracique plan horizontal et amplitudes dans le plan sagittal	69
2. Technique employée pour l'épreuve d'effort maximale progressive	71
a) Un protocole triangulaire	71
b) Intérêt de la mesure de VO ₂ max	72
c) Identification des seuils ventilatoires aérobie (SV1) et anaérobie (SV2)	73
1) Intérêt	
2) Modalités de mesure	73
3) Calculer les fractions utilisées des réserves (Fu r)	74
d) Intérêt d'une épreuve d'effort aérobie sollicitant les membres supérieur	75
e) Notre ergomètre est-il le plus spécifique ?	76
f) Influence de la position horizontale du corps	77
3. La puissance maximale anaérobie alactique (PMAA)	78
a) Protocole utilisé	
b) Mesurer la puissance maximale anaérobie sur ergomètre pour membres supérieurs ..	79
C. Le critère de jugement principal : le classement fédéral national	80
D. L'analyse statistique	80
PARTIE III : PERSPECTIVES ET ENJEUX	81
A. Schéma d'entraînement actuel des surfeurs du pôle France et Espoir	81
B. Proposition d'un test de terrain pour la détermination de la vitesse maximale aérobie (VMA) et vitesses aux seuils SV1 et SV2	82
1. Revue de la littérature, les tests de terrain	82
a) De la détermination directe de VO ₂ max à la nage à celle de la VMA : évaluation scientifique en natation sportive	83
1) Mesure directe de la VO ₂ max à la nage	83
2) Mesure indirecte lors de tests intermittents	86
3) La vitesse maximale aérobie (VMA)	86
> Définition	87
> Les tests triangulaires progressifs	87
> Les test rectangulaires	88
b) Les tests de terrain en surf	89
1) Le dispositif ergosurf	89
2) Protocole intermittent 45/15	89
3) Études internationales récentes	89
2. Intérêt de la détermination de la VMA	90
3. VMA et performance	90

4. Mise au point d'un test d'effort maximal progressif spécifique au surf	91
a) Les critères d'un test de terrain	91
1) Une épreuve triangulaire	91
2) La pertinence	91
3) La validité	92
4) La fidélité	92
5) L'accessibilité	92
b) Notre protocole	92
1) Environnement	93
2) Matériel	93
> Parcours de rame	93
> Conditionnement des sujets	93
3) Déroulement	94
4) Analyse des données	94
5) Le coût métabolique	95
C. L'entraînement, applications pratiques	96
1. Les modalités de contrôle de l'entraînement sur le terrain	96
a) Les moyens de suivi au cours de l'exercice physique	96
b) Les aspects techniques du cardiofréquencemètre	97
2. Le contenu	98
a) Utilisation des fréquences cardiaques et vitesses maximales et aux seuils SV1 et SV2 pour monitorer l'entraînemen	98
1) Objectif	98
2) Quelles intensités d'exercice pour quels objectifs ?	99
b) Intérêts de l'entraînement intermittent type High Intensity Interval Training (HIIT)	
1) Développer les qualités aérobies et anaérobies	103
2) Conséquences physiologiques	103
3) Diminution de la charge de travail	104
4) Application au surf	104
5) En pratique	105
c) Développer la puissance maximale anaérobie alactique des membres inférieurs et supérieurs	106
1) Renforcement musculaire des membres inférieur	106
> Les squats avec charge	106
> L'entraînement stato-dynamique	107
> La pliométrie	107
2) Renforcement musculaire des membres supérieurs	108
d) Particularités physiologiques de l'adolescent	109
e) Entraînement en piscine	110
f) S'entraîner pour éviter les blessures	111
g) La proprioception	113
1) Les planches d'équilibre	113
2) Le carveboard	113
D. Une évaluation globale	115
1. Communication entre les intervenants	115
2. Une approche pluridisciplinaire	115
3. La scolarité	115

E. Évaluer l'intérêt d'autres techniques d'entraînement : présentation du powerbreath ...	116
F. Synthèse	117
VI. CONCLUSION	120
ANNEXES	122
BIBLIOGRAPHIE	142

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Glissement des filaments protéiques d'actine et de myosine lors de la contraction musculaire grâce à l'hydrolyse de l'ATP	14
Figure 2 : Sollicitation des métabolismes en fonction de la durée et de l'intensité de l'effort : diminution de la puissance mécanique maximale créée sur une bicyclette ergométrique en fonction du temps et contribution estimée des apports énergétiques des différents métabolismes (Howald, 1974)	20
Figure 3 : Le cross-over concept (Books et Mercier, 1994)	24
Figure 4 : Pince de Harpenden pour la mesure des plis cutanés	36
Figure 5 : Plateau de VO ₂ max	38
Figure 6 : Évolution des rapports VE/VCO ₂ et VE/VO ₂ au cours de l'effort et définition des seuils SV1 et SV2	39
Figure 7 : Évolution de VO ₂ max jusqu'à 18 ans dans les deux sexes	58
Figure 8 : Évolution avec l'âge de VO ₂ max chez des homme entraînés et non entraînés	59
Figure 9 : Les protocoles d'épreuve d'effort, représentation schématique de l'incrémentement de la charge de travail (W) en fonction du temps (T)	71
Figure 10 : Ergomètre de kayak modifié	76
Figure 11 : Illustration des tests de détente verticale	78
Figure 12 : Technique d'évaluation physiologique du nageur à partir de la nage sur place contre des charges à maintenir élevées (A : ceinture, B : corde, C : poulie, D : charges additionnelles, E : valve à deux voies, F : pince-nez, G : sac de Douglas, J : graphe d'enregistrement)	83
Figure 13 : Bassin expérimental à courant d'eau continu et à vitesse modulable (Astrand et Englesson, 1972)	83
Figure 14 : Dispositif portatif de mesure de VO ₂ max : le K4b2	85
Figure 15 : Exemple de progression avec déplacement de la zone de transition aérobie-anaérobie : élévation de SV2	101
Figure 16 : Evolution de la lactatémie au cours d'un épreuve d'effort maximale avant et après un programme d'entraînement aérobie : déplacement vers la droite de la courbe de lactates sans amélioration de VO ₂ max.....	101
Figure 17 : Exemple d'exercice de renforcement musculaire stato-dynamique	107
Figure 18 : Illustration du « canard » en surf	111

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques principales des trois métabolismes énergétiques	20
Tableau 2 : Nombre de licenciés par catégorie d'âge et par sexe de 2007 à 2015 (selon Kostia Boudine, cadre technique national fédéral de surf)	28
Tableau 3 : Pourcentage de temps passé à ramer, rester stationnaire ou surfer : moyennes de différentes études	30
Tableau 4 : Moyenne des fréquences cardiaques globales, obtenues à la rame, en stationnaire et maximale durant une session de surf	31
Tableau 5 : Intervalles de fréquence cardiaque sollicités, exprimés en pourcentage de la fréquence cardiaque maximale et du temps passé	32
Tableau 6 : Age et caractéristiques biométriques d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et évolution en 10 ans	42
Tableau 7 : Age et caractéristiques biométriques d'un échantillon de surfeuses de haut niveau et évolution en 10 ans	44
Tableau 8 : Moyenne des consommations d'oxygène (maximale, à SV1 et à SV2) d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et évolution en 10 ans	45
Tableau 9 : Moyenne des consommations d'oxygène (maximale, à SV1 et à SV2) d'un échantillon de surfeuses de haut niveau et évolution en 10 ans	45
Tableau 10 : Moyenne des puissances aérobies (maximale, à SV1 et à SV2) d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et évolution en 10 ans	46
Tableau 11 : Moyenne des puissances aérobies (maximale, à SV1 et à SV2) d'un échantillon de surfeuses de haut niveau et évolution en 10 ans	46
Tableau 12 : Moyenne des pourcentages de fréquence cardiaque (maximale, atteinte à SV1 et à SV2) d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et évolution en 10 ans	47
Tableau 13 : Moyenne des pourcentages de fréquence cardiaque (maximale, atteinte à SV1 et à SV2) d'un échantillon de surfeuses de haut niveau et évolution en 10 ans	47
Tableau 14 : Moyenne des détente verticales (bipodale, unipodale droite et gauche) d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et évolution en 10 ans	46
Tableau 15 : Moyenne des détente verticales (bipodale, unipodale droite et gauche) d'un échantillon de surfeuses de haut niveau et évolution en 10 ans	46
Tableau 16 : Moyennes et test de Student et analyse statistique en régression logistique univariée : âge et caractéristiques biométriques	49
Tableau 17 : Moyennes, test de Student et analyse statistique en régression logistique univariée pour chacun des paramètres physiologiques à l'effort	50

Tableau 18 : Age et caractéristiques biométriques des surfeurs de haut niveau : données comparatives	53
Tableau 19 : Age et caractéristiques biométriques des surfeuses de haut niveau : données comparatives	54
Tableau 20 : Données comparatives : la VO2max	54
Tableau 21 : Analyse comparée des VO2max des plus et moins de 18 ans dans chaque groupe	60
Tableau 22 : Analyse comparée des VO2max des plus et moins de 25 ans dans chaque groupe	60
Tableau 23 : Données comparatives : la PMA	61
Tableau 24 : Données comparatives : la détente vertical	63
Tableau 25 : Analyse comparée des deux axes de l'étude : évolution du profil moyen et paramètres associés à la performance (classés par ordre croissant de significativité)	65
Tableau 26 : VO2max en fonction des outils de mesure	77
Tableau 27 : Rappel des résultats des consommations d'oxygène, puissance et fréquence cardiaque aux seuils aérobie et anaérobie, exprimées en pourcentage des valeurs maximales	98
Tableau 28 : Les types d'exercice en intensité et en durée en fonction des objectifs et des seuils	99
Tableau 29 : Paramètres associés à la performance en surf classés par significativité statistique croissante et propositions de méthodes d'évaluation et d'entraînement	118
Tableau 30 : Paramètres associés à la performance en surf d'après la revue bibliographique et proposition de méthodes d'évaluation et d'entraînement	119
Tableau 31 : Paramètres physiques sollicités en surf et proposition de méthodes d'évaluation et d'entraînement	119

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Les licences fédérales	122
Annexe 2 : Les fédérations et catégories du surf de haut niveau	123
Annexe 3 : Les circuits et championnats	124
Annexe 4 : Définition des critères de jugement du surf en compétition	127
Annexe 5 : Les contraintes environnementales	128
Annexe 6 :Fiche technique et mode d'emploi du TK100 JUMPMETRE pour mesurer la détente verticale des membres inférieurs	131
Annexe 7 : Le classement fédéral national : décryptage	132
Annexe 8 : Tableau du recueil de données par athlète	133
Annexe 9 : Paramètres étudiés rangés par classement	135
Annexe 10 : Programme d'entraînement annuel du pôle France et Espoir	137
Annexe 11 : Type de séances en fonction des intensités	138

INTRODUCTION

De plus en plus populaire et influent, le surf est devenu aujourd'hui un sport emblématique qui suscite la curiosité de milliers d'amateurs chaque année. Au delà de sa composante récréative, le milieu de la compétition a également gagné du terrain, le surf sera représenté pour la première fois aux Jeux Olympiques de Tokyo en 2020. Le niveau professionnel français est en plein essor, tant en individuel que par équipes, avec notamment une victoire aux derniers Mondiaux 2017 à Biarritz. Mais la notion de « préparation physique » n'a pas toujours été ancrée dans les mentalités des surfeurs professionnels.

Le surf offre des conditions (milieu marin, immersion) peu propices aux études. Peu exploré jusqu'alors, il est encore difficile de dire quels paramètres sont déterminants pour la performance en compétition. Afin d'orienter l'entraînement des surfeurs de manière optimale et spécifique, il est incontournable d'analyser les facteurs physiologiques mis en jeu, en y incluant les données scientifiques recueillies lors des tests d'effort en laboratoire.

Lors de notre rencontre avec l'entraîneur du pôle France et Espoir basé à la Fédération Française de Surf de Hossegor, nous avons constaté que les résultats des épreuves d'effort annuelles n'étaient utilisés que pour dépister une anomalie ou pour juger de la progression d'un athlète d'année en année, sans pour autant que son programme d'entraînement n'en découle. D'autre part il n'existe pas, aujourd'hui, dans le cadre de l'évaluation physiologique des compétences, de test de terrain valide pour évaluer les surfeurs en conditions réelles.

Ainsi, pour répondre à ces attentes, nous proposons tout au long de cette thèse :

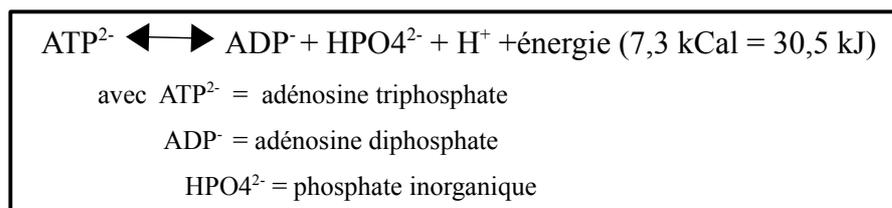
- de définir les métabolismes énergétiques mis en jeu dans la performance sportive et l'impact de l'entraînement sur les modifications physiologiques à l'exercice,
- de les appliquer au surf en utilisant les données issues des analyses qualitatives et quantitatives recueillies lors des compétitions pour mesurer l'impact physiologique de la pratique professionnelle,
- de dresser le profil moyen d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et de juger ou non de leur progression en comparant avec une étude de 2005 menée selon les mêmes critères d'inclusion,
- de définir quels sont les paramètres physiologiques associés à la performance en surf,
- de proposer certaines méthodes d'évaluation, d'entraînement et de suivi à partir des résultats de notre étude et des données de la bibliographie.

Le but de ce travail est d'identifier les paramètres physiologiques à l'effort à prendre en compte en vue d'optimiser l'évaluation, la préparation physique et le suivi des surfeurs de haut niveau, notamment au pôle France.

I. APPROCHE PHYSIOLOGIQUE DE LA PERFORMANCE EN SPORT

A. L'adénosine triphosphate (ATP)

Lors de l'activité musculaire, l'énergie libérée provient de l'hydrolyse de l'adénosine triphosphate (ATP), qui est la seule source d'énergie chimique de l'organisme immédiatement convertible en énergie mécanique (1). Les activités physiques sont classées en fonction du métabolisme qu'elles privilégient pour produire l'ATP. L'ATP est constituée d'une molécule d'adénosine liée à trois molécules de phosphate par des liaisons riches en énergie potentielle. La rupture d'une de ces liaisons par hydrolyse libère de l'énergie. Cette réaction, qui est immédiate, peut se faire indifféremment en présence ou en absence d'oxygène. Elle libère du phosphate inorganique, un proton H^+ et de l'énergie dont une grande partie (75 %) est dissipée sous forme de chaleur (2). L'unité de mesure énergétique des activités physiques est la calorie (Cal) et l'unité d'expression de l'énergie est le joule (J) avec la relation $1 \text{ kCal} = 4,2 \text{ kJ}$.



L'énergie libérée est nécessaire au glissement des filaments protéiques d'actine et de myosine, permettant la contraction musculaire au niveau du sarcomère, l'unité structurale et contractile du muscle strié (figure 1) (3).

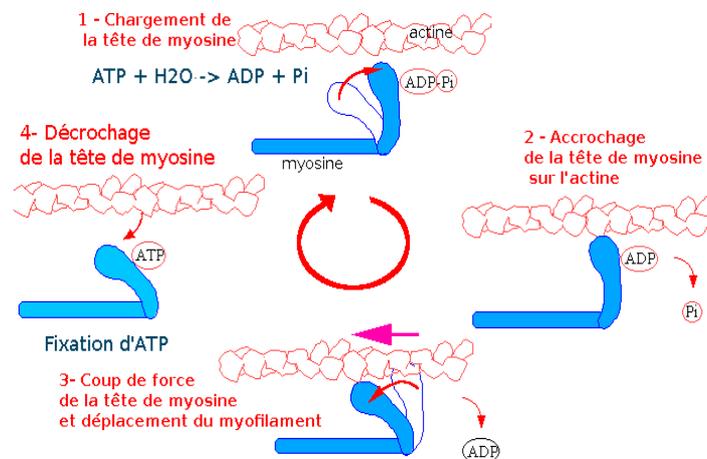


Figure 1

Glissement des filaments protéiques d'actine et de myosine lors de la contraction musculaire grâce à l'hydrolyse de l'ATP

Les réserves d'ATP intramusculaires disponibles ($\pm 5 \text{ mmol.kg}^{-1}$ de muscle frais), sont faibles et ne permettent de maintenir une contraction musculaire maximale que 2 secondes d'où l'absolue nécessité de sa resynthèse permanente (2).

B. Métabolismes énergétiques de resynthèse de l'ATP

Les muscles squelettiques ont une remarquable capacité de resynthèse d'ATP. La baisse des concentrations d'ATP lors d'un exercice musculaire déclenche simultanément trois mécanismes. Leur utilisation préférentielle successive sera fonction de l'intensité et la durée de l'exercice. Leurs caractéristiques diffèrent en terme :

- d'inertie (délai d'obtention de leur efficacité maximale),
- de puissance maximale (quantité d'énergie maximale libérée par unité de temps, elle est exprimée en Watt/kg (Watt = Énergie (joules) / t (sec)).
- de capacité (quantité totale d'énergie libérable exprimée en calories ou en joules),
- de rendement (pourcentage de l'énergie utilisée par rapport à l'énergie libérée).

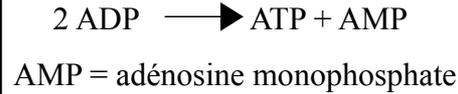
Ainsi, de l'exercice le plus intense (et court) au moins intense (et long), il s'agit :

- du système des phosphagènes par l'hydrolyse de la créatine phosphate (voie anaérobie alactique),
- de la glycolyse (catabolisme du glucose) et la glycogénolyse (catabolisme du glycogène) (voie anaérobie lactique)
- des phosphorylations oxydatives (voie aérobie).

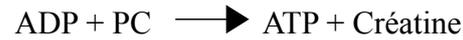
Les intensités d'effort sont exprimées en pourcentage de la consommation maximale en oxygène utilisé par les muscles par unité de temps. Noté VO_2max , car aussi défini comme le volume maximal d'oxygène utilisé en une minute, il s'exprime en litres par minute (L/min) ou millilitres par minute et par kilogrammes de masse corporelle (ml/min/kg).

1. Le système des phosphagènes : la voie anaérobie alactique

Les deux voies rapides anaérobies de resynthèse de l'ATP sont regroupées sous le terme de système des phosphagènes. L'ADP est rephosphorylée par deux réactions quasi immédiates. D'une part, par la reconversion d'ADP en ATP, catalysée par la myokinase ;



d'autre part, par le transfert du groupement phosphoryl de la phosphocréatine (PC) sur l'ADP, catalysé par la créatine-phosphokinase (CPK).



Ce système énergétique a une inertie pratiquement nulle, libère une grande quantité d'énergie (4-6 mmol ATP.kg⁻¹ de muscle frais), mais est rapidement épuisable car les réserves de PC intramusculaire (18-20 mmol.kg⁻¹ de muscle frais) sont faibles (2). La capacité de cette filière est donc très faible, par contre sa puissance est élevée car la libération d'énergie est rapide. Il joue un rôle majeur dans les exercices explosifs très brefs. Pour un exercice maximal de sprint, ces réserves seront épuisées en moins de 10 secondes (4). Contrairement à celles d'ATP, les réserves musculaires de phosphocréatine (PC) peuvent être entièrement utilisées, ce qui représente une capacité suffisante pour maintenir le niveau de production d'ATP pendant environ 20 à 30 secondes à 70 % de VO₂max (4).

2. La glycolyse : la voie anaérobie lactique

Le second métabolisme mis en jeu en l'absence d'oxygène pour produire de l'énergie, est alimenté par le catabolisme du glucose (glycolyse), après hydrolyse du glycogène (glycogénolyse). La glycolyse est une cascade de 10 réactions enzymatiques qui se déroulent dans le cytosol des cellules musculaires :



Les deux produits terminaux sont le pyruvate et le nicotinamide adénine dinucléotide hydrogéné (NADH). En l'absence d'oxygène ou lorsque la libération de pyruvate dépasse les capacités d'oxydation mitochondriale, il s'accumule dans la cellule et est rapidement transformé en acide lactique grâce à la lactate déshydrogénase (LDH) :



Il diffuse rapidement dans la circulation sanguine, dont le pH fait qu'il libère immédiatement un proton pour être converti en ion lactate :



Finalement, l'enchaînement des réactions ci-dessus donne le bilan suivant :



L'accumulation de protons H^+ est responsable de l'acidité cellulaire et inhibe la glycolyse anaérobie (l'acidose agit sur la phosphofructokinase qui intervient à la 3e étape de la glycolyse) (4). Les protons sont en partie captés par les divers tampons cellulaires et sanguins, le pH ne varie donc que très peu malgré de fortes sollicitations de la glycolyse (1). Le bilan du devenir du lactate à l'exercice se répartit globalement en l'oxydation des trois-quarts de la production, l'autre quart étant destiné à reconstituer les réserves du glycogène hépatique (1).

En présence d'oxygène, une partie est oxydée dans la mitochondrie, une mole de lactate libère 17 moles d'ATP (2). La respiration mitochondriale a un rôle essentiel dans le contrôle du devenir du lactate, il n'est pas un déchet métabolique. La partie restante est transportée dans le milieu interstitiel et dans les capillaires sanguins. Une fois dans la circulation, une partie est oxydée par le myocarde et surtout par les fibres oxydatives des groupes musculaires au repos ou moins sollicités ; une autre partie est utilisée comme précurseur de la glycogénogenèse hépatique (1). Le lactate est donc le témoin d'une production d'ATP par la glycolyse. Par conséquent, les athlètes qui fournissent à leurs muscles le plus d'énergie par unité de temps par la voie anaérobie lactique sont ceux qui en produisent le plus (1).

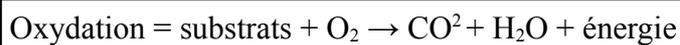
La vitesse de resynthèse de l'ATP est beaucoup plus rapide que celle de la phosphorylation oxydative (métabolisme aérobie) et peut être activée en quelques secondes seulement (inertie). Ce métabolisme permet à l'organisme de s'adapter aux situations nécessitant un ajustement rapide et important de la dépense énergétique (4). Sa capacité est plus grande que celle de la filière anaérobie alactique en raison d'un stock en glycogène plus important. En revanche, la puissance disponible est moins élevée du fait de la chaîne de réactions nécessaires. Le rendement de ce système est relativement faible et le gain n'est que de deux ATP.

Selon l'intensité de l'effort, le délai d'épuisement de la puissance anaérobie lactique est de 30 à 45 secondes (Pradet, 1998 et Billat, 2003) (4,5) pour un effort supra maximal alors que la capacité peut aller jusqu'à 2 minutes (Billat, 2003) (4) pour une intensité entre 85% et 95% de VO₂max.

Au bout de 2 à 3 minutes, la glycolyse aérobie participe déjà, pour d'autant que le potentiel aérobie du sujet est développé.

3. Le métabolisme aérobie

Cette filière permet la synthèse d'ATP en présence d'oxygène, grâce aux phosphorylations oxydatives de différents substrats. Elle combine deux processus au niveau des membranes mitochondriales, l'énergie produite par les oxydations étant utilisée pour la phosphorylation de l'ADP (2) :

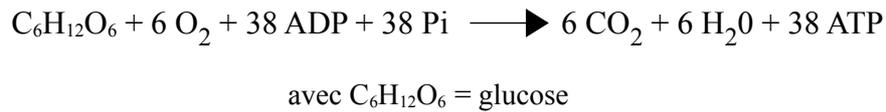


Le CO² et l'eau sont éliminés par la respiration et la sueur. Les substrats énergétiques du métabolisme aérobie sont multiples : glucides, lipides et protides. Leur utilisation préférentielle dépend de l'intensité et de la durée de l'exercice.

Les **protides** ne sont utilisés que lors d'exercices dépassant plusieurs heures (les stocks de glycogènes sont fortement abaissés).

Lors d'un exercice maximal progressivement croissant de faible intensité (40-60% de VO₂max), le muscle utilise principalement les AGL (acides gras libres), provenant de la dégradation des **triglycérides** (lipolyse). Ces derniers se trouvent dans le plasma, les tissus adipeux et dans les cellules musculaires. La dégradation des triglycérides donne 3 AGL et une molécule de glycérol. Ce dernier emprunte la voie de la glycolyse. Les AGL sont quant à eux oxydés pour former l'acétyl-CoA, oxydé à son tour au niveau du cycle de Krebs. La quantité de molécules d'ATP produite est très élevée. En effet, la dégradation du glycérol produit 22 ATP et celle des 3 AGL en produit 441, ce qui fait un total de 463 ATP par molécule de triglycéride.

Au-delà de 80 % de la consommation maximale d'oxygène (VO₂max), l'utilisation des **glucides** devient prédominante, puis quasi-exclusive lorsqu'on s'approche de la VO₂max. De même que lors de la glycolyse anaérobie, pour une molécule de glucose, il y a formation de pyruvate et de 2 molécules d'ATP. La suite est différente, le pyruvate entre dans les mitochondries où il suit le cycle de Krebs et permet de libérer 36 molécules d'ATP soit 38 au total pour une molécule de glucose.



Présents dès le début de l'effort, ces processus n'atteignent leur intensité maximale que lorsque le système cardio-respiratoire et circulatoire est complètement adapté à l'exercice (c'est-à-dire 1 à 3 min après le début de l'effort selon l'âge et le niveau d'entraînement) (6). Le délai et les limites de la capacité d'apport de l'oxygène expliquent l'inertie et la puissance relativement limitée du métabolisme aérobie par rapport aux autres systèmes énergétiques décrits. La capacité du métabolisme aérobie (théoriquement illimitée dans la mesure où les réserves de glucides et de lipides sont quasiment inépuisables) est donc inversement proportionnelle à l'intensité de l'exercice. La puissance maximale du processus aérobie (PMA), atteinte au cours d'un effort qui sollicite une consommation d'oxygène maximale (VO₂max), varie selon les substrats utilisés.

Au total : la capacité aérobie d'un individu représente donc la quantité totale d'énergie disponible et susceptible d'être libérée par voie oxydative, et dépend (7) :

- du système respiratoire (diffusion alvéolo-capillaire),
- de la chaîne des transporteurs d'oxygène des poumons aux cellules, le système circulatoire (hémoglobine, débit cardiaque, qualité des capillaires fonctionnels musculaires),
- de son utilisation par les fibres actives (système mitochondrial et enzymatique).

La complète oxydation des réserves de glucides et de glycogène devrait permettre de réaliser un exercice de 93 minutes à 70 % de VO₂max. Les stocks d'acide gras permettent quant à eux de fournir de l'ATP pendant plusieurs jours et ne constituent pas un facteur limitatif pour un exercice d'une puissance inférieure à 30-50 % de VO₂max (4).

4. Sollicitation des métabolismes : le continuum biologique

Un athlète peut donc compter sur trois mécanismes de production différents d'énergie (ATP) pour se mettre en action : ATP-PC, ATP-glycogène et ATP-oxygène qui correspondent respectivement aux 3 filières : anaérobie alactique, anaérobie lactique et aérobie. Leur caractéristiques sont résumées dans le tableau 1.

Tableau 1
Caractéristiques principales des trois métabolismes énergétiques

Métabolisme	Substrats	Bilan énergétique (par molécule de substrat)	Inertie	Puissance	Capacité	Produits terminaux
Anaérobie alactique	ATP, PC, ADP	1 ATP	+++	+++	-	AMP, ADP, créatine
Anaérobie lactique	Glucose, Glycogène	3 ATP	++	++	+	Acide lactique
Aérobie	Glucose	38 ATP	+	+	+++	H ₂ O, CO ²
	Triglycéride	463 ATP				

Selon le type d'effort (intensité et durée), la couverture énergétique de l'exercice peut solliciter « en priorité » l'un de ces 3 mécanismes. Ces derniers peuvent également se chevaucher et se compléter (figure 2).

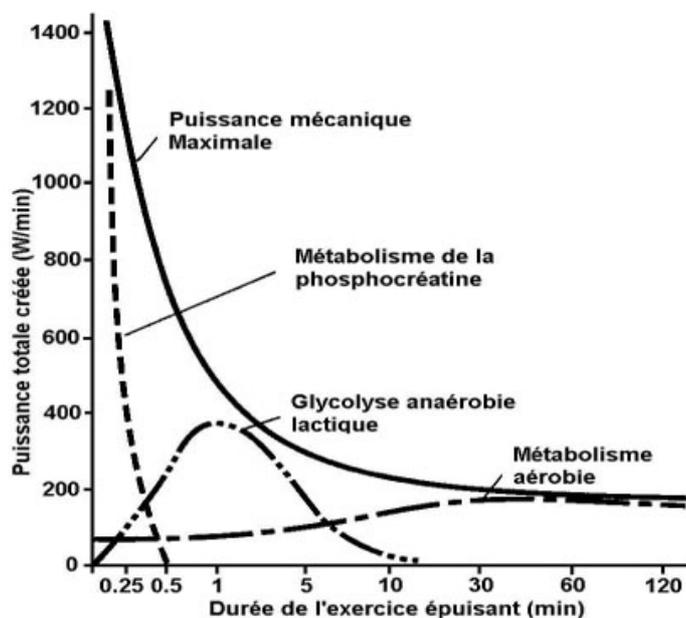


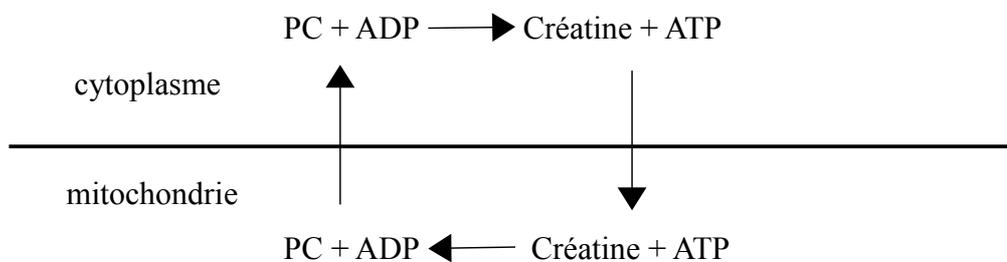
Figure 2

Sollicitation des métabolismes en fonction de la durée et de l'intensité de l'effort : diminution de la puissance mécanique maximale créée sur une bicyclette ergométrique en fonction du temps et contribution estimée des apports énergétiques des différents métabolismes (Howald, 1974)

A l'occasion d'épreuves d'effort d'intensité progressive, Fukuba et coll. ont prouvé que la glycolyse est sollicitée dès le début de l'effort (50% pour des exercices de 6 sec). Le lactate est produit par le muscle dès les plus basses puissances et s'y accumule sans diffuser dans le sang veineux. Production musculaire de lactate et consommation d'O₂ évolueraient linéairement depuis le début de l'effort (8). Ainsi les 2 phénomènes s'imbriquent, il serait plus juste d'évoquer pour les tests intenses et de courte durée le rôle du système ATP PC-glycolyse lactique, ce qui nous ramène à la notion de continuum biologique.

Il en est de même pour la filière anaérobie alactique. Depuis les années 70, elle est citée comme n'intervenant que dans les premières secondes de l'exercice puis s'estompant après 7 secondes d'effort (9). Les stocks de phosphocréatine (PC) localisés au niveau des protéines contractiles (actine/myosine) sont dégradés dès le début de l'exercice, et de façon importante si les contractions sont très intenses. Cependant, depuis les années 2000 et grâce aux nouvelles technologies, on sait maintenant que ces stocks peuvent être dégradés mais aussi régénérés continuellement au cours de l'exercice (9).

En effet, les études ont observé que lorsque la consommation d'oxygène (VO₂) atteint un état stable résultant de l'équilibre entre les besoins et les apports en oxygène, il en est de même pour la phosphocréatine qui est donc dégradée et régénérée à la même vitesse (10). La créatine et la phosphocréatine jouent un rôle de navette entre la mitochondrie et les protéines contractiles au cours de l'exercice permettant sa régénération :



Le métabolisme dit aérobie (production d'ATP au niveau des mitochondries qui consomment de l'oxygène) va donc permettre de régénérer la phosphocréatine au niveau des protéines contractiles, et ce tout au long de l'exercice en réponse à la demande. L'utilisation de la phosphocréatine n'est donc pas restreinte à quelques secondes, mais perdure tout au long de l'exercice (11,12). On devrait plutôt parler d'un continuum depuis la dégradation des réserves de glucides ou de lipides en fonction de l'intensité, jusqu'à la respiration mitochondriale suivie des navettes PC/Créatine pour resynthétiser les réserves de PC au niveau des protéines contractiles. Les différents types d'entraînement jouent sur les vitesses de réaction de ces étapes, et non spécifiquement sur une seule voie métabolique.

5. Effets de l'entraînement sur les modifications physiologiques

L'enjeu de l'entraînement va être d'améliorer inertie, puissance, capacité et rendement des différents systèmes. Pour obtenir une amélioration durable d'un processus, il faut développer en parallèle sa puissance et sa capacité (5). La puissance sera optimisée lors d'exercices à intensité maximale ou supra-maximale pendant des durées courtes en fonction du processus ciblé. Pour le développement de la capacité, les intensités doivent être inférieures et la durée de l'effort plus longue. De l'efficacité de ces métabolismes va découler la performance, c'est-à-dire le maintien d'une puissance d'exercice sur une durée, une distance fixées par le règlement sportif. L'entraînement améliore les qualités métaboliques, hémodynamiques, respiratoires et musculaires de l'organisme pour une meilleure adaptation à l'effort.

a) Modifications métaboliques en fonction des filières sollicitées

1) Adaptation à l'entraînement anaérobie

L'entraînement anaérobie se situe en fonction des auteurs entre 85 et 95% de VO₂max (5,13). La capacité du système des phosphagènes (anaérobie alactique) est augmentée par 2 adaptations biochimiques :

- l'augmentation des réserves énergétiques (énergie disponible),
- l'augmentation de l'activité et des vitesses d'intervention des enzymes clés de ce système énergétique (CPK et myokinase).

La production énergétique de la glycolyse est également améliorée. Ceci est possible grâce à une amélioration de l'activité enzymatique parallèlement à l'augmentation de la densité mitochondriale et des enzymes oxydatives (7). S'en suit une meilleure vitesse de réaction et une plus grande quantité de glycogène dégradé. D'autre part, le développement des systèmes tampons optimisera la capacité du sportif à mieux supporter l'acidose qui en découle par la formation des protons H⁺. La limite anaérobie supportable est atteinte lors de la rupture de l'équilibre entre vitesse de production et élimination de l'acide lactique dans l'organisme : on parle de seuil anaérobie (14,15). Il peut être obtenu lors d'un effort supra maximal, conduisant le sujet à l'épuisement, sur des durées entre 30 secondes et 2 minutes (5).

La récupération suite à un effort en anaérobie lactique sollicite la filière aérobie. La respiration mitochondriale favorise l'utilisation du lactate comme substrat énergétique, et la régénération de la phosphocréatine (9,16,17).

Ainsi, les différentes formes de travail associées au développement de la filière aérobie offrent des perspectives intéressantes pour toutes les spécialités sportives (17). Le délai et les limites de la capacité d'apport de l'oxygène expliquent également l'intérêt de développer l'inertie, la puissance et la capacité du système aérobie.

2) Adaptation à l'entraînement aérobie

L'endurance est une qualité qui permet de développer les systèmes cardio-vasculaires et cardio-respiratoires en effectuant des actions maintenues à une intensité et une durée données. La part majoritaire du métabolisme aérobie ou anaérobie dans l'utilisation des substrats pour la production d'ATP est définie par l'intensité de travail et les périodes de récupération (4,18,19).

Physiologiquement, un entraînement en endurance aérobie provoque des adaptations majeures au niveau du muscle squelettique, assurant un meilleur échange d'oxygène entre les capillaires et les tissus ainsi qu'un meilleur contrôle du métabolisme musculaire (7).

Elles sont fonction de l'intensité de l'entraînement, que nous exprimerons en pourcentage de VO₂max. Elle se situe en rapport avec l'objectif souhaité : travail en endurance fondamentale, en capacité aérobie ou en puissance aérobie.

L'endurance fondamentale correspond à l'intensité de base pour une utilisation privilégiée des lipides (intensité supérieure à 50% de VO₂max). Le nombre de capillaires entourant chaque fibre musculaire augmente. La capillarité musculaire s'accompagne d'une concentration plus forte du contenu musculaire en myoglobine (réservoir d'O₂ facilitant sa diffusion vers la mitochondrie). La diffusion de l'oxygène depuis les capillaires sanguins jusqu'aux mitochondries est optimisée (20), ainsi que l'épuration des déchets métaboliques. L'entraînement en endurance augmente les stocks de substrats au niveau musculaire (glycogène et lipides). L'augmentation des réserves intramusculaires de triglycérides et de la disponibilité des lipides comme substrat énergétique (libération des acides gras par les tissus adipeux) entraîne un taux plus élevé d'oxydation des acides gras, ce qui permet une épargne du glycogène, et la libération d'une grande quantité d'énergie (4). La lipolyse est alors sollicitée pour des intensités plus élevées, et le recours au métabolisme anaérobie est donc retardé, ainsi que l'accumulation d'acide lactique (21). Le « cross-over point » est le point de croisement où la quantité d'énergie provenant des glucides devient supérieure à celle fournie par les lipides (Figure 3) (22). L'entraînement va déplacer le point de croisement vers des valeurs de puissances plus importantes. Autrement dit, après entraînement un individu sera moins dépendant des glucides tout en utilisant plus de lipides. Ainsi il économisera son glycogène et augmentera son potentiel d'endurance.

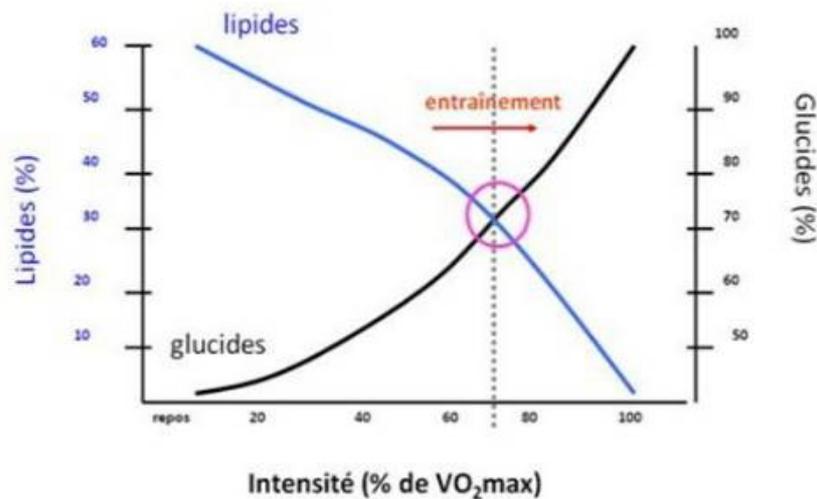


Figure 3
Le cross-over concept (Books et Mercier, 1994)

La capacité aérobie désigne l'intensité à partir de laquelle le sportif développe ses qualités d'endurance. Elle se situe entre 70 et 85% de VO_2max ou plus en fonction des auteurs (4,5,7). Elle sollicite la glycolyse entraînant une accumulation de lactates. La densité mitochondriale et les concentrations des enzymes impliquées dans le cycle de Krebs augmentent, et donc la capacité du muscle à dégrader le glycogène pour produire de l'énergie (apport d'ATP) (4). Costill et Trappe (2002) ont relaté que pour 27 semaines d'entraînement le nombre de mitochondries augmentait de 5% par semaine et leur taille de 35%. Le nombre de capillaires musculaires augmenterait de 40% (18).

La puissance aérobie correspond à l'intensité à partir de laquelle on optimise le potentiel en endurance et la capacité à maintenir des courses à haute intensité. Elle se travaille entre 90 et 120% de VO_2max . Les adaptations physiologiques sont sensiblement identiques à la capacité aérobie, avec une production de lactates encore plus importante.

Au total, lors de la progression, la production de lactates sera moindre pour un même effort, l'inertie pourra être améliorée et la puissance maximale augmentée modérément. L'entraînement aérobie permet d'élever le seuil anaérobie vers un niveau de sollicitation supérieur (retarder son apparition), et de maintenir l'exercice le plus longtemps possible.

Alors que l'entraînement aérobie retarde l'accumulation d'acide lactique, l'entraînement anaérobie augmente la tolérance aux déséquilibres acido-basiques pendant les efforts intenses ; il s'agit donc de deux moyens pour retarder la fatigue musculaire (23). La fatigue musculaire étant la conséquence de la baisse des réserves énergétiques et de l'accumulation d'acide lactique, la contraction musculaire sera alors de moins bonne qualité (24).

Comme nous le verrons, une forme d'entraînement intermittent sollicite les deux filières. Quelle que soit l'efficacité des systèmes physiologiques à l'effort, la limite d'adaptation à l'exercice musculaire dépend de la VO₂max. Toute modification de la VO₂ à l'exercice passe par des adaptations hémodynamiques.

b) Modifications hémodynamiques

La sollicitation des systèmes cardiaque et vasculaire nécessite, comme le système respiratoire, un délai d'adaptation. Les adaptations cardiorespiratoires se font en synergie pour permettre un apport d'oxygène au niveau des muscles en activité, selon le principe de Fick :

$$VO_2 = Q \times (CaO_2 - CvO_2)$$

VO₂ : consommation d'oxygène

Q : débit cardiaque (quantité de sang envoyée dans les artères par minute, il est le produit du volume d'éjection systolique (VES) et de la fréquence cardiaque (FC))

CaO₂ : concentration artérielle en O₂

CvO₂ : concentration veineuse en O₂

CaO₂ - CvO₂ = différence artério-veineuse en oxygène

La différence artério-veineuse en oxygène traduit le prélèvement musculaire en oxygène. La quantité d'O₂ consommée par le muscle est égale à la quantité d'O₂ dans les artères (CaO₂) moins la quantité d'O₂ dans les veines (CvO₂).

L'adaptation à l'entraînement aérobie entraîne des adaptations hémodynamiques centrales. L'endurance fondamentale va accroître le volume d'éjection systolique (VES) (au repos, à l'exercice sous-maximal et maximal) par augmentation du volume du ventricule gauche et de la masse myocardique (dans les limites physiologiques) (4). La fréquence cardiaque de repos diminue par diminution du tonus sympathique. Lors de l'effort sous-maximal, et en post-exercice, le muscle cardiaque réduit sa dépense énergétique et sa consommation d'O₂, améliorant les facultés de récupération (20). Le débit cardiaque reste stable pour des exercices sous-maximaux et augmente pour un effort maximal.

Au niveau périphérique, pour un effort maximal le débit sanguin est augmenté dans les territoires actifs (muscles, myocarde, muscles respiratoires). La capacité du flux sanguin global n'augmente pas pour un effort sous-maximal mais l'utilisation du débit sanguin acheminé vers les muscles est optimisé (apports de nutriments).

c) Modifications respiratoires

L'hypertrophie des muscles respiratoires (muscles intercostaux internes et diaphragme) permet d'augmenter l'amplitude de la ventilation (4). La diffusion alvéolo-capillaire pour les exercices maximaux est meilleure. Ceci est rendu possible par une augmentation parallèle de la surface d'échanges gazeux et du nombre d'alvéoles et de capillaires fonctionnels. L'utilisation d'une meilleure proportion d'O₂ permet une économie ventilatoire. La fréquence respiratoire est diminuée (et plus ample) au repos et pour les exercices sous maximaux et augmentée pour les exercices maximaux, de même que le débit respiratoire maximal (VE max) (20).

Ainsi, ces adaptations conduisent à un meilleur rendement de la part des grands systèmes fonctionnels (cardio-vasculaire et respiratoire). Un même exercice devient alors moins sollicitant.

d) Modifications de la typologie musculaire

Les fibres musculaires utilisées varient en fonction de l'exercice. La capacité oxydative est supérieure dans les fibres lentes par rapport aux fibres rapides. L'entraînement en endurance aérobie améliore le potentiel aérobie de façon similaire dans les 2 types de fibres, mais provoque une conversion de fibres rapides en fibres lentes (23). L'entraînement anaérobie augmente la capacité glycolytique dans les fibres rapides mais ne provoque pas de conversion.

La pratique sportive requiert de la part de l'entraîneur des connaissances physiologiques approfondies pour adapter l'entraînement aux objectifs fixés.

II. PRESENTATION DE LA DISCIPLINE

A. Historique

Le surf est né en Polynésie au XV^e siècle, initialement pratiqué par les indigènes (25). En 1778, l'explorateur James Cook jette l'ancre dans la baie de Kealakekua, aux Îles Sandwich (Hawaï). Il aperçoit alors des indigènes chevauchant les vagues sur de longues planches de bois, taillées dans un tronc d'arbre selon un rituel. Tué par les indigènes peu après cette découverte, Cook laisse sa place au lieutenant James King, qui fut le premier à relater dans le journal de bord la pratique du surf telles qu'il avait pu l'observer à Kealakekua Bay. L'archipel est le premier à convertir cette pratique, qui permettait aux chefs de tribus de prouver leur puissance et leur supériorité, en sport.

Au XIX^e siècle, la colonisation des îles d'Hawaï par les missionnaires américains interdisent la pratique de ce sport, choqués par la quasi-nudité des autochtones sur leurs planches.

Il faut attendre le début du XX^e siècle pour qu'un hawaïen, du nom de Duke Kahanamoku, remette le surf au goût du jour. Ce champion olympique de natation faisait des démonstrations en Californie et en Australie et devint l'une des personnalités les plus importantes du milieu (26). L'écrivain Jack London, publiera de nombreux articles sur ce sport encore méconnu du grand public. Le surf se répand alors peu à peu en Australie et aux États-Unis.

C'est à l'occasion du tournage du film « Le Soleil se lève aussi » tiré du roman d'Hemingway, que les Californiens Peter Viertel et Dick Zanuck arrivent en France en 1956 dans la ville de Biarritz, emmenant avec eux une planche de surf de Californie. Ils surfent leurs premières vagues à « la côte des basques », célèbre spot biarrot qui devient alors le berceau du surf en France (27). Les prémices ont été laborieuses, faute de matériel adapté jusqu'en 1963 avec l'arrivée des premiers Anglo-Saxons munis de leurs équipements (polystyrène, fibre de verre).

Les « Tontons surfeurs » : c'est ainsi qu'on été baptisés les pionniers du surf français sur la côte basque à la fin des années 1950. Le premier club de surf est fondé en 1959, nommé « Le Waikiki », équipé d'un râtelier d'une trentaine de planches. Les premiers championnats de France commencent en 1960 (le premier lauréat a été le biologiste Joël de Rosnay), suivi par les premiers championnats d'Europe, et la création de la Fédération Française de Surf en 1964, initialement basée à Biarritz puis à Hossegor depuis 1984. En 1990, le surf est reconnu comme une discipline de haut niveau par la Commission Nationale et bénéficie des dispositions prévues pour les sportifs appartenant à cette catégorie : suivi social, aides individualisées, suivi médical etc. Le pôle France de Biarritz est labellisé en 1996, puis se scinde en deux avec un pôle France jeunes et la création du pôle Espoir Aquitaine en 2010.

B. La pratique du surf en France

Le nombre de licenciés a été multiplié par 2 entre 2007 et 2015 pour les hommes, et 3 pour les femmes (tableau 2). Il reste faible par rapport aux autres sports (le 20e sport le plus pratiqué regroupe 140 000 licenciés). Ces chiffres sont modestes du fait des exigences géographiques de la pratique (proximité d'un littoral), et d'une majorité de pratiquants non licenciés. En 2013 on estime 37 millions de surfeurs dans le monde (28), contre 13 millions en 2002 (29). Les différents types de licences délivrées sont présentées en annexe 1.

Tableau 2

Nombre de licenciés par catégorie d'âge et par sexe de 2007 à 2015 (selon Kostia Boudine, cadre technique national fédéral de surf)

annee	Masculin	Féminin	<18	>=18	<18 Masc.	>=18 Masc.	<18 Fem.	>=18 Fem.	Total
2015	11360	5876	9647	7589	6039	5321	3608	2268	17236
2014	11331	5373	8577	8127	5458	5873	3119	2254	16704
2013	9269	3927	7198	5998	4783	4486	2415	1512	13196
2012	8789	3488	6924	5343	4732	4048	2192	1295	12277
2011	7718	2852	6102	4425	4327	3368	1775	1057	10570
2010	7027	2532	5485	4024	3892	3106	1593	918	9559
2009	6985	2443	5225	4203	3700	3285	1525	918	9428
2008	6298	2079	4556	3821	3212	3086	1344	735	8377
2007	5676	1888	4188	3376	2931	2745	1257	631	7564

< 18 : nombre de licenciés total de moins de 18 ans

> = 18 : nombre de licenciés total de 18 ans ou plus

< 18 Masc. : nombre de licenciés de sexe masculin de moins de 18 ans

> = 18 Masc : nombre de licenciés de sexe masculin de 18 ans ou plus

< 18 Fem. : nombre de licenciés de sexe féminin de moins de 18 ans

> = 18 Fem : nombre de licenciés de sexe féminin de 18 ans ou plus

C. Le haut niveau

Les critères requis pour faire partie des surfeurs français de haut niveau ont été modifiés cette année, comme me l'a indiqué le Directeur Technique National (DTN) Michel Plateau. Seuls sont inscrits sur les listes de sportifs de haut niveau et les listes des espoirs ceux qui pratiquent une discipline reconnue par la Commission Nationale du Sport de Haut Niveau (CNSHN).

La Direction Technique Nationale fait chaque année une proposition d'inscription en liste auprès du ministère des sports. Il n'y a plus de quotas d'inscription, mais la nécessité d'avoir réalisé des performances correspondant aux exigences du haut niveau. L'inscription se fait chaque année en Septembre.

Elle est effective au 1er novembre et est valable jusqu'au 31 octobre de l'année suivante. Le haut niveau de surf en France est séparé en différentes catégories, en fonction des résultats obtenus lors de ces compétitions, les détails sont disponibles en annexe 2 et 3.

D. Le surf en compétition

Il est indispensable de rappeler les règles et critères de jugement d'une compétition. Les concurrents vont à l'eau par groupe (séries) de quatre, de trois ou même de deux. Les concurrents se distinguent par des tee-shirts de couleurs différentes (30). Ils évoluent dans une zone limitée, pendant un temps limité (de un quart d'heure à une demi-heure en moyenne). Un système de signaux visuels et sonores définit ces limites d'espace et de temps.

Chaque vague surfée est appréciée et notée par quatre ou cinq juges sous la responsabilité d'un chef-juge. Chaque juge met une note de zéro à dix. Pour les gratifier de bonnes notes, les juges attendent des compétiteurs:

- qu'au plan technique leurs manœuvres respectent au mieux les critères de jugement en vigueur,
- qu'au plan stratégique, ils sélectionnent les vagues qui offrent le plus fort potentiel de points.

Depuis mars 2005, les critères de jugement sont les suivants : « Le surfeur devra exécuter des manœuvres radicales contrôlées, dans la section la plus critique de la vague avec vitesse, puissance et flow* (fluidité) pour optimiser au maximum son potentiel de points. Le surf innovant et évolutif, tout comme la variété du répertoire technique (manœuvres), devront être pris en compte au moment de récompenser les vagues surfées. Le surfeur qui respecte ces critères, en affichant sur les vagues le plus haut degré de difficulté et d'engagement, sera gratifié des scores les plus élevés ». La définition précise des termes employés est disponible en annexe 4.

flow : terme anglo-saxon imposé par la nomenclature.*

E. Analyse physiologique de la discipline : un effort intermittent

Le surf est caractérisé par une intermittence d'exercices variés en intensité et en durée, en fonction que l'athlète rame, soit stationnaire, attende une vague ou la surfe à proprement parler (action de glisse). Les concurrents ne sont notés que sur la glisse et les manœuvres effectuées. Or, les analyses physiologiques de l'activité nous montrent que la majorité de l'effort consiste à ramer. Grâce à du matériel d'enregistrements vidéos, puis des cardiofréquencesmètres et récemment des montres GPS, les auteurs ont pu au fil des années analyser les efforts fournis sur le terrain en terme de durée, fréquence cardiaque, vitesse et distance parcourue.

1. Durée des différentes phases

Meir et al. (1991) (31) ont analysé 6 surfeurs amateurs pendant une heure, puis plus récemment Mendez-Villanueva et al. (2006), (32) ont étudié 5 professionnels internationaux pendant une simulation de compétition de 20 minutes. Une étude a été publiée en 2012 (33) sur les surfeurs de niveau national en Nouvelle Zélande filmés sur 2 compétitions, et une étude en 2014 (34) sur 15 athlètes de surf pendant un entraînement de 2h. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3

Pourcentage de temps passé à ramer, rester stationnaire ou surfer : moyennes de différentes études

	Durée des différentes phases exprimées en pourcentage du temps total				
	rame	stationnaire	action de glisse*	divers**	sprint à la rame
Meir et al. (1991) (31)	44	35	5	16	X
Mendez-Villanueva et al. (2006) (32)	51	42	3,8	2,5	X
Farfalle et al. (2012) (33)	54	28	8	3	4
Secomb et al. (2014) (34)	42	52	2,5	X	4
Moyennes	47,75	39,25	4,83	7,16	4

*action de glisse** : action de surfer sur la vague (manœuvres, figures)

*divers*** : plonger sous les vagues, récupérer sa planche...

X : données manquantes

Si on fait la moyenne de ces différentes études, on retrouve une majorité de temps de rame. L'effort de rame va lui même alterner entre des courtes périodes intenses de sprint (4%) et des périodes plus longues d'endurance (environ 48%). Lors de l'effort de rame explosif que le sportif fournit pour prendre la vague de son choix, il sollicite la filière énergétique **anaérobie alactique**. Cet effort dure 61% du temps entre 1 et 10 secondes, et 20% du temps entre 11 et 20 secondes (33).

Tandis que la rame du bord pour revenir à la zone de déferlement une fois la vague surfée peut durer plus de 10 minutes (Lowdon 1989) (35). Ce repositionnement sera une phase d'intensité plus faible, nécessitant une bonne aptitude **aérobie** (31,32,36–38).

Même si le temps passé stationnaire est important en cumulé, il s'avère qu'il ne dure qu'entre 1 et 10 secondes dans 64% des cas (33). Une fois positionné, le surfeur doit ensuite donner l'impulsion qui lui permettra de se mettre debout (« take-off »).

Lors de la période de glisse (environ 5%), les filières sollicitées varient en fonction des vagues choisies, leur longueur et les manœuvres effectuées. L'effort peut passer de l'anaérobie alactique sur les vagues courtes, à lactique sur les efforts intenses de plus longue durée. En effet, certaines vagues « déroulent » sur une distance certaine (comme 400 mètres sur la vague de Jeffrey Bay en Afrique du sud), effort qui met alors en jeu la filière **anaérobie lactique** et éventuellement **aérobie** en fonction du temps de glisse. L'équilibre postural, ainsi que des notions plus subjectives de flow, engagement, et créativité décrits précédemment seront déterminants.

2. Analyse de la fréquence cardiaque

Les mêmes auteurs ont eu une approche similaire pour analyser la fréquence cardiaque de leurs échantillons respectifs. Les sujets ont d'abord réalisé une épreuve d'effort en laboratoire sur un ergomètre de kayak modifié (qui simule l'effort de rame en décubitus ventral) et enregistré la fréquence cardiaque maximale (FCmax) des surfeurs, pour ensuite les tester sur le terrain avec un cardiofréquencemètre. Le résumé des résultats est présenté dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4
Moyenne des fréquences cardiaques globales, obtenues à la rame, en stationnaire et maximale durant une session de surf

	Fréquences cardiaques moyennes			
	globales	à la rame	stationnaire	maximale
Meir et al. (1991) (31)	135 (75)	143 (80)	127 (71)	171
Mendez-Villanueva et al. (2006) (32)	146 (84)	X	X	X
Farley et al. (2012) (33)	140 (64,4)	X	X	190 (87,5)

Les chiffres sont exprimés en battement par minute (bpm).

Les chiffres entre parenthèses expriment les résultats en pourcentage de la FCmax obtenue lors de l'épreuve d'effort.

Plus intéressants, Farley et al. ont séparé les résultats selon des intervalles de fréquences cardiaques de différentes intensités. Les zones de moyenne et haute intensités entre 121 et 160 bpm représentent 60% du total des zones (56 à 74% de FCmax), 19% entre 101 et 120 bpm (45-55% de FCmax), et seulement 3% du temps entre 181 et 200 bpm (tableau 5).

Tableau 5

Intervalles de fréquence cardiaque sollicités, exprimés en pourcentage de la fréquence cardiaque maximale et du temps passé

	Intensité faible	Intensité modérée		Haute intensité		Très haute intensité
Intervalles de FC	< 100	101 - 120	121 - 140	141 - 160	161 - 180	181 - 200
% de FCmax	< 45	45 - 55	56 - 65	66 - 74	75 - 84	85 - 95
% de temps passé	4	19	31	29	15	3

FC : Fréquence cardiaque, exprimée en battements par minute (bpm)

% de FCmax : pourcentage de la fréquence cardiaque maximale obtenue lors de l'épreuve d'effort

% de temps passé : pourcentage de temps passé dans chaque intervalle de fréquence cardiaque exprimé en pourcentage du temps total

Les différences de résultats entre les études sont dues à des protocoles utilisés différents, on peut penser que Mendez-Villanueva et al. ont obtenu des fréquences cardiaques plus élevées que Meir et al. car ils ont étudié des professionnels en situation de simulation de compétition. Enfin dans la dernière étude les surfeurs sont en situation de compétition réelle, la fréquence cardiaque maximale plus élevée est, selon les auteurs, en lien avec l'adrénaline et la motivation.

3. Analyse des vitesses et distances parcourues

L'étude de Farley et al. (33) a été la première à utiliser une montre GPS pour analyser vitesse et distances parcourues par les surfeurs en compétition. Les résultats retrouvent une vitesse majoritaire (58% du temps) lente entre 1 et 4 km/h, qui correspond aux périodes de rame toutes confondues. La 2e tranche de vitesse majoritaire représente (29% du temps) et se situe entre 4,1 et 8 km/h, elle correspond aux sprints à la rame pour prendre une vague, aller rapidement à la zone de déferlement des vagues, ou ramer vite pour passer sur une vague avant qu'elle ne déferle. La moyenne de tous les sujets confondus était de 3,7 km/h.

La moyenne des distances parcourues pendant les 2 compétitions était en moyenne de 1605m en 20 min, avec environ 947m de rame (lente et rapide), et 128m à surfer. Les résultats sont toujours à interpréter avec prudence et ne sont pas généralisables à toutes les compétitions étant donné l'importance des conditions environnementales fluctuantes (climat, taille des vagues, leur fréquence, leur distance du bord, courants) et des facteurs propres aux participants (stratégie, niveau, motivation) (31,32,38).

Plusieurs auteurs ont relevé que ces conditions vont fortement influencer les durées que vont passer les surfeurs à ramer, rester stationnaire, surfer les vagues, ainsi que les adaptations physiologiques qui en découlent (31,38,39). Le surfeur doit analyser et s'adapter aux contraintes environnementales tant pour sa performance que pour palier aux dangers potentiels qui conditionnent la pratique (facteurs climatiques, animaux venimeux) (annexe 5).

4. Synthèse

L'analyse des données quantitatives et qualitatives du surf en compétition permet d'identifier les caractéristiques physiologiques requises. Il ressort de cette synthèse bibliographique que les périodes d'intensité modérée qui sollicitent la filière **aérobie** sont majoritaires, dominées par l'effort de rame. Le surf nécessite donc une bonne endurance cardio-respiratoire et musculaire pour maintenir un niveau technique et physique élevé durant toute une session mais également pour mieux récupérer entre deux vagues surfées.

Les qualités physiques liées à la filière énergétique **anaérobie** sont sollicitées par intermittence dans les efforts brefs et intenses (35,40). Endurance et puissance aérobie et anaérobie vont concerner le haut du corps, mais également les membres inférieurs sur les périodes de glisse.

III. MATERIEL ET METHODES

La conception du surf de haut niveau s'est sensiblement modifiée depuis les années 90. Grâce au rapprochement entre entraîneurs, médecins du sport et physiologistes les athlètes sont aujourd'hui entraînés et surveillés de près. Ainsi, les jeunes du pôle France bénéficient aujourd'hui, au même titre que tous les sportifs de haut niveau, d'un suivi médical obligatoire défini par un arrêté ministériel datant du 11 février 2004 et fixant la nature et la périodicité des examens médicaux prévus aux articles L. 3621-2 et R. 3621-3 du code de la santé publique (41).

A. Populations étudiées

La population source a été constituée par les surfeurs de haut niveau qui ont bénéficié d'une évaluation physiologique au centre hospitalier de la côte Basque (Bayonne) de 2010 à 2015. Les athlètes du pôle France représentaient notre population cible et font partie de cet échantillon.

Pour la détermination du profil moyen, un échantillon de 48 surfeurs, 19 surfeuses de 15 à 27 ans a été retenu, après exclusion des :

- moins de 15 ans,
- bodyboarders, bodysurfeurs et longboarders de haut niveau,
- individus dont l'épreuve d'effort s'est arrêtée prématurément quel qu'en soit le motif (blessures, douleur, etc).

Pour la recherche des paramètres physiologiques associés à la performance en surf les sujets de sexe féminin n'ont pas été pris en compte, faute d'effectif suffisant. Le recueil a été fait sur 6 ans, de 2010 à 2015, et porte sur 48 sujets obéissant aux mêmes critères d'exclusion.

B. Protocole de suivi des sportifs de haut niveau

1. L'examen morphologique et fonctionnel

a) Mensurations et mesure de l'indice de masse corporelle

La taille a été exprimée en centimètre, le poids en kilogramme et l'indice de masse corporelle (IMC) a été calculé grâce au rapport poids (kg) / taille (m²) et sera exprimé en kg/m².

b) Le pourcentage de masse grasse

Il a été calculé à partir de la somme de 4 plis cutanés, mesurés en millimètres avec une pince de Harpenden (figure 4), les sujets étaient en position debout et les mesures ont été prises du côté non dominant à différents endroits comme illustré ci-dessous :



- pli **tricipital** : pli vertical sur la face postérieure du triceps, bras entièrement détendu (éviter les rotations du membre). A mi-distance entre l'insertion haute (acromion de l'épaule) et basse (olécrane du coude),



- pli **bicipital** : pli vertical, situé à mi-distance entre l'insertion haute (tête humérale de l'épaule) et basse (pli du coude),



- pli **sous-scapulaire** : pli oblique vers le bas et le dehors, sur la face postérieure, le bras bien détendu. Le pli se situe juste sous la pointe de l'omoplate (1 cm),



- pli **supra-iliaque** : pli oblique en bas et en dedans. Juste au-dessus de la crête iliaque (2 cm), à son intersection avec la ligne axillaire antérieure.

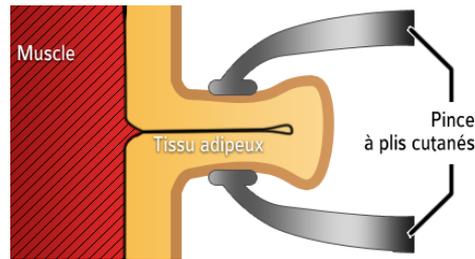


Figure 4
Pince de Harpenden pour la mesure des plis cutanés (42)

Cinq mesures ont été prises pour chaque pli et la moyenne est calculée. Elles ont dû être effectuées par le même opérateur chez un sujet détendu. La procédure a été reconnue fiable à condition de respecter certains critères. Elle consiste à saisir fermement un pli cutané entre pouce et index, comprenant le tissu sous-cutané et excluant le tissu musculaire sous-jacent. On y applique la pince perpendiculairement qui exerce une pression au point de contact avec la peau pendant deux secondes. La pression des doigts doit être relâchée pendant la mesure à la pince. L'épaisseur de la double couche s'affiche sur le cadran de la pince.

Le reste du calcul a consisté à additionner les 4 valeurs en mm, et à les convertir en pourcentage de masse grasse selon les équations suivantes.

1 - Calcul de la densité corporelle (DC) selon les équations de Durnin & Womersley :

Tranches d'âge (ans)	Hommes	Femmes
17-19	1,1620-0,0630 (logS)	1,1549-0,0678 (logS)
20-29	1,1631-0,0632 (logS)	1,1599-0,0717 (logS)
30-39	1,1422-0,0544 (logS)	1,1423-0,0632 (logS)
40-49	1,1620-0,0700 (logS)	1,1333-0,0612 (logS)
>= 50	1,1715-0,0779 (logS)	1,1339-0,0645 (logS)

*(S = Σ bicip + tricip + Sous-scap + Supra-il.)

2 - Calcul du % de tissu adipeux (Tadx) selon l'équation de Siri :

$$\% \text{ Tadx} = [(4,95/DC) - 4,50] \times 100$$

3 - Calcul de la masse grasse (MG) :

$$MG = \text{Poids(kg)} \times (\% \text{ Tadx} / 100)$$

L'équation de Durnin et Womersley pour le pourcentage d'adiposité a été validée dans les deux sexes (43), et en particulier sur la population de jeunes sportifs (44). Pour convertir la densité corporelle en pourcentage de masse grasse, les nombreuses validations de l'équation de Siri ont permis de la considérer comme étant la méthode de référence à fortiori chez les sportifs (45–48).

c) La souplesse

La mesure de la souplesse a été calculée sur la distance doigt sol, membres inférieurs en extension. Elle représentait la souplesse rachidienne et celle de la chaîne postérieure. Si le sujet posait l'extrémité des doigts au sol, nous avons noté zéro centimètre, une croix notée « + » si l'inter-phalangienne distale est en flexion sur le sol, « ++ » pour l'inter-phalangienne proximale, « +++ » pour la métacarpo-phalangienne et « ++++ » si la main est posée à plat sur le sol.

2. L'épreuve d'effort maximale

Dans les textes elle est obligatoire tous les quatre ans, en pratique, les surfeurs du pôle France et Espoir y sont soumis une fois par an. Elle vise à dépister d'éventuelles anomalies ou inadaptations survenant à l'effort, lesquelles imposeraient alors un avis spécialisé, et à mesurer les capacités de production énergétique du sportif dans les voies aérobie et anaérobie.

a) Test de VO₂max des membres supérieurs

Depuis 1998 à l'hôpital de Bayonne, les surfeurs utilisent pour leur épreuve d'effort un cycloergomètre ou ergocycle pour membres supérieurs. Le travail est fourni par un vélo adapté au travail des membres supérieurs en position assise, qui reproduit un effort type « pédalage de bras ».

Il s'agit d'un test dit triangulaire, c'est à dire maximal progressif. Durant l'effort, la puissance augmente par paliers d'une valeur fixe pendant des périodes données, pour tendre à obtenir un état métabolique stable à chaque palier. Après un échauffement de 3 à 5 minutes, la puissance imposée est augmentée progressivement par palier de 5 watts toutes les 30 secondes pour rendre la progression linéaire et précise à l'approche de la puissance maximale, imposant donc à l'athlète une production d'énergie croissante. Un électrocardiogramme a enregistré l'adaptation cardiaque à l'effort.

Le sportif a inspiré et expiré à travers un masque relié à une machine analysant la composition des échanges gazeux (ergospiromètre), permettant donc de calculer instantanément la quantité d'oxygène consommée et de dioxyde de carbone produite, reflétant l'adaptation respiratoire en réponse à une augmentation de la charge de travail.

Le caractère maximal de l'épreuve a été jugé sur les critères de la conférence de consensus de la société française de médecine du sport du 3 avril 2001 (49).

b) Variables mesurées

1) La consommation maximale d'oxygène (VO₂max)

Comme déjà défini, le VO₂max d'un individu représente le volume maximal d'oxygène qu'il peut consommer par unité de temps au cours d'un exercice suffisamment intense pour le conduire jusqu'à l'épuisement, il s'exprime en litres par minute (L/min) ou millilitres par minute et par kilogramme de masse corporelle (ml/min/kg). L'évolution de la consommation d'oxygène augmente avec l'intensité de l'effort parallèlement à la fréquence cardiaque. Elles évoluent linéairement avec l'augmentation de la charge de travail, ceci est un facteur de bonne adaptation physiologique à l'exercice (50). Puis la VO₂ se stabilise « en plateau » à partir d'une certaine intensité, témoignant du plafonnement des possibilités d'adaptation du sportif à l'effort demandé (figure 5).

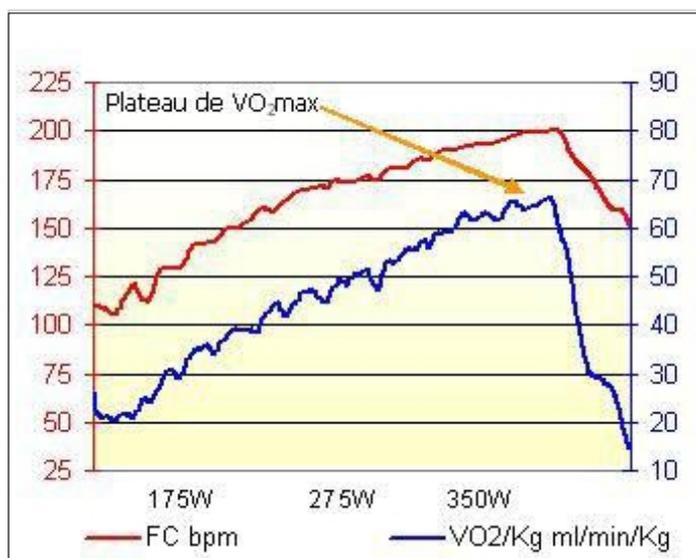


Figure 5
Plateau de VO₂max (52)

2) Les seuils ventilatoires

La détermination des seuils ventilatoires lors d'une épreuve d'effort à charge croissante a été largement utilisée et validée par plusieurs équipes (51,52). Elle repose sur les ruptures de pentes des courbes de débit ventilatoire, de VO_2 et de production de CO_2 au cours d'un exercice d'intensité croissante (figure 6).

SV1 correspond au seuil d'**adaptation ventilatoire, dit seuil aérobie**. Il a été défini d'après Wasserman K. (53) comme le niveau de VO_2 correspondant aux critères suivant :

- première augmentation non linéaire de la ventilation VE
- augmentation non linéaire de la production de gaz carbonique VCO_2
- équivalent respiratoire constant pour le gaz carbonique VE/VCO_2
- première augmentation de l'équivalent respiratoire pour l'oxygène VE/VO_2

Pour déterminer SV1, on a noté l'élévation du rapport VE/VO_2 sans augmentation concomitante du rapport VE/VCO_2 . Dans ces conditions, l'augmentation de VE/VO_2 , a indiqué que l'élévation de la ventilation (VE) pour éliminer le CO_2 est disproportionnée par rapport à la consommation d'oxygène.

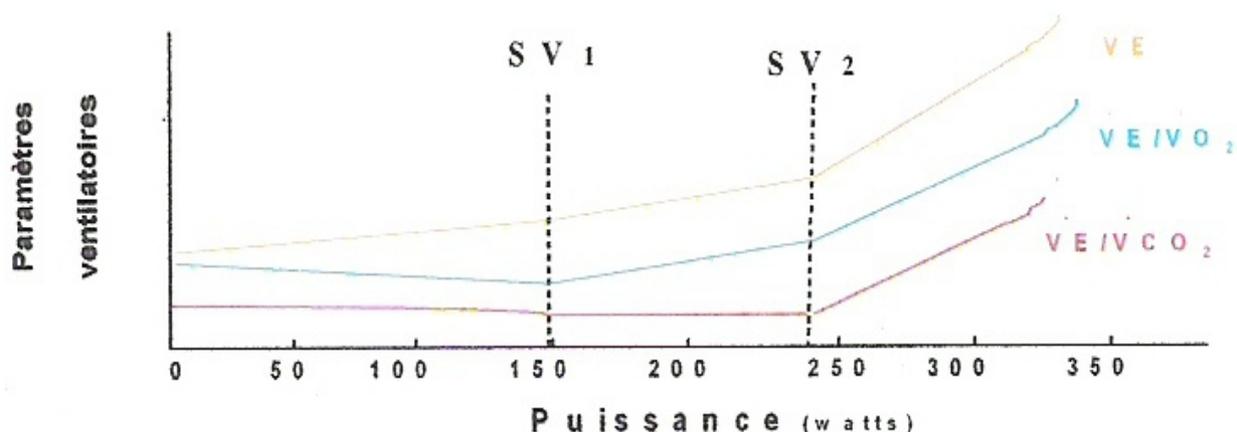


Figure 6
Évolution des rapports VE/VCO_2 et VE/VO_2 au cours de l'effort et définition des seuils SV1 et SV2

SV2 correspond au seuil de décompensation de l'acidose métabolique, soit d'**inadaptation ventilatoire ou encore anaérobie** et indique le niveau de charge maximum tolérable au cours d'un entraînement (54). Il a été défini, toujours d'après Wasserman, au seuil de VO₂ pour lequel on observe :

- une deuxième augmentation non linéaire de la ventilation VE, en excès et non plus proportionnelle à VCO₂ (hyperventilation) : l'équivalent pour le gaz carbonique VE/VCO₂ augmente,
- une deuxième augmentation non linéaire de l'équivalent pour l'oxygène VE/VO₂.

3) La fréquence cardiaque

La fréquence cardiaque maximale (FC_{max}) a été définie lorsque la courbe de FC atteint un plateau horizontal. On a défini également les FC au seuils SV1 et SV2, en les convertissant en pourcentage de la FC_{max} observée.

4) La puissance maximale aérobie (PMA)

Une puissance est un débit d'énergie c'est à dire une quantité maximale d'oxygène qu'un organisme peut utiliser par unité de temps. Son unité conventionnelle est le watt, rapporté au poids : W/Kg. La PMA se définit comme étant la puissance maximale développée (ici celle des membres supérieurs), correspondant à la consommation maximale d'oxygène. Elle a été déterminée lors de l'atteinte de la FC_{max}, à SV1 et SV2.

3. Le test de détente verticale

La détente verticale, exprimée en centimètre, a permis d'apprécier la **puissance anaérobie alactique** des membres inférieurs. L'évaluation a été bipodale, unipodale droite et gauche, à 3 reprises, nous garderons le meilleur essai. Il s'agit d'un saut vertical, sans élan avec une légère flexion préalable des genoux qui étire et met en tension les extenseurs de la cuisse, le mouvement des bras étant autorisé. Nous avons utilisé un TK 100 JUMPMETRE, le sujet porte une ceinture reliée à un tapis en caoutchouc, l'affichage des résultats est digital. La fiche technique du matériel est disponible en annexe 6.

4. Suite du bilan médical

a) L'examen médical bi-annuel

Il est pratiqué par un médecin diplômé en médecine du sport et comprend :

- un entretien,
- un examen physique,
- un bilan diététique et des conseils nutritionnels, aidés si besoin par des avis spécialisés coordonnés par le médecin selon les règles de la profession,
- un examen dentaire certifié par un spécialiste.

b) Le bilan psychologique

Il a lieu deux fois par an chez les sportifs mineurs et une fois par an chez les sportifs majeurs. Il s'agit d'un entretien spécifique, par un médecin ou par un psychologue sous responsabilité médicale, qui vise à :

- détecter des difficultés psychopathologiques et des facteurs personnels et familiaux de vulnérabilité ou de protection,
- prévenir des difficultés liées à l'activité sportive intensive,
- orienter vers une prise en charge adaptée si besoin.

c) Les examens complémentaires

Avant l'inscription sur la liste des sportifs de haut niveau ou des sportifs espoirs, une échocardiographie trans-thoracique de repos doit être réalisée, et à renouveler entre 18 et 20 ans si la première a été faite avant l'âge de 15 ans.

Sont également pratiqués une fois par an :

- une bandelette urinaire avec recherche de protéinurie, glycosurie, hématurie, nitrites,
- un électrocardiogramme standardisé de repos avec compte rendu médical,
- un examen biologique pour les sportifs de plus de quinze ans, avec autorisation parentale pour les mineurs, comprenant : numération-formule sanguine, réticulocytes, ferritine.

C. Méthodes d'analyse

Il s'agit d'une analyse rétrospective des 88 dossiers disponibles au plateau technique de médecine du sport de l'hôpital de Bayonne.

1. Étude descriptive transversale : analyse du profil moyen d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et de son évolution en 10 ans

Les athlètes ayant dans leur dossier plusieurs épreuves d'effort d'année en année, nous avons pris arbitrairement la dernière de chacun sur les 48 hommes et 19 femmes, de 2010 à 2015. Les moyennes ont été calculées pour les variables recueillies :

- l'âge
- l'examen biométrique : taille, poids, âge, IMC, pourcentage de masse grasse
- les paramètres physiologiques à l'effort :
 - VO2 (max, à SV1 et SV2)
 - Puissances (maximale aérobie, à SV1 et SV2)
 - Fréquence cardiaque maximale (et pourcentage atteint à SV1 et SV2)
- le test de détente verticale (bipodale, unipodale droite et gauche)

La souplesse n'a pas été étudiée, car mal reportée dans les dossiers. Le Dr Hervé Dubois a établi il y a 10 ans un profil moyen des surfeurs de haut niveau ayant passé leurs épreuves d'effort dans la même structure. Nous y avons comparé nos résultats pour analyser leur évolution.

Nous avons confronté nos moyennes à ceux des surfeurs professionnels internationaux et aux sports qui sollicitent majoritairement les membres supérieurs (canoë, kayak, sauvetage côtier, stand-up paddle) et inférieurs (triathlon, décathlon, football...).

2. Étude analytique observationnelle : recherche des paramètres physiologiques associés à la performance en surf

A partir des épreuves d'effort de 2010 à 2015 de 48 surfeurs, nous avons recherché les paramètres déterminants pour la performance en surf avec pour critère de jugement principal le classement fédéral national (annexe 7).

L'analyse **principale** a regroupé les résultats des 6 ans cumulés, pour une meilleure puissance statistique. Chaque année l'échantillon fluctue entre ceux qui quittent ou rejoignent le pôle France ou Espoir, chaque surfeur a ainsi effectué entre une et six épreuves d'effort (pour ceux qui l'ont fait chaque année) (annexe 8).

Cette analyse a représenté 83 classements, allant de la 3^e à la 459^e position dans le classement national. Deux groupes ont été constitués en fonction de leur classement rangés dans l'ordre croissant pendant l'année durant laquelle ils ont procédé à l'épreuve d'effort, les meilleurs dans le groupe 1 les autres dans le groupe 2 (annexe 9). Ils ont été scindés par la médiane des classements, donc le 42^e qui correspond à la position N°41, créant un groupe 1 de 42 valeurs et un groupe 2 de 41. Les moyennes des groupes 1 et 2 ont été calculées.

Une analyse par **catégorie d'âge** est venue compléter les résultats par la même méthode. Trois catégories étaient représentées : les 15-16 ans (n = 41), 17-18 (n = 22) ans et 18-20 ans (n = 18).

L'analyse statistique des variables quantitatives de ces 2 groupes indépendants a été réalisée par la méthode de Student, disponible sur biostatTGV.fr. Ce test statistique a été secondairement complété par une analyse en régression logistique univariée. Tous les résultats ont été considérés comme significatifs pour un risque alpha de 5%. Ainsi, un test est significatif lorsque $p < 0,05$.

Les résultats obtenus ont été critiqués en s'appuyant sur la revue bibliographique, et nous avons pu confirmer ou non les hypothèses émises par le Dr Dubois en 2005.

IV. RESULTATS

A. Analyse du profil moyen d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et évolution en 10 ans

1. Age et caractéristiques biométriques

Tableau 6
Age et caractéristiques biométriques d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et évolution en 10 ans

	Moyennes comparatives de deux échantillons de surfeurs de haut niveau		
	Étude rétrospective sur 5 * ans de 2000 à 2005 (n = 36)	Étude rétrospective sur 5 ** ans de 2010 à 2015 (n = 48)	Évolution en 10 ans (%)
Age (année)	17,6 (3,6)	17,55 (3,65)	- 0,28
Taille (cm)	174 (5,26)	172,64 (7,5)	- 0,78
Poids (kg)	67 (5,06)	62,4 (9,1)	- 6,86
IMC (kg.m ⁻²)	21,88 (1,71)	20,83 (1,93)	- 4,79
Masse grasse (%)	9,49 (2,24)	8,05 (2,67)	- 15,17

Les données entre parenthèses représentent les écarts-types.

* : Etude du Dr Dubois

** : Présente étude

Tableau 7
Age et caractéristiques biométriques d'un échantillon de surfeuses de haut niveau et évolution en 10 ans

	Moyennes comparatives de deux échantillons de surfeuses de haut niveau		
	Étude rétrospective sur 5 ans de 2000 à 2005 (n = 4)	Étude rétrospective sur 5 ans de 2010 à 2015 (n = 19)	Évolution en 10 ans (%)
Age (année)	24 (6,9)	17,68 (0,7)	- 26,33
Taille (cm)	165 (4,39)	167,47 (12,02)	+ 1,5
Poids (kg)	57 (3,61)	59,38 (7,35)	+ 4,17
IMC (kg.m ⁻²)	21,15 (1,65)	21,16 (0,44)	+ 0,04
Masse grasse (%)	19,5 (3,25)	17,4 (2,60)	- 10,77

Si on compare cette même population, à 10 ans d'intervalle, chez les hommes, pour une moyenne d'âge similaire (variation de 0,28%) , nos sportifs sont sensiblement plus petits (- 0,78%) et bien plus légers (- 6,86%), pour un IMC moindre (- 4,79%), et une masse grasse diminuée (- 15,17%). Les femmes sont plus grandes (+ 1,5%) et plus lourdes (+ 4,17%), pour un IMC égal et une masse grasse moindre (- 10,77%). Elles sont en revanche bien plus jeunes (- 26,33%).

2. Caractéristiques physiologiques à l'effort

a) La consommation d'oxygène maximale (VO2max) et aux seuils SV1 et SV2

Tableau 8

Moyenne des consommations d'oxygène (maximale, à SV1 et à SV2) d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et évolution en 10 ans

	Moyennes comparatives de deux échantillons de surfeurs de haut niveau		
	Étude rétrospective sur 5 ans de 2000 à 2005 (n = 36)	Étude rétrospective sur 5 ans de 2010 à 2015 (n = 48)	Évolution en 10 ans (%)
VO2max (ml/kg/min)	48,72 (4,5)	53,67 (7,01)	+ 10,16
VO2 à SV1 (ml/kg/min)	32,09 (2,83)	35,91 (5,09)	+ 11,9
VO2 à SV2 (ml/kg/min)	41,95 (3,96)	43,07 (5,53)	+ 2,6

VO2 : consommation d'oxygène par un travail des membres supérieurs

SV1 : seuil aérobie (adaptation respiratoire)

SV2 : seuil anaérobie (inadaptation respiratoire)

Tableau 9

Moyenne des consommations d'oxygène (maximale, à SV1 et à SV2) d'un échantillon de surfeuses de haut niveau et évolution en 10 ans

	Moyennes comparatives de deux échantillons de surfeuses de haut niveau		
	Étude rétrospective sur 5 ans de 2000 à 2005 (n = 4)	Étude rétrospective sur 5 ans de 2010 à 2015 (n = 19)	Évolution en 10 ans (%)
VO2max (ml/kg/min)	40,2 (8,18)	44,03 (1,13)	+ 9,53
VO2 à SV1 (ml/kg/min)	28,42 (6,86)	29,81 (1,97)	+ 4,89
VO2 à SV2 (ml/kg/min)	36,83 (7,64)	35,4 (3,18)	- 3

La VO2max est en augmentation en 10 ans chez les surfeurs étudiés, hommes comme femmes (respectivement de 10,16% et 9,53%). La VO2 à SV1 ayant largement progressé par rapport à SV2 (+ 11,90% versus + 2,60%) chez les hommes.

Chez les femmes le paramètre augmente à SV1 (+ 4,89%) et diminue à SV2 (- 3,88%).

b) La puissance maximale aérobie (PMA) et aux seuils SV1 et SV2

Tableau 10

Moyenne des puissances aérobie (maximale, à SV1 et à SV2) d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et évolution en 10 ans

	Moyennes comparatives de deux échantillons de surfeurs de haut niveau		
	Étude rétrospective sur 5 ans de 2000 à 2005 (n = 36)	Étude rétrospective sur 5 ans de 2010 à 2015 (n = 48)	Évolution en 10 ans (%)
PMA (Watt/kg)	2,84 (0,62)	2,79 (0,32)	- 1,7
P/m à SV1 (Watt/kg)	1,93 (0,32)	2,04 (0,28)	+ 5,67
P/m à SV2 (Watt/kg)	2,49 (0,27)	2,45 (0,26)	- 1,6

PMA : puissance maximale aérobie des membres supérieurs rapportée au poids

P/m : puissance des membres supérieurs, rapportée au poids

SV1 : seuil aérobie (adaptation respiratoire)

SV2 : seuil anaérobie (inadaptation respiratoire)

Tableau 11

Moyenne des puissances aérobie (maximale, à SV1 et à SV2) d'un échantillon de surfeuses de haut niveau et évolution en 10 ans

	Moyennes comparatives de deux échantillons de surfeuses de haut niveau		
	Étude rétrospective sur 5 ans de 2000 à 2005 (n = 4)	Étude rétrospective sur 5 ans de 2010 à 2015 (n = 19)	Évolution en 10 ans (%)
PMA (Watt/kg)	2,59 (0,45)	2,4 (0,23)	- 7,33
P/m à SV1 (Watt/kg)	1,87 (0,44)	1,72 (0,24)	- 8,02
P/m à SV2 (Watt/kg)	2,38 (0,36)	2,06 (0,26)	- 13,44

La PMA comparable par rapport à l'échantillon antérieur chez les hommes (variation de -1,70%), et diminuée chez les femmes (- 7,33%). On note toutefois, de même que pour la VO₂, une puissance à SV1 en progression chez l'homme (+ 5,67%) tandis qu'elle diminue chez la femme (- 8,02%). Le paramètre à SV2 est inférieur dans les deux sexes (- 1,60% et - 13,44%).

c) Les pourcentages de fréquence cardiaque aux seuils SV1 et SV2

Tableau 12

Moyenne des pourcentages de fréquence cardiaque (maximale, atteinte à SV1 et à SV2) d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et évolution en 10 ans

	Moyennes comparatives de deux échantillons de surfeurs de haut niveau		
	Étude rétrospective sur 5 ans de 2000 à 2005 (n = 36)	Étude rétrospective sur 5 ans de 2010 à 2015 (n = 48)	Évolution en 10 ans (%)
% FCmax à SV1	84,91 (2,76)	87,42 (4,60)	+ 3,3
% FCmax à SV2	94,56 (1,91)	95,12 (2,84)	+ 1,13

% FCmax : pourcentage de la fréquence cardiaque maximale

Tableau 13

Moyenne des pourcentages de fréquence cardiaque (maximale, atteinte à SV1 et à SV2) d'un échantillon de surfeuses de haut niveau et évolution en 10 ans

	Moyennes comparatives de deux échantillons de surfeuses de haut niveau		
	Étude rétrospective sur 5 ans de 2000 à 2005 (n = 4)	Étude rétrospective sur 5 ans de 2010 à 2015 (n = 19)	Évolution en 10 ans (%)
% FCmax à SV1	86,91 (1,82)	89,45 (2,39)	+ 2,92
% FCmax à SV2	95,14 (1,43)	95,2 (0,54)	+ 0,06

Elles sont sensiblement plus hautes avec toujours un meilleur résultat à SV1 (+ 3,3% et + 2,92%) qu'à SV2 (+ 1,13% et + 0,06%).

**d) Détente verticale : évaluation de la puissance maximale anaérobie
alactique des membres inférieurs**

Tableau 14

Moyenne des détente verticales (bipodale, unipodale droite et gauche) d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et évolution en 10 ans

	Moyennes comparatives de deux échantillons de surfeurs de haut niveau		
	Étude rétrospective sur 5 ans de 2000 à 2005 (n = 36)	Étude rétrospective sur 5 ans de 2010 à 2015 (n = 48)	Évolution en 10 ans (%)
db (cm)	44,76 (7,22)	51,2 (7,08)	+ 14,38
dd (cm)	25,09 (4,34)	33,2 (5,19)	+ 32,32
dg (cm)	26,19 (5,15)	33,68 (5,57)	+ 28,59

db : détente verticale bipodale

dd : détente verticale unipodale droite

dg : détente verticale unipodale gauche

Tableau 15

Moyenne des détente verticales (bipodale, unipodale droite et gauche) d'un échantillon de surfeuses de haut niveau et évolution en 10 ans

	Moyennes comparatives de deux échantillons de surfeuses de haut niveau		
	Étude rétrospective sur 5 ans de 2000 à 2005 (n = 4)	Étude rétrospective sur 5 ans de 2010 à 2015 (n = 19)	Évolution en 10 ans (%)
db (cm)	40,13 (5,42)	42,5 (6,36)	+ 5,9
dd (cm)	23,1 (2,62)	29 (0,7)	+ 25,54
dg (cm)	24,35 (2,69)	28 (2,82)	+ 14,98

La détente verticale bipodale et unipodale a progressé dans les deux sexes. Elle augmente de 14,38% en bipodal (+ 6,44 cm) chez les hommes, et de 5,9% chez les femmes (+ 2,37 cm), témoignant d'une meilleure puissance maximale anaérobie alactique des membres inférieurs.

Les femmes ont progressé en détente unipodale droite et gauche (+ 25,54% et + 14,98%), tout comme les hommes (+ 32,32% et + 28,59%).

B) Recherche des paramètres physiologiques associés à la performance en surf

Les tests de Student et l'analyse en régression logistique univariée ont retrouvé sensiblement les mêmes résultats. J'expose dans les tableaux les deux seuils de significativité « p » correspondants. Pour plus de clarté, je ne ferai référence qu'au test de Student en reprenant les résultats dans le texte.

1. Age et caractéristiques biométriques

Tableau 16
Moyennes et test de Student et analyse statistique en régression logistique univariée : âge et caractéristiques biométriques

	Age (année)	Taille (cm)	Poids (kg)	IMC (kg/m ²)	Pourcentage de MG
Analyse principale					
Moyenne 1 (n = 42)	19,2	174,09	66,02	21,74	8,37
Moyenne 2 (n = 41)	16,17	171,51	60,26	20,94	8,22
p (Student)	0.000005	0,06	0.0004	0,07	0,78
p (Rég logKhi-2)	0.0003	0.0717	0.0013		0,79
Analyse par catégorie d'âge : 15-16 ans					
Moyenne 1 (n = 20)	15,5	170,3	58,25	20,21	7,39
Moyenne 2 (n = 21)	15,33	171,14	58,73	20,29	8,06
p (Student)	0,29	0,69	0,82	0,9	0,42
Analyse par catégorie d'âge : 17-18 ans					
Moyenne 1 (n = 11)	17,4	173,81	64,8	20,87	7,86
Moyenne 2 (n = 11)	17,54	174,27	68	22,14	8,96
p (Student)	0,53	0,85	0,21	0,11	0,11
Analyse par catégorie d'âge : 18-20 ans					
Moyenne 1 (n = 9)	18	175,88	70,36	22,42	9,04
Moyenne 2 (n = 9)	18,88	178,44	71,24	22,83	9,21
p (Student)	4,36	0,3	0,71	0,51	0,88

Les seuils de significativité tel que $p < 5\%$ sont en caractère gras.

MG : masse grasse

Moyenne 1 : Moyenne du groupe 1 (mieux classés)

Moyenne 2 : Moyenne du groupe 2 (moins bien classés)

Rég logKhi-2 : analyse statistique en régression logistique univariée

D'après les moyennes de mon analyse principale, les surfeurs de l'échantillon du groupe 1 sont plus âgés (19 ans versus 16 ans), plus grands (+ 3cm), plus lourds (+ 6kg), avec un IMC et une masse grasse comparable au groupe 2. Seules les différences de poids ($p = 0.0004$) et d'âge ($p = 0.000005$) sont significatives. L'âge est la variable la plus significative, qui influe donc le plus sur le classement.

Si on neutralise ce paramètre (analyse par catégorie d'âge), on retrouve dans le groupe 1 des trois catégories, en moyenne, des individus plus petits, plus légers, de faible IMC et plus faible masse grasse (résultats non significatifs).

2. Caractéristique physiologiques à l'effort

Tableau 17
Moyennes, test de Student et analyse statistique en régression logistique univariée pour chacun des paramètres physiologiques à l'effort

	VO2			Puissance (p/m)			% FCmax		db (cm)
	max	SV1	SV2	PMA	SV1	SV2	SV1	SV2	
Analyse principale									
Moyenne 1 (n = 42)	55,14	38,07	45,28	2,89	2,22	2,62	89,5	96,41	51,78
Moyenne 2 (n = 41)	55,44	36,18	43,72	2,77	2	2,4	87,58	94,51	45,94
p (Student)	0,82	0,08	0,1	0,03	0.0002	0.0001	0,02	0.002	0.0001
p (Rég logKhi-2)	0,82			0.04			0.03	0.005	0.0009
Analyse par catégorie d'âge : 15-16 ans									
Moyenne 1 (n = 20)	59,07	36,54	44,06	2,82	2,07	2,47	87,99	95,42	46,87
Moyenne 2 (n = 21)	53,18	35,44	42,6	2,71	1,9	2,28	87,97	94,16	44,27
p (Student)	0.002	0,46	0,2	0,09	0,01	0.005	0,98	0,18	0,15
Analyse par catégorie d'âge : 17-18 ans									
Moyenne 1 (n = 11)	57,28	38,14	45,81	2,84	2,32	2,73	90,15	96,22	53
Moyenne 2 (n = 11)	55,75	37,23	45	3	2,2	2,64	88,78	94,82	47,62
p (Student)	0,42	0,72	0,66	0,28	0,43	0,56	0,44	0,34	0,04
Analyse par catégorie d'âge : 18-20 ans									
Moyenne 1 (n = 9)	55,76	37,86	44,38	2,78	2,25	2,63	91,46	96,7	54,2
Moyenne 2 (n = 9)	52,87	37,16	45,51	2,87	2,1	2,53	87,85	96,02	48
p (Student)	0,24	0,77	0,66	0,59	0,25	0,41	0,02	0,37	0,06

db (cm) : détente bipodale, exprimée en centimètre

a) La consommation d'oxygène maximale (VO₂max) et aux seuils (SV1 et SV2)

Dans l'**analyse principale**, les moyennes de VO₂max sont quasi identiques dans les deux groupes. La variable VO₂max n'est donc pas significative. En revanche, les moyennes des VO₂ à SV1 et SV2 sont supérieures dans le groupe 1 ($p = 0,08$ et $p = 0,1$)

Par **catégorie d'âge** la VO₂max devient meilleure en moyenne dans le groupe 1 dans les trois catégories, avec un résultat significatif pour les 15-16 ans ($p = 0,002$).

Les moyennes de VO₂ aux seuils sont toujours supérieures chez les mieux classés (p non significatif).

b) La puissance maximale aérobie (PMA) et aux seuils SV1 et SV2

La puissance maximale aérobie, représentation matérialisée de la VO₂max, est significativement meilleure dans le groupe 1 en analyse principale ($p = 0,03$). Aucune différence significative n'est démontrée par catégorie d'âge. Elle est meilleure en moyenne dans le groupe 1 chez les 15-16 ans et dans le groupe 2 pour les 17-18 et 18-20 ans.

Les **puissances aux seuils** sont plus élevées quelle que soit l'analyse. On note des résultats significatifs en analyse principale à SV1 ($p = 0,0002$) et SV2 ($p = 0,0001$). De même aux deux seuils pour les 15-16 ans ($p = 0,01$ et $p = 0,005$).

c) Les pourcentages de fréquence cardiaque aux seuils SV1 et SV2

Les fréquences cardiaques à SV1 et SV2 sont significativement plus hautes dans le groupe 1 avec une plus franche différence à SV2 ($p = 0,002$), qu'à SV1 ($p = 0,02$). Les trois catégories d'âge ont des seuils plus élevés dans le groupe 1, avec un résultat significatif pour le %FCmax à SV1 chez les 18-19 ans ($p = 0,02$).

d) Détente verticale : évaluation de la puissance maximale anaérobie alactique des membres inférieurs

Parmi les paramètres physiologiques la détente verticale bipodale est le paramètre physiologique le plus déterminant ($p = 0,0001$). Quel que soit l'âge, elle est meilleure dans le groupe 1, (+ 5,5% chez les 15-16 ans, + 10% chez les 17-18 ans et + 11,5% chez les 18-20 ans), significativement chez les 17-18 ans ($p = 0,04$).

V. DISCUSSION

PARTIE I : ANALYSE CRITIQUE DES RESULTATS ET REVUE DE LA LITTERATURE

A. Age et caractéristiques biométriques

1. Analyse du profil moyen d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et de son évolution en 10 ans

La population générale française connaît une hausse de sa taille et de son poids, les femmes de notre étude suivent la même évolution, elles sont même plus grandes que la population générale (moyenne d'âge 18 ans) en 2014 (167,47 cm versus 164,9 cm dans la population générale) (55). Les hommes en revanche sont bien en dessous de la moyenne (172,64 versus 179,7 dans la population générale), et plus légers qu'il y a 10 ans. La nouvelle moyenne d'âge des surfeuses de haut niveau candidates à l'épreuve d'effort annuelle est bien moindre (- 7 ans).

Concernant l'IMC, il ne traduit pas, ou mal, la masse grasse d'un individu il n'est qu'un indicateur, et non une donnée absolue (56). En effet, même si masse corporelle et volume musculaire sont liés (57), l'IMC ne tient pas compte des proportions de masse grasse, musculaire et osseuse, cet outil est donc inadapté chez les sportifs. Du fait de leur masse musculaire, l'IMC sera surestimé pour une masse grasse faible (58).

Même si on ne peut pas l'affirmer, la diminution de la masse grasse au fil des années témoigne probablement d'une évolution anthropométrique des surfeurs de haut niveau vers une masse musculaire plus importante.

2. Données comparatives

Les sportifs étudiés (tableau 18 et 19), hommes ou femmes, sont plus jeunes que ceux des catégories de professionnels comparées, ceci traduisant un biais de recrutement de la population. Les athlètes étudiés sont scolarisés pour la plupart. Ils sont comparables pour l'âge à une étude semblable sur les surfeurs en 2012.

Les hommes sont plus petits et plus légers comparé aux surfeurs d'études antérieures et aux autres sports. Les surfeuses en revanche sont comparables en termes de poids et taille. En comparaison avec les surfeurs(es) de niveau international de 1980 on retrouve cette tendance à la diminution du taux de masse grasse.

Les surfeurs de notre étude ont une masse grasse moindre que les professionnels de triathlon. La comparaison avec les autres sports est à titre indicatif et à interpréter avec prudence, la différence d'âge influant la composition corporelle.

Les kayakistes et canoéistes sont plus grands et plus lourds avec une même tendance chez les femmes.

Tableau 18
Age et caractéristiques biométriques des surfeurs de haut niveau : données comparatives

Disciplines	Age	Taille	Poids	IMC	MG
SURF					
Surfeurs internationaux (1980) (59)	22,2	173,6	67,9	22,6	10,5
Surfeurs du classement WCT (2003) (60)	27,5	174,7			
Surfeurs du classement WCT (2013) (61)	28	177,5	73,2		
Étude au pays basque (2012) (62)	17,6	174,3	66,73		
Surfeurs de haut niveau de 2010 à 2015 *	17,55	172,6	62,4	20,83	8,05
SPORTS SOLLICITANT LES MEMBRES SUP					
Kayakistes de slalom (2007) (63)	28,1	177	71,7		
Canoéiste de slalom (2007) (63)		177	73,1		
Canoë-kayak de course en ligne (2003) (64)	27,8	184,3	85,2		
Kayak de descente de haut niveau (2001) (65)	22,1	177,9	74,2		
SPORTS SOLLICITANT LES MEMBRES INF					
Triathlon ironman (2014) (66)		177,3	75,2	23,9	8,9

* : Présente étude

SUP : supérieurs

INF : inférieurs

MG : masse grasse exprimée en pourcentage

WCT : World Championship Tour, constitue la division d'élite du championnat du monde professionnel (top 34)

Triathlon ironman : nom donné au plus grand format de la discipline

Tableau 19

Age et caractéristiques biométriques des surfeuses de haut niveau : données comparatives

Disciplines	Age	Taille	Poids	IMC	MG
SURF					
Surfeuses internationales (1980) (59)	21,6	165,7	59,3		19,5
Surfeuses du classement WCT (2003) (60)	26,7	162			
Surfeuses du classement WCT (2013) (61)	23	168,3	59,1		
Surfeuses de haut niveau de 2010 à 2015	17,68	167,4	59,38	21,16	17,4
SPORTS SOLLICITANT LES MEMBRES SUP					
Kayakistes de slalom (2007) (63)	26,3	168			
Canoéiste de slalom (2007) (63)			59		
Canoë-kayak de course en ligne (2003) (64)	26,4	170,4	67,7		
SPORTS SOLLICITANT LES MEMBRES INF					
Triathlon ironman (2014) (66)		167	59,7	21,4	18

3. Recherche des paramètres biométriques associés à la performance en surf

En analyse principale, les athlètes du groupe 1 sont significativement plus âgés plus grands et plus lourds. La masse grasse est comparable dans les deux groupes. L'âge moyen de survenue du pic de croissance est de 14 ans chez le garçon, ce pourquoi nous avons exclu les moins de 15 ans (67). Cependant, la différence d'âge avant la fin de la croissance (18 ans en moyenne) influence la taille et le poids. L'association est forte entre la différence d'âge (+ 3 ans) et le classement dans cet échantillon de surfeurs allant de 15 à 27 ans. Le seuil de significativité ($p = 0,0003$) témoigne sans doute de l'importance de l'expérience et des acquisitions physiques, techniques et stratégiques acquises au cours des années d'entraînement.

En revanche, les moyennes obtenues dans les trois catégories dont l'âge est comparable sont plus basses chez les meilleurs pour la taille, le poids, l'IMC et la masse grasse. Cette tendance corrobore l'hypothèse d'une évolution anthropométrique vers des athlètes de plus petit gabarit. L'absence de signification statistique peut être due au fait des faibles effectifs comparés.

De 2012 à 2016, 5 études (deux au Pays basque espagnol et en Australie, et une au Royaume-Unis) retrouvent une corrélation significative entre la performance et le faible pourcentage de masse grasse pour une masse et taille identique, ce qui implique une masse musculaire plus importante (62,68–71). Ce lien a été retrouvé dans d'autres sports, notamment en 2016 en stand-up paddle (72) ou encore au volley (73).

La revue bibliographique suggère qu'une faible masse grasse soit un paramètre déterminant de la performance, dépendant du volume d'entraînement et de ses aspects qualitatifs. Les niveaux d'adiposité et de musculature influenceraient le potentiel de progression entre la performance intermédiaire et le niveau professionnel en surf. Bien que non démontré dans notre étude analytique principale, l'analyse par catégorie d'âge et l'évolution du profil moyen de nos athlètes corroborent cette hypothèse.

En revanche, la recherche d'un pourcentage de masse grasse excessivement bas n'est en rien un indicateur de performance chez les sportifs (74). L'attitude de certains athlètes, consistant à « s'assécher » au maximum ne présente donc aucun intérêt dans un objectif de performance (75).

Comme il l'a été prouvé chez les avironnistes de haut niveau, l'essentiel est de travailler la VO₂max et sa capacité aérobie, et de stabiliser son poids corporel, notamment par stimulation de l'oxydation des lipides qui en résulte (76–79).

B. Caractéristiques physiologiques à l'effort

1. La consommation d'oxygène maximale (VO₂max) et aux seuils SV1 et SV2

a) Analyse du profil moyen d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et de son évolution en 10 ans

La valeur de VO₂max a franchement augmenté dans les deux sexes. Le VO₂ à SV1 a davantage progressé qu'à SV2 chez les hommes (+ 9,3%), et s'est amélioré chez les femmes (à défaut de SV2). En revanche le VO₂ à SV2 n'augmente que légèrement chez l'homme, et diminue chez la femme. Les surfeurs de haut niveau semblent avoir gagné en capacité et endurance aérobie.

b) Données comparatives

Tableau 20
Données comparatives : la VO2max

Disciplines	Age	VO2max
SURF		
Collège surfers Lowdon, Bedi and Horvath (1989) (35)	20,7	40,4
Surfeurs de haut niveau de 2000 à 2005 (80)	17,6	48,72
Mendez-Villanueva et al. 2005 surfeurs pro de niveau européen (38)	25,6	50
Loveless ans Minaham 2010 australiens pro catégorie junior (36)	18	39,5
Étude 12 surfeurs de haut niveau, Farley et al. (2012) (40)	23	44
Surfeurs de haut niveau de 2010 à 2015	17,55	53,67
Étude de 2016 sur 15 surfeurs du WCT (81)	18,8	40,71
SPORTS SOLLICITANT LES MEMBRES SUP		
Kayakistes de l'équipe de France (1991) (82)		58,1
Canoéistes de l'équipe de France (1991) (82)		52,2
Sauvetage côtier Morton and Gastin (1997) (80)	21	40,4
15 athlètes de stand-up paddle (2016) (72)		43,7
SPORTS SOLLICITANT LES MEMBRES INF		
Natation (82)		60,5
Décathlon (82)		58,1

Stand-up paddle : sport qui consiste à pagayer debout sur une grande et large planche, style surf, avec une pagaie.

Pro: niveau professionnel

Dans le tableau ci-dessus, les sportifs des disciplines qui sollicitent leurs membres supérieurs ont tous réalisé leur test d'effort avec des ergomètres pour membres supérieurs, excepté chez les nageurs (évalués sur ergocycle pour membres inférieurs).

Y sont répertoriées les évaluations antérieures de la consommation maximale d'oxygène chez les surfeurs de haut niveau (35,36,38,40,80). La moyenne de VO2max obtenue dans mon étude (53,67 ml/kg/min) leur est supérieure. Cette différence est potentiellement le témoin de la qualité physique des surfeurs français, comme en témoigne leur progression. Une observation à interpréter avec prudence dans le cadre de notre étude qui est non comparative. L'âge influence notamment le VO2max. Nous verrons dans la seconde partie de la discussion que les aspects techniques de l'épreuve d'effort différent entre les études et sont à prendre en compte dans l'interprétation des résultats.

Parmi les autres sports sollicitant les membres supérieurs, on note une supériorité des kayakistes et canoéistes. La capacité aérobie en stand-up paddle et sauvetage côtier est semblable à celles mesurées dans les études internationales des surfeurs. Concernant la natation et le décathlon, les valeurs sont supérieures mais on ne peut les comparer directement car leur épreuve d'effort sollicite les membres inférieurs.

De façon générale, le VO₂max quelque soit la discipline est toujours supérieure à celle du sédentaire (83). En 1991, Jusselin et al (82) ont fait des recueils sur 679 sportifs de haut niveau de 14 à 19 ans et comparé 13 sports. Les valeurs les plus élevées sont retrouvées dans les spécialités sportives à haute dépense énergétique aérobie (comme ici en natation et décathlon, marathon, cyclisme), et plus basse dans les sports techniques (escrime, golf).

Bien que le surf soit une discipline technique, la professionnalisation de la discipline en fait aujourd'hui un sport dont les performances physiques aérobies sont non négligeables.

c) Recherche des paramètres physiologiques associés à la performance en surf

L'analyse par catégorie d'âge retrouve une moyenne de VO₂max supérieure chez les mieux classés dans les trois catégories représentées. Les résultats sont non significatifs mais rappelons que les effectifs de l'étude sont faibles. Les consommations d'O₂ aux seuils (VO₂SV1 et VO₂SV2) sont en moyenne plus élevées quelle que soit l'analyse et la catégorie d'âge, avec une différence significative chez les 15-16 ans ($p = 0,002$).

Les résultats témoignent de l'importance d'un entraînement adapté ayant pour objectif d'élever les seuils aérobie et anaérobie.

A l'inverse, notre étude principale n'identifie pas la VO₂max comme un paramètre déterminant de la performance en surf. La moyenne du groupe 2 étant même légèrement supérieure (55,44 ml/kg/min versus 55,14 ml/kg/min). L'absence de différence de VO₂max en faveur des mieux classés peut résulter du biais de leur âge plus avancé.

La revue de la bibliographie permet d'identifier les paramètres à prendre en compte et ajustements possibles pour rendre comparables les VO₂max d'athlètes de maturités différentes.

d) Facteurs influençant l'évolution de la consommation maximale d'oxygène : âge, profil hormonal et entraînement

La capacité aérobie en valeur absolue (VO_{2max} exprimé en ml/min) augmente avec l'âge jusqu'à 18 ans (cf figure 7 graphe de gauche). Cependant, elle semble rester stable en valeur relative (rapportée au poids), son augmentation en valeur absolue est compensée par l'augmentation de la masse corporelle (graphe de droite). Diviser le VO_{2max} par le poids, comme dans notre étude, permettrait de comparer les valeurs entre des individus de différentes corpulences.

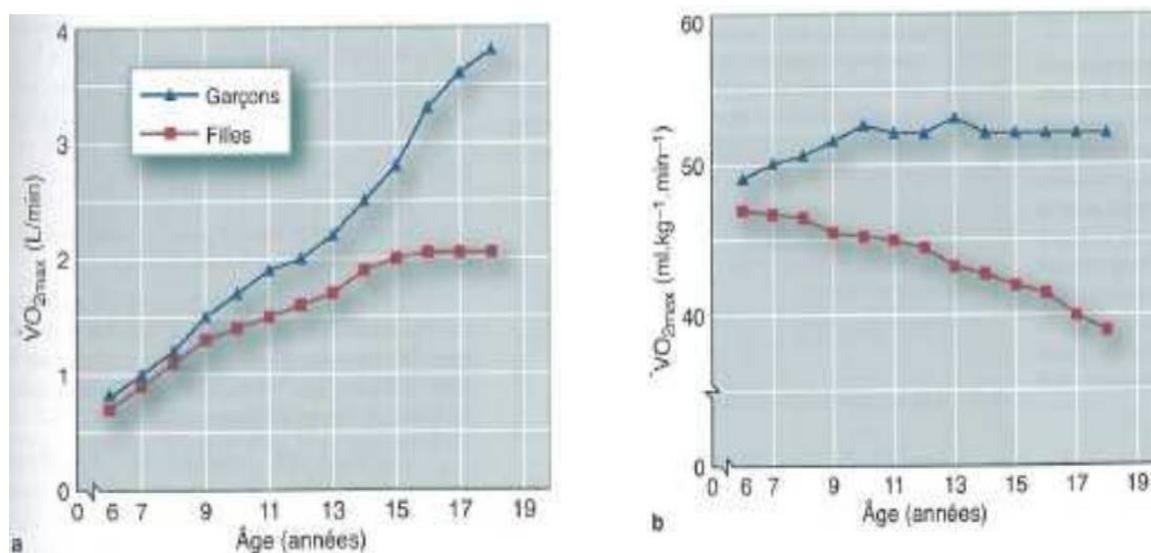


Figure 7
Évolution de VO_{2max} jusqu'à 18 ans dans les deux sexes (84)

La différence de poids n'est pas la seule responsable de résultats difficilement interprétables entre les adolescents. De nombreux paramètres physiologiques varient au cours de la puberté avec notamment une concentration de testostérone dans le sang qui s'élève du pic pubertaire (14 ans) jusqu'à 18 ans. Physiologiquement, elle favorise le développement du tissu musculaire, et diminue la masse grasse. Ces modifications hormonales et physiologiques augmentent la masse maigre qui est un paramètre déterminant de l'augmentation de la consommation maximale d'oxygène et au seuil SV2 (85).

Passé le cap des 18 ans, la capacité aérobie a tendance à décroître, d'environ 1% par an (4). Hypothèse appuyée par une étude documentaire de 62 articles où la valeur de VO_{2max} était mesurée directement sur des adultes en bonne santé aux États-Unis, au Canada, et dans 7 pays européens (86).

Chez les sportifs, exceptés les disciplines dont les possibilités énergétiques aérobie optimales ne sont atteintes qu'après plusieurs années d'entraînement (aviron, demi-fond, cyclisme), la VO₂max suit la même tendance (87). Wilmore (2017) suggère que le VO₂max peut rester stable jusqu'à l'âge de 30 ans, et ce d'autant plus que l'entraînement est intensif (20) (figure 8). Les études suggèrent que l'inactivité joue un rôle prépondérant dans la diminution de la VO₂max avec l'âge, par baisse du débit cardiaque maximal (ce qui affecte le débit sanguin destiné aux muscles actifs). Comme le montrent les études réalisées chez les sportifs versus sédentaires, l'entraînement atténue largement ces altérations.

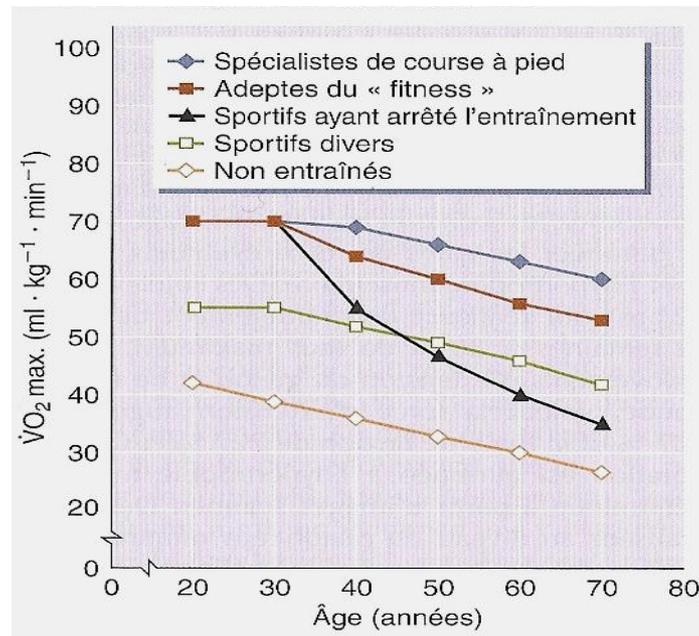


Figure 8
Évolution avec l'âge de VO₂max chez des hommes entraînés et non entraînés (20)

Notre échantillon de population regroupe-t-il des écarts d'âge trop importants pour évaluer le rapport VO₂max/performance correctement ?

On peut imaginer dans notre étude qu'une part trop importante de sujets de plus de 18 ans dans le groupe 1 en fait baisser la moyenne. En effet, leur VO₂max moyenne est inférieure par rapport aux moins de 18 ans, ils étaient 22 dans le groupe 1 contre seulement 4 dans le groupe 2 (tableau 21). Pour lever ce biais, les plus de 18 ans ont été retirés, on obtient alors une supériorité du groupe 1 avec une moyenne de 57,7 ml/kg/min contre 55,5 ml/kg/min dans le groupe 2 (p = 0,15).

Tableau 21
Analyse comparée des VO2max des plus et moins de 18 ans dans chaque groupe

	VO2max des moins de 18 ans	VO2max des plus de 18 ans
Groupe 1 (n = 42)	57,72 (n = 20)	56,72 (n = 22)
Groupe 2 (n = 41)	55,55 (n = 37)	49,76 (n = 4)
p (Student)	0,15	

Il est à noter qu'exclure uniquement les athlètes de plus de 25 ans suffit pour que la VO2 devienne meilleure dans le groupe 1 (55,7 ml/kg/min versus 55,5 ml/kg/min) (tableau 22).

Tableau 22
Analyse comparée des VO2max de plus et moins de 25 ans dans chaque groupe

	VO2max des moins de 25 ans	VO2max des plus de 25 ans
Groupe 1 (n = 42)	55,71 (n = 38)	55,32 (n = 4)
Groupe 2 (n = 41)	55,57 (n = 40)	53,3 (n = 1)

Malgré une VO2max rapportée au poids chez des sportifs entraînés, il semble que l'âge ait probablement biaisé le résultat de mon analyse principale. En ce qui concerne les VO2 aux seuils, il semble que les paramètres ne soient comparables au cours de l'adolescence que s'ils sont exprimés en pourcentage de la valeur maximale : VO2max, VO2 à SV1 et SV2 augmentent linéairement.

Bien que l'aptitude aérobie soit considérée comme un aspect fondamental dans le surf, aucune différence significative entre VO2 et classement n'a été retrouvée dans la littérature (38,87). Jusqu'en 2011 uniquement deux études ont recherché un lien entre VO2max et la performance en surf. Aucune différence significative n'a été observée, malgré des moyennes plus élevées chez les meilleurs (37,38,88).

En revanche en natation, plusieurs études retrouvent un lien entre VO2max et performance en 400m crawl (89–91). Elle apparaît également corrélée avec la performance chez les rameurs d'élite (92) (avironnistes finalistes du championnat du monde) et les kayakistes (65). On peut émettre l'hypothèse que ces derniers sports nécessitent plus d'endurance, de puissance et moins de technique si on les compare au surf. Comme en témoigne leurs de VO2max et PMA des membres supérieurs plus élevées dans les données comparatives.

2. PMA et puissance aux seuils (p/m SV1 et p/m SV2)

a) Analyse du profil moyen d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et de son évolution en 10 ans

Seule la puissance à SV1 a progressé chez l'homme (+ 5,67%). La PMA et la puissance à SV2 ont diminué dans les deux sexes. La puissance n'est pas un paramètre en progression.

b) Données comparatives

Tableau 23
Données comparatives : la PMA

Disciplines	PMA
SURF	
Surfeurs de haut niveau de 2000 à 2005 (80)	2,84
Surfeurs de haut niveau de 2010 à 2015	2,79
Surfeurs de haut niveaux, Farley et al. (2012) (40)	2,83
SPORTS SOLLICITANTS LES MEMBRES SUPERIEURS	
Kayak de descente de haut niveau (2001) (65)	3,52

La PMA est comparable à une étude récente sur les surfeurs, et plus faible que celle des kayakistes

c) Recherche des paramètres physiologiques associés à la performance en surf

La puissance maximale aérobie est significativement associée à la performance en surf dans notre étude principale. Ces résultats ne sont pas mis en évidence par catégorie d'âge. La moyenne est meilleure dans le groupe 1 chez les 15-16 ans, et paradoxalement inférieure au groupe 2 dans 2 catégories d'âge (17-18 et 18-20).

Les puissances aux seuils sont plus élevées chez les mieux classés, tout âge confondu. Les résultats sont fortement significatifs dans l'analyse principale p/m SV1 ($p = 0,0002$) et p/m SV2 ($p = 0,0001$) et à moindre mesure chez les 15-16 ans ($p = 0,01$ et $p = 0,005$).

Elle est davantage corrélée à la performance lorsqu'elle est exprimée relativement aux dimensions corporelles, comme dans notre étude (89).

Loveless and Minahan (37) ne retrouvent pas de différence significative en terme de puissance maximale aérobie entre amateurs et professionnels ($p = 0.97$). Par la suite, de 2010 à aujourd'hui, 4 études retrouvent une puissance maximale aérobie des membres supérieurs significativement supérieure dans le groupe des meilleurs (38,62,68,93). En 2012 en Australie et malgré la différence d'âge, des auteurs ont comparé deux groupes de surfeurs en fonction de leur niveau, un groupe de jeunes (14 ans) et un de seniors (24 ans). Ils en concluent que la PMA des membres supérieurs est un critère de discrimination entre les niveaux, et un paramètre important à développer à l'entraînement pour de meilleurs résultats (93). Ces résultats ont été confirmés par une étude similaire en 2013 mais avec des surfeurs appariés sur l'âge (68).

En natation, la puissance des bras est corrélée à la vitesse de nage, et donc à la performance (8). Ces études mettent en évidence que la performance en kayak en ligne est étroitement dépendante de la puissance maximale du métabolisme aérobie (65). La puissance des rameurs d'élite est également corrélée à la vitesse (94).

Au total, la PMA des membres supérieurs est un paramètre déterminant dans plusieurs disciplines, dont le surf.

3. Les pourcentages de fréquence cardiaque aux seuils SV1 et SV2

a) Analyse du profil moyen d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et de son évolution en 10 ans

Les valeurs de FC aux seuils se sont élevées en pourcentage de la FCmax. La progression est plus conséquente à SV1 (+ 2,17% de progression par rapport à SV2 chez les hommes et + 2,86% chez les femmes).

b) Données comparatives

Les paramètres physiologiques atteints au seuil ventilatoire anaérobie SV2 (% de VO₂max, % de FC et vitesse critique) sont corrélés à la performance en kayak (65).

c) Recherche des paramètres physiologiques associés à la performance en surf

Ces paramètres sont associés à la performance en surf dans notre étude principale, avec une association plus forte à SV2 qu'à SV1. Les seuils sont élevés dans les 3 catégories d'âge, avec un résultat significatif pour le %FC à SV1 chez les 18-19 ans. Puisque les fréquences cardiaques sont exprimées en pourcentage de la capacité maximale, le rapport ne semble pas varier en fonction de l'âge (85,95). Les résultats témoignent d'une élévation du seuil aérobie (SV1), mais la fréquence cardiaque atteinte au seuil SV2 semble la plus déterminante pour la performance.

4. Détente verticale : évaluation de la puissance maximale anaérobie alactique des membres inférieurs

a) Analyse du profil moyen d'un échantillon de surfeurs de haut niveau et de son évolution en 10 ans

La détente des membres inférieurs est le paramètre qui a le plus progressé, en bipodale (+ 14,38% chez les hommes et + 5,9% chez les femmes), et unipodale droit et gauche dans les deux sexes.

b) Données comparatives

Tableau 24
Données comparatives : la détente verticale

Disciplines	Détente bipodale (cm)
SURF	
Surfeurs internationaux australiens (2013) (68)	40
Surfeurs sélectionnés dans l'équipe nationale d'Australie (2015) (70)	49
Surfeurs internationaux australiens (2016) (96)	51
Surfeurs de haut niveau de 2010 à 2015	51,2
DIVERS	
Volleyeurs de haut niveau (1999) (97)	71,7
Athlètes de puissance (sprint, saut en hauteur) 1991 (98)	38,5
Athlète d'endurance (course) de 17 à 26 ans 1991(98)	32,9
Joueurs de football américain de 18 ans de niveau national (99)	38,4
22 joueurs de football de 14 à 20 ans (100)	47

La puissance maximale anaérobie alactique des membres inférieurs (PMAA) de notre échantillon est meilleure comparée aux autres études sur les surfeurs, y compris de niveau international (Australie, 2016). Elle est supérieure à d'autres sports excepté le volley, largement en tête. Les internationaux australiens semblent avoir évolué vers une détente supérieure entre 2013 et 2016 (+ 11 cm).

c) Recherche des paramètres physiologiques associés à la performance en surf

Elle représente le paramètre physiologique le plus déterminant statistiquement en analyse principale ($p = 0,0001$). La différence de hauteur atteinte est de 6 cm entre le groupe 1 et le groupe 2 (+ 13%). Elle est plus élevée quelque soit l'âge, et significativement chez les 17-18 ans ($p = 0,04$).

En 2013 les Australiens ont retrouvé une meilleure détente chez les internationaux (0.40 ± 0.07 m) par rapport aux nationaux comparables (âge, taille, poids) (0.38 ± 0.09 m) ($p = 0,5$) (68). Ils préconisent deux ans plus tard l'évaluation de ce paramètre comme critère sélectif pour intégrer l'équipe nationale ($p = 0,01$) (70). Ces résultats sont appuyés en 2016 par une étude menée par la *Gipuzkoa Surfing Association High Performance Program* ($p < 0,01$) (71).

Une étude réalisée chez les volleyeurs ne retrouve pas de corrélation entre détente et âge, qui ne serait pas dans ce cas un biais de confusion (97).

Au total, la PMAA semble corrélée à la performance en surf.

C. Synthèse

1. La biométrie

L'évolution du profil moyen, l'analyse par catégorie d'âge et la comparaison avec les autres sports suggère une morphologie type (petits, légers) chez les hommes. Cette évolution témoigne probablement d'une adaptation à l'évolution de l'activité. En effet, les critères de jugement lors des compétitions ont évolué, les manœuvres aériennes sont de plus en plus exécutées et valorisées (informations du Directeur Technique National).

Le pourcentage de masse grasse est le paramètre qui a le plus évolué, à la baisse. L'analyse statistique ne retrouve pas d'association entre la masse grasse et la performance. De nombreuses études concluent pourtant qu'il s'agit d'un paramètre déterminant.

2. Les paramètres physiologiques

Tableau 25

Analyse comparée des deux axes de l'étude : évolution du profil moyen et paramètres associés à la performance (classés par ordre croissant de significativité)

Paramètres	Évolution (%)	p (Student)
détente	+ 14,38	0.0001
p/m SV2	- 1,6	0.0001
p/m SV1	+ 5,67	0.0002
% FC SV2	+ 1,13	0.002
% FC SV1	+ 3,3	0.02
PMA	- 1,7	0.03
VO2 SV1	+ 11,9	0,08
VO2 SV2	+ 2,6	0,1
VO2max	+ 10,16	0,82

Hormis la puissance (maximale et à SV2), toutes les caractéristiques physiologiques du surfeur du haut niveau se sont améliorées. La nette progression des paramètres aérobies (VO2max, VO2 à SV1, %FCmax à SV1 et p/m SV1) témoigne d'une meilleure endurance maximale aérobie. Une progression en harmonie avec l'évolution anthropométrique, puisque c'est le travail en endurance qui augmente la sensibilité à l'insuline au niveau des adipocytes et entraîne une réduction de la masse grasse (101).

L'association est forte entre %FCmax à SV2 et performance et p/m à SV2 et performance. Or, les paramètres à SV2 ont nettement moins progressé qu'à SV1 (%FCmax et VO2), et la puissance (p/m SV2) a légèrement diminué. L'objectif de l'entraînement devra être d'élever les seuils vers des FC, VO2 et puissances supérieures, d'où l'intérêt d'un entraînement à haute intensité.

La PMA des membres supérieurs semble déterminante alors qu'elle n'a pas progressé. L'association puissance/performance est plus forte aux seuils (SV2 > SV1). Elle concerne les périodes de rame durant lesquelles le surfeur lutte contre le milieu naturel et contre ses concurrents.

Enfin, les résultats de cette étude appuyés par la revue de la littérature suggèrent qu'une PMAA des membres inférieurs performante est indispensable pour le surf de haut niveau. En effet, il s'agit du paramètre qui progresse le plus (détente verticale) et le plus fortement associé à la performance. Il reflète la puissance maximale anaérobie alactique des membres inférieurs, nécessaire pour réussir des manœuvres et figures explosives dans les portions les plus critiques des vagues comme l'exigent les critères de jugement actuel du surf professionnel.

Le Dr Dubois signalait déjà en 2005 une tendance à la corrélation entre classement et détente et classement et pourcentage de fréquence cardiaque à SV2 (80). Mon étude a permis de confirmer ces hypothèses et d'ajouter 4 paramètres potentiellement déterminants pour la performance en surf (puissances et %FCmax à SV1).

Au total l'analyse comparée des deux axes d'étude est le témoin d'une préparation physique de plus en plus présente et discriminante pour la performance en surf, et permet de donner des objectifs de progression à atteindre.

3. Particularités de l'adolescent

L'analyse par catégorie d'âge, de faible effectif, ne permet d'identifier que trois paramètres associés à la performance : VO₂max (p= 0,002), p/m SV2 (p = 0,005) et SV1 (p = 0,01), tous dans la catégorie des 15-16 ans. La moyenne des PMA est meilleure dans le groupe 1 chez les 15-16 ans, et paradoxalement inférieure au groupe 2 dans 2 catégories d'âge (17-18 et 18-20). Il s'agit probablement d'un âge où les qualités techniques sont en cours d'acquisition et le niveau dépend surtout des qualités physiques.

Même en natation, sport où les composantes techniques et physiques sont importantes, Cazorla en 1994 retrouve déjà chez les jeunes nageurs une relation entre VO₂max et performance et âge et puissance, qui n'apparaît plus chez les nageurs plus âgés (8). Ces résultats ont été confirmés par d'autres auteurs en 2003 (91). En effet, on peut penser que seules les caractéristiques physiques et physiologiques sont déterminantes à un jeune âge alors qu'ensuite interviennent les qualités techniques acquises au fil des années. La VO₂max trouverait alors sa place plus dans la détection des jeunes espoirs que dans l'évaluation des athlètes plus matures de meilleur niveau (8).

PARTIE II : ANALYSE CRITIQUE DE LA METHODE

A. Populations étudiées

La comparaison avec les valeurs d'une étude similaire réalisée il y a 10 ans doit être interprétée avec prudence car l'échantillon des athlètes n'est plus le même aujourd'hui. Il obéit cependant aux mêmes critères d'inclusion et d'exclusion.

Dans l'analyse toutes les années confondues, un surfeur peut apparaître une ou plusieurs fois. L'analyse année par année comparait chaque année deux groupes de trop faible effectif. Ceci est dû à la fluctuation des échantillons, d'une année sur l'autre, accueillant un nouveau sportif de haut niveau ou au contraire un perdu de vue. Il serait donc intéressant de mener une analyse prospective sur un échantillon stable.

En fonction de la catégorie à laquelle ils appartiennent, les écarts d'âge entre surfeurs de haut niveau sont importants, allant de 15 ans pour les athlètes du pôle France et Espoir, à 25 ans et plus pour les autres professionnels. Les sportifs étudiés ont des contenus d'entraînement différents en fonction de la catégorie à laquelle ils appartiennent. C'est pourquoi une analyse par catégorie d'âge a été réalisée, malgré les faibles effectifs.

B. Protocole de suivi des sportifs de haut niveau

1. Évaluation morphologique et fonctionnelle

a) La composition corporelle

La méthode de **référence** d'évaluation de la masse grasse est l'hydrodensitométrie (102). Le poids et le volume corporel sont déterminés par immersion complète du corps dans un liquide. Une équation permet ensuite de convertir la densité corporelle en pourcentage de masse grasse. A l'exception de contextes pathologiques particuliers, son coût et le manque de disponibilité ne permettent pas d'y avoir recours dans le suivi longitudinal des athlètes.

La méthode des **plis cutanés** a été validée par rapport aux méthodes de référence dans de nombreuses études (103,104). Les bonnes corrélations avec les méthodes de référence sont obtenues à partir de 12 ans (105,106). Une légère surestimation semble toutefois s'observer et paraît négligeable dans le cadre d'un suivi longitudinal d'athlètes (74), une des causes fréquentes repose sur une erreur de détermination du pli supra-iliaque (mesuré trop latéralement et/ou trop bas), ne répondant pas à la localisation précédemment décrite.

Le savoir faire de l'opérateur, qui doit être toujours le même, limite ce facteur de variation. L'âge, le sexe et l'origine ethnique sont d'autres facteurs de variation. L'épaisseur des plis est plus importante chez les filles et augmente avec l'âge, contrairement aux garçons (107). Quatre plis présentent des variations d'épaisseur significatives entre les deux sexes (75) : pectoral, bicipital, tricipital et abdominal. Selon l'origine ethnique, une équation spécifique est nécessaire (108). Au total, le pourcentage d'erreur est de l'ordre de +/- 3,5% (102). Quant à la pince de Harpenden®, elle est la seule à faire l'objet d'études de validation. Bien qu'onéreuse, elle ne nécessite aucune calibration secondaire ni entretien particulier. Certains auteurs insistent sur l'importance des mesures des plis aux membres inférieurs. Il semblerait exister une corrélation entre les mesures des plis de cuisse et mollet, avec la prédiction de performance chez des athlètes de course à pied, quels que soient le sexe et la distance parcourue (fond ou ½ fond) (109).

Les équations de Womersley et de Siri sont validées pour le pourcentage de masse grasse, bien que cette dernière le surestime légèrement chez des athlètes de poids léger (47). Elle est utilisée pour cette conversion avec la méthode hydrodensitométrie, considérée comme la méthode référence (102).

Pour prendre en compte la proportion de masse musculaire et de masse osseuse, il faut faire appel à une méthode d'absorptiométrie biphotonique à rayons X, aussi appelée **méthode DEXA**. (dual energy X-ray absorptiometry) (110). Comme nous l'avons vu, les chercheurs australiens utilisent ce dispositif pour étudier la composition corporelle des surfeurs (81). Il s'agit d'un balayage de l'ensemble du corps avec un faisceau de rayons X à deux niveaux d'énergie. Le rapport d'atténuation des deux rayonnements est fonction de la matière traversée permettant de séparer 3 compartiments : masse grasse, masse maigre, contenu minéral osseux.

Cette méthode présente les avantages d'être précise (marge d'erreur de l'ordre de +/- 1,8%), sensible et reproductible. Elle permet des approches régionales (bras, tronc, jambes) grâce à une faible irradiation (3 millirems). La limite réside dans le coût et la rareté des installations actuelles.

La méthode par impédancemétrie, généralement proposée sous forme de balance, doit être exclue, par manque de fiabilité. Les résultats apparaissent sous-évalués ou non reproductibles, avec des différences significatives par rapport aux méthodes de référence et à la méthode des plis cutanés (102).

Nous utilisons donc une méthode valide et accessible d'estimation du pourcentage de masse grasse.

b) La souplesse du rachis : rotation thoracique plan horizontal et amplitudes dans le plan sagittal

Dans l'action de surf, les manœuvres imposent des mouvements de rotation thoraciques majeurs dans le plan horizontal et de flexion/extension dans le plan sagittal.

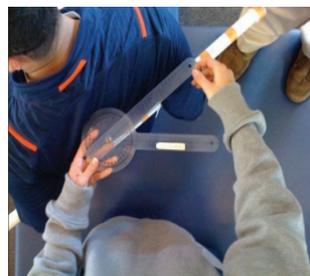
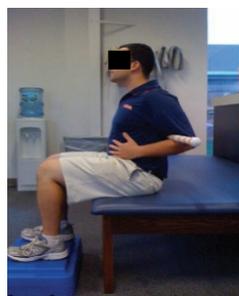
Pendant la rame le rachis thoracique est en extension (111). Pendant l'action de glisse dans le creux de la vague, le virage se fait en direction de la vague comme pour lui faire face, le rachis est en flexion (112).

Une étude australienne de 2016 démontre que la rotation thoracique est déterminante pour la performance (115). Elle est sollicitée dans certaines figures (cf photo).



Plusieurs méthodes de mesure de la **rotation thoracique dans le plan horizontal** ont été proposées (113–116).

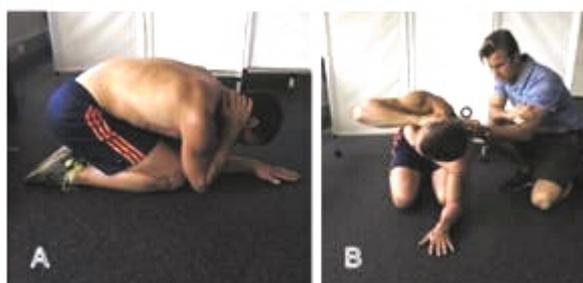
> La *Seated Rotation Technique* (113)



La position de départ : assis les genoux en flexion 90° (cf photo). On utilise un ballon entre les jambes et une barre en PVC dans le but de minimiser la contribution des mouvements des hanches et des épaules dans l'amplitude thoracique.

Les angles sont mesurés à l'aide d'un goniomètre, aligné parallèlement au sol, et positionné entre les processus épineux de T1 et T2. L'arête de la scapula est utilisée comme point de repère pendant la rotation.

> La *Lumbar-locked position* (112)



Elle été retenue en 2012 comme la méthode la plus fiable et reproductible (114). La position de départ est représentée sur la photo A. La position de la hanche fléchie aide à stabiliser l'articulation et éviter que des mouvements n'interfèrent avec le rachis. Les mesures sont faites à l'aide d'un inclinomètre placé entre les épineuses vertébrales de T1 et T2. Le sujet doit placer une main sur sa tête et tourner sa colonne vertébrale, se déplaçant dans la direction du bras levé. Il suffit ensuite de lire l'inclinomètre lorsque le mouvement s'arrête.

Pour la mesure de l'**amplitude thoracique dans le plan sagittal**, une étude australienne récente (2016) valide une nouvelle méthode (112). La souplesse rachidienne est mesurée à l'aide d'un mètre à ruban standard, et d'un HALO, un nouveau dispositif numérique qui enregistre l'amplitude thoracique à l'aide d'aimants (cf photos).



La souplesse du rachis dans le plan horizontal ou sagittal n'est pas évaluée à ce jour chez nos athlètes, seule la souplesse de toute la chaîne postérieure est évaluée par la distance doigt sol.

2) Technique employée pour l'épreuve d'effort maximale progressive

La notion de « consommation maximale d'oxygène » (VO_{2max}) a été définie pour la première fois par Hill et Lupton (1923) dans les années 1920. Sa mesure se fait depuis longtemps (1924 pour l'aviron) dans les sports où l'on pense plus ou moins justement qu'elle est un facteur limitant de la performance (83). C'est en particulier le cas des disciplines telles que la course à pied (demi-fond et fond), du ski de fond, du cyclisme et de l'aviron. Mais aujourd'hui, la quantité d'entraînement exigée pour atteindre et se maintenir au plus haut niveau impose aux disciplines à l'aspect technique plus ou moins prédominant (sports collectifs, tennis, golf, voile, tir, sports mécaniques, surf) une préparation physique générale de plus en plus importante. C'est pourquoi les entraîneurs de toutes les disciplines, soucieux de programmer la préparation de leurs athlètes, demandent que soit mesurée régulièrement la VO_{2max} des athlètes.

a) Un protocole triangulaire

Les protocoles employés peuvent être à intensité constante (rectangulaires, figure de droite) ou progressivement croissante (triangulaires, figure de gauche).

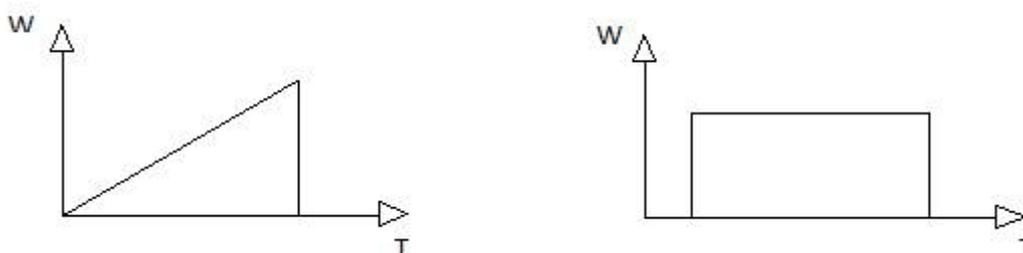


Figure 9

Les protocoles d'épreuve d'effort, représentation schématisée de l'incrémentement de la charge de travail (W) en fonction du temps (T)

Le choix du test dépendra du ou des objectifs fixés. Le test doit être triangulaire pour évaluer la composante aérobie, comme en laboratoire, avec un effort durant lequel la puissance augmente par paliers d'une valeur fixe pendant des périodes données.

Pour tendre à un état métabolique stable à chaque palier, elle doit répondre à certains critères :

- la durée de l'exercice doit être adaptée (si les paliers sont trop courts, le système anaérobie sera sollicité et la PMA sera surestimée ; s'ils sont trop longs, on s'expose au risque d'épuisement musculaire chez l'athlète et les paramètres seront alors sous-estimés),
- l'augmentation de l'intensité doit être progressive, avec une vitesse suffisante au premier palier,
- la durée totale d'effort doit être suffisante mais n'excédant pas plus de 20 minutes.

Ce test commence généralement avec une période de repos (pour les comparaisons avec les périodes d'effort) puis un échauffement, et s'achève par une période de récupération. L'épreuve se poursuit jusqu'à épuisement du sujet. On obtient alors directement la VO₂max au moment où le sujet atteint sa limite.

A contrario, lors d'un protocole rectangulaire, la puissance d'effort augmente brusquement et ne marque qu'un seul palier. A titre d'exemple, le plus populaire est le test de Cooper (1968). Il établit un diagnostic initial (test de masse utilisé dans l'armée) par un test de course continu et maximal, qui consiste à pratiquer la plus grande distance en 12 minutes. Il n'évalue pas, ou mal, la capacité aérobie.

Notre protocole est donc adapté à nos objectifs d'évaluation.

b) Intérêt de la mesure de VO₂max

Bien que non encore prouvé dans le surf, l'intérêt de la détermination de VO₂max est justifié par les relations très étroites entre ce paramètre et les performances dans diverses activités sportives (117). Ce paramètre correspondant aux limites de transport de l'oxygène par le système cardiovasculaire, et de son utilisation par les cellules musculaires (4). Il s'agit d'un critère d'aptitude aux exercices de longue durée.

Rappelons que pour comparer les résultats entre athlètes au cours de l'adolescence, il est recommandé d'exprimer les valeurs de VO₂ aux seuils en pourcentage de VO₂max. La comparaison inter-individuelles de VO₂max n'est possible que lorsqu'elle est rapportée au poids, car proportionnelle à la surface corporelle (ml/kg/min) (118).

Il semble cependant que la VO₂max ne présente que peu d'intérêt dans le suivi de l'entraînement pour évaluer la progression d'un athlète (83). En effet, l'évolution de la VO₂max et l'endurance aérobie en réponse à l'entraînement n'est pas toujours parallèle, et peut même se dissocier totalement (119). En 1987, Montpetit et coll. constatent déjà chez les nageurs de l'équipe de France que la VO₂max augmente pendant la première période d'entraînement puis se stabilise en plateau (à l'issue de 6 à 8 semaines), même si l'entraînement s'intensifie, parallèlement à une amélioration de la performance. Celle-ci serait donc due à l'évolution d'autres facteurs (8). Les mêmes constatations ont été rapportées chez des coureurs à pied et des cyclistes.

c) Identification des seuils ventilatoires aérobie (SV1) et anaérobie (SV2)

1) Intérêt

Nous avons identifié dans notre étude que les puissances et fréquences cardiaques aux seuils étaient corrélées à la performance. Notre analyse retrouve par ailleurs des valeurs de VO₂ aux seuils plus élevées chez les meilleurs. Pour une comparaison inter-individuelle, les paramètres aérobie et anaérobie semblent plus discriminants que les valeurs maximales. De plus, la comparaison des résultats obtenus en laboratoire et sur le terrain, a montré l'intérêt de la détermination du seuil anaérobie SV2 pour mieux appréhender l'aptitude physique en précisant la capacité d'endurance (85,120,121). Pour individualiser l'entraînement, les fréquences cardiaques à SV1 et SV2 vont s'avérer un outil de choix (85,122).

La détermination des seuils est précieuse tant pour évaluer la performance que pour moduler l'entraînement. La technique pour y parvenir a évolué au fil des années.

2) Modalités de mesure

Initialement, le seuil anaérobie est déterminé par le dosage direct du lactate sanguin : c'est le seuil lactique (123). Mais l'analyse critique de cette méthode a révélé ses limites. En effet, la signification même de la lactatémie ne représente qu'un équilibre instantané entre le débit d'apparition et le débit de disparition du lactate dans le sang. Les concentrations sanguines ne donnent qu'un reflet incomplet de la production cellulaire, d'autant plus que le lactate est réutilisé par l'organisme (14). De plus, le nombre de techniques susceptibles de le déterminer (au total 34 répertoriées par Léger et Tokmakidis en 1988) remet en question sa fidélité interne (1).

Même en sélectionnant (arbitrairement) une des techniques, le seuil lactique peut varier en fonction de paramètres propres à chacun (nature de l'entraînement, régime alimentaire...), et ne permet pas les comparaisons inter-individuelles. La mesure de la lactatémie est coûteuse, impose des précautions méthodologiques autant pour la santé de l'athlète et de l'entraîneur (manipulation de sang) que pour la validité des résultats trouvés. En conclusion, trop d'incertitudes subsistent encore pour pouvoir accorder au concept de seuil aérobie-anaérobie une signification physiologique certaine par la détermination d'un seuil à partir de la mesure de la lactatémie. Les limites de cette mesure ont fait très tôt rechercher d'autres moyens d'investigation.

Les approches expérimentales de Hollmann en 1959 puis surtout de Wasserman en 1973 (53) déterminent en premier les seuils par l'étude des échanges respiratoires et métaboliques au cours d'exercices d'intensité progressivement croissante (123). En 1984, il définit le seuil anaérobie comme : « Le point auquel survient l'acidose métabolique associée à des modifications des échanges gazeux et pulmonaires lors d'un exercice progressif ». Il met en relation les courbes de lactatémie et fréquence cardiaque avec celle des échanges gazeux et relève 2 points d'inflexion communs :

- > lactatémie 2 mmol/l correspondant au seuil ventilatoire aérobie (atteint à 60% VO₂max)
- > lactatémie 4 mmol/l correspondant au seuil ventilatoire anaérobie (atteinte à 80% VO₂max)

Ainsi, la mesure des seuils ventilatoires semble plus fiable que les seuils lactiques (124). Aujourd'hui, nous n'utilisons que l'étude des échanges gazeux respiratoires au cours de l'épreuve d'effort progressive.

3) Calculer les fractions utilisées des réserves (Fur)

Pour aller plus loin, en 2002, D. Laplaud et R. Menier, médecins du sport au centre régional de Limoges, étudient l'utilité de calculer les fractions utilisées des réserves (Fur) de fréquence cardiaque (fc), puissance et VO₂ à SV1 et SV2 (119).

Des exemples d'équation sont présentés ci-dessous :

$$Fur_{fc\ SV1} = \frac{fc\ SV1 - fc\ repos}{fc\ max - fc\ repos} \qquad Fur_{VO2\ SV2} = \frac{VO2\ SV2 - VO2\ repos}{VO2max - VO2\ repos}$$

Leur souci est de rendre plus informatif le suivi longitudinal du sportif, particulièrement dans l'appréciation du retentissement de l'entraînement sur l'endurance aérobie. Il en ressort que les fractions utilisées des réserves (de fréquence cardiaque de puissance maximale atteinte et de VO₂) fournissent des indices submaximaux d'endurance aérobie. Les Fur à SV1 apparaissent comme d'excellents indicateurs d'endurance aérobie et de son évolution sur quelques années. Les Fur à SV2 apparaissent, lors du suivi longitudinal d'un sportif tout au long de la saison, comme des indicateurs de variation de l'endurance aérobie en réponse à l'entraînement sur quelques mois, permettant de réévaluer le sportif au cours d'une saison sportive.

d) Intérêt d'une épreuve d'effort aérobie sollicitant les membres supérieurs

Les mesures physiologiques ne sont prises qu'au moyen d'ergomètre non spécifique comme le cycloergomètre pour membres inférieurs (vélo) et le tapis roulant jusqu'en 1974. Charbonnier s'intéressa alors à la consommation maximale d'oxygène sur cycloergomètre pour membres supérieurs utilisé chez les nageurs (53). En laboratoire, il a été démontré que le sportif est plus à l'aise sur l'ergomètre le plus spécifique possible de son geste habituel (83). Plusieurs études démontrent que la VO₂max est spécifique à la discipline pratiquée (125). Le sportif effectue alors un geste habituel et l'effort n'est pas interrompu prématurément par une fatigue musculaire locale due à la réalisation d'un geste inhabituel.

Chez les surfeurs, plusieurs dispositifs ont été utilisés dans la bibliographie, sollicitant toujours les membres supérieurs. Pour évaluer la puissance maximale aérobie pendant l'effort de rame en surf, les études ont validé l'ergocycle pour membres supérieurs, qui reproduit un « pédalage de bras » (35), c'est le dispositif que nous utilisons.

Les paramètres physiologiques à l'effort dépendent de la masse musculaire (126). La masse de l'un des membres supérieurs (bras + avant bras + main) représente environ 5,6%. Par contre, la masse de l'un des membres inférieurs (cuisse + jambe + pied) représente entre 15,7 à 17,6% du poids corporel. La faible masse musculaire mise en jeu dans un exercice avec les membres supérieurs pourrait constituer un facteur limitatif de la VO₂max.

Cependant, chez les sportifs qui développent le haut du corps, il semble que la VO₂max des membres supérieurs puisse atteindre la VO₂max des membres inférieurs. Jusselin et coll. (1990) retrouvent des résultats identiques quelque soit l'ergomètre utilisé (83). Il en est ainsi chez des rameurs ayant passé dans la même semaine l'épreuve sur ergomètre d'aviron, sur tapis roulant et sur bicyclette. Le même constat est fait, ce qui est surprenant chez les kayakistes hommes, entre un pédalage de bras et une course à pied sur tapis roulant (82).

Pour les nageurs, le niveau de corrélation entre les VO₂ obtenus en piscine ou sur ergocycle (vélo) est bon, avec toutefois une supériorité des valeurs de VO₂ lors d'un test de natation par rapport aux valeurs sur ergocycle. Cela est dû à l'aspect spécifique du test de natation (127,128).

Le matériel le plus adapté tachera de se rapprocher de la spécificité du geste, sans que l'évaluation ne soit sous estimée. Il ne serait pas inintéressant de comparer aujourd'hui en surf, la VO₂max des membres supérieurs obtenue avec le protocole actuel versus ergocycle pour membres inférieurs ou tapis roulant.

e) Notre ergomètre est-il le plus spécifique ?

Les études récentes utilisent un ergomètre en décubitus ventral pour ramer avec les bras contre résistance « swimbench ergometers », ou en français ergomètre de kayak modifié. Pour plus de réalisme, les australiens utilisent aujourd'hui un swimbench surmonté d'une planche de surf (40) (figure 10).

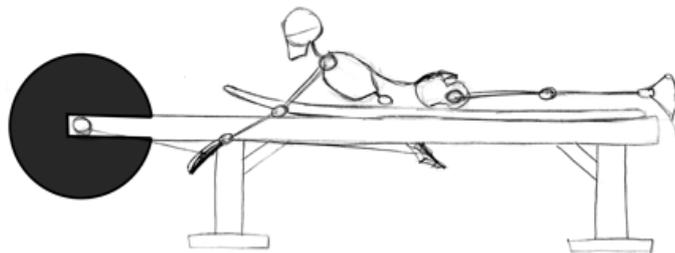


Figure 10
Ergomètre de kayak modifié (40)

Il semble qu'il soit le plus spécifique appareil disponible pour évaluer les qualités aérobies des membres supérieurs des surfeurs. Validé par plusieurs auteurs, il se rapproche au mieux de la pratique en simulant au plus près l'effort de rame (36). Il permet de calculer la distance parcourue et les vitesses. La différence avec notre protocole porte sur la position horizontale du corps, représente-t-elle un facteur limitant de la capacité aérobique ?

f) Influence de la position horizontale du corps

La VO₂max et la fréquence cardiaque obtenues lors d'épreuve d'effort semble diminuées en position horizontale par rapport à assis ou debout (38). En effet, la position en décubitus ventral modifie le recrutement musculaire et altère les paramètres hémodynamiques à l'effort (38). Au niveau respiratoire, la position horizontale crée des troubles de la ventilation mixte. Lors d'épreuves fonctionnelles respiratoires en décubitus ventral, un syndrome restrictif (diminution significative de la capacité vitale forcée (CVF) ($p < 0,05$)) et obstructif modéré sont objectivés (diminution des débits expiratoires maximaux entre 25 et 75% de la CVF (DEM25-75) ($p < 0,05$) et du volume expiré maximal en une seconde (VEMS) ($p < 0,05$)) (80). Ces résultats témoignaient de la réduction du volume pulmonaire et du calibre bronchique en position de rame.

La comparaison avec les autres études d'évaluation des surfeurs est délicate étant donné que les populations étudiées sont différentes. Cependant, les contraintes physiologiques induites par la position peuvent en partie expliquer la supériorité de la valeur de VO₂max de notre étude (obtenue en position assise, première ligne du tableau 26) par rapport aux autres (réalisée en décubitus ventral). Même s'il ne colle pas tout à fait avec les contraintes de la pratique, notre protocole a l'avantage d'éviter ces facteurs de limitation de la performance.

Tableau 26
VO₂max en fonction des outils de mesure

	Age	Tests	VO ₂ max
Surfeurs de haut niveau de 2010 à 2015	17,55	Ergocycle	53,67
Mendez-Villanueva et al. 2005 pro de niveau européen (38)	25,6	swimbench	50
Loveless and Minaham 2010 pro australiens catégorie junior (37)	18	swimbench	39,5
Surfeurs de haut niveau, Farley et al. (2012) (33)	23	swimbench	44
Étude de 2016 sur 15 surfeurs pro du WCT (81)	18,8	swimbench	40,7

3. La puissance maximale anaérobie alactique (PMAA)

a) Protocole utilisé

La haute fiabilité du test de détente des membres inférieurs a été démontrée dans d'autres sports (129,130). Le choix du saut vertical en guise d'évaluation de la puissance maximale anaérobie semble corrélé dans les études aux résultats obtenus à l'épreuve de charge vitesse sur ergocycle ($p < 0,01$) (57). Cette méthode valide et facile d'apprentissage correspond à celle utilisée à l'international : le countermovement jump (CMJ) (figure 11). Le squat jump (SJ) (consistant à sauter avec pour position de départ une flexion des genoux) (131,132), ainsi que l'isometric midhighpull (IMTP) (133,134) (tirage vertical contre résistance d'une barre fixe placée au niveau des cuisses) ont également été reconnus méthode valide d'évaluation pour la puissance des membres inférieurs. Nuzzo et al (2008) (135) et Secomb et al (2015) (136) retrouvent un bon niveau de corrélation entre ces trois tests. Ils sont combinés dans les études récentes pour apprécier la puissance des membres inférieurs, et considérés comme une batterie de tests valide et reproductible (133,134). En 2011, Sheppard et al. retiennent le dynamic-strength-deficit ratio (puissance mesurée au CMJ/puissance mesurée à l'IMTP) comme un marqueur sensible aux changements de performance après 3 mois d'entraînement (130).

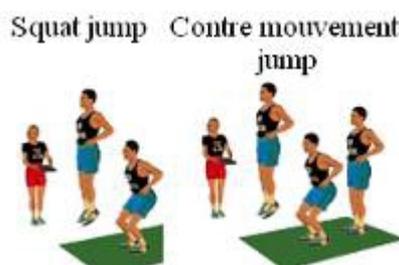


Figure 11
Illustration des tests de détente verticale (137)

Notre méthode d'évaluation de la puissance maximale anaérobie alactique des membres inférieurs est donc valide, et utile d'autant plus qu'elle semble être le facteur le plus déterminant pour la performance en surf. Sa réévaluation au cours de la saison sportive pour juger de l'efficacité de l'entraînement serait informative.

b) La détermination de la puissance maximale anaérobie des membres supérieurs

La puissance de haute intensité produite sur peu de temps par les membres supérieurs simule les accélérations à la rame pour prendre une vague et avoir une position idéale pour la surfer (36). Dans leur pratique les surfeurs l'utilisent aussi pour rejoindre le large le plus vite possible, sachant que le premier arrivé a la priorité sur les autres compétiteurs (31,32,38). On peut imaginer que la capacité à prendre le maximum de vagues en une session puisse être un argument pour discriminer les meilleurs. Tandis que les nageurs d'élite ou les kayakistes ont été largement évalués (138), une seule étude a évalué ce paramètre chez les surfeurs jusqu'en 2010 (36). Les résultats retrouvent d'ailleurs une puissance plus élevée chez les surfeurs que les nageurs de compétition et les maîtres nageurs sauveteurs (128).

En 2010, le swimbench est validé pour évaluer la puissance maximale anaérobie des membres supérieurs à la rame sur sprint de 10 mètres, versus le même test en piscine (36). Cette méthode d'évaluation de la puissance à la rame des membres supérieurs existe déjà chez les nageurs d'élite avec un haut niveau de corrélation entre les performances à la nage (vitesse) et les résultats obtenus avec le swimbench (Johnson et al., 1993; Loveless & Minahan, 2010; Morton & Gastin, 1997; Rohrs et al., 1990; Sharp et al., 1982). Il semble un outil fiable pour évaluer la rame à haute intensité.

En 2012, une première étude australienne retrouve une association forte entre la PMAA des membres supérieurs (évaluer par un test de traction) et la vitesse de rame sur 5, 10 et 15 mètres (en piscine). Les mêmes auteurs reconduisent ensuite l'étude comparant un groupe de juniors (14 ans) et seniors (24 ans) et aboutissent aux mêmes résultats (93,139).

En 2013, Sheppard et al. ont comparé les caractéristiques physiologiques de deux groupes de surfeurs, 22 de niveau international et 22 de niveau national (16 ans de moyenne d'âge) (68). Les vitesses atteintes au sprint à la rame sur 5, 10 et 15 mètres en piscine sont significativement meilleures dans le groupe international ($p = 0,03$). Il en est de même en 2015, au cours d'une étude menée par Tran et al. sur les surfeurs australiens juniors sélectionnés ou non pour intégrer l'équipe nationale (70).

En 2012 une équipe de chercheurs néo zélandais ont retrouvé une corrélation significative entre le classement des surfeurs en compétition et la puissance développée lors de sprints de 10 secondes sur ergomètre (40). Les australiens en 2016 reprennent ce protocole sur un test de 30 secondes, les résultats sont meilleurs chez les surfeurs professionnels qu'amateurs, suggérant qu'il s'agit d'un paramètre déterminant pour la pratique (88).

Au terme de la revue de la littérature, on suppose que les vitesses de rame en sprint sur de courtes distances (5, 10 et 15m), obtenues sur ergomètre type swim bench ou en piscine, sont des méthodes valides d'évaluation de la PMAA des membres supérieurs, un facteur déterminant de la performance en surf.

Au sein de notre fédération française en 2000, un test de terrain a évalué la rame à intensité maximale sur 10 mètres avec mesure de la vitesse atteinte. Voué à une utilisation interne (comparaison inter-individuelle), il n'a pas été reconduit par la suite. Lors des tests de laboratoire un test de PMAA membres supérieurs a été inclus puis abandonné, la position de départ était à l'horizontale comme pour effectuer des « pompes », avec pour but de décoller les mains du tapis le plus longtemps possible (équivalent d'un test de détente des membres supérieurs).

Au total, les perspectives d'avenir suggèrent :

- d'intégrer l'évaluation de la PMAA des membres supérieurs dans notre batterie de tests annuels chez les surfeurs du pôle France. Dans un premier temps, nous pouvons proposer un protocole sur l'ergocycle à bras actuel (pédalage d'emblée maximal sur 10 secondes, par exemple). L'association avec la performance pourrait être recherchée chez les surfeurs français.
- de tenir compte de l'importance de ce paramètre dans le contenu de l'entraînement.

C. Le critère de jugement principal : le classement fédéral national

Le classement fédéral national doit refléter leur niveau de performance. Des modifications ont été apportées en 2012, dans le but d'être plus représentatif. Le classement subissait des fluctuations importantes en cours d'année et des solutions ont été proposées pour « lisser » les résultats (cf annexe 7).

D. L'analyse statistique

Il s'agit d'une analyse rétrospective des données physiologiques annuelles des surfeurs de haut niveau. Une étude prospective d'un lot de surfeurs en suivant leur progression année par année permettrait d'analyser plus précisément quels paramètres sont susceptibles d'influencer le classement sur une période annuelle.

PARTIE III : PERSPECTIVES ET ENJEUX

A. Schéma d'entraînement actuel des surfeurs du pôle France et pôle Espoir

La préparation physique du pôle France fait appel aujourd'hui à 3 intervenants, l'entraîneur de la Fédération Française de Surf (FFS) pour l'entraînement en surf, un coach sportif (professeur de boxe de formation) pour la préparation physique et un professeur de natation de Biarritz pour les exercices en piscines. Dans chacun de ces domaines, le planning d'entraînement alterne 4 blocs sur la saison (de novembre à avril) (cf annexe 10).

Le développement à dominante aérobie (6 semaines) :

- 50% en surf : séances longues de 30 min à 1h, intensité d'effort à 70-80% de la PMA,
- 50% sur terrain sec : 1 footing de 45 min par semaine, gainage, exercices de coordination, renforcement musculaire, circuit training.

Le développement à dominante force et vitesse (10 semaines) :

- 60% de surf et 40% d'entraînement au sol (travail technique et exercices de haute intensité) pendant 6 semaines,
- puis mêmes objectifs mais avec 80% de surf et le travail des points individuels pendant 4 semaines.

La préparation à l'effort de compétition (8 semaines) :

- 80% de surf : intensités proches de la compétition,
- 20% de préparation physique : force et explosivité en salle, avec entretien de l'endurance par un footing par semaine.

La préparation terminale concerne les mois de mai juin et juillet, le volume de travail est réduit et l'agenda des compétitions chargé :

- l'entraînement de surf se concentre sur l'investissement de compétition et le travail des points forts,
- la préparation physique combine étirements, récupération, hygiène de vie et musculation stato-dynamique (combinant un effort statique puis dynamique dans le but d'améliorer l'explosivité).

Les cours de natation n'obéissent pas, pour l'instant, à ce rythme et ces objectifs précis. Il s'agit d'une initiative récente d'un professeur de natation à Biarritz, en accord avec l'entraîneur de la FFS. Depuis 4 ans, les surfeurs du pôle vont nager une fois par semaine à la piscine de Biarritz, de novembre à mars. L'entraînement de natation pur rectifie leurs défauts sur plusieurs types de nage, et reste orienté surf avec des exercices de rame sur planche. Pour se rapprocher de l'effort, ils font des séries de 100 mètres de nage à vitesse modérée entrecoupées de sprint sur 25 mètres.

Quelque soit l'entraînement, les objectifs de performance à atteindre ne sont pas mesurés mais évalués « au juger » par les entraîneurs, sans support de mesure. Ils n'utilisent pas les données des tests d'effort au cours de l'entraînement. Une dichotomie existe entre la précision des programmes établis et la pratique. Les entraînements en surf sont classés par intensité de 1 à 5 en fonction du pourcentage de PMA atteinte (cf annexe 11). On peut se demander si les intensités supposées atteintes à l'entraînement le sont réellement.

Pour apporter de la précision, nous allons proposer des outils pour monitorer l'entraînement : les fréquences cardiaques obtenues au test de laboratoire et la vitesse maximale aérobie.

B. Proposition d'un test de terrain pour la détermination de la vitesse maximale aérobie (VMA) et vitesses aux seuils SV1 et SV2

Les métabolismes physiologiques à l'effort peuvent être évalués indirectement par des tests de terrain, qui prennent en compte également qualités biomécaniques, neuromusculaires et physiologiques. Plutôt que de ne soumettre les surfeurs qu'aux exigences de laboratoire, nous proposons une évaluation plus proche des contraintes de la pratique. L'analyse de la discipline a mis en évidence la prédominance de l'effort de rame dans ce sport à composante aérobie. Pour comprendre le choix du protocole que nous proposons, il est utile de connaître les méthodes passées et existantes pour évaluer les nageurs et les surfeurs, quels sont leurs avantages et inconvénients.

1. Revue de la littérature, les tests de terrain

Les épreuves progressives de course apparaissent en France en premier, en 1982, permettant d'évaluer sur le terrain la *puissance maximale aérobie et fonctionnelle (produit de la PMA et du rendement mécanique aérobie (RMA))* et d'extrapoler la VO₂max (15). Nous ne nous intéresserons qu'aux tests de terrain concernant les nageurs et les surfeurs, ces deux sports aérobie qui sollicitent les membres supérieurs.

**a) De la détermination directe de VO₂max à la nage à celle de la VMA :
évaluation scientifique en natation sportive**

1) Mesure directe de la VO₂max à la nage

Compte tenu des déplacements dans l'eau, David L. Costill précise que l' « on ne peut utiliser des tests de course sur tapis roulant pour mesurer la consommation maximale d'oxygène du nageur ». Cazorla précise que s'il s'agit de connaître la capacité aérobie spécifique du nageur, seule la mesure directe de VO₂ au cours de la nage devrait être utilisée (8). Pour obtenir la consommation maximale d'oxygène du sujet à l'effort, il faut mesurer les volumes d'air inspiré et expiré recueillis dans des sacs de Douglas et en analyser les contenus. Les sacs de Douglas sont des sacs imperméables d'une contenance d'une centaine de litres (Douglas, 1911) (140). La mesure des volumes des gaz inspirés ou expirés se fait ensuite à l'aide d'un gazomètre comme celui de Tissot (1904). La teneur des gaz expirés en oxygène et en gaz carbonique est réalisée au moyen d'analyseur automatique. Divers protocoles ont existé, des années 1970 à 1980.

La **nage sur place contre des charges** de plus en plus lourdes à maintenir soulevées à une même hauteur a été le premier à voir le jour en 1965 (Costill) (8). Le nageur est attaché par une ceinture à une corde reliée à un système de poulie à l'extrémité de laquelle un certain nombre de poids est attaché (figure 12). Le nageur doit se maintenir sur place alors que des charges de plus en plus lourdes sont ajoutées périodiquement au cours du test. Bien que plus approprié que les tests sur tapis ou vélo, la turbulence engendrée par les mouvements des bras et des jambes en restant stationnaire perturbe l'efficacité de la nage (Cazorla et coll. 1994) (8). L'augmentation de la charge d'exercice a pour effet de redresser anormalement la position du nageur (127).

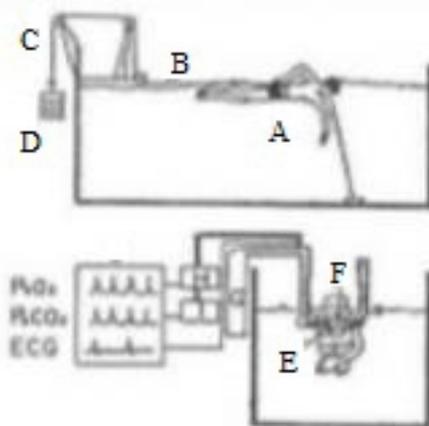


Figure 12

Technique d'évaluation physiologique du nageur à partir de la nage sur place contre des charges à maintenir élevées (A : ceinture, B : corde, C : poulie, D : charges additionnelles, E : valve à deux voies, F : pince-nez, G : sac de Douglas, J : graphe d'enregistrement)

En 1972, la nage est évaluée **sur place contre un flux** progressivement accéléré dans un bassin expérimental adapté (Astrand et Englesson, 1972) (8). Le nageur doit lutter contre un mouvement d'eau progressivement accéléré pour rester sur place (figure 13). L'inaccessibilité du bassin à courant d'eau continu rend difficile l'utilisation de ce protocole (équipement sophistiqué et coûteux).

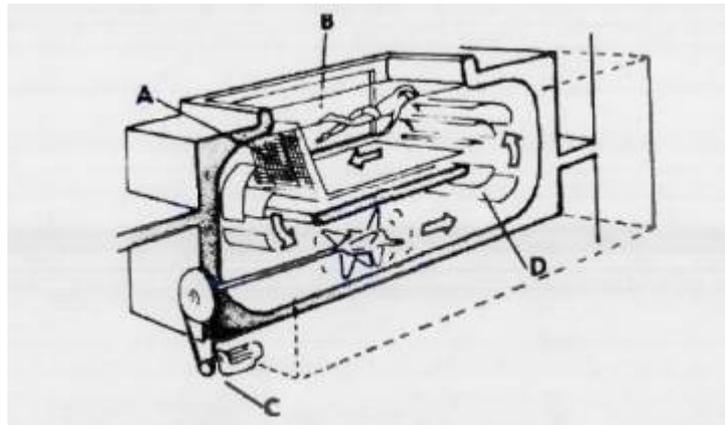
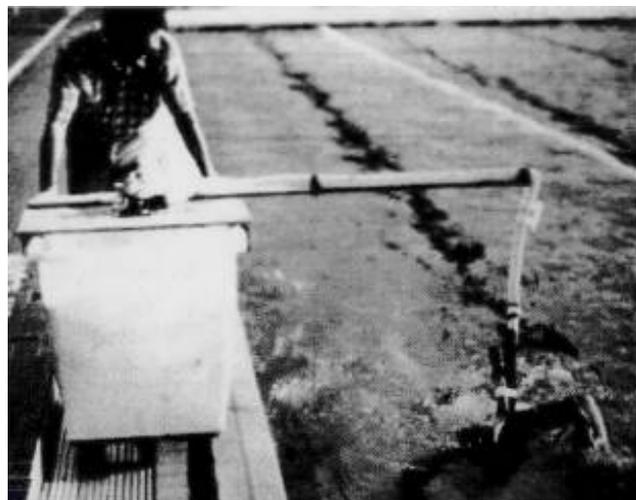


Figure 13
Bassin expérimental à courant d'eau continu et à vitesse modulable (Astrand et Englesson, 1972)

La nage **libre avec déplacement en piscine** normale a été testée par plusieurs auteurs (Mc Ardle et coll. 1971, Magel et Faulkner 1967, Montpetit et coll. 1981, Cazorla et coll 1982). Les gaz expirés sont recueillis grâce à un système aménagé pour suivre le nageur tout au long de son déplacement, monté sur un chariot et déplacé par un technicien (cf photo). Le chariot doit être facilement manipulable par les expérimentateurs et sans gêne pour les nageurs (141).



Les vitesses de nage obtenues (seul élément utile pour l'entraîneur) dans ces 3 tests sont toujours inférieures à celles réalisées sans appareillages. Le dispositif de recueil des gaz expirés est lourd et susceptible de modifier la technique de nage, il empêche potentiellement d'exprimer tout le potentiel aérobie (141). Plusieurs études ont notamment relaté une altération de la performance due à ce dispositif lors d'un 400 mètres nage libre (8). L'usage d'un masque naso-buccal pour la mesure des gaz inspirés et expirés n'autorise pas le plongeon ou les demi-tours culbutés, et fait perdre de l'efficacité aux nageurs (Lavoie et Léger, 1985) (141).

Dans les années 1990, les nageurs sont munis d'un appareil de mesure des gaz inspirés et expirés d'encombrement réduit, portatif et étanche (K4b2®) (figure 14). Il permet d'enregistrer en continu la VO₂ sur le terrain. Ce dispositif est moins accessible et son coût est élevé (140).

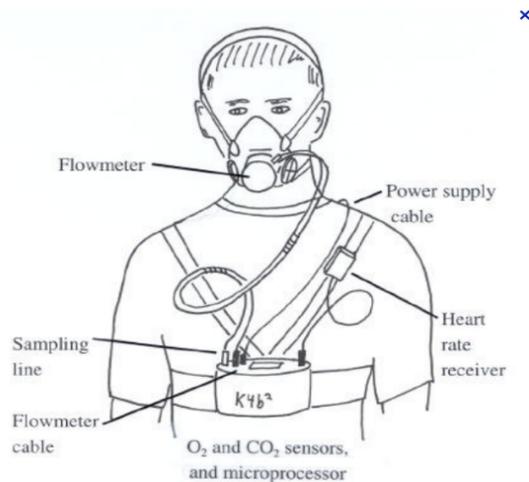


Figure 14
Dispositif portatif de mesure de VO₂max : le K4b2®

Avant son apparition et afin de libérer le nageur des contraintes de l'appareillage, les auteurs utilisent deux techniques de mesures indirectes, qui n'interfèrent pas sur la technique de nage.

2) Mesure indirecte lors de tests intermittents

L'analyse des gaz est effectuée en début de récupération :

- **par rétro-extrapolation de la courbe de décroissance de VO₂ après une épreuve triangulaire.** Citons pour exemple le test progressif de navette à paliers multiples en natation de Lavoie et Léger en 1985 (141). Il a été validé en juin 2015 dans le contexte actuel à l'université du Québec (127) et repris en Australie pour évaluer les joueurs de water-polo. Les athlètes nagent en continu entre deux cordes situées à 10 mètres d'intervalle. Une série de signaux sonores donnent le rythme. Ils nagent sur des paliers de 2 min à une vitesse prédéterminée suivis d'une minute de repos. La collecte des gaz a eu lieu immédiatement à l'arrêt de l'effort pendant 30 secondes dans des sacs de Douglas, les 30 secondes restantes de la minute de repos servaient à se replacer à l'extrémité du bassin la plus proche pour reprendre l'effort sur le palier suivant. Le test était constitué de 3 à 4 paliers d'effort d'une durée de 2 minutes chacun. La dernière navette achevée est convertie en mètre et la vitesse maximale aérobie (VMA) est ainsi calculée. Le participant est arrêté aussitôt qu'on remarque qu'il n'est plus capable de nager à la vitesse imposée par la bande sonore.
- **par mesure de VO₂ obtenue dans les 15 secondes immédiatement après 100 mètres de nage à vitesse maximale,** la consommation d'oxygène se maintenant quelques secondes au même débit maximal que pendant l'épreuve (Cazorla et coll, 1984) (142).

Ces protocoles de mesures sont imprécis, le premier dépend de l'atteinte ou non de la VMA au dernier palier, le deuxième dépend des cinétiques individuelles des échanges gazeux post exercice. Les tests de terrain déterminants la VMA sont plus simples d'utilisation, reproductibles, et permettent la détermination des vitesses aux seuils (8).

3) La vitesse maximale aérobie (VMA)

A la consommation d'oxygène maximale (VO₂max) correspond une vitesse maximale aérobie et une puissance maximale aérobie. Tandis que les cyclistes utiliseront la PMA (mesurée à l'aide d'un capteur de puissance), les coureurs à pied, nageurs et rameurs préféreront la VMA. La VMA semble corrélée à la PMA et à VO₂max (7), notamment en natation, où elle permet de définir les intensités d'exercice (Léger 2013) (8). Sa mesure ne remplace pas celle de la VO₂max, elle autorise son extrapolation avec une marge d'erreur liée à l'économie de course, qui selon les individus peut varier entre +/-5% (7).

> Définition

La VMA dépend de multiples interactions biomécaniques et physiologiques. Les facteurs déterminants sont soit modifiables par l'entraînement (la VO₂max et l'endurance aérobie), ou relèvent d'ajustements internes propres à chacun comme l'économie de nage (ou de rame) et la motivation (7). L'économie de nage (ou rendement mécanique) traduit l'efficacité technique du geste. En surf, s'ajoute la composante matérielle (en fonction de la planche) et environnementale (en fonction du plan d'eau).

Pour connaître la capacité aérobie spécifique du nageur et situer les vitesses les plus utiles pour gérer le contenu de son entraînement, on peut utiliser des tests triangulaires de nage pour déterminer la VMA accompagnés de l'enregistrement de la fréquence cardiaque. Les tests suivants peuvent se faire avec ou sans mesure de la VO₂max avec le dispositif portatif K4k2® précédemment décrit. De nombreux tests de terrain initialement conçus pour la course à pied ont été adaptés à la natation.

> Les tests triangulaires progressifs

On distingue les épreuves continues et intermittentes.

● Épreuves continues

Le test de Lavoie (1985) (141)

Le départ se fait dans l'eau, le sujet nage à allure progressive, la vitesse augmente de 0,050 m/s par paliers de 2 minutes. L'allure est donnée au nageur par un observateur marchant le long du bassin à la vitesse à laquelle le sujet doit nager. Il arrive un moment où le sujet ne parvient plus à suivre l'observateur. On estime que la vitesse au dernier palier franchi correspond à la VMA du nageur.

Le VAMeval NAGE (Cazorla, 1993) (7)

Il s'agit d'un test progressif de nage en crawl, avec augmentation de la vitesse par palier d'une minute, partant d'une vitesse de 1 m/s. La vitesse atteinte au dernier palier correspond à la VMA.

• Épreuves intermittentes

Le test des 5 x 200 progressifs (127)

Le sportif nage à allure progressive sur 5 x 200 mètres chronométrés. La récupération entre chaque 200 mètres est de 1 minute passive. Le nageur ne repart donc pas à sa fréquence cardiaque de repos ; celle-ci va donc augmenter progressivement tout au long du test. C'est le temps réalisé sur la dernière répétition qui donnera la VMA du nageur. Ce test s'adresse au nageur capable de réguler son allure, ayant une certaine expérience de leur pratique et non à des débutants en matière d'entraînement.

Le TUB2 (université Bordeaux 2) appliqué à la natation (Cazorla 1992) (7,14)

Chaque palier dure 3 minutes à vitesse progressivement accélérée. Une récupération entre les paliers (une minute) permet la mesure de la FC et éventuellement de la lactatémie. Il explore la VMA et les vitesses intermédiaires correspondant aux seuils aérobie et anaérobies.

> Les tests rectangulaires

Le test de 5 minutes (127)

Il est demandé au sujet de nager pendant 5 minutes la plus grande distance possible. On estime que la vitesse moyenne enregistrée sur ce test correspond à la VMA du nageur. Ce test repose sur la valeur moyenne du temps de soutien de la VMA, qui varie d'un individu à l'autre.

Le test rectangulaire du 400 mètres (127)

Il est le même que le protocole utilisé par les australiens pour évaluer les surfeurs à la rame sur planche (68). Il est demandé au sujet de nager un 400 mètres chrono départ plongé. On déduit les temps du premier et du huitième 50 mètres ; pour obtenir la VMA, on calcule la vitesse moyenne des six 50 mètres restants. Si le temps de nage est trop élevé (débutants) l'épreuve sera nagée à vitesse inférieure de la VMA et s'il est trop court (confirmés) l'épreuve sera nagée à vitesse supérieure.

Le test de 12 mètres nages libre (Jackson et coll 1979), inspiré du test de Cooper (1968) (7)

Cette épreuve non progressive permet de comparer les nageurs entre eux, mais ne donne aucune information déterminante pour les vitesses d'entraînement.

b) Les tests de terrain en surf

1) Le dispositif ergosurf

Le dispositif rappelle celui de la natation (nage contre des charges). Le sujet rame sur place, sa planche est attachée à un système de poulies au bout duquel une charge est suspendue, commençant à 2 kg et augmentant d'1 kg par minute. La VO₂ et la FC_{max} ont pu être recueillies, et comparées aux résultats obtenus avec un test sur tapis roulant et une épreuve avec un ergocycle pour les membres supérieurs. Le protocole ne permet pas d'obtenir la VMA (143).

2) Protocole intermittent 45/15

En 1998, Nicolas Berthé (cadre technique national de la FFS) compare plusieurs tests d'effort maximal aérobie spécifique au surf pour établir une valeur référence de la VMA (143). Le test retenu était triangulaire, de type intermittent 45/15, progressif et maximal, en ligne droite inspiré du 45-15 de Gacon (15).

Chaque palier est constitué d'une séquence de rame de 45 secondes suivie d'une pause de 15 secondes. La vitesse initiale est fixée à 1 m/s, et l'incrément de 0,05 m/s pour une durée totale de 10 à 14 minutes. Le sportif est arrêté lorsqu'il ne peut plus couvrir entièrement la distance imposée dans le palier. La plus grande vitesse atteinte sur le dernier palier entièrement complété constitue la vitesse de référence pour servir de calibrage à l'élaboration des charges aérobies intermittentes, que l'on qualifie de VMA_{int 45-15}.

3) Études internationales récentes

Les données de la littérature sont peu nombreuses pour ce qui est de la détermination de la VMA chez les surfeurs. Les études récentes sont effectuées en Australie. Chaque année, des sélections ont lieu pour déterminer quels surfeurs feront partie de l'équipe nationale. Dans cette optique plusieurs études ont recherché à établir une batterie de tests valides pour les discriminer, à savoir des tests évaluant les paramètres déterminants pour la performance. Les tests effectués permettraient à chaque entraîneur d'évaluer ses sportifs, de connaître les qualités physiques à améliorer et de quantifier leur progression sur une période donnée. Mais la propriété est accordée aux tests de sprint qui évaluent la puissance maximale anaérobie. En 2010, la validité d'un test de sprint de 10 secondes à la rame en piscine (13,5 m/s) a été prouvée pour la mesure de la puissance maximale anaérobie (36).

En 2013 la rame est évaluée en endurance sur 400m, et en sprint sur 5, 10 et 15 mètres (68). Le test a eu lieu dans une piscine extérieure de 25 mètres. Les sujets utilisent leur propre planche de compétition. Ils portent un transmetteur de position attaché sur leur dos, qui relève le temps tous les 0.02m de déplacement, et déterminent les chrono des sprints 5 10 et 15m, et par déduction la vitesse maximale au sprint. Pour l'endurance, ils font des allers-retours dans la piscine sur 400m, la moyenne des vitesses est calculée.

Ces test ne sont pas maximaux progressifs, ils n'évaluent pas la VMA. Le premier évalue la vitesse maximale anaérobie. Le dernier calcule une vitesse moyenne sur 400 mètres (test rectangulaire), il peut sous estimer ou sur estimer la VMA présumée atteinte et impose le biais du demi-tour.

2. Intérêt de la détermination de la VMA

L'enjeu est de connaître pour chacun les vitesses de rame sollicitant les différents métabolismes (vitesses aux seuils SV1 et SV2), afin de déboucher sur un entraînement personnalisé. Elle donne les intensités et vitesses à envisager dans les séances d'entraînement en fonction des objectifs. Il existe un parallèle entre pourcentage de VMA et répercussions physiologiques (15).

Ainsi, on pourra ajuster individuellement les vitesses de rame de chaque athlète, permettant le meilleur développement de leur capacité aérobie et suivre l'évolution de leur endurance : c'est la planification de l'entraînement individuel.

La progression pourra être objectivée au cours de la saison si la fréquence cardiaque devient moins élevée pour une même vitesse. La VO₂max évolue peu au cours de la saison, contrairement à la VMA, qui pourra ainsi être réévaluée par des tests de terrain au cours de l'année (50). La connaissance de la VMA peut renforcer la motivation de l'athlète pour atteindre ou dépasser la performance cible.

3. VMA et performance

La performance dans un exercice de longue durée dépend de la vitesse maximale aérobie et de l'endurance (Flandrois R. et Monod D, 2003) (144). En kayak, la VMA et la vitesse atteinte à SV2 sont corrélées à la performance (65). En 2005, lors d'un test de terrain élaboré par les médecins fédéraux français, la vitesse de rame à SV2 montre également une tendance à la corrélation (mesurée à 5,2 m/s en moyenne) (80).

Lors de leur protocole sur 400 mètres en 2013, les australiens retrouvent une vitesse moyenne en endurance à la rame sur une distance de 400 mètres ($p = 0,05$) plus élevée chez les meilleurs (68) (1,17 et 1,11 m/s). Les résultats sont les mêmes en 2015 chez les juniors (1,25 et 1,21 m/s) (70).

4. Mise au point d'un test d'effort maximal progressif spécifique au surf

a) Les critères d'un test de terrain

Au terme de cette revue de la littérature, on peut en déduire les critères sur lesquels juger un test de terrain.

1) Une épreuve triangulaire

Le test qui prétend explorer la filière aérobie et amener le sujet à obtenir sa VO_{2max} (et ainsi sa PMA ou VMA) devra être une épreuve triangulaire (14). La VMA varie en fonction du test utilisé. Plus l'augmentation de la vitesse des paliers est brutale et de courte durée, plus la VMA a des chances d'être surestimée. Dans ce cas, une part importante de la VMA est liée à la production anaérobie d'énergie. A l'inverse, plus la durée du protocole est importante, plus elle risque d'être sous-estimée probablement à cause des effets de la fatigue qui limitent la poursuite de l'exercice. Il existe donc autant de VMA qu'il existe de protocoles censés l'obtenir.

Au total, les critères à respecter pour évaluer la capacité aérobie sont (Cazorla, 1990) (15) :

- une durée totale d'effort suffisante,
- un effort progressif,
- une fréquence cardiaque finale élevée,
- une vitesse suffisante au premier palier,
- une durée des paliers évitant l'épuisement musculaire.

2) La pertinence

Elle est dictée par l'objectif d'obtenir une VMA de référence ainsi que les vitesses obtenues à SV1 et SV2 pour mieux orienter les intensités et durées lors des exercices de rame et proposer un suivi.

3) La validité

Pour vérifier la validité d'un test de terrain, il faut calculer le niveau de corrélation entre le facteur mesuré et le résultat obtenu, seul moyen d'avoir la preuve expérimentale que le test mesure effectivement ce qu'il est censé évaluer.

4) La fidélité

Le niveau de fidélité d'un test est défini par les résultats obtenus par les mêmes sujets passant deux fois le même test à peu de jours d'intervalle. Le test est dit fidèle lorsque les résultats entre 1er et 2e test restent stables. Remarquons cependant que le niveau de fidélité interne (propre au sujet) peut varier entre deux tests lorsque l'évalué découvre le test pour la première fois. En conséquence, il est donc recommandé de n'enregistrer que les meilleurs résultats (souvent obtenus au 2e test). Il est difficile en pratique de reconvoquer les surfeurs du pôle France en raison de leur emploi du temps chargé.

5) L'accessibilité

Les tests les plus accessibles sont ceux dont le protocole exige peu de compétence particulière et de matériel, dont la durée est la plus réduite possible, qui autorise une évaluation collective et ne nécessite que peu d'évaluateurs. Le protocole que nous proposons peut être jugé accessible dans la mesure où sa durée est courte, le schéma simple de compréhension, et nécessite peu de matériel.

b) Notre protocole

Le test que nous proposons est triangulaire, progressif et maximal, avec un effort durant lequel la vitesse augmente par paliers d'une valeur fixe pendant des périodes données, soit un incrément de puissance correspondant à 30 watts par paliers de 3 minutes, comme défini par le consensus de la Société française de médecine du sport du 3 avril 2001 (49).

Les fréquences cardiaques (maximale, à SV1 et SV2) recueillies au cours des épreuves d'effort en laboratoire serviront de référence pour évaluer le surfeur sur le terrain, lors de l'effort de rame en milieu aquatique, en déterminant la vitesse maximale aérobie, et les vitesses de déplacement aux seuils SV1 et SV2.

Nous proposons de réactualiser un test de terrain de la fédération française de surf, mené et réfléchi par Jean Didier Lafitte, médecin fédéral (1998). Il a été malheureusement abandonné, et les données non utilisées pour adapter l'entraînement.

1) Environnement

Température de l'eau (Costill, 1968), résistance de l'eau à l'avancement (Consilman 1955), et position horizontale du corps (Holmer, 1974 ; Pendergast et coll. 1977) sont autant de facteurs environnementaux qui donnent plus fluctuantes les données recueillies en milieu aquatique que sur terrain sec (127). La VMA pouvant varier en fonction des contraintes naturelles, notre choix s'est porté sur le lac de St Pée sur Nivelle. Il s'agit d'un plan d'eau calme et en eau douce (lac) qui évite le biais des courants et assure le bon fonctionnement des cardiofréquencemètres. Alors que les conditions environnementales dans l'océan (vagues, courants) fluctuent, ici le test sera donc reproductible d'une évaluation à l'autre.

2) Matériel

> Parcours de rame

Nous voudrions mettre en place un parcours de rame, représenté par une ligne d'eau de 50m, fragmenté à l'aide de balises en 5 parcelles de 10m.

B1-----B2-----B3-----B4-----B5-----B6

Afin d'éviter le biais du demi-tour, les intervalles chronométrés seront ceux entre B2 et B5 (en rouge), pour ne pas laisser au rameur de temps de récupération ou de ralentissement, et garder un effort maximal progressif. Le mieux serait de disposer d'une cellule photo électrique pour chronométrer les distances avec précisions.

> Conditionnement des sujets

Nous avons choisi volontairement une planche assez volumineuse pour une meilleure flottabilité, de façon à ce que le surfeur soit le plus au sec possible dans un souci d'étanchéité des cardiofréquencemètres fournis. Pour la comparabilité des résultats, la même planche sera utilisée à chaque test. Les athlètes seront munis d'un cardiofréquencemètre type, avec ceinture émettrice et

montre, celle-ci sera fixée sur l'avant de la planche, pour une visualisation continue de leur FC au cours du test. Ainsi nous pourrons enregistrer leur FC au long de l'exercice.

3) Déroulement

Deux examinateurs, équipés d'un chronomètre et d'un sifflet, seront postés à chaque extrémité de la ligne d'eau, en regard des intervalles retenus pour les mesures. Il s'agit d'un circuit continu autour de la ligne d'eau matérialisée, au cours duquel les examinateurs donnent des consignes aux athlètes, de façon à ce qu'ils atteignent, en fonction des paliers, leur fréquence cardiaque cible (SV1, SV2 et max) déterminées lors des épreuves de laboratoire. Un échauffement à la rame de 3 minutes amènera les rameurs à leur FC d'échauffement, qui est propre à chacun.

- T0 début de l'échauffement
- T3 ramer 3 minutes à la FC SV1
- T6 ramer 3 minutes à la FC SV2
- T9 ramer 1 minute à FCmax
- T10 fin

A la fin du 1er palier (T6) lorsque la FC à SV1 est atteinte, nous mesurerons le temps nécessaire pour parcourir la distance de 10 mètres entre les deux prochaines bouées rencontrées ; puis même opération au 2e palier (T9), lorsque la FC à SV2 sera atteinte, à la fin du 3e palier (T10) où la FCmax sera atteinte. Le test s'achève par une récupération active de 3 minutes.

Parmi cette revue bibliographique, seul ce test de terrain est maximal progressif continu et susceptible de déterminer la VMA à la rame en surf.

4) Analyse des données

Le temps nécessaire pour parcourir la distance de 10 mètres entre chaque paliers sera converti en mètre/seconde, et déterminera la VMA et les vitesses aux seuils SV1 et SV2.

5) Le coût métabolique

Qu'il s'agisse de la nage ou de la rame, la vitesse va dépendre des caractéristiques physiologiques mais aussi biomécaniques et techniques. En natation on parle de l'économie de nage, c'est à dire le coût métabolique (CM) nécessaire pour se déplacer à une vitesse donnée sur un parcours donné (8). En natation il est un important facteur de performance, influencé par les caractéristiques morphologiques et techniques (89). Les études ont montré que meilleur est le nageur et plus bas est son coût énergétique.

En surf, on parlera de technique de rame dans le rapport VMA/performance, elle marque la différence avec les épreuves d'effort sur ergocycle à bras. La relation entre VMA, VO₂ et CM est la suivante : $VMA = VO_{2max}/CM$.

Pour augmenter la VMA, il faut donc soit augmenter la VO₂max soit diminuer le CM (travail technique). Le CM est le premier facteur limitant de la VMA. En cas de progrès constatés, toute la difficulté pour l'entraîneur réside ensuite dans la capacité à déterminer s'ils sont dus à une réelle augmentation de la VMA du nageur ou à une diminution du coût énergétique de sa nage, c'est à dire une amélioration de la technique. Si un test de terrain n'est pas accompagné d'une mesure de VO₂max, on ne peut pas savoir si les variations de VMA sont dues au coût énergétique ou à la VO₂max (145).

C. L'entraînement, applications pratiques

Le surf évolue dans un environnement dynamique aux conditions fluctuantes (38) auxquelles les surfeurs doivent s'adapter pour maintenir un haut niveau de performance (146). En d'autres termes, puissance, force, endurance, contrôle postural et la capacité à s'adapter aux conditions pendant les compétitions sont importantes (38). Notre but est de rationaliser l'entraînement actuel du pôle France, en y apportant des données scientifiques. La gestion de l'effort et la connaissance de ses capacités sont des conditions essentielles à la réussite.

1. Les modalités de contrôle de l'entraînement sur le terrain

Pour appliquer les résultats des tests d'effort à la conduite de l'entraînement sur le terrain, il est nécessaire de déterminer des moyens de contrôle afin de situer l'intensité des exercices.

a) Les moyens de suivi au cours de l'exercice physique

L'échelle de perception de l'effort selon Foster et al (2001), adopte la formule « comment était l'exercice » en demandant à l'athlète ses impressions subjectives. La difficulté de la tâche tend à accroître la sensation d'effort à intensité objective équivalente (147). Elle dépend des déterminants psychologiques.

La mesure de VO₂max semble pertinente pour le suivi de l'effort. Elle s'effectue au moyen de sac de Douglas ou du K4kb, donc peu accessible.

Ces 2 méthodes peuvent être avantageusement remplacées par l'utilisation d'autres indicateurs comme la fréquence cardiaque.

Le pourcentage de fréquence cardiaque maximale (FCmax relevée à l'occasion du test en laboratoire) permet d'évaluer individuellement les intensités d'exercice. Son évolution au cours de l'effort va dépendre de l'entraînement du sujet, et de son état psychologique. Elle ne permet pas de comparaison inter-individuelle, et n'est pas atteinte à chaque entraînement (18).

Sachant que la fréquence cardiaque varie entre les individus, le mieux serait de prendre en compte la **fréquence cardiaque de réserve** (FCr). Elle correspond à la différence entre la FCmax et la FC de repos. En calculant son pourcentage on peut alors comparer les individus dont les FC (max et au repos) diffèrent (18).

$$\%FC \text{ réserve} = \frac{FC \text{ moyenne enregistrée} - FC \text{ repos} \times 100}{FC_{\text{max}} - FC \text{ repos}}$$

FC_{max} - FC repos

La VMA constitue une référence pour prévoir les intensités : infra maximales (en dessous de la VMA), maximales (correspondant à la VMA) et supra maximales (au-dessus de la VMA). Ces intensités s'expriment en pourcentages de VMA (15). Les vitesses de rame aux seuils SV1 et SV2, si connues grâce à un test de terrain, pourront être des repères utiles pour l'entraînement en conditions réelles ou en piscine. Elle permet de calculer une distance à parcourir pour un temps de travail donné.

A ce jour, pour une approche physiologique, la méthode la plus accessible pour gérer la charge d'entraînement est celle qui utilise l'évolution des fréquences cardiaques (148). Elle permet de monitorer l'intensité de l'activité en cours et nous informe sur les adaptations du corps aux procédés d'entraînement (149). Grâce à la connaissance des fréquences cardiaques cibles pour chaque sujet (maximale, à SV1 et SV2), le travail devient précis et orienté vers le développement d'une aptitude physique recherchée. A l'aide d'un cardiofréquencemètre, on peut ainsi établir des plages d'entraînement personnalisées.

Il serait intéressant d'évaluer les exercices de l'entraînement actuel avec cardiofréquencemètre pour savoir si oui ou non, les seuils prétendument atteints le sont réellement. Le pôle France possède à ce jour des cardiofréquencemètres et nous les encourageons à les utiliser lors de leurs entraînements, sur dur ou en piscine, avec une perspective d'investissement dans du matériel fiable en eau salée.

b) Les aspects techniques du cardiofréquencemètre

Actuellement, aucun cardiofréquencemètre n'est fiable en immersion eau salée, les signaux étant atténués (33) ce qui n'empêche pas son utilisation au cours de leur entraînement sur terrain sec, voir en piscine. S'ajoute à cette difficulté la gêne occasionnée par l'électrode thoracique en décubitus ventral. La surveillance de la fréquence cardiaque tant à l'entraînement qu'en compétition doit se faire dans des conditions rigoureuses d'utilisation. L'enregistrement des courbes sur imprimante permet en outre l'analyse à posteriori du travail effectué.

2. Le contenu

a) Utilisation des fréquences cardiaques et vitesses maximales et aux seuils SV1 et SV2 pour monitorer l'entraînement.

L'évolution des paramètres respiratoires, corrélée avec les courbes des fréquences cardiaques et de la VO₂, ont permis de caractériser les deux seuils lors de l'épreuve en laboratoire, en terme de puissance, de fréquence cardiaque, et de consommation d'O₂. L'ensemble des applications à l'entraînement va résulter de l'identification des seuils SV1 et SV2.

1) Objectif

Comme en témoigne les résultats de notre étude, les meilleurs sont ceux pour qui les pourcentages de VO₂, puissance et FC aux seuils se rapprochent du maximum (tableau 27). Les résultats les plus significatifs de puissance et FC portent sur les valeurs atteintes à SV2. D'où l'intérêt d'avoir pour objectif de travail d'élever les seuils (particulièrement SV2) vers des valeurs supérieures.

Si on exprime en moyenne les VO₂ aux seuils de mon échantillon (groupe 1 et 2 confondus) en pourcentage de VO₂max on obtient :

- un seuil aérobie SV1 atteint entre 65 et 69% de VO₂max,
- un seuil anaérobie SV2 atteint entre 79 et 82% de VO₂max.

Tableau 27

Rappel des résultats des consommations d'oxygène, puissance et fréquences cardiaque aux seuil aérobie et anaérobie, exprimés en pourcentage des valeurs maximales.

	VO ₂ (%VO ₂ max)		Puissances (%PMA)		FC (%FCmax)	
	SV1	SV2	SV1	SV2	SV1	SV2
Moyenne 1 (n = 42)	69%	82,00%	77,00%	91,00%	89,50%	96,41%
Moyenne 2 (n = 41)	65,00%	79,00%	72,00%	87,00%	87,58%	94,51%
p Student	0,08	0,1	0.0002	0.0001	0,02	0.002

2) Quelles intensités d'exercice pour quels objectifs ?

Selon les modifications physiologiques consécutives à l'entraînement et en fonction de l'intensité de l'exercice, on pourra travailler différentes filières. Le tableau 28 replace les seuils moyens de notre échantillon et présente les types d'exercices préconisés en fonction des objectifs de progression (Cazorla et Léger, 1993 ; Pradet et le collectif Insep, 1998 ; Billat, 2003).

Tableau 28

Les types d'exercices en intensité et en durée en fonction des objectifs et des seuils.

Seuils de notre échantillon	Intensité d'exercice (en % de VO ₂ max)	Type	Objectifs de progression et modifications physiologiques
	60	Footing de plus d'une heure (5)	Endurance fondamentale (4): capillarité musculaire, lipolyse privilégiée (retard à l'accumulation de l'acide lactique), épargne du glycogène, augmentation du VES, baisse de la FC de repos
SV1 : 65-69 % de VO ₂ max soit 87-90% de FCmax			
	70-85	Footing de 45 min (4,5)	Entretien de la condition physique, capacité aérobie, endurance, augmentation des concentrations mitochondriales et enzymatiques (150–152)
SV2 : 79-82 % de VO ₂ max soit 94-97% de FCmax			
	80-90	Série d'exercices entre 30 sec et 2 min (4,13)	Capacité et puissance aérobie et anaérobie (4,5,7,13,153), endurance (154), hausse des enzymes glycolytiques et du stock de glycogène, accumulation d'acide lactique, optimisation du VO ₂ max (18,155–157)
	> 90	Exercices intermittents court-court 15/15 et 30/30 (4,5,7,13)	
	supra-maximal	Exercices bref entre 3 et 5 secondes (4,5,13)	Capacité et puissance alactique (5,19)

D'après la revue bibliographique, la majorité de l'effort en surf porte sur des activités d'intensités moyennes (60% du temps entre 56 et 74% de FCmax, pour une fc moyenne à 74% de FCmax) qui intéressent la filière **aérobie**, en particulier pendant la phase majoritaire de rame (48% du temps total) durant laquelle la distance parcourue est d'environ 957 mètres et qui sollicite une fc moyenne de 143 bpm (80% de FCmax) (31,32,33,158). D'après Lowdon en 1989, l'aptitude aérobie est importante pour les longues périodes de rame (35). Elle permet d'avoir une récupération optimale entre chaque vague et chaque série de compétition (de 20 à 30 minutes plusieurs fois dans la journée) (30). Nous avons vu les bénéfices métaboliques et cardio-respiratoires de l'entraînement aérobie. Pour développer une filière de manière efficace, il faut travailler en puissance et en capacité (Pradet 1996).

La **capacité** représente la quantité totale d'énergie susceptible d'être fournie par voie oxydative (15). Elle dépend des réserves de substrats utilisables et de la totalité d'O₂ utilisé pour leur combustion. L'objectif de l'entraînement va être de maintenir le plus longtemps possible un certain pourcentage de VMA, ou d'augmenter sa vitesse pour une même durée d'exercice (15). La performance atteinte peut entrer dans le suivi de l'entraînement (8). Le travail s'effectue par l'intermédiaire de footing lents (endurance fondamentale à 50 à 70% de la VMA), rapides (70-85% de la VMA) ou d'exercices intermittents.

La **puissance** maximale aérobie (PMA), atteinte à VO₂max, est la quantité maximale d'oxygène qu'un organisme peut utiliser par unité de temps au cours d'un exercice musculaire intense et d'une durée égale ou supérieure à trois minutes. L'entraînement cherche à augmenter la VMA et la VO₂max grâce à des exercices courts à haute intensité (90-120% de VO₂max).

La capacité aérobie présente un intérêt majeur dans l'ensemble des disciplines sportives (83). Les tests de terrain en natation (Cazorla, 1994) montrent l'importance de la développer tant au niveau de la performance que pour pouvoir supporter des entraînements de durées et intensités élevées et récupérer plus rapidement, en développant un bon transport et une bonne utilisation cellulaire de l'oxygène.

Physiologiquement, rappelons qu'elle reflète la capacité à prendre en charge les déchets métaboliques de la contraction musculaire (capillarisation), l'accumulation d'acide lactique sera retardée et la production d'ATP optimisée (Costill et Wilmore, 2006 ; Billat 2012) (4,20). Le travail en endurance stimule la lipolyse, entraînant une forte production énergétique, une épargne du glycogène et une baisse de la masse grasse (101), paramètre déterminant dans plusieurs études (62,68-71).

La capacité aérobie a une limite supérieure : le seuil anaérobie. Elle reflète donc la contribution de la filière anaérobie dans la production d'énergie. Ainsi, le **seuil anaérobie** est un bon témoin de la capacité de performance en endurance aérobie se rapprochant du VO_{2max} (Laursen et coll., 2003 ; Meyer et coll, 2005) (157,160). Une programmation correcte de l'entraînement qui doit aboutir à un déplacement de la zone transitionnelle vers la VO_{2max} , doit améliorer la capacité aérobie. Plus le seuil de FC à SV2 est proche de FC_{max} , plus la production d'acide lactique et la sensation d'épuisement seront retardés. La capacité d'endurance ne dépend pas uniquement d'une VO_{2max} élevée mais surtout d'en utiliser le pourcentage le plus élevé possible. Des exemples de progression sont illustrés dans les figures ci-dessous.

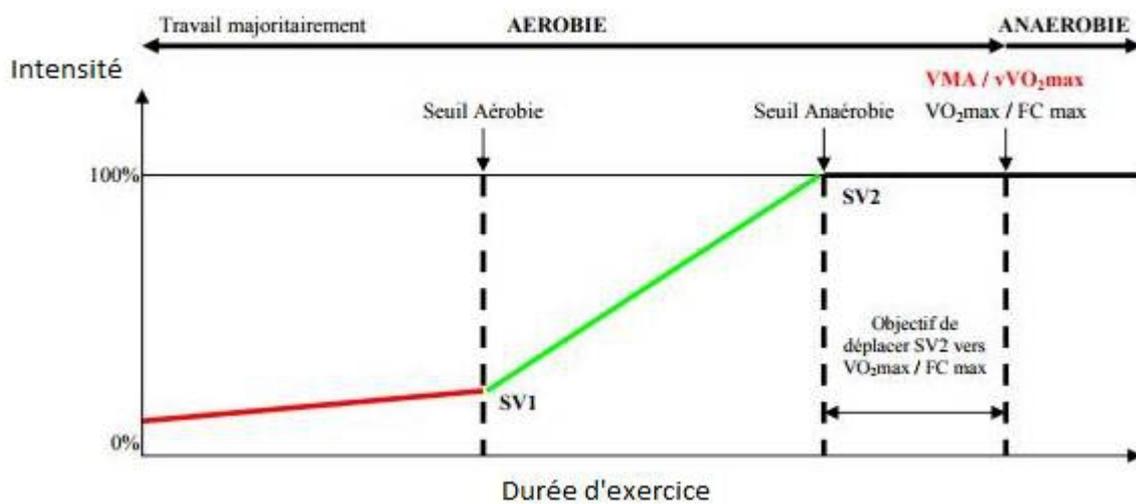


Figure 15
Exemple de progression avec déplacement de la zone de transition aérobie-anaérobie : élévation de SV2 (18)

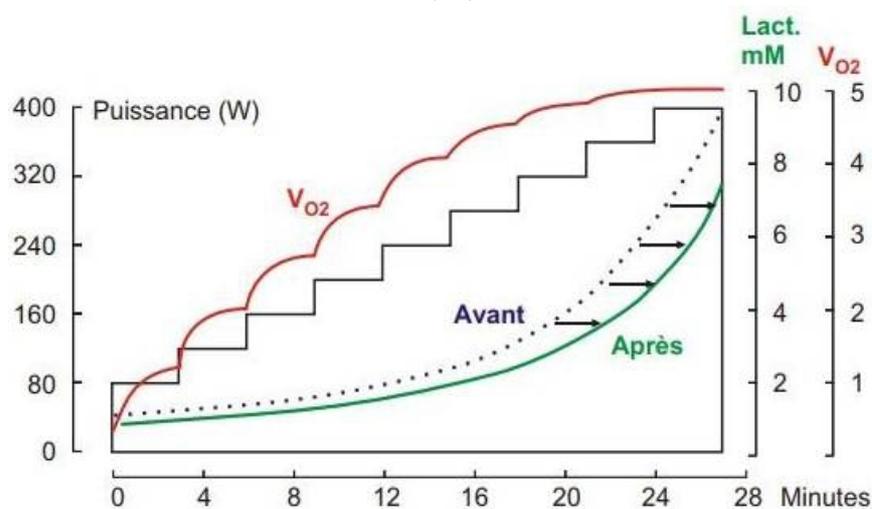


Figure 16
Evolution de la lactatémie au cours d'une épreuve d'effort maximale avant et après un programme d'entraînement aérobie : déplacement vers la droite de la courbe de lactates sans amélioration de VO_{2max} .

L'endurance aérobie est aussi corrélée au pourcentage de VO₂max mesuré à SV₁, seuil à partir duquel l'athlète n'est plus en aérobie stricte. En travaillant au-dessus de SV₁, on travaille efficacement son endurance (150,152).

En surf, pour éviter l'épuisement, la rame doit rester un effort inférieur à ses capacités maximales, d'où l'importance de la condition physique, avec pour objectif à l'entraînement d'élever les seuils ventilatoires SV₁ et SV₂ vers des puissances supérieures. Pour la même adaptation énergétique, l'effort produit sera alors supérieur. D'autres indicateurs pourront également témoigner d'une amélioration, telle que des fc inférieures pour un niveau de puissance identique.

On peut suggérer des exercices de rame en piscine (ou sur ergomètre type swimbench), avec cardiofréquencemètre. Les études récentes retiennent la distance de 400 mètres comme adaptée pour un parcours de rame qui sollicite l'endurance des membres supérieurs (parcouru en 6 minutes pour les meilleurs) (68,70).

L'entraînement à dominante aérobie ne représente actuellement qu'un mois et demi sur l'année (de novembre à mi-décembre) avec toutefois un footing par semaine d'entretien pendant la phase de préparation à l'effort de compétition (mars et avril), ce qui reste minime dans leur préparation physique annuelle. Il semble judicieux de préparer le terrain physiologique en début de saison, nous leur conseillons cependant de poursuivre ce type de travail tout au long de l'année.

L'entraînement au-dessus de SV₂ va pouvoir programmer des séances de fractionné ciblées sur la filière dite « anaérobie » et développer les systèmes « tampons » de l'organisme pour éliminer les protons issus de l'acide lactique. Les séances de hautes intensité optimise la VO₂max et les puissances aérobie et anaérobie (Pradet 1996). Nous avons tout intérêt à travailler en puissance, car comme l'objective notre étude, les puissances (maximale aérobie, à SV₁ et SV₂) sont associées à la performance. L'athlète devra pouvoir maintenir de hauts niveaux de sollicitation.

A l'inverse des idées préconçues, les exercices intenses de courte durée seraient aussi efficaces qu'un entraînement plus long pour développer le système aérobie. L'entraînement intermittent de haute intensité permet de développer les deux filières (153).

b) Intérêts de l'entraînement intermittent type High Intensity Interval Training (HIIT)

1) Développer les qualités aérobies et anaérobies

Par définition, l'exercice intermittent repose sur la répétition de périodes d'exercices d'une durée donnée, à une intensité imposée, entrecoupées de périodes de récupération passive ou active. Depuis le début des années 90, toutes les études convergent en faveur de l'entraînement intermittent versus continu pour augmenter le VO₂max et donc la capacité et l'endurance aérobie (155). L'endurance aérobie désigne la capacité à prolonger dans le temps des efforts sollicitant de hauts pourcentages de VO₂max. La notion de temps passé à VO₂max est devenue primordiale, et deux fois supérieure lors d'un exercice intermittent que continu. En fonction des objectifs, l'entraîneur peut recourir à plusieurs formes de travail intermittent, et solliciter de façon mixte la filière aérobie et anaérobie lactique et alactique (160).

Pour progresser à la fois en puissance aérobie (PMA) et anaérobie, il semble que l'High Intensity Interval Training (HIIT) ou entraînement intermittent à haute intensité soit le plus adapté (160). Pour optimiser la VO₂max et élever le seuil SV₂ les exercices doivent être courts (type 15/15 ou 30/30) et d'intensité maximale à supra-maximale (de 90% à 120% de la VO₂max en fonction des auteurs) (155,156,160).

2) Conséquences physiologiques

La glycolyse anaérobie lactique est utilisée pendant les toutes premières secondes, la production de lactates est faible compte tenu de la courte durée des exercices et métabolisée pendant les phases de récupération (18). Lors de la récupération entre les exercices de haute intensité, l'ATP n'est régénéré que part la filière aérobie (5). Au total, l'entraînement intermittent permettrait de retarder l'apparition de la fatigue et de récupérer plus rapidement entre les séances (Billat V. 2003) (161).

Au total, ce type d'exercices permet :

- la hausse des possibilités tampons du muscle,
- une sollicitation moindre de la glycolyse anaérobie (moins de lactates et une économie du glycogène),
- de développer capacité anaérobie sur des exercices courts (10-10, 15-15).

Les adaptations physiologiques seront fonction de la récupération : active ou passive. La récupération active permet d'éliminer plus facilement les ions lactates et H⁺ et maintenir les exercices plus longtemps lorsque la récupération est longue (plus de 30 sec). En revanche, lorsqu'elle est courte (moins de 30 sec), il semble que la récupération passive augmente le temps d'exercice, permette une meilleure réoxygénation de l'hémoglobine et une synthèse plus importante de phosphocréatine, donc une régénération plus rapide d'ATP (162).

3) Diminution de la charge de travail

Les effets de différents protocoles d'entraînement intermittent sur les canoéistes professionnels suggèrent que 3 semaines d'HIIT à faible volume (près de 6 ou 9 min par session) déterminent une amélioration du pic de VO₂max (163).

L'amélioration qualitative de l'entraînement (devenu alors personnalisé à sa propre adaptation énergétique et cardiorespiratoire), se manifeste en général par une diminution du volume d'entraînement. La récupération n'en sera que meilleure, ce qui contribue à échapper au surentraînement. L'intérêt de ce schéma d'entraînement réside dans la diminution de la charge de travail. C'est ce que révèlent les travaux d'une équipe de chercheurs canadiens de l'Université McMaster en Ontario (164).

Tous les participants ont effectué six séances d'entraînement au cours d'une période de 14 jours. Le groupe 1 avait des exercices de durée entre 90 et 120 min de vélo à un rythme modéré, et le groupe 2 un entraînement intensif à intervalle (30 sec de sprint x 4).

En cumulé sur 2 semaines, le groupe 1 a effectué dix heures et demie d'effort contre deux heures et demie pour le groupe 2. À l'aide de tests chronométrés et de biopsies musculaires, les auteurs retrouvent une amélioration similaire de leur performance physique et de la capacité oxydative musculaire.

4) Application au surf

Aérobie et sprint ne sont donc pas incompatibles. Il est nécessaire de développer l'aérobie pour enchaîner les répétitions de sprints pour une meilleure performance dans la durée. S'entraîner sur la distance de rame parcourue au cours d'une série de compétition poserait de nombreuses contraintes.

Le surf nécessite un travail d'endurance spécifique car c'est un sport dit « intermittent ». En surf, les phases d'intensité moyenne et forte (sprint à la rame durent entre 1 et 20 sec dans 80% du temps) alternent avec de courtes périodes de récupération (entre 1 et 10 sec) (33).

Dans mon étude, les fc aux seuils sont déjà élevées, d'où l'intérêt d'élever la consommation maximale d'oxygène. Au total, le travail intermittent à haute intensité semble adapté à la discipline.

De plus, notre population cible du pôle France et Espoir est composée d'adolescents scolarisés, la diminution de la charge de travail y trouve tout son intérêt. Il en est de même pour les périodes de compétition « phase de préparation terminale » qui durent 5 mois sur l'année et dont le volume de travail est réduit (annexe 10).

5) En pratique

Les entraîneurs semblent avoir notion des bénéfices de l'entraînement en fractionné, mais manquent de précision dans leurs protocoles. A ce jour, seulement 16% des séances ciblées sur les intensités prétendent atteindre 100-120% de la PMA, correspond au HIIT. Le reste est réparti à 50% sur des intensités de 85 à 105% de PMA, et à 34% entre 40 et 70%. De plus, les exercices proposés vont de 15 sec à 2 min avec des récupérations longues (de 2 min à 8 min) et les intensités atteintes sont non objectivées (annexe 11).

Ils pourront utiliser les pourcentages de FCmax ou la VMA pour adapter individuellement l'intensité de l'exercice. Les caractéristiques précises (en termes de temps de travail et de récupération) doivent être redéfinies avec précaution, et les séances monitorées.

Ce type d'exercice pourra être proposé en course sur dur ou en piscine. Pour se rapprocher de la spécificité du geste, l'entraînement pourra simuler les sprints à la rame qui simulent les accélérations pour prendre une vague et développer la puissance anaérobie alactique des membres supérieurs, entrecoupés de périodes de récupération courtes (entre 1 et 10 secondes), le tout durant 20 minutes (le temps d'une série de compétition).

Une étude américaine a testé 2 protocoles d'entraînements chez les surfeurs sur 5 semaines :

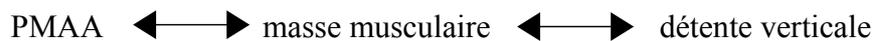
- le groupe qui s'entraînait en HIIT sur des sprints de 10 secondes a amélioré son sprint à la rame sur 15 mètres,
- le groupe qui s'entraînait HIIT par séries de 30 secondes a amélioré sa performance en endurance sur 400 mètres.

Les auteurs en concluent que ces protocoles d'entraînement améliorent les qualités aérobie et anaérobie (165). Ces exercices sont à retenir car les vitesses de rame sur 15 et 400 mètres semblent corrélées à la performance (40,68,70,81,88,93,139).

c) Développer la puissance maximale anaérobie alactique des membres inférieurs et supérieurs

1) Renforcement musculaire des membres inférieurs

La PMAA des membres inférieurs, évaluée par le test de détente verticale, est le paramètre le plus discriminant pour la performance dans notre étude. En effet, explosivité et puissance des membres inférieurs seront nécessaires pour effectuer les manœuvres, les seules à être notées. Les études suggèrent qu'une bonne musculature des membres inférieurs est susceptible d'améliorer les résultats par le biais d'une meilleure détente et puissance (96). De manière générale, la puissance maximale anaérobie semble en lien avec le volume musculaire ($p < 0,001$) chez le jeune garçon entraîné (57). En 2016 les scientifiques australiens évaluent la masse musculaire par absorptiométrie biphotonique à rayons X et retrouvent ce lien entre musculature des membres inférieurs et puissance et détente verticale (96).



Depuis plusieurs années, les préparateurs physiques des sports de puissance ont compris l'importance du renforcement musculaire (166). Le gain de masse musculaire est synonyme de gain de force, de puissance (Hoff et al., 2004), et de baisse de la masse grasse (167). Pour améliorer la PMAA des membres inférieurs, les auteurs proposent plusieurs méthodes.

> Les squats avec charge

Nuzzo et al (135) proposent un renforcement musculaire type squat avec la contrainte de porter du poids sur les épaules. Ils retrouvent une corrélation entre le poids maximum qu'il est possible de ne porter qu'une seule fois (on parle de 1 répétition maximum ou 1RM) et la hauteur atteinte au test de détente ($p < 0.05$). Cette notion de répétition maximum peut servir aux entraîneurs pour paramétrer les charges de travail à l'entraînement. En 1999 lors d'une étude sur les rugbymen, Baker and Nance (168) apportent les mêmes conclusions mais avec 3RM ($p < 0.05$). Notons qu'une partie significative de l'amélioration de la capacité à lever des charges est due à une augmentation de l'habileté à coordonner les autres groupes musculaires impliqués dans le mouvement, comme les muscles stabilisateurs du corps (169).

> L'entraînement stato-dynamique

Ce type de renforcement musculaire en squat peut se faire en stato-dynamique. Cette technique doit son nom au fait que le mouvement s'effectue avec une phase statique qui se greffe sur un mouvement concentrique (contraction musculaire). C'est une méthode de musculation qui peut être utilisée près des compétitions pour ses effets bénéfiques sur la stimulation nerveuse, ou lors des phases préparatoires (170).

Exemple d'exercice (figure 17) : squat avec charge, descendre normalement, remonter et s'arrêter 2 secondes genoux fléchis à 90°, puis finir le mouvement de façon explosive.

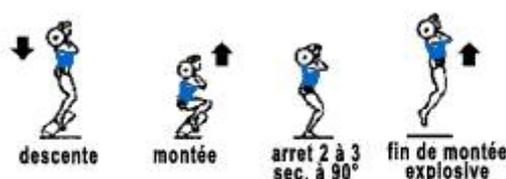


Figure 17
Exemple d'exercice de renforcement musculaire stato-dynamique

> La pliométrie

Pour améliorer la puissance musculaire, nous retiendrons également la pliométrie. Elle regroupe les exercices qui impliquent un étirement et une contraction rapide des muscles (comme dans un saut ou dans un bond). On parle d'une action musculaire pliométrique lorsque le muscle se retrouve d'abord soumis à un allongement (phase excentrique) et qu'ensuite il se contracte en se raccourcissant (phase concentrique). Elle mène aux améliorations de la performance dans les activités exigeant des contractions musculaires explosives (Malisoux, 2006).

Comme il a été prouvé chez les joueurs de volleyball, l'entraînement de pliométrie à court terme serait capable d'améliorer la détente verticale (Eduardo, 2008), la force musculaire et la puissance anaérobie (171–173). Les exercices pourront regrouper jump squat avec ou sans charge, bonds verticaux (saut à la corde) ou horizontaux (foulées bondissantes ou sauts à pieds joints en avançant). Les exercices pliométriques semblent être un excellent moyen de préparation terminale avant une compétition.

2) Renforcement musculaire des membres supérieurs

Concernant les membres supérieurs, la revue bibliographique insiste sur l'importance du sprint à la rame pour la performance. La musculation des membres supérieurs pour une meilleure PMAA doit être une priorité, notamment pour la vitesse de rame. En 2016, les australiens retrouvent un lien entre masse musculaire et PMAA des membres supérieurs (évaluée sur sprint de 10 secondes sur ergomètre) ; ces deux valeurs étant meilleures dans le groupe des surfeurs les plus performants (81). Ils notent également un lien en masse musculaire et VO2max. Une étude américaine récente compare 2 groupes de surfeurs et l'influence d'un programme de 5 semaines de musculation des membres supérieurs sur les vitesses de rame, en sprint sur 5, 10 et 15 mètres ainsi qu'en endurance sur 400 mètres. Elle retrouve une amélioration significative de la vitesse de rame sur toutes les distances dans le groupe d'entraînement versus le groupe contrôle (174).

Masse musculaire, puissance aérobie et anaérobie des membres supérieurs et vitesse à la rame sont des paramètres liés entre eux, et indépendamment corrélés à la performance.

L'entraînement de pliométrie peut être avantageux pour développer la puissance et la force (Jeffery, 2000) (166). Exemples :

- Le développé couché, qui consiste à saisir une barre chargée de poids en position allongée, la descendre jusqu'au thorax puis tendre les bras pour la repousser. En pliométrie la phase de poussée de la barre devra être explosive.
- Les tractions à la barre fixe, en insistant sur le mouvement de ressort après la descente.
- Les pompes sautées, en donnant une forte impulsion pour que les mains décollent du sol.

Les effets d'un programme de renforcement musculaire ont tendance à diminuer la masse grasse, augmenter la masse maigre et donc la VO2max. La masse maigre semble être un paramètre déterminant du seuil ventilatoire SV2 pendant la croissance (85). Les auteurs proposent une fréquence de deux fois par semaine (175).

La préparation physique du pôle comprend une séance de 1h par semaine avec un coach sportif spécialisé dans la boxe. Le circuit training (qui consiste à réaliser plusieurs exercices les uns après les autres) alternant exercices du haut et du bas du corps semble adapté. Les séances axées sur l'explosivité semblent bénéfiques en période de compétition.

d) Particularités physiologiques de l'adolescent

Si l'on a longtemps considéré que les adaptations à l'effort étaient semblables chez les enfants et chez les adultes, les recherches scientifiques récentes ont permis de mettre en lumière les similarités et différences existantes chez ces populations. L'adolescence est en effet une période caractérisée par de nombreuses modifications anatomiques et physiologiques.

La période pubertaire est particulièrement propice au développement de la masse musculaire en réponse à l'exercice, du fait de l'hypertrophie des fibres musculaires générée par la sécrétion d'hormone de croissance et de testostérone (169,176). Le système endocrinien joue un rôle important dans la mobilisation et l'utilisation des substrats énergétiques afin d'assurer la régulation du métabolisme énergétique (Bouassida et al. 2003, Bouhleb et al. 2008, Elloumi et al. 2008) (57).

Le pic de croissance ($13,8 \pm 0,8$ ans) est concomitant avec le pic de développement de l'explosivité, l'endurance musculaire, la vitesse, l'agilité, l'endurance cardiorespiratoire et la capacité anaérobie (Philippaerts et al. 2006) (177).

Au total :

L'entraînement aérobie pendant cette période semble être particulièrement bénéfique de même que le développement du rapport force/vitesse (puissance). Un entraînement physique régulier pendant l'adolescence permet non seulement un gain en VO₂max, mais aussi une amélioration de la valeur du seuil anaérobie. Chez le garçon, la période de la mi-puberté à la puberté est hautement favorable au développement de la puissance musculaire, car les facteurs hormonaux sont potentialisés. L'action anabolisante des hormones (testostérone et hormone de croissance GH) sur le muscle est indiscutable. La sécrétion de testostérone s'élève vers 12-14 ans.

La durée de la puberté est en moyenne de 3 ans. L'âge de 14 ans à 16 - 18 ans est idéal pour le développement des qualités physiques (169). Notre population cible (pôle France et Espoir) est concernée par cette tranche d'âge.

e) Entraînement en piscine

A ce jour, nous n'avons pas à disposition l'ergomètre adapté pour simuler la rame, en revanche la piscine de Biarritz accueille les surfeurs du pôle France chaque année de novembre à mars. Les sportifs peuvent travailler endurance, puissance et vitesse, avec l'avantage de ne pas subir les changements climatiques et de se rapprocher au mieux de la discipline, d'autant plus qu'il s'agit d'une piscine à eau salée (en partie). Les exercices peuvent varier entre la rame sur planche et les exercices de crawl dont le geste est très proche de celui du surfeur quand il rame (cf photo).



Le but de l'entraînement sera d'obtenir à la rame un bon rapport puissance/endurance. En effet, plus le surfeur mettra de temps à ramer vers le large (jusqu'au point de déferlement des vagues) plus les vagues auxquelles il devra faire face seront nombreuses. Vitesse et explosivité à la rame lui permettront d'avancer le plus possible entre chaque vague. Il faut imaginer des séries de vagues puissantes qui s'enchaînent à peu d'intervalle.

La rame est très régulièrement interrompue par le passage des vagues et la nécessité de faire des « canards », à savoir passer sous les vagues pour gagner du temps et ne pas reculer. Un peu avant la vague, le surfeur pousse le nez de la planche sous l'eau pour plonger suffisamment profondément et refaire surface à l'arrière de la vague (figure 18). Ces multiples apnées font subir au surfeur une perte de rythme, qui n'est pas compensée par le faible temps de repos occasionné, accroissant l'intensité de l'exercice (32,36–38). Des exercices d'apnée en piscine peuvent permettre de gérer plus facilement cette immersion.

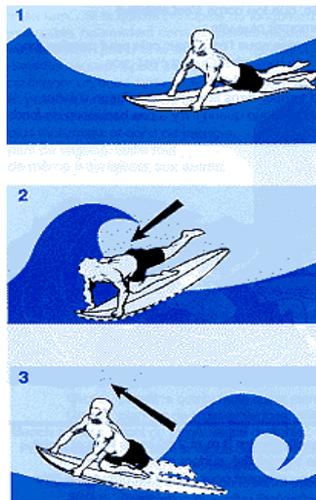


Figure 18
Illustration du « canard » en surf

Une fois positionné il faut être capable d'augmenter sa cadence de rame pour favoriser une entrée en vague rapide et pouvoir prendre des vagues puissantes (tel que défini par les critères officiels de notation). Pour établir les programmes des séances, on pourra s'inspirer des articles récents et travailler en crawl sur les distances et durées clefs :

- sprint sur 5 10 et 15m (38,68,93,139)
- sprint sur 10 et 30 secondes (40,81,88)

La distance de 400 mètres semble également associée à la performance (38,68). Aujourd'hui la distance nagée maximale en une fois n'est que de 100 mètres, les athlètes du pôle semblent pour l'instant manquer d'endurance. Les phases d'accélération sont effectuées sur 25 mètres. L'entraînement en crawl pourra être privilégié au dépens des autres nages, et impliquer les sportifs en leur expliquant tout le bénéfice attendu.

f) S'entraîner pour éviter les blessures

Le taux de blessures en surf (aiguës ou chroniques) est en constante augmentation (178–181). Des études récentes ont été menées pour caractériser les blessures et identifier les facteurs de risques, dans un but épidémiologique et pour développer des méthodes de prévention. Dans ce sens, une étude prospective sur 6 ans publiée en 2007 analyse les blessures en compétition en parallèle des conditions environnementales (tailles des vagues, fond marin).

Le risque augmente avec la taille des vagues et est 2,6 fois plus important si le fond marin est un récif corallien par rapport à du sable (181). Le risque global de blessure augmente chez les surfeurs de compétition par rapport aux amateurs, en fonction du nombre d'heures surfées, et de leur capacité à réaliser des figures aériennes (180). Il semble que l'augmentation de l'incidence des accidents en surf soit due à sa croissance démographique et à l'évolution de la pratique (qui tend à prendre de plus en plus de risques).

Les blessures aiguës sont majoritairement cutanées liées à des traumatismes directs induits par une planche de surf (178,182,183), alors que les manœuvres et figures réalisées sur les vagues induisent des blessures musculo-articulaires (179,184–187).

La dernière étude date de Mars 2017, rétrospective sur 16 ans, étudie les surfeurs qui se sont présentés dans un centre de traumatologie aiguë à San Diego. Ils retrouvent une majorité de blessures à la tête (42 à 46%) et au visage (22%), mais également au niveau du rachis (47 à 51%) (188). En effet, nous avons vu l'intérêt d'évaluer les souplesses rachidiennes dans les horizontaux et sagittaux, les contraintes imposées par la discipline sur le rachis étant nombreuses.

Un déficit de souplesse à ce niveau, soit une diminution de l'amplitude articulaire favorise les blessures au niveau des articulations voisines, à savoir le rachis cervical et lombaire mais également les épaules, et limite les performances (115,116,189). En 2014, Furness et al. ont identifié le rachis lombaire et l'épaule comme les deux zones les plus souvent atteintes de pathologies chroniques (190), l'épaule en premier lieu (179).

En pratique, travailler souplesse du rachis thoracique et renforcement des muscles para-vertébraux semble essentiel pour progresser en rame tout comme pour protéger le rachis d'une blessure potentielle. Le ballon suisse (swissball) est un ballon souple et instable, qui permet de travailler le gainage en renforçant les muscles abdominaux et dorsaux et para-vertébraux. Il est adapté pour travailler la souplesse du rachis dans le but d'augmenter les amplitudes de rotation dans le plan horizontal et de souplesse dans le plan sagittal. Un renforcement musculaire des muscles de la coiffe des rotateurs a également été proposé ainsi qu'au niveau des genoux, dont les blessures sont en augmentation chez les professionnels, dues à la tension occasionnée par les manœuvres, notamment aériennes (111).

La puissance du haut du corps permettra de se protéger en ramant autour des obstacles et d'être capable de maintenir sa planche dans les turbulences sous l'eau (111).

g) La proprioception

Les outils d'entraînement présentés ci-après sont peu coûteux, facile à transporter et associent un travail sur l'équilibre, la proprioception, les réflexes et le gainage.

1) Les planches d'équilibre

Le niveau de difficulté peut être croissant par déstabilisations sensorielles : ôter la vue à l'aide d'un bandeau, l'ouïe avec un casque ou perturber le toucher par des impulsions données par un partenaire. Plusieurs interface entre ces planches et le sol sont possibles (cylindre, boule). On peut citer l'indoboard (cylindre surmonté d'une planche en bois) et le plantxot (planche type skateboard montée sur deux supports hémisphériques à l'avant et à l'arrière) (cf photo).



2) Le carveboard

Le carveboard est un sport de glisse sur surface dure. La planche a été inventée par des surfeurs californiens pour travailler leurs mouvements les jours de mer plate. De par son anatomie (une planche, 4 roues) le carveboard ressemble en tous points au skateboard, mais la technique de glisse et les sensations procurées sont finalement bien plus proches de celles du surf. L'idée est d'exécuter des mouvements proches de la réalité et de les répéter pour favoriser l'assimilation des sensations.

La pratique privilégie le travail du virage, grâce à une capacité d'inclinaison (jusqu'à 45°), permettant les variations de courbes tout en limitant la perte de vitesse (cf photo). En plus d'améliorer l'équilibre, il sert à travailler les mouvements du haut du corps (la chaîne indispensable pour que les virages fonctionnent : tête (regard) épaule bras bassin) pendant les périodes de non surf et le renforcement musculaire des membres inférieurs. La répétitivité des mouvements et leur reproductibilité est possible sans interférence d'éléments extérieurs.

Cet outil permettrait une programmation d'entraînement personnalisé sur dur irréalizable sur vague, avec sessions chronométrées mettant en œuvre les filières anaérobie et aérobie en fonction des intensités imposées. C'est un projet pour l'entraîneur du pôle France puisque la fédération investit dans un parcours adapté à cette pratique « un bowl » (ou « bol » en français) qui sera livré en fin d'année 2017. Des surfeurs professionnels ont déjà investi comme John John Florence ou Jérémy Flores (respectivement 2e et 17e du classement mondial actuel) en créant une salle d'entraînement sportif avec ce type de dispositif.

L'équilibre et la proprioception sont deux paramètres particulièrement sollicités dans le surf. Nous projetions de programmer un entraînement spécifique et d'évaluer son efficacité sur une plateforme d'équilibre comme il en existe à Bordeaux. Cet axe d'étude demandait trop de disponibilité de la part des athlètes.



D. Une évaluation globale

1. Communication entre les intervenants

Les liens entre les médecins, les physiologistes et les cadres sportifs se sont rapprochés, motivés par l'intérêt de pratiquer des tests d'effort et de définir un profil des paramètres physiologiques à l'effort. L'enjeu est d'élaborer un entraînement adapté aux qualités requises. La préparation physique fait aujourd'hui partie intégrante de l'approche de l'activité. Il doit exister un lien permanent entre préparation physique, technique et mentale. L'athlète est le premier garant d'une communication régulière entre eux.

Or les différents intervenants contactés (coach de surf, entraîneur sur dur et professeur de natation) communiquent peu entre eux et ne connaissent pas le programme des uns et des autres. Un outil précieux serait un dossier informatisé, regroupant les informations physiologiques et médicales et accessible à tous.

2. Une approche pluridisciplinaire

Même si l'accent est mis sur l'entraînement physique, le développement des habiletés techniques, la gestion des enjeux stratégiques lors des compétitions et la préparation mentale font partie intégrante de l'entraînement. Les entraîneurs de haut niveau doivent être formés sur les facteurs plus généraux notamment la psychologie, la nutrition, la biomécanique et la physiologie (Tomlinson & Strachan, 1996). D'où l'intérêt, au moins en début de saison, d'un bilan de santé associant la consultation psychologique et le bilan diététique à l'épreuve d'effort, l'examen médical complet, l'ECG de repos et le bilan biologique.

3. La scolarité

Deux systèmes de sport étude s'offrent aujourd'hui en France.

L'un est dépendant de l'état et subventionné, ce sont les fédérations françaises. Le pôle France de surf entre dans cette catégorie, les jeunes bénéficient d'horaires aménagés au sein d'une scolarité classique (comme c'est le cas au lycée Malraux à Biarritz). Cette option offre l'avantage de rester inséré socioprofessionnellement, et facilite la reconversion chez les sportifs qui n'atteindront pas le niveau professionnel. L'organisation qui en découle est ardue entre les cours, les différents points d'entraînements nécessitant transports collectifs, et les déplacements en compétitions.

D'autres préfèrent quitter ce système et s'entraîner indépendamment. La scolarité est éventuellement assurée par le CNED et l'aspect financier par la famille et pour certains, les sponsors. L'avantage est de pouvoir voyager facilement (destinations reconnues pour la qualité des vagues comme l'Australie, le Costa Rica, Bali...), et avoir plus de plages horaires dédiées à l'entraînement. Les athlètes sont cependant « exclus » du système et la vie sociale est réduite.

Pour combiner les avantages des deux situations on pourrait imaginer un centre d'entraînement avec scolarité et sport au même endroit. Une telle infrastructure a un coût conséquent et n'est pas à l'ordre du jour. En Australie, un centre d'entraînement de haut niveau, le « Hurley Surfing Australia High Performance Centre » (HPC) a été inauguré en 2012. Il s'agit de la première structure de ce type au monde, bénéficiant d'installations de pointe, qui a coûté 2 millions de dollars au gouvernement fédéral, et 2 millions au sponsor Hurley. Proche des spots de surf idéaux, il comprend 22 logements, piscine extérieure et intérieure chauffée, salle de sport, de cours, de soins (191).

E. Évaluer l'intérêt potentiel d'autres techniques d'entraînement : présentation du powerbreath®

La force et l'endurance des muscles respiratoires seraient susceptibles d'influencer certaines performances sportives. Le powerbreath® est un système de valve créant un frein inspiratoire qui assure une charge calibrée fournissant une résistance à l'inspiration, visant à stimuler et renforcer les muscles inspiratoires.

Il est un dispositif médical au Royaume uni depuis 2006, améliorant la capacité respiratoire dans l'asthme ou la BPCO. Il a depuis de nombreuses années intéressé les auteurs quant à la performance sportive.

C'est en 1996, à l'Université de Loughborough (Angleterre, Royaume-Uni) que sont entrepris les premières recherches dans l'optique de concevoir un produit d'entraînement des muscles inspiratoires respiratoires pour les performances sportives (192). Dans une étude de 1998, ce dispositif a permis aux participants de prolonger la durée de leur exercice à vélo de 33 % tout en leur donnant la sensation très marquée d'une diminution de l'effort (193).

Les premières études démontrent une fatigue avérée des muscles inspiratoires après des efforts prolongés, et la possibilité d'améliorer leur force, puissance et endurance grâce à un entraînement spécifique comportant 30 respirations deux fois par jour avec powerbreath® pendant 4 semaines, avec une augmentation progressive de la résistance tous les 2 jours (194).

En 2011, une étude a étudié l'impact d'un entraînement de huit semaines avec powerbreath® (à raison de 60 inspirations par jour avec une résistance fixée à 85% de la pression inspiratoire maximale) dans une population d'étudiants universitaires pratiquant un sport de loisir (195). Ils retrouvent une amélioration de la force des muscles inspiratoires, par mesure des pressions maximales inspiratoires (PIM), expiratoires (PEM).

Enfin, en 2014, un essai randomisé effectué sur les nageurs d'élite a démontré que le powerbreath® combiné avec un échauffement classique en piscine améliore leurs performances sur le chrono en parcourant 100m par rapport à un échauffement classique (196).

Le pôle France en détient suffisamment pour que chaque athlète en soit muni, mais aucun ne l'utilise à ce jour. Pourtant, l'indication avait été retenue par le médecin fédéral suite à la mise en évidence des contraintes respiratoires liées à la position en décubitus ventral. De plus, dans les conditions réelles de surf, la position en hyperextension cervicale limite l'utilisation des muscles respiratoires accessoires. Il s'agit du seul sport à composante aérobie dans cette position.

Aucune étude n'a pour l'instant démontré d'amélioration significative des EFR avant et après une période d'entraînement des muscles respiratoires inspiratoires.

Nous avons tenté de réaliser une étude prospective sur deux mois, les sujets devaient effectuer une spirométrie avant et après l'utilisation du powerbreath®, à raison de 60 inspirations par jour avec une résistance fixée à 85% de la pression inspiratoire maximale. Finalement les jeunes sportifs n'ont pas suivi le protocole.

F. Synthèse

L'étude des paramètres déterminants pour la performance en surf sont présentés dans les tableaux ci-dessous en fonction que l'association ait été prouvée dans notre étude (tableau 29), suggérée dans les autres études (tableau 30) ou simplement présumée (tableau 31). A chaque paramètre correspond une performance en surf, une ou plusieurs méthodes d'évaluation et des stratégies d'entraînement.

Tableau 29

Paramètres associés à la performance en surf classés par significativité statistique croissante et propositions de méthodes d'évaluation et d'entraînement

Paramètres associés à la performance dans notre étude (ordre croissant de significativité)	Sollicitation en surf	Méthodes d'évaluation	Entraînement
Puissance maximale anaérobie alactique des membres inférieurs	- explosivité - manœuvres - figures	test de détente +/- combiné avec SJ et IMTP avec réévaluation à 3 mois d'entraînement grâce au rapport de puissances mesurées au test de détente et au IMTP	renforcement musculaire : - squats avec charge (1 à 3 RM) - stato-dynamique - pliométrie
Puissance et fréquence cardiaque à SV2	rame anaérobie (sprint)	épreuve d'effort maximale progressive	- séances de sprint à la rame en HIIT en utilisant cardiofréquencemètre ou VMA
Puissance et fréquence cardiaque à SV1	rame aérobie	épreuve d'effort maximale progressive	- endurance à la rame sur 400m - HIIT
Puissance maximale aérobie	endurance à la rame	- épreuve d'effort maximale progressive - parcours de rame/crawl sur 400m (69,71)	- endurance à la rame sur 400m - HIIT série de sprint à la rame de 30 sec - musculation des membres supérieurs

SJ : Squat Jump : consiste à sauter avec pour position de départ une flexion des genoux

IMTP : Isometric Midthighpull : tirage vertical contre résistance d'une barre fixe placée au niveau des cuisses

RM : répétition maximum

HIIT : High Intensity Interval Training

Tableau 30

Paramètres associés à la performance en surf d'après la revue bibliographique et proposition de méthodes d'évaluation et d'entraînement

Paramètres associés d'après la bibliographie	Sollicitation en surf	Méthodes d'évaluation	Entraînement
Puissance maximale anaérobie alactique des membres supérieurs	- sprint à la rame - take off	- pédalage de bras sur ergocycle (10sec au maximum) - sprint sur 5 10 et 15m ou 10 secondes sur swim bench ou en piscine	- HIIT : sprint à la rame/crawl sur 5 10 et 15m ou 10 sec - renforcement musculaire - pliométrie
Diminution de la masse grasse		mesure des plis cutanés	- endurance (footing) - musculation
Souplesse du rachis	- rame - manœuvres - figures	- souplesse dans le plan horizontal <i>Lumbar-locked position</i> - amplitude dans le plan sagittal	swissball

take-off : action de se mettre debout sur la planche

Tableau 31

Paramètres physiques sollicités en surf et proposition de méthodes d'évaluation et d'entraînement

Paramètres physiques	Sollicitation en surf	Méthodes d'évaluation	Entraînement
VO2max	- endurance - récupération	épreuve d'effort maximale progressive	- HIIT - footing
Proprioception	équilibre sur la planche	plateformes d'équilibre	- swissball - planches d'équilibre - carveboard
Débits respiratoires	syndrome restrictif et obstructif à la rame	épreuves fonctionnelles respiratoires	utilisation du powerbreath®
Prévention des blessures	contraintes engendrées sur les épaules, le rachis et les genoux		- renforcement musculaire de la coiffe des rotateurs, des muscles paravertébraux, des genoux - souplesse du rachis (swissball)

CONCLUSION

Le niveau de compétition en surf s'est élevé de façon exponentielle ces dix dernières années. Les entraîneurs et athlètes commencent à réaliser l'importance de la préparation physique. Les analyses quantitatives et qualitatives de la discipline ont identifié les qualités physiologiques requises. Les filières aérobie et anaérobie sont sollicitées par intermittence, avec une majorité d'action de rame.

Le premier axe de ce travail montre une amélioration significative des caractéristiques anthropométriques et des paramètres physiques d'un échantillon de surfeurs de haut niveau en une décennie. Nous avons mis en évidence une discordance entre la puissance maximale aérobie qui apparaît associée à la performance en compétition et l'absence de progression dans la population étudiée. De même, les paramètres à SV2 n'ont que peu augmenté alors qu'ils apparaissent plus déterminants qu'à SV1. Les paramètres physiques associés à la performance en surf sont de plus en plus discriminants en comparaison avec une étude menée il y a 10 ans, et permettent de déduire les domaines à améliorer à l'entraînement.

La détermination des fréquences cardiaques aux seuils aérobie et anaérobie à l'occasion de l'épreuve d'effort annuelle, et éventuellement de la VMA au cours d'un test de terrain apporterait de l'objectivité pour juger des intensités d'exercices. Le but sera de repousser les seuils vers des valeurs supérieures, notamment les puissances qui sont déterminantes pour la performance. Les entraîneurs doivent retenir le bénéfice des exercices intermittents qui collent parfaitement à la pratique. Il conviendra d'entretenir l'endurance et la capacité aérobie afin qu'ils aient une meilleure tolérance physique à la quantité d'entraînement et une récupération optimale entre chaque vague.

Parmi les points ciblés spécifiques de la discipline, le renforcement musculaire des membres supérieurs et inférieurs présente un atout majeur tant pour la performance (au travers du développement des puissances anaérobies alactiques du haut et bas du corps) que pour la sécurité des athlètes (prévention des blessures). Pour travailler l'équilibre, des séances de proprioception sur planches d'équilibre statique ou sur carveboard pourront être intégrées à l'entraînement. L'assouplissement du rachis et l'utilisation du powerbreath pourront s'ajouter aux nouvelles pistes de travail envisagées.

Concernant le suivi, lors de l'épreuve d'effort annuelle, les paramètres recueillis à chaque palier (FC, VO₂, puissance) permettent de quantifier le niveau métabolique de l'effort, et de déterminer avec précision les seuils pour un entraînement personnalisé. Une modernisation du suivi par numérisation des données du suivi médical et physiologique centraliserait les informations et permettrait d'effectuer de nouvelles études. L'évaluation de la PMAA des membres supérieurs et de la souplesse du rachis pourra être intégrée à la batterie de tests annuels. Pour juger de l'efficacité de

l'entraînement au cours de la saison, le suivi pourra être complété par un test de terrain qui déterminera la VMA à la rame, paramètre plus sensible à la progression que la VO₂max. Les épreuves fonctionnelles respiratoires, quant à elle, n'ont pas d'intérêt hors protocole d'évaluation du powerbreath®.

La charge globale pourra être optimisée grâce à une meilleure communication entre les intervenants. Ce travail de thèse montre que l'analyse et le suivi longitudinal des caractéristiques anthropométriques, physiques et physiologiques des jeunes surfeurs ne peut être que bénéfique. Grâce à l'identification des facteurs de performances en surf de haut niveau ce travail a permis d'affiner les méthodologies d'évaluation, d'entraînement et de suivi spécifiques du surf. Nous avons mis en exergue la possibilité d'optimiser leur préparation physique. Les informations présentées peuvent donner aux entraîneurs un grand avantage dans la planification réussie d'une saison et aux chercheurs une ouverture à de nouvelles études.

Quelques propositions d'études informatives :

- Développer une évaluation aérobie et anaérobie fiable et valide des surfeurs en milieu aquatique (test de terrain) puis analyser le lien entre les VMA, vitesses atteintes à SV1 et SV2 et le classement fédéral national
- Mesure de VO₂max sur le terrain grâce à un appareil portable
- Analyse des performances en compétition (montre GPS, FC, vidéos) et mesure de l'impact des conditions environnementales
- Étude longitudinale des réponses physiologiques à un entraînement dans l'eau ou sur dur, comparé avec un entraînement uniquement en surf
- Observer les résultats sur les performances aérobie et anaérobie après une intervention pour informer les athlètes sur les analyses et conditionnements prioritaires
- Analyser les qualités physiques des meilleurs mondiaux
- Comparer l'évolution des performances d'un entraînement personnalisé ou collectif
- Évaluer les fréquences cardiaques atteintes lors d'un entraînement sur carveboard
- Objectiver l'amélioration d'équilibre avant et après un entraînement ciblé sur la proprioception
- Comparer les valeurs obtenues lors d'épreuves d'effort sur swimbench, ergocycle pour membres supérieurs et inférieurs
- Effectuer des épreuves fonctionnelles respiratoires avant et après l'utilisation du powerbreath®
- Aborder la place de la nutrition chez ces sportifs scolarisés en pleine croissance.

Annexe 1 : Les licences fédérales

La Fédération Française de Surf met à disposition de ses adhérents 5 types de Licences :

La Licence compétition : Délivrée par les clubs, elle est obligatoire pour toute personne souhaitant participer aux compétitions fédérales. Elle permet à son titulaire d'être classé dans le Classement National Fédéral de la discipline concernée.

La Licence pratiquant : Elle est délivrée par les clubs à toute personne souhaitant participer à la vie associative du club concerné. Elle offre ainsi suivant les structures la possibilité de bénéficier de locaux, de prêts de matériels, de participer à différentes manifestations festives etc.

La Licence école : Elle est délivrée par les clubs affiliés ou les écoles labellisées par la FFS, à toute personne à qui est délivrée une prestation d'enseignement du surf.

La Licence dirigeant / éducateur : Elle est directement délivrée par la FFS, à toute personne responsable d'une structure privée labellisée par la FFS, ou exerçant la profession d'éducateur dans une telle structure.

Annexe 2 : Les fédérations et catégories du surf de haut niveau

Les fédérations

La World Surf League ou WSL est une entreprise américaine chargée de l'organisation de toutes les compétitions professionnelles de surf à travers le monde. Créée en 1976 sous le nom de IPS (International Professional Surfers) puis renommée ASP (Association of Surfing Professionals) en 1983, et WSL en 2015, elle est notamment responsable de l'organisation des épreuves constituant le championnat du monde de surf (World Championship Tour ou CT) ainsi que celles de la ligue d'accès à l'élite (World Qualifying Series ou QS). Elle gère également le circuit Pro Junior (- 18 ans) et Longboard Pro. Disposant de sa propre fédération, Tahiti est considérée comme un « pays » par la World Surf League ; la Fédération Française de Surf n'enregistre donc que les résultats et statistiques des surfeurs licenciés à la FFS. Le cas est le même pour Hawaï qui est indépendant des USA pour la WSL.

L'International Surfing Association (ISA) est la fédération internationale de surf, les championnats du monde des nations de l'ISA sont considérés comme des Jeux olympiques du surf (197).

L'European Surfing Fédération (ESF) est la fédération européenne de surf, elle organise les championnats d'Europe des nations de surf (EuroSurf)

Le surf de haut niveau se définit en différentes catégories en fonction des résultats en compétitions.

Les catégories de surf de haut niveau

- **Élite** : Top 8 WCT hommes et femmes ou classés 1 ou 2 au championnat du monde des nations de l'ISA
- **Seniors** : Top 32 WCT hommes et Top 16 WCT femmes ou classés 3 à 8 au championnat du monde des nations de l'ISA et 1 à 4 au championnat d'Europe des nations de surf
- **Relève** : De 12 à 18 ans faisant partie de l'équipe de France jeune ou classés dans le circuit Pro Junior
- **Collectifs nationaux** : Les plus de 25 ans classés au WQS Monde et Europe
- **Reconversion** : Concerne les sportifs ayant été inscrits sur les listes en catégorie Seniors ou Élite pendant 4 ans et présentant un projet spécifique de formation ou d'insertion professionnelle (dossier à remplir validé par la DTN)
- **Espoirs** : Concerne les sportifs de 12 à 20 ans de classement national qui sont susceptibles d'intégrer rapidement le Collectif France Jeunes.

Annexe 3 : Les circuits et championnats

Les circuits

Le circuit CT (Championship Tour) de la World Surf League constitue la division d'élite du championnat du monde professionnel. Seuls les 32 meilleurs surfeurs mondiaux sont qualifiés chaque saison pour y disputer la dizaine d'étapes du circuit soit :

- les 22 meilleurs surfeurs du CT de la saison précédente rejoints par
- les 10 meilleurs surfeurs du circuit QS de la saison précédente.

Ce Top 32 est rejoint par

- deux wild cards attribuées à l'année par la WSL à deux surfeurs méritants.
- deux autres wild cards sont décernées lors de chaque compétition.

Soit un tableau fermé de 36 concurrents sur chaque étape du circuit.

Le CT féminin est ouvert aux 17 meilleures surfeuses de la planète. Il est constitué des 10 meilleures surfeuses du CT de la saison précédente et des 6 meilleures surfeuses du QS de la saison précédente. Une wild card est décernée lors de chaque compétition. Soit un tableau fermé de 18 concurrentes sur chaque étape du circuit.

Toutes les compétitions du CT ont le même grade de points et de prize money : 10.000 points et 100.000 \$ pour les messieurs; 10.000 points et 60.000 \$ pour les dames.

En fin de saison, les 10 derniers du classement messieurs et les 6 dernières du classement dames sont rétrogradés sur le circuit QS.

L'Américain Kelly Slater détient le record de titres mondiaux : 11 ; et le record du nombre de victoires en CT : 54.

A ce jour, seuls 5 surfeurs Français ont accédé au CT : Eric Rebière (2004), Micky Picon (2006 et 2008), Jérémy Florès (depuis 2007), Tim Boal (2009) et Joan Duru (2017) ; 3 Françaises ont accédé au CT : Pauline Ado (2011 à 2014, 2017), Justine Dupont (2012) et Johanne Defay (depuis 2014). Les Français ont remporté 2 victoires sur le CT : Jérémy Florès (2) ; Les Françaises ont remporté trois victoires sur le CT : Anne-Gaëlle Hoarau (1) et Johanne Defay (2).

Les Français sur le circuit 2017 : Jérémy Florès, Joan Duru, Johanne Defay et Pauline Ado.

Le circuit QS (Qualifying Series) de la World Surf League est la deuxième division mondiale du surf professionnel. Il est constitué d'une cinquantaine de compétitions masculines et d'une vingtaine de compétitions féminines. Il est ouvert à tous les surfeurs disposant d'une licence WSL. Les surfeurs du Championship Tour, l'élite mondiale ou la 1re division, peuvent également participer aux compétitions QS.

Les compétitions sont classées en 5 catégories en fonction du « prize money » et des points qu'elles distribuent : QS 1.000, 1.500, 3.000, 6.000 et 10.000.

Les tableaux de chaque compétition sont fermés et seuls les meilleurs classés peuvent y participer. A titre d'exemple, seuls les 96 premiers du classement peuvent participer au QS 10.000, les plus prisés du circuit.

Le classement général est établi sur les cinq meilleurs résultats de chaque surfeur.

En fin de saison, les 10 premiers du classement, hors surfeur(s) du Top 22 du Championship Tour, accèdent au CT, le circuit principal.

Chez les filles, les 6 premières, hors surfeuse(s) du Top 10 du CT, accèdent à l'élite. Les Français à suivre en 2017 : Maxime Huscenot, Charly Martin, Marc Lacomare, Dimitri Ouvré, Jorgann Couzinet, Tim Bisso, Nommé et Diego Mignot.

Le circuit WSL Pro Junior est ouvert à tous les surfeurs de moins de 18 ans (inclus) disposant d'une licence WSL. Il est réparti en zones géographiques : Europe, Afrique, Amérique du Nord, Amérique centrale et du Sud, Océanie, Hawaii-Tahiti, Asie. En fin de saison, les meilleurs surfeurs de chaque zone sont qualifiés pour la grande finale mondiale. Les Français Nelson Cloarec et Juliette Brice sont champions d'Europe en titre.

Le circuit coupe de France est instauré depuis la fin des années 80, organisé par les clubs/ligues/comités affiliés à la Fédération Française de Surf, avec le soutien logistique et sportif de la FFS. Plusieurs étapes composent le circuit dans chacune des disciplines et catégories inscrites au calendrier ; un classement aux points est établi en fin de saison.

Au total, le circuit Coupe de France comprend une trentaine de compétitions à l'année.

Les championnats

Le championnat de France de surf se dispute chaque année à la Toussaint. Ils regroupent des compétiteurs sélectionnés au regard du classement national et des quotas délivrés pour les ligues et comités.

La 53e édition des championnats de France de surf ont lieu à Biarritz du 22 au 30 octobre 2016.

Le championnat d'Europe de surf en 2017 ont lieu du 30 septembre au 8 octobre en Norvège, organisés par l'European Surfing Fédération

Le championnat du monde est organisé par L'International Surfing Association ou ISA est la Fédération international de surf, seule reconnue par le Comité international olympique (CIO) en tant qu'autorité d'administration mondiale pour le surf. Les championnats du monde des nations de l'ISA sont considérés comme des Jeux olympiques du surf. Les médailles or, argent, bronze et cuivre sont décernées, les athlètes sont en compétition pour l'honneur de représenter leur pays et couleurs nationales. Depuis 1990, l'ISA s'est lancée dans la quête de l'olympisme. Après avoir échoué à plusieurs reprises, la décision a été prise le 3 août 2016 par le CIO d'inclure 5 nouvelles disciplines, dont le surf, aux JO-2020 à Tokyo (Japon). Ils ont eu lieu à Biarritz du 20 au 28 Mai 2017 à l'occasion des World Surfing Games.

Annexe 4 : Définition des critères de jugement du surf en compétition

- Les manœuvres radicales

Une manœuvre sera jugée radicale par l'endroit où elle est exécutée : celui à privilégier sera la section la plus critique de la vague, la plus proche du point de déferlement (la plus grande verticalité, déverse le maximum d'énergie, délivre le maximum de vitesse), offrant au compétiteur l'opportunité de mettre en avant son degré d'engagement, ses qualités de puissance et de contrôle, son habileté technique, et la qualité du « timing » avec la vague.

- Le contrôle

Il précise les limites de la radicalité. Il doit exclure les déséquilibres, gommer les mouvements parasites et surtout mettre l'accent sur la fiabilité des manœuvres qui pour être prises en compte par la notation doivent être totalement exécutées. Une manœuvre exécutée à 90% et terminée par une chute ne sera pas notée (toutefois dans le cadre d'un tube profond le surfer qui sort du tube mais qui chute à la sortie sera pénalisé pour manque de contrôle, mais son surf dans le tube sera valorisé).

- **Rechercher la vitesse maximale** va permettre de rendre les manœuvres plus explosives, plus nombreuses grâce à un enchaînement plus rapide et de rallonger la distance surfée.

- **Le flow (fluidité)** est une notion nouvelle. Le flow a remplacé le style jugé trop subjectif. C'est la fluidité du surfeur développée entre et pendant l'exécution des manœuvres. Le surfeur doit sortir d'un virage avec plus de vitesse qu'à son arrivée. Les manœuvres exécutées doivent être bien choisies en fonction du « timing » de la vague.

- **Innovation et créativité** seront prises en compte en fonction de la réalité de la prise de risque.

- **Le choix des vagues**, en privilégiant les plus grosses, qui permettront de mettre en avant ses qualités de puissance, et de surfer sur la plus longue distance fonctionnelle pour étoffer le potentiel de points. A la fin de la série on retient en général les trois meilleures vagues (parfois quatre ou cinq) de chaque concurrent sur chaque feuille de juge ce qui permet un classement des concurrents de la série. Les premiers classés accèdent au tour suivant, les autres sont éliminés du tableau principal (et inclus dans un tableau secondaire de repêchage) et ainsi de suite jusqu'à la finale.

Le surfeur doit donc assurer la meilleure prestation possible sur chaque vague, à chaque série de la compétition, plusieurs fois par jour et ce pendant plusieurs jours.

Annexe 5 : Les contraintes environnementales

1. Les conditions climatiques

a) La température de l'eau

Contrairement à d'autres sports en milieu marin, comme l'open water swimming (natation en pleine mer), les surfeurs ne sont que peu exposés aux risques d'hypothermie, du fait des destinations privilégiées et de l'équipement (combinaison).

Dans les eaux chaudes fréquemment rencontrées, la déshydratation, le taux de sudation et la température corporelle augmentent simultanément avec la température de l'eau (198).

b) Les courants

En fonction des saisons, notamment en automne où les grosses houles s'enchaînent sur la côte Atlantique, les accidents créés par ces courants ne sont pas rares, comme au large de la plage de Mawgan Porth (Angleterre) où 3 surfeurs ont péri en octobre 2014, avec en parallèle ce week-end là, plus de 10 accidents similaires sur la côte basque (199).

c) Les dangers vus du ciel

Ils concernent a minima les orages et le risque de foudroiement, mais surtout les rayonnements UV nocifs du soleil. En effet, les surfeurs cumulent les facteurs de risque de mélanome (exposition intense, intermittente et répétée, et ce dès le plus jeune âge, dans un environnement réfléchissant).

En Australie, dans "le paradis des surfeurs" qu'est le Queensland, le taux de cancers cutanés est le plus élevé du monde (200), et en 2e position derrière la Nouvelle-Zélande pour les mélanomes. Une campagne ciblée de sensibilisation a même été mise en œuvre en 2009 et 2010 par la ligue contre le cancer en partenariat avec surf prévention, pour sensibiliser les jeunes surfers : « surfez couverts » (201) moyennant des interventions dans les écoles de surf.

En Australie en 2011, c'est le Cancer Institute NSW qui sponsorisera l'épreuve féminine de longboard ASP de la division LQS (Longboard Qualifying Series) dans le cadre de leur campagne « Dark Side of Tanning », « le côté obscur du bronzage » (202). Dans ce registre une société australienne propose une combinaison de surf blanche zébrée de raies noires protégeant, d'une part, la peau et offrant, d'autre part, un camouflage imitant les poissons venimeux censés effrayer les requins dont les attaques des derniers mois en Australie et à l'île de la Réunion ont été fortement médiatisées.

2. Une faune hostile

Quelques mots sur les **animaux marins**, un sujet d'actualité dominé par les attaques de requin, notamment sur l'île de la réunion, mais le surfeur est menacé par bien d'autres espèces.

Elles sont surtout présentes dans la zone tropicale indo-pacifique, et leur venin (mélange complexe de polypeptides et d'enzymes) cause le plus souvent des réactions locales types érythèmes ou urticaire, mais aussi de violentes réactions générales (203–205).

Les risques d'envenimation atteignent les nageurs, les plongeurs, les pêcheurs et les surfeurs et relèvent de trois mécanismes : contact cutané, piqûre et morsure. Les venins sont surtout neurotoxiques, cardiotoxiques et paralysants (206). Exemple :

– **L'envenimation par contact cutané** est due aux cellules urticantes (ou nématocystes).

Les animaux responsables sont les méduses, les coraux et les anémones de mer. Parmi lesquels on peut citer *Physalia physalis*, une espèce de méduse située en Atlantique (aussi appelée galère portugaise) et dans le Pacifique. Le simple contact avec les tentacules provoque un érythème, puis une réaction urticarienne, puis des vésicules. Un malaise général est possible avec des crampes musculaires, des céphalées, une tachycardie, et une hypersécrétion nasale et lacrymale.

Ces symptômes régressent en quelques jours. Cependant, un risque léthal par noyade est possible en raison d'une syncope consécutive à la douleur. A titre anecdotique, ces méduses sont à l'origine de la découverte de l'anaphylaxie en 1902 par Richet et Portier, en étudiant le venin de *Physalis*. Le sérum anti-*Chironex fleckerii* (méduse) n'est disponible qu'en Australie.

Les cuboméduses sont de petite taille, mais très dangereuses pour l'homme. *Chironex fleckerii* possède un venin myotoxique, neurotoxique et hémolytique (207). Les brûlures provoquent un érythème avec un purpura et un œdème pouvant persister plusieurs semaines, avec des céphalées, une asthénie, des lipothymies, et un risque de collapsus cardio-respiratoire.

Les anémones tropicales (*Actinodendron glomeratum*) sont très dangereuses, provoquant des brûlures avec nécroses (208). Outre l'ablation la plus soignée possible des débris de tentacules, le traitement général nécessite parfois une assistance respiratoire.

– **L'envenimation par piqûre** survient avec les mollusques. Parmi les plus venimeux, il y a de nombreuses espèces de coquillages, en particulier des cônes. Leurs venins sont cardiotoxiques, vaso-actifs et paralysants, car ils bloquent la transmission neuro-musculaire allant jusqu'à la paralysie progressive avec des troubles de la vision et de la déglutition. Au maximum, peut survenir une paralysie respiratoire, responsable de décès dans 1 à 10 % des cas.

Les raies à aiguillons vivent enfouies sur le fond, ce qui les rend presque invisibles. Le dard est enfoncé grâce à la musculature puissante de leur queue. La douleur est immédiate et intense, puis apparaît un œdème, une nécrose puis une hypotension (209), avec évolution possible vers le décès.

La piqûre des poissons pierre engendre des symptômes généraux importants du fait des propriétés hémolytiques, neurotoxiques et cardiotoxiques du venin qu'il injecte. Il peut apparaître des nausées, des diarrhées, une hypothermie, des paralysies, une bradypnée voire détresse respiratoire. L'évolution est fatale dans un quart des cas. Les signes locaux sont non négligeables : œdème, avec marbrures ou cyanose, gagnant la région atteinte, nécrose apparaissant secondairement aux points d'injection. La surinfection est fréquente (210).

On pourra également citer également les oursins, étoiles de mer et certains poissons (raies, vives, rascasses, pterois, silures, poissons-chats).

– **L'envenimation par morsure** cause des plaies graves, parfois mortelles, notamment celles dues aux requins. Les accidents surviennent essentiellement près de la côte, habituellement à moins de 35 mètres du rivage, et en surface. Ces animaux prennent les planches de surf pour des proies, causant des plaies profondes et délabrantes. Le traitement nécessite de prévenir l'hémorragie, le choc, et l'infection.

Certains serpents de mer, vivant dans les eaux chaudes, comme *Hydrophis*, ont des crochets contenant un venin neurotoxique, myotoxique et cardiotoxique. Le décès peut survenir au bout de plusieurs jours par insuffisance rénale ou plusieurs mois en raison d'une hyperkaliémie due à la rhabdomyolyse (211).

En Australie, il existe des sérums antivenimeux spécifique pour les cuboméduses, les poissons pierre et les serpents de mer (212).

Annexe 6 : Fiche technique et mode d'emploi du TK100 JUMPMETRE pour mesurer la détente verticale des membres inférieurs

Caractéristiques :

- Mesure de 5 à 99 cm par incrément de 1 cm
- Tapis caoutchouc
- Affichage digital de la performance en cours et de la meilleure performance
- Pile Lithium : CR2477
- Dimensions du TK100 : 13.7 cm x 8 cm x 3.5 cm
- Dimensions du tapis : 38 cm de dia. x 3 mm
- Poids du TK100 : 200 g
- Poids du tapis : 400 g

Mode d'emploi :

1. Préparation

Insérer l'embout de la corde dans le tapis en caoutchouc Fixer fermement la ceinture autour de votre taille afin qu'elle ne bouge plus. Ensuite, tenez vous droit au centre du tapis. Tournez doucement la poulie dans le sens des flèches afin d'étirer la corde puis sautez.

2. Méthode de mesure

Tournez la poulie dans le sens des flèches afin d'étirer la corde, appuyer sur le bouton ON/C puis sautez, appuyer sur le bouton « set ». La mesure du premier saut est enregistrée, l'écran indique « 0 cm » Tournez à nouveau doucement la poulie dans le sens des flèches afin d'étirer la corde puis sautez une deuxième fois. La mesure de votre second saut s'affiche. Après 5 secondes environ, l'écran affiche la mesure du saut le plus haut. Si vous souhaitez réessayer, suivez la même procédure après avoir préalablement remis l'écran à zéro en appuyant sur le bouton ON/C. Si vous appuyez sur ON/C après chaque saut, aucune valeur « haute » ne vous sera indiquée. Il n'y a pas de bouton OFF sur cet appareil. L'alimentation est automatiquement coupée si l'appareil n'est pas utilisé après 1 minute.

Annexe 7 : Le classement fédéral national : décryptage

Seuls les classements des épreuves inscrites au championnat de France Open et Espoir sont pris en compte (213). En fin d'année 0, la somme des 4 meilleures épreuves est calculée. En année 1, le total de l'année 0 est reporté et réparti en 4 épreuves initiales

Jusqu'à cette année, à chaque nouvelle compétition, on retirait un T0 en le remplaçant par le nouveau résultat. Il s'en suivait de très fortes fluctuations dans le classement qui ne reflétaient pas la réalité des niveaux. L'intérêt de répartir de façon homogène les résultats de l'année précédente est que dans le cas où le surfeur a fait une bonne performance l'année 0, s'il n'y a pas ce phénomène de lissage, quand on lui retire un résultat, il perdra un bon score et se retrouvera très pénalisé. Les calendriers étant très fluctuants et hétérogènes on ne peut pas se permettre de retirer une épreuve de l'année passée et de la remplacer par une nouvelle pour avoir un classement glissant tout au long de l'année.

Au lieu de supprimer les T0, les nouveaux résultats seront ajoutés à la suite, et le calcul des points du classement se fera sur les 4 meilleurs résultats, en y incluant ces T0.

Les nouveaux résultats seront comptabilisés seulement s'ils sont supérieurs à T0. Ainsi, un compétiteur qui a fait une bonne saison 0 ne se verra pas pénalisé lorsqu'il participera à des compétitions régionales, départementales en début d'année.

Cas d'un surfeur blessé, qui n'a pas pu participer à des compétitions au cours de l'année :

- le surfeur participe à 0 compétition : une commission déterminera si le compétiteur est recredité ou non de points pour la saison suivante.
- le surfeur a participé à au moins une compétition : on lui conserve son résultat + T0
- à partir de 2 compétitions, on retombe dans le cas général.

Annexe 8 : Tableau du recueil de données par athlète

Noms	Date	Assesment natio	Age et caractéristiques biométriques					Caractéristiques physiologiques à l'effort									
			Taille	poids	age	IMC	MG %	VO2 max	VO2SV1	VO2SV2	PMA	P/M SV1	P/M SV2	%FC SV1	%FC SV2	Détente	
1	19/09/13	45	165	53,5	15	19,65	5,24	56,7	35,6	43,2	3,08	2,24	2,61	80,52	91,05	44	
	30/09/14	28	165	57	16	20,94		63	39	49	2,98	2,36	2,7	90	90,96	52	
	20/11/15	16	166	59	17	21,41	6	57,5	33,3	43,4	3,3	2,2	2,96	78,94	96,84	53	
2	12/09/13	70	174	60	15	19,82	4,65	56,2	43,6		2,41	2,25		93,18		43	
3	17/11/15	103	178	66,9	15	21,11	7,82	47,1	32,3	41,1	2,69	1,86	2,39	95,58	98,89	43	
4	29/05/15	27	178	78	19	24,62	11,9	45,5	32,4	43,9	2,56	2,11	2,5	85,32	95,65	50	
5	18/11/11	47	167	55,4	15	19,86	8,44	64	39,3	51	3,15	2,27	2,81	82	90,5	44	
6	13/10/15	60	172	57,4	15	26,29	5,33	62,4	23,8	35,7	2,52	1,48	2	78,94	91,05	48	
7	28/03/12	16	175	62,2	15	20,31	9,5	48,9	40,6	40,3	2,57	2,25	2,49	93,37	98,89	47	
	23/05/13	15	178	66	17	20,83	7,65	52,5	40,4	43,7	2,65	2,42	2,57	88,7	95,48	48	
	09/10/10	26	174	63,7	16	21,04	8,74	63,4	35,1	44,4	2,74	1,96	2,35	86,22	95,4		
8	28/03/12	12	175	64,4	18	21,03	8,84	57,3	45,8	52,4	2,63	2,32	2,56	94,02	98,36	58	
	23/05/13	20	175	66,8	19	21,81	7,88	61,2	45,8	52,4	2,69	2,24	2,47	92,93	98,36	51	
	06/10/11	106	179	64,7	15	20,19	9,69	55,3	37,2	44	2,78	1,93	2,39	89,79	96,93	44	
10	16/09/10	54	182	69,7	17	21,04	10,94	52,1	37,9	42	2,72	2,08	2,43	88,77	94,11		
	11/10/11	35	183	76	18	22,69	12,85	50,1	37	42,4	2,5	2,1	2,3	92,74	96,89	43	
11	09/09/10	32	164	49,3	15	18,33	7,37	63,9	37,8	43,2	3,18	1,92	2,33	92,11	96,55		
	11/10/11	28	173	59	16	19,71	6,92	61,5	35,1	44,1	2,88	2,03	2,45	88	96,5	46	
	28/03/12	21	175	60,6	16	19,79	6,83										
	23/05/13	9	178	66	17	20,83	4,97	64	40,1	49,7	3,25	2,64	3,13	92,11	96,55	57	
12	16/01/15	27	181	71,4	19	21,79	5,76	58,1	31,2	42,7	3,15	2,17	2,66	90,64	96,55	53	
	20/09/10	24	172	64	20	21,63	10,74	62,3	47,5	56,9	3,28	2,65	3,12	89,13	97,28		
	21/06/11	12	172	64,8	21	21,90	11,9	53,1	39,9	45,1	3,08	2,31	2,77	88,43	97,68		
	20/04/12	15	172	63,9	22	21,60	9,45	59,1	35,9	52,9	3,28	2,03	2,89	80,11	96,02	50	
	20/06/14		172	64,6	24	21,84	9,38									41	
	21/05/15	19	173	66,6	25	22,25	8,75	61,1	44,8	53,4	3,37	2,77	3,15	91,62	98,32	47	
13	14/09/10	167	169	64,7	16	22,65	10,89	53,9	39	45	2,73	2,1	2,42	86,5	95		
14	08/10/12	110	168	54,16	15	19,19	6,15	56,3	35,9	43,8	2,5	1,94	2,22	87,36	95,26	52	
15	30/09/14	72	173	53,8	15	17,98	4,55	72,5	41,2	46,8	3,05	2,22	2,59	87,56	92,74	40	
16	17/11/15	120	168	50,2	15	17,79	4,81	46,3	30,8	36,2	2,78	1,89	2,29	84,69	93,87	38	
17	17/10/14	139	169	58,2	15	20,41		52,2	39,4	45,2	2,88	2,06	2,41	92,64	98,42	41	
	27/11/15	83	170	62,1	16	21,49	6,65	51,1	34,5	41,4	2,57	2,01	2,41	92,51	98,39	47	
18	08/10/12	183	172	54,2	15	18,32	3,93	59,6	43,3	45,1	3,13	1,84	2,3	90,5	95	44	
	16/09/13	37	175	58,9	16	19,23	3,06	54,1	36,9	48,3	3,13	2,11	2,45	92,63	98,42	39	
19	10/10/14	82	170	63,6	15	22,01	7	52,5	38,1	42,4	2,77	2,14	2,38	90,6	97,23	44	
20	23/06/15	3	176	72,6	26	23,44	8,24	48,2	42,2	44	2,96	2,47	2,75	98,36	100	59	
21	15/10/10	9	177	67,4	22	21,51	7,69	53,3	38,8	45,6	2,89	2,37	2,74	92,63	98,42		
	23/01/15	10	177	67,7	27	21,61	4,74	47,6	26,7	36,8	2,91	1,86	2,53	87,24	96,93	57	
22	04/10/11	134	175	56,3	15	26,29	10,5	48,6	29	37,6	2,66	1,59	1,95	80,21	88,77	40	
	09/10/12	41	176	62,7	16	20,24	6,69	57,4	43,3	51	2,74	2,41	2,66	95,33	98,44	50	
23	17/11/15	189	176	61,3	15	19,79	7,82	55	39,6	44,5	2,52	2,12	2,36	86,74	93,37	45	

Noms	Date	assement natio	Age et caractéristiques biométriques					Caractéristiques physiologiques à l'effort								
			Taille	poids	age	IMC	MG %	VO2 max	VO2SV1	VO2SV2	PMA	P/M SV1	P/M SV2	%FC SV1	%FC SV2	Détente
24	11	71	158	51	15	20,43	9,48	65,7	36,6	43,9	2,94	1,96	2,25	85,23	93,33	43
	28/03/12	36	159	53	16	20,96	7,31	62,5	35,9	45,3	3,11	2,16	2,64	87,61	93,33	43
	25/11/13	21	161	55	17	21,22	7,47	60,8	34,7	46,1	3,27	2,09	2,63	85,43	93,68	52
25	21/09/10	36	179	70,6	19	20,63	9,42	47,3	35,1	44,9	2,92	2,05	2,76	86,59	96,64	
26	09/09/10	420	185	73,5	15	21,48	14,92	52,3	30,4	43,9	2,38	1,63	2,04	87,24	95,4	
	03/10/11	42	185	75,6	16	22,09	12,4	50,4	30,4	38,6	2,66	1,6	2,06	87,24	95,4	44
27	28/05/15	6	180	69	17	21,30	5,76	52	44,5	49,3	2,75	2,6	2,75	95,33	100	50
28	13/10/11	53	177	61,2	15	19,53	10,74	54,8	39	47,2	2,61	2,04	2,36	91,19	96,89	49
	28/05/15	23	190	77,9	19	21,58	9,34	43,9	33,9	32,1	2,5	2,05	2,37	94,02	98,36	
29	06/01/15	47	171	60,7	16	20,76	8	52,4	33,8	40,2	2,5	1,66	2,16	84,97	95,33	43
30	30/09/14	84	169	62,2	15	21,78	6	65,3	39,6	44,9	2,82	2,01	2,09	88,43	94,79	40
31	29/11/12	101	176	62,3	15	20,11	7,46	53	31,6	46,2	2,66	1,77	2,33	87,24	95,4	55
32	14/10/11	56	167	65,2	20	23,38	14,05	57,9	41,4	49,6	2,69	2,23	2,53	94,21	96,84	53
33	06/10/11	91	178	59,1	16	18,65	8,64	58,9	38,7	43,3	2,79	1,94	2,2	87,56	92,74	44
34	11/12/12	91	162	47,9	15	18,25	4,34	46	32	37,3	2,6	1,77	2,19	81,57	92,63	48
35	30/04/15	20	176	62,1	19	20,05	8,89	59,3	41,6	49,4	2,9	2,17	2,66	86,69	95,07	
36	09/09/10	66	167	63,7	16	22,84	8,5	57,2	42	46,7	2,82	2,11	2,43	87,56	93,78	
	04/10/11	29	168	65,9	17	23,35	8,77	61,1	44,2	46,8	3,11	2,2	2,57	88	93,5	49
	03/12/12	46	169	67,6	18	23,67	5,91	58,5			3,1			88,26	93,87	53
37	29/11/12	49	166	55,3	15	20,07	6,06	61,1	30,2	45,8	2,98	1,89	2,62	87,21	93,33	56
	25/11/13	35	170	61,3	16		7,45	53,4	30,2	45,8	2,85	1,71	2,36	89,04	93,33	
	20/11/14	64	173	66,8	17	22,32	9,63	58	31,2	43,3	3,59	2,24	3,14	83,25	92,11	53
	09/01/15	132	173	67,9	18	22,69	6,8	54,7	38,5	46,6	3,53	2,65	3,09	87,24	95,4	
38	23/06/11	14	175	74,1	23	24,20	11,89	52,7	39,9	44,4	2,97	2,43	2,7	90,5	95,53	
39	06/01/15	259	178	60,3	16	19,03	6,81	42,8	26	34,9	2,41	1,5	2	83,42	95,58	54
40	11/10/10	27	175	72	19	23,51	11,52	51,3	37,6	45,4	2,84	2,29	2,63	92,51	96,79	
	13/10/11	25	175	71	20	23,18	11,93	53,6	45	46	2,74	2,53	2,74	92,51	98,39	60
	16/09/13	20	175	72	22	23,51	9,76	46,1	37,6	45,4	2,84	2,29	2,63	85,79	97,15	62
41	23/01/14	101	152	39,6	15	17,14	4,84	56,2	33,6	41,5	2,9	2,14	2,52	85,5	96,5	37
	04/12/15	86	160	46,4	16	18,13	5,08	50,6	36,5	43,6	2,9	2,04	2,47	88,77	96,79	41
42	14/11/13	12	172	65	17	21,97	8,95	49,9	34,9	42,4	2,61	2	2,38	88,3	97,23	57
43	11/10/12	77	169	57	16	19,96	7,6	51,7	39,5	44,2	2,63	2	2,36	92,93	97,28	50
	14/11/13	59	173	62,2	17	20,78	7,55	62,9	33,9	44,6	2,81	1,84	2,41	86	93,74	57
44	03/12/12	10	165	68,4	21	25,12	14,04	44,3	33,3	38,9	2,63	2,19	2,41	88,77	95,72	
45	20/09/13	26	171	54,6	15	18,67	7,54	63,4	37,7	44,1	2,83	2,01	2,47	88,94	95,26	54
46	14/09/10	247	171	58,7	16	20,07	10,89	62,1	37,4	48,5	2,64	1,78	2,29	87,7	95,72	
	14/11/11	185	171	60,5	17	20,69	10,61	52,6	44,5	46,9	2,8	2,56	2,72	94,11	98,39	51
47	04/10/11	15	175	64,7	26	21,13	7,83	51,6	41,6	45,5	2,93	2,39	2,78	91,84	97,28	61
	09/10/12	14	175	67,5	27	22,04	8,45	51,6	41,6	45,5	2,81	2,29	2,66	88,94	94,21	66
48	16/09/10	23	178	74,7	18	23,58	9,7	57,7	38,6	43,6	2,67	2,2	2,47	92,93	98,36	
	04/10/11	22	179	74,5	19	23,25	10,96	54,6	30,8	41,5	2,75	2,01	2,41	83,79	94,41	60
	08/10/12	31	179	72,5	20	22,63	7,6	56	36,1	42,8	2,89	2,2	2,55	90,21	95,65	61
	20/11/14	74	180	72,9	23	22,50	6,99	53	36,9	42,9	3,02	2,45	2,81	91,71	98,89	53

Annexe 9 : Paramètres étudiés rangés par classement

Classement	Age et caractéristiques biométriques					Caractéristiques physiologiques à l'effort								
	Taille	Poids	Age	IMC	MG	VO2max	VO2SV1	VO2SV2	PMA	P/M SV1	P/M SV2	%FcmavSV1	%FcmavSV2	Détente
3	176	72,6	26	23,44	8,24	48,2	42,2	44	2,96	2,47	2,75	98,36	100	59
6	180	69	17	21,30	5,76	52	44,5	49,3	2,75	2,6	2,75	95,33	100	50
9	177	67,4	22	21,51	7,69	53,3	40,1	49,7	2,89	2,64	3,13	92,63	98,42	
9	178	66	17	21,55	4,97	64	38,8	45,6	3,25	2,37	2,74	92,11	96,55	57
10	165	68,4	21	25,12	9,3	44,3	26,7	36,8	2,63	1,86	2,53	88,77	95,72	
10	177	67,7	27	21,61	4,74	47,6	33,3	38,9	2,91	2,19	2,41	87,24	96,93	57
12	172	64,8	21	21,16	11,9	53,1	45,8	52,4	3,08	2,32	2,56	88,43	97,68	61
12	175	64,4	18	21,52	8,84	57,3	39,9	45,1	2,63	2,31	2,77	94,02	98,36	58
12	172	65	17	21,97	4,53	49,9	34,9	42,4	2,61	2	2,38	88,3	97,23	43
13	181	71,4	19	21,79	5,76	58,1	39,9	44,4	3,15	2,43	2,7	90,64	96,55	53
14	175	74,1	23	24,20	11,89	52,7	41,6	45,5	2,97	2,29	2,66	90,5	95,53	60
14	175	67,5	27	22,04	8,45	51,6	40,4	43,7	2,81	2,42	2,57	88,94	94,21	66
15	175	64,7	26	21,62	7,83	51,6	35,9	52,9	2,93	2,03	2,89	91,84	97,23	60
15	172	63,9	22	21,60	9,45	59,1	41,6	45,5	3,28	2,39	2,78	80,11	96,02	50
15	178	66	17	20,83	7,65	52,5	33,3	43,4	2,65	2,2	2,96	88,7	95,48	57
16	175	62,2	15	20,31	9,5	48,9	40,6	40,3	2,57	2,25	2,49	93,37	98,89	47
16	166	59	17	21,45	6	57,5	44,8	53,4	3,3	2,77	3,15	78,94	96,84	53
19	173	66,6	25	22,25	8,75	61,1	45,8	52,4	3,37	2,24	2,47	91,62	98,32	47
20	175	72	22	23,51	7,76	46,1	41,6	49,4	2,84	2,17	2,66	85,79	97,15	48
20	176	62,1	19	20,05	8,89	59,3	37,6	45,4	2,9	2,29	2,63	86,69	95,07	43
21	161	55	17	20,45	7,47	60,8			3,27			85,43	83,68	52
22	179	74,5	19	24,61	10,96	54,6	34,7	46,1	2,75	2,09	2,63	83,79	94,41	46
23	178	74,7	18	23,58	9,7	57,7	30,8	41,5	2,67	2,01	2,41	92,93	98,36	
23	190	77,9	19	21,58	9,34	43,9	33,9	32,1	2,5	2,05	2,37	84,97	95,33	50
24	172	64	20	21,63	10,74	62,3	38,6	43,6	3,28	2,2	2,47	89,13	97,28	
25	175	71	20	23,72	11,93	53,6	47,5	56,9	2,74	2,65	3,12	92,51	98,39	49
26	174	63,7	16	21,04	8,74	63,4	45	46	2,72	2,53	2,74	86,22	95,4	
26	171	54,6	17,5	18,67	7,54	63,4	35,1	44,4	2,83	1,96	2,35	88,94	95,26	54
27	175	72	19	23,51	11,52	51,3	37,7	44,1	2,84	2,01	2,47	92,51	96,79	
27	178	78	19	24,62	11,9	45,5	32,4	43,9	2,56	2,11	2,5	85,32	95,65	
28	173	59	16	21,94	6,92	61,5	31,2	42,7	2,88	2,17	2,66	88	96,5	50
28	165	57	16	20,94	X	63	37,6	45,4	2,98	2,29	2,63	90	98,96	52
29	168	65,9	17	22,80	8,77	61,1	39	49	3,11	2,36	2,7	88	93,5	44
30	175	66,8	19	21,81	8,32	61,2	35,1	44,1	2,69	2,03	2,45	92,93	98,36	51
31	179	72,5	20	25,38	7,6	56	44,2	46,8	2,89	2,2	2,57	90,21	95,65	61
32	164	49,3	15	18,33	7,37	63,9	36,1	42,8	3,18	2,2	2,55	92,11	96,55	
35	183	76	18	22,69	12,85	50,1	37,8	43,2	2,5	1,92	2,33	92,74	96,89	55
35	170	61,3	16	21,21	7,45	53,4	37	42,4	2,85	2,1	2,3	89,04	93,33	39
36	179	70,6	19	20,63	9,42	47,3	30,2	45,8	2,92	1,71	2,36	86,59	96,64	
36	159	53	16	16,00	7,31	62,5	35,9	45,3	3,11	2,16	2,64	87,61	93,33	43
37	175	58,9	16	19,23	3,06	54,1	35,1	44,9	3,13	2,05	2,76	92,63	98,42	44
41	176	62,7	16	20,24	6,69	57,4	36,9	48,3	2,74	2,11	2,45	95,33	98,44	50

Classement	Age et caractéristiques biométriques					Caractéristiques physiologiques à l'effort								
	Taille	Poids	Age	IMC	MG	VO2max	VO2SV1	VO2SV2	PMA	P/M SV1	P/M SV2	%FcmxSV1	%FcmxSV2	Détente
42	185	75,6	16	22,09	12,4	50,4	43,30	51,00	2,66	2,41	2,66	87,24	85,4	43
45	165	53,5	15	18,73	5,24	56,7	30,4	38,6	3,08	1,6	2,06	80,52	91,05	57
46	169	67,6	18	22,33	5,91	58,5	35,6	43,2	2,98	2,24	2,61	88,26	93,87	
47	167	55,4	15	19,86	8,44	64			3,15			82	90,5	49
47	171	60,7	16	20,76	8	52,4	39,3	51	2,5	2,27	2,81	84,97	95,33	43
49	166	55,3	15	20,07	6,06	61,1	33,8	40,2	2,63	1,66	2,16	87,21	93,33	53
53	177	61,2	15	21,94	10,74	54,8	30,2	45,8	2,61	1,89	2,62	91,19	96,89	48
54	182	69,7	17	24,99	10,94	52,1	39	47,2	2,72	2,04	2,36	88,77	94,11	
56	167	65,2	20	23,38	14,05	57,9	37,9	42	2,69	2,08	2,43	94,21	96,84	53
59	173	62,2	17	20,78	7,55	62,9	41,4	49,6	2,81	2,23	2,53	86	93,74	43
60	172	57,4	15	26,29	5,33	62,4	33,9	44,6	2,52	1,84	2,41	78,94	91,05	48
64	173	66,8	17	21,81	9,63	58	23,8	35,7	3,59	1,48	2	83,25	92,11	53
66	167	63,7	16	21,04	8,5	57,2	31,2	43,3	2,82	2,24	3,14	87,56	93,78	
70	174	60	15	21,26	4,65	56,2	42	46,7	2,41	2,11	2,43	93,18	90,02	
71	158	51	15	20,43	9,48	65,7	43,6		2,94	2,25		85,23	93,33	44
72	173	53,8	15	17,98	4,55	72,5	36,6	43,9	3,05	1,96	2,25	87,56	92,74	40
74	180	72,9	23	23,53	6,99	53	41,2	46,8	3,02	2,22	2,59	91,71	98,89	53
77	169	57	16	20,20	13,52	51,7	36,9	42,9	2,6	2,45	2,81	92,93	97,28	53
82	170	63,6	15	22,01	7	52,5	39,5	44,2	2,77	2	2,36	90,6	97,23	40
83	170	62,1	16	21,49	6,65	51,1	38,1	42,4	2,57	2,14	2,38	92,51	98,39	47
84	169	62,2	15	21,78	6	65,3	34,5	41,4	2,82	2,01	2,41	88,43	94,79	38
86	160	46,4	16	18,13	5,08	50,6	39,6	44,9	2,9	2,01	2,09	88,77	96,79	47
91	178	59,1	16	18,65	8,64	58,9	36,5	43,6	2,79	2,04	2,47	87,56	92,74	44
91	162	47,9	15	18,25	4,34	46	38,7	43,3	2,66	1,94	2,2	81,57	92,63	50
101	176	62,3	15	20,11	7,46	53	32	37,3	2,5	1,77	2,19	87,24	95,4	48
101	152	39,6	15	17,14	4,84	56,2	31,6	46,2	2,9	1,77	2,33	85,5	96,5	37
103	178	66,9	15	21,11	7,82	47,1	33,6	41,5	2,69	2,14	2,52	95,58	98,89	43
106	179	64,7	15	20,19	9,69	55,3	32,3	41,1	2,78	1,86	2,39	89,79	96,93	40
110	168	54,16	15	19,19	6,15	56,3	37,2	44	3,13	1,93	2,39	87,36	95,26	52
120	168	50,2	15	17,79	4,81	46,3	35,9	43,8	2,78	1,94	2,22	84,69	93,87	38
132	173	67,9	18	22,69	6,8	54,7	30,8	36,2	3,53	1,89	2,29	87,24	95,4	45
134	175	56,3	15	26,29	10,5	48,6	38,5	46,6	2,66	2,65	3,09	80,21	88,77	40
139	169	58,2	15	20,41		52,2	29	37,6	2,88	1,59	1,95	92,64	98,42	41
167	169	64,7	16	22,65	10,89	53,9	39,4	45,2	2,73	2,06	2,41	86,5	95	
183	172	54,2	15	18,32	7,5	59,6	39	45	2,83	2,1	2,42	90,5	95	44
185	171	60,5	17	20,69	10,61	52,6	43,3	45,1	2,8	1,84	2,3	94,11	97,28	41
189	176	61,3	15	19,79	7,82	55	44,5	46,9	2,52	2,56	2,72	86,74	93,37	54
247	171	58,7	16	18,53	10,89	62,1	39,6	44,5	2,64	2,12	2,36	87,7	95,72	
259	178	60,3	16	19,03	6,81	42,8	37,4	48,5	2,41	1,78	2,29	83,42	95,58	41

Annexe 10 : Programme d'entraînement annuel du pôle France et Espoir



Annexe 11 : Type de séances en fonction des intensités

PERIODE : du XX/XX au XX/XX/2009

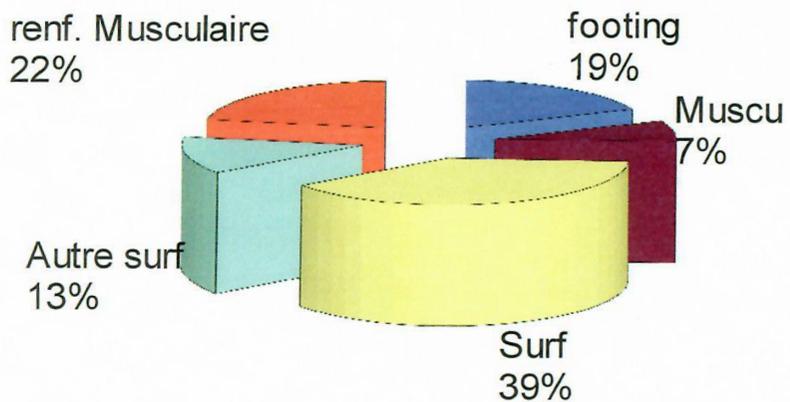
MOYEN D'ENTRAINEMENT

	séances	%
footing	10	19%
Muscu	4	7%
Surf	21	39%
Autre surf	7	13%
autre (VTT)	0	0%
renf. Musculaire	12	22%
total	54	

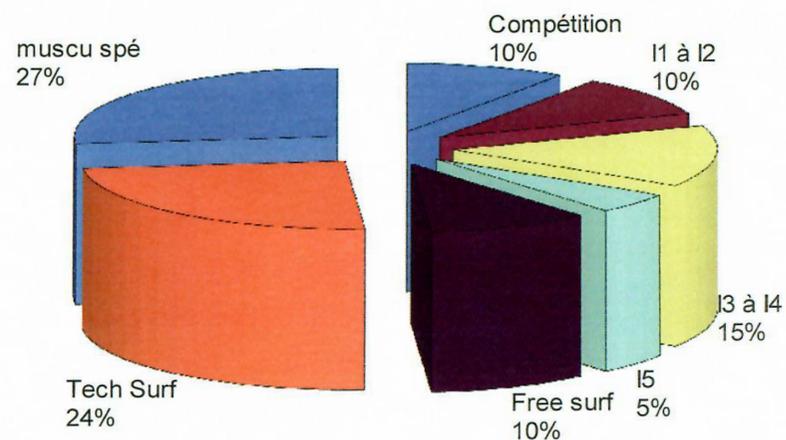
INTENSITE SEANCE SURF

	seances	%
Compétition	4	10%
I1 à I2	4	10%
I3 à I4	6	15%
I5	2	5%
Free surf	4	10%
Tech Surf	10	24%
muscu spé	11	27%
total	41	

REPARTITION DES MOYENS D'ENTRAINEMENT



REPARTITION PAR INTENSITE séances Surf



Caractéristiques de ce type de séance

Temps d'effort de 30 à 90 minutes
 Intensité sous-maxima, entre 40% et 70% de PMA

Effort continu
 Concentration en lactate inférieure à 2mMoles

Objectif n°1 : accumuler des heures de travail en surf.

Objectif n°2 : Base de travail des cycles de récupération.

Objectif n°3 : Développement de la vascularisation de la musculature spécifique.

SEANCE	Série	Répat	tps de W	Intens de W	tps de Récup série / bloc	Récup	Intens de Récup	Lieu	Tot tps de W	Observations
N°1	1	1	max 90'	40 à 70%	pas de récup	/	/	plate/vague	90'	Changer de support : planche longue, courte, lourde
N°2	1	1	30'	40 à 70%	pas de récup	/	/	plate/vague	30'	possibilité de faire de la muscu spécifique : poids
N°3	1	2	20'	70%	5'	active	40%	plate/vague	40'	dans les manches, sandows...
N°4	1	3	15'	70%	3'	active	40%	plate/vague	45'	Toujours intégrer un travail technique à ces séances
N°5	1	4	10'	70%	2'	active	40%	plate/vague	40'	
N°6	1	5 à 7	7'	70%	2'	active	40 à 60%	plate/vague	35 à 40'	

Temps effectif de travail à l'intensité cible

INTENSITE 1, endurance continue

Caractéristiques de ce type de séance

Temps d'effort long et fractionné
 Intensité sous-maxima comprise entre 70% et 85% de PMA

Ce travail correspond à la zone de transition aérobie/anaérobie

La récupération doit être active

Concentration en lactate comprise entre 2 et 4mMoles

Objectif n°1 : développer le travail en surf.

Objectif n°2 : Développement de l'activité enzymatique aérobie

Objectif n°3 : amélioration du seuil, économie dans l'utilisation du glyco-gène musculaire

SEANCE	Série	Répat	tps de W	Intens de W	tps de Récup série / bloc	Récup	Intens de Récup	Lieu	Tot tps de W	Observations
N°7	3	2	5'	70 à 75%	1/4'	active	40%	plate/vague	30'	>2 possibilités : favoriser le nombre de vagues surfées
N°8	3	3	4'	70 à 75%	1/3'	active	40%	plate/vague	36'	ou favoriser le temps de rame
N°9	1	8 à 10	3'	75 à 85%	1/30'	active	40%	plate/vague	24 à 30'	> Associer un travail technique/lactique/mental
N°10	3	4	2'	75 à 85%	1/15/2'	active	40%	plate/vague	24'	spécifique
N°11	4	4	1/30'	75 à 85%	1/3'	active	40%	plate/vague	20'	1/30 à 2' : temps rame+surf
N°12	2	10	30"	85%	30"/1'	active	60%	plate/vague	20'	1' : vague au bord ; temps rame+surf
N°13	4	10	30"	85%	30"/1'	active	60%	plate/vague	20'	lanc ou sans vague
N°14	4	10	30"	85%	30"/1'	active	60%	E plate	20'	
N°15	1	2	pyr 30" à 3'	80 à 85%	idem tps W	active	60%	E plate	21'	pyramide (30" - 1' - 1/30" - 2' - 2/30" - 3')
N°16	1	3	4x2'	pyr 70 à 85%	idem tps W	active	50%	E plate	24'	pyr (70% - 75% - 80% - 85%) pratique de rythme différent

Temps effectif de travail à l'intensité cible

Dès que le temps de travail devient inférieur à 2' et que la répétition de l'exercice augmente : intégrer le temps de travail sur la plage (coordination-recherche de vitesse- puissance...)

Autre alternative : faire l'exercice sur un autre support et un autre site de pratique (vélo, course à pied, lac, pas de vague...)

Fiche 2 entraînement surf xs

Caractéristiques de ce type de séance

INTENSITE 3, Puissance aérobie

Temps court et toujours fractionné
 Intensité sub-maxima comprise entre 85% et 95% de PMA
 Si l'on veut compter que l'on peut travailler à 95% de PMA, la stimulation anaérobie est très importante
 L'entraînement doit être composé de séances d'entraînement en intervalles entre 4 et 6 minutes
 Concentration en lactate aérobie
 Objectif n°1 : développer la puissance maxima aérobie de l'athlète
 Objectif n°2 : accumuler du travail spécifique sans trop de fatigue
 Objectif n°3 : amélioration du seuil, économie dans l'utilisation du glycochrome musculaire

SEANCE	Série	Repet	tps de W	Intens de W	tps de Récup	Récup	Intens de Récup	Lieu	Tot tps de W	Observations
N°17	1	5	5'	85%	5'	active	40 à 50%	plateau	25'	> Favoriser le nombre de vagues surfées ou le temps de rame
N°18	1	4	4'	85 à 95%	2'30"	active	40%	plateau	16'	>1 effort= environ surf + rame, et 1 récup=attente vague
N°19	2	8	1'	90%	1'15"	active	20%	plateau	16'	
N°20	2	6	1'	95%	30"	active	20%	plateau	12'	
N°21	4	3	30"	95%	30"	active	20%	plat	12'	
N°22	1	2	pyr 4' 2'30"	95%	30"	active	20%	plat	14'	pyramide (1 - 1'30" - 2 - 2'30" - 3) en eau plate
N°23	1	2	30" à 2'30"	90% à 95%	Item VI	active	20%	plat	15'	
N°24	3	3	2'	pyr 65 à 95%	1'	active	40%	plat	18'	pyr (85% - 90% - 95%) w surf, allure de course

attention il est important de contrôler l'intensité de ces séances, on ne dépassera pas 20' de w à 90% et fractionné

Caractéristiques de ce type de séance

INTENSITE 4, intensité de compétition : temps de série = rame intensive et surf

Temps court et toujours fractionné
 Intensité maxima, comprise entre 95% et 105% de PMA (puissance aérobie)
 La récupération doit être passive ou légèrement active
 C'est un entraînement en intervalles entre 4 et 6 minutes
 Concentration en lactate aérobie
 Objectif n°1 : apprentissage du rythme de compétition, entraînement spécifique, travail spécifique avec fatigue
 Objectif n°2 : modélisation de courses (chrono, jugement)
 Objectif n°3 : développer la puissance maxima aérobie de l'athlète
 Objectif n°4 : tolérance à la fatigue

SEANCE	Série	Repet	tps de W	Intens de W	tps de Récup	Récup	Intens de Récup	Lieu	Tot tps de W	Observations
N°25	1	6	2'30"	95 à 100%	8'	léger active	0 à 20%	vague	15'	>20 à 20" - temps effort lié au nombre de vague
N°26	1	8	1'30"	95 à 100%	8'	léger active	0 à 20%	vague	12'	>20 ->favoriser des séances concentration (surf + temps de rame à l'intervalle)
N°27	5	2	1'15"	95 à 100%	2'18"	léger active	0 à 20%	vague	12'30"	
N°28	6	2	45"	95 à 105%	2'18"	léger active	0 à 20%	vague	9'	>Conditions primordiales dans le choix du temps effort
N°29	4	3	40"	95 à 105%	1'18"	léger active	0 à 20%	vague	8'	>20 à 45" - vagues proches du bord type shore break
N°30	4	4	40"	95 à 105%	30"	léger active	0 à 20%	vague	17'	
N°31	5	4	20"	95 à 105%	30"	léger active	0 à 20%	vague	8'30"	
N°31bis	1	20 à 30	15" à 20"	95 à 105%	2'	passive	0%	vague	5' à 10'	> séances shore break, favoriser temps intense en surf
N°32	1	4 à 5	20 à 25"	95 à 100%	8'	léger active	0 à 20%	vague	20' à 25'	> réduire le temps d'attente au pic
N°33	1	1	20 à 25"	100 à 105%	8'	léger active	0 à 20%	vague	15 à 20'	

attention : en période de préparation à la compétition, le nombre de répétition sera diminué (travail de simulation de série)

INTENSITE 5, capacité anaérobie

Caractéristiques de ce type de séance		Temps d'effort compris entre 15" et 2'30"		Intensité maximale et sub-maximale (100 à 120% de PMA)		Intensité minimale et sub-minimale (100 à 110% de PMA)		Objectif n°1 : développer la résistance à la vitesse		Objectif n°2 : tolérer l'accumulation de lactate et maintenir la coordination en état de fatigue		Objectif n°3 : améliorer la capacité aérobie dans un contexte psychologique	
SEANCE	Style	Répart	tps de W	Intens de W	tps de Récup	Style de Récup	Récup	Intens de Récup	Pertes	Lieu	Tot tps de W	Observations	
N°34	1	4 à 6	2'	100 à 100%	8"	8"	léger active	0 à 20%	oui	plage/vag	8" à 12"	>Produire des lactates au niveau des membres sup et inf	
N°35	1	4 à 6	1'30"	100 à 110%	4/6"	4/6"	léger active	0 à 20%	oui	plage/vag	7'30" à 10"	>Produire des lactates au niveau des membres sup et inf. Et entraîner une vague surfer : vague proche du bord	
N°37	2	3 à 4	1'15"	100 à 105%	4/6"	4/6"	léger active	0 à 20%	oui	plage/vag	7'30" à 10"	>Résistance à la vitesse : monter et descendre la dune avant de surfer.	
N°39	4	4	20"	110 à 120%	2/3"	2/3"	léger active	0 à 20%	oui	plage/vag	5'20"		
N°40	3	4	15"	110 à 120%	2/3"	2/3"	léger active	0 à 20%	oui	plage/vag	5'20"		

BIBLIOGRAPHIE

1. Léger L, Cazorla G, Petibois C, Bosquet L. Lactate et exercice : mythes et réalités. *Staps*. no 54(1):63–76.
2. Cohen-Solal A, Carré F. Les métabolismes énergétiques. In: *Guide pratique des épreuves d'effort cardiorespiratoires en cardiologie*. Paris: Elsevier Masson; 2009. p. 8–14.
3. Rigoard P, Bauche S, Buffenoir K, Giot J-P, Faure J-P, Scepi M, et al. Le support anatomique de la contraction musculaire. *Neurochirurgie*. 2009 Mar 1;55:S69–82.
4. Billat V. *Physiologie et méthodologie de l'entraînement*. de boeck; 2012.
5. Pradet M. *La préparation physique*. In collection enseignement ed. INSEP; 2003.
6. Carpentier A. L'énergie et le sport. Laboratoire de biologie appliquée et unité de recherche en neurophysiologie, institut supérieur d'éducation physique et de kinésithérapie [en ligne]. [page consultée le 15/12/16]. Disponible sur internet : http://www.ulb.ac.be/sciences/intra/inforsc_archives/nrj/carpentier.htm
7. Cazorla G, Léger L. Comment évaluer et développer vos capacités aérobies. *Epreuves de course navette et épreuve Vameval*. France : A.R.E.A.P.S. (Association Recherche et Evaluation en Activité Physique et en Sport), 1993.
8. Cazorla G. Natation : les facteurs de la performance et leurs techniques d'évaluation. *Troisième colloque international de la guadeloupe*; 15, 16, 17 Décembre 1994.
9. Claire Thomas-Junius (Maitre de Conférences-HDR, Université Evry Val d'Essonne, UFR SFA, Département STAPS, INSEP, Mission Recherche, Laboratoire de Biomécanique et Physiologie). (page consultée le 15/12/16). Du nouveau dans le métabolisme de la phosphocréatine au cours de l'exercice, [en ligne]. <https://www.valdemarne.fr/newsletters/lettre-sport-sante-et-preparation-physique/du-nouveau-dans-le-metabolisme-de-la-phosphocreatine-au-cours-de-lexercice>
10. Rossiter HB, Ward SA, Kowalchuk JM, Howe FA, Griffiths JR, Whipp BJ. Dynamic asymmetry of phosphocreatine concentration and O₂ uptake between the on- and off-transients of moderate- and high-intensity exercise in humans. *J Physiol*. 2002 Jun 15;541(Pt 3):991–1002.
11. Saks VA, Kongas O, Vendelin M, Kay L. Role of the creatine/phosphocreatine system in the regulation of mitochondrial respiration. *Acta Physiol Scand*. 2000 Apr;168(4):635–41.
12. Zoll J, Koulmann N, Bahi L, Ventura-Clapier R, Bigard A-X. Quantitative and qualitative adaptation of skeletal muscle mitochondria to increased physical activity. *J Cell Physiol*. 2003 Feb;194(2):186–93.
13. Collectif Insep. *Energie et entraînement : l'exemple des courses*. 1998.
14. Cazorla G. *Evaluation des capacités énergétiques*. AREAPS : Association Recherche et Evaluation en Activité Physique et en Sport ; 2014.
15. Cazorla G. *Tests de terrain pour évaluer la capacité aérobie et la vitesse aérobie maximale*. AREAPS : Association Recherche et Evaluation en Activité Physique et en Sport. 2014.

16. Roth SM. Why Does Lactic Acid Build Up in Muscles? And Why Does It Cause Soreness? *Revue Scientific American*. [en ligne]. 23 janvier 2006, [consulté le 11/09/16]. Disponible sur internet : <<https://www.scientificamerican.com/article/why-does-lactic-acid-buil/>>
17. Ziane R. (page consultée le 12/09/16) Utiliser différentes formes de travail intermittent pour améliorer les potentialités aérobies ? [en ligne]. <https://www.valdemarne.fr/newsletters/lettre-sport-sante-et-preparation-physique/utiliser-differentes-formes-de-travail-intermittent-pour-ameliorer-les-potentialites-aerobies>
18. Dellal, A., Chamari K., Castagna C., et al. Evolution de la FC lors de jeux réduits et d'exercices intermittents chez des footballeurs de haut-niveau. (page consultée le 07/07/16). [en ligne]. <http://netsim.free.fr/maisondufoot/index.php?page=article/5.html>
19. Billat V, Renoux JC, Pinoteau J, Petit B, Koralsztein JP. Reproducibility of running time to exhaustion at VO₂max in subelite runners. *Med Sci Sports Exerc*. 1994 Feb;26(2):254–7.
20. Wilmore JH, Costill DL, Kenney L. *Physiologie du sport et de l'exercice*. De Boeck Supérieur; 2017. 644 p.
21. Brouns F, van der Vusse GJ. Utilization of lipids during exercise in human subjects: metabolic and dietary constraints. *Br J Nutr*. 1998 Feb;79(2):117–28.
22. Brooks GA, Mercier J. Balance of carbohydrate and lipid utilization during exercise: the “crossover” concept. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. 1994 Jun;76(6):2253–61.
23. Allen DG, Lamb GD, Westerblad H. Skeletal Muscle Fatigue: Cellular Mechanisms. *Physiol Rev*. 2008 Jan 1;88(1):287–332.
24. Balsom PD, Seger JY, Sjödin B, Ekblom B. Maximal-intensity intermittent exercise: effect of recovery duration. *Int J Sports Med*. 1992 Oct;13(7):528–33.
25. Surf Report. (page consultée le 06/12/15). Les origines du surf, d'Hawaii à Biarritz [en ligne]. <http://www.surf-report.com/news/hawai-surf-histoire-biarritz-origines-james-cook-8524.html>
26. La grande histoire du surf. (page consultée le 06/12/15). [en ligne]. <http://www.sur-la-plage.com/articles/la-grande-histoire-du-surf-8.php>
27. Velez D. “Tontons surfeurs” ou les pionniers du surf de la Côte basque. *Journal l'express par Agence France Presse*. [en ligne]. Août 2014 [consulté le 06/12/15]. Disponible sur internet : <http://www.lexpress.fr/actualites/1/styles/les-tontons-surfeurs-ou-les-pionniers-du-surf-de-la-cote-basque-en-trois-questions_1569283.html>
28. Moran K., Webber J. Surfing Injuries Requiring First Aid in New Zealand, 2007–2012. *International Journal of Aquatic Research and Education* [en ligne]. Janvier 2013, Vol.7, N°3, [consulté le 10/10/16]. <http://scholarworks.bgsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1056&context=ijare>
29. Nathanson A, Haynes P, Galanis D. Surfing injuries. *Am J Emerg Med*. 2002 May;20(3):155–60.
30. Fédération française de surf. (page consultée le 02/02/16). Règlement sportif 2015 [en ligne]. http://www.surfingfrance.com/images/Statuts_Reglements/Reglement%20sportif%202015.pdf

31. Meir RA, Lowdon BJ, Davie AJ. Heart rates and estimated energy expenditure during recreational surfing. *Aust J Sci Med Sport*. 1991;23(3):70–4.
32. Mendez-Villanueva A, Bishop D, Hamer P. Activity profile of world-class professional surfers during competition: a case study. *J Strength Cond Res*. 2006 Aug;20(3):477–82.
33. Farley ORL, Harris NK, Kilding AE. Physiological demands of competitive surfing. *J Strength Cond Res*. 2012 Jul;26(7):1887–96.
34. Secomb JL, Sheppard JM, Dascombe BJ. Time-Motion Analysis of a Two Hour Surfing Training Session. *International journal of sports physiology and performance*. Mai 2014 [consulté le 06/06/16]. Disponible sur internet : <https://www.researchgate.net/publication/262148600_Time-Motion_Analysis_of_a_Two_Hour_Surfing_Training_Session>
35. Lowdon BJ, Bedi JF, Horvath SM. Specificity of aerobic fitness testing of surfers. *ResearchGate*. 1989 Jan 1;21(4):7–10.
36. Loveless DJ, Minahan C. Two reliable protocols for assessing maximal-paddling performance in surfboard riders. *J Sports Sci*. 2010 May;28(7):797–803.
37. Loveless DJ, Minahan C. Peak aerobic power and paddling efficiency in recreational and competitive junior male surfers. *Eur J Sport Sci*. 2010 Nov 1;10(6):407–15.
38. Mendez-Villanueva A, Bishop D. Physiological aspects of surfboard riding performance. *Sports Med Auckl NZ*. 2005;35(1):55–70.
39. Mendez-Villanueva A, Mujika I, Bishop D. Variability of competitive performance assessment of elite surfboard riders. *J Strength Cond Res*. 2010 Jan;24(1):135–9.
40. Farley O, Harris NK, Kilding AE. Anaerobic and aerobic fitness profiling of competitive surfers. *J Strength Cond Res*. 2012 Aug;26(8):2243–8.
41. Code de santé publique. (page consultée le 05/05/15). Arrêté du 11 février 2004 fixant la nature et la périodicité des examens médicaux prévus aux articles L. 3621-2 et R. 3621-3, [en ligne]. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.docidTexte=LEGITEXT000005765391&dateTexte=20080429>
42. Debraux P. Pince à plis cutanés. *Sciences du sport*. (consulté le 07/09/17) [en ligne]. <https://www.sci-sport.com/articles/019.php>
43. Peterson MJ, Czerwinski SA, Siervogel RM. Development and validation of skinfold-thickness prediction equations with a 4-compartment model. *Am J Clin Nutr*. 2003 May;77(5):1186–91.
44. Hodgdon JA, Friedl KE, Beckett MB, Westphal KA, Shippee RL. Use of bioelectrical impedance analysis measurements as predictors of physical performance. *Am J Clin Nutr*. 1996 Sep;64(3 Suppl):463S–468S.
45. Heyters C. Validité de l'évaluation de la graisse corporelle totale d'un individu par l'utilisation d'équations anthropométriques existantes. *Sci Sports*. 1987 Jul 1;2(2):109–17.

46. Medicine AC of S. ACSM's Health-Related Physical Fitness Assessment Manual. Lippincott Williams & Wilkins; 2013. 191 p.
47. Modlesky CM, Cureton KJ, Lewis RD, Prior BM, Sloniger MA, Rowe DA. Density of the fat-free mass and estimates of body composition in male weight trainers. *J Appl Physiol* Bethesda Md 1985. 1996 Jun;80(6):2085–96.
48. Siri WE. Body composition from fluid spaces and density: analysis of methods. 1961. *Nutr* Burbank Los Angel Cty Calif. 1993 Oct;9(5):480-491; discussion 480, 492.
49. J. Medelli. Position de consensus de la Société Française de Médecine du Sport concernant la directive n°000149 du 3 avril 2001 sur les épreuves d'effort des sportifs de haut niveau. *Science & Sports* 2002 ; 17 : 48-50.
50. Institut de Recherche du Bien-être de la Médecine et du Sport santé. (consulté le 08/12/15). La VO2MAX, calculez vos performances. 2013 [en ligne]. <http://www.irbms.com/la-vo2max-calculez-vos-performances>
51. Davis JA, Convertino VA. A comparison of heart rate methods for predicting endurance training intensity. *Med Sci Sports*. 1975;7(4):295–8.
52. Lucía A, Hoyos J, Pardo J, Chicharro JL. Metabolic and neuromuscular adaptations to endurance training in professional cyclists: a longitudinal study. *Jpn J Physiol*. 2000 Jun;50(3):381–8.
53. Wasserman K, Whipp BJ, Koyl SN, Beaver WL. Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J Appl Physiol*. 1973 Aug;35(2):236–43.
54. Préfaut C, Mercier J. Les seuils ventilatoires, méthode non invasive d'estimation des seuils lactiques. *Sci Sports*. 1993 Jan 1;8(3):217–20.
55. NCD Risk Factor Collaboration. A century of trends in adult human height. *eLife*. 2016 Jul 26;5:e13410.
56. Pineau J-C. Relation fonctionnelle entre la masse grasse, les plis cutanés, le déficit ou l'excédent pondéral et le « poids théorique idéal ». *Comptes Rendus Académie Sci - Ser III - Sci Vie* [en ligne]. Août 1997, [consulté le 09/10/16]. Disponible sur internet : <<http://www.lissa.fr/rep/articles/9338000>>
57. Bouhlef E, Bouhlef H, Chelly MS, Tabka Z. Relation entre la puissance maximale anaérobie mesurée lors de l'épreuve charge–vitesse, la détente verticale et le 5-jump test chez le garçon entraîné. *Sci Sports*. 10 Avril 2005, Vol. 21, N° 1 - p. 1-7.
58. Mercier B, Mercier J, Granier P, Le Gallais D, Préfaut C. Maximal anaerobic power: relationship to anthropometric characteristics during growth. *Int J Sports Med*. 1992 Jan;13(1):21–6.
59. Lowdon B. J. The somatotype of international surfboard riders. 1980.
60. Association of surfing Professionals. (page consultée le 09/10/15). World Championship Tour 2003 personal profiles [en ligne]. <http://www.worldsurfleague.com/athletes/tour/mct?year=2003>

61. Association of surfing Professionals. (page consultée le 09/10/15). World Championship Tour 2003 personal profiles [en ligne]. <http://www.worldsurfleague.com/athletes/tour/mct?year=2013>
62. Fernández-López JR, Cámara J, Maldonado S, Rosique-Gracia J. The effect of morphological and functional variables on ranking position of professional junior Basque surfers. *Eur J Sport Sci.* 2013;13(5):461–7.
63. Ridge BR, Broad E, Kerr DA, Ackland TR. Morphological characteristics of Olympic slalom canoe and kayak paddlers. *Eur J Sport Sci.* 2007 Jun 1;7(2):107–13.
64. Ackland TR, Ong KB, Kerr DA, Ridge B. Morphological characteristics of Olympic sprint canoe and kayak paddlers. *J Sci Med Sport.* 2003 Sep 1;6(3):285–94.
65. Lévêque JM, Brisswalter J, Bernard O, Goubault C. Évaluation des caractéristiques physiologiques des kayakistes de descente de haut niveau de performance. *Sci Sports.* 2001 Jan 1;16(1):23–8.
66. Gilinsky N, Hawkins KR, Tokar TN, Cooper JA. Predictive variables for half-Ironman triathlon performance. *J Sci Med Sport.* 2014 May;17(3):300–5.
67. Pfersdorff A. La puberté normale : 13 cm de différence entre fille et garçon. *Pediatre Online.* [en ligne]. Décembre 2008, [consulté le 10/12/16]. Disponible sur internet : <http://www.pediatre-online.fr/adolescents/puberte-difference-fille-garcon/>
68. Sheppard JM, Nimphius S, Haff GG, Tran TT, Spiteri T, Brooks H, et al. Development of a comprehensive performance-testing protocol for competitive surfers. *Int J Sports Physiol Perform.* 2013 Sep;8(5):490–5.
69. Barlow MJ, Findlay M, Gresty K, Cooke C. Anthropometric variables and their relationship to performance and ability in male surfers. *Eur J Sport Sci.* 2014;14 Suppl 1:S171-177.
70. Tran TT, Lundgren L, Secomb J, Farley ORL, Haff GG, Seitz LB, et al. Comparison of physical capacities between nonselected and selected elite male competitive surfers for the National Junior Team. *Int J Sports Physiol Perform.* 2015 Mar;10(2):178–82.
71. Fernandez-Gamboa I, Yanci J, Granados C, Camara J. Comparison Of Anthropometry And Lower Limb Power Qualities According To Different Levels And Ranking Position Of Competitive Surfers. *J Strength Cond Res.* 2016 Jul 7.
72. Schram B, Hing W, Climstein M. Profiling the sport of stand-up paddle boarding. *J Sports Sci.* 2016;34(10):937–44.
73. Sheppard JM, Chapman DW, Gough C, McGuigan MR, Newton RU. Twelve-month training-induced changes in elite international volleyball players. *J Strength Cond Res.* 2009 Oct;23(7):2096–101.
74. Maton F. Méthode de mesure des plis cutanés chez le sportif. *Revue médecine du sport* [en ligne]. Avril 2008, [consulté le 2 juin 2017]. Disponible sur internet : <http://www.coachawake.com/wp-content/uploads/2014/05/plis-cutan%C3%A9s.pdf>
75. Legaz Arrese A, González Badillo JJ, Serrano Ostáriz E. Differences in skinfold thicknesses and fat distribution among top-class runners. *J Sports Med Phys Fitness.* 2005 Dec;45(4):512–7.

76. Cosgrove MJ, Wilson J, Watt D, Grant SF. The relationship between selected physiological variables of rowers and rowing performance as determined by a 2000 m ergometer test. *J Sports Sci.* 1999 Nov;17(11):845–52.
77. Jürimäe J, Hofmann P, Jürimäe T, Mäestu J, Purge P, Wonisch M, et al. Plasma adiponectin response to sculling exercise at individual anaerobic threshold in college level male rowers. *Int J Sports Med.* 2006 Apr;27(4):272–7.
78. Jürimäe J, Jürimäe T. Plasma leptin responses to prolonged sculling in female rowers. *J Sports Med Phys Fitness.* 2004 Mar;44(1):104–9.
79. Yoshiga CC, Higuchi M. Rowing performance of female and male rowers. *Scand J Med Sci Sports.* 2003 Oct;13(5):317–21.
80. Dubois H. Etude du suivi physiologique de surfeurs de haut niveau pendant cinq ans [Thèse de Doctorat en médecine générale]. Bordeaux : Université Victor Segalen; 2005.
81. Furness J, Hing W, Sheppard JM, Newcomer S, Schram B, Climstein M. The Physiological Profile Of Male Competitive And Recreational Surfers. *J Strength Cond Res.* 2016 Aug 31;
82. Fraisse F, Desnus B, Handschuh R, Jousselein E, Strady M, Thomaidis M. La consommation maximale d'oxygène des sportifs de haut niveau de moins de 20 ans. *Sci Sports.* 1991 Mar 1;6(1):25–35.
83. Jousselein E, Desnus B, Fraisse F, Handschuh R, Legros P, Strady M, et al. La consommation maximale d'oxygène des équipes nationales françaises de 1979 à 1988 (sportifs de plus de 20 ans). *Sci Sports.* 1990 Mar 1;5(1):39–45.
84. Tompuri T, Lintu N, Savonen K, Laitinen T, Laaksonen D, Jääskeläinen J, et al. Measures of cardiorespiratory fitness in relation to measures of body size and composition among children. *Clin Physiol Funct Imaging.* 2015 Nov;35(6):469–77.
85. Prioux J, Ayoub J, Matécki S, Sotin J, Mercier J, Ramonatxo M. Évolution du seuil ventilatoire pendant la croissance. Relations avec les caractéristiques anthropométriques. Étude multilongitudinale. (Définition de valeurs de références). *Sci Sports.* 2001 Jan 1;16(3):137–45.
86. Shvartz E. Aerobic fitness norms for males and females aged 6 to 75 years: a review. *Aviat Space Environ Med.* 1990 Jan;61(1):3–11.
87. Poujade B, Hautier CA, Rouard A. Influence de la morphologie, de VO₂max et du coût énergétique sur la performance en natation chez de jeunes nageurs. *Sci Sports.* 2003 Aug;18(4):182–7.
88. Minahan CL, Pirera DJ, Sheehan B, MacDonald L, Bellinger PM. Anaerobic Energy Production During Sprint Paddling in Junior Competitive and Recreational Surfers. *Int J Sports Physiol Perform.* 2016 Sep;11(6):810–5.
89. Costill DL, Kovaleski J, Porter D, Kirwan J, Fielding R, King D. Energy Expenditure During Front Crawl Swimming: Predicting Success in Middle-Distance Events. *Int J Sports Med.* 1985 Oct;06(05):266–70.

90. Montpetit R, Lavoie JM., Cazorla G. Aerobic Energy Cost of Swimming the Front Crawl at High Velocity in International Class and Adolescent Swimmers. *Biomechanics and Medicine in Swimming*. Published by Human Kinetics [en ligne]. 1983, [consulté le 02/01/17]. Disponible sur internet : https://www.iat.uni-leipzig.de/datenbanken/iks/open_archive/bms/4_228-234_Montpetit.pdf
91. Rodríguez FA. Maximal oxygen uptake and cardiorespiratory response to maximal 400-m free swimming, running and cycling tests in competitive swimmers. *J Sports Med Phys Fitness*. 2000 Jun;40(2):87–95.
92. Ingham SA, Whyte GP, Jones K, Nevill AM. Determinants of 2,000 m rowing ergometer performance in elite rowers. *Eur J Appl Physiol*. 2002 Dec;88(3):243–6.
93. Sheppard J. Anthropometric characteristics, upper body strength, and sprint paddling in competitive surfers [en ligne]. Janvier 2012, Vol 20, [consulté le 05/12/16]. Disponible sur internet : <http://ro.ecu.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=1674&context=ecuworks2012>
94. Nevill AM, Allen SV, Ingham SA. Modelling the determinants of 2000 m rowing ergometer performance: a proportional, curvilinear allometric approach. *Scand J Med Sci Sports*. 2011 Feb 1;21(1):73–8.
95. Mahon AD, Gay JA, Stolen KQ. Differentiated ratings of perceived exertion at ventilatory threshold in children and adults. *Eur J Appl Physiol*. 1998 Jun 1;78(2):115–20.
96. Secomb JL, Nimphius S, Farley OR, Lundgren L, Tran TT, Sheppard JM. Lower-Body Muscle Structure and Jump Performance of Stronger and Weaker Surfing Athletes. *Int J Sports Physiol Perform*. 2016 Jul;11(5):652–7.
97. Dauty M, Hamon D, Danion H, Maugars Y, Potiron-Josse M, Ginet J. Corrélation de la détente verticale avec la souplesse et la force des quadriceps et ischiojambiers. *Sci Sports*. 1999 Mar 1;14(2):71–6.
98. Grassi B, Cerretelli P, Narici MV, Marconi C. Peak anaerobic power in master athletes. *Eur J Appl Physiol*. 1991 Nov 1;62(6):394–9.
99. Guillodo Y, Sébert P, Barthélémy L. Latéralité podale et détente verticale chez le footballeur de haut niveau. *Sci Sports*. 1992 Oct 1;7(2):123–4.
100. Sébert P, Barthélémy L, Dietman Y, Douguet C, Boulay J. A simple device for measuring a vertical jump: description and results. *Eur J Appl Physiol*. 1990;61(3–4):271–3.
101. Gippini A, Mato A, Pazos R, Suarez B, Vila B, Gayoso P, et al. Effect of long-term strength training on glucose metabolism. Implications for individual impact of high lean mass and high fat mass on relationship between BMI and insulin sensitivity. *J Endocrinol Invest*. 2002 Jun;25(6):520–5.
102. Marin F. Composition corporelle et méthodes d'évaluation. *Revue medecine du sport* [en ligne]. Mars 2017, [consulté le 02/06/2017]. Disponible sur internet : <https://www.irbms.com/methode-devaluation-de-la-composition-corporelle>
103. Zahariev A, Bergouignan A, Caloin M, Normand S, Gauquelin-Koch G, Gharib C, et al. Skinfold thickness versus isotope dilution for body fat assessment during simulated microgravity: results from three bed-rest campaigns in men and women with and without countermeasures. *Eur J Appl Physiol*. 2005 Oct;95(4):344–50.

104. García AL, Wagner K, Einig C, Trippo U, Koebnick C, Zunft H-JF. Evaluation of Body Fat Changes during Weight Loss by Using Improved Anthropometric Predictive Equations. *Ann Nutr Metab.* 2006;50(3):297–304.
105. Housh TJ, Johnson GO, Housh DJ, Eckerson JM, Stout JR. Validity of skinfold estimates of percent fat in high school female gymnasts. *Med Sci Sports Exerc.* 1996 Oct;28(10):1331–5.
106. Kavak V. The determination of subcutaneous body fat percentage by measuring skinfold thickness in teenagers in Turkey. *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* 2006 Jun;16(3):296–304.
107. Chan YL, Leung SS, Lam WW, Peng XH, Metreweli C. Body fat estimation in children by magnetic resonance imaging, bioelectrical impedance, skinfold and body mass index: a pilot study. *J Paediatr Child Health.* 1998 Feb;34(1):22–8.
108. Dioum A, Gartner A, Maire B, Delpuech F, Wade S. Body composition predicted from skinfolds in African women: a cross-validation study using air-displacement plethysmography and a black-specific equation. *Br J Nutr.* 2005 Jun;93(6):973–9.
109. Arrese AL, Ostáriz ES. Skinfold thicknesses associated with distance running performance in highly trained runners. *J Sports Sci.* 2006 Jan;24(1):69–76.
110. Shah NR, Braverman ER. Measuring Adiposity in Patients: The Utility of Body Mass Index (BMI), Percent Body Fat, and Leptin. *PLOS ONE.* 2012 avr;7(4):e33308.
111. Everline C. Shortboard Performance Surfing: A Qualitative Assessment of Maneuvers and a Sample Periodized Strength and Conditioning Program In and Out of the Water. *Strength & Conditioning Journal.* Juin 2007;29.
112. Furness J., Sheppard JM. Clinical methods to quantify trunk mobility in an elite male surfing population. *Physical Therapy in sport : official journal of the Association of Chartered Physiotherapists in Sports Medicine.* Mai 2016;19:28-35.
113. Johnson KD, Grindstaff TL. Thoracic Rotation Measurement Techniques: Clinical Commentary. *North Am J Sports Phys Ther.* 2010 Dec;5(4):252–6.
114. Johnson KD, Kim K-M, Yu B-K, Saliba SA, Grindstaff TL. Reliability of thoracic spine rotation range-of-motion measurements in healthy adults. *J Athl Train.* 2012 Feb;47(1):52–60.
115. Lewis JS, Valentine RE. Clinical measurement of the thoracic kyphosis. A study of the intra-rater reliability in subjects with and without shoulder pain. *BMC Musculoskelet Disord.* 2010 Mar 1;11:39.
116. O’gorman H, Jull G. Thoracic kyphosis and mobility: the effect of age. *Physiother Pract.* 1987 Jan 1;3(4):154–62.
117. Vandewalle H. Consommation d’oxygène et consommation maximale d’oxygène : intérêts et limites de leur mesure. *ResearchGate.* 2004 Aug 1;47(6):243–57.
118. Chamari K, Moussa-Chamari I, Boussaïdi L, Hachana Y, Kaouech F, Wisløff U. Appropriate interpretation of aerobic capacity: allometric scaling in adult and young soccer players. *Br J Sports Med.* 2005 Feb;39(2):97–101.

119. Laplaud D, Menier R. Peut-on encore améliorer la méthodologie des épreuves d'effort maximales pour un suivi longitudinal plus informatif de la filière énergétique aérobie ? *Sci Sports*. 2002 Jan 1;17(6).
120. Péronnet F, Thibault G, Rhodes EC. Correlation between ventilatory threshold and endurance capability in marathon runners. *Med Sci Sports Exerc*. 1987 1987;19(6):610–5.
121. Tanaka K, Matsuura Y. Marathon performance, anaerobic threshold, and onset of blood lactate accumulation. *J Appl Physiol*. 1984 Sep;57(3):640–3.
122. Ekblom B. Effect of physical training in adolescent boys. *J Appl Physiol*. 1969 Sep;27(3):350–5.
123. Rieu M. Lactatémie et exercice musculaire. Signification et analyse critique du concept de “seuil aérobie-anaérobie.” *Sci Sports*. 1986 Jan 1;1(1):1–23.
124. Baldari C, Videira M, Madeira F, Sergio J, Guidetti L. Blood lactate removal during recovery at various intensities below the individual anaerobic threshold in triathletes. *J Sports Med Phys Fitness*. 2005 Dec;45(4):460–6.
125. Rioux T. Mesures et estimations de la vitesse maximale aérobie chez les nageurs avec palmes par tests maximal et submaximal. [Mémoire d'entraîneur fédéral 2e degré]. Mai 2007.
126. Nadeau M, Perronet F et coll. *Physiologie de l'activité physique*. 1980.
127. Boukhar K. Evaluation de la puissance aérobie maximale en natation (test progressif maximal à paliers multiples). [Mémoire de maîtrise en kinantropologie]. Université du Québec à Montréal, Juin 2015.
128. Swaine IL. Arm and leg power output in swimmers during simulated swimming. *Med Sci Sports Exerc*. 2000 Jul;32(7):1288–92.
129. Sheppard JM and coll. Assessing the Force-Velocity Characteristics of the Leg Extensors in Well-Trained Athletes : The incremental load power profile. *The Journal of Strength & Conditioning Research*. 2008 July;22(4):1320-1326.
130. Sheppard JM, Chapman D, Taylor K-L. An Evaluation of a Strength Qualities Assessment Method for the Lower Body. *ResearchGate*. 2011 Jun 1;19(2):4–10.
131. Sheppard JM and coll. Relative Importance of strength, power, and anthropometric measures to jump performance of elite volleyball players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*. 2008 May;22(3):758-65.
132. Stone MH, O'Bryant HS, McCoy L, Coglianese R, Lehmkuhl M, Schilling B. Power and maximum strength relationships during performance of dynamic and static weighted jumps. *J Strength Cond Res*. 2003 Feb;17(1):140–7.
133. Kawamori N, Rossi SJ, Justice BD, Haff EE, Pistilli EE, O'Bryant HS, et al. Peak force and rate of force development during isometric and dynamic mid-thigh clean pulls performed at various intensities. *J Strength Cond Res*. 2006 Aug;20(3):483–91.
134. Haff, G and coll. Force-Time Dependent Characteristics of Dynamic and Isometric Muscle Actions. 1997 Nov;11.

135. Nuzzo JL, McBride JM, Cormie P, McCaulley GO. Relationship between countermovement jump performance and multijoint isometric and dynamic tests of strength. *J Strength Cond Res.* 2008 May;22(3):699–707.
136. Secomb JL, Lundgren LE, Farley ORL, Tran TT, Nimphius S, Sheppard JM. Relationships Between Lower-Body Muscle Structure and Lower-Body Strength, Power, and Muscle-Tendon Complex Stiffness. *J Strength Cond Res.* 2015 Aug;29(8):2221–8.
137. Mackenzie SJ, Lavers RJ, Wallace BB. A biomechanical comparison of the vertical jump, power clean, and jump squat. *J Sports Sci.* 2014;32(16):1576-85.
138. Méndez-Villanueva A, Perez-Landaluce J, Bishop D, Fernandez-García B, Ortolano R, Leibar X, et al. Upper body aerobic fitness comparison between two groups of competitive surfboard riders. *J Sci Med Sport.* 2005 Mar 1;8(1):43–51.
139. Sheppard JM, McNamara P, Osborne M, Andrews M, Oliveira Borges T, Walshe P, et al. Association between anthropometry and upper-body strength qualities with sprint paddling performance in competitive wave surfers. *J Strength Cond Res.* 2012 Dec;26(12):3345–8.
140. Billat V. VO2 max à l'épreuve du temps: Pour une nouvelle vision de l'entraînement. De Boeck Supérieur; 2013. 183 p.
141. Lavoie et Léger 1985. A Maximal Multistage Swim Test to Determine the Functional and Maximal Aerobic Power of Competitive Swimmers. *The J. of Swimming Research.* 1985;1(2):17-22.
142. Cazorla G. De l'évaluation des nageurs de haut niveau à la détection des jeunes talents. AREAPS : Association Recherche et Evaluation en Activité Physique et en Sport, 2017.
143. Berthé N. Essai de mise au point et de validation d'un test d'effort maximal aérobie spécifique au surf. [Mémoire de physiologie du sport]. Université de la Réunion, 1998.
144. Flandrois R, Monod D. In: *Physiologie du sport.* 5e édition. Paris; 2003. (Masson).
145. Léger L. En natation evaluation de la puissance aérobie maximale. *La revue québécoise de l'activité physique.* 1985 ;3:39-43.
146. Eurich AD, Brown LE, Coburn JW, Noffal GJ, Nguyen D, Khamoui AV, et al. Performance differences between sexes in the pop-up phase of surfing. *J Strength Cond Res.* 2010 Oct;24(10):2821–5.
147. Delignières, D., Legros, P., & Famose, J.P. Perception de l'effort et difficulté de la tâche. 1991;14–8.
148. Thibault G. Entraînement cardio sports d'endurance et performance. Québec : Vélo Québec Editions. Vélo Québec Editions. Québec; 2009.
149. Assadi H. Réponses physiologiques au cours d'exercices intermittents en course à pied. [Thèse de Doctorat d'université]. Université de Bourgogne; 2012.
150. Caiozzo VJ, Davis JA, Ellis JF, Azus JL, Vandagriff R, Prietto CA, et al. A comparison of gas exchange indices used to detect the anaerobic threshold. *J Appl Physiol.* 1982 Nov;53(5):1184–9.

151. Farrell PA, Wilmore JH, Coyle EF, Billing JE, Costill DL. Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med Sci Sports*. 1979;11(4):338–44.
152. Vago P, Mercier J, Ramonatxo M, Prefaut C. Is ventilatory anaerobic threshold a good index of endurance capacity? *Int J Sports Med*. 1987 Jun;8(3):190–5.
153. Mongodin Axel. Influence d'un travail intermittent sur la capacité aérobie [Mémoire du diplôme d'état de masseur-kinésithérapeute]. Institut de formation en masso-kinésithérapie de Rennes ; 2012.
154. G.N. Bisciotti a,b,c, P.P. Iodice a,* ,1, E. Arcelli d , , E. Filaire a , , M. Sagnol a. Un test de terrain simple pour la détermination du seuil anaérobie. *Science & Sports*. 2003 Feb;18(1):46-47.
155. Helgerud J, Høydal K, Wang E, Karlsen T, Berg P, Bjerkaas M, et al. Aerobic high-intensity intervals improve VO₂max more than moderate training. *Med Sci Sports Exerc*. 2007 Apr;39(4):665–71.
156. Gorostiaga EM, Walter CB, Foster C, Hickson RC. Uniqueness of interval and continuous training at the same maintained exercise intensity. *Eur J Appl Physiol*. 1991;63(2):101–7.
157. Laursen PB, Shing CM, Jenkins DG. Reproducibility of the Cycling Time to Exhaustion at in Highly Trained Cyclists. *Can J Appl Physiol*. 2003 Aug 1;28(4):605–15.
158. Secomb JL, Sheppard JM, Dascombe BJ. Time-motion analysis of a 2-hour surfing training session. *Int J Sports Physiol Perform*. 2015 Jan;10(1):17–22.
159. Meyer T, Scharhag J, Kindermann W. Peak oxygen uptake. Myth and truth about an internationally accepted reference value. *Z Kardiol*. 2005 Apr;94(4):255–64.
160. Dupont G, Akakpo K, Berthoin S. The effect of in-season, high-intensity interval training in soccer players. *J Strength Cond Res*. 2004 Aug;18(3):584–9.
161. Billat V, Mille-Hamard L, Demarle A, Koralsztein J. Effect of training in humans on off-and on-transient oxygen uptake kinetics after severe exhausting intensity runs. *Eur J Appl Physiol*. 2002;87(6):496–505.
162. Dupont G, Berthoin S. Time spent at a high percentage of VO₂max for short intermittent runs: active versus passive recovery. *Can J Appl Physiol Rev Can Physiol Appl*. 2004;29 Suppl:S3–16.
163. Sheykhlovand M, Gharaat M, Khalili E, Agha-Alinejad H. The effect of high-intensity interval training on ventilatory threshold and aerobic power in well-trained canoe polo athletes. *Sci Sports*. 2016 Oct;31(5):283–9.
164. Gibala MJ, Little JP, van Essen M, Wilkin GP, Burgomaster KA, Safdar A, et al. Short-term sprint interval versus traditional endurance training: similar initial adaptations in human skeletal muscle and exercise performance. *J Physiol*. 2006 Sep 15;575(Pt 3):901–11.
165. Farley ORL, Secomb JL, Parsonage JR, Lundgren LE, Abbiss CR, Sheppard JM. Five Weeks of Sprint and High-Intensity Interval Training Improves Paddling Performance in Adolescent Surfers. *J Strength Cond Res*. 2016 Sep;30(9):2446–52.

166. Hamdi S. L'effet de deux méthode d'entrainement, la pliométrie et la musculation, sur l'économie à la course et sur l'explosivité chez lesjoueurs de soccer. [Mémoire de maîtrise en kinanthropologie]. Université du Québec à Montréal; 2011.
167. Hoff J. Training and testing physical capacities for elite soccer players. *J Sports Sci.* 2005 Jun;23(6):573–82.
168. Baker D, Nance S. The Relation Between Strength and Power in Professional Rugby League players. *The Journal of Strength & Conditioning Research.* 1999 Aug.
169. Hammami M. Effet de l'entraînement sur l'anthropométrie, les performances physiques et les réponses des axes somatotrope et cortico-gonadotrope chez l'adolescent footballeur de haut niveau. Education. Université de Rennes 2, 2013.
170. Chaibi R. L'impact du travail de la force maximale par la méthode de musculation dynamique sur l'amélioration de la puissance (force-vitesse) chez les rugbymen. [Maîtrise]. ISSEP deTunis ; 2005.
171. Villarreal E. Low and Moderate Plyometric Training Frequency Produces Greater jumping and sprinting gains compared with high frequency. *J Strength Cond Res.* 2008 May;22(3):715-25.
172. Rahimi R. The effects of plyometric, weight ans plyometric-weight training on anaerobic power and muscular strength. *Physical Education and Sport.* 2005 ;3(1) :81-91.
173. Kotzamanidis C. Effect of plyometric training on running performance and vertical jumping in prepubertal boys. *J Strength Cond Res.* 2006 May;20(2):441–5.
174. Coyne JOC, Tran TT, Secomb JL, Lundgren LE, Farley ORL, Newton RU, et al. Maximal Strength Training Improves Surfboard Sprint and Endurance Paddling Performance in Competitive and Recreational Surfers. *J Strength Cond Res.* 2017 Jan;31(1):244–53.
175. Ibo-Bainguié J-E. Effets de l'entraînement en musculation sur le VO₂max et autres qualités athlétiques chez le footballeur U-19 [Internet]. 2016 [cited 2017 Sep 23]. Available from: <http://www.archipel.uqam.ca/9406/>
176. Buchheit M, Abbiss CR, Peiffer JJ, Laursen PB. Performance and physiological responses during a sprint interval training session: relationships with muscle oxygenation and pulmonary oxygen uptake kinetics. *Eur J Appl Physiol.* 2012 Feb;112(2):767–79.
177. Philippaerts RM, Vaeyens R, Janssens M, Van Renterghem B, Matthys D, Craen R, et al. The relationship between peak height velocity and physical performance in youth soccer players. *J Sports Sci.* 2006 Mar;24(3):221–30.
178. Finch C, Williams F. The Feasibility of Improved Data Collection Methodologies for Sports Injuries. Accident research centre of Monash university.1995 Jan.
179. Nathanson A, Bird S, Dao L, Tam-Sing K. Competitive surfing injuries: a prospective study of surfing-related injuries among contest surfers. *Am J Sports Med.* 2007 Jan;35(1):113–7.
180. Furness J, Hing W, Walsh J, Abbott A, Sheppard JM, Climstein M. Acute injuries in recreational and competitive surfers: incidence, severity, location, type, and mechanism. *Am J Sports Med.* 2015 May;43(5):1246–54.

181. Barucq G. Accidents de Surf : Bilan de l'été 2014 dans le Sud-Ouest. Surf Prevention. [en ligne]. 2015 [consulté le 08/12/16]. Disponible sur internet : <http://blog.surf-prevention.com/2015/04/08/accidents-de-surf-cote-basque-landes/>
182. Lowdon BJ, Pateman NA, Pitman AJ. Surfboard-riding injuries. *Med J Aust.* 1983 Dec 10;2(12):613–6.
183. Lowdon BJ, Pitman AJ, Pateman NA, Ross K. Injuries to international competitive surfboard riders. *J Sports Med Phys Fitness.* 1987 Mar;27(1):57–63.
184. Allen RH, Eiseman B, Straehley CJ, Orloff BG. Surfing injuries At waikiki. *JAMA.* 1977 Feb 14;237(7):668–70.
185. Roger P. Injury in the surf. *Sport Health.* 2002 Sep;20(2):23.
186. Taylor DM, Bennett D, Carter M, Garewal D, Finch C. Acute injury and chronic disability resulting from surfboard riding. *J Sci Med Sport.* 2004 Dec 1;7(4):429–37.
187. Hay CSM, Barton S, Sulkin T. Recreational surfing injuries in Cornwall, United Kingdom. *Wilderness Environ Med.* 2009;20(4):335–8.
188. Jubbal KT, Chen C, Costantini T, Herrera F, Dobke M, Suliman A. Analysis of Surfing Injuries Presenting in the Acute Trauma Setting. *Ann Plast Surg.* 2017 Mar 16.
189. Furness J, Hing W, Walsh J, Abbott A, Sheppard JM, Climstein M. Acute injuries in recreational and competitive surfers: incidence, severity, location, type, and mechanism. *Am J Sports Med.* 2015 May;43(5):1246–54.
190. Furness J, Hing W, Abbott A, Walsh J, Sheppard J, Climstein M. Retrospective Analysis of Chronic Injuries in Recreational and Competitive Surfers: Injury Location, Type, and Mechanism. *Int J Aquat Res Educ.* 2014 Sep 1.
191. Surf prévention. L'Australie se dote d'un Centre de Haute Performance pour le Surf [en ligne]. 2012 [consulté le 17/08/17]. Disponible sur internet : <https://blog.surf-prevention.com/2012/06/18/centre-de-haute-performance-surf-australie/>
192. History of POWERbreathe (consulté le 11/12/16) [en ligne]. <http://www.powerbreathe.com/history-of-powerbreathe>
193. Romer LM, McConnell AK, Jones DA. Inspiratory muscle fatigue in trained cyclists: effects of inspiratory muscle training. *Med Sci Sports Exerc.* 2002 May;34(5):785–92.
194. Verges S, Boutellier U, Spengler CM. Effect of respiratory muscle endurance training on respiratory sensations, respiratory control and exercise performance: a 15-year experience. *Respir Physiol Neurobiol.* 2008 Mar 20;161(1):16–22.
195. Kellens I, Cannizzaro F, Gouilly P, Crielaard J-M. Entraînement de la force des muscles inspiratoires chez le sujet sportif amateur. *Rev Mal Respir.* 2011 May;28(5):602–8.
196. Wilson EE, et al. Respiratory muscle specific warm-up and elite swimming performance. *Br J Sports Med* 2014;48:789–791.

197. SurfingFrance. Championnats du monde ISA. (consulté le 06/09/16) [en ligne]. <http://www.surfingfrance.com/calendriers/championnats-du-monde-i-s-a.html>
198. Macaluso F, Di Felice V, Boscaino G, Bonsignore G, Stampone T, Farina F, et al. Effects of three different water temperatures on dehydration in competitive swimmers. *Sci Sports*. 2011 Nov;26(5):265–71.
199. Surf prévention. Drame à Mawgan Porth : 3 Surfeurs périssent noyés [en ligne]. 2014 [consulté le 08/12/16]. Disponible sur internet : <http://blog.surf-prevention.com/2014/10/27/noyade-surfers-mawgan-porth-beach/>
200. Bulliard JL, Levi F. Epidémiologie des cancers épithéliaux de la peau. *Revue Médicale Suisse*. 2009;5:882-888.
201. Watelet J. *Dermatologie et Sport*. *Sci Sports*. 2013 Dec;28(6):347–8.
202. Soufir N. Prévention du mélanôme chez les surfeurs australiens. Thérapeutiques en Dermato-Vénérologie. Unité Inserm U976 de l'Hôpital Saint-Louis à Paris, Décembre 2015.
203. Gerrard DF. Open water swimming. Particular medical problems. *Clin Sports Med*. 1999 Apr;18(2):337–347.
204. Reid HA. Epidemiology of sea-snake bites. *J Trop Med Hyg*. 1975 May;78(5):106–13.
205. Balhara KS, Stolbach A. Marine envenomations. *Emerg Med Clin North Am*. 2014 Feb;32(1):223–43.
206. Bourée P, Lançon A. Les animaux aquatiques dangereux. *Rev Fr Lab*. 2002 Apr 1;2002(342):61–4.
207. Geistdoerfer P, Goyffon M. Animaux aquatiques dangereux. *EMC - Toxicol-Pathol*. 2004 Apr;1(2):35–62.
208. Maretić Z, Russell FE. Stings by the sea anemone *Anemonia sulcata* in the Adriatic Sea. *Am J Trop Med Hyg*. 1983 Jul;32(4):891–6.
209. Russell FE. Stingray injuries: a review and discussion of their treatment. *Am J Med Sci*. 1953 Dec;226(6):611–22.
210. Maillaud C. Envenimations par poissons tropicaux : aspects cliniques et thérapeutiques. Table ronde de médecine de plongée de l'Océan Indien, Mauritius, 12-13 Septembre 1998.
211. Sebat C, Ribet S, Maillaud C. Envenimations sévères par serpents marins en Nouvelle-Calédonie : deux tableaux cliniques différents. *Journal Européen des Urgences*. Décembre 2005 ; 18 (4):204-210.
212. Fenner P, Williamson J. Clinical aspects of envenomation by marine animals. 1996 Feb;34.
213. Fédération française de surf. (consultée le 02/07/17). Procédure de calcul du classement fédéral [en ligne]. <http://www3.surfingfrance.com/F%C3%A9d%C3%A9ration/Classements/CalculClassementF%C3%A9d%C3%A9ral/tabid/535/Default.aspx>

Serment d'Hippocrate

Au moment d'être admis(e) à exercer la médecine, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité.

Mon premier souci sera de rétablir, de préserver ou de promouvoir la santé dans tous ses éléments, physiques et mentaux, individuels et sociaux.

Je respecterai toutes les personnes, leur autonomie et leur volonté, sans aucune discrimination selon leur état ou leurs convictions. J'interviendrai pour les protéger si elles sont affaiblies, vulnérables ou menacées dans leur intégrité ou leur dignité. Même sous la contrainte, je ne ferai pas usage de mes connaissances contre les lois de l'humanité.

J'informerai les patients des décisions envisagées, de leurs raisons et de leurs conséquences. Je ne tromperai jamais leur confiance et n'exploiterai pas le pouvoir hérité des circonstances pour forcer leurs consciences.

Je donnerai mes soins à l'indigent et à quiconque me les demandera. Je ne me laisserai pas influencer par la soif du gain ou la recherche de la gloire.

Admis(e) dans l'intimité des personnes, je tairai les secrets qui me sont confiés. Reçu(e) à l'intérieur des maisons, je respecterai les secrets des foyers et ma conduite ne servira pas à corrompre les mœurs.

Je ferai tout pour soulager les souffrances. Je ne prolongerai pas abusivement les agonies. Je ne provoquerai jamais la mort délibérément.

Je préserverai l'indépendance nécessaire à l'accomplissement de ma mission. Je n'entreprendrai rien qui dépasse mes compétences. Je les entretiendrai et les perfectionnerai pour assurer au mieux les services qui me seront demandés.

J'apporterai mon aide à mes confrères ainsi qu'à leurs familles dans l'adversité.

Que les hommes et mes confrères m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses : que je sois déshonoré(e) et méprisé(e) si j'y manque.

RESUME

Afin d'orienter l'entraînement et le suivi des surfeurs du pôle France de manière optimale et spécifique, nous avons voulu déterminer quels paramètres sont associés à la performance en surf de haut niveau. Cette étude rétrospective s'est appliquée à dresser le profil moyen d'un échantillon de surfeurs de haut niveau (48 hommes et 19 femmes) et d'en commenter son évolution en 10 ans. Nous y avons inclus les données recueillies lors des tests d'effort annuels : âge, taille, poids, masse grasse, consommation maximale d'oxygène (VO₂max), puissance maximale aérobie (PMA), fréquences cardiaques aux seuils ventilatoires aérobie (SV1) et anaérobie (SV2) exprimées en pourcentage de la fréquence cardiaque maximale (FCmax) et puissance maximale anaérobie alactique (PMAA) des membres inférieurs évaluée par un test de détente verticale. Le deuxième axe d'étude a recherché une association entre ces paramètres et la performance en surf chez les hommes avec pour critère de jugement principal le classement fédéral national. Le profil moyen témoigne d'une progression des paramètres physiologiques (VO₂max, PMAA) dans une discipline qui comprend aujourd'hui de véritables athlètes de haut niveau dont la masse grasse a diminué. Les paramètres physiologiques associés à la performance sont la détente des membres inférieurs ($p = 0,0001$), les puissances à SV2 ($p = 0,0001$) et SV1 ($p = 0,0002$) les pourcentages de FCmax atteints à SV2 ($p = 0,002$) et à SV1 ($p = 0,02$) et la PMA (0,03). En conclusion, l'entraînement devra privilégier les exercices d'explosivité des membres inférieurs et à haute intensité. Le protocole de suivi pourra être complété par un test de terrain pluriannuel.

Mots clefs : Suivi physiologique, performance en surf, effort de rame, consommation maximale d'oxygène, capacité aérobie, détente verticale, exercices intermittents.

ABSTRACT

Performance-associated physiological factors in surfing

In order to manage the training and the follow-up of the surfers from the "pôle France" in a optimal and specific way, we wanted to determine which parameters are associated with performance in high-level surfing. This retrospective study aimed to describe the average profile of a sample of high-level surfers (48 men and 19 women) and to make comments on its evolution over ten years. We included the data collected during the annual exercise stress tests: age, height, weight, body fat, maximal oxygen uptake (VO₂max), maximal aerobic power, cardiac frequency at aerobic (SV1) and anaerobic (SV2) thresholds expressed in percentage of the maximal heart rate (FCmax) and maximal anaerobic alactic power (MAAP) of the lower limbs during a vertical jump. The second axis focused on the search of an association between these parameters and the men's performance in surfing using the national federal ranking as the main judgement criterion. We evidenced improved physiological parameters (VO₂max, MAAP) in our current participants who demonstrated high-level athletes physical characteristics such as a lower body fat percentage. The physiological parameters associated with performance included the vertical jump ($p = 0,0001$), the power at SV2 ($p = 0,0001$) and SV1 ($p = 0,0002$), FCmax percentage at SV2 ($p = 0,002$) and SV1 ($p = 0,02$) and maximal aerobic power ($p = 0.03$). In conclusion, training should be focused on lower limbs-MAAP, and high intensity exercises. The follow-up protocol could be improved using a field test available throughout the year.

Key words : Physiological follow-up, surfing performance, paddling, maximal oxygen uptake, aerobic capacity, vertical jump, interval training.