

Bases Biomécaniques de la natation :

La propulsion du nageur

1. Le modèle de propulsion basé sur la 3 ^{ème} loi de Newton (action / réaction) :	2
2. Le modèle de propulsion basé sur le principe de Bernoulli :	3
2.1. La pression dynamique	3
2.2. L'effet Venturi - l'équation de Bernoulli	3
2.3. Forces exercées par un fluide sur un profil	4
2.4. La notion de portance active aérodynamique.....	4
2.5. Utilisation de la théorie de la portance aérodynamique dans la propulsion aquatique.	5
3. Modèles de la propulsion aquatique.....	10
3.1. Modèles traditionnels de la propulsion aquatique	10
3.2. Modèles basés sur la portance de la propulsion aquatique	12
4. Principes communs aux 4 nages de compétition d'après Counsilman (1986).....	14
5. Modification de la terminologie décrivant les techniques de nage	15
6. Efficacité des actions propulsives	16
6.1. Indices morpho-fonctionnels	16
6.2. Indices mécaniques.....	16
7. Bibliographie.....	17

Introduction

Le nageur se trouve confronté à un double impératif :

Réduire les résistances à l'avancement s'opposant à son déplacement et augmenter les résistances propulsives créées par ses membres pour se déplacer plus vite. Le déplacement du nageur va donc être conditionné par la création et le maintien de ces résistances propulsives.

Ainsi, dans un cas, les résistances sont la conséquence de l'action de l'eau sur le corps subie « passivement » par le nageur. Dans l'autre cas, c'est le nageur qui crée activement ces résistances. Sur un plan théorique, ces résistances propulsives peuvent être créées selon différents modèles biomécaniques avec des efficacités très variables.

1. Le modèle de propulsion basé sur la 3^{ème} loi de Newton (action / réaction) :

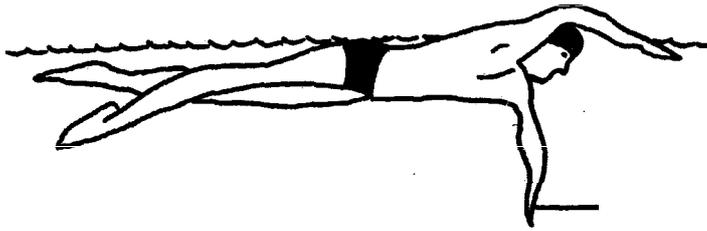
La troisième loi du mouvement de Newton intéresse directement toute la natation. En effet, à chaque action s'oppose une réaction inverse équivalente. De fait, si un nageur veut se déplacer dans une direction, il doit exercer une poussée avec ses membres dans la direction opposée.

Cela se traduit pour le nageur par une orientation des surfaces propulsives (par exemple la main) perpendiculairement au sens de déplacement, avec une direction des forces propulsives parallèle au déplacement.. Cette recherche d'une action propulsive doit intégrer la spécificité du milieu liquide à savoir que les molécules d'eau sont fuyantes et que tout mouvement réalisé perpendiculairement au sens de déplacement doit être effectué en accélération progressive. De fait, cette accélération va permettre d'emmener et de s'appuyer sur une même masse d'eau durant tout le trajet moteur. Si le mouvement n'est pas accéléré mais uniforme, alors les molécules d'eau pourront s'échapper de derrière la main et la propulsion sera très faible voire nulle.

Ainsi, ce modèle est basé sur 2 principes :

- orientation des surfaces propulsives perpendiculairement au sens de déplacement et donc direction des forces propulsives parallèle au déplacement

- appui sur une masse d'eau et accélération progressive de l'appui pour conserver cette masse d'eau tout au long du trajet propulsif.



Action du bras <-----> **Réaction**

Force exercée dans le sens inverse du déplacement Force égale et opposée à l'action du bras

2. Le modèle de propulsion basé sur le principe de Bernoulli :

2.1. La pression dynamique

Tout corps en mouvement possède, de par sa masse et sa vitesse une certaine quantité d'énergie que l'on appelle énergie cinétique. Il en est de même. Pour les fluides.

Ainsi, une masse d'eau ayant une certaine vitesse possède une certaine énergie cinétique. On l'appelle pression dynamique.

Si l'on se place face à un courant d'eau, on sent nettement cette pression qui est parallèle à la vitesse de l'eau.

2.2. L'effet Venturi - l'équation de Bernoulli

Lorsque l'on fait passer de l'eau dans un tuyau de section S ayant un étranglement de section S' ($S' < S$), la vitesse initiale V augmente, ceci afin de garder un débit constant (Cromer, 1980) : $S.V = S'.V'$

On constate alors que lorsque la vitesse augmente, la pression dynamique exercée par le liquide augmente également.

En même temps, la pression hydrostatique exercée sur les parois de l'étranglement, chute. C'est cette chute de pression statique que l'on appelle effet Venturi (cf. figure 28).

Daniel Bernoulli a mis en équation cet effet : $P_{\text{dynamique}} + P_{\text{statique}} = \text{Constante}$
Autrement dit, la pression qu'exerce un fluide sur une paroi diminue avec l'augmentation de la vitesse du fluide.

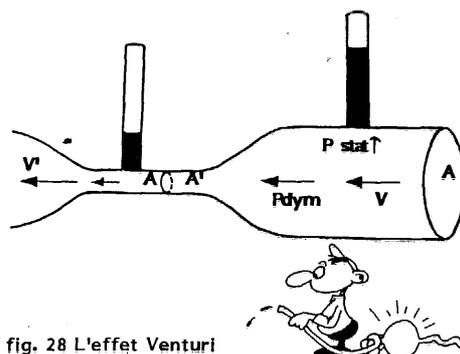


fig. 28 L'effet Venturi

2.3. Forces exercées par un fluide sur un profil

Si nous considérons un obstacle (la main du nageur ou d'une aile d'avion) fixe et un fluide animé d'une vitesse constante.

La résultante des forces exercées sur la main du nageur ou l'aile d'avion peut être réduite en une force : F (la Force hydrodynamique : fluide ou aérodynamique : l'air). Elle se décompose en 2 forces : une force de traînée (sens inverse au déplacement) et une force perpendiculaire : la portance.

2.4. La notion de portance active aérodynamique

Pourquoi un avion, plus lourd que l'air vole-t-il ?

C'est qu'il possède deux éléments indissociables: une source de propulsion horizontale et des ailes. L'aile est constituée d'un profil de base, dont le bord avant généralement arrondi est appelé bord d'attaque, et le bord arrière toujours effilé est appelé bord de fuite. La partie supérieure s'appelle l'*extrados* et la partie inférieure, l'*intrados* (Lachnitt, 1974).

L'avion possède un système de propulsion horizontal pour se déplacer dans un flux d'air. Ce flux engendre une composante de résistance à l'avancement (traînée dirigée dans la direction opposée à son avancement) mais également une composante de sustentation en passant par dessus et par dessous les ailes.

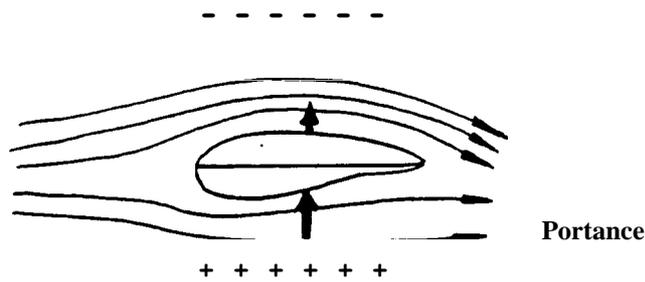


Profil de base d'une aile

Compte tenu de la forme non symétrique de l'aile dans ses composantes supérieure et inférieure, la distance que l'air doit parcourir pour aller du bord d'attaque au bord de fuite est plus grande par dessus que par dessous l'aile. Selon le théorème de Bernouilli, l'air passant au-dessus sera donc accéléré de façon à arriver au bord de fuite, en même temps que l'air passant par dessous (Aviation Research Associates 1943 cité par Maglischo 1987). Il se produira donc une différence de pression entre les deux surfaces. Une force verticale va se créer dans la mesure où les fluides ont tendance à aller des aires de haute

pression (+) aux aires de basse pression (-). Cette force verticale va s'exercer de bas en haut. Il s'agit de la portance.

Zone de basse pression



Zone de haute pression

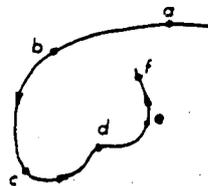
Aile soumise à écoulement laminaire

La forme incurvée va provoquer une zone de basse pression en haut et une zone de haute pression en bas créant une force verticale de bas en haut : la portance

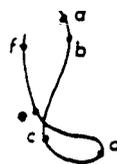
2.5. Utilisation de la théorie de la portance aérodynamique dans la propulsion aquatique.

Counsilman (1971) observe les trajets moteurs des nageurs de niveau en plaçant des lampes clignotantes sur leurs mains et filme ces trajets. Il en conclut que ceux-ci n'étaient en aucune manière rectilignes quels que soient les plans de l'espace.

a-b : entrée b-c : prise d'appui c-d : traction d-e : poussée e-f : sortie



Vue latérale



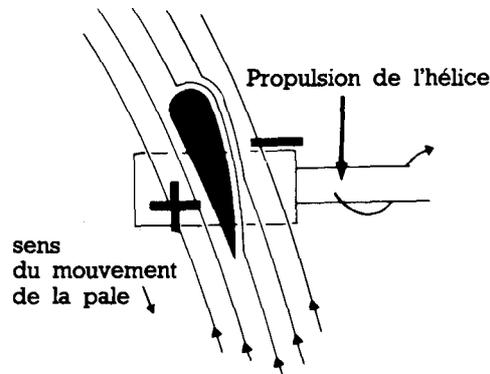
Vue frontale



Vue de dessous

Trajets moteurs en crawl d'après Counsilman.

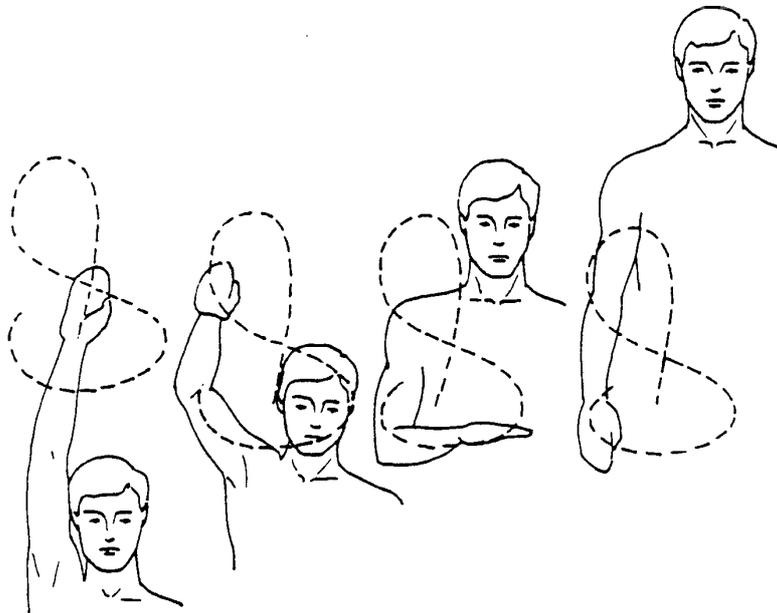
Il publie alors une théorie où le modèle explicatif de la nage n'est plus la force de poussée de la rame en accord avec la troisième loi de Newton sur l'action-réaction, mais il compare plutôt la main du nageur à une hélice.



L'hélice d'un navire est aussi une application du principe de Bernoulli, dans ce cas la pale de l'hélice se meut dans le plan vertical et l'effet de sustentation, sert à propulser le navire dans le plan horizontal.

Suite aux observations des trajets sous marins des mains, il apparaît que les mains se déplacent surtout verticalement et latéralement.

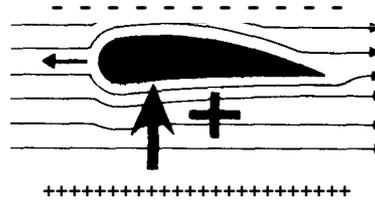
Celles-ci finissent, dans un repère fixe, le trajet propulsif près du point où elles l'ont commencé, démontrant que c'est le corps qui se déplace et non les mains.



Représentation schématique du trajet du bras droit en crawl montrant que la main finit son trajet propulsif près du point où elle l'a commencé (Colwin, 1982).

Utilisant le théorème de Bernoulli dans cette nouvelle théorie explicative, Cousilman en 1977 précise que la main du nageur peut se servir de l'effet de portance pour propulser le nageur.

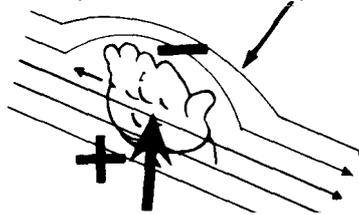
L'eau s'écoule plus rapidement ici d'où diminution de pression



L'inégalité de pression crée une force dirigée vers le haut

Une aile produit une force de soulèvement du fait qu'elle est cambrée (courbe sur ses surfaces). La surface supérieure de l'aile étant courbée d'une façon plus prononcée que la surface du dessous, L'air est obligé de se déplacer plus rapidement sur le dessus que sur le dessous de celle-ci; par conséquent la pression qui s'établit en dessous de l'aile est plus élevée que celle qui s'établit sur le dessus. Il en résulte la création d'un effet de soulèvement en application du principe de Bernoulli (soulèvement aérodynamique).

L'eau s'écoule plus rapidement ici d'où pression moins élevée



L'inégalité de pression crée une force dirigée vers le haut

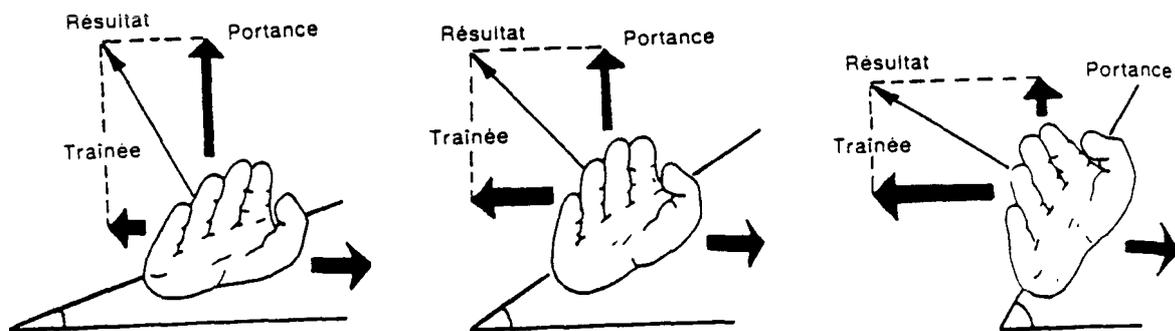
Ce principe de propulsion est basé sur l'écoulement laminaire (de part et d'autre d'un corps ou d'un objet).

Ce n'est donc pas l'action directe des surfaces propulsives perpendiculairement au sens de déplacement qui vont créer une réaction en sens opposé (loi de Newton) mais au contraire, une inclinaison optimale des surfaces propulsives (qui ne doivent jamais être perpendiculaires au sens de déplacement) permettant l'écoulement laminaire du fluide (principe de Bernoulli).

L'angle d'inclinaison de la main va être extrêmement important dans le résultat propulsif associant la traînée et la portance.

Dans le cas où l'angle d'attaque est trop grand, le nageur utilise sa main comme une rame et non comme une pale d'hélice. Avec trop peu d'angulation, les forces de portance et de traînée sont faibles et la main glisse. Pour le nageur, cela veut dire que l'orientation de la main doit être continuellement ajustée à chaque changement de direction du trajet moteur. L'angle d'incidence avec la direction du trajet de la main peut être compris entre 20) et 50) (Maglischo, 1982).

Cet ajustement est nécessaire car la force hydrodynamique ayant pour composante la traînée et la portance détermine donc l'intensité et la direction du mouvement du nageur. Pour un maximum d'intensité, celle ci devra être dirigée vers l'avant. Le nageur devra donc trouver une finesse technique optimale basée sur sa sensibilité ou son sens de l'eau.



Angle d'inclinaison de la main contribuant au résultat propulsif associant la traînée et la portance.

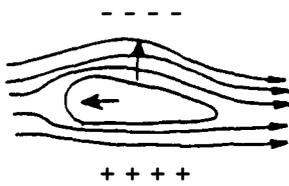
Précisions complémentaires :

-La première concerne les directions respectives de la portance et de la traînée. Une relation constante existe :

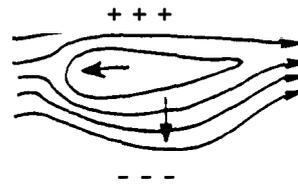
La portance s'exerce toujours perpendiculairement à la traînée qui est toujours opposée au déplacement.

Deux cas peuvent donc se produire; lorsque le déplacement se réalise vers l'avant, la portance est positive, c'est le cas de l'aile que nous avons étudiée, mais il est possible également que la portance soit négative et il s'agit alors par exemple d'une aile à l'envers ou d'une aile orientée vers le bas.

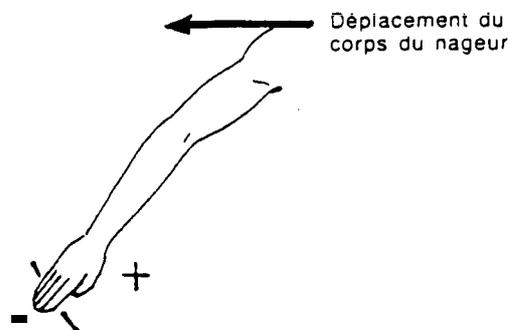
Portance positive soulèvement



portance négative enfoncement



- La seconde précision : dans le cas du nageur il est possible dissocier la direction du corps en déplacement (vers l'avant) et l'orientation des appuis propulsifs (par exemple vers le bas). Dans ce cas, si la main réalise un trajet orienté vers le bas, la traînée sera donc en sens inverse vers le haut et alors si l'orientation de la main est correcte, la portance sera dirigée vers l'avant.



Trajet propulsif

Possibilité pour la main du nageur de réaliser un effet propulsif de la portance hydrodynamique d'après Maglischo 1987.

Ce modèle est donc basé sur deux principes :

- l'orientation des surfaces propulsives (par ex. les mains) ne doit jamais être perpendiculaire au sens de déplacement et la direction de la force propulsive créée n'est pas parallèle au déplacement.

- Le nageur ne s'appuie pas sur une seule masse d'eau mais sur une succession de masse d'eau différente. Le mouvement ne sera donc pas uniformément accéléré mais avec une suite d'accélération. Le rythme (suite de temps fort et de temps faible) de déplacement des appuis sera donc variable.

LOETZ et SCHMITT (1988) ont étudié les pics de pression de la main durant les quatre nages. Ils ont constaté qu'en brasse, il y a deux pics de pression et pour les trois autres nages, trois pics de pression. Cela confirme que les nageurs de

haut niveau s'appuient bien sur des masses d'eau différentes et que le rythme des appuis propulsifs est variable et non uniformément accéléré.

Cependant, cette analyse est à tempérer dans une optique d'apprentissage car l'intégration de cette technique est pour une large part inconsciente. En effet, de nombreux nageurs n'ayant pas connaissance de ces principes se situent au haut niveau et depuis les observations de Counsilman (1971), il n'a pas été observé de changements techniques significatifs (sauf en brasse conséquence de changement dans le règlement).

Cette analyse est donc pour une large part théorique et elle est difficilement utilisable dans une optique d'optimisation des performances.

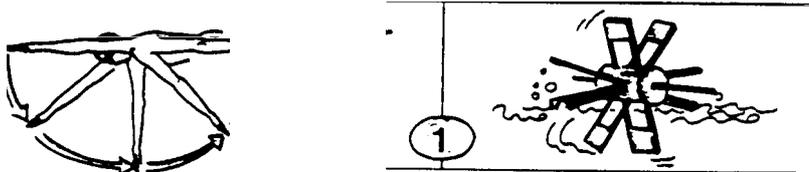
3. Modèles de la propulsion aquatique

Six modèles : quatre traditionnels (action/réaction) et deux basés sur la portance sont analysés.

3.1. Modèles traditionnels de la propulsion aquatique

Principe théorique : C'est la 3^{ème} loi de Newton ou loi d'action-réaction.

Modèle de la roue à aube.



La nage correspondant à ce modèle peut être caractérisée par un trajet propulsif bras tendus

L'utilisation de ce modèle lors de la nage se justifie chez le débutant par la meilleure perception du mouvement lorsque le bras est tendu, les propriocepteurs de l'épaule étant très précis. La conséquence négative de ce modèle est l'importante sollicitation des muscles de l'épaule.

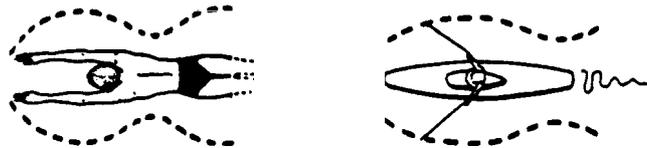
De plus, si une accélération de la vitesse de rotation améliore dans un premier temps la vitesse de déplacement du corps, très vite cette accélération n'aura plus d'effet sur la vitesse de déplacement.

Modèle de l'aviron.

C'est encore la loi d'action-réaction avec en plus une accélération linéaire horizontale

Cette accélération aura un effet d'appui sur les masses d'eau en mouvement et donc, la réaction sera le déplacement du corps.

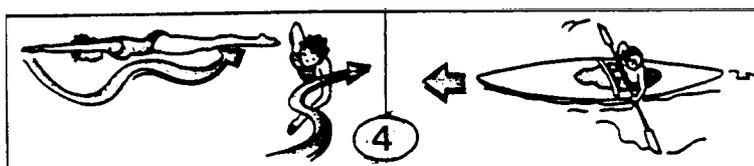
L'accélération des appuis permet de maintenir les forces de propulsion en contact avec les masses d'eau fuyantes. Les muscles de l'épaule sont très sollicités.

Modèle de la pagaie.

La logique de ce modèle est de rechercher constamment des masses d'eau immobiles et de les diriger vers l'arrière.

Le nageur utilisant ce modèle a un mouvement de bras horizontal, il déplace ses appuis sinusoidalement cherchant à mobiliser des masses d'eau immobiles qu'il repousse derrière lui.

Il y a une recherche d'une meilleure efficacité par la mobilisation des surfaces propulsives vers des masses d'eau immobiles (donc création d'appuis moins fuyants), cependant, le trajet est horizontal et il n'y a pas l'utilisation de la profondeur (propulsion en 2 dimensions).

Modèle de « l'esquimautage ».

Dans ce modèle, l'orientation de la pagaie n'est pas uniquement horizontale, la recherche des masses d'eau immobiles se réalise dans les 3 plans de l'espace afin de créer des appuis propulsifs.

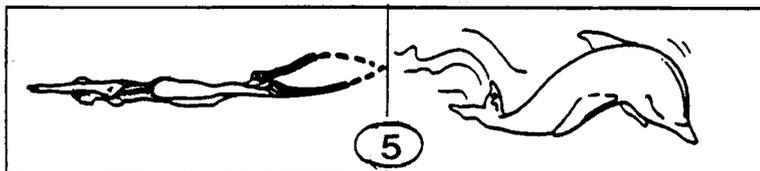
Le nageur utilisant ce modèle a un mouvement de bras courbé en forme de S dans les 3 plans de l'espace.

Dans les modèles traditionnels de la propulsion aquatique, le principe de l'orientation des surfaces propulsives à la perpendiculaire du sens du déplacement et la direction des forces propulsives parallèle au sens du déplacement sont fondamentaux.

A l'inverse, dans les modèles basés sur la portance, à aucun moment la surface propulsive ne doit se trouver à 90 degrés par rapport au sens du courant d'eau créé par l'appui.

3.2. Modèles basés sur la portance de la propulsion aquatique

Modèle de la palme.



Dans ce modèle, les trajets sont constamment obliques avec soit compensation de la portance négative par la portance positive (c'est le cas de l'ondulation du dauphin), soit prédominance de la portance positive sur la portance négative (c'est le cas du planning ou du surfing).

Deux grandes applications de ce modèle sont utilisées : celle de l'ondulation du corps ou du battement de jambes d'une part et celle des appuis obliques des membres supérieurs d'autre part.

Si l'ondulation est plus efficace que la propulsion des bras et des jambes sur le dos, c'est sans doute lié à la réduction des résistances à l'avancement et à l'utilisation de la portance comme source de propulsion. Le règlement a limité l'emploi de cette forme de propulsion dans les épreuves de dos.

Modèle de l'hélice ou de la godille.



Il s'agit ici du principe de Bernouilli. L'hélice n'est autre chose que la vis ordinaire, et la théorie de son action en est la même

Quand on fait tourner une hélice au milieu de l'eau avec rapidité, l'eau environnante se trouve mise en mouvement avec la même vitesse et par suite de la réaction qu'elle exerce sur les faces inclinées de l'hélice, elle imprime au bateau un mouvement de progression, qui est d'autant plus rapide que l'hélice tourne plus vite. Le mouvement de rotation de l'hélice, même rapide, est constant, il n'y a pas d'accélération. L'hélice a suivi une évolution constante depuis son utilisation par Bernouilli. L'idéal actuel semblerait être une hélice à pas variable qui s'adapte à la vitesse pour accroître le rendement du système.

Counsilman en 1971, après observation de prises de vues sous marines réalisées avec des champions, a démontré que leurs mains suivaient un parcours en forme de S. Il considère alors que la main du nageur est utilisée par celui-ci comme une hélice. En effet, si la main est inclinée de façon appropriée par rapport à sa trajectoire dans l'eau, elle peut jouer le même rôle qu'une hélice de bateau et donc permettre la propulsion vers l'avant du nageur.

Ce modèle de l'hélice a souvent été utilisé pour expliquer la logique propulsive du nageur expert. En réalité le modèle de la godille apparaît tout aussi intéressant dans la mesure où il se rapproche des mouvements de nage tout en restant associé au principe de dépression.

En effet, dans un mouvement de godille créant le déplacement d'une embarcation, la pagaie ne se trouve jamais perpendiculaire ni au sens du déplacement, ni à l'orientation du mouvement.

En natation synchronisée, le mouvement de godille réalisé par les mains est courant. Nous pouvons citer la godille « endroit » de la propulsion par la tête en position dorsale (bras le long du corps). Les mains réalisent une rotation (le dos des mains étant orienté contre les cuisses) les paumes sont tournées vers le fond de la piscine (flexion poignets de 45° vers le haut), en gardant cet angle,

les avant-bras s'écartent vers l'extérieur simultanément puis rotation des paumes vers l'intérieur contre les cuisses.



Godille « droit » de la main pour réaliser un déplacement par la tête en position dorsale en natation synchronisée.

En natation sportive (course) la godille ne peut pas constituer à elle seule l'ensemble de la propulsion du nageur.

Schleihauf en 1979 repris en 1988 par Hay, précise que la propulsion des bras en natation est dérivée de la **combinaison de la portance et des forces de traînée**.

L'une et l'autre de ces forces sont prédominantes par exemple) à leur tour à l'intérieur d'un même cycle. Ainsi, par exemple les forces de portance dominent en brasse et les forces de portance et de traînée sont dominantes chacune à leur tour dans les différentes phases du crawl.

Plus la main sort de l'eau (en nage alternée par exemple) près de l'endroit où elle est rentrée (repéré par un bouchon de la ligne d'eau) meilleure sera son efficacité.

Counsilman en 1977 précise (en relation avec la complémentarité portance/traînée) que : ***l'efficacité maximum de la propulsion dans l'eau est obtenue en déplaçant vers l'arrière une grande masse d'eau sur une courte distance plutôt qu'une petite quantité d'eau sur une plus grande distance.***

4. Principes communs aux 4 nages de compétition d'après Counsilman (1986)

1) Les mains ne se déplacent pas dans l'eau en suivant une ligne droite mais suivent une trajectoire sinueuse pour s'appuyer sur des couches d'eau « plus stables », et pour combiner différentes inclinaisons de la main afin d'avoir le meilleur angle de prise d'eau.

2) Le nageur ne « tire pas et ne pousse pas » avec les bras tendus mais, il plie son coude. Ceci permet d'incliner la main afin d'exercer toute sa force vers l'arrière.

3) Le coude doit être maintenu en position haute et avancée (ou en position surélevée) pendant la « poussée ».

4) A l'entrée et à la sortie de l'eau, la main doit être inclinée selon l'angle le plus approprié pour diminuer le nombre de bulles d'air créées. A l'entrée en crawl : par le pouce, doigts serrés et angle allant de 35 à 45, à la sortie paume de main tournée vers la cuisse sortie petit doigt en premier.

5) Les mains doivent être inclinées au bon angle au cours de la traction et de la poussée aquatique du bras si on veut obtenir le maximum de puissance (angle proche de 37° de la main avec la direction de la trajectoire suivie).

6) Rechercher le meilleur profil hydrodynamique possible en diminuant les résistances frontales et les résistances tourbillonnaires (ou aspiration de queue).

7) Eviter de repousser l'eau contre son corps lors du déplacement aquatique car cela accroît les résistances et ralentit la progression.

5. Modification de la terminologie décrivant les techniques de nage

Les termes de **traction** et **poussée** induisent des mouvements style coup de rame d'avant en arrière.

Différents termes peuvent être retenus permettant une analyse plus fine des trajets moteurs :

- Le terme de **balayage** (*sweep*) (Maglischo, 1982).
- Le terme **d'appui** suivi d'une direction principale suivant laquelle il se produit : extérieur, intérieur, vers le haut, vers le bas, en arrière.
- Le travail en **godille** (Counsilman, 1969 ; Chollet, 1990) avec un appui vers l'extérieur et vers l'intérieur (mouvement de base de la natation synchronisée).

6. Efficacité des actions propulsives

6.1. Indices morpho-fonctionnels

Une grande taille (Pelayo 1989), des épaules larges (Bulgacova, 1990), de longs segments (Chatard, 1986), des surfaces propulsives importantes (Sidney, 1988) sont des paramètres caractérisant les possibilités du nageur.

6.2. Indices mécaniques

6.2.1. Cadence optimale des actions propulsives

Dans l'absolu, la meilleure cadence se trouve dans la continuité des actions propulsives. Le trou moteur doit être au maximum évité à l'intérieur d'un cycle afin d'échapper à de trop fortes décélérations. On retrouve ce concept de continuité pour bras/bras et Jambes/jambes pour les nages alternées et jambes/bras pour les nages simultanées.

6.2.2. Amplitude/Fréquence

Le temps qu'un nageur met pour nager une distance se détermine à partir de sa vitesse moyenne.

$$\text{Vitesse (m/s)} = \text{Fréquence (Hz)} \times \text{Amplitude (m)}$$

La fréquence peut être définie comme le nombre de cycle de bras par minute (avec un cycle de bras = 1 mouvement du bras droit + 1 mouvement du bras gauche).

L'amplitude peut être définie comme la distance parcourue (m) pour chaque cycle de bras.

Des études ont montré que :

- En nage libre, papillon, et brasse, les fréquences moyennes sont quasiment identiques, c'est l'amplitude moyenne qui détermine leur rang. C'est en dos que l'amplitude est la plus grande et la fréquence la plus faible.
- La fréquence est plus grande sur 100m que sur 200m.
- L'amplitude est plus grande sur 200m que sur 100m (sauf pour le 200m papillon féminin et le 200 dos masculin).

- Les différences de vitesse entre les hommes et les femmes s'expliquent au niveau de l'amplitude alors que les fréquences sont sensiblement équivalentes.
- Les meilleurs nageurs ont une amplitude supérieure.
- Si l'on veut augmenter la vitesse moyenne, à court terme il faut jouer sur la fréquence, et à long terme sur l'amplitude.

6.2.3. L'indice de nage

Pour estimer l'économie de la technique d'un nageur, David Costill (1985) a défini l'indice de nage. Cet indice est calculé en multipliant la vitesse de nage et l'amplitude :

$$IN = V \times A \text{ ou } V^2/F$$

Cet indice suppose que pour une vitesse donnée, le nageur ayant la plus grande propulsion par cycle possède la technique natatoire la plus efficace.

7. Bibliographie

Chollet Didier -1997- (2^{ème} édition) *Approche scientifique de la natation sportive*. Ed Vigot, Paris, p 389.

Counsilman J.E -1986- *La natation de compétition*. Ed Vigot, Paris, p 221.

Costill D.L, Maglischo B.W, Ricardson A.B -1994- *La natation*. Ed Vigot, Paris, p 215.

Pelayo P, Maillard D, Rozier D, Chollet D -1999- *Natation au collège et au Lycée*. Ed Revue EPS, Paris, p 301.