



FFESSM

Commission Technique Nationale



24 QUAI DE RIVE-NEUVE  
13284 MARSEILLE CEDEX 07

TEL : 0 820 000 457

JUILLET 2011

WWW.FFESSM.FR

H. CORDIER

## **Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine**

Mémoire en vue d'obtenir le titre d'Instructeur National de plongée sous-marine



**La Genèse : palmes type « De Corlieu »**

(source : <http://lettre-musee-dumas.over-blog.com/article-palmes-anciennes-73539900.html>)

FFESSM	<b>Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine</b>	Commission Technique Nationale  Page 2/66
--------	--	--

## **REMERCIEMENTS**

Il est toujours difficile de remercier. Non pas qu'il en coûte, bien au contraire, c'est un enrichissement car remercier est souvent rendre ce qui a été donné et garder les intérêts pour soi.

La difficulté réside dans le fait de savoir qui remercier, comment le faire et pour quelles raisons le faire ?

On remercie pour se rappeler que, quoique l'on produise de nouveau, ce n'est que le résultat de l'évolution d'un savoir que certains nous ont transmis et que d'autres nous ont aidé à construire. Ce faisant, on identifie les raisons de remercier, ainsi que les destinataires de ces remerciements. La manière de remercier, chose ô combien importante, m'a été soufflée, symboliquement parlant, par P. Dac : « *La façon de remercier dépend de ce que l'on reçoit* ».

Le fait de rédiger un mémoire en vue d'obtenir le prestigieux titre d'Instructeur National de la FFESSM constitue mon remerciement pour toutes les personnes qui ont participé, à un moment ou à un autre, à ma formation car, je ne l'oublie pas, c'est grâce à eux que j'ai pu arriver jusque là. J'espère qu'ils seront remerciés de savoir que chaque ligne contient une partie de ce qu'ils m'ont appris, qu'il s'agisse des encadrants qui m'ont initié à la plongée (José Carpentier, Jean-Luc Nicol), de celui qui m'a éclairé sur son enseignement et sa compréhension globale (Christophe Desix), ou des professeurs qui m'ont transmis les rudiments de la mécanique des fluides sous ses différents aspects (Hieu Ha Minh, Patrick Chassaing, Jean Fabre, ...).

La quantité de travail fournie pour produire ce mémoire, les heures passées à en construire le contenu, à le rédiger et à le corriger constituent mes remerciements envers mes parrains (Guy Zonberg, Daniel Lehmann) et envers celles et ceux qui, d'une manière ou d'une autre, m'aident à devenir IN, qu'ils soient en place ou déçus, hauts cadres ou simples pratiquants.

En espérant qu'il pourra leur être utile à quelque chose, le contenu de ce mémoire constitue mon remerciement envers les « amis de plongée » que je côtoie depuis tant d'années, et les « collègues d'une plongée » croisés au hasard de la vie subaquatique.

Enfin, la passion de vivre au quotidien et la découverte de la richesse humaine, ces deux choses fondamentales, apprises en partie grâce à la plongée, sont mes remerciements pour Frédérique, Gustave et Clothilde qui, bien qu'ils en profitent à chaque instant, en pâtissent parfois également.

## **TABLE DES MATIERES**

<b>SYNTHESE.....</b>	<b>7</b>
<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>11</b>
1.1. CONTEXTE .....	11
1.2. PROBLEMATIQUE .....	12
1.3. OBJECTIFS DU DOCUMENT.....	13
1.4. METHODOLOGIE.....	13
<b>2. PALMAGES : DIFFERENTS TYPES .....</b>	<b>14</b>
2.1. GENERALITES.....	14
2.2. PALMAGE « ACADEMIQUE » .....	15
2.3. PALMAGE « DU GENOU » .....	16
2.4. PALMAGE « PEDALAGE » .....	17
2.5. PALMAGE « MANQUE D'AMPLITUDE » .....	18
2.6. PALMAGE « CHEVILLE BLOQUEE » .....	19
2.7. TYPES DE PALMAGE : SYNTHESE.....	20
<b>3. PALMES : DIFFERENTS TYPES.....</b>	<b>21</b>
3.1. INTRODUCTION .....	21
3.2. SE DEPLACER DANS L'EAU : RAPPELS.....	21
3.3. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES PALMES.....	23
3.3.1. Généralités et rappels .....	23
3.3.2. Palmes à voilure courte.....	24
3.3.3. Palmes à voilure longue.....	26
3.3.4. Palmes à voilure articulée.....	27
3.3.5. Palmes à voilure fendue .....	28
<b>4. ASSOCIATION « PALMAGES – PALMES ».....</b>	<b>31</b>
4.1. INTRODUCTION .....	31
4.2. METHODOLOGIE D'ETUDE.....	31
4.3. APPROCHE THEORIQUE.....	32
4.3.1. Adéquation « palme à voilure courte – palmages ».....	32
4.3.2. Adéquation « palme à voilure longue – palmages » .....	33
4.3.3. Adéquation « palme à voilure articulée – palmages » .....	35
4.3.4. Adéquation « palme à voilure fendue – palmages » .....	36
4.3.5. Approche Théorique : Synthèse.....	38
4.4. APPROCHE EMPIRIQUE .....	39
4.4.1. Limites d'étude .....	39
4.4.2. Protocole d'essais .....	40
4.4.3. Comparaison des types de palmage entre eux .....	42
4.4.4. Résultats et analyse .....	43
4.4.4.1. Palmage « du genou ».....	43
4.4.4.2. Palmage « pédalage » .....	46
4.4.4.3. Palmage « manque d'amplitude ».....	49
4.5. SYNTHESE DES APPROCHES THEORIQUE ET EMPIRIQUE.....	53
<b>5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>55</b>
5.1. CONCLUSIONS .....	55
5.2. PERSPECTIVES.....	56
<b>6. REFERENCES.....</b>	<b>57</b>

FFESSM	<b>Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine</b>	Commission Technique Nationale  Page 4/66
--------	--	--

6.1.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	57
6.2.	SITES INTERNET .....	57
<b>7.</b>	<b>ANNEXES.....</b>	<b>58</b>
7.1.	PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT D'UNE PALME .....	58
7.1.1.	<i>Forces de portance et de traînée.....</i>	58
7.1.2.	<i>Application au mouvement d'une palme .....</i>	61
7.2.	MODIFICATION DES CARACTERISTIQUES DE PALMAGE SUR DIFFERENTS TESTS .....	64
7.3.	COMPARAISON DES TYPES DE PALMAGE ENTRE EUX .....	66

### **TABLE DES FIGURES**

FIGURE 1.1 : EXEMPLE D'UN TYPE DE PALMAGE .....	11
FIGURE 2.1 : PALMAGE « ACADEMIQUE ».....	16
FIGURE 2.2 : PALMAGE « DU GENOU » (« JEUNE » PLONGEUR).....	17
FIGURE 2.3 : PALMAGE « DU GENOU » (PLONGEUR EXPERIMENTE).....	17
FIGURE 2.4 : PALMAGE « PEDALAGE » .....	18
FIGURE 2.5 : PALMAGE AVEC MANQUE D'AMPLITUDE .....	19
FIGURE 3.1 : HELICE PROPULSIVE EN BOIS CONSTRUITE PAR L'INVENTEUR DE L'HELICE : FREDERIC SAUVAGE (EXTRAIT DE <a href="http://www.musee-marine.fr/site/fr/877">HTTP://WWW.MUSEE-MARINE.FR/SITE/FR/877</a> ).....	22
FIGURE 3.2 : MOUVEMENT DE LA NAGEOIRE CAUDALE DURANT LE DEPLACEMENT D'UN DAUPHIN (EXTRAIT DE <a href="http://mglebrusc.free.fr/textes/les%20hommes/requins&amp;cetaces/deplacement.htm">HTTP://MGLEBRUSC.FREE.FR/TEXTES/LES%20HOMMES/REQUINS&amp;CETACES/DEPLACEMENT.HTM</a> ).....	23
FIGURE 3.3 : EXEMPLES DE PALMES A VOILURE COURTE.....	25
FIGURE 3.4 : EXEMPLES DE PALMES A VOILURE LONGUE.....	26
FIGURE 3.5 : EXEMPLES DE PALMES A VOILURE ARTICULEE.....	27
FIGURE 3.6 : EXEMPLES DE PALMES A VOILURE FENDUES .....	29
FIGURE 3.7 : MISE EN EVIDENCE DE LA DIFFERENCE DE TRAINEE DE PRESSION ENTRE UNE PLAQUE PLANE ET UN CYLINDRE (EXTRAIT DE [GUYON ET AL. ; 2001]).....	30
FIGURE 4.1 : MISE EN EVIDENCE DE LA FAIBLE SURFACE PROPULSIVE D'UNE PALME A VOILURE COURTE ASSOCIEE A UN PALMAGE « DU GENOU » (AVEC CHEVILLE BLOQUEE).....	32
FIGURE 4.2 : PALMAGE « PEDALAGE » AVEC UNE VOILURE COURTE : SCHEMA DE PRINCIPE .....	33
FIGURE 4.3 : MISE EN EVIDENCE D'UNE PHASE NON PROPULSIVE DANS L'ASSOCIATION « VOILURE COURTE – PALMAGE PEDALAGE » (VOIR JAMBE DROITE).....	33
FIGURE 4.4 : MISE EN EVIDENCE DE LA SURFACE PROPULSIVE D'UNE PALME A VOILURE LONGUE ASSOCIEE A UN PALMAGE « DU GENOU ».....	34
FIGURE 4.5 : MISE EN EVIDENCE DE LA DEFORMATION D'UNE PALME A VOILURE ARTICULEE ASSOCIEE A UN PALMAGE « DU GENOU ».....	35
FIGURE 4.6 : MISE EN EVIDENCE DE LA DEFORMATION D'UNE PALME A VOILURE ARTICULEE ASSOCIEE A UN PALMAGE « PEDALAGE » .....	35
FIGURE 4.7 : MISE EN EVIDENCE DU DECALAGE DES AXES DU CHAUSSON ET DE LA VOILURE SUR UNE PALME A VOILURE ARTICULEE .....	36
FIGURE 4.8 : MISE EN EVIDENCE DE LA REDUCTION DE LA TRAINEE DE PRESSION POUR DES PALMES A VOILURE FENDUE .....	37
FIGURE 4.9 : COMPARAISON DES PERFORMANCES DE CHAQUE TYPE DE PALMAGE ENTRE EUX (PALMES A VOILURE ARTICULEE).....	42
FIGURE 4.10 : EXEMPLE DE PALMAGE HYBRIDE ENTRE LES TYPES « DU GENOU » ET « ACADEMIQUE » .....	43
FIGURE 4.11 : PALMAGE TYPE « DU GENOU » - RESULTATS DES TESTS.....	43
FIGURE 4.12 : ILLUSTRATION DU TRAVAIL DES DIFFERENTES VOILURES (LONGUE, ARTICULEE, FENDUE) AVEC UN PALMAGE TYPE « DU GENOU » .....	45
FIGURE 4.13 : PALMAGE DE TYPE « PEDALAGE ».....	46
FIGURE 4.14 : PALMAGE TYPE « PEDALAGE » - RESULTATS DES TESTS .....	47
FIGURE 4.15 : ILLUSTRATION DU TRAVAIL DES DIFFERENTES VOILURES (LONGUE, ARTICULEE, FENDUE) AVEC UN PALMAGE TYPE « DU GENOU » .....	49
FIGURE 4.16 : EXEMPLE DE PALMAGE TYPE « MANQUE D'AMPLITUDE » .....	50
FIGURE 4.17 : PALMAGE TYPE « MANQUE D'AMPLITUDE » - RESULTATS DES TESTS.....	50
FIGURE 4.18 : ILLUSTRATION DU TRAVAIL DES DIFFERENTES VOILURES (COURTE, LONGUE, ARTICULEE) AVEC UN PALMAGE TYPE « MANQUE D'AMPLITUDE » .....	52
FIGURE 4.19 : MISE EN EVIDENCE DE LA DIFFERENCE DE POSITION ENTRE LES DIFFERENTS TESTS EN CAPELE POUR UN TESTEUR .....	53
FIGURE 5.1 : SYNTHESE DE L'ADEQUATION « PALMAGE – PALME » .....	55
FIGURE 7.1 : FORCE EXERCEE PAR L'EAU SUR UNE PLAQUE PLANE SE DEPLAÇANT AVEC INCLINAISON NULLE (EXTRAIT DU SITE <a href="http://pou.guide.free.fr">HTTP://POU.GUIDE.FREE.FR</a> ) .....	58

FFESSM	<b>Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine</b>	Commission Technique Nationale  Page 6/66
--------	--	--

FIGURE 7.2 : MISE EN EVIDENCE DE LA PORTANCE ET DE LA TRAINEE (EXTRAIT DU SITE <a href="http://POU.GUIDE.FREE.FR">HTTP://POU.GUIDE.FREE.FR</a> )	59
FIGURE 7.3 : VISUALISATION DE LA TURBULENCE DERRIERE UN OBJET SPHERIQUE (EXTRAIT DE <i>AN ALBUM OF FLUID MOTION</i> DE M. VAN DYKE) .....	59
FIGURE 7.4 : EVOLUTION DES COEFFICIENTS C <sub>x</sub> ET C <sub>z</sub> , POUR UNE AILE D'AVION, EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCLINAISON $\alpha$ (EXTRAIT DE [6]) .....	60
FIGURE 7.5 : RESULTANTE DE LA PORTANCE ET DE LA TRAINEE (EXTRAIT DU SITE <a href="http://WWW.ONERA.FR">HTTP://WWW.ONERA.FR</a> ) .....	61
FIGURE 7.6 : APPARITION DE LA FORCE PROPULSIVE SUR UNE PALME LORS DE LA PHASE DE DESCENTE (SCHEMA EXTRAIT DE <a href="http://WWW.NAGEAVECPALMES-FFESSM.COM">HTTP://WWW.NAGEAVECPALMES-FFESSM.COM</a> ET MODIFIE PAR L'AUTEUR) .....	62
FIGURE 7.7 : APPARITION DE LA FORCE PROPULSIVE SUR UNE PALME LORS DE LA PHASE DE REMONTEE (SCHEMA EXTRAIT DU SITE <a href="http://WWW.NAGEAVECPALMES-FFESSM.COM">HTTP://WWW.NAGEAVECPALMES-FFESSM.COM</a> ET MODIFIE PAR L'AUTEUR) .....	63
FIGURE 7.8 : MISE EN EVIDENCE D'UNE MODIFICATION DU PALMAGE EN PMT ET EN CAPELE .....	65

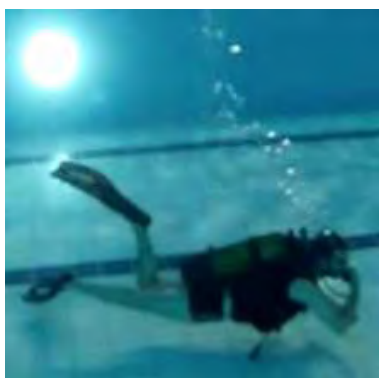
FFESSM	Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine	Commission Technique Nationale Page 7/66
--------	---	---

## SYNTHESE

### CONTEXTE

L'idée du thème de ce mémoire est née en observant les différents plongeurs rencontrés au cours de ces « quelques » années d'encadrement ou de plongée en promenade sous-marine. Ces observations ont permis de remarquer que le palmage réel des plongeurs était, bien souvent, assez éloigné du mouvement parfait que nous souhaiterions probablement tous avoir et, en tout cas, de celui que l'on essaye généralement d'apprendre au cours des (plus ou moins) longues séances de palmage.

La figure suivante illustre bien ce point car on peut y observer que le palmage de ces plongeurs n'est pas... « académique » :



Pourtant, ces 2 plongeurs arrivent à plonger ! Ceci est d'autant plus vrai que l'un de ces plongeurs est N2 et l'autre... E4. Leurs mouvements sont quasiment identiques, mais leurs performances sont différentes. En effet, le plongeur N2 est, en l'état actuel des choses, incapable de réaliser une DTH de 30 mètres, ou de tracter ses élèves dans le courant depuis l'arrière d'un bateau jusqu'au mouillage... alors que l'encadrant E4 y arrive « sans problèmes » !!! Cette différence de performance ne vient pas d'une différence de condition physique ni de puissance musculaire<sup>1</sup>. Elle provient du choix des palmes et, surtout, de **l'adéquation de ces palmes aux caractéristiques du palmage<sup>2</sup> du plongeur**.

Ce sujet m'a semblé suffisamment intéressant, complexe et permettant d'engager une réflexion ouverte et collégiale pour en faire un mémoire ; tout en gardant à l'esprit que : « *La véritable culture, celle qui est utile, est toujours une synthèse entre le savoir accumulé et l'inlassable observation de la vie* » (F. Alberoni).

### OBJECTIFS

Ce mémoire porte sur **l'adéquation, ou l'inadéquation, du couple « palmage – palmes »** et vise, en particulier, à répondre aux questions suivantes :

- Existe-t-il vraiment des associations « palmage – palmes » meilleures que d'autres ?
- Si oui :
  - Pourquoi ?
  - Quels sont les critères permettant de réaliser cette, ou ces, association(s) au mieux (i.e. : comment choisir les palmes les mieux adaptées à un type de palmage donné).
  - Cette association est-elle optimale dans toutes les conditions rencontrées en plongée (ex. : nage capelée, ballade subaquatique, nage rapide, ...) ?

<sup>1</sup> Ces 2 plongeurs ont une condition physique « normale » et une puissance musculaire comparable *a priori*.

<sup>2</sup> Certains pourraient parler de « défauts » de palmage mais nous allons dans le reste du mémoire que cette notion de « défaut » va perdre beaucoup de son sens.

## METHODOLOGIE

Pour atteindre ces objectifs nous avons, dans un premier temps, identifié les différents types de palmage et leurs caractéristiques, puis identifié les différents types de palme et leurs caractéristiques.

A partir de ces caractéristiques nous avons étudié, par une approche théorique et expérimentale, la pertinence des différentes associations possibles c'est-à-dire l'impact du couple « palmage – palme » sur le rendement global de propulsion du plongeur.

## RESULTATS

A partir d'observations faites sur le terrain 5 types principaux de palmage différents chez les plongeurs ont été identifiés. Ces 5 types sont les suivants : palmage « **académique** », « **du genou** », « **pédalage** », « **manque d'amplitude** » et « **cheville bloquée** ». D'autres palmages existent mais ils ne sont, en réalité, qu'une combinaison de ces 5 principaux types et nous ne retenons donc, dans cette étude, que ceux-là.

L'analyse de ces palmages nous a permis de définir le mouvement du pied puisqu'il s'agit bien du paramètre déterminant le mouvement de la palme. Ce mouvement est synthétisé dans le tableau suivant :

Type de Palmage	Mouvement d'un pied
« Académique »	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mouvement de battement alternatif de haut en bas, quasi vertical (peu ou pas de mouvement horizontal par rapport au corps du plongeur),</li> <li>• Amplitude moyenne à importante selon le cas,</li> <li>• Le pied est en extension en permanence<sup>3</sup> (angle « pied – tibia » ouvert au maximum des capacités physiques).</li> </ul>
« Du genou »	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mouvement quasi-circulaire autour du genou (à la manière d'un essuie-glace).</li> <li>• Selon le cas (plongeur débutant ou expérimenté), le pied sera, ou non, en extension (angle « pied – tibia » ouvert au maximum des capacités physiques) lors de la phase de descente de la palme.</li> </ul>
« Pédalage »	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mouvement de va-et-vient quasi-horizontale en ne faisant que se rapprocher et s'éloigner du buste du plongeur durant tout le mouvement,</li> <li>• Très léger battement du haut vers le bas peut être observé mais celui-ci est souvent minime.</li> </ul>
« Manque d'amplitude »	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Battement alternatif de haut en bas, quasi vertical,</li> <li>• Faible amplitude.</li> <li>• La cheville se place à chaque fois en position naturelle.</li> </ul>
« Cheville bloquée »	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Battement alternatif de haut en bas quasi vertical,</li> <li>• Faible amplitude</li> <li>• L'angle « pied – tibia » reste constant tout au long du mouvement et peut être, selon les cas, très fermé (inférieur à 135°).</li> </ul>

Tous ces palmages n'ont pas, indépendamment de la palme qu'on leur ajoute, le même rendement propulsif. Des tests pratiques ont permis de procéder à un premier classement de certains de ces types de palmage par ordre d'efficacité (ou de rendement de propulsion). D'après ces tests, le palmage « du genou » est plus efficace que celui « manque d'amplitude », lui-même plus efficace que le palmage « pédalage ». Malheureusement, ces tests n'ont pu être menés sur tous les types de palmage ni avec suffisamment de plongeur ce qui fait que, au final, on ne peut pas considérer que la conclusion soit fiable et applicable à tous les plongeurs. Ce point pourra donc être à reprendre par la suite.

<sup>3</sup> un peu comme une danseuse qui voudrait faire des pointes



Concernant les palmes de plongée, on constate, en observant le marché actuel, qu'on peut les répartir **en 4 familles principales** : les palmes **à voilure courte, à voilure longue, à voilure articulée et à voilure fendue**. Leurs principales caractéristiques, ainsi que la manière dont doit travailler la voilure pour fournir un rendement propulsif maximum ont été définies.

En conjuguant les analyses faites sur les palmages et celles menées sur les palmes nous avons ensuite tenté, par une approche théorique et empirique de faire ressortir l'adéquation<sup>4</sup>, ou l'inadéquation<sup>5</sup>, entre les différentes associations « palmage – palme » possibles. Le résultat de ces approches est synthétisé dans le tableau suivant qui présente l'état du rendement de propulsion pour chaque association « palmage – palme » (☺ = Bon ; ☹ = Moyen ; ☹ = Mauvais ; ? = Indéterminé) :

Palmage	Voilure			
	Courte	Longue	Articulée	Fendue
« Académique »	☺	☺	☹	☹
« Du genou »	☹ ou ☹	☹	☺	☺
« Pédalage »	☹	☹	☺	☺
« Manque d'amplitude »	☹	☹	?	☹
« Cheville bloquée »	☹ ou ☹	☹ ou ☹	☺	?

Ce tableau permet de conclure que :

- On peut, après avoir déterminé le type de palmage d'un élève (ou son propre type de palmage), en déduire le, ou les, type(s) de palme qui permettront d'obtenir le meilleur rendement de propulsion. De même, on peut en déduire les associations à éviter.
- Pour les palmages de type « académique » et « du genou », il est toujours possible de trouver plusieurs types de voilure qui s'adapteront bien aux caractéristiques de palmage. *A priori*, cela voudrait dire que les besoins du plongeur (en terme de déplacement) devraient pouvoir être couverts dans ces cas en choisissant la bonne voilure. Le perfectionnement technique ne semble donc, dans ces cas, pas indispensable à l'atteinte des objectifs de déplacement du plongeur.
- Pour le palmage « pédalage » on peut également trouver plusieurs types de voilure qui s'adaptent bien aux caractéristiques de palmage. Mais, le médiocre rendement de ce mouvement fait que, même si on choisit une voilure adéquate, il est possible que les objectifs de déplacement ne soient pas toujours atteints. Selon le cas, on devra donc recourir à un travail de perfectionnement technique.
- Pour le palmage « manque d'amplitude », aucun type de voilure ne donne un bon rendement. Il est donc clair que les besoins du plongeur en terme de déplacement ne pourront pas être assurés en situation réelle. Il faut donc, dans ce cas, avoir absolument recours à un perfectionnement technique afin d'améliorer l'amplitude de mouvement.
- Pour le palmage « Cheville bloquée », un seul type de voilure semble être adapté, mais cette conclusion ne repose que sur une approche théorique (il n'a pas été possible de trouver un plongeur ayant ce type de palmage pour cette étude). Il faut donc rester prudent sur cette conclusion. De plus, cette bonne adéquation dépend du degré de blocage de la cheville. Compte-tenu de ces éléments, il semble donc préférable de conseiller, lorsqu'on rencontre un plongeur ayant un palmage de ce type, d'avoir recours à du perfectionnement technique afin de corriger ce blocage lorsque cela est possible.

<sup>4</sup> Qui correspond à un bon rendement propulsif.

<sup>5</sup> Qui correspond à un rendement propulsif mauvais.

FFESSM	<b>Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine</b>	Commission Technique Nationale  Page 10/66
--------	--	---

Enfin, on gardera à l'esprit que, bien qu'il n'ait pas été possible de le démontrer avec certitude dans cette étude, certains mouvements de palmage semblent avoir, indépendamment de la voile utilisée, un meilleur rendement que d'autres, ce qui revient à dire que le perfectionnement technique au palmage permet toujours d'améliorer le rendement propulsif. Mais on peut considérer que, au bout d'un moment, on peut avoir atteint un niveau de rendement suffisant pour atteindre les objectifs de déplacement du plongeur en fonction de son niveau. N'oublions donc pas que « *l'habit ne fait pas le moine* » et qu'il ne sert à rien de vouloir « *acheter des palmes plus rapides que celles du voisin* » car le problème est plus complexe que cela.

Il convient également de faire attention car ce tableau n'est ni un dogme, ni « une bible ». Il ne permet, malheureusement, pas de traiter tous les cas que l'on rencontre en pratique. En effet, il arrive parfois qu'un plongeur ait un type de palmage « hybride », c'est-à-dire qui a des caractéristiques intermédiaires entre plusieurs des types indiqués dans ce tableau. Pour trouver la meilleure association « palmage – palme » il faudra alors « extrapoler » les résultats de celui-ci ou s'inspirer de la méthode utilisée pour le bâtir et, ainsi, recourir à une analyse poussée, voire à des tests comparatifs.

## **PERSPECTIVES**

Cette étude a permis de poser de bonnes bases sur l'adéquation de l'association « palmage – palme ».

Néanmoins, les tests pratiques n'ont pu être menés en totalité et certaines associations n'ont pu être testées. De plus, le faible nombre de testeurs nous empêche de généraliser certaines conclusions à l'ensemble des plongeurs.

Il faudrait donc continuer et enrichir ces tests afin d'augmenter la population de testeurs (plusieurs plongeurs possédant les mêmes caractéristiques de palmage) et d'augmenter le nombre de modèles de palmes testés pour améliorer la qualité des conclusions de l'étude.

Nous espérons néanmoins que ce document pourra être, en l'état, utile aux encadrants ou aux plongeurs afin de mieux comprendre la difficile alchimie entre un palmage et sa palme.

FFESSM	Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine	Commission Technique Nationale Page 11/66
--------	---	--

## 1. INTRODUCTION

### 1.1. CONTEXTE

L'idée du thème de ce mémoire est née en observant les différents plongeurs rencontrés au cours de ces « quelques » années d'encadrement ou de plongée en promenade sous-marine. Ces observations ont permis de remarquer que le palmage réel des plongeurs était, bien souvent, assez éloigné du mouvement parfait que nous souhaiterions probablement tous avoir et, en tout cas, de celui que l'on essaye généralement d'apprendre au cours des (plus ou moins) longues séances de palmage.

La question suivante s'est alors posée : « pourquoi continuer à chercher à enseigner un palmage « parfait » alors que, *in fine*, celui-ci est rarement utilisé et que, malgré cela, les plongeurs arrivent toujours à plonger ? ». Le corollaire de cette question est de se dire que si cela ne sert pas complètement à quelque chose, existe-t-il un autre moyen permettant d'atteindre le même objectif ?

La figure suivante illustre bien ce point car on peut y observer que le palmage de ces plongeurs n'est pas... « académique » (cf. Figure 1.1) :

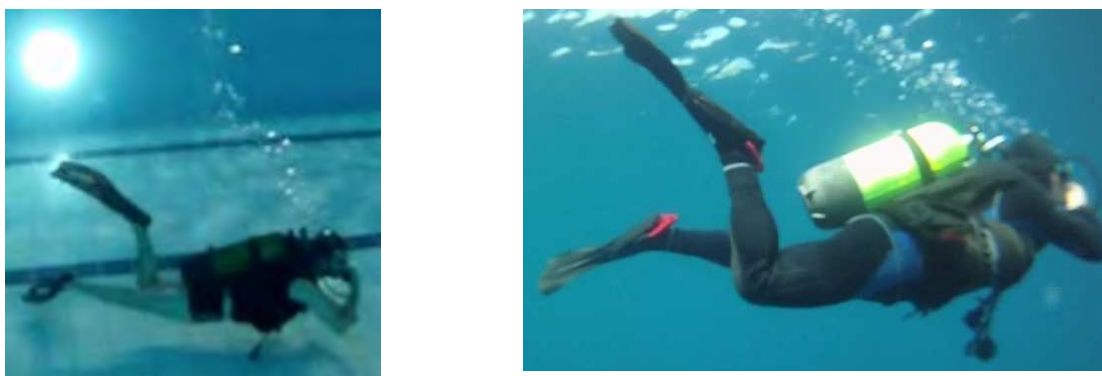


Figure 1.1 : Exemple d'un type de palmage

Pourtant, ces 2 plongeurs arrivent à plonger ! Ceci est d'autant plus vrai que l'un de ces plongeurs est N2 et l'autre... E4.

Leurs mouvements sont quasiment identiques<sup>6</sup>, mais leurs résultats sont différents. En effet, le plongeur N2 est, en l'état actuel des choses, incapable de réaliser une DTH de 30 mètres, ou de tracter ses élèves dans le courant depuis l'arrière d'un bateau jusqu'au mouillage... alors que l'encadrant E4 le y arrive « sans problèmes » !!!

La question qui se pose alors est : « d'où vient cette différence de performances entre ces deux plongeurs alors que leurs palmages respectifs semblent identiques ? ». Cela ne vient pas d'une différence de condition physique ni de puissance musculaire<sup>7</sup>. La seule possibilité restante réside donc dans le choix des palmes et **l'adéquation, ou l'inadéquation, de ces palmes aux caractéristiques du palmage<sup>8</sup> du plongeur.**

Tous les plongeurs se doutent bien que certaines palmes leur vont mieux que d'autres et choisissent LA palme qui leur convient le mieux (tout au moins le pensent-ils). Mais, ce choix est souvent basé sur des critères qui ne tiennent pas compte des caractéristiques de palmage de la personne. Il n'existe

<sup>6</sup> Une analyse plus fine des mouvements respectifs montre une légère différence de mouvement (de la cheville en l'occurrence) mais qui ne permet pas d'expliquer ces différences importantes de performances (cf. §2.3).

<sup>7</sup> Ces 2 plongeurs ont une condition physique « normale » et une puissance musculaire comparable *a priori*.

<sup>8</sup> Certains pourraient parler de « défauts » de palmage mais nous allons dans le reste du mémoire que cette notion de « défaut » va perdre beaucoup de son sens.

FFESSM	Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine	Commission Technique Nationale  Page 12/66
--------	---	--

d'ailleurs, à l'heure actuelle, aucun document se posant cette question pour les plongeurs. Ce point n'est pas non plus abordé dans la formation des encadrants (qui sont pourtant les premiers conseillé dans ce choix), ni dans celle des plongeurs. Bref, bien que le déplacement en plongée sous-marine soit l'une des fonctions de base à assurer, force est de constater qu'il y a des lacunes dans ce domaine.

Ce sujet m'a semblé suffisamment intéressant, complexe et permettant d'engager une réflexion ouverte et collégiale pour en faire un mémoire ; tout en gardant à l'esprit que : « *La véritable culture, celle qui est utile, est toujours une synthèse entre le savoir accumulé et l'inlassable observation de la vie* » (F. Alberoni).

## 1.2. PROBLEMATIQUE

**L'analyse décrite dans ce document ne concerne que la plongée sous-marine.** Bien que certains concepts soient communs avec la NAP (Nage Avec Palmes), leur mise en application dans ce document est bien spécifique aux personnes, aux conditions et aux matériels rencontrés en plongée subaquatique. Il ne faut donc pas faire le parallèle avec la NAP sans précautions<sup>9</sup>.

Concernant le déplacement subaquatique, **l'objectif final est le même quelques soient les conditions de plongée : assurer un déplacement sans jamais dépasser ses capacités physiques**<sup>10</sup>. Selon les situations, cet objectif final peut être complété :

- En plongée « ballade » : l'objectif est de se déplacer à vitesse « normale », sans s'essouffler et en cherchant à consommer le moins possible<sup>11</sup>.
- En cas de problème : l'objectif est d'être capable de faire face au(x) problème(s) (ex. : palmer rapidement pour aller chercher de l'air auprès d'un coéquipier, tracter un élève dans le courant pour lui faire rejoindre un point sûr, ...) sans dépasser ses capacités physiques car cela pourrait conduire à aggraver le problème.
- En situation d'examen (ou de préparation à un examen) : l'objectif est de réaliser un déplacement avec des contraintes (ex. : 800m PMT chronométré, DTH, nage capelé, ...). Il est donc important de ne pas dépasser ses propres limites physiologiques sous peine d'être « recalé ».

D'un point de vue physique, le déplacement à réaliser est représenté par l'énergie cinétique<sup>12</sup>. Celle-ci dépend de la masse du plongeur et du carré de sa vitesse de déplacement. On voit donc que, en plongée « ballade », le plongeur peut choisir son énergie de déplacement puisque c'est lui qui contrôle son déplacement selon ce qu'il souhaite voir ou non. En cas de problème, ou en situation d'examen, il en est tout autrement. C'est la situation qui dicte l'énergie de déplacement à acquérir et c'est donc au plongeur à s'adapter. Il est donc primordial que l'énergie musculaire à fournir pour atteindre l'énergie de déplacement nécessaire ne dépasse ce que le plongeur est capable, physiquement parlant, de fournir.

On voit donc apparaître la notion fondamentale de **rendement de propulsion (ou rendement propulsif)**. Ce rendement correspond au rapport entre l'énergie nécessaire au déplacement et l'énergie musculaire fournie par le plongeur. Ce rendement dépend :

1. de son mouvement de palmage,
2. des palmes utilisées par le plongeur,
3. de l'adéquation entre ces deux éléments.

<sup>9</sup> Les personnes éventuellement intéressées par ce point peuvent prendre contact directement avec l'auteur.

<sup>10</sup> C'est-à-dire sans dépasser la puissance maximale qu'on peut développer dans les conditions de plongée. Si on les dépasse, il faudra arrêter le déplacement à cause d'un essoufflement, d'une crampe, ou d'un taux trop important de lactates dans les muscles.

<sup>11</sup> En évitant tout de même l'hypercapnie.

<sup>12</sup>  $=1/2 mv^2$  (m : masse du plongeur ; v : vitesse de déplacement du plongeur).

FFESSM	Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine	Commission Technique Nationale Page 13/66
--------	---	--

**La problématique de la présente analyse vise donc à étudier comment ce rendement évolue en fonction des palmes utilisées, du palmage du plongeur et de leur relation mutuelle.**

### **1.3. OBJECTIFS DU DOCUMENT**

Ce mémoire porte sur **l'adéquation, ou l'inadéquation, du couple « palmage – palmes »** et vise, en particulier, à répondre aux questions suivantes :

- Existe-t-il vraiment des associations « palmage – palmes » meilleures que d'autres ?
- Si oui :
  - Pourquoi ?
  - Quels sont les critères permettant de réaliser cette, ou ces, association(s) au mieux (i.e. : comment choisir les palmes les mieux adaptées à un type de palmage donné).
  - Cette association est-elle optimale dans toutes les conditions rencontrées en plongée (ex. : nage capelée, ballade subaquatique, nage rapide, ...) ?

### **1.4. METHODOLOGIE**

Pour atteindre ces objectifs nous allons, dans un premier temps, identifier les différents types de palmage et leurs caractéristiques (cf. chapitre 2) et identifier les différents types de palme et leurs caractéristiques (cf. chapitre 3).

A partir de ces caractéristiques nous étudierons la pertinence des différentes associations possibles (cf. chapitre 4). Cette étude repose sur une approche théorique (cf. §4.3) associée à une approche expérimentale (cf. §4.4) afin de confirmer, ou de contredire, l'approche théorique.

Au final, on présentera un tableau de synthèse montrant, lorsque cela est possible, le degré d'adéquation entre chaque type de palmage et chaque type de palme (cf. §4.5).

*Remarque* : Dans toute cette étude nous avons travaillé sur un déplacement horizontal par commodité (mise en place de parcours chronométrés, mise en œuvre plus facile en piscine qu'en milieu naturel, disponibilité des « testeurs », ...). Néanmoins, et bien que cela ne soit pas présenté dans ce document, nous avons vérifié que les éléments de cette étude sont cohérents avec les observations faites en plongée et lors de déplacements verticaux. En particulier, nous avons vérifié que les caractéristiques de palmage des plongeurs restent sensiblement les mêmes lors de déplacements horizontaux et verticaux.

FFESSM	Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine	Commission Technique Nationale Page 14/66
--------	---	--

## 2. PALMAGES : DIFFERENTS TYPES

Le mouvement de palmage d'un plongeur peut être défini à l'aide de 2 éléments bien différents. Le premier élément est la puissance musculaire que développe ce plongeur pour palmer. Le second est le type de palmage, c'est-à-dire la manière dont le plongeur bouge ses pieds (car ce sont eux qui définissent le mouvement des palmes).

La puissance musculaire ne joue un rôle que pour déterminer la quantité d'énergie maximum que peut dépenser un plongeur pour essayer d'avancer. Selon son **rendement propulsif**, cette puissance sera suffisante, ou non, pour répondre aux besoins de déplacement de ce plongeur. Nous verrons par la suite que cette puissance influe également sur le rendement propulsif en relation avec la dureté de la voilure.

Dans ce chapitre nous nous intéressons aux types de palmage de nos plongeurs. Nous allons donc identifier ces types, puis définir leurs caractéristiques.

Même si, au final, **c'est le mouvement du pied qui est important dans le palmage**<sup>13</sup>, il faut prendre conscience que celui-ci est le résultat du mouvement des membres inférieurs autour de 3 articulations : la hanche, le genou et la cheville. Les différents types de palmage que l'on peut rencontrer chez les plongeurs sont donc associés à la manière dont ils mobilisent les membres autour de ces articulations<sup>14</sup>.

A partir d'observations faites sur le terrain nous avons identifié 5 types principaux de palmage différents chez les plongeurs. Ces 5 types sont les suivants<sup>15</sup> : palmage « académique », « du genou », « pédalage », « manque d'amplitude » et « cheville bloquée ». D'autres palmages existent (voir par exemple le §6.3 de [Clabé ; 2009]) mais ils ne sont, en réalité, qu'une combinaison de ces 5 principaux types et nous ne retenons donc, dans cette étude, que ceux-là.

Présentons maintenant leurs caractéristiques.

### 2.1. GENERALITES

Tous les types de palmage possèdent des caractéristiques communes. En effet, quelque soit le type de palmage on peut décomposer le mouvement en 4 phases (un peu comme un moteur à 4 temps) dont, en général, 2 sont actives (phases durant lesquelles certains groupes musculaires se contractent fortement) et 2 passives (phases durant lesquelles les groupes musculaires qui fonctionnaient se détendent et les groupes musculaires suivants se préparent à la contraction).

Ces 4 phases sont les suivantes :

1. Phase d'armement du mouvement : cette phase est active et peut être (selon le type de palmage) moyennement, faiblement voire pas du tout propulsive. Elle consiste à amener le pied de son point mort précédent à son point mort suivant en contractant les muscles postérieurs (ex. : fessiers, muscles ischio-jambiers, mollets, ...).
2. Phase de repos et de préparation de la phase suivante (images A dans les figures du présent chapitre) : cette phase est passive et peu propulsive. C'est dans cette phase que la voilure

<sup>13</sup> Car c'est lui qui fixe le mouvement de la palme, qui est le seul élément propulsif du plongeur.

<sup>14</sup> Le mémoire d'IR de G. Clabé (2009) présente les muscles utilisés pour mobiliser ces membres dans le cas du palmage. Le lecteur désireux de plus de détails pourra s'y reporter.

<sup>15</sup> Il existe un 6<sup>ème</sup> type de palmage qui est le « frog kick ». Ce type de palmage, qui ressemble au mode de propulsion utilisé par les batraciens (d'où son nom), n'est utilisable que pour se déplacer à petite vitesse et pour un déplacement horizontal. N'étant pas utilisable dans l'ensemble des situations rencontrées en plongée sous-marine (ex. : assistance, ...), nous ne le détaillons pas dans le présent document.

FFESSM	<b>Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine</b>	Commission Technique Nationale  Page 15/66
--------	--	---

reprend, grâce à ses propriétés élastiques sa forme d'équilibre (plus ou moins rapidement selon sa nervosité).

3. Phase d'extension du mouvement (images B et C dans les figures du présent chapitre) : cette phase est active et est toujours (plus ou moins selon le type de palmage) propulsive. Elle consiste à étendre le plus possible la jambe en contractant les muscles antérieurs (ex. : abdominaux, quadriceps, jambiers, extenseurs des orteils, ...).
4. Phase de repos et de préparation de la phase suivante (images C ou D dans les figures du présent chapitre) : cette phase est passive et peu propulsive. C'est dans cette phase que la voileure reprend, grâce à ses propriétés élastiques sa forme d'équilibre (plus ou moins rapidement selon sa nervosité).

Nous détaillons maintenant l'application de ces caractéristiques générales pour les différents types de palmage que l'on peut rencontrer en plongée sous-marine.

## 2.2. PALMAGE « ACADEMIQUE »

Les principales caractéristiques de ce type de palmage sont les suivantes :

- Au niveau de la hanche, le mouvement de la cuisse est relativement symétrique<sup>16</sup>. L'amplitude est moyenne à importante. Le principal muscle moteur est le psoas iliaque mais les muscles des cuisses (quadriceps) se contractent également pour maintenir la jambe la plus droite possible.
- Au niveau du genou :
  - Dans la phase de descente il se plie légèrement mais ce pliage n'est pas volontaire (i.e. : les ischio-jambiers ne se contractent pas). Au contraire, les muscles des cuisses (quadriceps) cherchent à maintenir, autant que faire se peut, le tibia dans l'alignement de la cuisse. Le pliage du genou résulte donc d'un équilibre entre le mouvement de la cuisse et la résistance de l'eau sur la palme.
  - Dans la phase de remontée de la palme, le genou se bloque naturellement.
- Au niveau de la cheville :
  - Dans la phase de descente de la palme, la cheville est laissée libre de tout mouvement. Elle se bloque donc naturellement et se retrouve tendue.
  - Dans la phase de montée de la palme, la cheville est également décontractée et se positionne naturellement. Certains plongeurs choisissent de contracter volontairement le mollet pour maintenir la palme la plus horizontale possible et gagner ainsi un peu d'impulsion (c'est le cas sur la Figure 2.1).

Ces éléments peuvent être visualisés sur les figures suivantes :



A) Montée de la palme gauche  
(fin)



B) Descente de la palme gauche  
(début de descente)

<sup>16</sup> Selon que la nage a lieu en surface ou sous l'eau.

FFESSM	<b>Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine</b>	Commission Technique Nationale  Page 16/66
--------	--	---



C) Descente de la palme gauche  
(position intermédiaire)



D) Descente de la palme gauche  
(fin)

Figure 2.1 : Palmage « académique »

Au final, il faut retenir qu'**avec le palmage « académique », le pied est en extension en permanence** (un peu comme une danseuse qui voudrait faire des pointes), **a un mouvement de battement alternatif de haut en bas, quasi vertical** (peu ou pas de mouvement horizontal par rapport au corps du plongeur) **et d'amplitude moyenne à importante.**

### 2.3. PALMAGE « DU GENOU »

Les principales caractéristiques de ce type de palmage sont les suivantes :

- Au niveau de la hanche :
  - La cuisse ne bouge quasiment pas par rapport à l'axe du buste. L'angle « cuisse – buste » reste donc quasiment constant tout au long du mouvement.
- Au niveau du genou :
  - Alors que la cuisse bouge peu, le tibia se déplace beaucoup, un peu à la manière d'un « essuie-glace ». L'angle « cuisse – tibia » varie entre 180° (i.e. : jambe tendue) et 90° (jambe pliée) tout au long du mouvement.
  - Les muscles des cuisses (quadriceps, vastes, biceps) sont les plus sollicités afin de faire bouger le tibia (et donc l'ensemble du mollet)<sup>17</sup>.
- Au niveau de la cheville :
  - En règle générale, dans la phase de montée de la palme, l'angle « tibia – pied » varie pour que le pied soit le plus horizontal possible.
  - A la descente de la palme, la cheville suit ce même mouvement (pour les « jeunes » plongeurs en général) et le pied reste donc proche de l'horizontale. Pour les plongeurs expérimentés, l'angle « tibia – pied » s'ouvre autant que faire se peut au moment où la palme doit redescendre. Le pied est alors en extension plus ou moins prononcée selon les plongeurs.

<sup>17</sup> Assez souvent, les plongeurs qui ont adopté ce type de palmage considèrent « qu'il faut de la cuisse » pour bien palmer. On comprend ici pourquoi.



FFESSM	<b>Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine</b>	Commission Technique Nationale  Page 17/66
--------	--	---

Ces éléments peuvent être visualisés sur les figures suivantes :



Figure 2.2 : Palmage « du genou » (« jeune » plongeur)

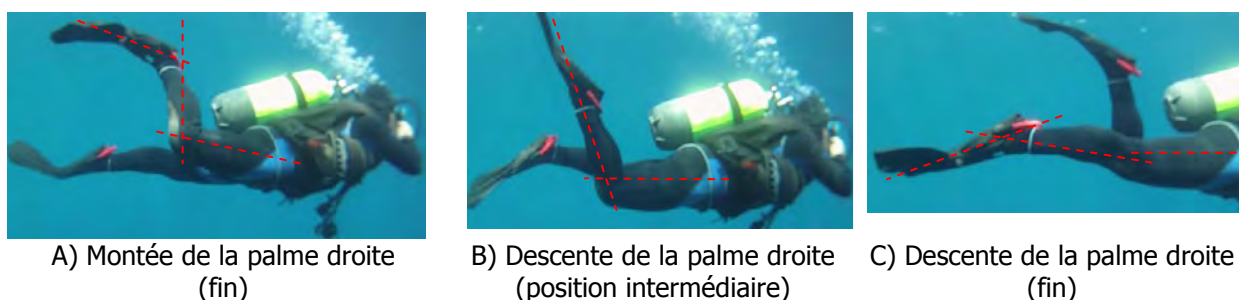


Figure 2.3 : Palmage « du genou » (plongeur expérimenté)

Comme cela a été souligné au chapitre 1, on constate bien que les deux mouvements présentés sur les figures précédentes, bien que très proches, sont, en réalité, différents et que cette différence est principalement liée à l'ouverture de la cheville dans la phase de descente de la palme<sup>18</sup>.

Au final, il faut retenir que dans **le palmage « du genou »**, **le pied décrit un mouvement quasi-circulaire autour du genou**, un peu comme un essuie-glace. Selon le cas (plongeur débutant ou expérimenté), le pied sera, ou non, en extension lors de la phase de descente de la palme.

## 2.4. PALMAGE « PEDALAGE »

Les principales caractéristiques de ce type de palmage sont les suivantes :

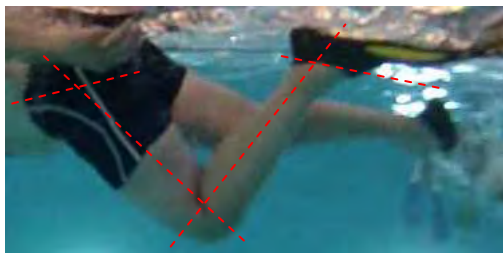
- Au niveau de la hanche :
  - La cuisse bouge beaucoup.
  - L'angle « buste – cuisse » varie entre 180° (fin de phase de remontée de la cuisse) et 90° (en fin de phase de descente de la cuisse et dans des cas extrêmes de pédalage). La cuisse se déplace donc en arc de cercle autour de la hanche.
- Au niveau du genou :
  - Dans la phase d'armement du palmage (car, comme nous allons le voir, il n'y pas vraiment de phase de descente du pied dans ce type de palmage), et en même temps que la cuisse descend, le genou se plie pour rapprocher le mollet du corps du plongeur. La forme décrite par la cuisse et le tibia ressemble donc à un « V » plus ou moins ouvert selon le moment du palmage. Ce « V » se ferme dans la phase d'armement du palmage (i.e. : lorsque le pied se rapproche du buste), et s'ouvre dans la phase propulsive (i.e. : lorsque le pied s'éloigne du buste).
  - Le pliage – dépliage du genou est, ici, volontaire.

<sup>18</sup> Nous verrons également que, contrairement au « jeune » plongeur, le plongeur expérimenté a su choisir la palme lui permettant d'exploiter au mieux cette caractéristique de son palmage et que c'est cette bonne adéquation « palmage – palme » qui explique la différence de performance entre les deux plongeurs.

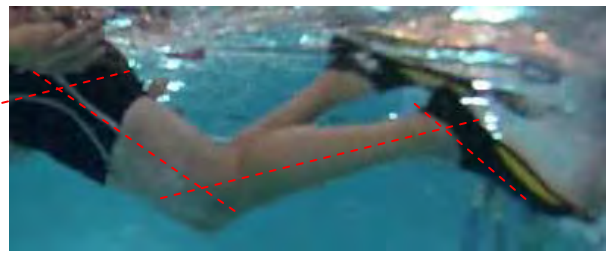
FFESSM	<b>Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine</b>	Commission Technique Nationale  Page 18/66
--------	--	--

- L'angle « cuisse – tibia » (i.e. : l'angle du « V ») varie donc entre 180° (jambe tendue en fin de phase d'extension) et 45° environ (en fin de phase d'armement du palmage).
- Au niveau de la cheville :
  - En règle générale, l'angle « pied – tibia » varie au cours du mouvement afin de maintenir le pied relativement horizontal.
  - Parfois, la cheville reste bloquée dans une position fixe tout au long du mouvement. Lorsque c'est le cas, l'angle « pied – tibia » est plus ou moins ouvert selon les personnes (de 90° pour un débutant complet<sup>19</sup> à 135° environ<sup>20</sup> pour quelqu'un de plus entraîné).

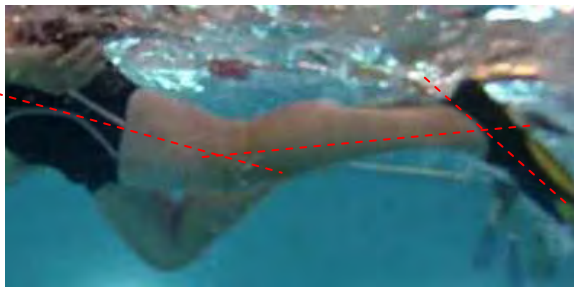
La combinaison de tous ces éléments fait que, dans ce type de palmage, le cheville décrit un cercle plus ou moins aplati (le cercle se rapproche donc plus d'une ellipse) selon les cas, ce qui lui vaut son surnom de « pédalage ». Ces éléments peuvent être visualisés sur la figure suivante :



A) Phase d'armement de la palme gauche (fin)



B) Phase propulsive (position intermédiaire)



C) Phase propulsive (fin)

Figure 2.4 : Palmage « pédalage »

Au final, il faut retenir que dans **le palmage « pédalage »**, **le pied décrit un mouvement quasi-horizontale** et ne fait que se rapprocher et s'éloigner du buste du plongeur durant tout le mouvement. Un très léger battement du haut vers le bas peut être observé mais celui-ci est souvent minime.

## 2.5. PALMAGE « MANQUE D'AMPLITUDE »

Les principales caractéristiques de ce type de palmage sont les suivantes :

- Au niveau de la hanche :
  - C'est surtout à ce niveau que l'on rencontre un manque d'amplitude. Le psoas iliaque ne se contracte pas suffisamment et la cuisse ne descend pas assez sous l'eau.

<sup>19</sup> Car il cherche à retrouver les appuis plantaires auxquels il est habitué en tant que « terrien ».

<sup>20</sup> Ce qui correspond à peu près, pour la population courante (càd à l'exclusion d'anciennes danseuses ou danseurs), à la butée naturelle du pied lorsque celui-ci est en extension.

FFESSM	<b>Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine</b>	Commission Technique Nationale  Page 19/66
--------	--	---

- Dans des cas extrêmes, l'amplitude du mouvement de la cuisse peut être comparable à celle d'un nageur en crawl (la fréquence est, en revanche, plus faible).
- Au niveau du genou :
  - Dans la phase de descente il se plie légèrement. Selon les plongeurs, ce pliage est volontaire ou involontaire. Dans ce dernier cas, il résulte d'un équilibre entre le mouvement moteur de la cuisse et la résistance de l'eau sur la palme.
  - Dans la phase de remontée de la palme, le genou se bloque naturellement.
- Au niveau de la cheville :
  - A ce niveau, le mouvement est comparable à celui du palmage « académique » (cf. §2.1).
  - Dans la phase de descente de la palme, la cheville est laissée libre de tout mouvement. Elle se bloque donc naturellement.
  - Dans la phase de montée de la palme, la cheville est également décontractée et se positionne naturellement. Certains plongeurs choisissent de contracter légèrement le mollet pour maintenir la palme la plus horizontale possible et gagner ainsi un peu d'impulsion.

Ces éléments peuvent être visualisés sur la figure suivante :



A) Montée de la palme gauche  
(fin)



B) Descente de la palme gauche<sup>21</sup>  
(position intermédiaire)



C) Descente de la palme gauche  
(fin)

Figure 2.5 : Palmage avec manque d'amplitude

Au final, il faut retenir que **dans le palmage avec manque d'amplitude, le pied décrit un mouvement de battement alternatif de haut en bas, quasi vertical mais**, contrairement au palmage « académique » **de faible, ou de très faible, amplitude.**

## 2.6. PALMAGE « CHEVILLE BLOQUEE »

Ce palmage est souvent un palmage de débutant. Il est associé à une crispation, plus ou moins prononcée selon les cas, de l'ensemble des muscles inférieurs. L'amplitude du mouvement de palmage est donc, en général, faible à moyenne, et le genou est plus ou moins bloqué selon les cas. Néanmoins, la cheville est bien l'articulation la plus bloquée et c'est pour cela que nous avons choisi ce nom pour ce type de palmage.

<sup>21</sup> On peut observer ici un léger pliage « actif » du genou mais qui reste léger.

Les principales caractéristiques de ce type de palmage sont les suivantes<sup>22</sup> :

- Au niveau de la hanche, le mouvement de la cuisse est relativement symétrique. L'amplitude est faible à moyenne. Le principal muscle moteur est le psoas iliaque.
- Au niveau du genou :
  - Dans la phase de descente de la palme, il est souvent bloqué, mais moins que la cheville car il est musculairement difficile de bloquer complètement cette articulation compte-tenu que la cuisse est motrice et que la résistance de l'eau s'exerce surtout sur la palme.
  - Dans la phase de remontée de la palme, cela dépend des cas. Pour certains plongeurs le genou reste dans la même position qu'à la descente, tandis que pour d'autres plongeurs, la jambe est tendue et le genou se bloque donc naturellement.
- Au niveau de la cheville :
  - C'est à ce niveau que le mouvement a une particularité par rapport aux autres types de palmage.
  - L'angle « tibia – pied » est assez fermé (angle compris entre 150° environ pour des plongeurs expérimentés et 90° environ pour des débutants) et reste quasiment constant tout au long du mouvement de palmage.

Au final, il faut retenir que **dans le palmage « cheville bloquée », le pied décrit un mouvement de battement alternatif de haut en bas, quasi vertical mais**, contrairement au palmage « académique » **de faible amplitude**. De plus, l'angle « pied – tibia » reste constant tout au long du mouvement et peut être, selon les cas, très fermé (inférieur à 135°).

## 2.7. TYPES DE PALMAGE : SYNTHÈSE

Les types de palmage présentés dans ce chapitre nous permettent maintenant de mieux comprendre le mouvement final des pieds lors du palmage. Ce mouvement est synthétisé dans le tableau suivant :

Type de Palmage	Mouvement d'un pied
« Académique »	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mouvement de battement alternatif de haut en bas, quasi vertical (peu ou pas de mouvement horizontal par rapport au corps du plongeur),</li> <li>• Amplitude moyenne à importante selon le cas,</li> <li>• Le pied est en extension en permanence<sup>23</sup> (angle « pied – tibia » ouvert au maximum des capacités physiques).</li> </ul>
« Du genou »	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mouvement quasi-circulaire autour du genou (~ essuie-glace).</li> <li>• Selon le cas (plongeur débutant ou expérimenté), le pied sera, ou non, en extension (angle « pied – tibia » ouvert au maximum des capacités physiques) lors de la phase de descente de la palme.</li> </ul>
« Pédalage »	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mouvement de va-et-vient quasi-horizontale en ne faisant que se rapprocher et s'éloigner du buste du plongeur durant tout le mouvement,</li> <li>• Très léger battement du haut vers le bas peut être observé mais celui-ci est souvent minime.</li> </ul>
« Manque d'amplitude »	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Battement alternatif de haut en bas, quasi vertical,</li> <li>• Faible amplitude.</li> <li>• La cheville se place à chaque fois en position naturelle.</li> </ul>
« Cheville bloquée »	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Battement alternatif de haut en bas quasi vertical,</li> <li>• Faible amplitude</li> <li>• L'angle « pied – tibia » reste constant tout au long du mouvement et peut être, selon les cas, très fermé (inférieur à 135°).</li> </ul>

<sup>22</sup> Il n'a pas été possible d'obtenir des visualisations *in-situ* de ce type de palmage.

<sup>23</sup> un peu comme une danseuse qui voudrait faire des pointes

FFESSM	Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine	Commission Technique Nationale Page 21/66
--------	---	--

### 3. PALMES : DIFFERENTS TYPES

#### 3.1. INTRODUCTION

Le Petit Larousse illustré (édition 2000) donne la définition suivante : « **Palme** *n.f.* (*lat.* palma) : *Nageoire en caoutchouc qui s'ajuste au pied et qui augmente la vitesse, la puissance de nage* ».

On peut reformuler cette définition en disant qu'une palme est un ustensile permettant d'augmenter le **rendement propulsif** de la nage. Les contraintes spécifiques de la plongée sous-marine (utilisation de matériel lourd, nage sur un temps assez long, nécessité de pouvoir porter assistance, ...) obligent le plongeur à utiliser un tel dispositif car il ne peut utiliser que ses pieds pour se déplacer.

Le but de ce chapitre est de classer les différents types de palmes qui existent à l'heure actuelle sur le marché en identifiant leurs principales caractéristiques techniques. Nous verrons ensuite que chaque type de palme est fait pour « travailler » d'une certaine manière, son rendement étant alors optimum.

#### 3.2. SE DEPLACER DANS L'EAU : RAPPELS

Avant de regarder les différents types de palme existants sur le marché, nous allons rappeler, de manière simple, les principes physiques du déplacement d'un plongeur dans l'eau à l'aide de palmes. Une description plus complète et détaillée est disponible dans la référence [Cordier ; 2004].

Le déplacement d'une personne dans l'eau utilise les mêmes principes physiques que pour l'envol d'une fusée dans l'air ou la propulsion d'un avion.

Il faut expulser, dans le sens contraire de celui où l'on souhaite se déplacer, une certaine quantité de fluide<sup>24</sup> et ce, à une vitesse supérieure à celle de son propre déplacement.

En terme physique cela revient à dire qu'il faut créer *la poussée* la plus importante possible. La poussée produite (par un turboréacteur par exemple) est égale au produit du débit masse de fluide ( $\dot{m}$ ) expulsé par la différence entre sa vitesse d'expulsion ( $\vec{v}_{sortie}$ ) et celle du déplacement ( $\vec{v}_{déplacement}$ ). C'est une force (qui est une grandeur vectorielle) que l'on écrit :

$$\vec{p} = \dot{m}(\vec{v}_{sortie} - \vec{v}_{déplacement})$$

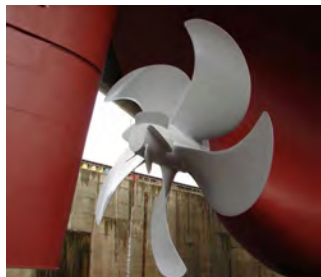
Un corps qui exerce une poussée sur un fluide reçoit, par réaction, une poussée de même intensité mais dans le sens contraire au déplacement du fluide. Si le fluide s'écoule vers l'arrière, le corps qui crée cette poussée va donc avancer.

Pour qu'un nageur se déplace vers l'avant, il doit donc envoyer de l'eau vers l'arrière afin de créer cette poussée. Plus la quantité d'eau envoyée par seconde est importante et/ou plus la vitesse d'éjection de cette quantité d'eau est grande par rapport à la vitesse de déplacement du nageur, plus celui-ci ira vite.

Pour créer la poussée nécessaire à ce déplacement dans l'eau, la nature a trouvé 4 moyens différents. L'homme n'en exploite que 3 qui sont les suivants<sup>25</sup> :

<sup>24</sup> De l'eau dans le cas d'un nageur ou d'un plongeur, des gaz de combustion ou de l'air dans le cas d'une fusée ou d'un avion

<sup>25</sup> Le 4<sup>ème</sup> moyen correspond à celui mis en œuvre, entre autres, dans le déplacement des poulpes (éjection d'eau contenue dans une réserve par contraction musculaire) mais l'homme n'a, à notre connaissance, jamais utilisé ce principe pour se déplacer sous l'eau (c'est pourquoi il n'est pas détaillée ici).

**L'hélice**

source :  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Sokoto\\_propeller.jpg](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Sokoto_propeller.jpg)

**La nageoire caudale**

source :  
[http://www.france5.fr/carnets-d-expedition/IMG/cache-640x427/03\\_Nageoire\\_caudale\\_cachalot\\_Guadeloupe-640x427.jpg](http://www.france5.fr/carnets-d-expedition/IMG/cache-640x427/03_Nageoire_caudale_cachalot_Guadeloupe-640x427.jpg)

**La rame**

source : <http://www.fototac.net/article-21981822.html>

**L'hélice** permet d'expulser de l'eau (ou tout autre fluide) vers l'arrière grâce à un mouvement rotatif d'axe parallèle au déplacement. Bien que ce système soit assez efficace, son principe n'est pas utilisé pour la propulsion sous-marine des plongeurs à l'aide des jambes ou des bras<sup>26</sup>.

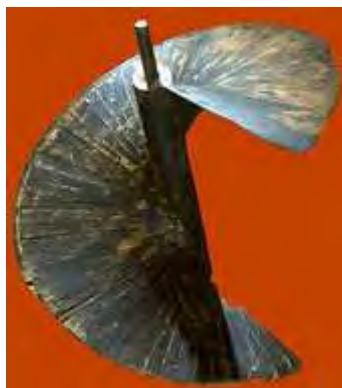


Figure 3.1 : Hélice propulsive en bois construite par l'inventeur de l'hélice : Frédéric Sauvage (extrait de <http://www.musee-marine.fr/site/fr/877>).

**La nageoire caudale** permet d'expulser de l'eau vers l'arrière grâce à un déplacement de haut en bas et de bas en haut comme cela est indiqué sur la Figure 3.2. Cela se produit en plaçant l'axe de la surface propulsive (ex. : nageoire, voile de palme, pieds, ...) parallèle à l'axe du déplacement. Ce principe est celui qui est généralement (et historiquement) associé au palmage. Le principe de fonctionnement est comparable à celui d'une aile d'avion, mais qui fonctionnerait « à l'inverse ». En effet, et de manière synthétique<sup>27</sup>, la circulation d'un fluide autour d'une aile d'avion génère 2 forces que sont la portance (qui sert à faire voler l'avion) et la traînée (qui tend à freiner l'avion). Pour une nageoire on fait l'inverse, c'est-à-dire que l'on déplace la palme en créant ces forces (grâce à l'action des pieds), ce qui entraîne le déplacement du fluide et permet ensuite, par réaction, de créer le déplacement du plongeur.

<sup>26</sup> Ceci n'est pas totalement vrai car ce principe a été utilisé sur le « vélo subaquatique » et le « scubster » (cf. : <http://www.techno-science.net/forum/viewtopic.php?t=19347>) mais ce cas sort du cadre de ce mémoire.

<sup>27</sup> Voir en annexe (cf. §7.1) pour plus de détails.



FFESSM	Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine	Commission Technique Nationale Page 23/66
--------	---	--



Figure 3.2 : Mouvement de la nageoire caudale durant le déplacement d'un dauphin (extrait de <http://mglebrusc.free.fr/textes/les%20hommes/requins&cetaces/deplacement.htm>)

Le principe de **la rame** consiste à « pousser l'eau » vers l'arrière en s'appuyant dessus. Le principe de fonctionnement est identique à celui de la nageoire (càd : déplacement de la surface propulsive qui entraîne le déplacement de l'eau qui entraîne le mouvement) **sauf que l'axe de la surface propulsive (ex. : paume de la main, voilure de palme, ...) est placé perpendiculairement à l'axe du déplacement**. C'est également ce principe que l'on utilise avec une roue à aubes. Ce principe est également utilisé, avec plus ou moins de succès, lors du palmage, pour peu que celui-ci, ou les palmes utilisées, présentent des caractéristiques particulières.

A titre d'illustration on peut noter que, pour se déplacer dans l'eau, un nageur de crawl utilise le principe de la nageoire caudale au niveau des pieds et celui de la rame (ou de la roue à aubes) au niveau des mains. En brasse, il utilise le principe de la rame au niveau des pieds et des mains.

Le plongeur, en revanche, ne peut utiliser que le mouvement de ses pieds pour se déplacer<sup>28</sup>. C'est pour cela qu'il a besoin de palmes. Nous verrons au chapitre 4 que celui-ci peut utiliser les principes de la nageoire caudale ou de la rame selon son type de palmage.

### 3.3. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES PALMES

#### 3.3.1. Généralités et rappels

D'une manière générale, une palme de plongée est constituée d'un chausson et d'une voilure.

La partie qui nous intéresse ici est la voilure car c'est elle qui permet l'essentiel de la propulsion. Celle-ci se caractérise par :

- Sa surface (ou sa longueur).
- La présence de particularités de conception, comme par exemple les voilures fendues ou celles qui sont articulées.
- Sa dureté, c'est-à-dire sa capacité à se déformer sous la contrainte. Une palme très dure nécessite de dépenser beaucoup d'énergie pour se déformer, mais restituera cette énergie au moment où elle se remettra en place. La dureté d'une palme dépend principalement du matériau utilisé et de la présence, ou non, de « raidisseurs » sur les palmes (souvent placés sur les cotés mais qui peuvent également, sur certains modèles, être intégrés dans la voilure).
- Sa nervosité, c'est-à-dire la rapidité avec laquelle elle reprend sa forme initiale après avoir été déformée. La nervosité d'une palme dépend principalement du matériau utilisé pour la voilure.

<sup>28</sup> Car il a besoin de ses mains pour différentes choses (ex. : gérer son gilet, porter assistance à un coéquipier, ...). Ce point est abordé plus en détails dans la référence [Cordier ; 2004], au §3.2.5.

FFESSM	<b>Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine</b>	Commission Technique Nationale  Page 24/66
--------	--	---

Pour assurer la propulsion, la voileure peut être utilisée de 2 manières différentes :

- Comme une nageoire caudale : l'axe de la voileure doit alors être proche (mais pas trop proche) de celui du déplacement. De plus, pour pouvoir créer une force de propulsion, la voileure doit se déformer pour adopter une forme comparable à celle d'une aile d'avion et faire ainsi apparaître une portance (voir explications en annexe, cf. §7.1).
- Comme une rame : l'axe de la voileure doit alors être le plus perpendiculaire possible de l'axe du déplacement. De plus, pour pouvoir créer une force de propulsion, la voileure doit être la plus droite possible et présenter la surface la plus importante possible face au déplacement (ex. : sur une barque, on avance moins bien en ramant avec des rames « à plat »). Cela permet, en effet, de créer la force de traînée la plus importante et donc, par réaction, la poussée la plus importante (voir explications en annexe, cf. §7.1).

Ces éléments permettent de comprendre que, compte-tenu de la conception actuelle des palmes, la voileure peut se diviser en 2 parties :

- Une partie qui ne participe pas à la propulsion. C'est la partie la plus proche du pied car, compte-tenu de la rigidité de la voileure et de la position du pied par rapport à l'axe du déplacement, cette partie est celle qui se déforme le moins et qui génère donc la force propulsive la plus faible<sup>29</sup> (cf. §7.1.1).
- Une partie propulsive qui correspond au reste de la voileure.

**Pour obtenir le meilleur rendement de propulsion il faut donc maximiser la partie propulsive de la palme.** Or, la séparation entre ces 2 parties (propulsive et non-propulsive) de la voileure n'est pas une séparation fixe qui dépendrait uniquement de la palme puisque celle-ci est liée à l'angle de la voileure par rapport au déplacement (cf. Figure 7.4). Elle dépend donc non seulement des caractéristiques de la palme (longueur de voileure, particularités de conception, dureté, nervosité), mais également des caractéristiques du plongeur comme : (i) sa puissance musculaire (plus elle est élevée et plus la voileure aura tendance à se déformer) et (iii) du type de palmage (la voileure se déformera différemment selon le mouvement du pied du plongeur).

Dans ce chapitre, consacré aux palmes, nous cherchons à définir les caractéristiques des palmes et à déterminer, de manière théorique, le mouvement permettant d'obtenir le meilleur rendement propulsif avec ces palmes **c'est-à-dire le mouvement de la voileure permettant de créer la surface propulsive maximale, pendant le temps le plus long sur un cycle de palmage.**

En observant les palmes de plongée actuellement disponibles sur le marché, on constate qu'on peut les répartir **en 4 familles principales** : les palmes **à voileure courte, à voileure longue, à voileure articulée et à voileure fendue**. Cette répartition est celle que nous détaillons maintenant.

### **3.3.2. Palmes à voileure courte**

La figure suivante montre quelques exemples de palmes à voileure courte<sup>30</sup> :

<sup>29</sup> Cette force peut même, dans certains cas, aller à l'encontre du mouvement désiré et donc freiner le plongeur.

<sup>30</sup> On exclut volontairement les palmes qui ne sont pas conçues pour la plongée sous-marine (ex. : palmes Décathlon®, ...) car elles ne sont pas suffisamment propulsives pour des plongeurs.





Figure 3.3 : Exemples de palmes à voilure courte

D'une manière générale, les palmes à voilure courte sont souvent les palmes « d'entrée de gamme » et possèdent les caractéristiques suivantes :

<b>Caractéristique de la voilure</b>	<b>Valeur</b>
<b>Longueur ou Surface propulsive</b>	< ~35 cm < ~750 cm <sup>2</sup>
<b>Particularités de conception</b>	Aucune
<b>Dureté</b>	Moyenne
<b>Nervosité</b>	Faible à Moyenne

Tableau 3-1 : Principales caractéristiques des palmes à voilure courte

Ces caractéristiques entraînent que, pour être utilisé avec le meilleur rendement propulsif possible :

- **Ce type de palme doit être utilisé comme une « nageoire caudale »**, c'est-à-dire avec un mouvement du chausson le plus vertical possible. En effet, l'association d'une voilure courte et d'une dureté moyenne vont empêcher la voilure de se déformer beaucoup. Donc, si l'on cherche à utiliser ce type de palme comme une rame, tout en gardant l'axe du pied relativement horizontal, la surface de cette rame sera faible et ne permettra donc pas de s'appuyer beaucoup sur l'eau. Le rendement propulsif sera alors faible.

- **Ce type de palme doit être utilisé avec un battement plutôt ample** car, la voileure étant courte, sa partie propulsive est, elle aussi, « petite ». Pour que cette partie propulsive soit la plus grande possible (afin d'obtenir le meilleur rendement de propulsion), il faut que la voileure puisse se déformer au mieux<sup>31</sup>. Mais la dureté moyenne de ce type de voileure (couplée au fait que, la voileure étant petite, le porte-à-faux sera faible) entraîne que, pour obtenir une bonne déformation, il faille l'utiliser avec un mouvement plutôt ample et/ou puissant de palmage afin de lui fournir assez d'énergie<sup>32</sup> pour lui permettre de se déformer. Néanmoins, il faut faire attention à ne pas avoir une amplitude « trop » importante car la voileure se déformerait trop, ce qui ferait chuter le rendement de manière importante<sup>33</sup>.

Plus on s'éloigne de ces conditions de fonctionnement et plus le rendement propulsif de ces palmes diminue.

### 3.3.3. Palmes à voileure longue

La figure suivante montre quelques exemples de palmes à voileure longue :



Figure 3.4 : Exemples de palmes à voileure longue

Globalement, les palmes à voileure longue possèdent les caractéristiques suivantes :

Caractéristique de la voileure	Valeur
Longueur ou Surface propulsive	> ~45 cm > ~800 cm <sup>2</sup>
Particularités de conception	Aucune
Dureté	Moyenne à Elevée
Nervosité	Moyenne à Elevée

Tableau 3-2 : Principales caractéristiques des palmes à voileure courte

<sup>31</sup> Cet optimum de déformation est un équilibre entre la dureté de la palme et la puissance musculaire de celui qui l'utilise. Si l'un des deux est très différent de l'autre, la surface propulsive sera diminuée.

<sup>32</sup> On rappelle que l'énergie (en Joule) est le produit de la puissance (en Watt) par le temps (en secondes). On peut donc jouer sur ces 2 paramètres pour obtenir une quantité d'énergie donnée.

<sup>33</sup> A cause de la chute du coefficient de portance à partir d'un certain angle limite (cf. Figure 7.4).

Ces caractéristiques entraînent que, pour être utilisé avec le meilleur rendement propulsif possible :

- **Ce type de palme est conçu pour être utilisé comme une « nageoire caudale »**, c'est-à-dire avec un mouvement du chausson le plus vertical possible. En effet, l'association d'une longue voilure et d'une dureté moyenne à élevée va permettre à la voilure de se déformer (mais pas trop) sur une partie importante de sa longueur et d'obtenir ainsi une grande surface propulsive. Le fait de l'utiliser comme une rame ne permettra pas, compte-tenu de la dureté de la voilure, d'obtenir une surface propulsive aussi élevée, mais celle-ci peut être suffisamment importante pour satisfaire les besoins d'un plongeur (cf. §4.3.2 et §4).
- **Ce type de palme doit être utilisé avec un battement plutôt ample et/ou puissant** car, la surface de la voilure étant importante et la dureté étant moyenne à élevée, il faut beaucoup d'énergie pour déformer celle-ci afin de la rendre propulsive. Avec un battement ample, cette énergie est à dépenser moins souvent sur 1 cycle de mouvement qu'avec un battement de faible amplitude, ce qui améliore le rendement propulsif. Néanmoins, il faut faire attention à ne pas avoir une amplitude « trop » importante car la voilure pourrait alors trop se déformer, ce qui ferait chuter le rendement<sup>34</sup>.

Plus on s'éloigne de ces conditions optimales de fonctionnement et plus le rendement propulsif de ce type de palme diminue.

### 3.3.4. Palmes à voilure articulée

La famille des palmes à voilure articulée correspond à des palmes pour lesquelles la voilure contient une articulation permettant à la palme de se déformer différemment (i.e. : de manière discontinue) selon l'endroit de la voilure où l'on se place. Selon les modèles cette articulation est réalisée à l'aide d'un système de ressort, d'une charnière ou d'une forme spécifique de la voilure (cf. Figure 3.5).

La figure suivante montre quelques exemples de palmes à voilure articulée :



Palme Seawing  
(Scubapro)



Palme Slingshot  
(Aqualung)



Palme Volo  
(Mares)



Palme XSteam  
(Mares)

Figure 3.5 : Exemples de palmes à voilure articulée

<sup>34</sup> A cause de la chute du coefficient de portance à partir d'un certain angle limite (cf. Figure 7.4).

Globalement, les palmes à voile articulée possèdent des caractéristiques proches de celles à voile courte mais avec une particularité de conception :

<b>Caractéristique de la voile</b>	<b>Valeur</b>
<b>Longueur ou Surface propulsive</b>	~35 à 40 cm  ~700 cm <sup>2</sup>
<b>Particularités de conception</b>	Articulation
<b>Dureté</b>	Faible
<b>Nervosité</b>	Moyenne

Tableau 3-3 : Principales caractéristiques des palmes à voile articulée

Cette articulation supplémentaire vise à s'affranchir du fait que, sur une voile classique, dureté et nervosité sont liées par les caractéristiques du matériau utilisé pour la voile. Or, si l'on souhaite faire fonctionner une palme comme une rame (plutôt que comme une nageoire caudale), il faut fortement déformer la voile afin que celle-ci présente la surface propulsive la plus importante possible. Avec une voile classique il faut donc une palme très souple (i.e. : de faible dureté) mais elle sera alors peu nerveuse (i.e. : elle reprendra sa forme initiale lentement) ce qui est dommageable pour le rendement propulsif.

L'utilisation d'une articulation permet, en quelque sorte, de diminuer artificiellement la dureté de la voile (en lui permettant de se déformer fortement) sans trop nuire à sa nervosité (en utilisant un matériau ou un système qui permettra de ramener rapidement la voile dans sa position initiale).

Ces caractéristiques entraînent que, pour être utilisé avec le meilleur rendement propulsif possible :

- **Ce type de palme est conçu pour être utilisé comme une « rame »**, c'est-à-dire avec un mouvement du chausson plutôt horizontal. Avec ce mouvement et l'articulation sur la voile, celle-ci se plie fortement et présente alors une surface propulsive importante. Celle-ci peut alors être presque parfaitement perpendiculaire à l'axe du déplacement, ce qui est impossible avec une voile classique.
- **L'amplitude du mouvement et la puissance du palmage ont moins d'importance qu'avec les autres types de palme.** En effet, l'articulation de la voile est faite pour que la déformation de celle-ci soit la plus facile possible et nécessite donc le moins d'énergie possible. Il suffit donc que cette amplitude ne soit pas trop faible.

Plus on s'éloigne de ces conditions optimales de fonctionnement et plus le rendement propulsif de ce type de palme diminue.

Néanmoins, il faut remarquer que si on utilise ce type de palmes comme une rame, le mouvement de retour (ou d'armement) de la palme est, comme avec toute rame, peu propulsif car travaillant avec une voile peu déformée et parallèle à l'axe du déplacement. Donc, même si le rendement de ce type de palme est bon dans la phase active du palmage, celui-ci est globalement moyen, du fait de la phase peu propulsive de retour de la palme. Il peut néanmoins satisfaire aux besoins du plongeur selon les cas (ex. : promenade sous-marine, efforts modérés, ...).

### **3.3.5. Palmes à voile fendue**

Avant de regarder les caractéristiques de ce type de palmes, on peut faire la remarque qu'il est, quand même, assez étonnant de se dire qu'une palme puisse être efficace avec un grand trou au milieu !!! Cette remarque, bien que souvent entendue sur les bateaux de plongée n'est pourtant pas toujours conforme à la réalité.

La figure suivante montre quelques exemples de palmes à voile fendue :



Figure 3.6 : Exemples de palmes à voile fendue

Globalement, les palmes à voile fendue possèdent les caractéristiques suivantes :

Caractéristique de la voile	Valeur
Longueur ou Surface propulsive	~35 à 40 cm ~700 cm <sup>2</sup>
Particularités de conception	Voilure fendue
Dureté	Faible à Moyenne
Nervosité	Faible à Moyenne

Tableau 3-4 : Principales caractéristiques des palmes à voile fendue

Ces caractéristiques entraînent que, pour être utilisé avec le meilleur rendement propulsif possible :

- Ce type de palme est conçu pour être utilisé comme une « rame »,** c'est-à-dire avec un mouvement du chausson plutôt horizontal. En effet, la voile est souple afin de se déformer au maximum pour que celle-ci présente la surface propulsive la plus importante possible lors d'un mouvement horizontal (i.e. : dans l'axe du déplacement) du chausson. Comme déjà précisé, un nageur en crawl utilise exactement ce principe avec ses mains. Or, on sait qu'un nageur de crawl, lorsqu'il prend appui sur l'eau avec ses mains, écarte légèrement ses doigts car la force propulsive créée en écartant légèrement les doigts est supérieure à celle obtenue en les fermant. C'est, tout simplement, parce que cela diminue la traînée de pression (cf. §7.1.1) qui a tendance à freiner le mouvement, sans diminuer la poussée. En effet, une main fermée ressemble à une plaque plane alors qu'une main ouverte ressemble à 5 cylindres mis cote à cote. La surface présentée à l'eau (i.e. : le maître couple) est identique dans les deux cas, la poussée créée est donc identique dans les 2 cas. En revanche, la traînée de pression est plus faible avec les doigts espacés car ils génèrent, dans leur sillage, moins de tourbillons car un cylindre pénètre mieux dans l'eau qu'une plaque plane. Ce point est illustré sur la figure suivante (cf. Figure 3.7). La dépression créée, et donc la traînée de pression, est plus faible derrière chaque doigt séparés ce qui diminue, au global, la force de traînée subie par la main ce qui la freine moins. **En ajoutant la voile d'une palme qui travaille parallèlement au déplacement (comme une rame), on diminue donc la résultante des forces de traînée sans (trop) toucher, selon les conditions d'utilisation, à la poussée, ce qui permet d'augmenter le rendement propulsif.**

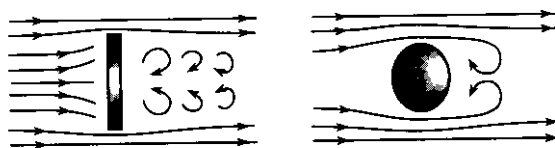


Figure 3.7 : Mise en évidence de la différence de traînée de pression entre une plaque plane et un cylindre (extrait de [Guyon et al. ; 2001])

- De même qu'avec les voilures articulées, **l'amplitude du mouvement et la puissance du palmage ont moins d'importance qu'avec les autres types de palme** (à voile courte et à voile longue). En effet, la souplesse de la voile est faite pour que la déformation de celle-ci soit la plus facile possible et nécessite donc le moins d'énergie possible. Il suffit alors que celle-ci ne soit pas trop faible pour ne pas trop déformer la voile ce qui nuirait au rendement propulsif.

Plus on s'éloigne de ces conditions optimales de fonctionnement et plus le rendement propulsif de ce type de palme diminue.

Néanmoins, il faut remarquer que si on utilise ce type de palmes comme une rame, le mouvement de retour (ou d'armement) de la palme est, comme avec toute rame, peu propulsif car travaillant avec une voile peu déformée et parallèle à l'axe du déplacement. Donc, même si le rendement de ce type de palme est bon dans la phase active du palmage, celui-ci est globalement moyen, du fait de la phase peu propulsive de retour de la palme. Il peut néanmoins satisfaire aux besoins du plongeur selon les cas (ex. : promenade sous-marine, efforts modérés, ...).

FFESSM	Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine	Commission Technique Nationale Page 31/66
--------	---	--

## 4. ASSOCIATION « PALMAGES – PALMES »

### 4.1. INTRODUCTION

Après avoir classé et déterminé les caractéristiques des différents types de palmage et des différents types de palme nous allons chercher à déterminer les associations « palme – palmage » qui semblent être les meilleures et, à l'inverse, celles qui semblent être les moins bonnes.

Le but de ce travail est de montrer qu'un palmage donné, même s'il est généralement considéré comme « mauvais » (car s'éloignant du palmage « académique ») peut, compte-tenu de l'offre importante en palmes aujourd'hui disponible, permettre d'obtenir un rendement correct, voire bon. *A contrario*, le but est également de montrer que certains types de palme ne doivent pas être associés à certains types de palmage sous peine de voir le rendement propulsif s'effondrer ce qui risque d'entraîner essoufflement ou surconsommation en air, fatigue ou mauvaises performances pour le plongeur. On pourrait, pour synthétiser cette idée en disant que, de nos jours, « tout le monde peut trouver palme à son pied sans pour autant adapter sa démarche ».

Mais un point très important doit être rappelé. Le rendement propulsif dont on parle correspond au rapport entre l'énergie récupérée pour le déplacement<sup>35</sup> et celle fournie à la palme. Un bon rendement veut donc dire que ce rapport est proche de 1 alors qu'un rendement médiocre indique que ce rapport se rapproche de 0.

Mais, comme nous l'avons vu au chapitre 1 (cf. §1.2), les besoins du plongeur ne s'expriment pas directement en terme de rendement propulsif. Le plongeur a besoin d'une certaine quantité d'énergie pour assurer son déplacement<sup>36</sup>. Il peut donc l'obtenir même avec une palme et un palmage de mauvais rendement. La différence est alors que, pour obtenir cette quantité d'énergie il aura dû en dépenser beaucoup plus. Toute le problème se résume alors à une question simple : « *quelle quantité d'énergie un plongeur peut-il, ou accepte t'il, de dépenser pour se déplacer ?* ». La réponse à cette question est individuelle. **Il ne faudra donc pas s'étonner si, malgré le fait que certaines associations « palme – palmage » ne soient pas bonnes (car ne donnant pas un rendement propulsif correct), on puisse néanmoins les rencontrer en pratique** et que, consciemment ou non, les plongeurs pratiquant ces associations soient néanmoins... heureux de le faire. L'encadrant passionné et patient pourra alors peut-être faire preuve d'une dose extrême et constante de pédagogie pour faire évoluer cette association vers une meilleure qui rendra alors notre plongeur... encore plus heureux car il consommera moins d'air et se sentira, *in fine*, mieux.

### 4.2. METHODOLOGIE D'ETUDE

Le but de ce chapitre est de déterminer les associations « palmage – palme » permettant d'obtenir les meilleurs rendements propulsifs et, par extension, de déterminer celles qui sont moins pertinentes.

Pour cela nous procédons de 2 manières différentes mais complémentaires.

Dans un premier temps (cf. §4.3) nous allons nous appuyer sur les caractéristiques des différents types de palmage et de palme vus aux chapitres précédents (cf. §2 et §3) pour déterminer, sur la base d'un raisonnement théorique, la qualité de toutes les associations possibles.

Puis, dans un second temps (cf. §4.3.5) nous allons procéder à des tests *in-situ* où nous ferons palmer des plongeurs possédant des types de palmage différents avec des types de palmes différents sur des distances identiques, tout en les chronométrant. Cela nous permettra alors de confirmer, ou non, les analyses théoriques précédentes. Enfin, nous ferons une synthèse de ces différents éléments

<sup>35</sup> Sous forme d'énergie cinétique.

<sup>36</sup> Celle-ci est plus ou moins importante selon le cas. Elevée pour un effort particulier (ex. : épreuve d'examen, lutte contre un courant, tractage, ...) ou faible lors d'une plongée de ballade sans difficultés particulières.



FFESSM	Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine	Commission Technique Nationale Page 32/66
--------	---	--

pour construire, sur la base de ces approches théoriques et empiriques, un tableau permettant d'identifier la qualité des différentes associations « palmage – palme » possibles.

### 4.3. APPROCHE THEORIQUE

#### 4.3.1. Adéquation « palme à voilure courte – palmages »

En théorie, on constate que **les palmes à voilure courte semblent plutôt adaptées à un palmage « académique »** avec un mouvement ample.

*A contrario*, **ce type de palme n'est pas adapté à un palmage « manque d'amplitude »** car celui-ci ne permettra pas à la voilure de se déformer suffisamment.

Le **palmage « du genou » semble moyennement, ou non-adapté à ce type de voilure** car :

- Dans la phase de descente de la palme, le palmage « du genou » fait, *a priori*, travailler la voilure en partie comme une rame (car le pied se déplace en partie sur un plan horizontal) et en partie comme une nageoire caudale (car le pied se déplace en partie sur le plan vertical). La surface propulsive (et donc le rendement propulsif de la palme) est alors extrêmement dépendante de la position de la cheville :
  - Si la cheville est en extension : la plus grande partie de la voilure travaille comme une rame (car elle est plutôt perpendiculaire à l'axe de déplacement) et est propulsive. Le rendement propulsif est alors bon.
  - Si la cheville est bloquée à l'horizontal : la voilure travaillera en partie comme une nageoire caudale et en partie comme une rame, mais se déformera peu (compte-tenu de sa faible longueur et de sa dureté) et le rendement propulsif sera alors moyen. Ce point est illustré sur la figure suivante (seule la partie de la voilure entourée est propulsive ce qui représente moins de la moitié de la surface totale de voilure) :



Figure 4.1 : Mise en évidence de la faible surface propulsive d'une palme à voilure courte associée à un palmage « du genou » (avec cheville bloquée)

- Dans la phase de montée de la palme, le palmage « du genou » fait travailler la voilure comme une nageoire caudale car le pied bouge dans un plan vertical, ce qui tend à améliorer le rendement propulsif. Néanmoins, le pied bouge également dans le plan horizontal ce qui a tendance à s'opposer à la déformation de la voilure. Au global, le rendement propulsif est alors moyen.
- En combinant ces éléments on trouve donc que le palmage « du genou » est moyennement<sup>37</sup> ou pas<sup>38</sup> adapté à une palme à voilure courte.

Le **palmage « pédalage » ne semble pas adapté** à ce type de palme car :

- Dans la phase propulsive (càd au moment où la jambe s'étend), ce mouvement fait travailler la palme comme une rame. La voilure étant de taille réduite, cette rame est de faible surface. La dureté de la voilure étant moyenne, celle-ci ne se déformera pas suffisamment pour être complètement perpendiculaire à l'axe du mouvement. Au global, le rendement propulsif sera très moyen. Ces éléments peuvent être illustrés sur le schéma suivant :

<sup>37</sup> Lorsque la cheville est en extension lors de la phase de descente de la palme.

<sup>38</sup> Lorsque la cheville reste bloquée à l'horizontal lors de la phase de descente de la palme.



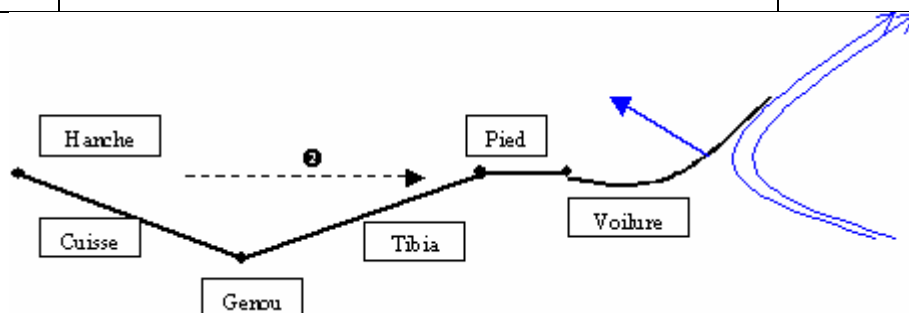


Figure 4.2 : Palmage « pédalage » avec une voileure courte : schéma de principe

- Ce type de palmage ne contient qu'une seule phase propulsive par mouvement complet de palmage : celle où la jambe s'étend (et que le pied s'éloigne du corps). En effet, lorsque le pied se rapproche du corps, la voileure de la palme se place quasiment à l'horizontal et n'est donc pas propulsive comme on peut le voir sur la figure suivante<sup>39</sup> :



Figure 4.3 : Mise en évidence d'une phase non propulsive dans l'association « voileure courte – palmage pédalage » (voir jambe droite)

Le **palmage « cheville bloquée »** semble moyennement, ou non-adapté à ce type de **voilure** car celui-ci fait travailler la voileure comme une nageoire caudale, ce qui devrait permettre d'obtenir un bon rendement propulsif. **Mais** selon l'angle de la cheville avec l'axe du déplacement, et la puissance du palmage, la voileure peut prendre une forme très différente et d'autant moins propulsive si le pied forme un angle très fermé avec le tibia (car la voileure est alors peu déformée et presque verticale). Ceci est également vrai dans la phase de remontée de la palme.

#### 4.3.2. Adéquation « palme à voileure longue – palmages »

En théorie, on constate que **les palmes à voileure longue semblent plutôt adaptées à un palmage « académique »** avec une amplitude de mouvement plutôt importante.

*A contrario*, **ce type de palme ne semble pas adapté à un palmage « manque d'amplitude »** car celui-ci ne permettra pas à la voileure de se déformer correctement.

Le **palmage « du genou »** semble moyennement adapté à ce type de **voilure** car :

- Dans la phase de descente de la palme, le palmage « du genou » fait travailler la voileure en partie comme une rame (car le pied se déplace en partie sur un plan horizontal) et en partie comme une nageoire caudale (car le pied se déplace en partie sur le plan vertical). Dans le cas de voileures courtes nous avons vu (cf. §4.3.1) que la surface propulsive (et donc le rendement propulsif de la palme) est extrêmement dépendante de la position de la cheville. Dans le cas d'une voileure longue cela est beaucoup moins vrai car, la voileure étant longue et la dureté de la palme moyenne, la voileure peut se déformer assez pour présenter une surface propulsive suffisante pour répondre aux besoins du plongeur. Ce point est illustré sur

<sup>39</sup> Cette figure permet également de visualiser, sur la jambe gauche, la faible surface propulsive lors de la phase de propulsion dans cette association « voileure courte – palmage pédalage ».

FFESSM	Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine	Commission Technique Nationale Page 34/66
--------	---	--

la figure suivante (la partie de la voileure entourée est propulsive et représente environ 4/5<sup>ème</sup> de la surface totale de voileure) :



**Figure 4.4 :** Mise en évidence de la surface propulsive d'une palme à voileure longue associée à un palmage « du genou »

- Dans la phase de montée de la palme, le palmage « du genou » fait travailler la voileure comme une nageoire caudale car le pied bouge dans un plan vertical, ce qui est bon pour le rendement propulsif. Mais, le pied bouge également dans le plan horizontal ce qui a tendance à s'opposer à la déformation de la voileure (comme on peut le voir sur la figure précédente au niveau de la voileure du pied droit) et diminue donc le rendement. Au global, le rendement propulsif est alors moyen dans cette phase.
- En combinant ces éléments on trouve donc que le palmage « du genou » semble moyennement adapté à une palme à voileure longue. Malgré ce rendement moyen, la surface propulsive importante peut permettre, au final, de satisfaire les besoins des plongeurs qui utilisent ce type de palme<sup>40</sup>.

Le **palmage « pédalage » ne semble pas adapté** à ce type de palme car :

- Dans la phase propulsive (càd au moment où la jambe s'étend et où le pied s'éloigne du corps), ce mouvement fait travailler la palme comme une rame (ce qui a tendance à diminuer le rendement pour ce type de palme). Néanmoins, la voileure étant longue, celle-ci peut se déformer assez pour présenter une surface propulsive suffisante pour répondre aux besoins du plongeur. Le rendement sera alors, dans cette phase, moyen.
- Ce type de palmage ne contient qu'une seule phase propulsive par mouvement complet de palmage : celle où la jambe s'étend (et que le pied s'éloigne du corps). En effet, lorsque le pied se rapproche du corps, la voileure de la palme se place quasiment à l'horizontal et n'est donc pas propulsive. Le rendement est alors nul.
- Au global, le rendement propulsif est donc mauvais avec cette association « palme à voileure longue – palmage pédalage ».

Le **palmage « cheville bloquée » est moyennement, ou non-adapté à ce type de voileure** car :

- Dans la phase de descente de la voileure : bien que ce mouvement fasse travailler la voileure comme une nageoire caudale (ce qui devrait permettre d'obtenir un bon rendement propulsif), l'angle de la cheville avec l'axe du déplacement, et la puissance du palmage, ne permettent pas de déformer la voileure de manière optimale. De plus, le chausson et le début de la voileure sont dans une position qui freine l'avancement, et ce, d'autant plus que l'angle « tibia – pied » est fermé. Le rendement est alors moyen voire mauvais (selon l'angle « tibia – pied »).

<sup>40</sup> Cela explique probablement que de nombreux plongeur ayant un palmage « du genou » ont ce type de palme (surtout lorsqu'ils préparent le N4 ou le MF2). Lorsque la voileure est en matière plastique, on observe alors toujours, au bout de quelques utilisations, une zone de faiblesse (couleur plus claire que le reste de la voileure) proche de la fin du pied. Cette zone correspond à l'endroit où la voileure se « casse » du fait qu'on la fait travailler comme une rame. En revanche, cette zone n'existe pas pour des plongeurs ayant un palmage « académique ».

FFESSM	Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine	Commission Technique Nationale Page 35/66
--------	---	--

- Dans la phase de remontée, selon l'angle « tibia – pied », la voile se déformera plus ou moins et aura donc un rendement propulsif moyen à mauvais.

#### 4.3.3. Adéquation « palme à voile articulée – palmages »

En théorie, on constate que **les palmes à voile articulée semblent plutôt adaptées aux palmages de type « du genou » et « pédalage »**. En effet, ces mouvements possèdent la caractéristique commune d'avoir le pied qui se déplace, en partie (dans le cas du palmage « du genou ») ou en totalité (dans le cas du palmage « pédalage »), dans le plan horizontal c'est-à-dire parallèlement à l'axe du déplacement. Grâce à l'articulation de la voile, la plus grande partie de celle-ci a donc tendance à se positionner perpendiculairement à cet axe et donc à prendre appui sur l'eau. On maximise ainsi, par rapport aux autres types de palme, la surface propulsive de la « rame ». Ce point est illustré sur les figures suivantes :



Figure 4.5 : Mise en évidence de la déformation d'une palme à voile articulée associée à un palmage « du genou »



Figure 4.6 : Mise en évidence de la déformation d'une palme à voile articulée associée à un palmage « pédalage »

*A contrario*, ce type de palme ne semble pas adapté à un palmage « académique » car celui-ci va plutôt faire travailler la voile comme une nageoire caudale. Or, l'articulation sur la voile aura tendance à déformer exagérément la voile (comme pourrait le faire une palme trop souple) ce qui nuira au rendement propulsif.

Le **palmage « cheville bloquée » semble bien adapté à ce type de voile** car :

- L'articulation de la voile permet à celle-ci, lors du mouvement de palmage, de rattraper le décalage induit par le blocage de la cheville. Le rendement propulsif est donc meilleur du

FFESSM	<b>Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine</b>	Commission Technique Nationale  Page 36/66
--------	--	---

fait de cette articulation par rapport à ce qu'il serait à surface de voilure identique avec un autre type de palme.

- De plus, sur certains modèles de palme à voilure articulée, l'axe de la voilure est décalé (d'environ 30°) de celui du chausson (et donc du pied) afin de rattraper le mauvais angle pris par la cheville et faire que la voilure soit, en position d'équilibre, à l'horizontale<sup>41</sup>. Cela permet donc à un plongeur dont le rendement propulsif serait médiocre du fait du blocage de sa cheville lors du palmage, de corriger, tout au moins en partie, ce défaut et donc d'augmenter son rendement propulsif par rapport à l'utilisation de palmes plus classiques. A titre d'exemple on peut citer les palmes Volo<sup>®</sup> de Mares<sup>®</sup> (cf. Figure suivante) :



Figure 4.7 : Mise en évidence du décalage des axes du chausson et de la voilure sur une palme à voilure articulée

**Pour le palmage « manque d'amplitude », il est difficile de savoir si celui-ci s'accorde bien, ou non, avec les palmes à voilure articulée.** En effet, cela devrait dépendre de la cause de ce manque d'amplitude. En effet :

- Si le manque d'amplitude est dû à un manque de puissance des muscles moteurs (abdominaux, psoas, iliaque, fessiers, ...) alors cette association « palme à voilure articulée – palmage avec manque d'amplitude » devrait améliorer le rendement propulsif. En effet, avec des palmes classiques (à voilure courte ou longue), la dureté moyenne à élevée de ces types de palme associée à la faible puissance des muscles moteurs va conduire à un manque d'amplitude dans le mouvement de palmage. Or, nous avons vu que la présence d'une articulation sur la voilure entraîne une sorte de diminution de la dureté de celle-ci. Le mouvement sera alors plus ample et le rendement propulsif augmentera. Une illustration de cette situation est donnée au paragraphe 4.4.4.3.
- Si le manque d'amplitude est dû à un acte volontaire (ex. : durée de contraction des muscles moteurs trop faible, manque de sensations corporelles, ...) alors le changement de palmes ne changera rien. Il faut alors obligatoirement passer par des compléments d'apprentissage.

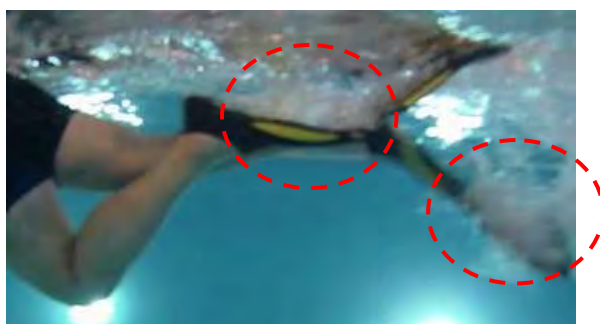
#### **4.3.4. Adéquation « palme à voilure fendue – palmages »**

En théorie, on constate que, de la même manière que les palmes articulées, **les palmes à voilure fendue semblent plutôt adaptées aux palmages de type « du genou » et « pédalage »**. En effet, ces mouvements possèdent la caractéristique commune d'avoir le pied qui se déplace, en partie (dans le cas du palmage « du genou ») ou en totalité (dans le cas du palmage « pédalage »), dans le plan horizontal c'est-à-dire parallèlement à l'axe du déplacement. Grâce à la faible dureté de la voilure, et au décalage d'angle entre l'axe de la voilure et celui du chausson, la plus grande partie de celle-ci a tendance à se positionner perpendiculairement à cet axe et donc à prendre appui sur l'eau. La présence de la fente dans la voilure permet alors de diminuer la traînée de pression et donc de freiner moins la voilure<sup>42</sup>. Ce point est illustré sur la figure suivante (explications données après la figure) :

<sup>41</sup> Ce n'est pas vrai sur tous les modèles. De plus, c'est également vrai sur d'autres types de palmes (ex. : à voilure fendue).

<sup>42</sup> Ce qui contribue à augmenter le rendement propulsif par rapport à une palme qui aurait la même surface propulsive.

FFESSM	Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine	Commission Technique Nationale Page 37/66
--------	---	--



A) Avec les palmes habituelles



B) Avec des palmes à voilure fendue

Figure 4.8 : Mise en évidence de la réduction de la traînée de pression pour des palmes à voilure fendue

En effet, on observe que, avec la palme fendue (cf. Figure 4.8A), il y a beaucoup moins de bulles derrière la voilure qu'avec la palme habituelle de ce plongeur (qui est une palme à voilure articulée, cf. Figure 4.8B). Or, ces bulles sont piégées par les tourbillons<sup>43</sup> générés en arrière de la voilure lorsque celle-ci redescend après avoir atteint la surface lors du mouvement de remontée. Le palmage étant le même sur ces 2 images (car c'est le même plongeur, qui palme de manière identique et que les voilures adoptent toutes les deux la même forme) on voit bien que la palme fendue crée moins de tourbillons que la palme habituelle de ce plongeur ce qui indique bien que la traînée de pression est moindre.

*A contrario*, ce type de palme ne semble pas adapté à un palmage « académique » car celui-ci va plutôt faire travailler la voilure comme une nageoire caudale. Or, la souplesse de la voilure va entraîner une déformation trop importante de celle-ci, et donc une perte de rendement. De plus, la présence de la fente dans la voilure va permettre à l'eau située d'un côté de la voilure de rejoindre l'autre côté de la voilure ce qui va faire chuter fortement la portance. Ces deux éléments combinés vont entraîner un mauvais rendement propulsif.

**Le palmage « manque d'amplitude » ne semble pas adapté aux palmes à voilure fendue** car :

- Que ce soit à la montée ou à la descente de la palme, ce palmage fait travailler la voilure comme une nageoire caudale. Compte-tenu de la faible amplitude et de la souplesse de la voilure, celle-ci devrait se déformer correctement, ce qui devrait donner un rendement propulsif correct.
- Mais la présence d'une fente dans la voilure va permettre à l'eau située d'un côté de la voilure de rejoindre l'autre côté de celle-ci ce qui va faire chuter fortement la portance et donc, va fortement diminuer le rendement de propulsion.
- Au final, cet effet de diminution du rendement devrait l'emporter sur celui d'augmentation.

Pour le **palmage « cheville bloquée »**, l'analyse théorique ne nous permet pas de dire si celui-ci est, ou non, adapté aux palmes à voilure fendue. En effet :

- Les éléments suivants tendent à obtenir un bon rendement propulsif :
  - La souplesse de la voilure permet à celle-ci, lors du mouvement de palmage, de rattraper le décalage induit par le blocage de la cheville.
  - L'axe de la voilure est décalé (d'environ 30°) de celui du chausson (et donc du pied) afin de rattraper le mauvais angle pris par la cheville et faire que la voilure soit, en position d'équilibre, à l'horizontale. Cela permet donc à un plongeur dont le rendement propulsif serait médiocre du fait du blocage de sa cheville lors du palmage, de corriger, tout au moins en partie, ce défaut et donc d'augmenter son rendement propulsif par rapport à l'utilisation de palmes plus classiques.
- *A contrario*, ce type de palmage fait travailler la voilure comme une nageoire caudale. Or, nous avons vu que la présence d'une fente dans la voilure faisait fortement chuter la

<sup>43</sup> Rappelons que ce sont ces tourbillons qui créent la traînée de pression.



portance créée avec ce type d'utilisation ce qui diminue fortement le rendement de propulsion.

- Au global, il ne nous est pas possible de déterminer le (ou les) élément(s) qui prennent l'ascendant sur les autres et l'analyse théorique ne permet donc pas de conclure quand à la qualité de cette association.

#### 4.3.5. Approche Théorique : Synthèse

Les éléments théoriques sur l'adéquation « palmes – palmages » obtenus dans ce chapitre peuvent être synthétisés dans le tableau suivant :

Approche Théorique			
Type de Palmage	Type de Voilure	Adéquation « Palme – Palmage »	Commentaires
« Académique »	Courte	<b>Bonne</b>	Ce mouvement permet à la voile de se déformer suffisamment pour maximiser la surface propulsive.
	Longue	<b>Bonne</b>	Ce mouvement permet à la voile de se déformer suffisamment pour maximiser la surface propulsive.
	Articulée	<b>Mauvaise</b>	Ce mouvement cherche à faire travailler la voile comme une nageoire caudale. A cause de l'articulation sur la voile, celle-ci se déformera trop ce qui diminue la surface propulsive.
	Fendue	<b>Mauvaise</b>	Ce mouvement cherche à faire travailler la voile comme une nageoire caudale. La souplesse de la voile va entraîner une trop grande déformation de celle-ci. La présence de la fente dans la voile va diminuer la surface propulsive.
« Du genou »	Courte	<b>Moyenne à Mauvaise</b>	La phase de remontée de la palme est peu propulsive. Au global, cette adéquation est : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Moyenne : si la cheville est extension durant la phase de descente de la palme car la surface propulsive de la voile est alors de taille moyenne.</li> <li>• Mauvaise : si la cheville est bloquée à l'horizontal durant la phase de descente de la palme car la surface propulsive de la voile est alors faible.</li> </ul>
	Longue	<b>Moyenne</b>	La phase de remontée de la palme est peu propulsive. Ce mouvement fait travailler la voile en partie comme une « nageoire caudale » (rendement ↗ car elle conçue pour cela) et en partie comme une « rame » (rendement ↘).
	Articulée	<b>Bonne</b>	Ce mouvement, associé à l'articulation de la voile, permet de faire travailler celle-ci comme une « rame » et de maximiser sa surface propulsive.
	Fendue	<b>Bonne</b>	Ce mouvement, associé à la souplesse de la voile, permet de faire travailler celle-ci comme une « rame » et de maximiser sa surface propulsive. La présence de la fente a tendance à diminuer la traînée de pression.

« Pédalage »	Courte	<b>Mauvaise</b>	La phase d'armement du palmage n'est pas propulsive. Ce mouvement, associé à la faible longueur de la voileure et à sa dureté, ne permet pas de créer une surface propulsive suffisante.
	Longue	<b>Mauvaise</b>	La phase d'armement du palmage n'est pas propulsive. La voileure travaille comme « une rame ».
	Articulée	<b>Bonne</b>	Ce mouvement, associé à l'articulation de la voileure, permet de faire travailler celle-ci comme une « rame » et de maximiser sa surface propulsive.
	Fendue	<b>Bonne</b>	Ce mouvement, associé à la souplesse de la voileure, permet de faire travailler celle-ci comme une « rame » et de maximiser sa surface propulsive. La présence de la fente a tendance à diminuer la traînée de pression.
« Manque d'amplitude »	Courte	<b>Mauvaise</b>	Ce mouvement ne permet pas à la voileure de se déformer suffisamment.
	Longue	<b>Mauvaise</b>	Ce mouvement ne permet pas à la voileure de se déformer suffisamment.
	Articulée	<b>?</b>	Dépend de la cause du manque d'amplitude du mouvement (cf. §4.3.3).
	Fendue	<b>Mauvaise</b>	Ce mouvement fait travailler la voileure comme une « nageoire caudale » mais la présence de la fente sur la voileure va faire chuter la portance.
« Cheville bloquée »	Courte	<b>Moyenne à Mauvaise</b>	Selon l'angle de la cheville avec l'axe du déplacement et la puissance du palmage, la voileure peut prendre une forme très différente.
	Longue	<b>Moyenne à Mauvaise</b>	Selon l'angle de la cheville avec l'axe du déplacement et la puissance du palmage, la voileure peut prendre une forme très différente.
	Articulée	<b>Bonne</b>	L'articulation de la voileure permet de rattraper le décalage induit par le blocage de la cheville.
	Fendue	<b>?</b>	Des éléments contradictoires ne permettent pas de conclure sur cette adéquation (cf. §4.3.4).

#### 4.4. APPROCHE EMPIRIQUE

##### 4.4.1. Limites d'étude

Le but de ce chapitre est de confirmer, ou d'infirmer, les analyses théoriques sur les associations « palmages – palmes » en les confrontant à des éléments pratiques objectifs.

Pour cela, nous avons procédé à des tests chronométrés avec des plongeurs en piscine afin de contrôler les distances parcourues et d'éviter que des facteurs externes (ex. : houle, courant, ...) ne viennent perturber les conditions d'essais. On fait donc l'hypothèse implicite que les conclusions obtenues à partir de tests réalisés en piscine restent valables pour des plongeurs en mer, ce qui se trouve être souvent le cas dans notre activité et, en particulier, au niveau des apprentissages sur le palmage.

FFESSM	<b>Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine</b>	Commission Technique Nationale  Page 40/66
--------	--	---

Il n'a malheureusement pas été possible de tester *in situ* toutes les associations « palmages – palmes » possibles<sup>44</sup> pour les raisons suivantes :

- Problème d'adéquation entre les tailles des palmes disponibles et celles des testeurs. Ce point a rendu plus difficile le recrutement de testeurs (qui devaient tous chausser aux alentours du 42-43).
- Manque de disponibilité des testeurs : difficultés à trouver un palmeur « cheville bloquée », disponibilité des testeurs encadrants, ...
- Manque de disponibilité des lignes d'eau à la piscine : dates d'ouverture, partage de lignes d'eau avec les plongeurs en formation, ...
- Manque de temps disponible pour faire ces tests. En effet, pour pouvoir analyser correctement les tests chronométrés il est nécessaire de filmer les plongeurs sous l'eau. Or, nous n'avions aucun matériel vidéo sous-marin ni aucune compétence dans ce domaine (filmer, monter les films, ...). Une partie importante du temps consacré à cette étude a donc été consacrée à la recherche du matériel adapté au travail à mener<sup>45</sup> et à l'acquisition de compétences minimum (vraiment très minimum...) pour filmer et exploiter les films. Le temps imparti pour faire cette étude étant limité (la durée du cursus d'INS est de 2 ans maximum et il n'a pas été possible de s'y mettre dès le début...), le temps disponible pour réaliser ces tests fut plus court que prévu initialement.

Pour cette étude nous n'avons pu réunir que 5 plongeurs, tous issus du même club, et représentant 3 types de palmages différents<sup>46</sup>. Leurs niveaux respectifs vont du N2 au MF1. Ce chiffre est faible pour pouvoir faire une véritable analyse statistique représentative et il conviendra d'en tenir compte dans les analyses et conclusions du présent chapitre. Néanmoins, cela constitue déjà une première base qu'il faudrait augmenter par la suite.

Au final, cette vérification empirique n'a pu être menée complètement et il sera nécessaire de la compléter et de l'étayer par la suite. Elle permet néanmoins d'obtenir de premiers éléments permettant d'étayer, ou de remettre en question, les éléments théoriques construits au chapitre précédent (cf. §4.3).

#### **4.4.2. Protocole d'essais**

Le but de ces tests est d'acquérir des éléments objectifs permettant de confirmer, ou d'infirmer, les qualités d'associations « palmages – palmes » décrites au chapitre précédent (cf. §4.3). Ces éléments objectifs sont les suivants :

- Temps mis pour parcourir une distance donnée avec un type de palme donné.
- Images vidéo afin de visualiser le travail de la voilure de chaque palme.

Les types de palmage représentés par ces plongeurs sont les suivants : palmage « du genou », palmage « pédalage », palmage « manque d'amplitude ». Le palmeur « du genou » n'est, en réalité, pas complètement de ce type car son palmage possède également quelques caractéristiques du palmeur « académique ». Un plongeur « académique » a été trouvé (une plongeuse en l'occurrence) mais il n'a pas été possible de lui faire réaliser les tests avec d'autres palmes pour des questions de disponibilité<sup>47</sup>. Aucun palmeur « cheville bloquée » n'a pu être trouvé.

---

<sup>44</sup> Les associations manquantes apparaissent clairement dans le tableau de synthèse (cf. §4.5) afin d'identifier celles qui ont été menées et celles qui restent à faire.

<sup>45</sup> En tenant compte des différentes contraintes de légèreté du matériel, de maniabilité, de simplicité de fonctionnement et... de prix.

<sup>46</sup> Nous ne présentons dans ce document, par commodité et économie de place, que les tests réalisés sur 3 d'entre eux.

<sup>47</sup> Ce plongeur utilise des palmes à voilure longue.



Tous les types de palmes sont représentés dans cette étude : palmes à voileure longue (Mares Avanti L), à voileure courte (Mares Avanti X3), à voileure articulée (Mares Volo) et à voileure fendue (Scubapro Twin Jet Max).

Chaque plongeur teste 3 types de palmes. Ces 3 types différents correspondent à : son type de palme habituel, celui qui devrait lui donner le meilleur rendement propulsif et celui qui devrait lui donner le rendement propulsif le moins bon. Lorsque le plongeur utilise habituellement le type de palme qui devrait lui donner le meilleur (resp. le pire) rendement propulsif, on lui fait tester un type de palme au hasard (en fonction de ce qui est disponible au moment du test). Au global, voici les associations « palmage – palme » qui ont pu être testées :

	Voilure courte	Voilure longue	Voilure articulée	Voilure fendue
« Académique »		X		
« Du genou »		X	X	X
« Pédalage »	X	X	X	X
« Manque d'amplitude »	X	X	X	
« Cheville bloquée »				

Tableau 4-1 : Associations « palmages – palmes » testées *in situ*

Chaque test complet consiste à réaliser, à la suite et après une récupération passive complète, les distances suivantes<sup>48</sup> :

- 50m au maximum de ses possibilités (i.e. : « à fond »). Ce test est un bon indicateur (même si ce n'est pas le seul) pour déterminer le rendement propulsif maximum que peut obtenir le plongeur (et son type de palmage) avec la voileure utilisée. En effet, le plongeur cherche à aller le plus vite possible et produit donc sa puissance maximale d'effort. Il cherche donc à utiliser au mieux sa voileure compte-tenu de ses propres caractéristiques de palmage. En comparant les résultats obtenus à ce test avec les différents types de voileure on a donc une bonne indication de celle qui est la plus adaptée au type de palmage du plongeur.
- 200m PMT.
- 200m Capelé avec un bloc de 12 litres (long) équipé d'un gilet stabilisateur et en respirant sur le détendeur. Ce test vise à se rapprocher le plus possible des conditions réelles d'utilisation des palmes. De plus, on sait qu'un palmage « sous charge » peut être légèrement différent d'un palmage « hors charge ».
- 100m en ondulation. Ce type d'exercice présente la particularité de forcer le plongeur à augmenter les caractéristiques prépondérantes de son type de palmage<sup>49</sup>.

L'ordre de réalisation de ces distances est toujours le même. Il n'a pas été possible de faire réaliser plusieurs fois ces tests et dans un ordre aléatoire afin de vérifier la reproductibilité des performances. Il s'agit là d'un biais de l'étude et ce point devra être amélioré par la suite.

Ces tests ont été réalisés pendant les créneaux habituels d'entraînement du club, dans une ligne d'eau (de 25 mètres) spécifique et réservée. Les testeurs n'ont donc pas été gênés par d'autres plongeurs.

A chaque changement de type de palme, aucun temps n'est laissé au palmeur pour « s'habituer » à ses nouvelles palmes. En effet, le but est d'évaluer la qualité de l'association « palmage – palme » et il est donc important que le palmeur ne modifie pas son geste afin de s'adapter à la palme. Pour la même raison, les temps mesurés pour les différentes distances et avec les différentes palmes n'ont pas été communiqués aux testeurs.

<sup>48</sup> Toutes les distances doivent être réalisées sans les bras, dans la même position (ex. : bras tendus ou le long du corps).

<sup>49</sup> Nous n'en connaissons pas les raisons mais ce point est observé quasi-systématiquement (même si ce n'est pas une règle « absolue »). A tel point que ce type d'exercice est souvent utilisé par l'auteur pour révéler certains défauts de palmage parfois masqués sur les autres types de nage.

#### 4.4.3. Comparaison des types de palmage entre eux

A partir des données acquises nous avons, dans un premier temps, cherché à déterminer s'il était possible de classer les types de palmage les uns par rapport aux autres. En effet de manière classique on parle souvent de « bon palmage » et de « mauvais palmage » sans toujours être capable de définir ce que c'est.

De plus, l'approche théorique nous a permis de définir les associations « palmage – palme » qui semblent les meilleures ou les moins bonnes, ce qui correspond à une image du rendement propulsif du couple « palmage – palme », mais ne nous a donné aucun éléments sur le rendement propulsif du mouvement de palmage en lui-même.

Nous avons donc comparé entre eux les temps obtenus par les plongeurs aux différents types de palmage et ce, pour chaque type de voileure.

Tous les résultats sont présentés en annexe (cf. §7.3) mais, pour des raisons de clarté, nous ne présentons ici que ceux obtenus avec les voilures articulées (sachant que les observations sont identiques pour les autres tests) :

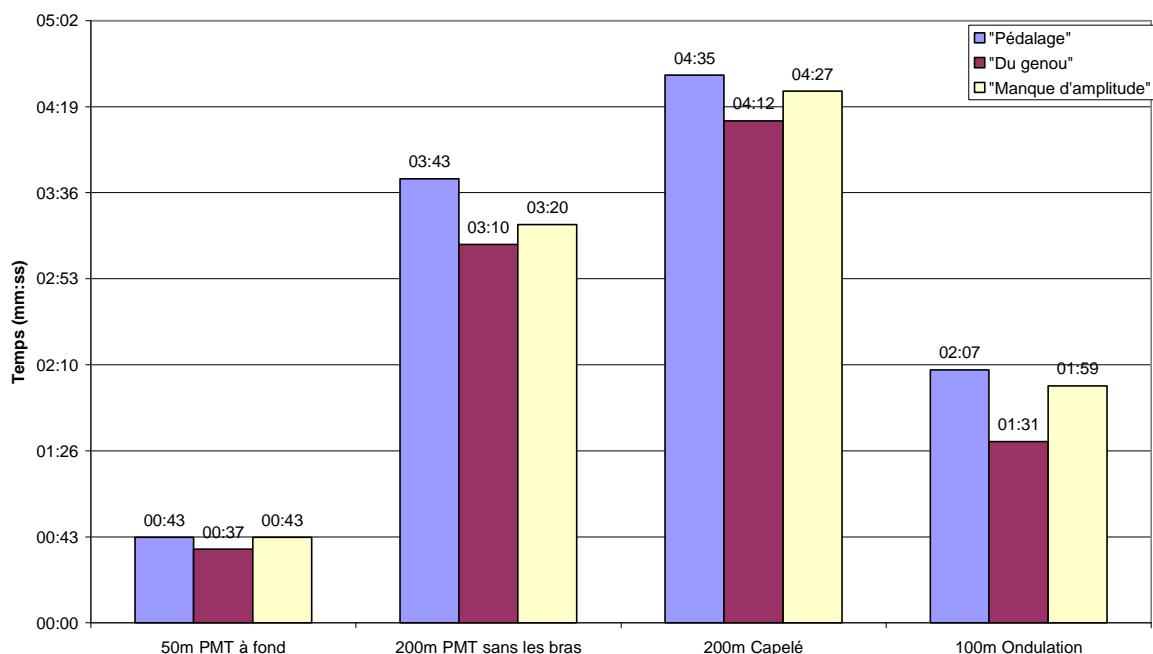


Figure 4.9 : Comparaison des performances de chaque type de palmage entre eux (palmes à voileure articulée)

Ces résultats indiquent que, quelque soit le type de voileure utilisée, le palmage « du genou » obtient de meilleurs temps que celui « manque d'amplitude », qui obtient lui-même de meilleurs temps que celui « pédalage ».

On pourrait donc confirmer l'idée générale que même si l'adéquation « palmage – palme » est bonne, il n'en demeure pas moins que certains mouvements de palmage sont plus efficaces que d'autres. **Bien que cela soit vrai sur ces tests, le trop faible nombre de plongeurs ayant participé empêche de pouvoir généraliser cette conclusion.** En effet, d'autres facteurs peuvent intervenir dans le résultat final comme : les capacités physiques individuelles, la fluidité de chacun, l'état de fatigue, etc.

Il faudrait donc, pour compléter ce point de manière objective, continuer à mener ces tests sur une population de testeurs beaucoup plus étendue.

#### 4.4.4. Résultats et analyse

##### 4.4.4.1. Palmage « du genou »

Le testeur avec ce type de palmage utilise habituellement des palmes à voileure longue (Mares Avanti L). De plus, son type de palmage, bien que principalement du type « du genou », ne l'est pas exclusivement car, comme on peut le voir sur la figure suivante, son palmage combine un pliage du genou<sup>50</sup> (l'angle « cuisse – tibia » est quasiment de 90° à la fin de montée de la palme, cf. Figure 4.10A) avec une mobilisation notable de la hanche :

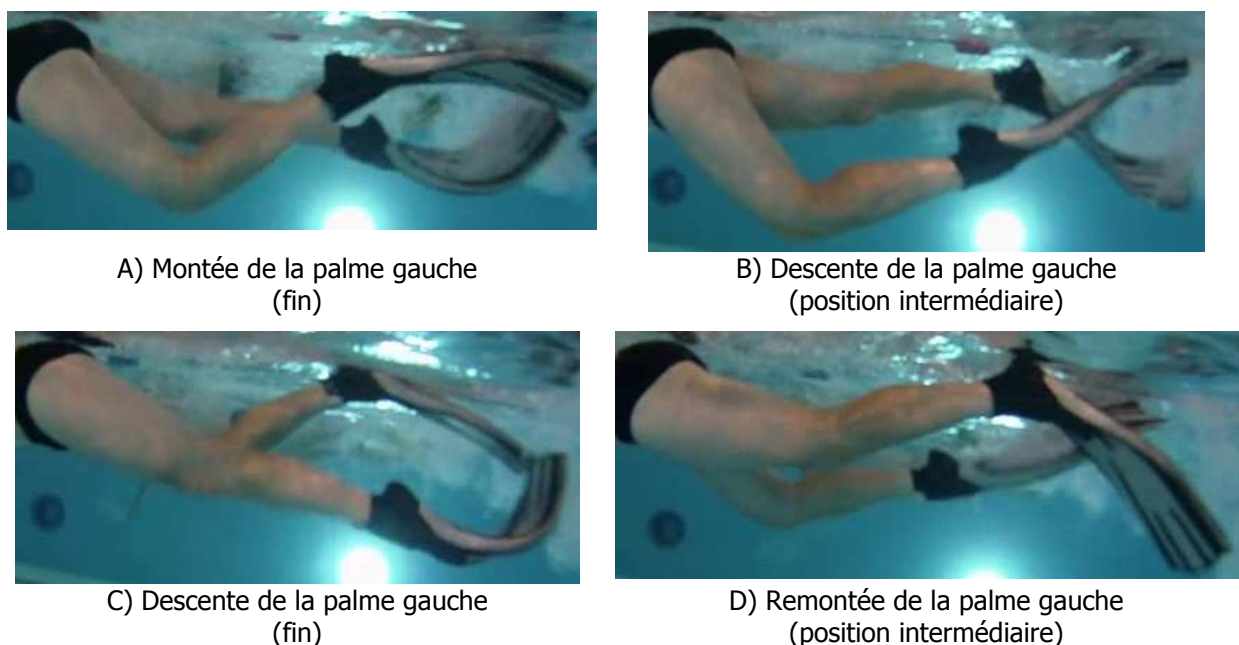


Figure 4.10 : Exemple de palmage hybride entre les types « du genou » et « académique »

Les résultats des tests avec ce plongeur sont les suivants :

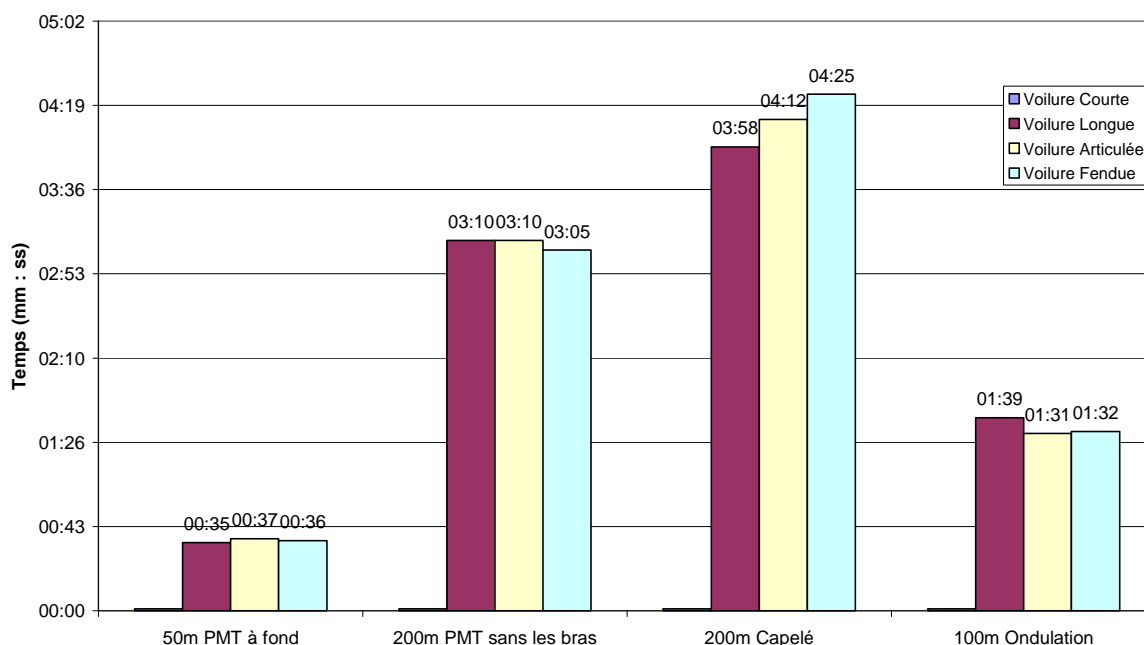


Figure 4.11 : Palmage type « du genou » - Résultats des tests

<sup>50</sup> Ce qui est une caractéristique importante du type « du genou ».

L'analyse de ces résultats montre les éléments suivants :

<b>Test</b>	<b>Observations</b>	<b>Conclusions</b>
50m à puissance maximale	<p>Le meilleur temps est obtenu avec les voilures longues (voilures habituellement utilisées par ce plongeur).</p> <p>Les temps obtenus avec les voilures articulées et celles fendues sont quasiment identiques à celui obtenu avec ses voilures habituelles.</p>	<p>Cela indique que ses voilures habituelles (voilures longues) semblent bien adaptées à son type de palmage.</p> <p><b>Cela indique que les voilures articulées et fendues sont également adaptées à son type de palmage ce qui, si l'on tient compte du fait que son palmage est un mélange des types « du genou » (part prépondérante) et « académique » (part minoritaire), est cohérent avec les conclusions de l'approche théorique.</b></p>
200m PMT	<p>Les temps obtenus avec les 3 types de voile (longue, articulée et fendue) sont très proches, le meilleur temps étant obtenu avec les voilures fendues.</p>	<p>Cela indique que ces 3 types de palme semblent adaptés à son type de palmage et, en particulier, les voilures fendues. En tenant compte de la particularité de son palmage, cela est cohérent avec les conclusions de l'approche théorique pour les palmes articulées et fendues. En revanche, on aurait pu s'attendre à avoir un rendement propulsif légèrement moins bon pour les voilures longues.</p> <p>Néanmoins, on peut remarquer que les surfaces propulsives des ces 3 types de voile ne sont pas les mêmes. En particulier, celle des voilures longues est bien supérieure aux autres. On confirme donc bien que, à surface de voile identique, les palmes à voile articulée et fendue peuvent avoir, avec ce type de palmage, un meilleur rendement propulsif, <b>ce qui est également cohérent avec les conclusions de l'approche théorique.</b></p>
200m Capelé	<p>Les temps sont, ici, assez différents les uns des autres.</p> <p>Le meilleur temps est obtenu avec les voilures longues. Le second temps (de 6% supérieur) est obtenu avec les voilures articulées. Le temps le plus long (de 11% supérieur au temps le plus court) est obtenu avec les voilures fendues.</p> <p>L'analyse des films vidéos réalisés lors de ces tests montre que, lors du test avec les voilures fendues, le plongeur a eu plusieurs fois une crampe (mollet droit), ce qui lui a fait perdre du temps (~10 à 15 secondes d'arrêt cumulé pour étirer le muscle)</p> <p>En tenant compte de cela on peut considérer que les temps obtenus avec les voilures articulées et fendues</p>	<p>Ces éléments montrent que, sur ce test, les voilures longues sont mieux adaptées au type de palmage du plongeur par rapport aux voilures articulées ou fendues, ce qui semble incohérent avec les conclusions de l'approche théorique.</p> <p>Néanmoins, l'analyse des films vidéo montre que, sur ce test, le plongeur a légèrement changé de type de palmage. Il plie beaucoup moins le genou et le mouvement se rapproche alors beaucoup plus d'un palmage « académique » que « du genou ». Ce point est illustré en annexe (cf. Figure 7.8).</p> <p><b>En tenant compte de ce point, les observations deviennent cohérentes avec les conclusions de l'approche théorique.</b></p>

	sont quasiment identiques.	
100m Ondulation	On observe que les meilleurs temps sont obtenus avec les voilures articulées et fendues.	Ce type d'exercice présente la particularité d'augmenter les caractéristiques prépondérantes du type de palmage utilisé par les plongeurs. Ici, les caractéristiques augmentées correspondent à celles du type « du genou ». Les observations sont donc cohérentes avec les conclusions de l'approche théorique

Ces tests permettent donc de conforter les conclusions de l'approche théorique. Il reste néanmoins à vérifier que ces conclusions sont basées sur un raisonnement cohérent.

Pour cela, nous utilisons les images enregistrées lors des différents tests avec les différents types de palme afin d'illustrer la manière dont chaque voileure « travaille » en réponse au mouvement de palmage du plongeur. Par soucis de simplicité, et pour ne pas trop alourdir ce document, nous ne comparons que les images prises lors du 200 mètres PMT et uniquement lors de la fin de phase propulsive. On obtient alors la figure suivante :



A) Voilure Longue



B) Voilure Articulée



C) Voilure Fendue

**Figure 4.12 :** Illustration du travail des différentes voilures (longue, articulée, fendue) avec un palmage type « du genou »

Malgré les effets d'échelle (dus au fait que la distance « plongeur – caméra » n'est pas toujours la même sur ces images) on observe clairement que :

FFESSM	<b>Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine</b>	Commission Technique Nationale  Page 46/66
--------	--	---

- Les voilures travaillent comme une rame car leur axe est perpendiculaire à celui du déplacement.
- La surface propulsive est, en grandeur relative par rapport à la longueur totale de la palme, plus importante avec une voileure articulée ou fendue. comparée à celle avec une voileure longue. Néanmoins, pour la voileure longue, la valeur de cette surface propulsive semble comparable à celle des autres voileures ce qui explique que ce type de palme puisse répondre aux besoins du plongeur.

**Au global, les résultats des tests effectués par ce plongeur et l'analyse de la manière dont travaille chaque type de voileure confirment les conclusions de l'approche théorique, à savoir que les voileures les mieux adaptées au palmage de type « du genou » sont bien les voileures articulées ou les voileures fendues.**

Ces tests permettent également de dire que les voileures longues, bien que moins efficace dans ce cas, permettent néanmoins de satisfaire les besoins du plongeur.

Enfin, les résultats des tests sur la nage capelée permettent également de vérifier que les voileures longues sont bien adaptées à un palmage de type « académique ».

#### 4.4.4.2. Palmage « pédalage »

Le testeur avec ce type de palmage utilise habituellement des palmes à voileure articulée (Mares Volo). Ses caractéristiques de palmage sont typiques du type « pédalage » comme on peut le voir sur la figure suivante :



A) Phase d'armement de la palme gauche  
(fin)



B) Phase propulsive  
(position intermédiaire)



C) Phase propulsive  
(fin)

Figure 4.13 : Palmage de type « pédalage »

Les résultats des tests avec ce plongeur sont les suivants<sup>51</sup> :

<sup>51</sup> Les indications « 00 :01 » ne correspondent à aucun résultats réels car les tests correspondants n'ont pu être réalisés.

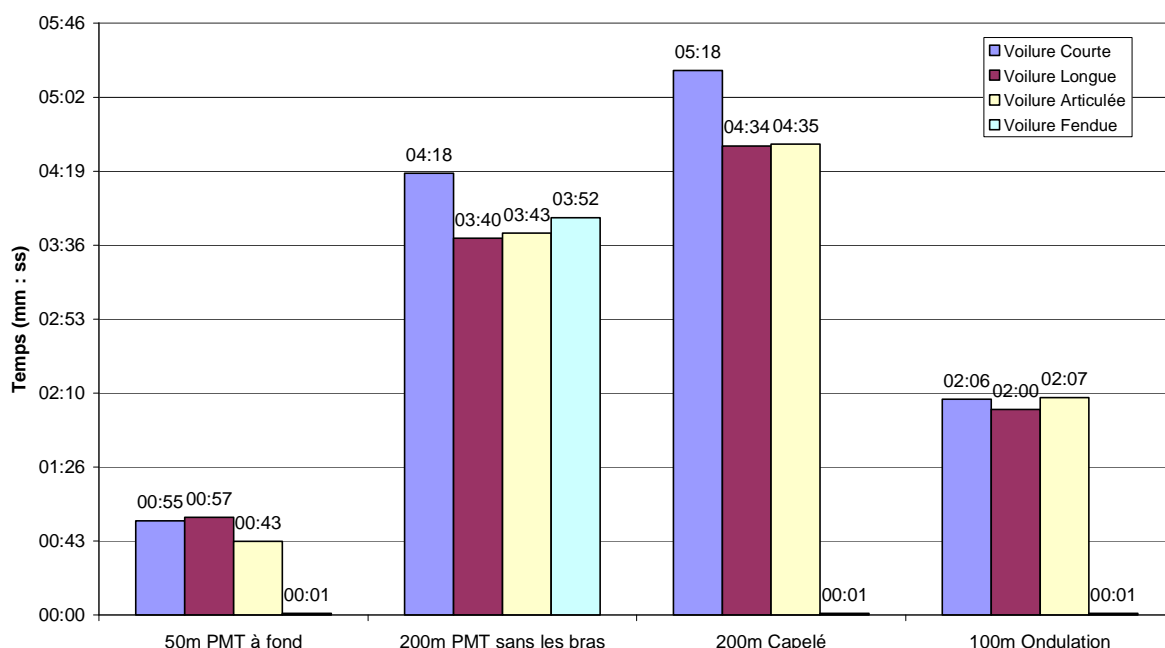


Figure 4.14 : Palmage type « pédalage » - Résultats des tests

L'analyse de ces résultats montre les éléments suivants :

Test	Observations	Conclusions
50m à puissance maximale	Le meilleur temps est obtenu avec les voilures articulées (voilures habituellement utilisées par ce plongeur).	Cela indique que ses palmes habituelles (voilure articulée) semblent bien adaptées à son type de palmage car les différences de temps sont significatives (gain d'environ 30% en temps par rapport aux voilures courtes). Ce point est cohérent avec les conclusions de l'approche théorique.
	Les temps obtenus avec les voilures courte et longue sont quasiment identiques entre eux et éloignés (~+30%) de ceux obtenus avec les voilures articulées.	Cet élément indique que, pour ce type de palmage (« pédalage »), les voilures courtes et longues ne semblent pas adaptées. Pour les voilures courtes, ce point est cohérent avec l'approche théorique. En revanche, ce n'est pas le cas pour les voilures longues.
200m PMT	Les temps obtenus avec les voilures longue et articulée sont très proches. En revanche, celui obtenu avec des palmes à voilure courte est nettement supérieur (+17%). Celui obtenu avec les voilures fendues est intermédiaire et très proche (+5%) de ceux obtenus avec les voilures longues et articulées.	Ces observations confirment que la voilure courte n'est pas adaptée à ce type de palmage et que la voilure articulée est, en revanche, bien adaptée. Ces éléments sont cohérents avec les conclusions de l'approche théorique. Ces observations indiquent que les palmes à voilure longue semblent adaptées à ce type de palmage sur ce test. L'analyse des images (cf. Figure 4.15) montre que ce plongeur possède une bonne puissance musculaire qui lui permet de courber nettement la voilure longue. Bien que la faisant travailler comme une rame, il crée une surface propulsive suffisante ce qui lui permet d'obtenir un bon temps par rapport aux autres voilures. Le temps relevé avec les palmes à voilure fendue vient confirmer les conclusions de l'approche théorique.
200m Capelé	Les observations sont identiques à celles du 200	Ces éléments confirment les conclusions indiquées sur le 200 mètres PMT, ce qui est cohérent avec celles de



	mètres PMT. Le temps mesuré avec les palmes à voile courte est de 16% supérieur aux autres.	l'approche théorique.
100m Ondulation	Les temps obtenus sont très proches les uns des autres (différence de 6% au maximum)	Cette observation n'est pas cohérente avec les conclusions de l'approche théorique (le temps avec les palmes à voile courte devrait être plus important). L'analyse des images révèle que la fréquence des mouvements d'ondulation du plongeur est plus importante avec les palmes à voile courte par rapport aux autres. Ceci pourrait donc expliquer les différences de temps observées.

Ces tests, à l'exception de celui en ondulation, permettent donc de conforter les conclusions de l'approche théorique. Il reste néanmoins à vérifier que ces conclusions sont basées sur un raisonnement cohérent.

Pour cela, nous utilisons les images enregistrées lors des différents tests avec les différents types de palme afin d'illustrer la manière dont chaque voile « travaille » en réponse au mouvement de palmage du plongeur. Par soucis de simplicité, et pour ne pas trop alourdir ce document, nous ne comparons que les images prises lors de 200 mètres PMT et uniquement lors de la fin de phase propulsive. On obtient alors la figure suivante :



A) Voilure Courte



B) Voilure Longue



C) Voilure Articulée



FFESSM	Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine	Commission Technique Nationale Page 49/66
--------	---	--



D) Voilure Fendue

Figure 4.15 : Illustration du travail des différentes voilures (longue, articulée, fendue) avec un palmage type « du genou »

Malgré les effets d'échelle (dus au fait que la distance « plongeur – caméra » n'est pas toujours la même sur ces images) on observe clairement que :

- Ce type de palmage fait travailler les voilures comme des rames car leur axe est perpendiculaire à celui du déplacement.
- La surface propulsive ainsi créée est très faible avec les voilures courtes. Il est donc normal d'obtenir des temps plus longs avec ce type de voileure.
- Avec les palmes à voileure longue il semble que la surface propulsive soit comparable à celle obtenue avec les palmes à voileure articulée.

**Au global, les résultats des tests effectués par ce plongeur (à l'exception du test en ondulation) et l'analyse de la manière dont travaille chaque type de voileure confirment, pour les palmes à voileure courte et celles à voileure articulée, les conclusions de l'approche théorique<sup>52</sup>.**

Pour les palmes à voileure longue, l'approche empirique indique que l'adéquation est meilleure que celle prévue par l'approche théorique. Il faudrait donc compléter ces tests en les menant sur d'autres plongeurs ayant le même type de palmage pour confirmer, ou infirmer, ce point. Néanmoins, on peut confirmer que, dans le cas présenté ici, les palmes à voileure longue répondent aux besoins de propulsion de notre plongeur, ce qui est cohérent avec les conclusions de l'approche théorique.

#### 4.4.4.3. Palmage « manque d'amplitude »

Le testeur avec ce type de palmage utilise habituellement des palmes à voileure courte (Mares Avanti X3). Ses caractéristiques de palmage sont typiques du type « manque d'amplitude » comme on peut le voir sur la figure suivante :



A) Montée de la palme gauche (fin)



B) Descente de la palme gauche (position intermédiaire)

<sup>52</sup> A savoir que les palmes à voileure courte ne sont pas adaptées, et celles à voileure articulée sont bien adaptées.



C) Descente de la palme gauche (fin)

D) Remontée de la palme gauche (position intermédiaire)

Figure 4.16 : Exemple de palmage type « manque d'amplitude »

Les résultats des tests avec ce plongeur sont les suivants :

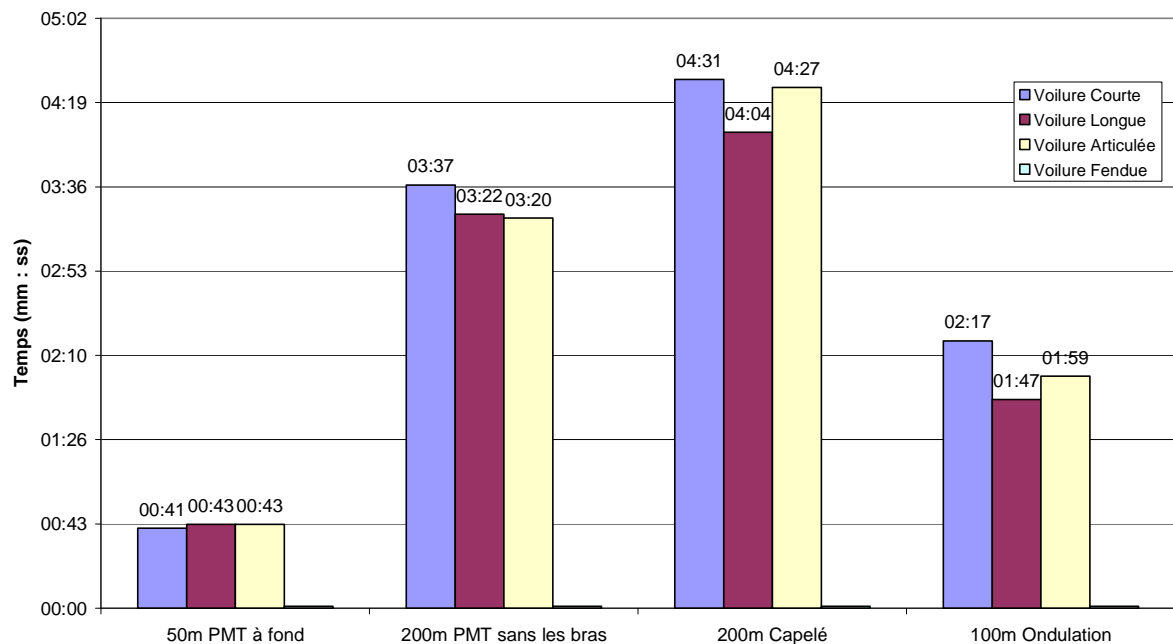


Figure 4.17 : Palmage type « manque d'amplitude » - Résultats des tests

L'analyse de ces résultats montre les éléments suivants :

Test	Observations	Conclusions
50m à puissance maximale	Tous les temps sont quasiment identiques	Cette observation semble indiquer que tous les types de palmes essayés sont aussi adaptés (ou inadaptés ?) que celles qu'il utilise habituellement (voilure courte). Bien qu'étonnant, ce résultat n'est pas en contradiction avec les conclusions de l'approche théorique qui indique qu'aucun de ces 3 types de palmes ne devrait convenir (sauf peut-être les voilures articulées) à ce type de palmage.
200m PMT	Les meilleurs temps sont obtenus avec les palmes à voilure articulée et celles à voilure longue. Le temps le moins bon est obtenu avec les palmes à voilure courte (palmes habituelles du testeur)	La mauvaise performance réalisée avec les palmes à voilure courte est cohérente avec les conclusions de l'approche théorique. Le temps obtenu avec les palmes à voilure longue est étonnant et semble être en contradiction avec les conclusions de l'approche théorique puisque le rendement propulsif avec ces voilures devrait être médiocre (alors qu'il est ici comparable avec celui obtenu avec les voilures

FFESSM	Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine		Commission Technique Nationale
		<p>articulées). L'analyse des séquences vidéos réalisées lors de ces tests permet d'obtenir des éléments complémentaires qui semblent conforter les conclusions de l'approche théorique (cf. Figure 4.18)</p> <p>La bonne performance obtenue avec les palmes à voile articulée semble indiquer que ce type est bien adapté à ce type de palmage. Néanmoins, les résultats des autres tests indiquent plutôt que cette adaptation serait moyenne. En l'état, et tout comme avec l'approche théorique, il n'est donc pas possible de conclure.</p>	
200m Capelé	<p>Le meilleur temps est obtenu avec les voilures longues. Le second temps (de 9% supérieur) est obtenu avec les voilures articulées. Le temps le plus long (de 11% supérieur au temps le plus court) est obtenu avec les palmes à voile courte.</p>	<p>La bonne performance obtenue avec les palmes à voile longue n'est pas cohérente avec les conclusions de l'approche théorique. Néanmoins, l'analyse des images vidéo montre que, avec les palmes à voile longue et celles à voile articulée, ce plongeur a tendance à augmenter légèrement son amplitude de mouvement<sup>53</sup>. Il corrige donc son manque d'amplitude et améliore donc son rendement propulsif avec les palmes à voile longue. Cette observation tend donc à confirmer les conclusions de l'approche théorique.</p> <p>Le temps obtenu avec les palmes à voile articulée semble indiquer que le rendement propulsif obtenu est moyen (par rapport aux autres voilures).</p> <p>La mauvaise performance obtenue avec les palmes à voile courte confirme les conclusions de l'approche théorique.</p>	
100m Ondulation	<p>On observe les mêmes éléments qu'aux tests sur le 200m capelé.</p>	<p>Les conclusions sont identiques à celles pour les tests au 200m capelé.</p>	

Ces tests permettent de conforter les conclusions de l'approche théorique dans certains cas, mais viennent la contredire dans d'autres cas. Il faudrait donc procéder à des tests supplémentaires afin de compléter cette approche empirique.

Pour les tests réalisés sur le 200m PMT, nous illustrons, sur la figure suivante, le travail des voilures afin de voir si quelque chose peut expliquer les résultats étonnants obtenus (càd. : bonne adéquation de ce type de palmage avec les palmes à voile longue) :

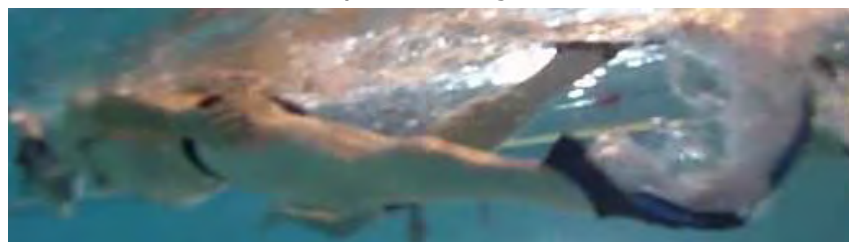


A) Voilure Courte

<sup>53</sup> Il est possible que cela soit dû à une dureté plus faible pour ces voilures par rapport à ses palmes habituelles (voilure courte).



B) Voilure Longue



C) Voilure Articulée

**Figure 4.18 :** Illustration du travail des différentes voilures (courte, longue, articulée) avec un palmage type « manque d’amplitude »

Malgré les effets d’échelle (dus au fait que la distance « plongeur – caméra » n’est pas toujours la même sur ces images) on observe que :

- Les palmes à voilure courte travaillent comme une nageoire caudale. Mais cette voilure, du fait du manque d’amplitude dans le mouvement est très peu déformée et possède donc une surface propulsive assez faible. Ce point confirme l’approche théorique et les résultats des tests.
- Il semble que les palmes avec voilure longue travaillent correctement. En effet, la voilure est suffisamment déformée ce qui génère une surface propulsive correcte. Cette observation est étonnante car, avec un palmage qui manque d’amplitude, on devrait observer une déformation moins prononcée de la voilure. Pour en comprendre la raison, nous avons approfondi l’analyse en utilisant les séquences vidéo dont sont extraites ces images. On observe alors que, avec ce type de voilure (ainsi qu’avec les voilures articulées), ce plongeur a tendance à augmenter son amplitude de mouvement<sup>54</sup> et à accentuer le pliage du genou. L’augmentation d’amplitude est particulièrement favorable à l’augmentation du rendement propulsif avec ce type de voilure. De plus, nous avons vu précédemment (cf. Figure 4.15B) qu’un certain pliage du genou pouvait, avec des voilures longues, augmenter également le rendement propulsif. Ces deux éléments cumulés permettent d’expliquer le bon rendement propulsif obtenu avec ces voilures sur le test du 200 mètres PMT alors que l’approche théorique prévoyait que celui-ci devait être mauvais. Ce point se vérifie également sur les tests du 200m capelé et du 100m ondulation avec les voilures longues.
- La voilure articulée semble légèrement trop déformée par rapport à ce que l’on pourrait attendre d’un palmage manquant d’amplitude. Là encore, l’analyse des séquences vidéo permet de voir que, avec ces voilures, l’augmentation d’amplitude entraîne également une augmentation du pliage du genou. La voilure travaille alors, au moins en partie, comme une rame, ce qui est favorable à un bon rendement propulsif. Cette observation est également vraie pour les tests en capelé et en ondulation mais, pour ces 2 tests et comme on peut le voir sur la figure suivante (cf. §Figure 4.19), le plongeur a adopté des positions différentes entre les nages avec les voilures longues et celles avec les voilures articulées. Il a donc été nettement plus freiné lors de la nage en capelé avec les voilures articulées ce qui pourrait expliquer les résultats obtenus.

<sup>54</sup> Il est possible que cela soit dû à une dureté plus faible pour ces voilures par rapport à ses palmes habituelles (voilure courte).



A) Test capelé avec palmes à voileure longue (bouteille hors de l'eau, tête relevée)



B) Test Capelé avec palmes à voileure articulée (bouteille totalement immergée, tête vers le bas et palmes vers le haut)

**Figure 4.19** : Mise en évidence de la différence de position entre les différents tests en capelé pour un testeur

Au global, les résultats des tests effectués par ce plongeur et l'analyse de la manière dont travaille chaque type de voileure confirment certaines conclusions de l'approche théorique (i.e. : les palmes à voileure courte ne sont pas adaptées au palmage de type « manque d'amplitude », l'adéquation de ce type de palmage avec des palmes à voileure articulée ne peut être précisée).

En revanche, ces tests ne permettent pas de confirmer les conclusions concernant l'adéquation de ce type de palmage avec des palmes à voileure longue car des biais sur le protocole du test ont été détectés. Il faudrait donc procéder à des tests complémentaires pour essayer de préciser ces points.

#### 4.5. SYNTHÈSE DES APPROCHES THÉORIQUE ET EMPIRIQUE

Le tableau suivant présente la synthèse des approches théorique et empirique afin d'afficher un résultat final unique. Ce résultat sera ensuite utilisé dans la conclusion.

Pour les associations « palmage – palme » qui n'ont pas pu être vérifiées par une approche empirique nous avons considéré l'approche théorique comme valide et affichons donc la conclusion correspondante. Pour les associations qui ont pu être vérifiées, et lorsque les conclusions sont différentes entre les deux approches on affiche une valeur intermédiaire (ex. : bonne + mauvaise = moyenne).

		Adéquation « Palmage – Palme »		
Palmage	Voilure	Approche Théorique	Approche Empirique	Résultat Final
« Académique »	<b>Courte</b>	Bonne	Non vérifié	☹
	<b>Longue</b>	Bonne	Non vérifié	☹
	<b>Articulée</b>	Mauvaise	Non vérifié	☹
	<b>Fendue</b>	Mauvaise	Non vérifié	☹
« Du genou »	<b>Courte</b>	Moyenne à Mauvaise	Non vérifié	☹ ou ☹
	<b>Longue</b>	Moyenne	Bonne	☹
	<b>Articulée</b>	Bonne	Bonne	☺
	<b>Fendue</b>	Bonne	Bonne	☺
« Pédalage »	<b>Courte</b>	Mauvaise	Mauvaise	☹
	<b>Longue</b>	Mauvaise	Bonne	☹
	<b>Articulée</b>	Bonne	Bonne	☺
	<b>Fendue</b>	Bonne	Bonne	☺
« Manque d'amplitude »	<b>Courte</b>	Mauvaise	Mauvaise	☹
	<b>Longue</b>	Mauvaise	Moyenne	☹

FFESSM	Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine	Commission Technique Nationale Page 54/66
--------	---	--

	<b>Articulée</b>	?	?	?
	<b>Fendue</b>	Mauvaise	Non vérifié	☹
« Cheville bloquée »	<b>Courte</b>	Moyenne à Mauvaise	Non vérifié	☺ ou ☹
	<b>Longue</b>	Moyenne à Mauvaise	Non vérifié	☺ ou ☹
	<b>Articulée</b>	Bonne	Non vérifié	☺
	<b>Fendue</b>	?	Non vérifié	?



## 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

### 5.1. CONCLUSIONS

Les objectifs de ce document étaient d'étudier l'adéquation, ou l'inadéquation, du couple « palmage – palme » dans le domaine de la plongée sous-marine sportive, et de déterminer les critères pouvant permettre de conseiller un encadrant (ou un plongeur) pour tirer le meilleur parti des palmes, ou de déterminer lesquelles choisir afin que celles-ci lui permettent de remplir leur fonction première : améliorer, voire optimiser, le rendement de propulsion.

Pour cela nous avons défini les différents types de palmage que l'on peut rencontrer en plongée sous-marine sportive ainsi que leurs caractéristiques. Nous espérons que ce travail permettra aux encadrants de mieux observer et de mieux comprendre le palmage de leurs élèves.

Puis nous avons défini les différents types de voilure que l'on rencontre sur le marché actuel ainsi que leurs caractéristiques et avons tenté d'expliquer la, ou les, meilleur(es) manière(s) d'utiliser ces voilures.

A partir de ces éléments nous avons ensuite tenté, par une approche théorique et empirique de faire ressortir l'adéquation, ou l'inadéquation, entre les différentes associations « palmage – palme » possibles. Ces éléments sont synthétisés dans la figure suivante (☺ = Bon; ☹ = Moyen ; ☹ = Mauvais ; ? = Indéterminé) :

Palmage	Voilure			
	Courte	Longue	Articulée	Fendue
« Académique »	☺	☺	☹	☹
« Du genou »	☹ ou ☹	☹	☺	☺
« Pédalage »	☹	☹	☺	☺
« Manque d'amplitude »	☹	☹	?	☹
« Cheville bloquée »	☹ ou ☹	☹ ou ☹	☺	?

Figure 5.1 : Synthèse de l'adéquation « palmage – palme »

Ce tableau permet de conclure que :

- On peut, après avoir déterminé le type de palmage d'un élève (ou son propre type de palmage), en déduire le, ou les, type(s) de palme qui permettront d'obtenir le meilleur rendement de propulsion. De même, on peut en déduire les associations à éviter.
- Pour les palmages de type « académique » et « du genou », il est toujours possible de trouver plusieurs types de voilure qui s'adapteront bien aux caractéristiques de palmage. *A priori*, cela voudrait dire que les besoins du plongeur (en terme de déplacement) devraient pouvoir être couverts dans ces cas en choisissant la bonne voilure. Le perfectionnement technique ne semble donc, dans ces cas, pas indispensable à l'atteinte des objectifs de déplacement du plongeur.
- Pour le palmage « pédalage » on peut également trouver plusieurs types de voilure qui s'adaptent bien aux caractéristiques de palmage. Mais, le médiocre rendement de ce mouvement fait que, même si on choisit une voilure adéquate, il est possible que les objectifs de déplacement ne soient pas toujours atteints. Selon le cas, on devra donc recourir à un travail de perfectionnement technique.
- Pour le palmage « manque d'amplitude », aucun type de voilure ne donne un bon rendement. Il est donc clair que les besoins du plongeur en terme de déplacement ne

FFESSM	<b>Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine</b>	Commission Technique Nationale  Page 56/66
--------	--	---

pourront pas être assurés dans tous les cas. Il faut donc avoir recours à un perfectionnement technique afin d'améliorer l'amplitude de mouvement.

- Pour le palmage « Cheville bloquée », un seul type de voileure semble être adapté, mais cette conclusion ne repose que sur une approche théorique (il n'a pas été possible de trouver un plongeur ayant ce type de palmage pour cette étude). Il faut donc rester prudent sur cette conclusion. De plus, cette bonne adéquation dépend du degré de blocage de la cheville. Compte-tenu de ces éléments, il semble donc préférable de conseiller, lorsqu'on rencontre un plongeur ayant un palmage de ce type, d'avoir recours à du perfectionnement technique afin de corriger ce blocage lorsque cela est possible.

Enfin, on gardera à l'esprit que, bien qu'il n'ait pas été possible de le démontrer avec certitude dans cette étude, certains mouvements de palmage semblent avoir, indépendamment de la voileure utilisée, un meilleur rendement que d'autres (cf. §4.4.3) ce qui revient à dire que le perfectionnement technique au palmage permet toujours d'améliorer le rendement propulsif. Mais on peut considérer que, au bout d'un moment, on peut avoir atteint un niveau de rendement suffisant pour atteindre les objectifs de déplacement du plongeur en fonction de son niveau. N'oublions donc pas que « *l'habit ne fait pas le moine* » et qu'il ne sert à rien de vouloir « *acheter des palmes plus rapides que celles du voisin* » car le problème est plus complexe que cela.

Il convient également de faire attention car ce tableau n'est ni un dogme, ni « une bible ». Il ne permet, malheureusement, pas de traiter tous les cas que l'on rencontre en pratique. En effet, il arrive parfois qu'un plongeur ait un type de palmage « hybride », c'est-à-dire qui a des caractéristiques intermédiaires entre plusieurs des types indiqués dans ce tableau. Pour trouver la meilleure association « palmage – palme » il faudra alors « extrapoler » les résultats de celui-ci ou s'inspirer de la méthode utilisée pour le bâtir et, ainsi, recourir à une analyse poussée, voire à des tests comparatifs.

En espérant que ce travail pourra rendre service à qui voudra bien le lire jusqu'au bout et qui n'oubliera pas cette phrase de D. Diderot : « *L'observation recueille les faits ; la réflexion les combine ; l'expérience vérifie le résultat de la combinaison* ».

## **5.2. PERSPECTIVES**

Cette étude a permis de poser de bonnes bases sur l'adéquation de l'association « palmage – palme ».

Néanmoins, les tests pratiques n'ont pu être menés en totalité et certaines associations n'ont pu être testées. De plus, le faible nombre de testeurs nous empêche de généraliser certaines conclusions à l'ensemble des plongeurs.

Il faudrait donc continuer et enrichir ces tests afin d'augmenter la population de testeurs (plusieurs plongeurs possédant les mêmes caractéristiques de palmage) et d'augmenter le nombre de modèles de palmes testés pour améliorer la qualité des conclusions de l'étude.



FFESSM	Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine	Commission Technique Nationale Page 57/66
--------	---	--

## 6. REFERENCES

### 6.1. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CHASSAING P. ; 2000 ; *Mécanique des fluides. Eléments d'un premier parcours* ; Cépaduès éditions ; ISBN 2 85428 509 3.

CLABE G. ; 2009 ; Adaptation de la technique à l'évolution du matériel : le palmage ; Mémoire d'instructeur régional ; Disponible sur : [http://www.ffessmpm.fr/spip.php?article794&id\\_rubrique=27](http://www.ffessmpm.fr/spip.php?article794&id_rubrique=27)

CORDIER H. ; 2004 ; Mémoire d'Instructeur Régional de plongée sous-marine : Mécanique des fluides appliquée à la plongée sous-marine ; Disponible sur : <http://www.ffessm-ctridf.fr/accueil/accpublications.html>

GRAMMATICOS B. ; *La technique de nage en monopalme* ; Document récupéré sur le site <http://www.nageavecpalmes-ffessm.com> .

GUYON E., HULIN J.P., PETIT L. ; 2001 ; *Hydrodynamique Physique. Nouvelle édition revue et augmentée* ; CNRS Editions & EDP Sciences ; ISBN 2 86883 502 3.

LESIEUR M. ; 1994 ; *La turbulence* ; Presses universitaires de Grenoble ; ISBN 2 7061 0588 7.

REGOURD L. ; Aide au choix d'une palme de chasse ; Article disponible sur : [http://www.chasse-sous-marine.com/magazine/technik/test\\_palmes/index.htm](http://www.chasse-sous-marine.com/magazine/technik/test_palmes/index.htm)

STOCKER H., JUNDT F., GUILLAUME G. ; 1999 ; *Toute la physique* ; Editions Dunod ; ISBN 2 10 003942 3.

### 6.2. SITES INTERNET

[1] <http://pou.guide.free.fr>

Ce site a été largement utilisé pour rédiger le paragraphe 7.1.1, en particulier pour l'explication de la portance et de la traînée.

[2] <http://www.nageavecpalmes-ffessm.com>

[3] <http://www.ffessm.fr>

FFESSM	Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine	Commission Technique Nationale Page 58/66
--------	---	--

## 7. ANNEXES

### 7.1. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT D'UNE PALME

Remarques : ce chapitre est intégralement repris de la référence [Cordier ; 2004]. Des éléments complémentaires, ou présentés différemment, peuvent être trouvés dans [Clabé ; 2009] et [Regourd ; ?].

#### 7.1.1. Forces de portance et de traînée

Pour se déplacer vers l'avant il faut éjecter de l'eau vers l'arrière. **Pour cela, on utilise une propriété physique des fluides lorsqu'ils se déplacent par rapport à une surface : cela crée une force.** Cette propriété est réversible c'est-à-dire que, si à l'aide d'une surface particulière (nous détaillerons ses spécificités plus tard), on applique une force sur un fluide, cela le met en mouvement (ce qui, rappelons-le, nous permettra de nous déplacer par réaction). Nous détaillons maintenant ce phénomène.

Lorsqu'un corps (prenons une plaque plane par exemple) est placé dans un fluide (de l'eau par exemple), et que ce corps se déplace par rapport au fluide, alors **le fluide exerce une pression sur la surface du corps s'opposant au déplacement** (i.e. : le maître-couple). Cette pression, appliquée sur cette surface, génère une force freinant la plaque dans son déplacement<sup>55</sup>. Nous pouvons mettre cela en évidence avec le schéma suivant :

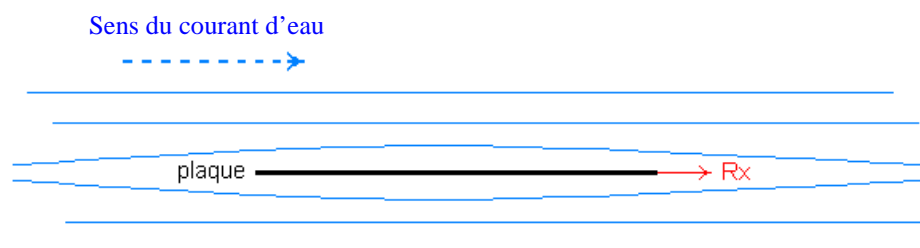


Figure 7.1 : Force exercée par l'eau sur une plaque plane se déplaçant avec inclinaison nulle (extrait du site <http://pou.guide.free.fr>)

Sur le schéma, la plaque est horizontale : elle n'a tendance ni à monter ni à descendre, mais **seulement à reculer**. L'écoulement du fluide sur les différentes faces du corps et à l'aval de celui-ci provoque des forces spécifiques qui tendent à s'opposer au mouvement de la plaque. La résultante de ces forces (notée  $R_x$  sur le schéma) est appelée la force de traînée.

Si on incline la plaque d'un angle  $\alpha$  par rapport à la direction du courant d'eau, on observe que les filets d'eau sont déviés autour de la plaque, laquelle a tendance à **reculer plus fortement que dans le cas précédent et à aller vers le haut**. Ceci s'explique respectivement par l'augmentation de la force de traînée (car le maître-couple a augmenté) et par l'apparition d'une nouvelle force que l'on appelle la portance<sup>56</sup> (notée  $R_z$  sur le schéma ci-dessous).

<sup>55</sup> Car c'est la plaque qui se déplace dans l'eau immobile. Si c'est l'eau qui se déplace, et que la plaque est initialement immobile, alors cette force fait reculer la plaque.

<sup>56</sup> Remarque de savoir-vivre dans le monde des physiciens : alors que pour parler de la force de portance on dit souvent : 'la portance...', il est parfois déplacé de faire de même avec les forces de traînée ...

Sens du courant d'eau

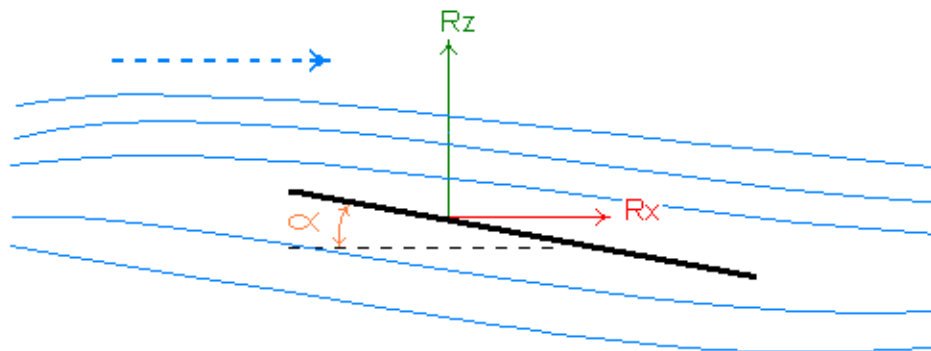


Figure 7.2 : Mise en évidence de la portance et de la traînée (extrait du site <http://pou.guide.free.fr>)

**La portance apparaît lorsque la vitesse d'écoulement du fluide autour du corps prend des valeurs différentes sur certaines de ses faces** (ici les faces supérieures et inférieures de la plaque). Ces différences de vitesses entraînent une différence de pression du fluide sur les différentes surfaces du corps ce qui génère des forces différentes dont la résultante (i.e. : la somme) est la portance. Cette force de portance est orientée perpendiculairement à la direction du déplacement.

**La force de traînée apparaît lorsque le corps se déplace dans un fluide.** Celle-ci est la résultante de 3 phénomènes hydrodynamiques qui tendent à s'opposer au déplacement du corps :

- ✓ Le fluide, en se déplaçant autour du corps, frotte sur la surface de celui-ci ce qui crée une première force de traînée, appelée **traînée 'de frottement'**.
- ✓ Lorsque la vitesse de déplacement est assez grande, on constate que l'écoulement situé derrière le corps est complètement erratique. On dit de cet écoulement qu'il est « turbulent », ce qui est mis en évidence sur la figure suivante :

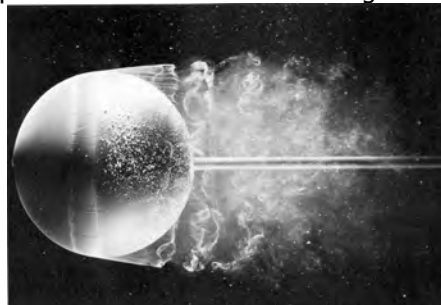


Figure 7.3 : Visualisation de la turbulence derrière un objet sphérique (extrait de *An album of Fluid Motion* de M. Van Dyke)

En particulier, on constate que cette partie de l'écoulement contient de nombreux tourbillons. Or, au centre de ces tourbillons se situe une zone de basse pression. Il règne donc, derrière le corps, une pression inférieure à celle régnant devant le corps. Cette dépression a tendance à le retenir vers l'arrière. Il apparaît donc une seconde force de traînée, appelée **traînée 'de pression' ou 'de sillage', ou encore 'de forme'**, puisque c'est la forme du corps qui va jouer sur le nombre et la taille des tourbillons qui vont se créer à l'aval. En plongée c'est la force de traînée la plus importante.

- ✓ Il existe également une troisième force de traînée, appelée **traînée d'onde**, qui n'existe que lorsqu'on nage en surface. On crée des vagues qui tapent sur diverses parties du plongeur ce qui le ralentit. Cette traînée d'onde n'existe pas lorsqu'on est complètement immergé.

Au global, on considère que les forces de portance et de traînée sont proportionnelles à la masse volumique du fluide, à la surface qu'oppose le corps à l'écoulement du fluide (maître-couple) et au carré de la vitesse relative du corps par rapport au fluide. On a :

$$F_{\text{Portance}} = \frac{1}{2} C_z \rho_{\text{fluide}} S V^2$$

$$F_{\text{Traînée}} = \frac{1}{2} C_x \rho_{\text{fluide}} S V^2$$

Avec :

- ✓  $C_x$  et  $C_z$  : coefficient de portance et de traînée.
- ✓  $\rho_{\text{fluide}}$  : Masse volumique du fluide.
- ✓  $S$  : Surface de Maître-couple.
- ✓  $V$  : Vitesse du fluide.

On peut donc caractériser ces deux forces en utilisant uniquement les coefficients  $C_x$  et  $C_z$ . Des expérimentations montrent que ces coefficients varient, pour un corps donné, en fonction de l'angle d'inclinaison  $\alpha$ . Cette variation est mise en évidence sur le schéma suivant dans le cas d'une aile d'avion :

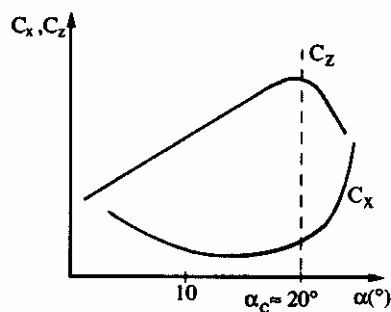


Figure 7.4 : Evolution des coefficients  $C_x$  et  $C_z$ , pour une aile d'avion, en fonction de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  (extrait de [6])

**On voit que le coefficient de portance augmente avec l'angle d'inclinaison jusqu'à une valeur critique de cet angle (aux alentours de  $20^\circ$  dans notre exemple mais cette valeur dépend du corps considéré et n'est donc pas une constante). Si  $\alpha$  continue d'augmenter, la portance chute alors drastiquement tandis que la force de traînée augmente de manière importante.**

La somme de ces deux forces se combine en une résultante  $R$  qui représente, au global, la force exercée par la surface sur le fluide. Ceci est mis en évidence sur le schéma suivant dans le cas d'une aile d'avion :

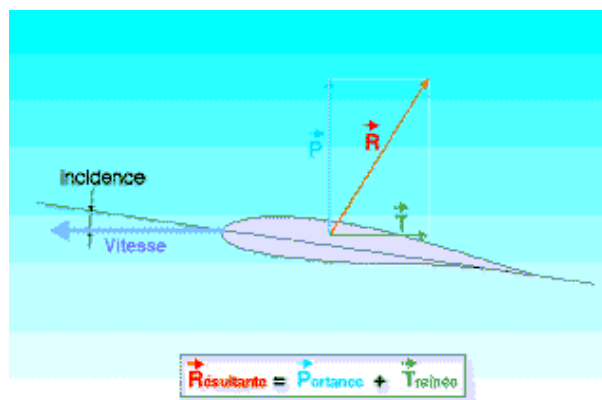


Figure 7.5 : Résultante de la portance et de la traînée (extrait du site <http://www.onera.fr>)

On voit alors que cette force est dirigée vers l'arrière ce qui permet d'éjecter, vers l'arrière et vers le haut, une quantité d'eau donnée. Plus cette force est importante et plus la quantité d'eau éjectée est grande. Par réaction, l'eau exercera une force, de même intensité et de sens opposé, sur la plaque plane ce qui lui permettra d'avancer (c'est la force propulsive).

**On peut donc conclure en disant que pour mettre en mouvement une quantité d'eau donnée, il suffit de mettre en mouvement un corps (ex. : une plaque plane, les mains, ...) dans l'eau. Ce mouvement relatif créera une force (somme des forces de portance et de traînée) qui, par réaction sur le corps, lui permettra d'avancer.**

Il faut également remarquer qu'en l'absence de mouvement relatif de la plaque par rapport à l'eau il n'y a pas d'apparition de force. C'est pourquoi on parle de forces hydrodynamiques.

### 7.1.2. Application au mouvement d'une palme

Voyons maintenant comment cela s'applique au cas du mouvement simplifié<sup>57</sup> d'une palme<sup>58</sup>. On considère un mouvement de palmage académique.

On peut faire l'hypothèse qu'une palme est constituée de 2 plaques planes articulées entre elles :



. Le segment P correspond au pied du plongeur alors que M est la voile de la palme (par 'pied' on entend plutôt la partie de la jambe qui participe au mouvement mais nous simplifierons en parlant de 'pied' seulement ou de chausson). On suppose que le segment P ne participe pas à l'apparition de la force propulsive.

**Le mouvement global d'une palme est celui impulsé par le battement des pieds.** Ce mouvement est alternatif vertical ce qui entraîne l'apparition d'une phase de descente, puis de montée, de la palme. Le mouvement de descente, et ses conséquences en terme de création de force propulsive, sont décrits dans le tableau suivant et mis en évidence sur la Figure 7.6 :

N°	Désignation	Description de la phase
①	Descente du pied	Partant de la position horizontale (voilure et pied dans l'alignement), le pied amorce sa descente. Dans cette phase, la voilure ne se déplace pas. Elle ne fait que changer son orientation. Il n'y a donc apparition ni de forces de portance, ni de traînée. Cette phase ne participe donc pas à la propulsion du plongeur.
②	Descente de la voilure	Lorsque l'angle entre la voilure et le pied a atteint son maximum (qui dépend des contraintes imposées par les articulations, de l'élasticité de la voilure et de la position choisie par le palmeur), la voilure commence à se déplacer par rapport à l'eau. Les forces de portance et de traînée apparaissent alors ce qui permet, par réaction, au plongeur d'avancer. En comparaison aux autres phases, cette phase est la plus propulsive (nous verrons pourquoi par la suite).
③	Fin de la descente	Lorsque le pied stoppe son mouvement descendant, la voilure continue le sien (à cause de son élasticité) jusqu'à être alignée avec le pied <sup>59</sup> . La voilure se déplaçant par rapport à l'eau on est encore dans une phase propulsive. Néanmoins, la vitesse d'éjection de l'eau et l'angle entre le pied et la voilure vont en diminuant ce qui entraîne une diminution de la valeur de la force propulsive, qui

<sup>57</sup> Simplifié = il s'agit d'un palmage où l'on ne retient que les éléments essentiels.

<sup>58</sup> On reprend ici le développement présenté dans la référence [5] sur la simplification du mouvement d'une palme en modifiant et en approfondissant les explications afin de les appliquer à notre cas.

Lors du mouvement de descente et de remontée de la palme on créé, à chaque fois, une force sur l'eau qui, par réaction, provoque une force sur le plongeur lui permettant d'avancer. Ceci est mis en évidence sur le schéma suivant<sup>60</sup> :

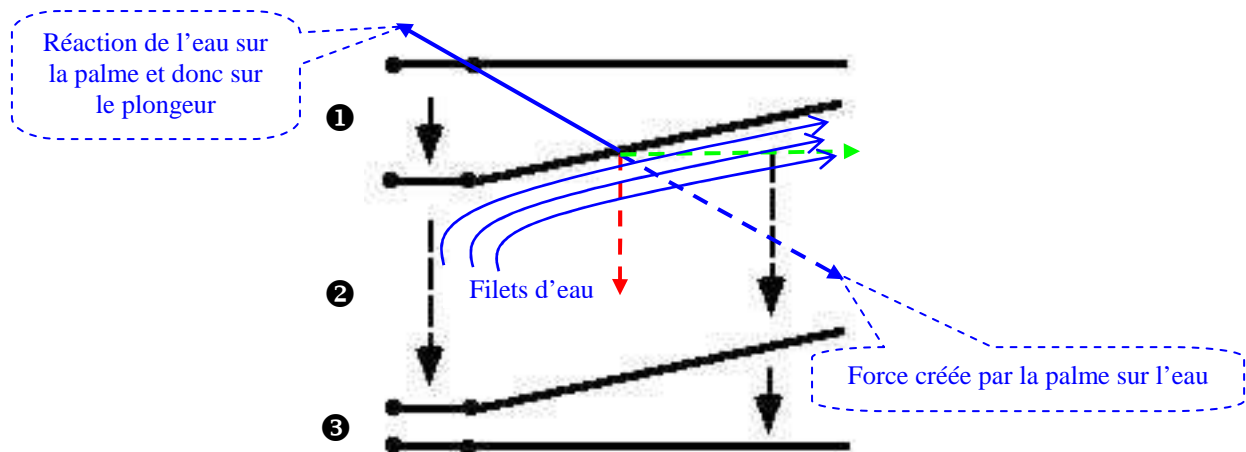


Figure 7.6 : Apparition de la force propulsive sur une palme lors de la phase de descente (schéma extrait de <http://www.nageavecpalmes-ffessm.com> et modifié par l'auteur).

Le mouvement de remontée de la palme, et ses conséquences en terme de force propulsive, sont décrits dans le tableau suivant et mis en évidence sur la Figure 7.7 :

N°	Désignation	Description de la phase
④	Remontée du pied	Le mouvement s'inverse lors de la phase ascendante mais suit grosso modo le même schéma. Le pied amorce sa remontée et la voileure commence par changer son orientation. Dans cette phase, la voileure ne se déplace pas. Elle ne fait que changer son orientation. Il n'y a donc apparition ni de portance, ni de force de traînée. Cette phase ne participe donc pas à la propulsion du plongeur.
⑤	Remontée de la voileure	L'angle entre la voileure et le pied atteint sa valeur maximale. Cette valeur maximale à la remontée n'est pas nécessairement égale à la valeur maximale de descente. En effet, les contraintes imposées par les articulations et la position choisie par le palmeur ne sont pas forcément symétriques à celles de la descente. La voileure se déplaçant par rapport à l'eau, on créé une force propulsive. En général, l'angle entre la voileure et le pied est plus petit à la remontée qu'à la descente ce qui diminue l'intensité de la force propulsive (résultante de la portance et de la traînée). Cette phase est donc, en général, moins propulsive que la phase de

<sup>59</sup> En pratique, dès que le pied arrive à son point le plus bas, il recommence un nouveau mouvement ascendant en ne laissant pas le temps à la voileure de terminer sa course. La voileure stoppe alors son mouvement descendant ce qui fait disparaître la force propulsive. On retrouve également ce phénomène en fin de remontée.

<sup>60</sup> Pros : Sur cette figure, l'écoulement d'eau le long de la palme est, compte-tenu de son mouvement, perpendiculaire à la voileure et non parallèle comme présenté dans les schémas du paragraphe 7.1.1. Cela entraîne que la force de portance (en vert) est horizontale, et les forces de traînée (en rouge) verticales vers le bas.

<b>6</b>	Fin de la remontée	<p>descente de la voileure.</p> <p>Lorsque le pied stoppe son mouvement ascendant la voileure continue le sien (à cause de son élasticité) jusqu'à être alignée avec le pied.</p> <p>La voileure se déplaçant par rapport à l'eau on est encore dans une phase propulsive. Néanmoins, la vitesse d'éjection de l'eau et l'angle entre le pied et la voileure vont en diminuant ce qui entraîne une diminution de la force propulsive qui, lorsque le pied et la voileure sont alignés devient nulle.</p>
----------	--------------------	--

Ces phases sont représentées sur le schéma suivant :

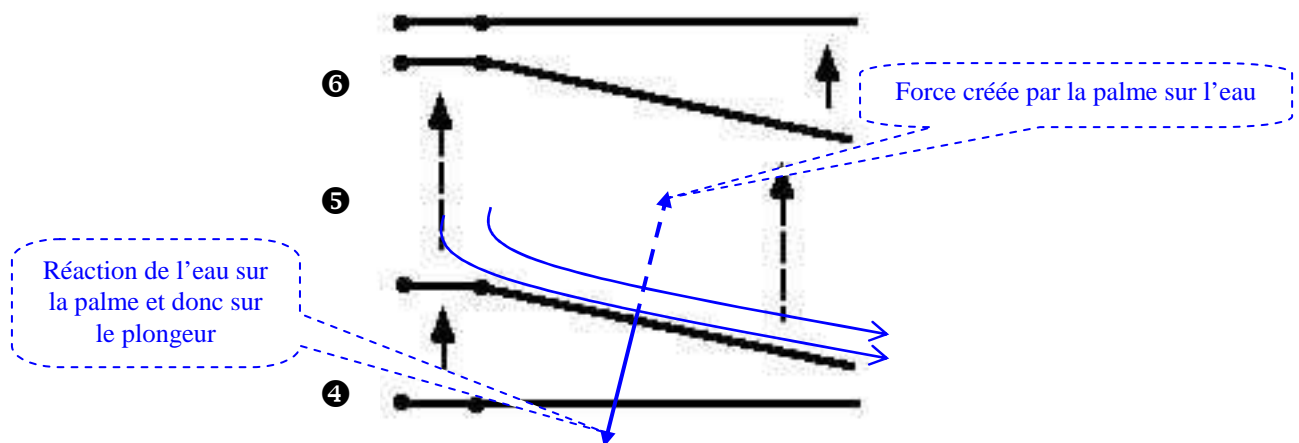


Figure 7.7 : Apparition de la force propulsive sur une palme lors de la phase de remontée (schéma extrait du site <http://www.nageavecpalmes-ffessm.com> et modifié par l'auteur).

On constate alors que **plus la force propulsive est horizontale et plus le rendement propulsif de la palme est grand. L'angle d'inclinaison de la force propulsive avec l'horizontale est donc, au même titre la quantité et la vitesse d'éjection d'eau, un paramètre important du rendement propulsif d'une palme.**

La composante verticale (qui ne sert pas à avancer) de la force propulsive est la résultante des forces de traînée tandis que sa composante horizontale (qui sert réellement à se propulser) est la force de portance. **Pour augmenter le rendement propulsif de la palme il faut donc augmenter cette portance tout en réduisant au maximum les forces de traînée.** Cela se traduit par l'augmentation, dans une certaine mesure, de l'angle d'inclinaison de la voileure (cf. §7.1.1). En pratique, il y a 2 possibilités pour faire cela :

1. Rendre la voileure élastique pour que celle-ci se courbe lors du mouvement de palmage, sans toutefois dépasser l'angle critique où la portance chute drastiquement. Ceci est l'aspect mécanique de la voileure d'une palme et est contrôlé, entre autres, par les propriétés élastiques (ou plastiques) des matériaux de la palme, l'épaisseur de la voileure ou la présence éventuelle d'éléments comme des raidisseurs dans la voileure. Ces éléments ne sont pas détaillés dans ce mémoire mais constituent un paramètre important d'augmentation du rendement de la palme. C'est pour cela qu'une palme n'est pas constituée d'une planche articulée au niveau du pied (comme sur notre modèle) mais d'une partie rigide, le chausson, et d'une partie déformable, la voileure.
2. Modifier le design de la palme pour que la voileure se place d'elle-même à l'angle le plus intéressant. Cet élément sera présenté dans le paragraphe 3.3.

Néanmoins, malgré tous les efforts pour rendre la force propulsive parfaitement horizontale<sup>61</sup>, cela ne peut pas être le cas car les forces de traînée ne peuvent être nulles. **Le rendement propulsif d'une palme ne peut donc jamais être égal à 100%.**

<sup>61</sup> Ce qui amènerait le rendement propulsif de la palme à une valeur proche de 100%.



## 7.2. MODIFICATION DES CARACTERISTIQUES DE PALMAGE SUR DIFFERENTS TESTS

La figure suivante (cf. Figure 7.8) met en évidence que le testeur ayant initialement un palmage mixte « du genou – académique » (avec dominance du type « du genou », cf. images en colonne gauche) voit celui-ci modifié lorsqu'il palme en capelé (cf. images en colonne droite) en adoptant une dominante du type « académique » (mais en ayant toujours certaines caractéristiques du type « du genou ») :



A) Montée de la palme gauche  
(fin)



B) Descente de la palme gauche  
(position intermédiaire)



C) Descente de la palme gauche  
(fin)



FFESSM	<b>Palmes Et Palmages en Plongée Sous-Marine</b>	Commission Technique Nationale  Page 65/66
--------	--	---



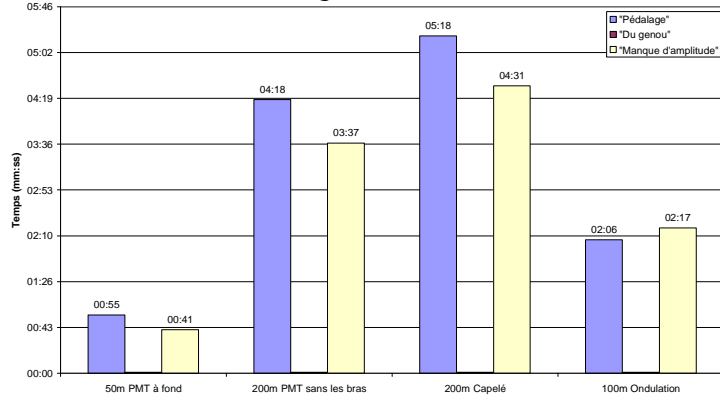
D) Remontée de la palme gauche  
(position intermédiaire)

Figure 7.8 : Mise en évidence d'une modification du palmage en PMT et en capelé

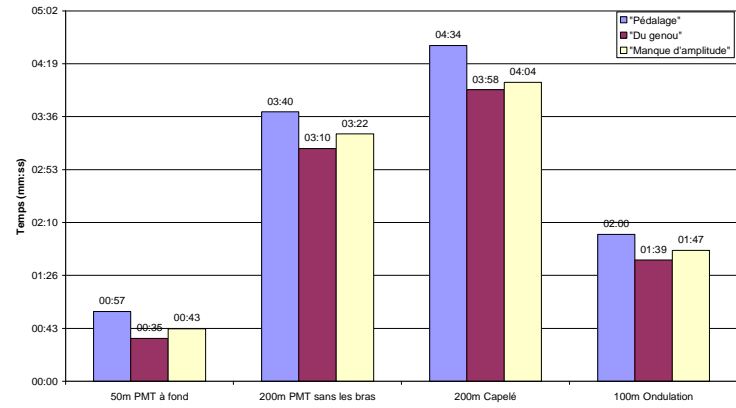
La différence se voit surtout dans la fin de phase de descente de la palme (images C) et dans celle de remontée (image D) car la jambe est tendue plus longtemps lors de la nage en capelé par rapport à la nage PMT.

### 7.3. COMPARAISON DES TYPES DE PALMAGE ENTRE EUX

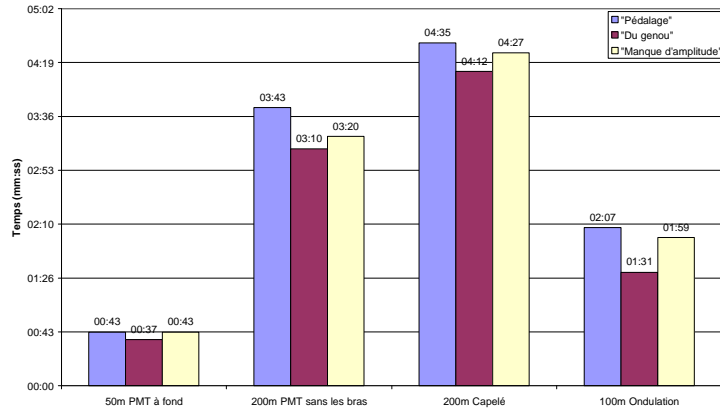
L'ensemble des résultats obtenus au §4.4.3 sont les suivants :



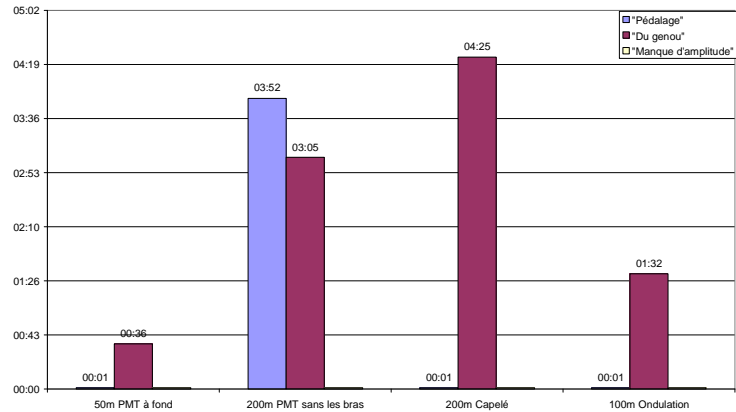
A) Voilure Courte



B) Voilure Longue



C) Voilure Articulée



D) Voilure Fendue