

## **Lois physiques rencontrées par un nageur**

Travail de maturité réalisé au Lycée Denis-de-Rougemont de Neuchâtel  
sous la direction de M. Michel Favez

Noé Stauffer

### **Introduction**

La natation est un sport où la performance est intimement liée à la maîtrise technique. Comme dans la plupart des sports, la recherche a permis de faire d'énormes progrès et il devient de plus en plus difficile d'améliorer les records. Chaque détail gestuel ou matériel (combinaisons par exemple) retient désormais l'attention des chercheurs afin de gagner des centièmes de seconde. Bien que le sujet soit de plus en plus étudié, certains phénomènes physiques comme la propulsion ne sont pas encore totalement compris. En effet, les scientifiques s'accordent sur le fait que le nageur est soumis à quatre forces différentes mais leurs avis divergent en ce qui concerne le phénomène de la propulsion qui fait l'objet de différentes théories : traînée engendrée par la main et le bras, phénomène de portance exercé par un fluide et théorie du vortex.

Dans ce travail, il s'agira d'étudier les lois physiques appliquées sur le nageur ainsi que les différentes théories proposées. Mon objectif principal est la compréhension des différents paramètres influençant le nageur lors de son déplacement en crawl et au moment du départ. Pour le départ je différencierai deux « plots » de départ.

Il faut toutefois souligner le fait que je n'entrerai pas forcément dans tous les détails car certains principes ou théorèmes nécessitent des développements qui dépassent le cadre de ce travail.

Les éventuels liens tirés avec la pratique et les conseils de l'entraîneur ne sont pas toujours en lien direct avec la physique (tout ce qui concerne les muscles d'un point de vue biologique et chimiques), c'est pourquoi je ferai des parallèles seulement dans les cas les plus évidents.

De même, je ne m'attarderai pas sur l'aspect très technique et pédagogique de la natation, le but n'étant pas d'apprendre à nager aux gens, mais d'étudier comment un nageur d'élite avance et quels facteurs il peut optimiser (par exemple, il n'y a pas d'étude spéciale sur la respiration).

Je ne parlerai également pas de l'influence de muscles précis pour une force propulsive plus efficace mais généraliserai en disant simplement que la force musculaire joue un rôle.

La position du bras sous l'eau (tendu ou un peu plié) pour une force propulsive optimale n'est pas un sujet qui sera traité car cela nécessiterait une longue étude avec des expérimentations ; mon but est plutôt de présenter les phénomènes intervenants dans la propulsion du nageur. De plus, en natation, ce sont les sensations qui jouent le plus grand rôle à haut niveau.

Les virages et la respiration bien que très importants ne seront également pas étudiés.

### **Phase nagée**

Cette première partie consiste à étudier le nageur durant sa phase nagée.

Je vais donc observer quelles sont les forces agissant pendant le déplacement dans l'eau. Il y a quatre forces : le poids, la poussée d'Archimède, la force de propulsion et la force de traînée.

En premier lieu, j'étudierai l'équilibre du corps humain dans l'eau ; ensuite, j'analyserai les différentes résistances, formant la force de traînée, que le nageur rencontre en avançant et

finalement j'expliquerai quelles sont les théories de la propulsion en natation. Avant de passer à une analyse précise de chaque cas cité ci-dessus je procéderai à quelques rappels basiques sur les notions physiques nécessaires à la compréhension de mes explications.

### 1) L'équilibre du nageur

Un corps plongé dans un fluide en équilibre subit deux forces : sa force de pesanteur et la force d'Archimède.

La force de pesanteur ou poids est la force qui attire une masse  $m$  au centre de la Terre. Elle est exprimée mathématiquement par  $F_p = mg$ . Son point d'application est le centre de gravité qui représente le point moyen d'application de toutes forces  $dF_p$  dues aux masses  $dm$  du corps dont nous parlons.

La force d'Archimède  $F_A$  est une force de même direction que la force de pesanteur mais de sens opposé. Elle est due à une différence de pression entre les parties supérieure et inférieure du corps ou plus précisément à la somme vectorielle des forces de pression (pression due à la différence de hauteur) sur tout le volume de l'objet. La force d'Archimède s'exprime par :

$$F_A = \rho g V$$

Son point d'application est le centre de carène qui est le centre géométrique du volume immergé du corps en question. C'est donc le point sur lequel s'applique la résultante de toutes les forces de pressions agissant sur chaque petit élément de surface du corps.

Pour qu'un corps soit à l'état d'équilibre, il doit remplir deux conditions :

- La somme vectorielle des forces sur ce dernier est égale à zéro.
- La somme vectorielle des moments de force est égale à zéro.

Si une de ces deux conditions est rompue, il en résulte une accélération. La première condition implique un mouvement de translation et la deuxième un mouvement de rotation.

- $\sum \vec{F} = m \vec{a}$  La force résultante crée une accélération sur la masse  $m$ .
- $\sum \vec{M}_O = \sum \vec{r} \times \vec{F} = I_O \vec{\alpha}$  Une force appliquée à une distance  $r$  d'un point  $O$  de référence sur un objet crée une accélération angulaire dépendant du moment d'inertie  $I_O$  de cet objet. Ici l'opération est produit vectoriel  $\vec{r}$  avec  $\vec{F}$ , c'est donc la composante perpendiculaire de la force par rapport à  $r$  qui est importante et qui crée la rotation. Le sens de la rotation est donné par l'orientation du vecteur  $\vec{M}_O$ .

Nous en concluons que le point d'application de la force est un paramètre important dans la recherche d'équilibre d'un corps. Maintenant, il s'agit d'appliquer cela au corps humain, soumis à deux forces.

Le corps flotte quand la force de pesanteur équivaut à la force d'Archimède. Comme la masse volumique de l'homme correspond approximativement à celle de l'eau le volume immergé est très proche du volume total. La somme des forces est égale à zéro, il n'y a donc pas de mouvement de translation.

Prenons la deuxième condition. Ce qui nous intéresse est de savoir s'il va y avoir un mouvement de rotation. Il faut donc mettre en évidence les points d'application des deux forces en présence.

Le centre de gravité ( $C_g$ ) de l'être humain se situe au niveau du bassin tandis que le centre de carène (centre géométrique) se trouve un peu plus haut, au bas de la poitrine. Toutefois, ces derniers peuvent se déplacer selon la position de la tête, des bras ou encore des jambes et selon la morphologie de la personne en question. Cette différence de position est due au fait que notre corps n'a pas une masse volumique homogène ; en effet le centre de gravité ne se

situé pas au centre géométrique car nos jambes, dont le principal composant est le muscle, ont une masse volumique plus importante que notre torse, contenant de l'air, ce qui déplace le centre de gravité un peu en dessous du centre géométrique.

Observons la situation dans laquelle le nageur est à plat ventre.

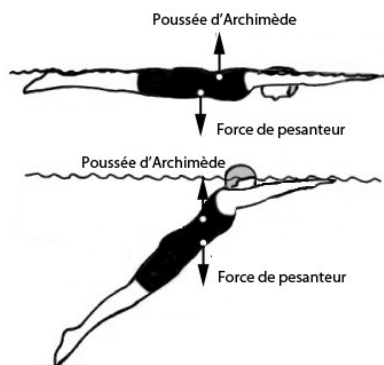


Figure 1 (<http://coachsci.sdsu.edu/swim/bullets/float36.htm>)

Comme nous l'avons dit, la force d'Archimède est (approximativement) égale au poids. Malgré ceci, la somme des moments de force n'est pas nulle car si nous prenons le centre de carène comme point de référence (le choix de ce point ne change aucunement le résultat, il faut juste le faire de façon stratégique), il résulte un moment de force dû à l'emplacement du centre de gravité par rapport au centre de carène. Il y a donc une rotation créée par ce couple de forces (figure 1).

Le corps du nageur tournera jusqu'à ce que le centre de gravité et le centre de carène soient alignés verticalement puisqu'à cet instant, produit vectoriel  $\vec{r}$  avec  $\vec{F}_p$  est nul car l'angle entre les deux vecteurs est également nul. L'angle entre la verticale et la droite passant par les deux points d'application quand le nageur est à plat détermine l'angle avec lequel l'individu flotte (angle par rapport à la surface de l'eau).

Le centre de rotation correspond au point fixe de cette rotation mais nous ne calculerons pas son emplacement.

Quel est le sens de cette rotation ? Le vecteur donné par le produit vectoriel se dirige dans notre sens, de ce fait la rotation est positive ce qui équivaut au sens contraire des aiguilles d'une montre.

Ceci est la cause pour laquelle nos jambes « coulent » lorsque nous nageons ; il faut donc beaucoup battre des jambes pour que l'eau nous tienne en équilibre. Nous poussons avec nos jambes selon deux axes : un vertical et l'autre horizontal. Observons l'axe vertical : les pieds rencontrent une résistance lors d'un déplacement vers le bas ; il y a donc une force qui pousse nos jambes vers le haut et qui nous maintient en équilibre. Le moment de force créé par nos battements compense celui dû à la non coïncidence des centre de gravité et carène.

Les déplacements sur l'axe horizontal contribuent à la propulsion si les pieds se déplacent vers l'arrière et aux résistances si c'est vers l'avant. Il est donc primordial pour le nageur ne de pas créer de mouvement qui réduirait son avancement.

Les battements contribuent à une faible proportion de la propulsion totale qui est assurée en majeure partie par les membres supérieurs mais j'en reparlerai plus précisément dans la partie dédiée à la propulsion.

L'action des jambes et des pieds est indispensable dans la recherche d'équilibre et nécessite une quantité importante d'énergie. Le nageur se fatigue énormément en voulant garder ses membres inférieurs à la surface de l'eau car s'il les laisse traîner, il n'aura pas une forme hydrodynamique et sera fortement ralenti. Il est donc impératif d'être le plus à plat possible dans l'eau afin de subir le moins de résistance possible.

Après avoir observé qu'il existe une différence de position entre les points d'application du poids et de la force d'Archimède, il est nécessaire d'indiquer que chaque individu flotte de manière unique. En effet, la différence de position entre ces deux points est propre à chacun et résulte de la morphologie de la personne en question.

Comme expliqué plus tôt, l'homme n'a pas une masse volumique homogène : la graisse par exemple est moins dense que l'eau tandis que les os et les muscles le sont plus. Il en résulte qu'une personne possédant une petite couche de graisse flottera mieux que quelqu'un de morphologie très fine. Des poumons développés augmentent le volume sans faire peser plus, c'est également un avantage. Lorsque le nageur respire en crawl, il doit sortir le moins de volume possible de sa tête pour s'enfoncer le moins possible et ne pas subir plus de résistances.

Si un nageur est doté d'une « ceinture » de graisse au niveau des hanches, son centre de carène se déplace latéralement en direction du  $C_g$  et l'angle de flottaison est de ce fait diminué (figure 1). La dépense d'énergie pour une position horizontale est réduite.

C'est pour cela que les femmes flottent mieux : la région des hanches est plus développée et stocke plus de matières grasses que pour l'homme. Elles s'enfoncent moins et leur angle de flottaison est plus faible.

Les entraîneurs doivent faire attention aux changements morphologiques durant la croissance de leurs athlètes et attribuer les changements techniques en conséquence. Un adolescent dont les jambes grandissent et se musclent subitement va voir son angle de flottaison augmenter. Etant habitué à nager avec une technique personnelle, s'il n'effectue pas de changement sur cette dernière, il aura une position nettement moins hydrodynamique qui le freinera et le poussera peut-être à faire des mouvements perturbant la nage.

Une autre caractéristique intéressante ayant un impact sur la flottabilité est la température de l'eau car sa masse volumique en dépend. Plus l'eau est froide, plus nous flottons mais une eau fraîche crispe rapidement les muscles et fait perdre beaucoup de chaleur au nageur. C'est pourquoi il faut une température « idéale ». Les piscines accueillant les Jeux Olympiques sont remplies d'eau entre 24 et 28° C.

A l'entraînement, nous utilisons des « pullboys » ; ces sont des blocs de mousse placés entre les cuisses dont le rôle est de maintenir les jambes à la surface de l'eau. Par le port d'un « pullboy », le centre de carène se déplace en direction des jambes, ce qui fait diminuer le moment de force agissant sur le nageur. L'angle de flottaison est réduit. Ils permettent de se concentrer sur les mouvements de bras dans une position idéale, horizontale, sans gaspiller d'énergie aux niveaux de jambes. La concentration au niveau des bras est donc optimale.

Bien que la musculation ait permis des améliorations dans une grande majorité de sports, une attention particulière est indispensable en natation. En effet, une augmentation de la masse volumique de certaines parties peut créer un moment de force plus grand à contrer par l'augmentation de la masse mais également par un possible déplacement négatif du centre de masse ou de carène.

**Remarque :** Pour tout ce chapitre sur l'équilibre, j'ai négligé la portance sur le corps car la couche limite se décolle trop tôt et la portance (force perpendiculaire à la vitesse de l'écoulement) a donc une très faible influence. Néanmoins, nous verrons qu'elle est

importante au niveau de la main dans le chapitre de la propulsion. Les notions de portance et de couche limite sont expliquées plus loin.

## 2) Les résistances

Dans cette partie, je vais parler de tout ce qui résiste à la progression d'un nageur dans le milieu aquatique. Il existe trois principales formes de résistances ou traînées (nom donné aux forces freinant le nageur) rencontrées par ce dernier. En s'additionnant, elles forment la traînée totale qui s'oppose à la propulsion et donc au sens du vecteur vitesse.

De plus, j'expliquerai les raisons pour lesquelles les nageurs portent des combinaisons.

Avant de passer à l'étude de ces trois traînées, je vais procéder à quelques rappels de mécanique des fluides concernant principalement les écoulements et la pression. Ces rappels seront également utiles pour le chapitre suivant car paradoxalement nous observerons que le phénomène de traînée représente une grande part de ce qui fait avancer le nageur.

Tout d'abord, lorsqu'un fluide est en mouvement, on peut distinguer trois formes d'écoulements. Premièrement, il y a l'écoulement laminaire dans lequel les lignes de fluide sont parallèles ; les molécules du fluide sont dans un état ordonné. Dans ce genre d'écoulement, la traînée de frottements domine sur la traînée de forme (dont je parlerai plus tard) qui est souvent négligeable pour un petit objet se déplaçant lentement.

Ensuite, le fluide peut avoir un écoulement turbulent qui se caractérise par un état désordonné et difficilement prévisible des molécules. Ici c'est la traînée de forme qui domine.

Finalement l'écoulement tourbillonnaire dans lequel il y a la présence de tourbillons, la vitesse des particules est augmentée. Il est souvent rencontré dans la transition laminaire-turbulent.

Quand un corps se déplace dans un fluide, on appelle couche limite la couche faisant l'interface entre le corps en mouvement et le fluide. Cette couche possède la même vitesse que le corps concerné mais s'en décolle facilement si ce dernier ne possède pas une forme hydrodynamique : par exemple s'il contient des arêtes pointues ou des changements de direction brusques. Souvent, lorsque la couche se décolle l'écoulement passe de laminaire à tourbillonnaire.

Que cela soit le corps qui se déplace ou le fluide ou même les deux, ce qui importe est la vitesse relative entre les deux quand nous parlons de vitesse. En effet, le fluide a le même comportement par rapport au corps, le résultat est donc similaire.

Ensuite, d'après le théorème de Bernoulli, basé sur la conservation de l'énergie et du débit, la pression totale ( $P_{\text{tot}}$ ) dans une ligne de fluide est conservée.

$$P_{\text{tot}} = \rho gh + P_{\text{statique}} + \frac{1}{2}\rho v^2$$

$\rho$  = masse volumique du fluide

$g$  = constante gravitationnelle de la Terre

$h$  = différence de hauteur par rapport à un point de référence

$v$  = vitesse relative du fluide

- Le premier terme est la pression potentielle due à la différence de hauteur par rapport à un point de référence. Pour le nageur nous négligerons les différences minimales de hauteur et nous nous passerons donc de ce terme.

- Le deuxième est la pression statique ( $P_{\text{statique}}$ ), c'est la pression que l'on peut mesurer si un baromètre est placé en dessous et perpendiculairement à l'écoulement (laminaire), c'est celle que l'on ressent.

- Le dernier représente la pression dynamique qui est due à la vitesse relative du fluide. Si le fluide est arrêté sa pression dynamique est convertie en pression statique. C'est donc également une pression « potentielle ».

La traînée totale est décomposée en trois principaux facteurs d'importance plus ou moins grande que sont la traînée de frottement, la traînée de forme et la traînée de vague. Je vais m'arrêter sur chacune d'entre elles et expliquer de quoi elles dépendent.

#### a) La traînée de frottement

Cette forme de traînée, la moins importante des trois, est due au contact entre la surface du corps en mouvement et le fluide. Elle disparaît lorsque la couche limite se décolle. Dans la couche limite, la vitesse des particules adhérant à la peau correspond à la vitesse du nageur tandis que celle des particules les plus éloignées a la valeur de celle du fluide. La couche du fluide la plus proche du corps frotte ce dernier et est par conséquent stoppée, ce qui ralentit la couche suivante qui, elle, ralentit celle d'après et ainsi de suite jusqu'à arriver à la couche ayant la vitesse du fluide.

$$F = kR\eta v$$

*k = coefficient dépendant de la forme (forme, lisse / rugueux)*

*R = rayon maximal*

*$\eta$  = viscosité du fluide*

*v = vitesse relative du fluide*

On voit que la traînée de frottement dépend de la forme du corps, de la viscosité du fluide et de la vitesse relative du fluide. La viscosité de l'eau à 20° C est de 10<sup>-3</sup> Pa · s ce qui est faible.

La traînée de frottement a peu d'importance sur le nageur d'autant plus que la couche limite se décolle lors de sa progression dans l'eau.

On pourrait croire que les matières lisses sont systématiquement plus hydrodynamiques que les rugueuses (en général oui) mais la peau des requins nous montre le contraire. En effet, des sortes de petites écailles font que l'eau s'y engouffre ce qui crée alors de mini tourbillons qui retiennent l'eau près du corps. L'écoulement est alors ralenti et les frottements réduits. L'eau colle au corps et la couche limite ne se détache pas – pas de dépression à l'arrière comme nous pourrions le voir dans le chapitre suivant. La plupart du temps, les surfaces lisses sont bien plus avantageuses. La peau des requins est à première vue lisse ; c'est donc à une très petite échelle que l'on observe ces écailles avantageuses. Certaines combinaisons sont inspirées de la peau du requin.

Les nageurs se rasent les jambes et certains intégralement lors des grands rendez-vous. Un individu dont la peau est plus lisse est légèrement avantageux mais c'est surtout la sensation de glisse qui est importante.

Une des fonctions de la combinaison de natation est justement de réduire la traînée de frottement par sa structure lisse. J'en reparlerai plus précisément par la suite.

Les bonnets de natation issus de la nouvelle génération sont d'une part composés d'une matière très lisse et possèdent d'autre part une forme de « dôme » permettant la suppression des plis présents sur le dessus des bonnets basiques. Il faut préciser que cette innovation concerne les nageurs recherchant le moindre centième d'amélioration ; ces bonnets sont inutiles pour les nageurs de niveau moyen.

#### b) La traînée de forme

C'est de loin la composante la plus importante de la traînée. Elle est due à une différence de pression entre l'avant et l'arrière de l'objet.

Le fluide arrivant à une vitesse  $v$  sur l'avant de l'objet est arrêté à l'endroit sur lequel il arrive de manière perpendiculaire, il transforme donc sa pression dynamique en pression statique. A cet endroit, appelé point de stagnation, le fluide n'est pas dévié pour contourner l'avant de l'objet mais stoppé ; il se forme donc une zone de haute pression autour du point de stagnation dans laquelle les particules du fluide sont presque immobiles. Ne pouvant s'échapper sur les bords, elles créent alors un « cône » de haute pression que les autres particules arrivant sur l'objet contournent.

Il est possible de diminuer la grandeur de cette zone de haute pression selon la forme présentée à l'avant.

En effet, sur un corps pointu les particules du fluide sont plus facilement évacuées, ce qui empêche la formation d'une grande zone de haute pression sur la section frontale autour de la pointe. Par contre, si l'objet est une plaque perpendiculaire la zone de pression est grande car elle est plus difficilement évacuée.

C'est donc la forme la plus pointue qui sera la plus efficace pour éviter cette augmentation de pression sur le front.

Parlons maintenant de l'arrière de l'objet et reprenons la notion de couche limite. Cette couche colle l'objet mais peut s'en décoller en un certain point au moment où elle n'est plus capable de suivre la forme du corps. L'écoulement laminaire au début se transforme en tourbillonnaire. Les particules situées après le point de décollement sont donc dans un état désordonné qui crée une dépression (appelée sillage) par la présence de tourbillons. Les particules ont augmenté leur vitesse ce qui induit une baisse de pression statique. Cette dépression est la cause la plus importante de la traînée de forme.

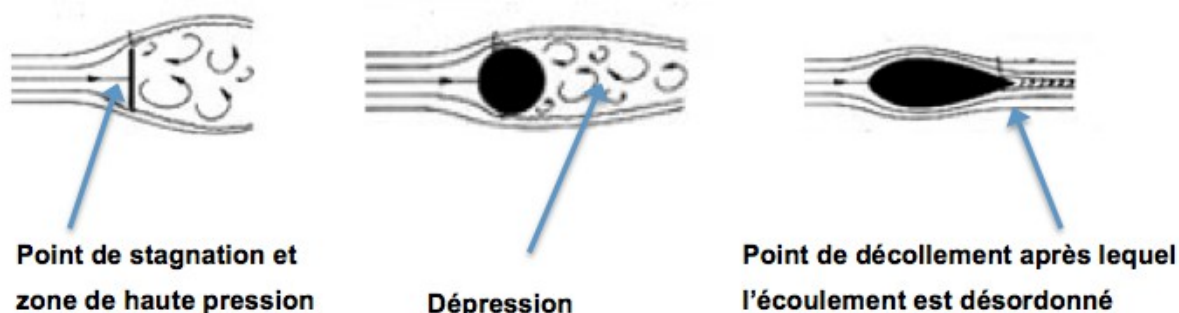


Figure 2 (<http://quest.nasa.gov/aero/planetary/>)

Nous observons bel et bien sur ces schémas que la forme a une importance. Il faut éviter une surface trop perpendiculaire à l'écoulement, pour adoucir la pénétration dans le fluide, et des arrêtes qui décolleraient la couche limite et induiraient une baisse de pression à l'arrière. La forme optimale est celle d'une goutte car elle permet une pression frontale pas trop grande et surtout que la couche limite ne se décolle presque pas (presque pas de dépression à l'arrière).

S'il y a décollement, il faut le retarder le plus possible afin que la dépression intervienne le plus tard possible.

La traînée de forme est proportionnelle à la surface frontale, à la masse volumique du fluide, à la vitesse relative au carré et à un coefficient dû à la forme de l'objet.

$$F = \frac{1}{2} C_x \rho v^2$$

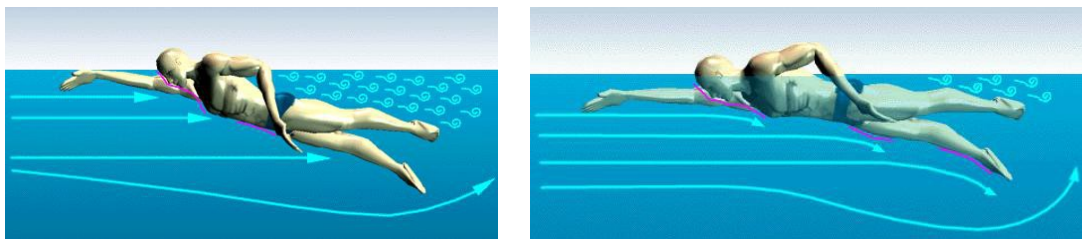
$C_x$  = coefficient de traînée dépendant de la forme

$S$  = surface frontale

$\rho$  = masse volumique du fluide

$v = \text{vitesse relative du fluide}$

Le nageur doit donc être le plus à plat possible pour avoir la moins grande surface frontale ; il doit donc battre continuellement des pieds pour les maintenir à la surface de l'eau et rencontrer le moins de résistance possible. Lors de la poussée d'un des bras, l'autre doit être tendu horizontalement.



A gauche (Figure 3) : nageur subissant une grande traînée à cause d'une mauvaise position. La surface frontale est grande et le  $C_x$  est mauvais, la dépression est grande.

A droite (Figure 4) : la traînée est réduite grâce à une meilleure position.  
(<http://cbraccio.pbworks.com/w/page/4362515/Swimming>)

Dès le départ, il faut aborder une position « hydrodynamique » en flèche afin de perdre le moins de vitesse gagnée sur le plongeon. A haut niveau, une mauvaise pénétration dans l'eau anéantit pratiquement les espoirs de victoire sur un sprint.

Dans la phase nagée, si le coefficient de traînée n'est pas assez faible le nageur produit des efforts inutiles d'autant plus que la traînée de forme est proportionnelle au carré de la vitesse, il met énormément de force pour avancer car il doit tout d'abord contrer la force de résistance avant de créer une accélération. Ceci montre bien qu'il ne suffit pas d'avoir de la force pour être un nageur performant, il est indispensable avant cela de positionner son corps de manière à ressentir le moins de résistance possible et de ne pas créer de mouvements perturbateurs qui déséquilibrerait l'athlète ou qui lui seraient contre productifs. A haute vitesse, une mauvaise position est très pénalisante et ainsi très gourmande en énergie pour acquérir une grande vitesse. Un nageur peu musclé mais bien positionné avancera plus vite qu'un autre très musclé mais mal positionné car moins de force est requise.

Le fait d'être gainé a son importance car si le nageur est « mou », ses jambes tombent encore plus facilement.

Il faut éviter trop de respirations car le nageur possède une forme moins hydrodynamique durant cette phase : le corps suit le mouvement de la tête et en respirant, le nageur s'enfonce un peu plus dans l'eau – une partie de la tête sort de l'eau – ce qui fait qu'il rencontre plus de résistances.

### c) La traînée de vague

Elle est causée soit par le nageur lui-même, soit par quelqu'un d'autre dans une ligne parallèle par exemple. Du fait que le nageur se déplace à l'interface de deux fluides – l'air et l'eau, il crée des ondes : les vagues. A l'arrière la vague créée forme une dépression qui aspire tandis qu'à l'avant c'est une zone de haute pression qui apparaît et freine. De nouveau, la forme joue un rôle tout comme la vitesse. En effet, la traînée de vague augmente considérablement avec la vitesse mais disparaît assez rapidement en s'éloignant de la limite air-eau. A un mètre de profondeur, les effets ne sont presque plus ressentis, raison pour laquelle les nageurs profitent de rallonger un maximum leurs coulées après le départ et les virages. Ce déplacement subaquatique a été limité à 15m par la fédération internationale de natation, preuve que les gains peuvent être considérables.



Il faut donc veiller à se mouvoir le plus à plat possible et à ne pas former d'autres vagues – à l'entrée du bras dans l'eau par exemple.

De grosses lignes de séparation sont placées entre les différents concurrents lors de compétitions dans le but de réduire les vagues causées par les autres nageurs.

Les vagues freinent mais peuvent aussi être bénéfiques dans une situation particulière : on parle alors de « prendre la vague » dans le langage des nageurs. Lorsqu'un nageur est de peu devancé par celui de la ligne adjacente, il bénéficie de la vague frontale créée par son concurrent ; s'il arrive à avancer à la même vitesse que la vague, le nageur se déplace avec elle en étant poussé par cette dernière. Il faut donc être dessus car si le nageur est derrière, cette vague le pénalise.

### Combinaisons

Pour cloître ce chapitre sur les résistances, je trouve intéressant d'évoquer le cas des combinaisons en natation, plus précisément des super-combinaisons interdites depuis déjà quelques années. Elles se portent des épaules au chevilles (les bras sont libres), on parle alors de combinaisons intégrales.

Composées de polyuréthane, elles ont plusieurs rôles. Premièrement, leur aspect lisse permet de diminuer la traînée de frottements.

Ces combinaisons serrent les muscles et aplatissent les divers plis, ce qui d'une part réduit la section frontale et d'autre part retarde le décollement de la couche limite. Les chercheurs se sont inspirés de la « peau » de requins qui présente de minuscules écailles. L'eau pénètre dans les trous entre les écailles, ce qui la retient contre la surface et maintient l'écoulement laminaire plus longtemps que pour une surface lisse. Le même phénomène est présent avec les balles de golf qui possèdent des petites cavités qui retiennent l'air contre elles que des balles lisses. Ces combinaisons permettent donc de retarder le décollement de la couche limite, car l'eau leur colle, et réduit donc la taille de la dépression à l'arrière.

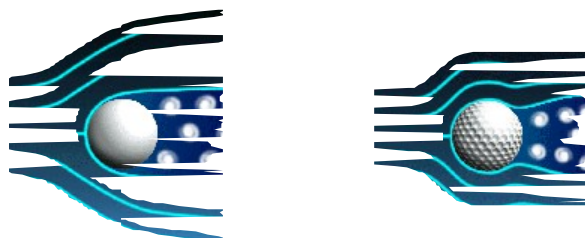


Figure 5 à gauche : la balle est lisse, la couche limite se décolle tôt, la dépression à l'arrière est grande.

Figure 6 à droite : l'écoulement laminaire est maintenu plus longtemps par la présence des trous car l'air colle plus à la surface. La taille de la dépression est réduite.

(<http://www.linternaute.com/science/divers/pourquoi/06/balles-golf/balles-golf.shtml>)

Il y a encore quelques rôles physiologiques comme une meilleure circulation du sang grâce à leur aspect serré mais je n'en parlerai pas plus car je m'écarterais de mon sujet de travail.

Ces combinaisons réduisent tellement la traînée qu'elles ont été interdites par la fédération internationale de natation (FINA). De nos jours, il est permis de porter des combinaisons allant des hanches aux genoux pour les hommes, et des épaules aux genoux pour les femmes. Elles sont cependant juste composées de tissu ; l'aspect peau de requin, le plus efficace pour diminuer la traînée, n'est plus présent. Elles gardent toutefois les autres aspects des super-combinaisons en polyuréthane même si elles sont plus petites et un peu moins lisses.

La force de traînée totale est donc formée de la traînée de forme, de la traînée de frottement et de la traînée de vague. Cette force s'oppose à la force de propulsion.

### 3) La propulsion

La propulsion du nageur est un phénomène ne faisant pas l'unanimité chez les scientifiques. En effet, ils s'interrogent sur le moteur principal de la propulsion ; est-ce plutôt la traînée rencontrée par la main quand elle se dirige vers l'arrière ou la portance et les vortex subis par cette dernière lors de déplacements latéraux ? Quelles sont les proportions ? Je vais discuter de ces théories en concurrence chez les spécialistes. Je parlerai également de la propulsion effectuée par les jambes.

La théorie de la traînée est plus évidente à première vue car nous savons que pour avancer il faut déplacer la main vers l'arrière ; cette dernière subissant alors une force orientée dans le sens du déplacement du nageur qu'elle transmet par les muscles à tout le corps. La main et les bras sont ralentis mais le corps avance. Cette résistance est évidemment la traînée, même phénomène faisant ralentir le corps comme vu précédemment. Paradoxalement, la traînée permet au nageur de se propulser tout comme elle lui résiste.

Pour pouvoir bénéficier au maximum de cette force, il faut disposer sa main, contrairement au corps, de manière la moins hydrodynamique. La couche limite doit se détacher et créer une large zone de basse pression. La forme la plus adéquate est celle d'une « plaque » opposée perpendiculairement au déplacement et donc au vecteur vitesse. Il est aisé de remarquer que si la main est disposée d'une autre façon l'avancement à chaque coup de bras est moins efficace. De nombreux entraîneurs le font observer à leurs nageurs en les faisant nager avec le poing fermé ou la main en couteau (l'auriculaire entre en premier et le pouce en dernier).

Une personne ayant des plus longs bras ou plus grandes mains possède une plus grande surface propulsive et est donc avantagée.

Pour rappel la traînée :  $F = \frac{1}{2} C_S \rho v^2$

Ici il est question de la traînée de forme car les deux autres traînées vues précédemment sont négligeables.

Il est également important de remarquer que pour que la main nous permette d'avancer, il faut qu'elle ait une vitesse en norme plus grande que celle du corps sinon la traînée n'est plus propulsive. En fait, c'est sa vitesse relative par rapport à l'eau qui compte car si cette dernière est dirigée vers l'avant la traînée ralentit le nageur.

La force de traînée est toujours perpendiculaire au déplacement de la main, le nageur doit donc veiller à orienter sa main un maximum vers l'arrière et à ne pas créer de mouvements contre productifs dans lesquels la paume de la main serait dirigée vers le haut comme à la fin d'un mouvement de bras en crawl. Mes entraîneurs m'ont toujours expliqué qu'il fallait que la paume de ma main « regarde » vers l'arrière et cela dans toutes les nages. Il est toutefois évident que les mouvements effectués par le nageur pour avancer n'ont pas un rendement parfait et contiennent des phases pouvant être perturbatrices.

La deuxième théorie, celle de la portance, nécessite quelques explications en mécanique des fluides. Comme nous l'avons vu plus haut, selon le théorème de Bernoulli la pression totale est conservée le long d'une ligne de courant.

Ci-dessous, un corps se déplaçant dans un fluide de masse volumique  $\rho$ . La ligne de courant contournant le haut de l'objet doit parcourir une plus grande distance que si elle allait tout droit comme en bas, ce qui implique une augmentation de la vitesse pour les particules passant en dessus de l'objet.

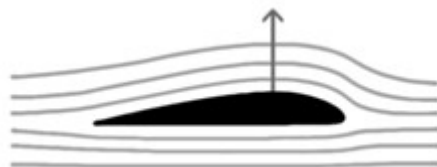


Figure 7 ([http://fr.wikipedia.org/wiki/Portance\\_\(mécannique\\_des\\_fluides\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Portance_(m%C3%A9canique_des_fluides)))

Dans le théorème de Bernoulli le terme lié à la différence de hauteur est ici négligeable en chaque point d'une ligne de fluide. Nous avons donc :  $P_{\text{tot}} = P_{\text{statique}} + \frac{1}{2}\rho v^2$

Une augmentation de vitesse implique une diminution de la pression statique sur le haut, tandis que sur le bas la vitesse reste quasiment inchangée. Il existe donc une différence de pression entre le haut et le bas du corps due à l'écoulement du fluide autour de ce dernier. Ce gradient de pression donne naissance à une force dirigée, dans notre cas, vers le haut : la portance – elle peut aussi être dirigée vers le bas mais elle est toujours perpendiculaire à l'écoulement.

La main subit aussi une force de portance : cette explication de la propulsion est née d'observations sur le déplacement de la main à l'aide de sources lumineuses. Il en est ressorti que la trajectoire de cette dernière lors d'un déplacement en crawl n'est pas rectiligne mais est plutôt composée de mouvements latéraux où le nageur profiterait du phénomène de portance grâce à la forme de sa main. En effet, l'eau est accélérée sur le dos de la main car elle doit parcourir une plus grande distance (en partie à cause du pouce) tandis qu'elle garde environ la même vitesse sur la paume. Il en résulte une basse pression sur le dos de la main et une haute pression sur la paume. C'est donc de nouveau la main qui transmet la force propulsive au corps.

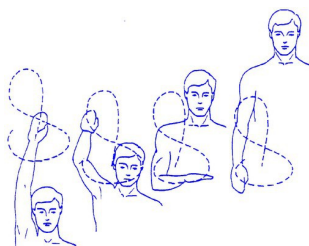


Figure 8 : Présence de déplacements latéraux lors d'un mouvement de crawl (<http://www.nataswim.info/natation/autour/424-modelisation-propulsion-natation-mecanique>)

La force de portance :  $F_{\text{portance}} = \frac{1}{2}C_z S \rho v^2$

Elle est proportionnelle la masse volumique  $\rho$  du fluide, à la surface  $S$  (de la main par exemple) parallèle à l'écoulement, à la vitesse relative au carré  $v^2$  entre le fluide et la main, et au coefficient de portance  $C_z$  qui dépend de l'angle d'attaque, de la vitesse et de la forme. Elle augmente avec l'angle d'attaque (angle entre le déplacement de la main et le segment reliant les doigts) jusqu'à un angle limite après lequel la couche limite se détache formant ainsi des turbulences autour de la main qui annulent l'effet de portance. La main doit donc avoir une forme hydrodynamique et l'angle d'attaque ne doit pas être trop grand.

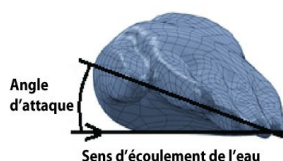


Figure 9 (<http://www.hindawi.com/journals/bmri/2013/140487.fig>)

La traînée sur la main est toujours de sens inverse à son déplacement tandis que la portance lui est perpendiculaire. La trajectoire de la main n'est ni seulement dirigée vers l'arrière ni seulement latérale. La résultante des forces de traînée et de portance doit donc avoir une composante dirigée dans le sens du déplacement du nageur la plus grande possible et la main doit toujours adapter son angle d'attaque en fonction de son déplacement.

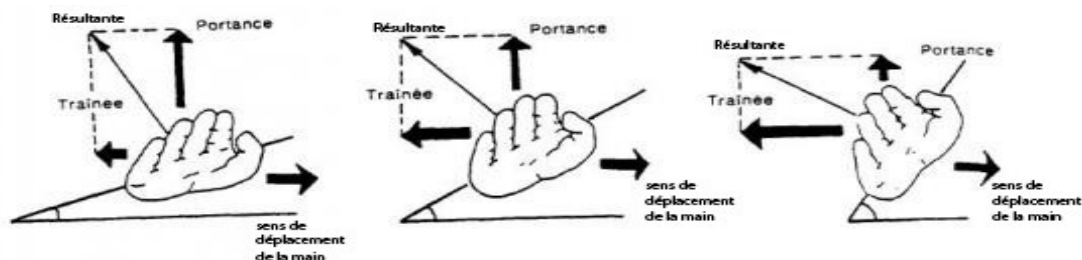


Figure 10 : Résultante des forces de portance et de traînée sur la main selon différents angles d'attaque. De gauche à droite : A, B, C (<http://www.nataswim.info/natation/autour/424-modelisation-propulsion-natation-mecanique>)

Lors d'un déplacement uniquement vers l'arrière (C), l'angle doit être de  $90^\circ$  (sur le schéma l'angle n'est pas droit car il s'agit d'un déplacement vers l'arrière avec une petite composante latérale) et c'est la traînée qui a le plus gros potentiel propulsif tandis que lorsque c'est un déplacement latéral (A), c'est la portance qui domine et l'angle doit être idéalement l'angle limite. Les trajectoires diagonales (B) profitent de la portance et de la traînée pour être le plus efficace possible. L'angle doit être inversé à chaque changement de direction car sinon la portance est négative. Nous en concluons que la main se positionne chaque fois autrement en fonction de son sens de déplacement. Toutefois, le nageur n'y fait pas tant attention que ça car il fonctionne à l'instinct et aux sensations.

Il existe encore une explication pour la propulsion qui est directement liée au phénomène de portance : la théorie du vortex. La main du nageur se comportant comme une aile d'avion en se déplaçant latéralement engendrerait deux tourbillons qui accentueraient l'effet de portance. Puis, lorsque la main arrive au bout de son déplacement latéral et change de direction un des deux tourbillons se détacherait vers l'arrière et par la troisième loi de Newton, il y aurait en conséquence de l'éjection de cette masse, une accélération du corps vers l'avant. Il s'agit du même phénomène observé dans le mode de propulsion des poissons.

Je ne développerai pas plus cette théorie du vortex en raison de mon manque de compétences en mécanique des fluides. Je l'ai toutefois évoquée car je trouve important de mettre en évidence le fait que la propulsion est un phénomène complexe avec plusieurs théories en concurrence dont on ne sait pas exactement laquelle est l'élément majeur de la propulsion.

Par contre, les scientifiques savent que la traînée, la portance et les vortex contribuent tous, dans des proportions respectives mais pas encore connues, à la propulsion du nageur. Lorsque la main se déplace vers l'arrière, il y a différentes phases qui profitent plus à l'un ou l'autre de ces modes de propulsion.

Nous allons maintenant parler de la propulsion effectuée par les membres inférieurs en crawl, par battements de jambes, et en phase subaquatique, par ondulations.

Commençons par les battements de jambes. Ils contribuent seulement à une petite part de la propulsion du nageur en nage complète (crawl). Comme précisé précédemment, les battements ont plus le rôle de maintenir l'équilibre du corps dans l'eau. La propulsion par battements de jambes se fait grâce à la traînée : le nageur effectue des mouvements vers l'arrière avec le bas de ses jambes et ses pieds, ce qui fait apparaître une force de traînée

dirigée d'une part vers le haut pour le maintien de l'équilibre et d'autre part vers l'avant (dans le sens de l'avancement) pour la propulsion. Il existe toutefois un grand nombre de mouvements parasites donnant naissance à une traînée dirigée vers le bas et / ou dans le sens contraire à l'avancement ; il s'agit donc d'une traînée contre-productive. Ce sont surtout les pieds qui permettent d'avancer grâce à leur forme. De plus, les articulations des chevilles permettent de réduire les mouvements contre-productifs de par leur souplesse qui oriente le pied de façon à bénéficier d'une traînée dirigée dans le bon sens que cela soit quand le nageur pousse avec le pied « contre le bas » ou « contre le haut ».

L'entraîneur doit faire attention à ce genre de détails qui permettent d'augmenter la capacité propulsive d'un nageur et de réduire les dépenses énergétiques ne contribuant pas à la propulsion tout en sachant qu'une part importante d'énergie est consommée par les jambes dans le but du maintien de l'équilibre.

Passons aux ondulations. C'est le même principe que pour les battements de jambes mais le corps est totalement immergé car le nageur utilise les ondulations après le départ et les virages en phase subaquatique.

Le nageur produit aussi des vortex lors de battements de jambes mais encore plus lors d'ondulations. Le tourbillon crée se détache lors du changement de direction du / des pieds et propulse le nageur en réaction à son éjection. Il s'agit du même principe de propulsion que pour les dauphins.

La souplesse du bassin, des genoux et des chevilles est importante pour avoir d'une part une plus grande force propulsive (plus grande traînée à chaque mouvement et plus gros tourbillons formés) et d'autre part pour éviter les mouvements contre-productifs. Le bassin, les genoux et les chevilles s'orientent de façon à ce que les mouvements de jambes donnent des mouvements propulsifs.

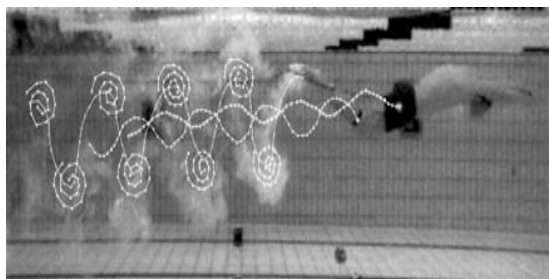


Figure 11 : Présence de vortex suite aux ondulations du nageur  
([http://www.fade.up.pt/rpcd/\\_arquivo/artigos\\_soltos/vol.6\\_supl.2/01.swimming\\_biomechanics.pdf](http://www.fade.up.pt/rpcd/_arquivo/artigos_soltos/vol.6_supl.2/01.swimming_biomechanics.pdf))

La vitesse atteinte par ondulations rivalise fortement celle atteinte en nage complète car la force propulsive générée par les ondulations est grande mais surtout car le coefficient de traînée est beaucoup moins important ; le nageur a une forme nettement plus « hydrodynamique » qu'en nage complète. De plus, sous l'eau la traînée de vague n'est presque plus ressentie.

La force de traînée, la force de portance, la force créée suite à l'éjection d'un vortex (créées par les membres supérieurs) et la force de propulsion créée par les jambes forment la force résultante de propulsion qui s'oppose à la traînée totale (aussi dans l'axe horizontal). La somme de forces sur le nageur crée une accélération sur l'axe horizontal (car le poids et la poussée d'Archimède se compensent) dans le sens du déplacement du nageur. Il faut donc juste prendre en compte la force de traînée et celle de propulsion :

$$F_{\text{propulsion}} - F_{\text{traînée}} = m a$$

Le nageur accélère jusqu'à ce que la force de traînée compense la force de propulsion, la première augmentant très rapidement avec la vitesse ( $F_{\text{traînée de forme}} = \frac{1}{2} CS\rho v^2$ ). Il existe donc une vitesse limite. Pour atteindre une grande vitesse il faut donc avoir la meilleure position possible afin que la force de traînée augmente le moins rapidement possible. Il est important que la force propulsive soit grande mais aussi que la force de traînée ne compense cette dernière qu'à une vitesse la plus grande possible. Le nageur doit optimiser et diminuer un maximum les facteurs augmentant la traînée totale par sa position ou par le port d'une combinaison par exemple. J'ai fait l'hypothèse que la force propulsive est constante pour montrer qu'il existe une vitesse limite que le nageur ne peut dépasser mais en réalité cette force n'est pas constante et le nageur subit de nombreuses accélérations.

## Départ

Il s'agit ici de comparer deux plots de départ différents, le premier plat, classique et le deuxième, penché, qui est une innovation technique.

Pourquoi parler du départ qui ne fait pas partie à proprement parler de la phase nagée ? Car le départ est ce qui va donner le ton à la course ; une bonne prise de vitesse permet de se donner confiance et évite de devoir se fatiguer à créer de la vitesse dans les premiers mètres pour rattraper les autres. Dans une finale olympique, un meilleur départ que les concurrents peut attribuer la victoire. Le départ est tellement important que de nouveaux plots sont apparus ces dernières années. Nous verrons comment ils permettent une meilleure prise de vitesse.

Analysons en premier lieu le plot dit « classique ». Il est parallèle à la surface de l'eau.

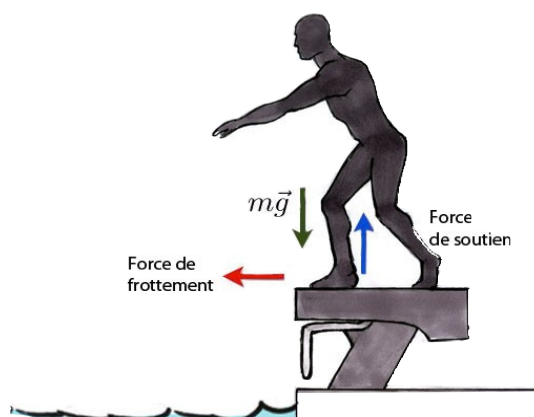


Figure 12 : Plot « classique » (<http://www.wired.com/playbook/2012/07/olympics-physics-swimming-starting-blocks/>)

Trois forces agissent sur l'athlète : la force de pesanteur, la force de soutien ( $F_s$ ) du plot et la force de frottement ( $F_f$ ) entre les pieds et le plot. Le pied avant bénéficie aussi d'une force de soutien s'il s'agrippe à l'angle à l'avant du plot mais ne le prenons pas en compte pour nos calculs car dans nos deux situations c'est la même chose. Lors du départ, le nageur poussera avec ses mains contre le bord du plot, il subira alors une force supplémentaire dirigée vers l'avant mais comme avant c'est la même chose pour les deux types de plots.

Nous avons selon l'axe Oy :  $m \cdot g = F_s$  et selon l'axe Ox :  $F_f = m \cdot a = F_s \cdot \mu_s = m \cdot g \cdot \mu_s$

Donc :  $a = g \cdot \mu_s$

Nous remarquons que l'accélération dépend de  $\mu_s$  le coefficient de frottement statique du matériau. Les plots sont recouverts la plupart du temps de matière rugueuse afin de pas glisser comme vu plus haut et de pouvoir pousser plus fort pour avoir une meilleure accélération de départ.

La force de frottements augmente si l'on presse plus fort sur la surface mais elle a un maximum ; si le nageur pousse trop fort contre l'arrière son pied glisse. Il faut donc faire attention à cela.

Prenons maintenant le deuxième plot qui est penché avec un certain angle.

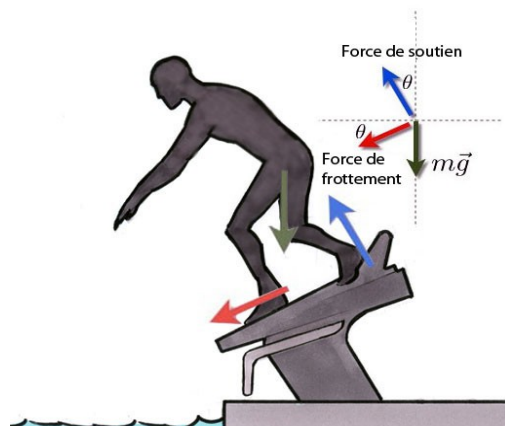


Figure 13 : Plot incliné (<http://www.wired.com/playbook/2012/07/olympics-physics-swimming-starting-blocks/>)

Nous avons toujours les trois mêmes forces. Le plot forme un angle  $\alpha$  avec l'horizontale. Prenons un système d'axes avec les x horizontaux et y verticaux.

Nous avons selon l'axe Ox :  $F_s \cdot \sin(\alpha) + F_f \cdot \cos(\alpha) = m a_x$  et selon l'axe Oy :  $F_s \cdot \cos(\alpha) + m g = 0$

En manipulant un peu :  $a_x = g \cdot (\tan(\alpha) + \mu_s)$

Nous regardons seulement l'accélération sur l'axe Ox car c'est celle-ci qui nous intéresse. On observe que l'accélération est de toute façon plus grande que dans le cas précédent s'il y a un angle.

Pour les deux cas nous avons pris  $F_s = m g$  mais il serait possible de presser plus fort sur le plot et l'accélération serait donc plus grande. Comme dit précédemment, le nageur va aussi pousser avec ses mains contre l'arrière, ce qui augmentera également l'accélération de départ.

Les plots de départ inclinés confèrent donc une plus grande accélération de départ.

## Conclusion

Le nageur est soumis à plusieurs lois physiques auxquelles il doit faire attention pour être le plus performant possible.

Premièrement, avant de penser à avancer il doit penser à son équilibre car il y a un moment de force dû à la différence des centres d'application de son poids et de la poussée d'Archimède ; ceci fait tomber ses jambes et il doit par conséquent taper plus ou moins fort dans l'eau avec ses pieds selon sa morphologie et sa position dans l'eau. Il fait donc ces battements pour créer un moment de force qui contre le premier et le maintien en équilibre. Ces battements de jambes demandent beaucoup d'énergie. La morphologie du nageur a aussi une influence sur sa flottaison verticale.

Deuxièmement, lors de son déplacement, le nageur est soumis à plusieurs types de résistances : la traînée de frottement liée au contact de la surface de son corps avec l'eau, la traînée de forme, la plus importante, liée à sa position dans l'eau, à sa morphologie, à sa vitesse qui engendrent une différence de pression à son front et à son arrière, puis finalement la traînée de vague due à des vagues provoquées par lui-même ou par un nageur voisin. Les

deux premières traînées peuvent être réduites par le port d'une combinaison, la deuxième seule en améliorant sa position dans l'eau et la dernière en se déplaçant suffisamment sous la surface de l'eau.

Finalement, le nageur doit se propulser pour avancer. Il peut le faire grâce à ses membres supérieurs ou grâce à ses membres inférieurs, les premiers contribuant à la part la plus importante de sa propulsion. La propulsion créée par les bras et surtout la main est formée de trois phénomènes : la traînée produite par la main lorsqu'elle se déplace vers l'arrière, la portance formée sur la main suite à des déplacements latéraux dans la phase de traction des bras et la formation de vortex (tourbillons) liée directement à la portance présente sur la main ; ces vortex sont éjectés lorsque la main change de direction dans ses déplacements latéraux et en réaction il créent une accélération sur le nageur.

Le nageur doit d'abord avoir un bon équilibre et une bonne position dans l'eau avant de vouloir se propulser fortement car la demande en énergie devient très vite énorme. La force devient nécessaire lorsque ces deux conditions citées sont acquises. La morphologie du nageur est également un facteur très important pour sa propulsion mais aussi dans le but de subir le moins de résistances.

La natation est un sport demandant des capacités techniques (adoption d'une bonne position dans l'eau et création de mouvements productifs), une morphologie adéquate et pour finir des capacités physiques qu'il s'agisse d'endurance ou de force – il faut comme dans tous les sports également des aptitudes mentales.

Je suis content d'avoir étudié ce sujet car j'ai pu acquérir de nouvelles connaissances scientifiques qui en plus m'ont permis de mieux comprendre les phénomènes présents dans le sport que je pratique. A l'entraînement, il m'arrive de penser à ces nouveaux acquis mais le plus important reste quand même la sensation.

## Bibliographie

### Sources livresques

LANOTTE Nunzio et LEM Sophie, « La physique de la natation », in *Pour la science*, n°426, Avril 2013, p. 42-49.

### Sources internet

ALLAIN Rhett, *Olympics Physics : New Platform Is No Chip Off The Old Starting Block*, in Wired : <http://www.wired.com/playbook/2012/07/olympics-physics-swimming-starting-blocks/>. Contenu : Départ, équations et images des différents plots. Consulté la dernière fois début mars 2014.

<http://swimright23.webs.com>. Contenu : mécanique des fluides, propulsion, équilibre. Consulté la dernière fois fin janvier 2014.

GIBO Tricia, *Swimming : A Dragging Battle Against the Forces of Physics*, in Illumin : <https://illumin.usc.edu/printer/79/swimming-a-dragging-battle-against-the-forces-of-physics/>. Contenu : Résistances et mécanique des fluides. Consulté la dernière fois fin janvier 2014.

Tara KOFF, Eddy MATKOVICH et Kristin MCPHILLIPS, *Resistance, Drag and Hydrodynamics*, 15 avril 2004 : <http://www.unc.edu/~tarak/>. Contenu : Mécanique des fluides. Consulté la dernière fois fin janvier 2014.

<http://physique.coursgratuits.net/mecanique-des-milieux-continus/theorie-de-bernoulli.php>. Contenu : Théorème de Bernoulli. Consulté la dernière fois fin décembre 2013.



<http://www.je-comprends-enfin.fr/index.php?/Mecanique-et-physique-des-vols/composante-de-la-trainee-aerodynamique/id-menu-51.html>. Contenu : Traînée de forme, dernière mise à jour le 29 janvier 2011. Consulté la dernière fois fin décembre 2013.

<http://veronique.deschodt.free.fr/mecafluides.html>. Contenu : Mécanique des fluides. Consulté la dernière fois fin janvier 2014.

Brent S. RUSHALL, *FLOTATION IN SWIMMING : THE FORGOTTEN TECHNIQUE MODIFIER*, in *Swimming Science Bulletin* 36, 15 février 2007 : <http://coachsci.sdsu.edu/swim/bullets/float36.htm>. Brent S. RUSHALL est professeur à *San Diego State University*. Contenu : Equilibre du nageur, flottaison. Consulté la dernière fois mars 2014.

<http://www.youtube.com/watch?v=4q5ffroIMMc>. Contenu : Traînée de forme.

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Portance>. Contenu : Portance. Consulté la dernière fois fin février 2014.

<http://www.nataswim.info/natation/autour/424-modelisation-propulsion-natation-mecanique>. Contenu : Mécanique des fluides, propulsion. Consulté la dernière fois mars 2014.

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Traînée>. Contenu : Traînée. Consulté la dernière fois février 2014.

Corey BINNS, *How It Works : The Dolphin Kick*, in *POPULAR SCIENCE*, 2008 : <http://www.popsci.com/how-it-works/article/2008-08/how-it-works-dolphin-kick>. Contenu : Propulsion par ondulations. Consulté la dernière fois mars 2014.

Raúl ARELLANO, José M. TERRES-NICOLI, Jose M. REDONDO, *Underwater Undulatory Swimming*, pp.16-17, in *FUNDAMENTAL HYDRODYNAMICS OF SWIMMING PROPULSION* :

[http://www.fade.up.pt/rpcd/\\_arquivo/artigos\\_soltos/vol.6\\_supl.2/01.swimming\\_biomechanics.pdf](http://www.fade.up.pt/rpcd/_arquivo/artigos_soltos/vol.6_supl.2/01.swimming_biomechanics.pdf). Contenu : Vortex. Consulté la dernière fois mars 2014.

<http://www.linternaute.com/science/divers/pourquoi/06/balles-golf/balles-golf.shtml>. Contenu: Mécanique des fluides, aérodynamisme. Consulté la dernière fois février 2014.

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Aérodynamisme>. Contenu : Traînée de forme. Consulté la dernière fois février 2014.