COMMISSION TECHNIQUE REGIONALE

MECANIQUE DES FLUIDES APPLIQUEE A LA PLONGEE SOUS MARINE

Mémoire présenté dans le cadre du stage d'instructeur régional

Novembre 2004

Hervé CORDIER

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION. 7

2. DEFINITIONS ET ABREVIATIONS. 9

3. ETUDE TECHNIQUE DES PALMES ET DE LEUR UTILISATION 10

3.1. INTRODUCTION 10
3.2. RAPPELS : SE DEPLACER DANS L'EAU 11
3.2.1. Rappels de physique. 11
3.2.2. Vitesse maximale théorique de déplacement d'un nageur dans l'eau 12
3.2.3. Poussée provoquée par un nageur 13
3.2.4. Liens entre vitesse, poussée et rendement propulsif 13
3.2.5. Besoins spécifiques de la propulsion d'un plongeur 13
3.3. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT D'UNE PALME 14
3.3.1. Forces de portance et de traînée 14
3.3.2. Application au mouvement d'une palme 17
3.3.3. Utilisation de deux palmes 20
3.4. ANALYSE TECHNIQUE DE DIFFERENTES CARACTERISTIQUES DE PALMES 21
3.4.1. Influence de la surface de la voilure 23
3.4.2. Présence de canaux sur la voilure 23
3.4.3. Influence de la forme de bout de voilure 24
3.4.4. Présence de tuyères en début de voilure 24
3.5. DE L'ADAPTATION DU MATERIEL A L'HOMME 25
3.5.1. Introduction 25
3.5.2. Analyse du « palmage » d'un débutant 26
3.5.2.1. Blocage de la cheville 26
3.5.2.2. Pliage du genou 27
3.5.3. Modification de l'angle d'inclinaison de la voilure avec le pied 28
3.5.4. Palmes fendues 29
3.6. ENSEIGNEMENT DE L'HYDRODYNAMIQUE DES PALMES 31
3.6.1. Besoins de connaissances sur l'hydrodynamique des palmes 31
3.6.2. Eléments d'hydrodynamique des palmes à enseigner 32
3.6.3. Compréhension des notions délicates sur l'hydrodynamique des palmes 33
3.7. CONCLUSION 35

4. RESPIRATION, ESSOUFFLEMENT ET MELANGES TRIMIX ! 37

4.1. NOTIONS DE BASE SUR LES PERTES DE CHARGE 37
4.2. ECOULEMENT D'AIR DANS LES VOIES AERIENNES 37
4.3. TORDRE LE COU AUX IDEES REÇUES : ESSOUFFLEMENT ET VISCOSITE. 39
4.4. ETUDE DES PROTOCOLES DE PREPARATION D'UN MELANGE TRIMIX 40
4.4.1. Estimation du temps maximal d'homogénéisation d'un mélange trimix. 41
4.4.2. Influence de l'ordre d'injection des gaz. 42

5. DE L'EAU ET DES BULLES ! 45

5.1. « SUIVRE LES PETITES BULLES » : OUI, MAIS LESQUELLES ? 45
5.2. DYNAMIQUE DES RONDS DE BULLE. 48
5.3. JEUX DE DAUPHINS. 51
5.4. TORDRE LE COU AUX IDEES REÇUES : L'AIR PEUT-IL FAIRE COULER ? 52

6. CONCLUSION 54

7. BIBLIOGRAPHIE 55

8. SITES INTERNET 55

FIGURES

FIGURE 3.1 : SCHEMATISATION DU PRINCIPE D'ACTION-REACTION DANS LE CAS D'UN NAGEUR (EXTRAIT DU COURS 'TECHNIQUES DE NAGE' DE J.M. OYHENART)..... 12
FIGURE 3.2 : FORCE EXERCEE PAR L'EAU SUR UNE PLAQUE PLANE SE DEPLAÇANT AVEC INCLINAISON NULLE (EXTRAIT DU SITE HTTP://POU.GUIDE.FREE.FR)..... 15
FIGURE 3.3 : MISE EN EVIDENCE DE LA PORTANCE ET DE LA TRAINEE (EXTRAIT DU SITE HTTP://POU.GUIDE.FREE.FR)..... 15
FIGURE 3.4 : VISUALISATION DE LA TURBULENCE DERRIERE UN OBJET (EXTRAIT DE *AN ALBUM OF FLUID MOTION* DE M. VAN DYKE)..... 15
FIGURE 3.5 : EVOLUTION DES COEFFICIENTS CX ET CZ, POUR UNE AILE D'AVION, EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCLINAISON α (EXTRAIT DE [6])..... 16
FIGURE 3.6 : RESULTANTE DE LA PORTANCE ET DE LA TRAINEE (EXTRAIT DU SITE HTTP://WWW.ONERA.FR)..... 17
FIGURE 3.7 : APPARITION DE LA FORCE PROPULSIVE SUR UNE PALME LORS DE LA PHASE DE DESCENTE (SCHEMA EXTRAIT DE HTTP://WWW.NAGEAVECPALMES-FFESSM.COM ET MODIFIE PAR L'AUTEUR)..... 18
FIGURE 3.8 : APPARITION DE LA FORCE PROPULSIVE SUR UNE PALME LORS DE LA PHASE DE REMONTEE (SCHEMA EXTRAIT DU SITE HTTP://WWW.NAGEAVECPALMES-FFESSM.COM ET MODIFIE PAR L'AUTEUR)..... 19
FIGURE 3.9 : ANNULATION DE LA COMPOSANTE VERTICALE DE LA FORCE PROPULSIVE LORS D'UN PALMAGE CLASSIQUE (EXTRAIT DU COURS 'TECHNIQUES DE NAGE' DE J.M. OYHENART)..... 20
FIGURE 3.10 : MISE EN EVIDENCE DU CONTOURNEMENT DE LA PALME PAR L'EAU ET DE L'APPARITION DES TOURBILLONS DE BOUT DE PALME (EXTRAIT DU SITE INTERNET HTTP://WWW.ONERA.FR)..... 23
FIGURE 3.11 : MISE EN EVIDENCE DES EVOLUTIONS POSSIBLES POUR « CORRIGER » LE BLOCAGE DE LA CHEVILLE (EXTRAIT DU SITE INTERNET HTTP://WWW.MARES.COM)..... 28
FIGURE 3.12 : MISE EN EVIDENCE DE LA DIFFERENCE DE TRAINEE DE PRESSION ENTRE UNE PLAQUE PLANE ET UN CYLINDRE (EXTRAIT DE [11])..... 30
FIGURE 3.13 : EXEMPLES DE PALMES FENDUES (EXTRAIT DES SITES HTTP://WWW.SCUBAPRO-UWATEC.COM ET HTTP://WWW.OCEANIC.COM)..... 30
FIGURE 4.1 : NAISSANCE DE LA TURBULENCE A LA SUITE D'UNE PETITE PERTURBATION (EXTRAIT DE [11])..... 37
FIGURE 4.2 : SCHEMATISATION DES VOIES AERIENNES SUPERIEURES (EXTRAIT DE [12])..... 38
FIGURE 4.3 : JET DE CO_2 (A GAUCHE) ET D'UN GAZ NON PRECISE (A DROITE) DANS DE L'AIR INITIALEMENT AU REPOS (EXTRAIT DE [3] ET D'UN SITE INTERNET)..... 41
FIGURE 4.4 : JET ASCENDANT D'HELIUM A ENVIRON 10M/S DANS L'AIR INITIALEMENT AU REPOS (EXTRAIT DU SITE HTTP://WWW.IMFT.FR)..... 43
FIGURE 5.1 : VISUALISATION DE BULLES AVEC DES FORMES ET DES VOLUMES DIFFERENTS. LES VOLUMES DES BULLES SONT EGAUX A (A) : 50MM^3, (B) : 200MM^3 (EXTRAIT DE [10])..... 46
FIGURE 5.2 : VITESSE TERMINALE D'UNE BULLE EN FONCTION DE SON DIAMETRE EQUIVALENT (A 20°C) (EXTRAIT DE [4])..... 47
FIGURE 5.3 : SCHEMA DE PRINCIPE DE REALISATION D'UN TOURBILLON EN FORME D'ANNEAU TOURBILLON..... 49
FIGURE 5.4 : FORMATION D'UN ANNEAU TOURBILLON LORS DE L'EJECTION D'UN FLUIDE DANS UN AUTRE FLUIDE.49
FIGURE 5.5 : VISUALISATIONS, PAR INJECTION DE COLORANT DANS DE L'EAU, DE LA FORMATION D'UN ANNEAU TOURBILLON (EXTRAIT DE DIFFERENTS SITES SUR INTERNET)..... 50
FIGURE 5.6 : SCHEMA D'UN TOURBILLON TOROÏDAL (EXTRAIT DE [6])..... 50
FIGURE 5.7 : IMPACT D'UN ANNEAU TOURBILLONNAIRE SUR LA SURFACE DE L'EAU (EXTRAIT DE [6])..... 51
FIGURE 5.8 : DAUPHINS ESSAYANT DE JOUER A SAUTE-MOUTON (EXTRAIT DU SITE HTTP://WWW.EARTHTRUST.COM)..... 52
FIGURE 5.9 : MOUVEMENT RELATIF EN 'SAUTE-MOUTON' DE DEUX ANNEAUX TOURBILLONS (EXTRAIT DE *AN ALBUM OF FLUID MOTION* DE M. VAN DYKE)..... 52

SYNTHESE

CONTEXTE

Ce document constitue le mémoire rédigé dans le cadre du cursus pour le titre d'instructeur régional de plongée-sous-marine au sein de la FFESSM.

OBJECTIFS

Ce document vise à fournir des explications compréhensibles à différents phénomènes ou comportements observables dans la pratique courante de cette activité. La principale particularité de ces phénomènes est qu'ils mettent en jeu des éléments décrits par une science physique spécifique (et finalement peu connue de la part du grand public) : la mécanique des fluides[1].

Les phénomènes et comportements dont il est question dans le présent document sont relatifs aux éléments suivants :

- Les palmes et leur utilisation,
- La respiration des gaz,
- La préparation des mélanges trimix,
- La vitesse des bulles en fonction de leurs forme et taille,
- Des comportements singuliers de certains types de bulles (observés parfois lors des paliers pour faire passer le temps).

Ces éléments sont regroupés en trois chapitres dont les objectifs sont les suivants :

- **La première partie est consacrée à l'étude des palmes**. L'objectif de ce chapitre est de comprendre **comment fonctionne une palme** et d'être capable d'analyser les différences entre les types de palmes présents sur le marché français. **Le cas des palmes fendues est traité spécifiquement**. Ce chapitre permettra également d'expliquer pourquoi **un type de palme est spécifique à un type de palmage**. De plus, nous avons procédé à une **analyse pédagogique** des **éléments simples d'hydrodynamique** que l'on pourrait enseigner aux plongeurs afin de mieux leur faire **comprendre le fonctionnement des palmes** et la manière de **les utiliser au mieux**.
- **Le second chapitre est consacré à l'étude des écoulements de gaz** (air et trimix) et est appliqué aux cas de **l'essoufflement, de la respiration sous-marine** et de **l'homogénéisation d'un mélange trimix** suite à sa fabrication.
- **Le troisième chapitre porte sur l'étude des écoulements où l'on trouve simultanément du gaz et des liquides** (les écoulements diphasiques). On y abordera, entre autres, la question de la **forme exacte des bulles** à suivre lors de la remontée pour être à la **bonne vitesse**. On cherchera également à savoir s'il est plus facile de remonter en se plaçant dans une colonne de bulles ou à l'extérieur de celle-ci. Enfin, un paragraphe est consacré au comportement des « ronds de bulles » que l'on voit parfois apparaître lors des paliers (parfois très long !!).

METHODOLOGIE

La méthode utilisée pour répondre aux différentes questions a été la suivante :

- Rechercher les éléments existants dans la bibliographie. Cette bibliographie, peu abondante, est principalement issue de revues scientifiques et d'éléments récupérés sur internet.
- Analyser ces éléments et les traduire en langage compréhensible.
- Procéder à une analyse théorique des questions (ex. : quelle bulle dois-je suivre pour remonter à 12m/min, en quoi un trou dans une palme peut-il améliorer son rendement propulsif, …) en se basant sur des connaissances en mécanique des fluides et sur le vécu de plongeur.

[1] La mécanique des fluides est une science physique visant à l'étude du comportement des fluides (liquides, gaz, plasmas, …). Ce domaine de la physique est souvent découpé en plusieurs autres disciplines comme l'hydrodynamique, l'aérodynamique, l'aéraulique, la mécanique des fluides diphasique ou polyphasique, la rhéologie, la turbulence, …

- Lorsque cela était possible, contacter des fabricants ou des industriels pour avoir leur avis sur la question afin de compléter l'étude menée[2].

RESULTATS

Concernant le chapitre sur les palmes et leur utilisation, les principaux résultats sont les suivants :

- **La vitesse maximale atteinte par un plongeur est directement proportionnelle à la quantité d'eau qu'il éjecte derrière lui**. L'objectif des palmes est de maximiser, pour un effort donné, cette quantité d'eau éjectée. Plus celle-ci est élevée et plus le rendement propulsif est grand.
- **Le rendement propulsif optimum d'une palme est lié à la manière dont on l'utilise** et peut être amélioré grâce, entre autres, aux éléments suivants : rigidité de la voilure, surface de la voilure, présence de canaux directionnels sur la voilure, présence de tuyères en début de voilure (uniquement sur des palmes courtes et rigides), forme du bout de la voilure, angle d'inclinaison de la voilure avec l'axe du pied, présence d'une ouverture longitudinale dans la voilure.
- Dans le cas d'un « palmage » où l'axe du pied reste perpendiculaire à celui du tibia (ex. : pédalage du débutant), **des palmes où la voilure n'est pas dans l'axe du pied ont un rendement propulsif meilleur que des palmes classiques**.
- Dans le cas d'un « palmage » où l'on plie le genou (ex. : pédalage du débutant), **des palmes fendues ont un rendement propulsif meilleur que des palmes classiques**.
- **Les nouveaux types de palmes (ex. : palmes fendues, …) permettent d'avancer correctement** (si on ne leur en demande pas trop) **sans avoir besoin d'apprendre à palmer**, simplement en utilisant le mouvement « naturel » du palmage de débutant. Néanmoins, ces palmes **ne permettent pas de développer une puissance importante** comme cela peut être nécessaire lors d'un sauvetage à la palme de 20m ou si l'on a besoin d'aider un élève à avancer dans un courant un peu fort. **Cela pourrait remettre en question, au moins en partie, la manière dont on enseigne actuellement le palmage dans les différents cursus de plongeur**. Il nous semble nécessaire de mettre en place une cellule de réflexion sur ce point afin de se préparer à cette évolution.
- Il est possible de faire comprendre des éléments d'hydrodynamique simples à des plongeurs de tout niveau afin de les aider à mieux palmer en comprenant comment fonctionnent leurs palmes.

Concernant le chapitre sur la respiration sous-marine et la préparation des mélanges trimix, les principaux résultats sont les suivants :

- Plus on augmente les durées d'inspiration et d'expiration et plus les pertes de charge dues à l'écoulement d'air dans les voies aériennes sont faibles, ce qui diminue les risques d'essoufflement.
- Les risques d'essoufflement augmentent avec la profondeur car **la viscosité de l'air diminue avec la pression**.
- En utilisant certains protocoles de remplissage lors de la préparation d'un mélange trimix, il est possible de ramener **le temps d'homogénéisation du mélange à environ 1 ou 2 heures** (au lieu des 12 ou 24 heures souvent préconisées).

Concernant le chapitre sur l'étude des bulles dans l'eau, les principaux résultats sont les suivants :

- Il est impossible de discriminer visuellement des bulles remontant à des vitesses inférieures à 12m/min.
- Si l'on souhaite remonter à une vitesse de 12 mètres par minute il faut suivre des bulles sphériques d'1mm de diamètre.
- Si l'on souhaite remonter respectivement à des vitesses de 15, 17 et 20 mètres par minute il faut suivre respectivement plusieurs types de bulles (de forme et de taille très différentes) en même temps.
- Lors d'une remontée d'urgence (ex. : sauvetage à la palme), il peut être préférable de se positionner dans la colonne de bulle car celle-ci facilitera la remontée.

[2] Ce dernier point a été le plus délicat, en particulier avec les fabricants de matériel de plongée-sous-marine. Les contacts industriels (Air Liquide en particulier que je tiens ici à remercier) ont été assez facile car les interlocuteurs étaient en général des techniciens. Pour les fabricants de matériel de plongée-sous-marine, les seuls contacts que j'ai pu obtenir[2] étaient soit des commerciaux, soit des techniciens qui n'étaient pas familiarisés avec le monde de l'aéraulique ou de l'hydraulique. Les échanges ont donc été peu nombreux dans ce cas.

PERSPECTIVES

Les perspectives les plus intéressantes concernent le travail sur les palmes.

En priorité, il semble très important de **lancer une réflexion plus approfondie** que celle présentée dans ce document sur **l'impact des nouveaux types de palmes** (ex. : palmes fendues) sur l'enseignement des techniques de palmage dans le cursus des plongeurs. En effet, l'apparition de ces types de palmes permet à des débutants d'avancer correctement lors d'une plongée d'exploration classique sans avoir à se soucier d'apprendre à palmer. **Le problème se pose ensuite si ce débutant souhaite évoluer dans les différents niveaux de plongeur** car il sera alors incapable d'assister un équipier ou un élève en situation particulière (ex. : déplacement dans un courant soutenu, …).

De plus, cette réflexion pourrait également permettre d'établir une liste de conseils et de recommandations quant à l'utilisation de ce type de palmes à destination des plongeurs et des structures qui souhaitent les utiliser (ex. : dans quel cas ces palmes sont adaptés, dans quel cas elles ne le sont pas, conseils pour en tirer le meilleur parti, …).

A minima, il serait profitable à l'ensemble de la communauté des plongeurs de communiquer sur ces nouveaux types de palmes afin d'expliquer leurs principes de fonctionnement ainsi que leurs avantages et inconvénients, avec tests à l'appui. Un article dans la revue officielle de la fédération pourrait être un bon moyen de remplir cet objectif.

1. INTRODUCTION.

Durant ces derniers mois on m'a souvent demandé quel était mon sujet de mémoire pour le titre d'instructeur régional de plongée-sous-marine. A la réponse : « Mécanique des fluides appliquée à la plongée-sous-marine » je récoltais souvent une mine dubitative de la part de mon interlocuteur. Passé le premier moment de stupeur (1 seconde en moyenne), plusieurs types de réactions apparaissaient :

- L'étonnement : « Hein ? Tu peux répéter s'il te plaît ? ».
- La surcharge cognitive : « Bouah ! Mais personne ne va rien y comprendre ! ».
- L'incompréhension : « Eh ben ! Je comprends déjà pas le titre alors le reste… ».
- La peur de la science : « La mékaquoi appliquée à la plongée ? ».
- La politesse : « Oh ! Ben bonne chance à toi. ».
- L'encouragement dissimulé : « Ouh la ! C'est pas un sujet facile ça ! ».
- L'intérêt : « Ah bon ! Mais qu'est-ce que tu vas y mettre dedans ? ».
- L'envie du technicien : « Super ! Tu vas parler des palmes, des bulles, … ».

Ces réactions très diverses m'ont grandement aidé dans la définition des objectifs du présent mémoire ainsi que dans sa rédaction. En effet, chacune constitue soit une question à laquelle il faudra répondre, soit un écueil à éviter (i.e. : il faudra faire simple et compréhensible).

L'objectif de ce mémoire est donc **d'expliquer**, et de **faire comprendre**, certains **phénomènes ou comportements couramment observés en plongée-sous-marine** à l'aide **d'éléments compréhensibles de mécanique des fluides**[3]. Le principal écueil à éviter serait de considérer la mécanique des fluides comme une fin en soi et non comme un moyen d'expliquer des choses pratiques et observables.

Pour atteindre cet objectif j'ai, dans un premier temps, fait la liste (non exhaustive) des questions, phénomènes ou comportements que l'on peut couramment observer en plongée sportive et dont la compréhension nécessite des connaissances en mécanique des fluides. Cette liste est la suivante :

- Comment fonctionne une palme ?
- Comment une palme avec une fente au milieu peut-elle efficace ?
- Comment expliquer les différences entre les types de palmes ?
- Combien de temps met un mélange trimix pour s'homogénéiser ?
- Peut-on faire confiance aux petites bulles pour remonter à la bonne vitesse ?
- Comment faire de jolis ronds de bulles ?
- Est-il plus simple de faire une assistance en se plaçant dans une colonne de bulles ?
- Pourquoi le Mistral refroidit-il l'eau en Méditerranée et pas le vent d'est ?
- Est-il possible, en nageant derrière un camarade, de moins se fatiguer ?
- Les théories de décompression basées sur la prise en compte du comportement des bulles.
- …

La seconde étape a été de faire une sélection parmi ces sujets. Cette sélection a été faite en tenant compte de l'intérêt de la question, de la bibliographie exploitable pour répondre à la question et de mon sentiment personnel d'être capable de formuler une réponse simple, en relation directe avec la plongée tout en ne refaisant pas ce que l'on peut déjà trouver dans la bibliographie classique de plongée-sous-marine. Cela nous conduit à un document organisé en 3 parties organisées en fonction des types d'écoulement considérés (écoulement d'eau, d'air, de gaz dans un liquide ou divers) :

- **La première partie est consacrée à l'étude des palmes**. L'objectif de ce chapitre est de comprendre **comment fonctionne une palme** et d'être capable d'analyser les différences entre les types de palmes présents sur le marché français. Le cas des palmes fendues est traité spécifiquement. Ce chapitre permettra également d'expliquer pourquoi **un type de palme est spécifique à un type de palmage**. De plus, nous avons procédé à une **analyse pédagogique**

[3] La mécanique des fluides est une science physique visant à l'étude du comportement des fluides (liquides, gaz, plasmas, …). Ce domaine de la physique est souvent découpé en plusieurs autres disciplines comme l'hydrodynamique, l'aérodynamique, l'aéraulique, la mécanique des fluides diphasique ou polyphasique, la rhéologie, la turbulence, …

L'une de ses plus extraordinaires caractéristiques est qu'il s'agit d'une discipline scientifique permettant d'expliquer, souvent à l'aide d'outils mathématiques complexes, des phénomènes facilement observables comme les tourbillons sur l'eau, la météorologie, …

des **éléments simples de mécanique des fluides** que l'on pourrait enseigner aux plongeurs afin de mieux leur faire **comprendre le fonctionnement des palmes** et la manière de **les utiliser au mieux**.

- **Le second chapitre est consacré à l'étude des écoulements de gaz** (air et trimix) et est appliqué aux cas de **l'essoufflement, de la respiration sous-marine** et de **l'homogénéisation d'un mélange trimix** suite à sa fabrication.
- **Le troisième chapitre porte sur l'étude des écoulements où l'on trouve simultanément du gaz et des liquides** (les écoulements diphasiques). On y abordera, entre autres, la question de la **forme exacte des bulles** à suivre lors de la remontée pour être à la **bonne vitesse**. On cherchera également à savoir s'il est plus facile de remonter en se plaçant dans une colonne de bulles ou à l'extérieur de celle-ci. Enfin, un paragraphe est consacré au comportement des « ronds de bulles » que l'on voit parfois apparaître lors des paliers (parfois très long !!).

Afin de faciliter la compréhension des éléments présentés dans ce mémoire je me suis attaché à mettre le moins de jargon scientifique possible dans le corps du texte. C'est pourquoi chaque notion propre à la mécanique des fluides et nécessaire à la compréhension est introduite progressivement et est toujours mise en relation avec la question posée.

L'utilisation, parfois à outrance, des notes de bas de page permet, soit de compléter les notions présentées, soit de fournir des éléments supplémentaires (et souvent plus théoriques) au lecteur désirant « aller un peu plus loin ». Ces notes de bas de pages sont précédées de la mention : « *Pros :* » afin d'identifier clairement qu'elles font appel à des notions scientifiques plus solides. Ce choix de présentation permet de contenter aussi bien le plongeur désirant obtenir les réponses à ses questions, que le scientifique qui pourrait s'interroger sur certaines approximations faites dans le corps du texte[4].

Ce mémoire présente une vision des solutions aux problèmes posés. Il est donc possible que des erreurs d'interprétation, des approximations abusives ou des erreurs de typographie s'y soient glissées. Que le lecteur les découvrant n'hésite pas à m'en faire part afin d'en discuter et de les corriger.

J'espère avoir atteint l'objectif fixé tout ayant évité le naufrage sur l'île de la tentation mathématique et ce, malgré le chant des sirènes Navier-Stockes et Bernoulli.

Enfin, il faut préciser la chose suivante : malgré les réactions très différentes obtenues à l'énoncé du sujet de ce mémoire, chaque interlocuteur avait ensuite la même demande : pouvoir obtenir, une fois finalisé, une copie du mémoire afin de mieux comprendre comment fonctionne une palme ou comment quelles sont exactement les bulles à suivre à la remontée ! J'espère que ces lecteurs ne seront pas déçus à la suite de leur lecture, que leurs craintes auront été apaisées et que leur soif de connaissances aura été, au moins en partie, étanchée.

[4] Ces approximations, ou raccourcis, ont été utilisé afin de faciliter la compréhension du lecteur.

2. DEFINITIONS ET ABREVIATIONS.

Aéraulique	Partie de la mécanique des fluides qui étudie l'écoulement de l'air, des gaz dans les conduits.
Aérodynamique	Partie de la mécanique des fluides qui traite des phénomènes liés au mouvement relatif des solides par rapport à l'air ou à des gaz.
Hydraulique	Partie de la mécanique des fluides qui étudie l'écoulement de l'eau, des liquides.
Hydrodynamique	Partie de la mécanique des fluides qui traite des phénomènes liés au mouvement relatif des solides par rapport à l'eau ou aux liquides.
Impulsion	Variation de la quantité de mouvement d'un corps suite à l'application d'une force donnée durant un temps donné.
Maître-couple	Surface d'un corps qui s'oppose à l'écoulement d'un fluide.
Quantité de mouvement	Produit de la masse et de la vitesse d'un corps. Cette grandeur caractérise l'état de mouvement d'un corps par rapport à un référentiel.
Rendement Propulsif	Rapport entre l'effort produit par le nageur et le déplacement réellement obtenu. De manière plus scientifique on peut définir ce rendement comme le rapport entre l'énergie cinétique ($=\frac{1}{2}mV^2$) du nageur et l'énergie dépensée dans le but de se déplacer.

INDEX DE NOTATION.

Symbole	Définition	Unité
$\dot{m}$	Débit massique	kg/s
$\mathbf{d_e}$	Diamètre équivalent d'une bulle	mm
F	Force	N
m	Masse	kg
$\boldsymbol{\rho}$	Masse volumique	kg/m^3
p	Quantité de mouvement	kg.m/s = N.s
t	Temps	s
$\boldsymbol{\nu}$	Viscosité cinématique	m^2/s
$\boldsymbol{\eta}$	Viscosité dynamique	$N.s/m^2$ = Pa.s
V	Vitesse	m/s

3. ETUDE TECHNIQUE DES PALMES ET DE LEUR UTILISATION

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[5] 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 l'augmentation du rendement propulsif permet :

- D'être capable de réagir efficacement à une situation particulière (courant, assistance d'un plongeur en difficulté, …).
- De diminuer le risque d'essoufflement compte-tenu de la masse importante du matériel à transporter sous l'eau, ce qui permet d'augmenter la sécurité durant la plongée.
- De diminuer la consommation d'air pour effectuer un trajet donné sous l'eau. Cela permet de rester plus longtemps sous l'eau pour profiter du spectacle.

On comprend alors mieux l'importance que revêt cet élément de matériel qui devient par conséquence un élément de sécurité.

Néanmoins, ce matériel, aussi performant soit-il, peut se révéler inefficace s'il est mal utilisé. L'un des objectifs de la formation des plongeurs est donc d'apprendre à en tirer le meilleur parti. Dit autrement, **on apprend aux plongeurs à maximiser leur rendement propulsif en utilisant de manière adéquate leurs palmes**.

Parallèlement à cette formation les constructeurs cherchent également à créer un matériel ayant le rendement propulsif le meilleur qui soit car, une palme permettant de nager vite et de manière puissante **sans se fatiguer** serait promise à un beau succès commercial. C'est pourquoi le marché des palmes de plongée-sous-marine présente une offre diversifiée, chaque fabriquant y allant de sa petite touche d'innovation sur le dessin des palmes. Le revers de la médaille est qu'il est difficile de comprendre l'impact réel de ces différences sur le rendement propulsif. Ceci est l'un des points abordés dans le présent mémoire.

Dans le cadre de la rédaction du présent mémoire nous avons procédé à un test simple auprès de moniteurs de différents niveaux (du E1 au E4 ou équivalent) et appartenant à différentes organisations (FFESSM, PADI, TDI et IANTD). **Nous leur avons posé la question suivante : « Comment une palme fonctionne t'elle ? »**. Le but était de regarder si les **encadrants** connaissaient les principes de fonctionnement des palmes comme cela est le cas pour d'autres éléments de matériel comme le détendeur ou l'ordinateur de plongée. Notre objectif n'était pas de faire une analyse statistique[6] des réponses et nous ne les avons donc pas comptabilisé. Les types de réponses obtenus ont été les suivants :

- Certains encadrants répondent : « on n'a pas besoin de savoir comment ça marche pour savoir palmer ». Si l'on souhaite uniquement se servir des palmes, cette réponse est tout à fait justifiée. En revanche, s'il s'agit d'utiliser au mieux des palmes (i.e. : tirer le meilleur profit de ces palmes en se fatiguant le moins possible) alors cette réponse est plus discutable[7]. De plus, cette réponse ne permet pas au plongeur de comprendre les différences entre les palmes, ni les évolutions de ce matériel, ni même de pouvoir choisir la palme qui lui convient le mieux. Enfin, d'un point de vue pédagogique, ce type de réponse n'est pas satisfaisante.
- Certains répondent que c'est parce que la surface de la palme est plus grande que celle des pieds et des mains et que cela permet de prendre plus d'appui sur l'eau. Cela est vrai mais incomplet. En effet, cette explication ne permet toujours pas de comprendre les évolutions que

[5] Rapport entre l'effort produit par le nageur et le déplacement réellement obtenu. Voir §2 pour une définition plus scientifique. On peut assimiler cela à l'efficacité d'une palme.

[6] Même si, a posteriori, nous nous sommes dit que cela aurait été intéressant afin de quantifier les lacunes dans ce domaine.

[7] On peut imaginer cette même réponse mais appliquée au gilet stabilisateur, au détendeur ou à l'ordinateur de plongée. Ne pas comprendre comment fonctionne un ordinateur de plongée n'empêche pas de plonger avec (il suffit de suivre ses indications « à l'aveugle ») mais il faut reconnaître que la connaissance de ses principes de fonctionnement facilite grandement une utilisation optimale.

subit actuellement ce matériel. Pourquoi le fait de faire un trou dans la voilure (ex. : tuyères ou palmes fendues) permettrait de mieux avancer ? **Cela est contraire à l'explication donnée**.

- Une minorité répond que c'est l'application simple d'un vieux principe physique plus connu sous le nom de 'conservation de la quantité de mouvement'. Cette réponse est correcte au niveau scientifique mais n'est pas très pédagogique et ne permet toujours pas de comprendre les différences entre les types de palmes.
- Enfin, quelques personnes (2 sur une trentaine) ont pu expliquer, de manière plus ou moins claire et en moins de 5 minutes, les principes généraux de fonctionnement d'une palme et d'expliquer simplement quelques différences entre les palmes.

Ce test anodin nous as permis de constater les **lacunes importantes** existantes dans la formation des plongeurs quant à l'utilisation des palmes et ce, à tous les niveaux et dans toutes les organisations citées ci-dessus. Visiblement, très peu de personnes comprennent les principes de fonctionnement des palmes.

Nous allons donc tenter, dans le paragraphe 3.2, de remédier à ces lacunes en expliquant les principes généraux permettant aux palmes de **faire avancer plus vite** et **de manière plus puissante**. Ces explications s'appuieront sur des rappels de physique puis sur l'application de ces rappels afin de :

1. Comprendre comment un nageur peut se déplacer dans l'eau (§3.2).
2. Identifier les éléments contrôlant sa vitesse et la puissance de sa nage.
3. Identifier les contraintes de propulsion spécifiques au plongeur par rapport au nageur.

Nous introduirons ensuite les notions de forces de portance, de traînée et de force propulsive puis, en appliquant ces notions dans le cas d'un palmage « académique », **nous verrons comment une palme permet d'augmenter la vitesse, la puissance et le rendement propulsif** de la nage.

Lorsque ces principes de fonctionnement auront été assimilés, nous étudierons (cf. §3.4) les différents types de palmes existant actuellement sur le marché français. Un paragraphe particulier (cf. §3.5) sera consacré à l'étude des nouveaux types de palmes (apparus depuis environ 2 à 3 ans en France) où la voilure est fendue. Enfin, nous regarderons en quoi ces évolutions pourraient induire des **modifications dans l'enseignement du palmage** mais également dans le **comportement général des plongeurs** actuels et futurs.

3.2. RAPPELS : SE DEPLACER DANS L'EAU

3.2.1. Rappels de physique.

Le principe général permettant de comprendre le déplacement d'un corps dans l'eau est la conservation de la quantité de mouvement. La quantité de mouvement d'un corps est le produit de sa masse par sa vitesse. C'est une grandeur vectorielle, sa direction et son sens étant ceux du déplacement. Elle caractérise l'état de mouvement par rapport à un référentiel. On l'écrit :

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

L'unité de la quantité de mouvement est le kg.m/s ou encore le N.s.

Pour comprendre les principes physiques mis en œuvre lors d'un déplacement nous avons besoin des 3 lois de Newton :

- La première loi de Newton (appelée également : principe d'inertie) nous apprend qu'un corps sur lequel ne s'applique aucune force, ne modifie pas sa quantité de mouvement. **Autrement dit, sans l'action d'une force, la vitesse d'un corps ne peut évoluer et doit donc rester constante**.
- La seconde loi de Newton (appelée également principe d'action ou principe fondamental de la dynamique) nous indique que la variation de quantité de mouvement d'un corps est égale au produit de la somme des forces s'exerçant sur ce corps, et du temps durant lequel celles-ci restent appliquées[8]. **Autrement dit, pour faire varier la quantité de mouvement d'un corps il faut lui appliquer une force pendant un certain temps**. Plus le temps, ou la force, sont important et plus cette variation de quantité de mouvement sera grande. Réciproquement, une variation de quantité de mouvement d'un corps sur une durée provoque l'apparition d'une

[8] *Pros :* On peut exprimer cela par la relation mathématique suivante : $\Delta\vec{p} = \vec{F}.\Delta t$.

force. Plus cette variation de quantité de mouvement est importante ou plus le temps est bref, plus cette force sera grande.

- La troisième loi de Newton (également appelée principe d'action-réaction) rend compte du fait qu'à toute force $\vec{F}$ s'appliquant sur un corps correspond une seconde force ($-\vec{F}$), de même intensité mais de sens opposé, s'appliquant à un autre corps (*ndla* : celui sur lequel le premier corps prend appui). **Autrement dit, lorsqu'un corps A applique une force à un support B, le corps A reçoit, de la part de B, une force de même intensité mais appliquée dans le sens contraire.**

Appliquons ces lois au cas d'un nageur. Pour se propulser, celui-ci doit appliquer une force sur l'eau (i.e. : le support) qu'il orientera vers l'arrière à l'aide de ses mains et pieds. Il reçoit alors, par réaction, une force de même intensité mais orientée vers l'avant, **ce qui le fait avancer**. La vitesse acquise est proportionnelle à l'intensité de la force et au temps pendant lequel elle est exercée, et inversement proportionnelle à sa propre masse. Ceci est schématisé sur la figure suivante :

Figure 3.1 : Schématisation du principe d'action-réaction dans le cas d'un nageur (extrait du cours 'Techniques de nage' de J.M. Oyhenart).

3.2.2. Vitesse maximale théorique de déplacement d'un nageur dans l'eau.

Cette vitesse sera atteinte s'il n'y a ni frottement ni perte d'énergie lors cette impulsion. Dans ce cas, l'impulsion transmise au support est intégralement renvoyée au nageur[9]. Par hypothèse nous nous plaçons donc dans ce cas.

Cette vitesse est alors la suivante[10] :

$$\vec{V}_{Max_nageur} = -\frac{m_{eau_éjectée}}{m_{nageur}} \vec{V}_{eau_éjectée}$$

Équation 3.1 : Vitesse maximale théorique d'un nageur.

On peut donc dire que, en l'absence de frottement, la vitesse de déplacement d'un nageur, après avoir pris une impulsion sur l'eau, est proportionnelle :

- **au rapport entre la masse d'eau éjectée et celle du nageur,**
- **à la vitesse à laquelle cette masse d'eau est éjectée.**

Cette relation est la même dans le cas d'un plongeur avec son équipement. Nous pouvons néanmoins faire les remarques suivantes à partir de cette expression :

- **La différence de masse entre un nageur et un plongeur est assez importante**. En effet, la masse du matériel de plongée est supérieure à une vingtaine de kilogrammes[11] soit, pour une personne pesant 80kg, environ ¼ de sa masse. On voit donc que, pour une impulsion équivalente (i.e. : une masse et une vitesse d'eau éjectée équivalente), la vitesse maximale d'un plongeur par rapport à celle d'un nageur sera d'environ 25% inférieure. Réciproquement, si un

[9] Le rendement propulsif est alors de 100%.

[10] Pros : Car la somme des quantités de mouvement du plongeur et du support (l'eau éjectée lors de l'impulsion), prises avant et après impulsion sont égales.

[11] On compte environ : 2kg pour la combinaison, 15kg pour un bloc, 2kg pour les 2 détendeurs, 1kg pour PMT et 2kg de lestage.

plongeur souhaite atteindre la même vitesse qu'il aurait en nageant sans son matériel, alors celui-ci devra produire un effort supérieur d'environ 25%.

- La masse d'un plongeur étant donnée par des paramètres relativement fixes (masse de la personne, masse du matériel de plongée, lestage), il est très difficile de jouer dessus pour augmenter la vitesse maximale théorique du plongeur. Il va donc falloir, pour cela, jouer **soit sur la masse d'eau éjectée, soit sur la vitesse d'éjection** de cette quantité d'eau.
- Etant donné que l'eau créé une force de frottement lors du déplacement du plongeur, cette vitesse maximale ne sera, en pratique, jamais atteinte par le plongeur.

3.2.3. Poussée provoquée par un nageur

L'autre paramètre important avec la vitesse de déplacement est la puissance de nage qui est, en réalité, la force de poussée que peut développer le nageur lors d'une impulsion. **Ce paramètre est important car c'est lui qui, par exemple, permettra à un plongeur de porter assistance à un coéquipier (ex. : sauvetage palmes) ou bien de résister à un courant**.

Un traitement mathématique (cf. [11], p.78) basé sur le principe fondamental de la dynamique (2nd loi de Newton) nous apprend que la force de poussée est proportionnelle au produit de la quantité d'eau éjectée par unité de temps[12] et de la vitesse d'éjection de l'eau. On a donc :

$$F_{poussée} = \dot{m}_{eau_éjectée} V_{Ejection}$$

$$Avec : \dot{m}_{eau_éjectée} = \frac{m_{eau_éjectée}}{t_{éjection}}$$

On voit alors que pour augmenter cette force de poussée il faut, soit augmenter la vitesse d'éjection de l'eau derrière le nageur, soit augmenter la quantité d'eau éjectée **par unité de temps**, c'est-à-dire le débit massique d'eau éjectée. On peut remarquer que cette poussée ne dépend pas de la masse du nageur.

Donc, pour une masse d'eau et une vitesse d'éjection donnée, **la vitesse du nageur est seulement fonction de sa masse, alors que la poussée créée dépend du temps mis pour éjecter cette quantité d'eau**. Plus ce temps est bref, plus la poussée est forte. **A quantité et vitesse d'eau éjectée égale, un mouvement bref provoque donc une poussée supérieure au même mouvement réalisé plus lentement[13].**

3.2.4. Liens entre vitesse, poussée et rendement propulsif

D'après la 1ère loi de Newton on peut dire que l'apparition de la force de poussée va modifier la quantité de mouvement du nageur. La masse du nageur étant constante cela se traduit par une augmentation de sa vitesse, proportionnelle à cette variation temporelle de quantité de mouvement et inversement proportionnelle à sa propre masse. Plus la poussée créée est importante, et la masse du nageur faible, et plus la vitesse de nage sera grande. **C'est donc bien l'apparition de la force de poussée qui modifie la vitesse de nage**.

Le rendement propulsif est en fait le rapport entre la force de poussée obtenue (i.e. : celle qui servira à augmenter la vitesse de nage), et celle réellement développée par le nageur. Ce rendement représente donc le pourcentage de la force produite par le nageur et se retrouvant réellement sous forme de poussée. **Il s'agit donc d'un paramètre propre au mode de propulsion choisit par le nageur**. Par exemple, on sait très bien que l'on créé une poussée plus importante en nageant la brasse par rapport à une nage style « petit chien ». C'est-à-dire que pour le même effort produit par le nageur (i.e. : la même quantité d'énergie dépensée), la brasse permettra de créer une poussée plus forte. Le rendement propulsif de la brasse est donc, dans ce cas, supérieur à celui de la nage type « petit chien »[14].

3.2.5. Besoins spécifiques de la propulsion d'un plongeur

Nous avons jusqu'à présent étudié le cas de la propulsion d'un nageur. Les relations établies pour un nageur sont également valables pour un plongeur. Néanmoins, un nageur se déplace dans l'eau par action des bras et, dans

[12] Ce que l'on appelle un débit massique, qui s'exprime en kg/s et que l'on note $\dot{m}$ (m avec un point au-dessus).

[13] *Pros :* Physiquement cela est dû au fait que c'est l'accélération qui provoque l'apparition d'une force. Plus l'accélération du fluide est forte et plus la force créée est importante.

[14] On peut également comparer cela au rendement propulsif d'une roue à aubes ou d'une hélice. Même si le moteur développe la même puissance on sait qu'un bateau à hélice avancera plus vite qu'un bateau avec des roues à aubes.

une moindre mesure, des pieds. Nous allons montrer, en détaillant les besoins spécifiques de déplacement d'un plongeur, que le mode de déplacement d'un nageur n'est pas applicable au domaine de la plongée-sous-marine. Les besoins spécifiques sont les suivants :

- Le plongeur doit pouvoir porter assistance à un coéquipier ce qui nécessite l'utilisation des mains. Celles-ci doivent donc rester libres et disponibles en permanence ce qui interdit leur utilisation pour la propulsion Seules les jambes peuvent donc jouer ce rôle. Or, un nageur avance principalement avec ses bras. Le plongeur doit donc utiliser un équipement supplémentaire pour combler ce besoin.
- De plus, pour être en mesure de venir en aide à un coéquipier (sauvetage, aller rapidement vers ce coéquipier pour lui porter assistance, …) le plongeur doit, en terme de déplacement, avoir de 'la réserve sous le pied'.
- Un plongeur respire de l'air sous pression. L'énergie dépensée pour respirer augmente donc avec la profondeur (cf. §4.1 et 4.3 sur les pertes de charge et l'essoufflement). Afin d'éviter l'essoufflement il doit limiter l'énergie dépensée pour se déplacer. Cela nécessite d'utiliser un moyen de déplacement avec un rendement propulsif élevé.
- Le port du matériel de plongée (bouteille en particulier) modifie l'équilibre spatial du plongeur. La position d'équilibre la plus stable est celle où la bouteille serait située en dessous du plongeur. Pour des raisons pratiques et ergonomiques cette solution n'est pas viable et le plongeur positionne donc son bloc sur le dos, ce qui n'est pas une position stable. Afin de minimiser l'énergie dépensée pour conserver cette position d'équilibre, le plongeur doit utiliser, au niveau des pieds, des éléments stabilisateurs.

L'ensemble des ces contraintes ont conduit les plongeurs à trouver un autre moyen de propulsion que celui utilisé par les nageurs. Historiquement, le moyen choisi a été un appendice, de sexe féminin, nommé 'palme' que l'on enfile au bout du pied.

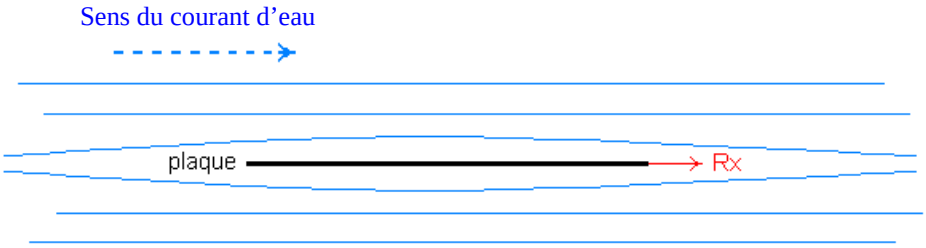
Pour conclure, on peut dire que les éléments théoriques vu dans les paragraphes précédents nous permettent de comprendre comment on peut se déplacer dans l'eau. On comprend également comment il est possible d'augmenter la vitesse et la puissance de la nage. En revanche, ils ne nous permettent pas de comprendre comment une palme permet d'augmenter ces deux paramètres. Or, ceci n'est pas évident car comment un appendice que l'on agite de haut en bas peut nous permettre d'avancer plus vite et de développer une puissance de nage supérieure ? C'est ce que nous allons voir dans les paragraphes suivants.

3.3. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT D'UNE PALME

3.3.1. 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 créé une force**. A contrario, 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.

Lorsque qu'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[15]. Nous pouvons mettre cela en évidence avec le schéma suivant :



[15] 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.

Figure 3.2 : 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 Rx sur le shéma) est appelée la force de traînée.

Si on incline la plaque d'un angle α 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[16] (notée Rz sur le schéma ci-dessous).

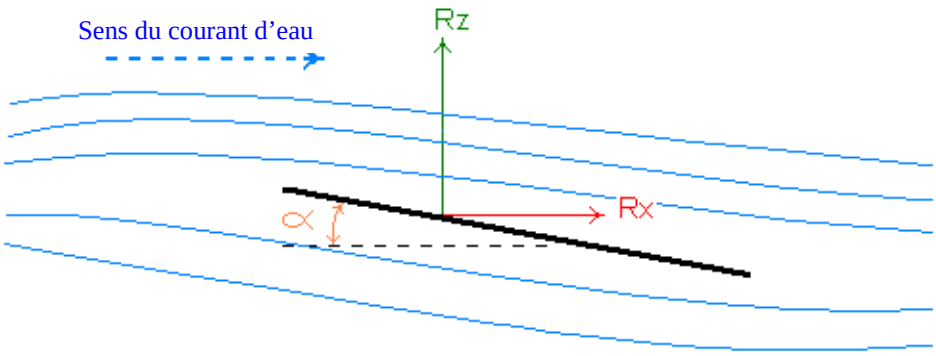


Figure 3.3 : Mise en évidence de la portance et de la traînée (extrait du site http://pou.guide.free.fr)

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 :

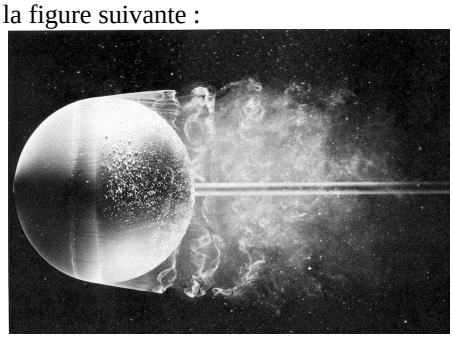


Figure 3.4 : Visualisation de la turbulence derrière un objet (extrait de *An album of Fluid Motion* de M. Van Dyke)

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

[16] 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 …

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 se 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 créé des vagues qui tapent sur diverses parties du plongeur ce qui le ralentis. 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 :

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

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

Avec :

- ✓ Cx et Cz : coefficient de portance et de traînée.
- ✓ ρ_{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 Cx et Cz. Des expérimentations montrent que ces coefficients varient, pour un corps donné, en fonction de l'angle d'inclinaison α. Cette variation est mise en évidence sur le schéma suivant dans le cas d'une aile d'avion :

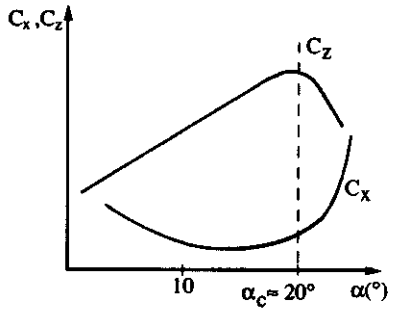


Figure 3.5 : Evolution des coefficients Cx et Cz, pour une aile d'avion, en fonction de l'angle d'inclinaison α (extrait de [6])

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° dans notre exemple). Si α 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 :

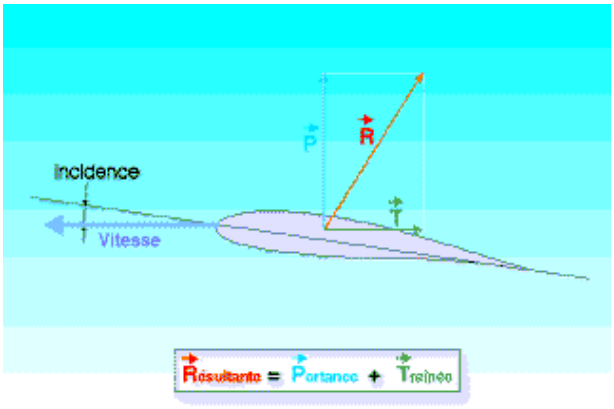


Figure 3.6 : Résultante de la portance et de la traînée (extrait du site http://www.onera.fr)

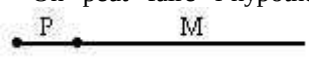
On voit alors que cette force est dirigée vers l'arrière ce qui permet d'éjecter, vers l'arrière et vers le haut, une quantité d'eau donnée. Plus cette force est importante et plus la quantité d'eau éjectée est grande. Par réaction, l'eau exercera une force, de même intensité et de sens opposé, sur la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

3.3.2. Application au mouvement d'une palme

Voyons maintenant comment cela s'applique au cas du mouvement simplifié[17] d'une palme[18]. 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 voilure 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 3.7 :

N°	Désignation	Description de la phase
❶	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.
❷	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

[17] Simplifié = il s'agit d'un palmage où l'on ne retient que les éléments essentiels.

[18] 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.

		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).
❸	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[19]. 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 devient nulle lorsque le pied et la voilure sont alignés.

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[20] :

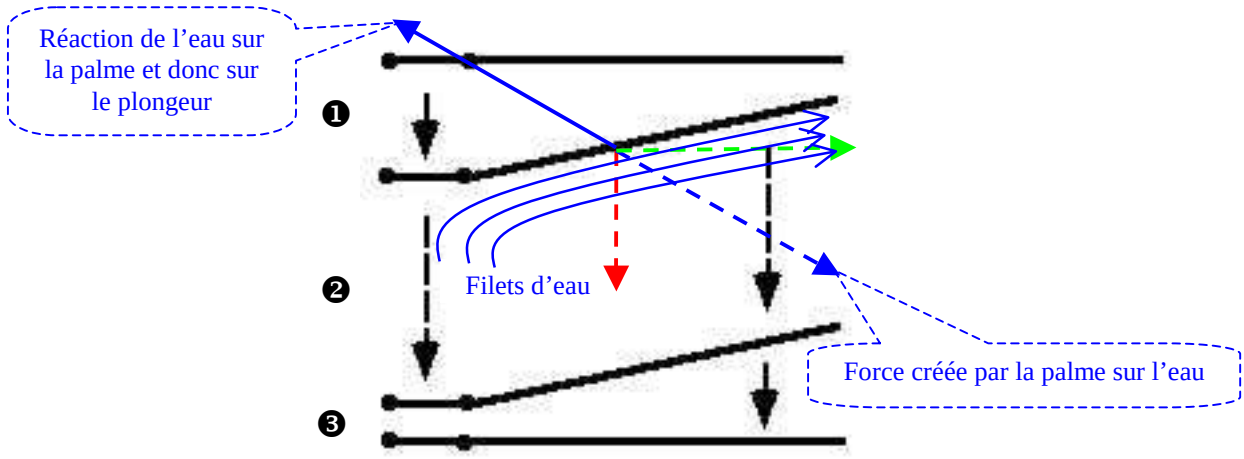


Figure 3.7 : Apparition de la force propulsive sur une palme lors de la phase de descente (schéma extrait de http://www.nageavecpalmes-ffessm.com et modifié par l'auteur).

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 3.8 :

N°	Désignation	Description de la phase
❹	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 voilure commence par changer son orientation. Dans cette phase, la voilure 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.
❺	Remontée de la voilure	L'angle entre la voilure 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.

[19] 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 voilure de terminer sa course. La voilure stoppe alors son mouvement descendant ce qui fait disparaître la force propulsive. On retrouve également ce phénomène en fin de remontée.

[20] *Pros* : Sur cette figure, l'écoulement d'eau le long de la palme est, compte-tenu de son mouvement, perpendiculaire à la voilure et non parallèle comme présenté dans les schémas du paragraphe 3.3.1. Cela entraîne que la force de portance (en vert) est horizontale, et les forces de traînée (en rouge) verticales vers le bas.

		La voilure se déplaçant par rapport à l'eau, on créé une force propulsive. En général, l'angle entre la voilure 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 descente de la voilure.
❻	Fin de la remontée	Lorsque le pied stoppe son mouvement ascendant la voilure continue le sien (à cause de son élasticité) jusqu'à être alignée avec le pied. 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 force propulsive qui, lorsque le pied et la voilure sont alignés devient nulle.

Ces phases sont représentées sur le schéma suivant :

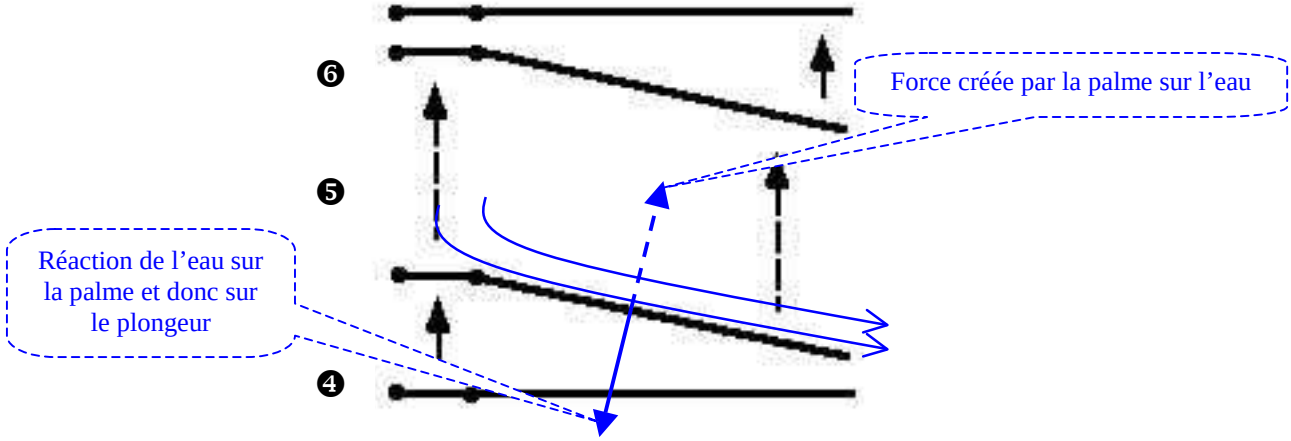


Figure 3.8 : Apparition de la force propulsive sur une palme lors de la phase de remontée (schéma extrait du site http://www.nageavecpalmes-ffessm.com et modifié par l'auteur).

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 voilure (cf. §3.3.1). En pratique, il y a 2 possibilités pour faire cela :

1. Rendre la voilure 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 voilure d'une palme et est contrôlé, entre autres, par les propriétés élastiques (ou plastiques) des matériaux de la palme, l'épaisseur de la voilure ou la présence éventuelle d'éléments comme des durcisseurs dans la voilure. 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 voilure.
2. Modifier le design de la palme pour que la voilure se place d'elle-même à l'angle le plus intéressant. Cet élément sera présenté dans le paragraphe 3.4.

Néanmoins, malgré tous les efforts pour rendre la force propulsive parfaitement horizontale[21], 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%.**

[21] Ce qui amènerait le rendement propulsif de la palme à une valeur proche de 100%.

3.3.3. Utilisation de deux palmes

Les plongeurs utilisent en général une palme à chaque pied. Leur mouvement est alternatif et symétrique de haut en bas. C'est peut-être un détail pour vous mais pour moi ça veut dire beaucoup !

En effet, nous avons vu au paragraphe précédent que la force propulsive comportait une composante verticale (i.e. : la résultante des forces de traînéee) vers le haut ou le bas selon la phase de palmage. Donc, lorsqu'on palme, on devrait avoir tendance à remonter ou à descendre selon la phase de palmage.

L'utilisation des 2 palmes de manière alternative et symétrique permet d'annuler cet effet puisque lorsqu'une palme, dans sa phase de descente, produit une force verticale vers le haut, l'autre palme, dans sa phase montante, créé une force verticale vers le bas et d'intensité comparable[22].

Ceci est mis en évidence sur le schéma suivant où l'on peut voir que la somme des composantes verticales des flèches verte et orange s'annulent mutuellement :

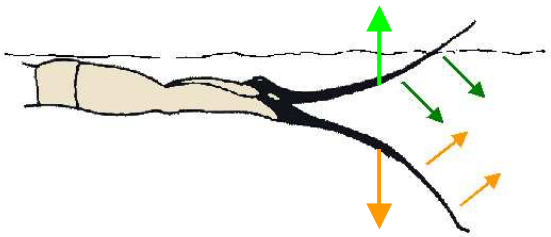


Figure 3.9 : Annulation de la composante verticale de la force propulsive lors d'un palmage classique (extrait du cours 'Techniques de nage' de J.M. Oyhenart)

En conclusion de cette partie on peut dire que :

- La vitesse d'un nageur est proportionnelle à la masse et à la vitesse de l'eau éjectée dans le sens opposé au déplacement. Elle est également inversement proportionnelle à la masse du nageur.
- La puissance de nage est proportionnelle à la quantité d'eau éjectée et à la vitesse d'éjection de cette quantité d'eau. Elle est également inversement proportionnelle au temps mis pour éjecter cette quantité d'eau.
- Une palme permet d'augmenter la vitesse et la puissance de la nage car elle augmente la vitesse et la masse d'eau éjectée.
- La palme permet d'augmenter ces deux facteurs car elle permet de créer une force propulsive (résultante de la portance et des forces de traînée) plus grande.
- La force propulsive augmente si on augmente la portance et si l'on diminue les forces de traînée.

[22] Lorsqu'on utilise une monopalme cette composante ne s'annule pas. Néanmoins, les voilures de monopalme sont en général beaucoup plus souple et se courbe donc plus que les palmes classiques de plongée. Cela entraîne une diminution de cette composante verticale. Lorsqu'on regarde les nageurs avec palmes nager en monopalme on constate néanmoins qu'ils ondulent beaucoup plus l'ensemble du corps. La compensation de la composante verticale qui apparaît au niveau des pieds se fait donc avec le reste du corps et non avec la seconde palme.

3.4. ANALYSE TECHNIQUE DE DIFFERENTES CARACTERISTIQUES DE PALMES

Le but de ce paragraphe est d'appliquer les principes décrits dans le paragraphe précédent afin de comprendre les différences entre les différents types de palmes actuellement sur le marché.

Le marché français se compose actuellement des types de palmes suivants :

Type de palme	Principales caractéristiques techniques	Exemple
Palmes à voilure courte	Longueur de la voilure : < 30cm. Surface propulsive : < 700cm^2. Remarques particulières : Voilure très courte.	
Palmes à voilure moyenne	Longueur de la voilure : ~35cm. Surface propulsive : ~750cm^2. Remarques particulières : Aucune.	
Palmes à voilure longue	Longueur de la voilure : > 45 cm. Surface propulsive : > 900cm^2. Remarques particulières : Aucune.	
Palmes avec tuyères	Longueur de la voilure : ~30cm. Surface propulsive : <700cm^2. Remarques particulières : Présence de tuyères à la base de la voilure (près du pied). La voilure est souvent réalisée dans un matériau assez rigide (ex. : caoutchouc).	

Palmes avec canaux	Longueur de la voilure : ~45cm. Surface propulsive : ~ Remarques particulières : Présence de canaux orientés dans le sens de l'écoulement d'eau sur la voilure.	
Palmes fendues	Longueur de la voilure : Comparable à celle des voilures moyennes. Surface propulsive : Idem. Remarques particulières : Une partie de la voilure est fendue en son milieu. La voilure est souvent réalisée dans un matériau assez souple.	
Palmes « complexes »	Longueur de la voilure : ~40cm. Surface propulsive : ~750cm^2. Remarques particulières : Présence de plusieurs des caractéristiques cités précédemment dans ce tableau et/ou de caractéristiques particulières.	

Tableau 1 : Classification et caractéristiques des différents types de palmes (photos extraites des sites Internet des différentes marques)

A partir de ce tableau on peut mettre en évidence les éléments caractérisants les différences entre les palmes existantes sur le marché actuel :

- Surface de la voilure.
- Présence de canaux sur la voilure.
- Présence de tuyères en début de voilure.
- Forme de bout de voilure.
- Angle d'inclinaison de la voilure avec l'axe du pied.
- Voilure fendue en son milieu.

L'objectif technique des constructeurs est toujours le même : **augmenter, pour un type de palmage donné, le rendement propulsif des palmes**. Or, nous avons vu dans les paragraphes précédents que cela devait se traduire par une augmentation de la portance et une diminution des forces de traînée. Nous allons donc analyser maintenant comment ces différentes caractéristiques techniques permettent de remplir ce double objectif.

3.4.1. Influence de la surface de la voilure

Nous avons vu au paragraphe 3.3.1 que les forces de portance et de traînée sont directement proportionnelles à la surface de la voilure. Toutes choses étant égales par ailleurs, une palme avec une surface de voilure plus grande éjectera une quantité d'eau plus importante, augmentant ainsi la vitesse de nage ainsi que sa puissance.

L'augmentation de surface de voilure va souvent de paire avec l'augmentation de sa longueur. C'est pourquoi les palmes longues permettent, pour peu qu'on les utilise avec la palmage adéquat, d'avancer plus vite et de manière plus puissante que des palmes plus courtes.

Néanmoins, un moyen d'augmenter la surface de la voilure, **sans pour autant augmenter sa longueur**, a été étudié (par Cressi-Sub en particulier). Ce fabriquant a mis dans le même alignement, et au même niveau, le dessus du chausson et la voilure, ce qui permet d'intégrer cette surface à celle de la voilure. Ceci est une bonne idée mais ne peut fonctionner que si le pied est orienté dans le prolongement de la jambe (i.e. : pointe des pieds tendue) ce qui créé alors de la portance. Dans le cas contraire (i.e. : axe du pied perpendiculaire à celui de la jambe) on créé plus de traînée que de portance ce qui fait chuter le rendement propulsif de la palme. **L'effet recherché est donc fortement dépendant du type de palmage créé par le plongeur**.

3.4.2. Présence de canaux sur la voilure

La présence de canaux sur la voilure de la palme vise à limiter la quantité d'eau contournant la palme afin de canaliser celle-ci pour l'éjecter vers l'arrière.

En effet, si on utilise un surface totalement lisse, une partie de l'eau mise en mouvement d'un coté de la palme contourne la voilure pour passer de l'autre coté de la palme, diminuant d'autant la quantité d'eau éjectée vers l'arrière et donc la poussée créée par la palme. **C'est parce que la pression de l'eau de part et d'autre de la palme n'est pas la même**. Lorsque la palme descend, la pression sur la face de la voilure orientée vers le bas (extrados) est supérieure à celle sur la face supérieure (intrados). Une partie de l'eau située coté extrados (là où la pression est la plus forte) cherche donc à venir combler le «vide » existant coté intrados (là où la pression est la plus basse). Le chemin le plus facile pour l'eau est de passer sur les cotés de la palme (on voit alors apparaître 2 tourbillons sur les cotés de la palme). Ceci est schématisé sur le dessin suivant :

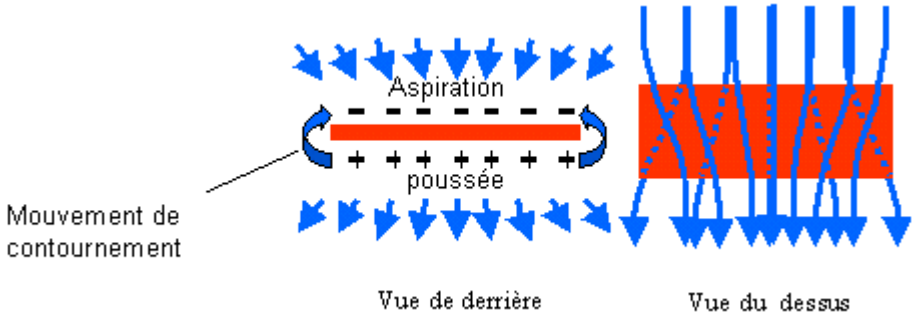


Figure 3.10 : Mise en évidence du contournement de la palme par l'eau et de l'apparition des tourbillons de bout de palme (extrait du site Internet http://www.onera.fr)

Ces tourbillons constituent des zones de basses pressions qui créent, sur la surface de la palme, une force tendant à s'opposer au mouvement de celle-ci. Ces tourbillons[23] augmentent donc la traînée de pression (ou de forme) (cf. §3.3.1) **ce qui diminue le rendement propulsif de la palme**.

[23] *Pros :* Ces tourbillons apparaissent également en bout d'aile d'avion comme on peut le voir sur la photo suivante (extrait du site Internet http://www.onera.fr) obtenue par catapultage d'une maquette d'avion au travers d'un panache de fumée (la maquette se déplace vers l'arrière de la figure) :

La présence de canaux orientés dans l'axe de la palme permet de **s'opposer à ce mouvement naturel** de contournement de la voilure lors du palmage et d'augmenter la quantité d'eau éjectée vers l'arrière en canalisant celle-ci. **On diminue donc la traînée de pression générée par le mouvement de la palme ce qui permet d'augmenter son rendement propulsif**.

La présence de nervure sur la surface de la voilure (ex. : palmes Dessault©) vise le même objectif.

Sur la majorité des palmes on voit également des rebords sur les cotés de la voilure qui sont utilisés pour :

- Constituer une barrière supplémentaire à ce mouvement naturel de l'eau qui diminue la propulsion.
- Contrôler la déformation de la palme afin d'éviter à la voilure de dépasser l'angle critique au-delà duquel la portance chute grandement.
- Diminuer le temps de réponse élastique de la voilure afin de diminuer le temps non propulsif observé en fin de mouvement (ascendant et descendant) de voilure.
- Servir de stabilisateur à la palme pour éviter son dérapage lorsque la cheville n'est pas parfaitement horizontale.

3.4.3. Influence de la forme de bout de voilure

La forme de la partie de voilure la plus éloignée du pied semble être un élément tout à fait insignifiant. Pourtant, lorsqu'on regarde les différents types de palmes on constate que cette forme est très variable et va de la forme rectangulaire et anguleuse à une forme d'ellipse vers l'intérieur ou l'extérieur. **C'est donc bien un paramètre pris en compte par les fabricants dans l'optimisation du rendement propulsif d'une palme.**

D'un point de vue hydrodynamique cette forme va jouer sur les tourbillons générés en bout de palme (les mêmes que ceux du paragraphe précédent), **et donc sur la traînée de pression** (cf. §3.3.1). En fonction de la forme de bout de voilure, on génèrera plus ou moins de tourbillons (de taille plus ou moins importante) ce qui augmentera plus ou moins cette force de traînée. Par exemple, des calculs plus poussés montrent qu'une partie anguleuse (i.e. : bout de palme de forme rectangulaire) produit plus de tourbillons qu'une forme arrondie, **un bon compromis étant donné par des formes elliptiques[24].**

Comparé aux autres paramètres décrits dans ce chapitre (surface de la voilure, présence de canaux, …) celui-ci n'est pas prépondérant. Il n'en demeure pas moins que lorsque l'objectif est de maximiser le rendement propulsif d'une palme il a un rôle à jouer. C'est pour cela que ce paramètre est plus particulièrement étudié dans le cas de palmes de compétitions ou de chasse-sous-marine.

3.4.4. Présence de tuyères en début de voilure

On a vu, au paragraphe précédent, que la différence de pression de part et d'autre de la voilure génère l'apparition d'un courant d'eau d'un coté de la voilure vers l'autre, ce qui diminue la force propulsive de la palme[25].

---

[24] Ceci est mis en application dans le domaine des voiles de bateaux. En effet, les grands voiles les plus efficaces ont toujours des formes elliptiques ce qui permet de diminuer leur traînée de pression et donc d'augmenter au maximum la portance qu'elles créent pour faire avancer le bateau.

[25] En diminuant la quantité d'eau éjectée vers l'arrière, c'est-à-dire en augmentant les forces de traînée de la palme au détriment de la portance.

De plus, en raison des propriétés élastiques de la voilure, celle-ci se courbera d'autant plus qu'on s'éloigne du pied. Si l'angle pris par la voilure reste inférieur à l'angle critique, on peut dire que l'extrémité de la palme contribue beaucoup plus à la force propulsive que la partie de la voilure située proche du pied (qui aura tendance à rester dans l'axe du pied). **La portance est donc plutôt créée par l'extrémité de la voilure tandis que les forces de traînée le sont plutôt par la partie de voilure proche du pied**. C'est pourquoi on dit souvent que la première partie de la voilure (celle proche du pied) ne sert pas à la propulsion. Cet effet est d'autant plus important que la voilure est rigide et se déforme peu sur sa longueur. Dans ce cas de figure on observe une diminution notable du rendement propulsif de la palme.

Si on ajoure cette partie « peu propulsive » en y créant des tuyères on ne diminue quasiment pas la portance créée par la palme mais on réduit grandement la force de traînée qu'elle génère. De plus, pour peu qu'on oriente ces tuyères dans l'axe de la palme, celles-ci canaliseront l'eau mis en mouvement par le chausson vers l'arrière, ce qui participera à la propulsion en augmentant la portance. **La présence de tuyères permet donc d'augmenter le rendement propulsif d'une palme en diminuant la force de traînée et en augmentant légèrement la portance créées par la palme.**

En revanche, si la voilure est très souple, les tuyères ne sont pas utiles puisque la partie « non propulsive » de la voilure est alors très réduite. Elles se rencontrent donc principalement sur des palmes rigides, ce qui était le cas lorsque les voilures étaient faites avec des matériaux comme le caoutchouc. Ceci a quasiment disparu de nos jours car les matériaux des voilures ont grandement évolué et lui permettent de se courber sur un maximum de longueur sans casser et sans dépasser l'angle limite où la portance deviendrait très faible, ce qui reste plus efficace que la présence de tuyères.

Ce principe a été popularisé par les palmes Jetfin© et ses descendantes (ex. : palmes Contact de Beuchat©, …) qui étaient bien des palmes courtes et rigides se pliant difficilement.

3.5. DE L'ADAPTATION DU MATERIEL A L'HOMME

3.5.1. Introduction

Depuis 3 à 5 ans environ on a vu apparaître, en France, des palmes avec des conceptions différentes de ce que l'on avait l'habitude de voir. Par exemple, des palmes dont l'axe de la voilure n'est plus aligné avec celui du chausson (de l'ordre de 30°) ont fait leur apparition. Plus étonnant encore, on a vu apparaître des palmes dont la voilure est fendue au milieu !

Pourtant, des ingénieurs (des gens censés réfléchir un minimum), ont « pondu » ce style de palme !!

De plus, certains plongeurs, après avoir essayé ce style de palmes ne jurent plus que par elles. Il faut donc se rendre à l'évidence : **ces nouveaux concepts apportent bien quelque chose à ces utilisateurs**. Sous peine de se voir dépassé par le progrès technique il est donc essentiel de comprendre les principes de fonctionnement de ce type de palmes.

Ces évolutions (que l'on pourrait qualifier de révolutions) correspondent en fait à une tendance nouvelle : **celle d'adapter le matériel à l'homme et non le contraire**.

En effet, lorsqu'un débutant met des palmes pour la première fois on constate que le mouvement de « palmage » qu'il adopte n'est pas le mouvement académique (décrit au §3.3.2). **Le rendement propulsif obtenu est alors assez faible**. Il cherche à retrouver des appuis plantaires, comparables à ceux du terrien marchant sur un sol dur. Une partie importante de sa formation de plongeur consistera à apprendre à palmer correctement[26], c'est-à-dire à modifier son comportement naturel (i.e. : son mouvement naturel de « palmage » qui tient plus du pédalage que du palmage académique) pour faire fonctionner correctement ce nouveau matériel (les palmes dans le cas présent). On est donc bien dans une situation où c'est à l'homme de s'adapter au matériel !

La démarche suivie par ces nouveaux concepts de palme est totalement inverse. On cherche à **concevoir un matériel dont le rendement propulsif optimum est obtenu avec un « palmage » ressemblant plus à celui du débutant** qu'à un palmage académique.

Pour comprendre cela nous allons analyser les principales caractéristiques du palmage d'un débutant. A partir de cette analyse nous déduirons les caractéristiques techniques que doivent avoir des palmes visant à tirer le meilleur parti de ce style de palmage. Enfin, nous verrons comment ces caractéristiques techniques sont appliquées en pratique.

[26] Il faut prendre ici le mot 'correctement' comme 'adapté au fonctionnement optimum de la palme'.

3.5.2. Analyse du « palmage » d'un débutant

Les principales caractéristiques du « palmage » d'un débutant sont :

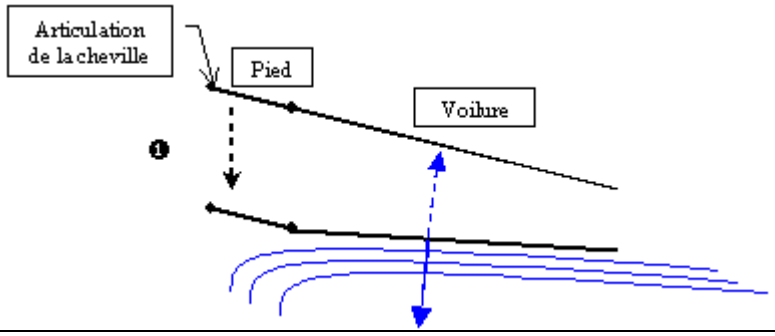
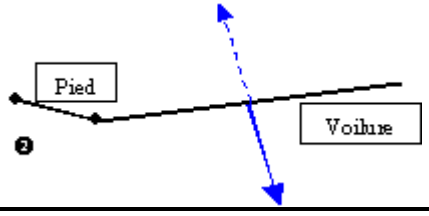
- **La cheville est**, en général, **bloquée dans une direction fixe** (avec un angle de l'ordre de 125° par rapport au tibia). Le débutant cherche, là encore, à reproduire le mouvement de la marche où le pied doit conserver un angle de l'ordre de 90° avec le tibia pour pouvoir se poser à plat sur le sol.
- **Il plie exagérément le genou**. Il tente ainsi de reproduire le mouvement terrestre de la marche où l'on plie le genou pour soulever la jambe pour ensuite déplier le genou afin de poser le pied par terre et prendre l'appui plantaire stable permettant la propulsion.

Ces deux caractéristiques engendrent un mouvement global qui n'est plus un mouvement de battement vertical mais plutôt un mouvement de pédalage horizontal.

Nous allons maintenant reprendre chacune de ces caractéristiques en regardant leurs conséquences en terme de mouvement de la palme et d'apparition de portance et de force de traînée.

3.5.2.1. Blocage de la cheville.

Si le débutant « palme » avec la cheville bloquée cela entraîne que la position de départ de la palme n'est pas horizontale (décrite au paragraphe 3.3.2) mais présente déjà un angle avec la direction du déplacement. Les phases suivantes du palmage sont alors modifiées comme suit :

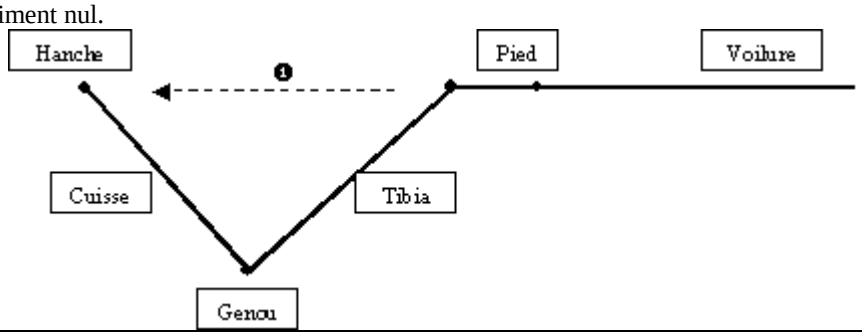
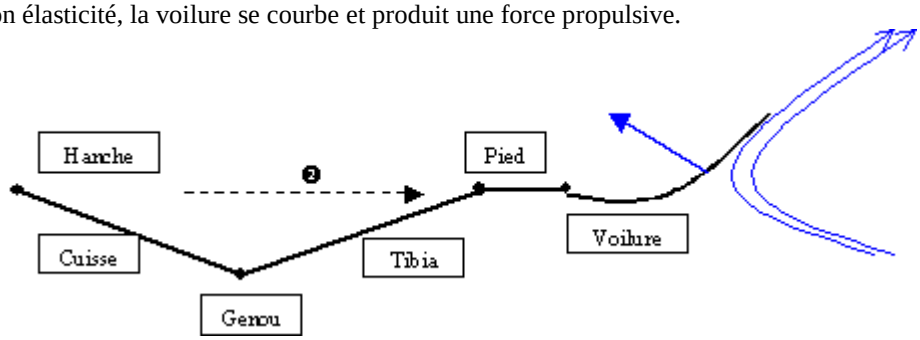
N°	Désignation	Description de la phase
❶	Descente du pied	A partir de la position de départ (non horizontale puisque la cheville est bloquée), le pied descend. A cause de l'élasticité de la voilure celle-ci ne se déplace quasiment pas vers le bas mais modifie son inclinaison. Comme la voilure ne se déplace quasiment pas, la force propulsive créée est très faible. De plus, comme l'incidence de la voilure est de plus en plus horizontale, la force créée a tendance a être de plus en plus verticale. Donc, tant que l'angle entre la voilure et le pied n'a pas atteint son maximum (qui dépend, rappelons-le, des contraintes imposées par les articulations, de l'élasticité de la voilure et de la position choisie par le palmeur), le mouvement n'est quasiment pas propulsif. 
❷	Descente de la voilure	Lorsque l'angle entre la voilure et le pied a atteint son maximum, la voilure commence à se déplacer par rapport à l'eau (i.e. : à descendre). Les forces de portance et de traînée apparaissent alors ce qui permet, par réaction, au plongeur d'avancer. On retrouve donc ici la même phase ❷ que dans le palmage académique (cf. §3.3.2) Néanmoins, la cheville étant bloquée dans une position non horizontale, l'angle entre la voilure et l'axe de déplacement de l'eau est plus faible que dans le cas du palmage académique. La portance créée est donc beaucoup plus faible. Cette phase est donc, lorsque la cheville reste bloquée dans une position non horizontale, moins propulsive qu'elle ne l'est dans le palmage académique. 

❸	Fin de la descente	Lorsque le pied stoppe son mouvement descendant, la voilure continue le sien (à cause de son élasticité) jusqu'à être de nouveau alignée avec le pied. 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 cette force propulsive, qui devient nulle lorsque le pied et la voilure sont alignés. Le fait que la cheville soit bloquée en position non horizontale ne change pas grand chose à cette phase qui est, même dans le cas du palmage académique, peu propulsive.

Dans la phase de remontée de la palme, le blocage de la cheville ne modifie pas grand chose puisque, même dans le cas du palmage académique, cette phase est moins propulsive que la phase descendante. Ce sera également le cas ici. Donc, au global, on constate que le mouvement de palmage avec blocage de la cheville est beaucoup moins efficace, avec des palmes classiques, que le mouvement de palmage académique décrit au paragraphe 3.3.2.

3.5.2.2. Pliage du genou

Lorsque le débutant plie le genou en « palmant » il fait travailler la voilure de la palme, non plus verticalement comme elle le devrait, mais horizontalement car il plie également la hanche. Les phases du palmage sont alors les suivantes :

N°	Désignation	Description de la phase
❶	Pliage du genou	La phase de descente de la palme est remplacée par une phase où le pied se rapproche du corps du plongeur par pliage du genou. La voilure et le pied restent donc horizontaux lors de ce déplacement. Aucune portance n'est créée dans cette phase puisque la voilure n'éjecte plus d'eau vers l'arrière. Le rendement propulsif est donc quasiment nul. 
❷	Dépliage du genou	Lorsque le pied est arrivé en bout de course, le plongeur déplie son genou pour essayer de prendre appui sur l'eau et se propulser. En raison de son mouvement et de son élasticité, la voilure se courbe et produit une force propulsive.  Cette phase est donc la seule de ce mouvement qui soit propulsive. Néanmoins, la force maximum serait obtenue si la voilure se positionnait à la verticale ce qui n'est pas possible compte-tenu de l'élasticité partielle des palmes classiques.

Globalement, ce mouvement de « palmage », avec des palmes classiques, n'a pas un bon rendement propulsif. En effet, la première moitié du mouvement ne produit pas de propulsion, tandis que la seconde moitié ne fait pas travailler la palme avec l'angle optimum.

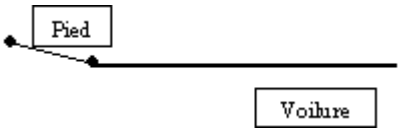
3.5.3. Modification de l'angle d'inclinaison de la voilure avec le pied

Nous allons voir maintenant les modifications qu'ont peut apporter à des palmes afin de tirer parti du blocage de la cheville et du pliage du genou[27].

On a vu au paragraphe 3.5.2.1 que le fait de bloquer la cheville dans une position non horizontale lors du palmage, diminuait le rendement propulsif de celui-ci. En effet, **le blocage de la cheville diminue l'angle entre la voilure et l'axe de déplacement de l'eau ce qui diminue la portance et donc la force propulsive de la palme**.

L'objectif recherché par les fabricants est de modifier la conception du matériel pour que, malgré ce défaut de blocage de la cheville, une palme puisse travailler correctement. Il existe actuellement deux possibilités pour cela :

- Modifier la position de départ de la palme en décalant l'axe de la voilure par rapport à celui du chausson (de l'ordre de 30° vers le bas). On rattrape ainsi le mauvais angle pris par la cheville comme on peut le voir sur ce schéma :



- Permettre à la voilure de se plier plus facilement lors de la phase de descente afin de se placer rapidement à l'angle le plus intéressant. En pratique, cela revient à installer un système permettant un pliage plus important à partir d'un certain point de la voilure[28].

A titre d'exemple on peut citer les palmes Volo© de Mares© où ces deux principes sont, entre autres, mis en application simultanément comme présenté sur le schéma suivant :

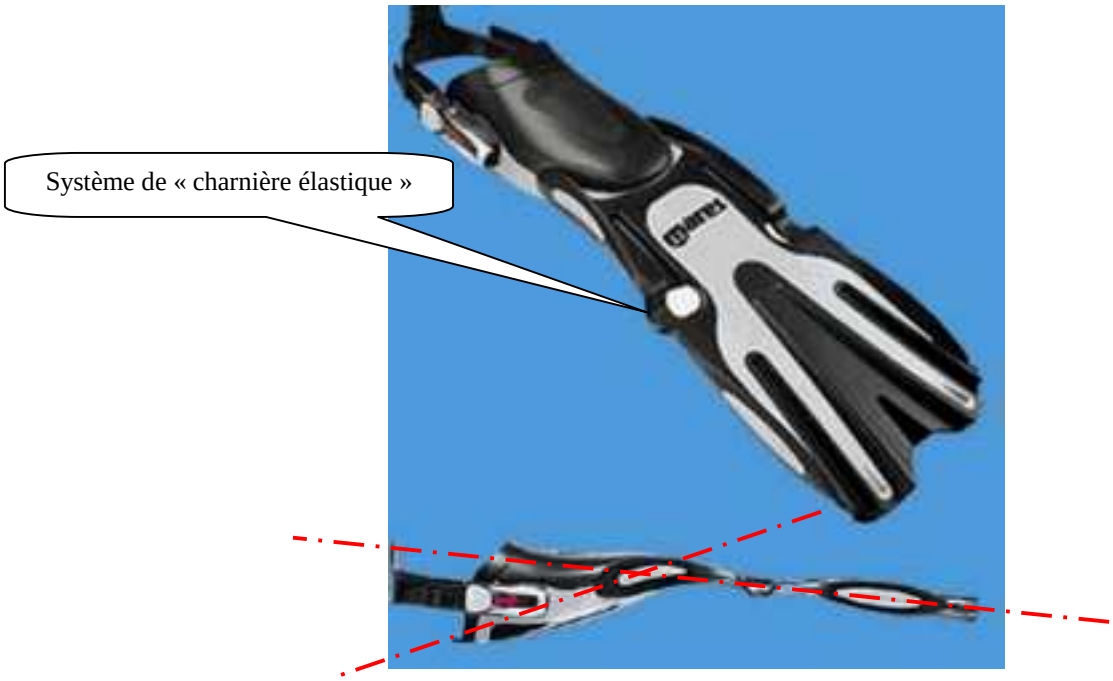


Figure 3.11 : Mise en évidence des évolutions possibles pour « corriger » le blocage de la cheville (extrait du site Internet http://www.mares.com).

Ces deux évolutions du matériel permettent 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**.

[27] Il faut remarquer ici que si on arrive à concevoir un matériel dont le rendement propulsif maximum est atteint en bloquant la cheville et/ou en pliant le genou alors ces « défauts » se transformeront en « qualité ».

[28] Certains constructeurs apportent des modifications au design de la voilure (ex. Volo© de Mares© où une sorte de « charnière » a été installée), d'autres raccourcissent les nervures rigides qui courent le long de la voilure.

En revanche, la contrepartie de cette évolution est qu'un plongeur ayant un palmage académique verra son rendement propulsif diminuer s'il utilise ce type de palmes. **On en arrive donc à conseiller un style de palme en fonction des défauts de palmage de la personne**. De plus, si le problème de blocage de la cheville est un jour résolu, il faudra que le plongeur change de palmes ou accepte d'avoir un rendement propulsif plus faible en ayant un palmage académique par rapport à celui qu'il avait avec un palmage « moins parfait ».

3.5.4. Palmes fendues

Extrait d'un dialogue sur un bateau de plongée, à l'étranger, en 1996 (traduit de l'américain par l'auteur) :

- *Plongeur US* : « T'as vu mes palmes fendues comme elles marchent bien ! La pub dit que ça marche comme une hélice !! ».
- *Plongeur français (en voyage)* : « Mais bien sûr ! Des palmes avec un trou au milieu et qui marchent comme une hélice ! Et la marmotte elle met l'chocolat dans l'papier alu !!! ».
- *Plongeur US* : « ??? ».

Et pourtant, 3 ans plus tard, on a vu apparaître ce style de palmes en France et on peut reconnaître que ces palmes présentent de réels avantages. Il n'en demeure pas moins que cette évolution **est stupéfiante car il est tout de même étonnant de se dire qu'une palme puisse être efficace avec un grand trou au milieu !!!**

En effet, cette ouverture correspond à une diminution de la surface propulsive de la palme, ce qui semble contraire à l'effet recherché. De plus, cette ouverture se situe dans la partie terminale de la voilure qui est, comme nous l'avons vu au paragraphe 3.3.2, la partie la plus propulsive. Cette ouverture semble donc être une hérésie car elle va diminuer la quantité d'eau éjectée vers l'arrière de la palme et donc la force propulsive.

Ce raisonnement est correct si on considère que ces palmes travailleront de manière classique, c'est-à-dire selon un mouvement vertical alternatif de haut en bas (i.e. : palmage académique). Néanmoins, nous allons voir que si on fait travailler ces palmes de manière différente, ce raisonnement n'est plus adapté et **la forme particulière avec une fente au milieu permet d'augmenter le rendement propulsif** par rapport à ce qui se faisait jusqu'à présent. La question qui se pose alors est de trouver le mouvement qui permettra de tirer le meilleur parti de ces palmes.

En reprenant l'analyse du mouvement de « palmage » de quelqu'un qui plie le genou (cf. §3.5.2.2) on peut facilement répondre à cette question : il suffit de faire travailler la palme comme une rame (et non comme une aile d'avion) lorsque le plongeur déplie son genou. Pour cela, **il faut que la voilure de la palme soit la plus perpendiculaire possible au déplacement de l'eau** afin de 'prendre appui' sur l'eau. Il suffit alors d'adopter une palme avec les caractéristiques suivantes :

- **La voilure doit pouvoir se plier à 90° par rapport à l'axe de déplacement** lorsque le genou se déplie (ce qui est la phase propulsive du mouvement). Pour cela il faut une matière suffisamment souple pour pouvoir se plier, mais pas trop souple, pour ne pas se plier à plus de 90° ce qui entraînerait une diminution de la surface propulsive et donc une chute du rendement propulsif.
- **La voilure doit revenir à l'horizontal lorsque le genou se plie** pour éviter que ce mouvement ne vienne freiner l'avancement. Pour cela, il faut une voilure qui reprenne le plus rapidement sa forme initiale.
- La surface propulsive doit être suffisante pour propulser le plongeur mais pas trop importante pour ne pas fatiguer outre mesure les muscles propulsifs (qui sont alors principalement le quadriceps crural et les vastes interne et externe).

Si ces caractéristiques techniques sont mises en place, la palme travaillera comme une main lors d'un mouvement de crawl, c'est-à-dire que le déplacement de la palme se fait en prenant un appui sur l'eau de manière perpendiculaire à l'axe du déplacement.

Cette explication permet de comprendre pourquoi les palmes fendues sont réalisées dans une matière très souple. En revanche, la présence d'une fente dans la voilure n'est toujours pas explicable. C'est ce que nous allons voir maintenant.

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. §3.3.1), sans diminuer la portance. En effet, une main fermée ressemble à une plaque plane alors qu'une main ouverte ressemble à 5 cylindres mis cote à cote. Le maître couple est identique dans les deux cas puisque la surface vue par l'eau est la même, la portance créée est donc identique dans les 2 cas. En revanche, la traînée de pression est plus faible avec les doigts espacés. En effet,

les doigts espacés génèreront, dans leur sillage, moins de tourbillons car un cylindre pénètre mieux dans l'eau qu'une plaque plane comme le montre le schéma suivant :

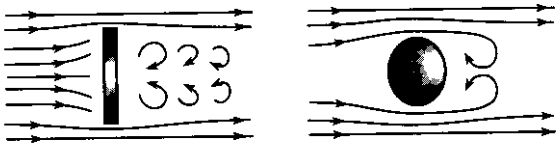


Figure 3.12 : Mise en évidence de la différence de traînée de pression entre une plaque plane et un cylindre (extrait de [11])

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.

En ajourant la voilure d'une palme qui travaille parallèlement au déplacement (comme les mains quand on nage le crawl), on diminue donc la résultante des forces de traînée sans toucher à la portance, ce qui permet **d'augmenter le rendement propulsif**.

Ces évolutions sont, entre autres, mises en œuvre sur les palmes TwinSpeed de Scubapro et V12 d'Oceanic :

Palme Twin Speed de Scubapro

Palme V12 d'Oceanic

Figure 3.13 : Exemples de palmes fendues (extrait des sites http://www.scubapro-uwatec.com et http://www.oceanic.com)

Les fabricants ont même poussé le raffinement jusqu'à mettre des nervures en V sur la voilure de la palme. Ces nervures, orientées vers l'ouverture centrale (et non dans l'axe de la voilure comme sur des palmes « classiques ») jouent le même rôle que les canaux des voilures classiques (cf. §3.4.2) en visant à canaliser le maximum d'eau vers l'ouverture centrale pour diminuer les passages 'parasites' d'eau sur les bords de la voilure[29].

Les palmes fendues sont donc conçues pour permettre aux personnes pliant le genou lors du palmage d'obtenir un rendement propulsif correct, ce qui n'est pas le cas avec les palmes « classiques ».

Les avantages de ce type de palme sont les suivants :

- Ils permettent aux personnes pliant exagérément le genou de trouver maintenant « palme à leur pied » sans, pour autant, aller moins vite que les autres.
- Les voilures étant souples et relativement courtes, elles prennent moins de place sur les bateaux de plongée et sont plus maniables en surface.
- Ce type de palmage utilise des muscles habitués à travailler sur terre et donc bien adaptés en terme de rendement énergétique. Leur utilisation permet donc de diminuer la fatigue du palmage lors d'une plongée classique et donc, de consommer moins d'air pour faire le même trajet, **si elles sont utilisées avec un palmage où l'on plie le genou**.
- Elles ont un bon rendement propulsif lorsqu'on ne leur en demande pas trop. C'est-à-dire que dans une gamme classique de vitesse de déplacement (correspondant à celle atteinte en plongée classique, même avec un peu de courant), le rendement propulsif de ce type de palme est très bon. En revanche, si on leur en demande trop, celle-ci deviennent rapidement inefficaces.

Ce type de palme présente néanmoins des inconvénients :

- Elles ne permettent pas de rendre propulsive la phase où le pied se rapproche du corps. Sur un mouvement complet de palmage, ces palmes produisent donc une force propulsive plus faible

[29] On peut également noter que ces palmes sont très souples et que l'axe de la voilure est décalé par rapport à celui du chausson. Les fabricants ont donc associé plusieurs évolutions différentes ensembles afin de tenir compte des personnes qui plient le genou et bloquent la cheville **en même temps**.

que celle obtenue avec des palmes classiques et un palmage académique. Elles montrent donc leurs limites lorsqu'il s'agit d'atteindre une puissance de palmage élevée (ex. : lors d'un sauvetage, de l'assistance d'un coéquipier, …). Donc, malgré un rendement propulsif élevé en conditions de plongée classique, ce type de palme ne permettra pas de produire une puissance de nage élevée.

- Un plongeur ayant un palmage académique ne pourra pas tirer le meilleur parti de ce type de palme puisqu'il ne fera pas travailler la voilure correctement. Il devra alors, s'il souhaite augmenter son efficacité de palmage, modifier son mouvement afin de plier le genou.

3.6. ENSEIGNEMENT DE L'HYDRODYNAMIQUE DES PALMES

Les précédents paragraphes de ce chapitre nous ont permis de combler le manque de connaissances sur les palmes. Bien qu'il soit important, pour un moniteur, de comprendre comment fonctionne une palme et de comprendre pourquoi un type de palme est adapté à un type de palmage, il est également important que ce moniteur soit capable de transmettre, de manière simple, ces éléments de compréhension à ses élèves. **Cela permettra au plongeur de comprendre comment fonctionnent ses propres palmes et donc, de pouvoir les utiliser de la meilleure manière possible**. Celui lui permettra également de choisir, de manière raisonnée, les palmes convenant à ses besoins.

Dans ce paragraphe nous allons proposer des éléments de pédagogie pour remplir cet objectif. Pour cela nous allons :

- Identifier les besoins des plongeurs, en fonction du niveau préparé, quant à leur connaissance sur les palmes et le palmage.
- En déduire les éléments techniques à transmettre en fonction de leur niveau.
- Identifier les difficultés d'apprentissage que peuvent rencontrer ces plongeurs dans la compréhension de ces éléments techniques.
- Proposer des solutions pédagogiques pour résoudre ces difficultés.

3.6.1. Besoins de connaissances sur l'hydrodynamique des palmes

Nous proposons, dans le tableau suivant, une classification des besoins des plongeurs, en fonction de leur niveau, par rapport à l'utilisation de leurs palmes. Cette classification est basée sur les objectifs de formation des différents niveaux :

Niveau du plongeur	Besoin relatif aux palmes et au palmage
Baptême	Le baptisé doit être, durant le baptême, dans une position adaptée à la nage (i.e. : à l'horizontale), les yeux regardant plutôt devant et vers le bas (afin de voir ce qui s'y passe). Le maintien de cette position n'est pas évident car le baptisé cherche une position d'équilibre adapté à la marche terrienne (i.e. : debout en cherchant des appuis plantaires). Le palmage du baptisé est alors caractérisé par un pliage excessif du genou et le blocage de la cheville.
Niveau 1	Le N1 doit être capable de se maintenir en surface et de se déplacer dans l'eau (avec et sans bloc) sans s'essouffler dans des conditions normales de pratique (mer peu agitée, peu de courant, …). Il doit donc acquérir les bases lui permettant d'utiliser correctement ses palmes. De plus, c'est à ce niveau qu'on achète ses premières palmes.
Niveau 2	Les objectifs au N2 sont les mêmes qu'au N1. En revanche, l'accès à l'autonomie nécessite que le N2 puisse remplir ces objectifs dans des conditions de pratiques plus complexes (courant, mer agitée, assistance d'un coéquipier, …). Les défauts de palmage réduisant de manière importante le rendement propulsif doivent donc être corrigés. En revanche, des défauts mineurs (i.e. : diminuant peu le rendement propulsif) peuvent encore subsister.
Niveau 3	Idem N2.
Niveau 4	Le N4 doit être capable de se maintenir en surface et de se déplacer dans toutes les situations (celles humainement gérables bien entendu). Il doit, de plus, être capable d'assurer cela pour ses élèves (ex. : aider un débutant à rejoindre le mouillage en cas de

	courant de surface, …). Les épreuves physiques du N4 demandent une technique proche de la démonstration[30]. Le N4 doit donc être capable de choisir ses palmes en fonction de ces objectifs et d'adopter le palmage permettant d'en tirer le meilleur parti. Il doit de plus pouvoir conseiller un plongeur sur son futur achat.
Niveau 5	En plus des éléments du N4, le N5 doit être capable d'adapter le site de plongée aux capacités des plongeurs.

3.6.2. Eléments d'hydrodynamique des palmes à enseigner

A partir du tableau précédent nous proposons une sélection des éléments d'hydrodynamique des palmes à apporter aux différents niveaux de plongeur :

Niveau du plongeur	Eléments d'hydrodynamique des palmes à enseigner
Baptême	A ce niveau il n'est pas nécessaire d'aborder des éléments théoriques. Il est nécessaire d'expliquer l'utilité des palmes (avancer sans les bras et moins se fatiguer) ainsi que la manière dont on les fixe au pieds. On peut également expliquer rapidement (moins d'une minute) comment fonctionnent les palmes utilisée durant le baptême : ✓ Pour des palmes classiques : expliquer qu'il faudra faire des battements verticaux, un peu comme si on nageait le crawl, mais avec une amplitude un peu plus importante. ✓ Pour des palmes fendues : aucune explication ne sera nécessaire puisque la palme est conçue pour un palmage pliant le genou et bloquant la cheville.
Niveau 1	Le N1 devant être capable d'utiliser correctement ses palmes et étant en mesure de les acheter il nous semble nécessaire de lui expliquer de manière simple les éléments suivants : ✓ Principes physiques qui permettent d'avancer dans l'eau : éjection d'une quantité d'eau vers l'arrière. ✓ Rôles d'une palme : augmenter la vitesse et la puissance de nage. ✓ Notion de rendement propulsif. ✓ Paramètres jouant sur la vitesse et la puissance de nage : quantité d'eau éjectée vers l'arrière, vitesse d'éjection et, pour la puissance, temps d'éjection. ✓ Faire la liaison entre ces paramètres théoriques et la pratique : ✓ Temps d'éjection ⇔ Temps mis pour réaliser le mouvement de palmage. ✓ Quantité d'eau éjectée ⇔ Surface de la voilure + Mouvement de palmage (académique ou débutant). ✓ Vitesse d'éjection d'eau ⇔ Amplitude du mouvement de palmage. ✓ Existence de différents types de palmes, explication des avantages et inconvénients respectifs, adéquation du type de palme avec le palmage de l'élève. A ce niveau, il ne nous semble pas nécessaire de parler de forces de portance et de traînée car ces notions sont trop techniques.
Niveau 2	Idem N1. Si cela facilite la correction des principaux défauts de palmage, on peut introduire les notions de forces de portance et de traînée. On se sert alors de ces éléments théoriques pour faciliter la compréhension du mouvement correct. En dehors de ce cas particulier il ne nous semble pas nécessaire de développer plus le sujet.
Niveau 3	Idem N2.

[30] Ceci peut paraître un vœu pieux lorsqu'on regarde le palmage de certaines personnes préparant le N4. Cela vient souvent de la formation reçue, axée essentiellement sur l'amélioration des capacités physiques des personnes (capacités aérobies, anaérobies, …) et peu tournée vers l'amélioration des techniques de palmage et de nage. Ceci est une erreur qu'il faut absolument combler car on sait très bien qu'à long terme, seules les capacités techniques perdurent alors que les capacités physiques, si elles ne sont pas entretenues, déclinent rapidement. Il vaut donc mieux chercher l'amélioration du rendement propulsif d'une personne que l'augmentation de la puissance musculaire qu'il peut développer pour nager (i.e. : privilégier la technique au physique).

Niveau 4	On cherche à maximiser le rendement propulsif du N4. Il doit donc comprendre comment les différents types de palmes fonctionnent et sur quels paramètres jouent les évolutions apportées aux palmes par les fabricants. Il semble donc nécessaire de développer les notions de force de portance et de traînée pour comprendre comment est générée la force propulsive des palmes. Il semble également nécessaire d'appliquer ces notions aux différents types de palmes afin de comprendre leurs avantages et inconvénients respectifs.
Niveau 5	Idem N4.

3.6.3. Compréhension des notions délicates sur l'hydrodynamique des palmes

Afin de faciliter la compréhension des éléments d'hydrodynamique citées dans le paragraphe précédent, nous présentons ici un tableau décrivant les principales notions à faire passer, les éventuelles difficultés de compréhension ainsi que des propositions de solutions pédagogiques.

Notion à transmettre	**Principales difficultés de compréhension**	**Proposition de technique pédagogique visant à favoriser l'assimilation de la notion**
Rendement propulsif	La définition exacte fait intervenir les notions d'énergie ce que tout le monde ne maîtrise pas forcément.	On peut réaliser une expérience simple visant à faire comprendre la notion de rendement propulsif : ✓ Faire réaliser à l'élève une distance donnée avec les palmes (ex. : 50m). ✓ Faire compter le nombre de coups de palmes nécessaire pour réaliser cette distance. ✓ Refaire cette distance en cherchant à diminuer ce nombre de coups de palme (en donnant, si besoin est, des conseils à l'élève). Lorsque l'élève arrive à faire la même distance en donnant moins de coups de palme il est facile de lui faire comprendre la notion de rendement propulsif : il fait la même distance dans tous les cas mais en dépensant moins d'énergie puisqu'il palme moins. Son rendement propulsif est donc meilleur (son mouvement de palmage s'est alors amélioré).
Force de portance	La notion de force de portance est complexe à transmettre.	On peut reprendre la démarche présentée au paragraphe 3.3.1 avec les schémas associés.
Traînée de frottement	Cette notion est très bien comprise par les élèves et ne présente, en général, pas de difficultés particulières. En effet, on comprend assez facilement que plus un fluide frotte sur une surface et plus celui-ci tend à freiner le mouvement de l'objet.	Pas de proposition.
Traînée de pression	Comprendre la relation qui existe entre la forme d'un objet et la force de traînée générée par l'écoulement de l'eau autour de cet objet.	Expliquer les éléments suivants : ✓ Au centre d'un tourbillon la pression est plus faible qu'aux alentours. On peut prendre l'exemple du tourbillon de vidange du bain (qui est vide au milieu ce qui indique bien une dépression) ou alors, faire remarquer qu'à la météo on parle de dépression et que ces dépressions (associées à une diminution de la pression atmosphérique) sont en réalité des tourbillons (ce que l'on voit très bien sur les animations satellite).

		✓ Montrer (grâce à la Figure 3.12), que des formes différentes d'objets, génèrent plus ou moins de tourbillons et donc une dépression plus ou moins importante derrière l'objet. ✓ Grâce à la relation pression-force-surface, acquise dès le N1, on peut faire comprendre qu'un plus grand nombre de tourbillons génère une force plus importante derrière l'objet ce qui le ralentit d'autant plus (dépression = aspiration).
Influence du temps d'éjection sur la poussée créée par une palme	La difficulté est de comprendre comment, à quantité d'eau éjectée et à vitesse d'éjection égales, on peut créer une poussée plus ou moins importante en jouant sur le temps d'éjection.	Il faut tout d'abord faire comprendre que le temps d'éjection de l'eau est en fait le temps de réalisation du mouvement de palmage. L'augmentation de la poussée par diminution du temps de réalisation d'un mouvement de palmage peut facilement être mise en évidence lors du palmage de sustentation. Il suffit pour cela de prendre un peu de poids (ceinture de lest pas exemple) dans les mains (avec les bras hors de l'eau) et de constater que l'une des possibilités pour ne pas couler est d'augmenter la fréquence de palmage. En faisant cela on augmente bien la poussée du palmage en diminuant le temps d'éjection de l'eau[31].
Différence de principes de fonctionnement des palmes classiques et des palmes fendues	La compréhension des principes différents de fonctionnement des palmes classiques et des palmes fendues n'est pas évidente à ressentir si on ne maîtrise pas les explications données dans les paragraphes précédents.	On va chercher à ressentir ces différences de comportement. Pour cela on va réaliser une expérience simple mettant en évidence que la poussée créée par des palmes classiques est meilleure avec un mouvement de palmage classique alors que celle créée par une palme fendue est meilleure quand on palme du genou. L'expérience est la suivante : ✓ Montrer tout d'abord que le fait de plier le genou fait travailler la palme de manière horizontale et non plus de manière verticale. ✓ Prendre ensuite une palme classique dans la main, se mettre au bord de la piscine (ou du bateau) et faire entrer dans l'eau, perpendiculairement à la surface, la palme. ✓ Faire de même avec une palme fendue. ✓ On ressent alors très bien la différence de poussée créée par chaque type de palme et on ressent que la poussée est plus importante avec la palme fendue. On voit également les différences de comportement des voilures respectives (l'une reste perpendiculaire à la surface de l'eau et l'autre se courbe pour résister au déplacement).

[31] L'augmentation de l'amplitude est plus efficace mais cela ne nous aide pas dans ce cas.

		✓ Refaire l'expérience mais en appliquant un mouvement de battement aux palmes. On constate alors que la poussée la plus importante est obtenue avec la palme classique.

Ces techniques pédagogiques ont été mises en application lors de formation de N1, N4 et MF1 sur la saison sportive 2003-2004 par l'auteur. Ceci a permis de vérifier leur applicabilité en pratique et de faire les remarques suivantes :

- L'enseignement du palmage au N1 a été facilité du fait de la compréhension des principes de fonctionnement des palmes. De plus, les N1 sont maintenant capables de faire un choix raisonné des palmes qui leur conviennent et de justifier ce choix (ce qui dépasse l'objectif d'enseignement initial).
- La correction des défauts de palmage d'une personne préparant le N4 a été plus facile grâce à ces mêmes éléments. Il semblerait que ceci ait principalement joué sur l'auto-correction des défauts en mettant des mots sur des sensations (bonnes ou mauvaises) ressenties par l'élève lors du palmage.
- La compréhension des différents principes de fonctionnement entre des palmes classiques et des palmes fendues a été faite rapidement (en moins de 10 minutes) devant un auditoire hétérogène composé de personnes du N1 au E2.

Ces éléments pédagogiques montrent donc qu'il est possible transmettre facilement des notions d'hydrodynamique des palmes à tous les niveaux de plongeur. Néanmoins, **cette acquisition de connaissances ne doit, à notre avis, pas faire l'objet d'un cours théorique particulier**, même pour des personnes préparant le N4. Il nous semble beaucoup plus productif de **se servir des séances de nage pour faire passer les notions** nécessaires à une meilleure utilisation des palmes.

3.7. CONCLUSION

Ce chapitre 3, consacré à l'hydrodynamique des palmes, nous a permis de constater l'ampleur des lacunes dans ce domaine. Celles-ci portent principalement sur la compréhension des principes de fonctionnement d'une palme et les différences entre les types de palmes actuellement sur le marché. A partir de ce constat nous avons essayé de combler ces lacunes grâce aux actions suivantes :

- Nous avons regardé les principes physiques gouvernant le déplacement d'un nageur et identifié les facteurs contrôlant sa vitesse et sa puissance de nage. Nous en avons conclu que la vitesse de la nage est proportionnelle à la masse et à la vitesse de l'eau éjectée derrière le nageur et inversement proportionnelle à la masse du nageur. La puissance de nage est, de plus, inversement proportionnelle au temps d'éjection de l'eau (i.e. : au temps mis pour effectuer le mouvement) et ne dépend pas de la masse du nageur.
- Nous avons ensuite regardé comment une palme permettait de contrôler ces facteurs afin d'augmenter la vitesse et la puissance de nage. Cela nous a permis d'aborder les concepts de forces de portance, de traînée et de force propulsive d'une palme et de voir comment ces concepts pouvaient être mis en œuvre pour comprendre le mouvement d'une palme. Nous en avons conclu que pour maximiser le rendement propulsif d'une palme, la portance doit être la plus grande possible et la résultante des forces de traînée la plus faible possible.
- Ces éléments techniques et théoriques ont alors été mis en application pour comprendre les améliorations apportées aux palmes par les différents fabricants du marché. En particulier, l'influence de la surface, de la présence de canaux, de tuyères et de la forme de la voilure sur le rendement propulsif de la palme ont été étudiés.
- Enfin, nous avons regardé comment des évolutions novatrices sur les palmes (ex. : fente dans la voilure, …) pouvaient permettre de tirer le meilleur parti des « défauts » classiques de palmage (ex : pliage du genou et blocage de la cheville).

Ces études nous ont permis de constater que **nous entrons dans une période nouvelle** quant à la conception des palmes. En effet, les dernières innovations en matière de palme visent toutes un seul et même but : **concevoir des palmes pouvant être utilisée, de manière efficace, avec un mouvement de palmage se rapprochant plus du palmage d'un débutant que celui du mouvement académique**. Cela reviendrait presque à transformer les gros défauts de palmage (blocage de la cheville et pliage du genou) en avantages, ce qui constitue une rupture importante de philosophie puisqu'on cherche alors à **adapter le matériel à l'homme et non le contraire**. Le stade ultime de cette philosophie est actuellement atteint avec les palmes en forme de « pied de canard ». Elles sont très

petites mais permettent d'avancer correctement lorsqu'on sait les utiliser. Ces palmes sont conçues pour être utilisées avec un palmage de débutant complet, c'est-à-dire en pédalant[32]. C'est donc bien le matériel qui s'adapte au mouvement naturel d'une personne avec des palmes lorsque celle-ci n'a aucune notion de palmage.

Si ces nouveaux concepts de palmes se développaient de manière importante chez les plongeurs français, il faudrait probablement apporter des modifications à nos manières d'enseigner le palmage. Nous fournissons ici des pistes de réflexion autour de ce thème :

- Ne plus parler d'apprentissage du palmage mais plutôt d'apprentissage des palmages. On pourrait alors parler de palmage type « académique » où le mouvement est vertical et de palmage type « débutant » où le mouvement est horizontal.
- Accepter de différencier l'enseignement du palmage en fonction des palmes utilisées. Cela nous conduirait à faire des cours d'apprentissage du palmage différents entre les personnes utilisant des palmes « classiques » et celles utilisant des palmes fendues.
- Les palmes fendues n'étant pas forcément adaptées aux exigences des épreuves du N4 il serait nécessaire de faire un choix entre :
    - Modifier ces exigences (en particulier sur les épreuves nécessitant la production d'une poussée importante comme le sauvetage palme)
    - Ou, ne rien changer aux épreuves N4 mais, pour les plongeurs n'ayant utilisé que ce type de palmes, mettre en place des cours d'apprentissage du palmage dans les formations N4.
- Demander aux élèves ayant des difficultés importantes de propulsion avec des palmes classiques (i.e. : difficultés d'apprentissage du palmage « académique ») de prendre des palmes fendues pour pouvoir avancer avec un mouvement plus « naturel ». Ce type de palmes pourrait donc se positionner comme une alternative au palmage classique.
- Diminuer le temps passé sur l'apprentissage du palmage chez les débutants (i.e. : diminuer les temps de formation des N1) grâce à l'utilisation des palmes fendues, sans pour autant diminuer grandement la marge de sécurité du plongeur. Ce temps de formation serait alors reporté sur des formations de type N4, si les exigences de l'examen n'ont pas été modifiées.

On voit que certains des scénarii proposés posent des questions pouvant remettre en cause, de manière assez profonde, la manière dont on aborde l'apprentissage du palmage dans la pratique du plongeur. Nous pensons qu'il est important de **créer un groupe de travail** au sein du collège des instructeurs afin de réfléchir, de manière plus approfondie, aux différentes possibilités qui s'offrent à nous : faut-il ignorer cette évolution et prendre ainsi le risque de se voir dépassé par les évènements ou, au contraire, faut-il se préparer à une révolution profonde car, au-delà du problème des palmes fendues, se pose la question de l'acceptation de la notion d'adapter le plongeur au matériel ou le matériel au plongeur ?

A minima, il est indispensable d'informer nos plongeurs des avantages et inconvénients de ces nouveaux types de palmes ainsi que de leurs principes de fonctionnement pour leur permettre de les utiliser au mieux.

[32] On peut aussi les utiliser correctement en « palmant » comme une grenouille c'est-à-dire en faisant un mouvement de brasse avec les pieds.

4. RESPIRATION, ESSOUFFLEMENT ET MELANGES TRIMIX !

4.1. NOTIONS DE BASE SUR LES PERTES DE CHARGE

Les écoulements d'air sont en général des écoulements dits 'turbulents'. Qu'est-ce que la turbulence ?

L'écoulement d'un fluide est turbulent lorsque celui-ci est animé de mouvements tourbillonnaires permanents produisant un brassage continuel du fluide. L'écoulement est alors imprévisible de manière détaillée c'est-à-dire qu'il est impossible de prévoir, en chaque point de l'écoulement et à tout moment, la vitesse et la pression du fluide[33].

Les tourbillons se produisent par suite des frottements internes auquel le fluide est soumis. Lorsque la vitesse du fluide devient suffisamment importante, un petite perturbation de l'écoulement (due, par exemple, à une aspérité ou à une vibration) se propage dans l'ensemble de l'écoulement. Ceci est mis en évidence sur le schéma suivant où l'on voit l'apparition de la turbulence à partir d'un écoulement laminaire :

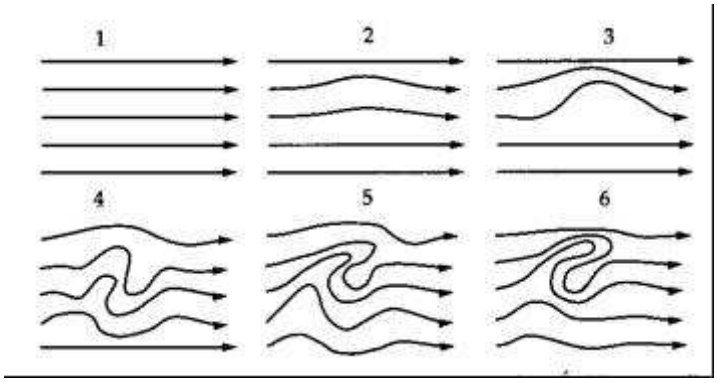


Figure 4.1 : Naissance de la turbulence à la suite d'une petite perturbation (extrait de [11]).

Dans un écoulement turbulent, le frottement des particules fluides dans un tourbillon dissipe plus d'énergie que dans un écoulement laminaire dans lequel ces tourbillons n'existent pas. Il faut donc **fournir plus d'énergie au fluide pour le déplacer d'un endroit à un autre lorsque l'écoulement est turbulent** par rapport au cas où cet écoulement est laminaire.

Cette dissipation d'énergie se traduit par une diminution de la pression du fluide au cours de son écoulement. Ceci s'appelle **la perte de charge**[34]. Celle-ci est beaucoup plus élevée dans le cas d'un écoulement turbulent[35].

4.2. ECOULEMENT D'AIR DANS LES VOIES AERIENNES

L'objectif de ce paragraphe est d'acquérir une idée globale de l'écoulement d'air dans les voies aériennes.

Des calculs menés sur des ordinateurs puissants, à partir d'une modélisation des voies aériennes supérieures, permettent d'obtenir l'ordre de grandeur des vitesses d'air (et donc du débit) ainsi que la répartition de l'écoulement dans les différentes parties des voies aériennes (les couleurs sont proportionnelles à la vitesse d'air) comme on peut le voir dans le tableau suivant :

---

[33] *Pros :* Toutefois, sur des intervalles de temps suffisamment long par rapport au temps caractéristique des tourbillons, on peut définir et prédire une distribution moyenne de la vitesse et de la pression.

[34] On pense souvent que la perte de charge est due aux frottements du fluide sur les parois de la conduite dans laquelle a lieu l'écoulement. En fait cela ne représente qu'une faible partie de la perte de charge totale. La majorité de cette perte de charge est due aux frottements à l'intérieur même des tourbillons présents dans le fluide.

[35] *Pros :* Le niveau de turbulence du fluide est quantifiée par une grandeur sans dimension appelée le nombre de Reynolds. Ce nombre est fonction de la vitesse du fluide (V), d'une longueur caractéristique de la géométrie de l'écoulement (le diamètre 'D' du tuyau par exemple), de la masse volumique (ρ) et de la viscosité dynamique (η) du fluide : $Re = \frac{\rho V D}{\eta}$

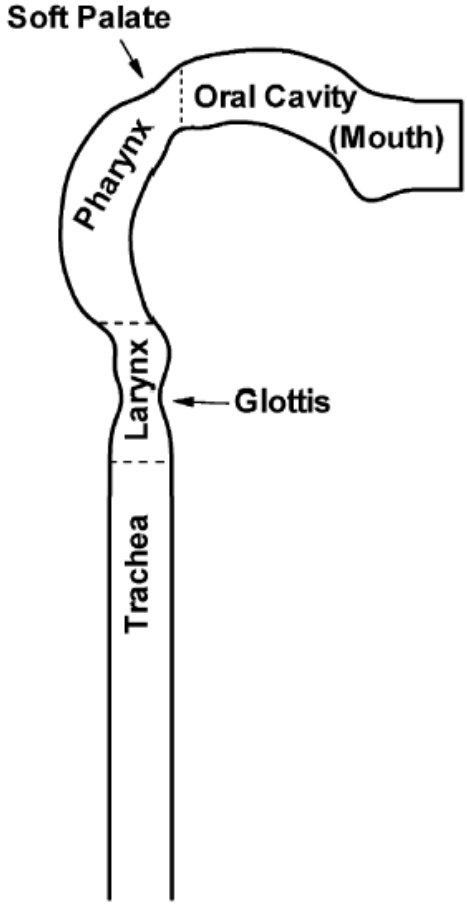
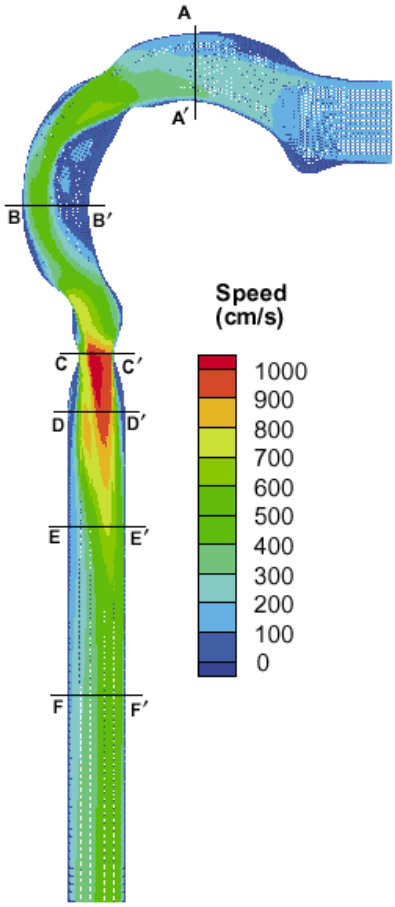
Schématisation des voies aériennes supérieures	Répartition des vitesses d'air lors d'une inspiration
	
	Répartition des vitesses d'air lors d'une inspiration avec un débit de 30l/min.

Figure 4.2 : Schématisation des voies aériennes supérieures (extrait de [12]).

Ces calculs permettent de déterminer les pertes de charge dues à l'écoulement du fluide dans les voies aériennes en fonction du débit[36]. On peut constater que la vitesse maximale de l'air est atteinte au niveau de la glotte (section C-C') pour un débit de 30l/min. C'est donc dans cette région que les pertes de charge seront les plus importantes.

La vitesse d'écoulement d'air augmente proportionnellement au débit, qui augmente lui-même proportionnellement à la pression, et donc à la profondeur. L'écoulement va donc devenir de plus en plus turbulent ce qui augmentera d'autant plus la perte de charge. Cela met en évidence le mécanisme **d'augmentation du risque d'essoufflement avec la profondeur**.

Grâce à ces éléments on peut également mieux comprendre les caractéristiques spécifiques de la respiration sous-marine. L'objectif de cette respiration est justement de minimiser les risques d'essoufflement tout en assurant les besoins vitaux d'apport en oxygène et d'élimination du dioxyde de carbone. Pour diminuer ces risques il est nécessaire de limiter au maximum les pertes de charge dues à l'écoulement d'air lors de la ventilation et donc d'avoir un débit d'air le plus faible possible, tout en assurant les besoins vitaux. Pour cela il suffit d'augmenter le temps passé ventiler en **augmentant les durées d'inspiration et d'expiration** ce qui permet d'apporter les quantités de gaz demandées par le corps mais sur un temps plus long, donc avec un débit et des vitesses plus faibles ce qui limitera les pertes de charge et donc la fatigue des muscles ventilatoires.

---

[36] Pros : Les calculs détaillés montrent, d'après [8] que cette perte de charge est proportionnelle à : $\Delta P_{VoiesAériennes} \propto \left[\frac{4\rho Q}{\eta \pi D}\right]^{-0,55} \frac{\rho}{g\pi^2 D^4} Q^2$ avec ρ, η, g, Q et D respectivement les masse volumique, viscosité dynamique, accélération de la pesanteur, débit d'air et diamètre de la trachée.

4.3. TORDRE LE COU AUX IDEES REÇUES : ESSOUFFLEMENT ET VISCOSITE.

On entend souvent dire que l'une des causes de l'augmentation du travail ventilatoire est l'augmentation, avec la pression (et donc la profondeur), de la viscosité de l'air. Cette image est certes pédagogique mais elle n'en demeure pas moins totalement fausse, d'autant plus que c'est exactement le contraire qui se produit : la viscosité de l'air **diminue** avec l'augmentation de la profondeur. Etudions cela de plus près.

De manière intuitive on peut dire que la viscosité d'un fluide est associée à la résistance (la force) que l'on doit exercer afin de déplacer un objet dans ce fluide. Par exemple, on sait qu'il faut exercer une force plus grande pour déplacer un objet dans de l'huile plutôt que pour le déplacer dans de l'eau car l'huile est plus visqueux que l'eau. Il semblerait donc évident que l'augmentation du travail ventilatoire avec la profondeur soit dû à une augmentation de la viscosité de l'air.

Pourtant, il n'existe pas une, mais deux viscosités, et ce, pour chaque fluide[37]. Il s'agit des viscosités suivantes :

- Viscosité dynamique (notée en général η) : c'est celle dont on vient de parler. La force nécessaire pour mettre en mouvement un fluide (ou un objet dans ce fluide) est d'autant plus forte que la viscosité dynamique de celui-ci est élevée. Elle s'exprime en Pa.s et est typiquement de 10^{-5} Pa.s pour les gaz, 10^{-3} Pa.s pour l'eau et entre 0,1 et 0,01 Pa.s pour les huiles moteurs.
- Viscosité cinématique (notée, en général, ν) : c'est le rapport entre la viscosité dynamique et la masse volumique du fluide considéré. Physiquement, cette viscosité représente la capacité d'un fluide à transmettre un mouvement (ou une impulsion) d'un point A vers un point B. Plus cette viscosité cinématique est faible et plus l'impulsion fournie au fluide en un point A se transmet rapidement au point B.

Or, en ce qui concerne les gaz (ce n'est pas vrai pour les liquides), la viscosité dynamique reste constante avec la pression[38] et ce, jusqu'à des pressions d'environ 15 bar. Donc, pour des profondeurs inférieures à 150 mètres, on peut dire que l'augmentation du travail ventilatoire n'est pas dû à une augmentation de la viscosité de l'air.

Alors, comment se fait-il que le travail ventilatoire augmente avec la pression ?

Examinons l'influence de la pression sur l'autre viscosité, c'est-à-dire, la viscosité cinématique. On a :

$$\upsilon = \frac{\eta}{\rho}$$

Or, nous savons que la viscosité dynamique reste constante avec la profondeur. Ceci n'est pas vrai pour la masse volumique puisqu'elle augmente proportionnellement à la pression (ceci est l'application directe de la loi de Mariotte). **On constate donc que la viscosité cinématique diminue avec la profondeur**. Mais qu'est-ce que cela implique au niveau du travail ventilatoire ?

Eh bien c'est très simple, si la viscosité cinématique diminue, cela favorise l'apparition et le développement de la turbulence au sein du fluide. En effet, une perturbation créée à un endroit du fluide (par une aspérité ou un rétrécissement par exemple) se propagera d'autant mieux que ν est faible.

Or, on a vu au paragraphe 4.1 que plus l'écoulement est turbulent, plus la perte de charge (i.e. : la perte de pression) est élevée ce qui veut dire que l'on doit dépenser plus d'énergie pour faire circuler l'air de la bouche jusqu'aux poumons. Cette énergie correspond au travail ventilatoire puisque cette énergie est fournie par les muscles ventilatoires.

---

[37] *Pros :* On ne parle ici que des fluides dits 'newtoniens' qui ont un comportement comparable à l'eau. Pour les fluides dits 'non-newtoniens' on ne peut pas définir de viscosité car leurs comportements sont très particuliers (par exemple : ils ne coulent pas comme l'eau). Quelques exemples de fluides 'non-newtonien' : le sang lorsqu'il se trouve dans des petits vaisseaux ou certains fluides alimentaires (mayonnaise, ketchup ou plus généralement les sauces alimentaires qui ont besoin de 'prendre' pour être réussies), la pâte à pain, le mélange eau+maïzena, le sable mouillé, …

[38] *Pros :* Ceci s'explique, pour les gaz, par le fait que la viscosité dynamique est proportionnelle à l'expression suivante : $nl\sqrt{mT}$ où *n* est le nombre de molécules par unité de volume, *l* leur libre parcours moyen (distance moyenne parcourue par une molécule avant d'entrer en contact avec une autre), *m* la masse d'une molécule et *T* la température. Or, le produit *nl* est indépendant de la pression car, lorsque *n* augmente, *l* diminue dans les mêmes proportions.

En conclusion on peut donc dire que **l'augmentation du travail ventilatoire avec la profondeur est dû à une augmentation de la masse volumique de l'air** (qui entraîne une diminution de la viscosité cinématique) ce qui favorise l'apparition de la turbulence au sein de l'écoulement d'air dans les poumons. Cet effet est renforcé par l'augmentation du débit, et donc de la vitesse d'écoulement, d'air au niveau des voies aériennes (cf. paragraphe précédent)

Plus simplement, et plus pédagogiquement (pour ne pas partir dans des explications trop complexes), on pourra dire aux élèves que **l'augmentation du travail ventilatoire avec la profondeur est due à l'augmentation de la densité des gaz respirés**. Or, on peut aisément comprendre que plus la densité d'un fluide est importante, plus on doit dépenser d'énergie pour déplacer un volume donné.

4.4. ETUDE DES PROTOCOLES DE PREPARATION D'UN MELANGE TRIMIX.

En règle générale, lorsqu'un plongeur souhaite réaliser un mélange Trimix (Hélium, Azote, Oxygène) dans un bloc initialement vide, il a le choix entre plusieurs possibilités :

- Mettre en premier l'oxygène, y ajouter l'Hélium puis compléter avec de l'air.
- Réaliser au préalable un mélange Nitrox en mettant d'abord l'oxygène puis de l'air dans le bloc et compléter avec l'Hélium pour atteindre les pourcentages désirés.

L'hélium (4g/mol) étant un gaz beaucoup plus léger que l'oxygène (32g/mol) et l'azote (28g/mol) on pourrait, lors de la réalisation du mélange, se retrouver avec un mélange où l'hélium surnagerait au-dessus du mélange azote-oxygène. Il est donc nécessaire, lorsqu'on réalise un trimix, d'homogénéiser le mélange obtenu pour éviter de respirer un gaz hypoxique.

Pour se prévaloir de ce risque, les plongeurs fabriquant des Trimix ont mis au point des procédures dites d'homogénéisation. Chacun a développé « sa » propre technique sans forcément se baser sur des éléments scientifiques. Voici quelques unes de ces procédures :

1. Attendre un temps plus ou moins long (entre 6h et 1 semaine[39]) après le gonflage avant d'utiliser le mélange.
2. Rouler la bouteille à l'horizontale pendant 2h puis laisser reposer 6h.
3. Attendre 6h en stockant la bouteille à l'horizontale.
4. Gonfler rapidement les blocs et ne rien faire de particulier ensuite.

L'objectif de ce paragraphe est de voir si des connaissances en mécanique et en physique des fluides peuvent nous aider, si ce n'est à répondre à ces questions, au moins à étudier leur bien fondé.

Ces 3 procédures jouent en fait sur deux principes de mécanique des fluides :

- La diffusion de la matière : lorsque qu'un gaz A est mis en contact avec un gaz B, celui-ci tend à diffuser à l'intérieur du gaz avec une vitesse qui dépend de la nature des deux gaz et de leurs concentrations respectives. Il s'agit du même type de processus que celui de la dissolution d'un gaz dans un liquide que nous connaissons bien en plongée. La vitesse de diffusion est décrite au moyen d'une grandeur physique appelée le coefficient de diffusion que l'on notera D. La diffusion de matière est un phénomène assez lent.
- Le mélange induit par la turbulence : lorsqu'un gaz A est injecté dans un gaz B avec une vitesse importante, il se produit un mélange turbulent de ces deux gaz, d'autant plus important et rapide que la vitesse d'éjection est grande. La Figure 4.3 représentant un jet de CO_2 dans de l'air met en évidence ce phénomène. On y voit clairement la turbulence générée ainsi que le mélange des deux gaz qui augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la zone d'injection. Ce phénomène permet d'accélérer l'homogénéisation d'un mélange.

[39] Cette forte disparité des temps d'attente atteste bien du caractère non raisonné des différentes techniques. De plus, lorsqu'on leur demande pourquoi ils attendent ce temps là, ils sont souvent incapables de le justifier.

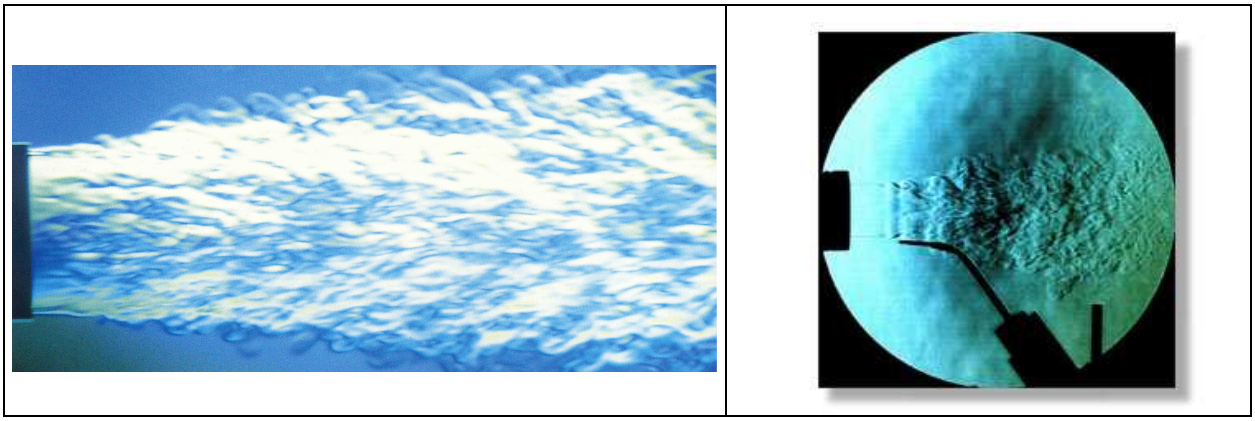


Figure 4.3 : Jet de CO_2 (à gauche) et d'un gaz non précisé (à droite) dans de l'air initialement au repos (extrait de [3] et d'un site Internet).

Nous allons calculer le temps maximal d'homogénéisation d'un mélange trimix ce qui revient à considérer que cette homogénéisation n'est due qu'à la diffusion de matière. Nous verrons ensuite que la turbulence de jet permet de réduire ce temps maximal, surtout lorsqu'on injecte l'hélium dans l'air.

4.4.1. Estimation du temps maximal d'homogénéisation d'un mélange trimix.

Pour estimer le temps maximal nécessaire à l'homogénéisation d'un trimix nous allons considérer que seul le mécanisme de diffusion de matière agit. On imagine donc qu'après remplissage du bloc on a une strate d'hélium qui surnage au-dessus d'un mélange d'azote et d'oxygène. Nous allons calculer le temps nécessaire à l'hélium pour atteindre, par diffusion moléculaire, le fond du bloc de plongée en étant initialement situé dans la partie la plus haute du bloc.

On considère que le mélange azote-oxygène est de l'air et qu'il est homogène tout de suite après le gonflage[40].

Le problème d'homogénéisation du trimix est alors uniquement lié à la présence de l'Hélium. Le coefficient de diffusion de l'Hélium dans l'air est de $0{,}62 cm^2/s$ ([41]).

On peut montrer que la diffusion spatiale d'une quantité de gaz est proportionnelle à $\sqrt{Dt}$ où D est le coefficient de diffusion du gaz dans le milieu considéré. Si nous appliquons cela au cas d'une bouteille de 18 litres (qui est, avec la bouteille de 20 litres, la bouteille la plus haute de celles rencontrées actuellement le marché français) dont la hauteur est d'environ 80cm nous obtenons un temps maximal d'homogénéisation de l'ordre de :

$$t_{Hom_BlocDebout\&Immobile} \approx \frac{x^2}{D} = \frac{80^2}{0{,}62} = 10322s = 172\,min = 2h52'$$

Donc, le temps mis par de l'Hélium situé en haut de la bouteille pour atteindre le fond de la bouteille (dans le cas où la bouteille est en position debout), et ce, uniquement par diffusion moléculaire est de l'ordre de 3 heures. En prenant un coefficient de sécurité de 2 ou 3 on peut considérer que le temps maximum d'homogénéisation d'un mélange trimix est de l'ordre de 6 à 9 heures. On peut donc conclure qu'attendre l'homogénéisation d'un mélange trimix, pour un bloc debout et immobile, plus de 9h semble très conservatif.

A titre d'exemple voyons maintenant quelle est l'influence de la position de stockage sur ce temps maximal d'homogénéisation. On se place dans le même cas que précédemment mais en considérant que la bouteille est conservée couchée et non plus debout. La distance à parcourir pour l'hélium est alors beaucoup plus faible puisqu'elle correspond au diamètre de la bouteille (environ 20cm) et non plus à sa longueur. On a alors :

---

[40] Cette hypothèse est justifiable dans la mesure où un mélange Nitrox est homogène immédiatement. Cela peut se vérifier aisément en fabriquant un tel mélange et en faisant son analyse immédiatement après le gonflage puis régulièrement pendant 1 à 2 heures. On constate que l'analyse de l'oxygène du nitrox ne varie que de 1 à 2% ce qui correspond en fait au temps nécessaire pour que la turbulence produite par le gonflage se calme.

[41] Cette valeur est celle mesurée à –29°C. On considèrera que cette valeur est identique à celle mesurée à température ambiante (~20°C). Cette hypothèse est plus conservative puisque l'agitation moléculaire augmentant avec la température, ce coefficient doit également augmenter lorsque la température croît. La diffusion de l'hélium dans l'air à 20°C est donc plus importante qu'à –29°C.

$$t_{Hom_BlocCouché\&Immobile} \approx \frac{x^2}{D} = \frac{20^2}{0{,}62} = 645s \approx 11min$$

On voit donc qu'en stockant la bouteille couchée après gonflage, le temps maximal d'homogénéisation est très fortement diminué. Ceci est corroboré par les renseignements pris auprès de la société Air Liquide qui indique une forte diminution du temps d'homogénéisation des mélanges lorsque les bouteilles sont conservées en position couchée.

En conclusion on peut dire que l'ordre de grandeur théorique du temps maximal d'homogénéisation d'un mélange trimix est le suivant :

- **De l'ordre de 9 heures si le bloc est stocké en position debout.**
- **De l'ordre de 1 à 2 heures si le bloc est stocké en position couchée.**

Nous allons maintenant voir comment on peut encore diminuer ce temps d'homogénéisation ou augmenter la marge de sécurité que l'on prend.

4.4.2. Influence de l'ordre d'injection des gaz.

Tout d'abord on peut remarquer que l'ordre d'injection des différents gaz joue un rôle important dans l'homogénéisation du mélange.

Des contacts auprès de la société Air Liquide sur leurs procédures d'homogénéisation ont permis de confirmer que l'homogénéisation est d'autant plus rapide qu'on introduit, de manière séquentielle, les gaz dans l'ordre croissant de leur masse molaire respective. Donc, si on injecte en premier l'hélium, puis l'azote et enfin l'oxygène, le mélange est homogène quasiment instantanément. De même si on injecte de l'air ou un nitrox dans de l'hélium.

Cette méthode, facilement réalisable dans un contexte industriel, est plus complexe à mettre en œuvre dans un contexte de plongée sportive. En effet, on utilise souvent des transferts de gaz par différence de pression partielle entre le réservoir de gaz pur (en général une B50) et le bloc de plongée. Lorsque ce transfert n'est pas possible (pression du bloc supérieure à celle de la B50) on comprime alors le gaz pur avec un compresseur de plongée classique. Or, on sait que ce type de matériel ne doit pas être utilisé pour comprimer un mélange trop enrichi en oxygène à cause de la présence conjointe d'huile et de chaleur dans les étages de compression ce qui entraîne un risque très important de combustion de l'huile et de dégradation du compresseur.

En revanche, si on utilise un surpresseur compatible avec l'oxygène, cette procédure peut être mise en place. Le temps d'homogénéisation est alors quasiment instantané (i.e : inférieur à 1 heure), pour peu qu'on ait gonflé de manière classique (i.e. : en un temps minimal).

Afin de **pouvoir utiliser cette technique dans un cadre de plongée sportive** on peut « renverser » le problème. En effet, si on utilise un tube plongeur allant jusqu'au fond du bloc, ou si on **gonfle le bloc à l'envers** avec un tube plongeur classique, on peut inverser l'ordre d'injection des gaz, c'est-à-dire injecter du plus lourd (oxygène) au plus léger (hélium) en conservant un temps d'homogénéisation très faible.

Cette diminution du temps d'homogénéisation est **due à la turbulence** créée lors de l'injection des gaz dans le bloc. Cette turbulence de jet est assez importante, surtout pour un jet d'Hélium dans de l'air initialement au repos comme on peut le voir sur la Figure 4.4. En effet, si on compare la forme de ce jet avec celles présentées à la Figure 4.3 (jet de CO2 dans de l'air, c'est-à-dire de gaz ayant des masses molaires très proches) on constate que la turbulence créée par un jet d'hélium dans de l'air est beaucoup plus importante que celle d'autres gaz. Cette augmentation du mélange turbulent vient principalement des jets collatéraux que l'on voit apparaître à partir d'une certaine vitesse d'injection (de l'ordre de 10m/s).

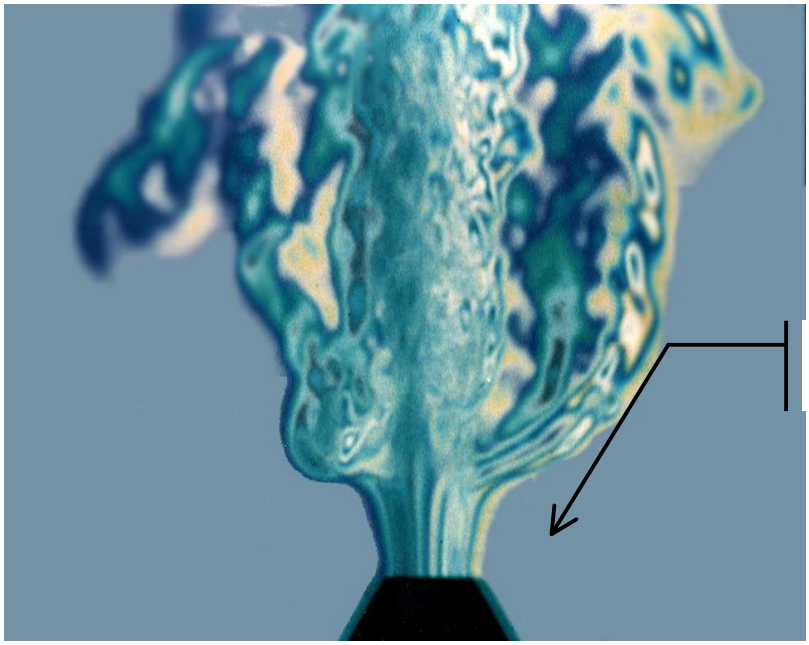


Figure 4.4 : Jet ascendant d'Hélium à environ 10m/s dans l'air initialement au repos (extrait du site http://www.imft.fr).

Ces jets collatéraux (et donc le mélange turbulent) sont d'autant plus importants que la **vitesse d'éjection de l'hélium dans le mélange initial (air ou nitrox) sera grande**. On peut évaluer cette vitesse en suivant la procédure suivante :

1. *Calculer le débit massique moyen d'hélium :* il suffit de mesurer le temps mis pour injecter la totalité de l'hélium dans le bloc de plongée et, en considérant que l'hélium est un gaz parfait[42], en déduire le nombre de moles de gaz transvasées de la B50 au bloc de plongée. Grâce à la masse molaire de l'hélium (4g/mol) on en déduit la masse d'hélium transvasé puis, en divisant par le temps, le débit massique moyen d'hélium transvasé.
2. *Calculer la vitesse d'éjection de l'hélium :* le débit massique moyen est égal au produit de la vitesse moyenne d'éjection par la surface de la section de passage du tube plongeur.

Si cette vitesse est supérieure à 10m/s alors on sait que les jets collatéraux sont apparus. Le mélange turbulent aura donc été très important et le temps d'homogénéisation très faible (inférieur à l'heure).

Remarque importante : Les jets collatéraux n'apparaissent, à partir de cette vitesse d'injection, **que dans le cas où l'écoulement d'hélium dans l'air (ou dans un nitrox) est ascendant**, c'est-à-dire que le gonflage aura été fait avec le **bloc retourné** et que **l'oxygène et l'azote auront été mis en premier**. Dans le cas d'un écoulement descendant ces vitesse ne sont pas du tout les mêmes et les conclusions de ce paragraphe ne seraient pas les mêmes.

En conclusion on peut dire que :

- Le temps maximum d'homogénéisation d'un mélange trimix est compris entre 2 et 9 heures selon qu'on stocke le bloc de plongée couché ou debout.
- On peut réduire ce temps d'homogénéisation (dans le cas du temps le plus long) ou augmenter la marge de sécurité (dans le cas du temps le plus court) en gonflant le bloc la tête vers le bas et en vérifiant que la vitesse moyenne d'injection de l'hélium dans le nitrox (ou l'air) est supérieure ou égale à 10m/s. Dans ce cas le temps d'homogénéisation est de l'ordre de 1 heure (temps nécessaire à la tranquilisation du mélange).

De manière pratique, et dans un cadre de plongée sportive, on peut conseiller de préparer les mélanges trimix la veille du jour où l'on souhaite s'en servir, avec un stockage en position couchée, ce qui laisse une marge de sécurité plus que confortable.

[42] Ce qui n'est pas totalement vrai puisqu'une B50 d'hélium ne contient pas $10m^3$ de gaz mais environ $9m^3$.

Dans un cas d’urgence, par exemple lors d’un secours de plongée souterraine nécessitant des plongées profondes répétées, on pourrait mettre en place es procédures afin de pouvoir utiliser des mélanges dans l’heure suivant leur réalisation.

5. DE L'EAU ET DES BULLES !

5.1. « SUIVRE LES PETITES BULLES » : OUI, MAIS LESQUELLES ?

Bref extrait d'un dialogue entre un moniteur et son élève :

- *Le moniteur* : « Bon alors c'est très facile. Pour remonter à vitesse constante il te suffit de suivre les petites bulles. Fait quand même attention qu'une petite bulle grossit au fur et à mesure de sa montée en application de la loi de Mariotte. Il faut donc changer régulièrement de bulle mais toujours en prenant les petites bulles pour référence ».
- *L'élève* : « OK, mais les petites bulles ce sont lesquelles ? ».
- *Le moniteur* : « Ben les petites ».
- *L'élève* : « Ah oui, les toutes petites ! ».
- *Le moniteur (d'un air agacé)* : « Mais non, pas les toutes toutes petites, celles qui sont un peu plus grosses ! ».
- *L'élève (d'un air résigné)* : « OK, pas les toutes toutes petites ! ».

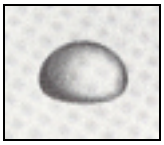
Bref extrait d'un (autre) dialogue entre un moniteur et son élève :

- *L'élève* : « Lorsque j'ai passé mon 1er échelon (ça ne s'appelait pas encore niveau 2) on me disait de remonter à 17 mètres par minutes. Maintenant que je passe mon niveau 3 (quelques quinze ans après) on me dit qu'il faut que je remonte à 10 mètres par minutes afin de ne pas faire couiner mon ordinateur. ».
- *Le moniteur* : « Oui et alors ? ».
- *L'élève* : « Eh bien ce qui m'embête c'est que l'on me dit toujours de suivre les petites bulles ! Alors qu'en toute logique cela ne devrait pas être les mêmes qu'avant. J'imagine que les petites bulles n'ont pas acheté d'ordinateur de plongée et n'ont donc pas modifiée leurs vitesses de remontée ! ».
- *Le moniteur (d'un air gêné)* : « Euh…. !!! ».

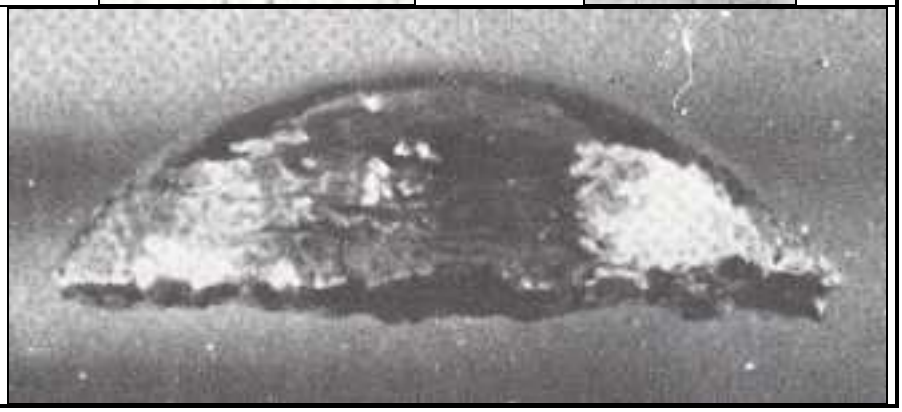
Ces deux extraits de dialogues (presque) imaginaires mettent en avant la chose suivante : sous des apparences simples, voire simplistes, la relation entre la vitesse d'une bulle et sa forme ainsi que sa taille est loin d'être évidente et surtout, est inconnue de la plupart des plongeurs (ce qui est tout à fait normal car, nous le verrons ci-dessous, cette relation fait intervenir plusieurs éléments difficiles à appréhender ensemble).

De nombreux travaux scientifiques sont dédiés à l'étude de ce genre de problèmes[43]. Le but de ce paragraphe est donc d'essayer d'aider ce moniteur afin que, la prochaine fois, il puisse répondre plus précisément à son élève.

En observant attentivement une colonne de bulle venant de l'expiration d'un plongeur on peut constater qu'elle est composée de plusieurs types de bulle. Le tableau ci-dessous montre certaines de ces bulles en indiquant leur noms :

Nom du type de bulle	Photographie du type de bulle (extrait de [4])
Sphérique	Voir Figure 5.1 la bulle en haut à gauche
Sphéroïde	
Ellipsoïdale	

[43] L'étude de ces problèmes fait partie de ce que l'on appelle les écoulements diphasiques (i.e. : à 2 phases) car ils font intervenir, dans ce cas, les phases liquides et gazeuses.

Calotte Sphérique	
Calotte Sphérique ondulée	

Etudions maintenant la relation entre la forme, la vitesse et les dimensions d'une bulle. En observant les bulles ci-dessus, on peut facilement arriver à la conclusion que la vitesse d'une bulle dépend des paramètres suivants :

1. Sa taille, par l'intermédiaire de son volume. En effet, plus une bulle a un volume important et plus son poids apparent[44] sera négatif ce qui aura tendance à la faire remonter plus vite.
2. Sa forme. En effet, selon sa forme, l'écoulement autour de la bulle créera une force de traînée plus ou moins importante (cf. §3.3.1) ce qui aura tendance à la ralentir plus ou moins (cf. Figure 5.1).

Ceci est appliqué aux exemples de bulles suivants :

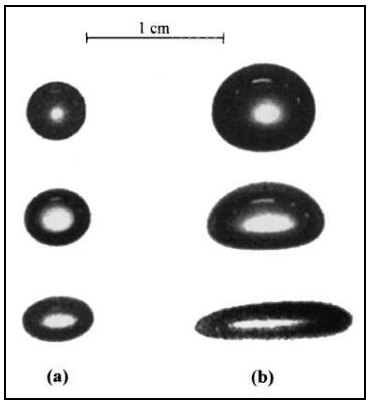


Figure 5.1 : Visualisation de bulles avec des formes et des volumes différents. Les volumes des bulles sont égaux à (a) : 50mm^3, (b) : 200mm^3 (extrait de [10]).

Les bulles des colonnes (a) et (b) ont, respectivement, les mêmes volumes (50 et 200mm^3). La poussée d'Archimède va donc être identique pour chaque bulle sur une même colonne. En revanche, leur forme n'est pas identique. Du fait de leur forme plus allongée présentant une surface (i.e. : un maître-couple) résistante à l'écoulement plus importante, les bulles en bas des colonnes, vont moins vite que celles situées en haut de chaque colonne. En schématisant le problème on peut dire que le volume de la bulle sert à augmenter sa vitesse alors que sa forme tend à la faire ralentir. Là où apparaît la difficulté c'est que la bulle est quelque chose de déformable, au

[44] $P_{apparent} = P_{réel} - P_{archimède}$.

On peut exprimer cette relation bien connue sous la forme suivante : $P_{Apparent} = V_{Bulle} \times (\rho_{Bulle} - \rho_{Eau})$.

Or, la masse volumique de l'eau (1kg/L) est très supérieure à celle de la bulle, essentiellement constituée d'air (10^{-3}kg/L).

L'augmentation du volume de la bulle conduit donc à augmenter fortement la poussée d'Archimède au détriment d'une très faible augmentation du poids réel de la bulle. Le poids apparent diminue donc fortement lorsque le volume de la bulle augmente ce qui augmente fortement la vitesse de remontée.

contraire d'un objet solide. L'augmentation de la vitesse de la bulle va, en modifiant les forces hydrodynamiques qui s'y appliquent, modifier sa forme, ce qui modifiera en retour sa vitesse et ainsi de suite[45].

La relation « forme – volume – vitesse » d'une bulle est un sujet toujours très étudié en mécanique de fluides. Ces études portent, en règle générale, sur une bulle placée dans un liquide au repos et dans un écoulement non perturbé par la présence d'autres bulles. Nous allons faire l'hypothèse que nous sommes dans ce cas en plongée lors d'une remontée[46]. On a alors le graphique suivant qui donne la vitesse terminale d'une bulle en fonction de son diamètre équivalent[47] à 20°C :

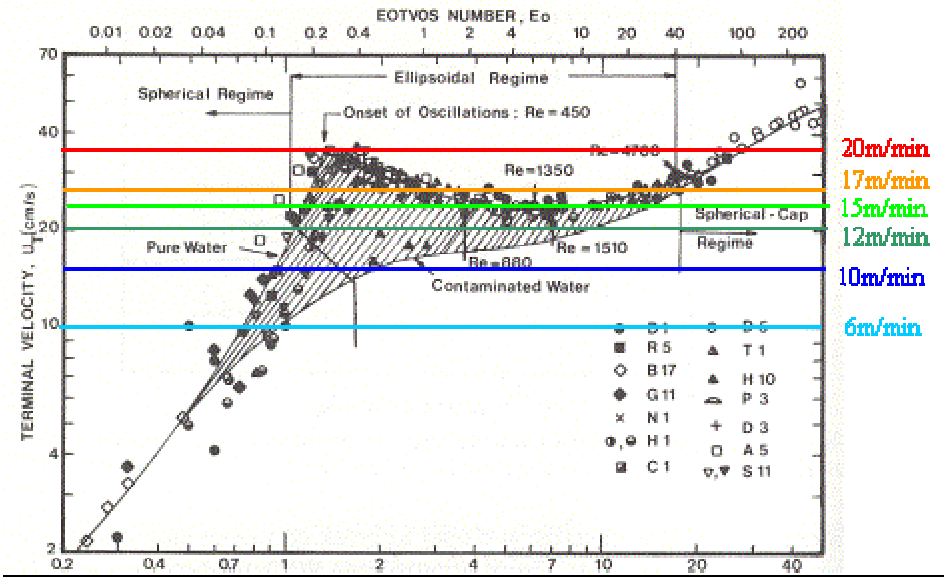


Figure 5.2 : Vitesse terminale d'une bulle en fonction de son diamètre équivalent (à 20°C) (extrait de [4]).

Grâce à ce graphique on peut en déduire le tableau suivant :

Vitesse de la bulle en m/min	Vitesse de la bulle en cm/s	Forme(s) de la bulle	Diamètre équivalent
20	33,33	2 possibilités : 1. Ellipsoïdale 2. Calotte Sphérique avec ondullations	2 possibilités : $d_{e1} \approx 1{,}3$mm de2 ≈ 30mm
17	28,33	2 possibilités : 1. Ellipsoïdale 2. Calotte Sphérique	3 possibilités : $d_{e1} \approx 1{,}1$mm $d_{e2} \approx 3$mm $d_{e3} \approx 18$mm
15	25	Ellipsoïdale	2 possibilités : $d_{e1} \approx 1{,}1$mm $d_{e2} \approx 7$mm
12	20	Sphérique	$d_e \approx 1$mm

[45] *Pros :* La forme des bulles dépend des forces suivantes qui s'appliquent sur elle :

- Les forces de pression dynamique dues au mouvement de la bulle au sein du liquide et qui dépendent des caractéristiques de l'écoulement et du fluide dans lequel a lieu cet écoulement (vitesse, masse volumique et viscosité du fluide, taille de la bulle).
- Les forces de pression statiques (pression hydrostatique) qui s'appliquent sur la bulle puisqu'elle est placée au sein du liquide.
- Les forces de tension superficielle dues à la présence d'une interface entre 2 phases différentes (gaz-liquide).

La forme des bulles résulte de l'importance relative de ces forces les unes par rapport aux autres.

[46] L'hypothèse du liquide au repos est justifiée lorsqu'il n'y a ni courant ni houle prononcés. Celle d'une bulle isolée ne ressentant pas l'influence d'autres bulles proche d'elle l'est beaucoup moins mais est envisageable si on attend suffisamment longtemps après l'éjection des bulles lors de l'expiration.

[47] Le diamètre équivalent (noté d_e) d'une bulle est le diamètre qu'aurait une bulle sphérique de même volume.

10	16,67	Sphérique	$d_e \approx 0,9mm$
6	10	Sphérique	$d_e \approx 0,7mm$

On peut alors en déduire, après calcul des dimensions de la bulle en fonction de son diamètre équivalent et de sa forme, le tableau suivant :

Vitesse de la bulle	Forme et dimensions de la bulle
20m/min	Ellipsoïdale de grand axe environ égal à 2mm Ou Calotte sphérique avec ondulations de diamètre à la base environ égal à 18cm
17m/min	Ellipsoïdale de grand axe environ égal à 1,6mm Ou Ellipsoïdale de grand axe environ égal à 3,5mm Ou Calotte sphérique de diamètre à la base environ égal à 15cm
15m/min	Ellipsoïdale de grand axe environ égal à 1,6mm Ou Ellipsoïdale de grand axe environ égal à 1cm
12m/min	Sphérique d'un diamètre d'environ 1mm
10m/min	Sphérique d'un diamètre d'environ 0,9mm
6m/min	Sphérique d'un diamètre d'environ 0,7mm

On peut en déduire les éléments suivants :

- Il est impossible, en se basant sur la forme et la taille des bulles, de différencier, à l'œil nu, des bulles de vitesse comprise entre 6 et 12m/min[48]. Cela veut donc dire que **pour des vitesses de remontée comprises dans cette fourchette, il n'est pas nécessaire de donner le conseil de suivi des bulles aux élèves car il ne leur sera d'aucune utilité**. On peut en revanche leur dire qu'ils ne doivent pas dépasser les bulles sphériques d'environ 1mm de diamètre sinon ils iront trop vite.
- Si l'on souhaite remonter aux alentours de 15m/min il faut se trouver à la vitesse où les bulles ellipsoïdales d'environ 1,6mm et 1cm de grand axe cohabitent.
- Si l'on souhaite remonter aux alentours de 17m/min il faut se trouver à la vitesse où les bulles ellipsoïdale d'environ 1,6mm et 3,5mm de grand axe cohabitent avec les bulles en forme de calotte sphérique d'environ 15cm de diamètre à la base.
- Si l'on souhaite remonter aux alentours de 20m/min il faut se trouver à la vitesse où les bulles ellipsoïdale d'environ 2mm de grand axe cohabitent avec les bulles en forme de calotte sphérique avec des ondulations à leur surface d'environ 18cm de diamètre à la base.

Cette étude nous apprend que le suivi des petites bulles pour remonter à une vitesse donnée est en fait tout un art et que les conseils simples que nous donnons à nos élèves, ou que nous avons reçu de nos moniteurs, peuvent parfois se révéler bien plus complexes que ne pourrait le prédire le sens commun. **Nos sensations visuelles et d'accélération, ainsi que le chronomètre associé à un profondimètre restent donc les éléments les plus sûrs à notre disposition pour évaluer correctement une vitesse de remontée en plongée[49].**

5.2. DYNAMIQUE DES RONDS DE BULLE.

On voit parfois des personnes (souvent au palier) s'amuser à faire des ronds de bulles dans l'eau, un peu comme les fumeurs font des ronds de fumée dans l'air. Outre l'aspect très esthétique de cette pratique et le fait que cela permet de faire passer le temps, l'observateur attentif remarquera les éléments suivants :

- La réalisation de ces ronds de bulles n'est pas évidente.
- Le diamètre du rond de bulle augmente au fur et à mesure que la bulle remonte.

[48] En effet, faire la différence, à l'œil nu et sous l'eau (avec un masque modifiant les distances et les tailles), entre une bulle de 0,7mm et 1mm de diamètre relève de l'impossible.

[49] On pourrait concevoir des sphères rigides remontant à une vitesse donnée. Cela permettrait de faciliter l'apprentissage de la remontée à vitesse constante en donnant un repère visuel à l'élève. Cela pourrait également constituer un élément supplémentaire de sécurité. Si quelqu'un est intéressé pour fabriquer ce genre d'ustensile je suis tout à fait près à lui fournir les dimensions exactes en fonction de la vitesse de remontée choisie (les équations n'étant pas les mêmes que pour une bulle on ne peut pas appliquer les éléments de la Figure 5.2).

- La vitesse de remontée du rond de bulle n'est pas constante. Elle est plus rapide au début et, plus on se rapproche de la surface, plus celle-ci diminue.
- Lorsque le rond de bulle arrive proche de la surface celui-ci semble ne pas vouloir 'percer' la surface.

Nous allons, à l'aide de connaissances en mécanique des fluides, essayer d'expliquer ces éléments. Regardons tout d'abord le principe de création d'un anneau de bulle. Celui-ci résulte de deux éléments bien distincts. Dans un premier temps il est nécessaire de créer un anneau tourbillonnaire (tourbillon refermé sur lui-même) de forme toroïdale (i.e : en forme de tore) et d'y injecter de l'air. Ensuite, c'est l'anneau tourbillonnaire qui vivra sa vie en emportant les bulles. Voyons d'abord comment créer un tourbillon refermé sur lui-même.

Pour créer un anneau toroïdal on utilise la propriété suivante des écoulements de jet : lorsqu'on éjecte un fluide (ex. : de l'air) dans un autre fluide au repos (ex. : de l'eau), il se créé, à partir d'une certaine vitesse[50], un tourbillon sur les cotés de la zone de jet car le fluide injecté entraîne avec lui le fluide au repos se trouvant dans son entourage. Ce mécanisme de formation est mis en évidence sur les deux figures ci-dessous :

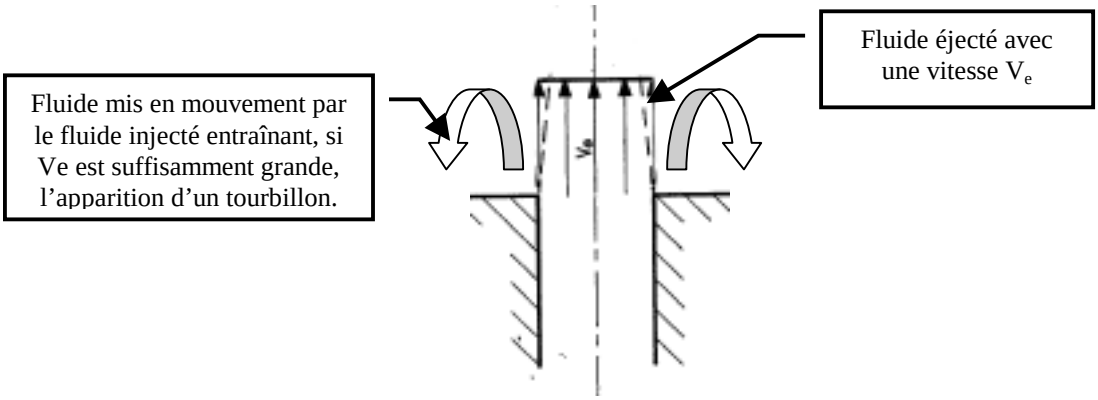


Figure 5.3 : Schéma de principe de réalisation d'un tourbillon en forme d'anneau tourbillon.

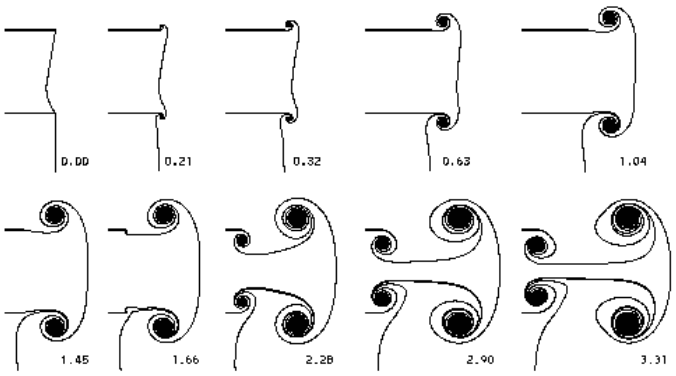


Figure 5.4 : Formation d'un anneau tourbillon lors de l'éjection d'un fluide dans un autre fluide.

En pratique, pour générer ce tourbillon, il suffit de souffler, avec une vitesse élevée (correspondante à celle qu'on obtient en soufflant de manière brève et intensive), un jet d'air dans l'eau avec la bouche en forme de cercle[51]. Ceci est mis en évidence sur la Figure 5.5.

[50] *Pros :* En réalité le critère important n'est pas la vitesse mais la turbulence créée par le jet. Si le jet est laminaire, il n'y aura pas de tourbillon. Si le jet est trop turbulent, il y a un nombre trop important de tourbillons qui sont alors de trop petite taille pour influencer le mouvement normal des bulles.

[51] Si la bouche n'est pas en forme de cercle on n'obtiendra pas un bel anneau mais plutôt un tore avec une base plus ou moins circulaire qui ne sera pas stable. La forme de la bouche lors de l'éjection de l'air est donc un paramètre fondamental pour réaliser de beaux ronds de bulle.

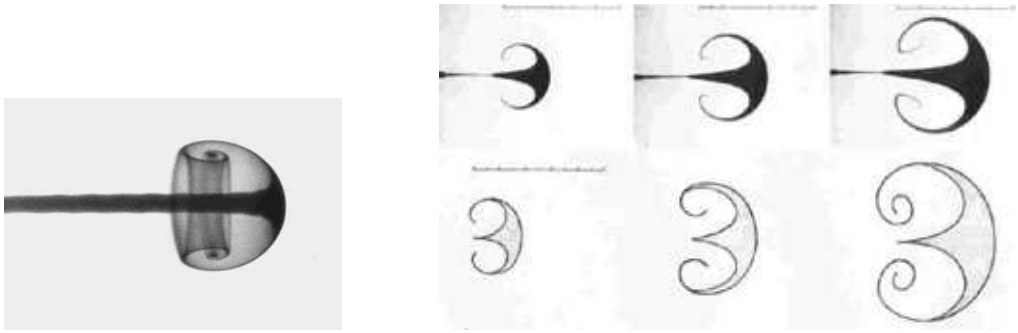


Figure 5.5 : Visualisations, par injection de colorant dans de l'eau, de la formation d'un anneau tourbillon (extrait de différents sites sur internet).

Ceci permet de créer un tourbillon en forme de tore dans lequel est emprisonné la quantité d'air que l'on a soufflé. L'énergie ayant servi à créer le jet d'air est transmise au tourbillon sous deux formes :

- La première partie sert à faire se déplacer l'anneau tourbillonnaire[52] avec une vitesse V
- La seconde partie sert à donner une certaine vitesse de rotation (Γ)[53] au tourbillon sur lui-même.

La figure suivante illustre ceci et donne la définition des différentes grandeurs dont nous allons nous servir maintenant :

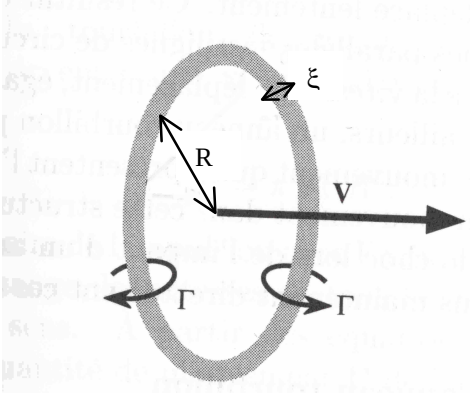


Figure 5.6 : Schéma d'un tourbillon toroïdal (extrait de [6]).

En résolvant les équations décrivant la dynamique des tourbillons[54] on obtient l'expression exacte de la vitesse V du rond de bulle :

$$V = \frac{\Gamma}{4\pi R}\left(\mathrm{Ln}\frac{8R}{\xi} - \frac{1}{2}\right)$$

Cette expression nous permet de mieux comprendre les éléments suivants :

- La vitesse de déplacement du rond de bulle est directement proportionnelle à la vitesse de rotation de l'anneau sur lui-même. On peut donc en déduire que, si l'on souhaite faire un rond

52 Remarque : Le tourbillon contenant des bulles d'air, il est préférable que V soit orienté verticalement vers le haut. Dans ce cas, la vitesse du tourbillon sera dans le même sens que la vitesse des bulles ce qui évitera que le tourbillon ne soit perturbé (voire détruit) par les bulles. Il est donc préférable, si l'on souhaite que le rond de bulles reste intact le plus longtemps possible, de diriger sa bouche parallèlement à la surface et dirigée vers celle-ci.

53 *Pros :* En réalité Γ n'est pas la vitesse de rotation mais la circulation de la vitesse autour de l'anneau tourbillonnaire. On a par définition : $\Gamma = \int_{\text{Contour}} \vec{V}.\vec{tdl}$ ce qui, en faisant l'hypothèse que le tourbillon est plan, se réduirait à : $\Gamma = 2\pi\omega_0\xi^2$ où ω_0 est la vitesse de rotation du tourbillon. Par souci de simplification on a confondu, dans le texte, circulation de la vitesse et vitesse angulaire.

54 Dans le cas présent on utilise une analogie entre un anneau tourbillonnaire et le champ magnétique produit par un fil conducteur. L'ensemble du calcul est présenté dans la référence [6] au chapitre 7.

de bulle se déplaçant rapidement, il faut lui donner une vitesse de rotation importante ce qui peut se faire en soufflant très fortement et sur un temps bref le maximum d'air.

- Au fur et à mesure de sa montée, le rond de bulle a tendance à être freiné par l'eau qui l'entoure et qui est, initialement, au repos. Cela tend à faire diminuer la vitesse de déplacement (V) de l'anneau tourbillonnaire. On peut alors voir, au prix d'une analyse mathématique plus poussée de l'équation ci-dessus[55], que cette diminution de vitesse de déplacement entraîne une augmentation du rayon R de l'anneau. On comprend alors pourquoi le rayon de l'anneau tourbillonnaire augmente lors de sa montée vers la surface.
- On voit également que le rapport entre le rayon du rond de bulle et celui de l'anneau en lui-même, joue un rôle dans la vitesse de déplacement. Toutes choses étant égales par ailleurs, un rond de bulle plus fin donnera une vitesse de remontée plus importante à l'anneau de bulle.

Enfin, le dernier comportement singulier d'un rond de bulle est probablement le plus spectaculaire. En effet, lorsque le rond de bulle atteint la surface on pourrait s'attendre à ce qu'il la perce directement comme le ferait une bulle. Or, il n'en est rien.

Lorsqu'on regarde attentivement, on constate que le rond de bulle a tendance à rester à une distance fixe de la surface et que son rayon augmente. Tout se passe comme si le rond de bulle voyait un autre 'rond de bulle', identique à lui-même et qui se situerait de l'autre coté de la surface. Dans ce cas, la vitesse de déplacement vers le haut (V) doit diminuer d'autant plus vite que le rond de bulle est proche de la surface, jusqu'à s'annuler à la surface. Il faut donc, d'après l'expression de V donnée ci-dessus que le rayon du rond de bulle augmente à l'infini. Ceci est illustré à la Figure 5.7 où l'on voit un anneau de bulle proche de la surface avec son « image » de l'autre coté de cette surface :

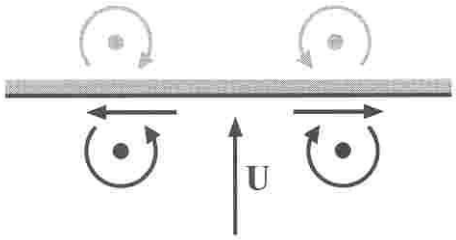


Figure 5.7 : Impact d'un anneau tourbillonnaire sur la surface de l'eau (extrait de [6]).

Donc, en théorie, le rond de bulle n'atteindra jamais la surface puisque son « image » l'empêchera de remonter tout en faisant augmenter indéfiniment son rayon. En pratique, l'eau n'étant pas parfaitement au repos et les bulles ayant tendance à rejoindre la surface, ce petit jeu ne durera pas éternellement.

5.3. JEUX DE DAUPHINS.

Sur le site 'www.earthtrust.com' on peut voir des dauphins réalisants différents types de ronds de bulles avec leur évent afin de jouer avec. En particulier, l'une de ces figures peut être réalisée par un plongeur et permet d'observer un phénomène assez particulier : les ronds de bulle jouent à saute-mouton.

[55] *Pros :* Il suffit de remarquer que : $\lim_{R->\infty} \frac{Ln(R)}{R} = 0$

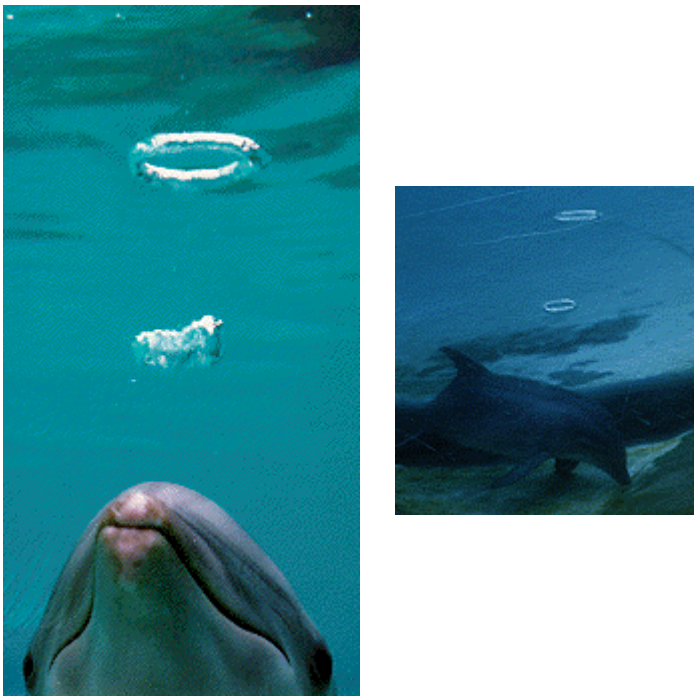


Figure 5.8 : Dauphins essayant de jouer à saute-mouton (extrait du site http://www.earthtrust.com).

Il suffit pour cela de générer 2 ronds de bulles identiques (A1 et A2) et assez rapprochés. L'interaction de ces deux tourbillons (mise en évidence sur la Figure 5.9) conduit à ce que l'anneau tourbillonnaire situé derrière l'autre (A1) passe à l'intérieur de l'anneau qui le précède (A2), tandis que son rayon diminue. Ce rayon diminuant, la vitesse de déplacement du tourbillon A1 augmente (cf. §5.2) ce qui amène ce tourbillon à dépasser celui situé devant lui. Ce phénomène se reproduit alors avec l'autre anneau et ainsi de suite. On assiste alors à une sorte de 'saute-mouton' perpétuel entre les deux tourbillons. Ceci est mis en évidence sur la figure ci-dessous :

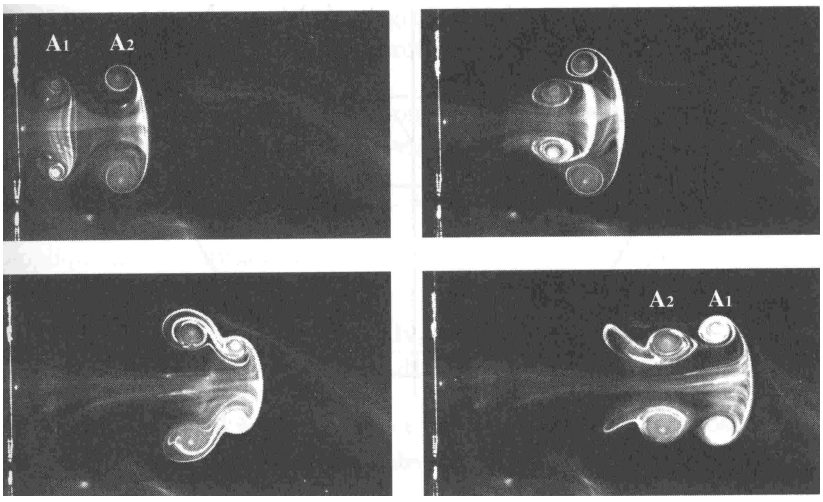


Figure 5.9 : Mouvement relatif en 'saute-mouton' de deux anneaux tourbillons (extrait de *An album of Fluid Motion* de M. Van Dyke).

En pratique, lorsqu'on s'amuse à ce jeu sous-marin, on n'arrive pas à voir plus de 2 ou 3 chevauchements successifs car les tourbillons se détruisent assez rapidement. C'est parce que les bulles tendent à perturber les tourbillons dans leur mouvement jusqu'à les détruire totalement.

5.4. TORDRE LE COU AUX IDEES REÇUES : L'AIR PEUT-IL FAIRE COULER ?

L'objectif de ce paragraphe est de corriger une erreur trouvée dans un livre d'exercices de plongée. Cette erreur n'est pas grave mais elle débouche sur une conclusion qui se veut pratique mais néanmoins incorrecte. Cette

conclusion est que, pour faciliter l'exercice de sauvetage à la palme d'une personne, il ne faut surtout pas se placer dans la colonne de bulle créée par la respiration des deux plongeurs (sauveteur+sauvé). Or, ceci est totalement faux et est même **contraire à la réalité**. Nous allons donc reprendre le raisonnement de l'exercice pour trouver l'endroit où le raisonnement « dérape ».

Cet exercice est le suivant : *Un sphère solide (diamètre 25cm, densité par rapport à l'eau de 0,8, volume V) flotte à la surface d'un récipient rempli d'eau pure. Au moyen d'un diffuseur placé au fond du récipient, on injecte un nuage de fines bulles d'air, dont le volume total occupe 10% de celui de la phase liquide. La question posée est de calculer la fraction en pourcentage du volume du corps qui émerge de l'eau. La suite du problème consiste à voir l'évolution de ce pourcentage si on augmente le débit d'air à 20 puis 25% du volume.*

Le raisonnement du corrigé de l'exercice est le suivant : en injectant de l'air dans l'eau celle-ci voit sa densité diminuer. Par exemple, si l'air occupe 10% du volume d'eau alors la densité de l'eau n'est plus que de 0,9 (au lieu de 1 pour de l'eau pure). Si l'on augmente cette fraction du volume d'eau occupée par l'air à 20%, puis 25%, la densité de l'eau devient respectivement égale à 0,8, puis 0,75. La sphère, dont la densité est de 0,8 flotte donc dans de l'eau pure (dont la densité est de 1) mais coule dans de « l'eau » de densité 0,75.

Jusque là, il n'y a aucune erreur de raisonnement. En effet, il est totalement vrai que si l'on place de l'air **sans mouvement** dans de l'eau, l'émulsion obtenue a une densité plus faible que l'eau pure. La poussé d'Archimède subie par un corps plongé dans cette émulsion est donc plus faible[56].

La conclusion du problème est alors la suivante : « *Dans sa colonne de bulles, le poids apparent du plongeur augmente, du fait de la diminution de la poussée d'Archimède. De ce point de vue, il se trompe* (ndla : en pensant que ce sera plus facile de remonter dans la colonne de bulles), *ce qui ne doit pas l'empêcher de remonter aussi verticalement que possible.* ».

En fait, c'est là que se situe l'erreur de raisonnement. Les auteurs ont confondu la statique des fluides avec un raisonnement de dynamique des fluides. Le fait d'injecter de l'air en mouvement modifie totalement les lois en présence puisque l'on passe d'un fluide au repos à un fluide en mouvement par addition de ces bulles. En effet, lorsqu'une bulle est en mouvement elle possède une certaine quantité de mouvement (cf. §3.2.1) qu'elle va transmettre, non seulement à l'eau environnante (ce qui créera un courant d'eau vers le haut), mais également, si elle vient à entrer en contact avec un corps solide, à ce corps. **La bulle cèdera donc une partie de son impulsion à ce corps solide** (i.e. : le plongeur), ce qui aura tendance à le faire remonter. Le courant d'eau créé par les bulles participera également à cette remontée puisque c'est l'eau qui, en s'écoulant autour du plongeur, créera une force de portance.

En pratique on peut mettre cela en évidence de plusieurs façons :

- Dans une fosse de plongée en se plaçant juste au-dessus du chapelet de bulles créé par les plongeurs en dessous (lors d'un jour de grande affluence dans le bassin de 20 mètres par exemple). On constate alors que, même en étant parfaitement équilibré avec le gilet, qu'on remonte avec une vitesse non négligeable. Arrivé en surface on est même littéralement emporté par le courant généré par les bulles.
- Lors de l'ancien exercice du MF2 qui consistait à remonter de 40 mètres avec le gilet gonflé et à devoir s'arrêter à 3 mètres. Chaque candidat MF2 savait que, s'il voulait s'arrêter à 3 mètres, il devait absolument se dégager de sa propre colonne de bulle car celle-ci, en le rattrapant, le faisait remonter à la surface, l'invitant ainsi à revenir à une prochaine session.

Le corrigé de l'exercice en question n'est donc pas, d'un point de vue physique, correct. Il n'en demeure pas moins que le raisonnement qu'il propose est intéressant et que l'on peut féliciter les auteurs de cet ouvrage pour avoir mis à jour ce paradoxe.

Cet exemple illustre parfaitement la spécificité de la mécanique des fluides en montrant qu'un raisonnement adapté à un corps au repos dans un fluide également au repos, n'est plus forcément juste lorsque ces éléments sont en mouvement les uns par rapport aux autres.

Cet exemple illustre également qu'une science complexe comme la mécanique des fluides peut avoir des applications pratiques pour un plongeur afin de l'aider non seulement dans la réalisation d'un exercice mais également, dans sa mission d'assurer sa propre sécurité et celle des autres.

---

[56] *Pros :* Ceci est vrai tant que la réalisation de cette émulsion ne change pas la nature physico-chimique du liquide initial. Par exemple, dans le cas de blancs d'œufs battus en neige, l'émulsion obtenue a bien une densité plus faible que le liquide initial (les blancs d'œufs non battus) et pourtant, un objet placé sur cette émulsion reste à sa surface.

6. CONCLUSION

L'objectif principal de ce mémoire était d'expliquer et de faire comprendre, à l'aide d'éléments simples et compréhensibles de mécanique des fluides, certains phénomènes, comportements ou questions techniques observés en plongée-sous-marine.

Nous avons étudié les principes de fonctionnement des palmes et avons constaté que l'apparition de nouveaux concepts de palmes résultait d'une tendance visant à adapter le matériel à l'homme. Il nous semble important de **mettre en place une cellule de réflexion visant à étudier l'impact de ces nouveaux types de palmes sur la formation actuelle** délivrée aux plongeurs de la FFESSM dans le domaine du palmage. En effet, comme nous l'avons vu au paragraphe 3.7, les différents scenarii d'impact du développement de ce style de palmes sur la formation à l'utilisation des palmes pourraient amener à devoir, soit **modifier des épreuves à différents examens** (comme le N4 ou le MF2), soit **modifier le niveau à partir duquel cette formation sera faite**. De plus, nous devons, a minima, **diffuser une information claire** sur ces nouveaux types de palmes à l'adresse des moniteurs et des plongeurs afin de leur faire comprendre les principales caractéristiques de ces palmes ainsi que, éventuellement, les modifications pédagogiques qu'elles sont susceptibles d'entraîner.

De plus, nous avons montré que l'enseignement, par exemple lors des séances pratiques dédiées à la nage avec des palmes, d'éléments simples d'hydrodynamique des palmes permettait aux élèves de mieux tirer parti de leurs palmes et de faire un choix raisonné lors de leur achat.

Les autres paragraphes de ce mémoire ont permis de constater que quelques connaissances en mécanique des fluides permettaient de reconsidérer des éléments transmis de génération en génération de moniteurs comme, par exemple, les bulles à suivre selon la vitesse de remontée, ou encore le fait de devoir remonter dans ou hors d'une colonne de bulles. Ces connaissances nous ont également permis de clarifier les problèmes de temps d'homogénéisation des mélanges trimix.

De nombreux sujets n'ont pu être abordés, faute de temps, dans ce mémoire. On peut citer en particulier le problème des modèles de décompression faisant intervenir des éléments de mécanique des fluides diphasiques (ex. : modèles VPM et RGBM), ou bien les évolutions visant à diminuer la perte de charge dans la partie MP d'un détendeur, ou encore la dynamique particulière du sang qui se comporte tantôt comme de l'eau, tantôt comme une pâte, l'optimisation de la perte de charge dans les recycleurs, etc. Cela laisse encore du travail dans les années à venir !!!

7. BIBLIOGRAPHIE

[1] BHAGA D., WEBER M.E.
Bubbles in viscous liquids : shapes, wakes and velocities.
Journal of Fluid Mechanics ; Vol. 105 ; pp. 61-85 ; 1981.

[2] BREIDENTHAL R.E., BUONADONNA V.R., WEISBACH M.F.
Molecular mixing via jets in confined volumes.
Journal of fluid mechanics ; Vol. 219 ; pp. 531-544 ; 1990.

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

[4] CLIFT R., GRACE J.R., WEBER M.E.
Bubbles, Drops and Particles.
Academic Press, New York, 1978.

[5] GRAMMATICOS B.
La technique de nage en monopalme.
Document récupéré sur le site http://www.nageavecpalmes-ffessm.com .

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

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

[8] LIU Y., SO R.M.C., ZHANG C.H.
Modeling the bifrucating flow in an asymetric human lung airway.
Journal of Biomechanics ; Vol. 36 ; pp 951-959 ; 2003.

[9] MARTEN K., SHARIFF K., PSARAKOS S., WHITE D.
Les ronds d'air des dauphins.
Pour la Science ; n°228 ; Octobre 1996.

[10] RAYMOND F., ROSANT J.M.
A numerical and experimental study of the terminal velocity and shape of bubbles in viscous liquids.
Chemical Engineering Science ; Vol. 55 ; pp. 943-955 ; 2000.

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

[12] ZHANG Z., KLEINSTREUER C., KIM C.S.
Micro-Particle transport and deposition in a human oral airway model.
Journal of Aerosol Science ; Vol. 33 ; pp 1635-1652 ; 2002.

8. SITES INTERNET

[1] http://pou.guide.free.fr
Ce site a été largement utilisé pour rédiger le paragraphe 3.3.1, en particulier pour l'explication de la portance et de la traînée.

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

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