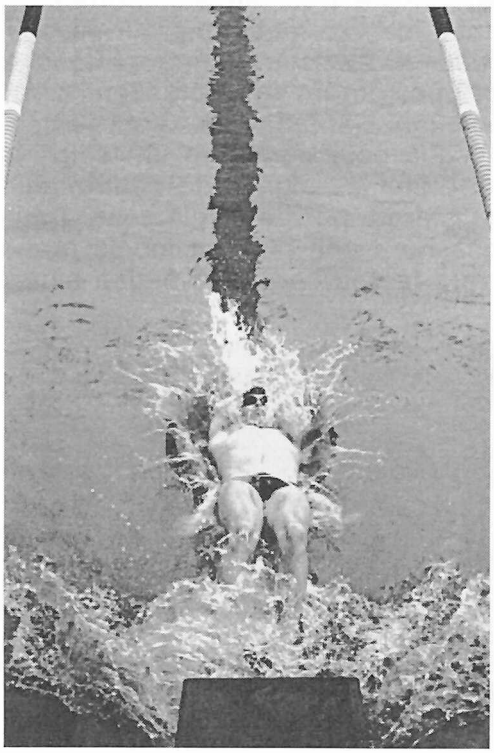
7. La notion de résistance à l'avancement



De très nombreuses notions mécaniques ou biomécaniques sont actuellement employées lors de l'étude de la propulsion aquatique. Un des problèmes de compréhension des concepts utilisés est lié au fait de référer une terminologie identique à des conceptions qui se différencient nettement. La résistance à l'avancement ne devra pas être confondue avec la résistance propulsive. Les forces de portance sont fondamentalement différentes des forces de traînée. Il s'agira également de différencier les résistances de vague, de frottement ou de remous (Counsilman 1975) tout comme il s'agira de différencier les traînées de forme, de vague ou de frottement (Hay 1980, Maglischo 1987).

Les concepts et notions théoriques ont évolué dans le temps grâce à l'amélioration des connaissances scientifiques. C'est le cas particulièrement des notions de portance et de traînée s'appuyant d'abord sur une conception de la troisième loi d'action-réaction de Newton, puis par la suite sur l'application du théorème de Bernouilli (Counsilman 1971).

Différenciation entre résistance à l'avancement et résistance de propulsion

Un nageur en déplacement est un système vivant qui crée des zones de résistances qui ont tendance à freiner son action.

L'avancée du corps du nageur est le résultat de plusieurs forces, dont la première est la propulsion (actions locomotrices qui cherchent des résistances afin de prendre des appuis sur l'eau). La seconde est la résistance à l'avancement (réactions freinatrices qui s'opèrent sur toutes les zones corporelles se déplaçant moins vite que les appuis propulsifs). Une troisième force, liée au positionnement du corps mais également aux segments propulsifs ou non propulsifs, va également intervenir, c'est la portance qui aura des implications indirectes sur les deux autres forces.

Les lois de la mécanique des fluides sont les mêmes quant aux résistances lorsque le corps avance dans un volume d'eau inerte ou lorsque celui-ci est stabilisé dans un courant d'eau en mouvement dans des conditions de vitesse identiques. Cette forme de résistance (dans les deux cas) est appelée résistance passive, c'est elle qui peut être mesurée par exemple par remorquage du nageur immobile dans l'eau. Une résistance active par contre correspondra à celle du nageur en situation de nage c'est-à-dire opérant des actions motrices propulsives.

La résistance passive à l'avancement

De nombreuses études expérimentales ont analysé les résistances de nageurs en situation de remorquage, en bassin de carène ou en « swimming flume » (bassin à courant d'eau spécifiquement mis en place pour l'étude de la nage).

Counsilman, en 1968, distinguait trois formes de résistances provoquées par l'eau *(fig. 30)*.

Ce même auteur avait déjà montré dès 1955, faisant suite aux travaux de Alley en 1952, qu'un nageur tracté était soumis à trois formes de résistances :

- une résistance de forme,
- une résistance de vague,
- une résistance de frottement.

Il est déjà possible de considérer que les résistances frontales et l'aspiration de queue sont des composantes de la résistance de forme.

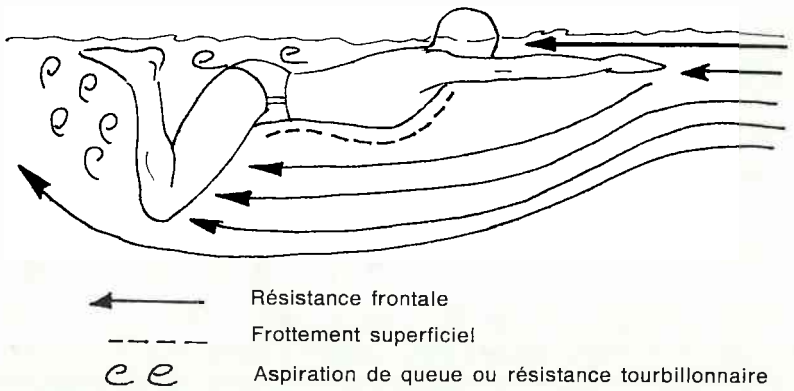


Figure 30. Trois formes de résistances provoquées par l'eau (d'après Counsilman 1968)

Les caractéristiques mécaniques de la résistance à l'avancement

Une première question se pose immédiatement : quelles sont les composantes mécaniques de cette résistance à l'avancement ?

Si on utilise la formule $R = KSV^2$ on considérera que la résistance (R) est égale au produit du carré de la vitesse(V) par la surface du maître couple du corps concerné (S) par un coefficient (K) correspondant à la forme de ce corps.

1. Analysons tout d'abord le facteur vitesse

Dans la relation $R = KSV^2$ on remarque que le facteur « vitesse de déplacement » du corps est important. Si cette vitesse est nulle (cas d'un corps inerte) la résistance à l'avancement est donc nulle. Par contre, en déplacement, ce facteur vitesse a une incidence essentielle sur les résistances à l'avancement. En effet, si à une vitesse de 1 mètre par seconde (exemple 1 minute 40 secondes au 100 mètres) la résistance est : $R = K \times S \times 1$, à 2 mètres par seconde (exemple 50 secondes au 100 mètres) la résistance sera $R = K \times S \times 4$.

Les trois formes de résistances passives évoquées (résistance frontale, frottement superficiel et aspiration tourbillonnaire) vont dépendre de ce facteur vitesse.

2. Qu'est-ce que la surface du maître couple ?

Cette surface représente la projection orthogonale du corps sur un plan vertical lorsqu'il se déplace à l'horizontale. En effet, le maître couple d'un corps correspond à la représentation perpendiculaire à l'axe du déplacement de ce corps. Sa surface correspond en quelque sorte à l'ombre laissée sur un écran placé perpendiculairement au déplacement lorsqu'un projecteur éclaire le corps par l'arrière *(fig. 31a et b)*.

Les nageurs connaissent bien ce facteur de résistance particulièrement lors des coulées de reprise de nage où le relevé de la tête par exemple réduit la coulée à cause de l'augmentation de résistance due à l'accroissement de surface du maître couple. Mais en situation de nage également, l'augmentation excessive de la surface du maître couple peut être à l'origine d'une grande résistance à l'avancement *(fig. 32)*.

Une difficulté apparaît toutefois car, alors qu'il est facile d'analyser la surface du maître couple d'un corps rigide, dans le cas du corps humain déformable et non aligné par rapport au sens du déplacement, cette surface restera un concept théo-

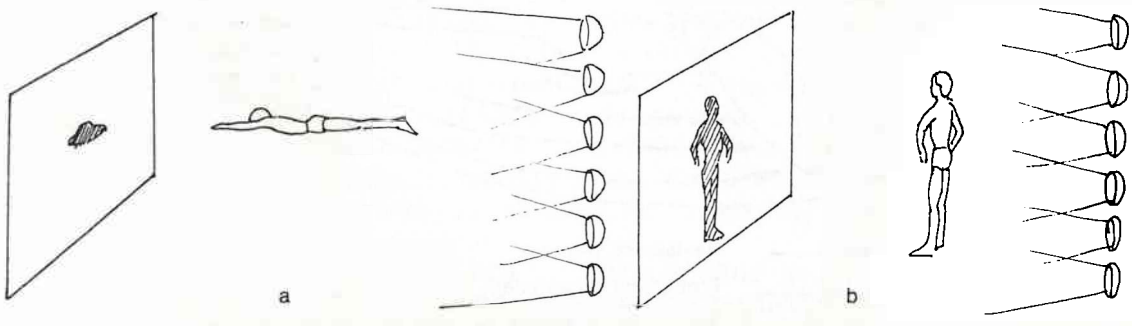


Figure 31. Représentation schématique du maître couple.
Surface du maître couple d'un nageur en coulée (a) surface d'un sujet debout (b).

Figure 32. Résistance à l'avancement augmentée par une grande surface du maître couple en crawl.

rique. Dans les études sur la traînée de forme que nous envisagerons plus tard, ce paramètre va intervenir de manière importante.

Les trois formes de résistances passives évoquées (résistance frontale, frottement superficiel et aspiration tourbillonnaire) vont dépendre de cette surface du maître couple.

3. Le coefficient de forme

Chacun sait que pour deux corps ayant la même surface de maître couple, la forme de ces corps permet une plus ou moins bonne pénétration et donc une plus ou moins grande réduction de résistance à l'avancement. Il s'agit ici de la correspondance au Cx d'une voiture *(fig. 33)*.

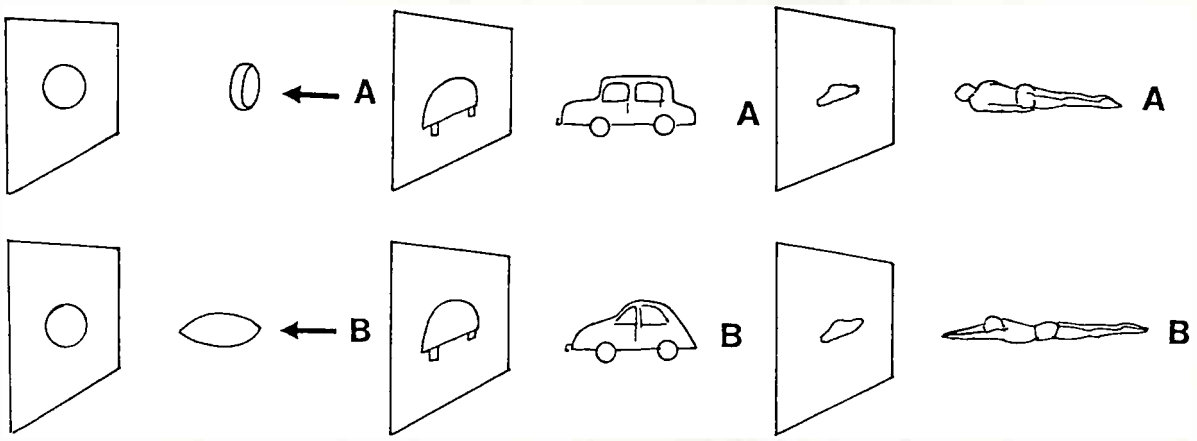


Figure 33. Représentation schématique du coefficient de forme faisant apparaître des corps de même surface de maître couple mais dont les formes de pénétration sont différentes : B mieux « profilé » que A.

Les trois formes de résistances passives évoquées (résistance frontale, frottement superficiel et aspiration tourbillonnaire) vont dépendre de ce coefficient de forme.

Pour illustrer la réduction progressive de la résistance à l'avancement, il est intéressant d'observer un nageur réaliser une coulée à partir d'une position d'origine debout *(fig. 34)*. Dans cette situation le nageur offre de moins en moins de surface de maître couple, ceci est facilement évaluable *(fig. 34a,b,c,d,e)*. Dans le même temps il améliore très sensiblement sa forme de pénétration dans l'eau.

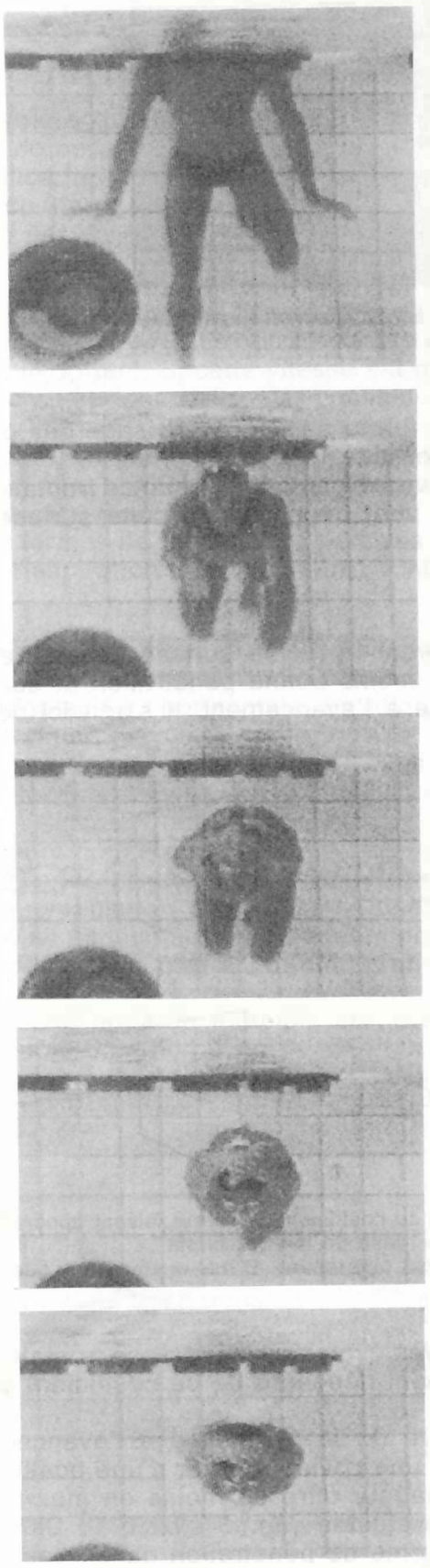


Figure 34. Réduction progressive de la surface du maître couple lors d'une coulée ventrale à partir d'une position debout. (Ill. Bruno Gutzeit)

8. Les notions de portance et de traînée passives

Ces notions de portance et de traînée, de la même manière que celle de résistance peuvent être considérées de manière passive, active, ou propulsive.

Comme nous l'avons vu dans le sous-chapitre 4 sur l'équilibration aquatique, un corps tracté horizontalement et vers l'avant se redresse *(fig. 19)*. Celui-ci est en effet soumis à une force directe : la traction exercée vers l'avant, et une force indirecte : l'effet horizontal de l'eau. La résistance (R) que rencontre le corps va s'exercer perpendiculairement à la surface du corps qui se déplace. Celle-ci est la résultante de deux forces, la portance (P) et la traînée (T) *(fig. 35)*.

La portance aura comme action de tendre à redresser les surfaces, à les élever (les « porter »).

La traînée passive s'exerçant dans le sens contraire de la progression tendra à freiner la progression du nageur. Ce terme de traînée est fréquemment et étroitement associé au terme de résistance.

Mais la traînée n'est pas toujours passive, elle peut être utilisée à des fins propulsives.

Nous différencierons donc les notions de portance et de traînée passives, des notions de portance et de traînée propulsives. Ces dernières devant être reprises de manière plus approfondie dans le sous-chapitre suivant, dans la mesure où les recherches scientifiques actuelles ont énormément fait évoluer ces deux notions.

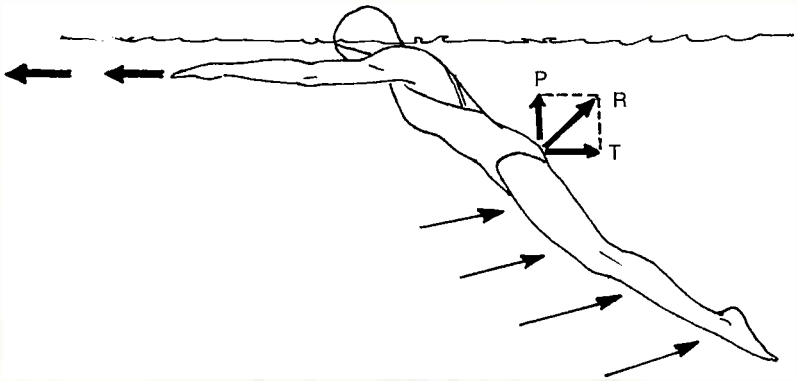


Figure 35. Résistance rencontrée par un corps tracté horizontalement vers l'avant. Cette résistance (R) s'exerce perpendiculairement (L) à la surface du corps. Elle est la résultante de deux forces, la portance (P) et la traînée (T).

Résistance ou traînée de forme

Elle correspond aux résistances à l'avancement liées aux mouvements verticaux ou latéraux excessifs qui augmentent d'une part la surface antérieure amplifiant les résistances frontales, mais également les surfaces postérieures intervenant négativement sur les aspirations tourbillonnaires postérieures.

« Cette résistance accrue est appelée traînée de forme car elle dépend de la forme du corps du nageur au cours de son déplacement dans l'eau », (Maglischo 1987).

Résistance frontale

Celle-ci sera, en plus des facteurs de vitesse et de surface du maître couple excessivement liée au coefficient de forme dans sa composante frontale.

Counsilman (1968) nous fait part d'une étude réalisée sur un nageur remorqué en position couchée sur le ventre. Lorsque sa tête était en position haute (eau au niveau des sourcils), la traînée a augmenté significativement, par rapport à une position normale de la tête (l'eau arrivant au niveau de la ligne des cheveux).

Résistance ou traînée de remous

Cette résistance correspond totalement aux résistances tourbillonnaires ou aspiration de queue. Il s'agit d'une forme de résistance excessivement freinatrice. Elle exerce un effet de succion voire d'aspiration à l'arrière du corps, ceci d'autant plus que la surface du maître couple mais surtout la forme arrière du corps sont mal profilées.

En effet, lors de l'étude précédente du coefficient de forme, le profil avant (lié aux résistances frontales) n'avait pas été différencié du profil arrière. Or, une question importante doit être posée : quelle est la part relative de la résistance frontale et de la résistance de remous comme frein à la propulsion ?

Pour tenter de répondre à cette question, utilisons la démonstration suivante : lorsque 4 objets de même poids et de même surface de maître couple sont lâchés dans l'eau, en considérant qu'ils ne modifient pas leurs positions respectives pendant leur chute, leur ordre d'arrivée au sol sera fonction de l'importance de leur résistance et donc surtout des résistances frontales et de remous *(fig. 36)*.

On constate que la sphère a moins de résistances frontales et de remous que les trois autres objets, que le disque a plus de résistances frontales et de remous

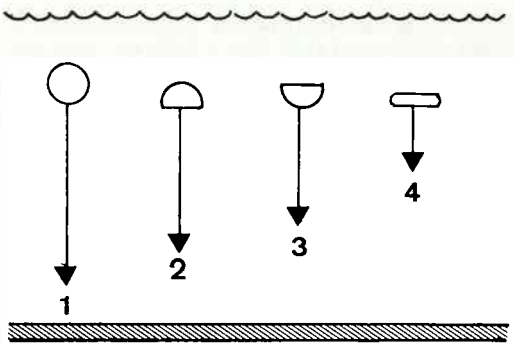


Figure 36. Ordre d'arrivée au sol de 4 objets de même poids et de même surface de maître couple mais ayant des formes différentes.

que les trois autres objets, dans le cas des deux demi-sphères leurs formes sont identiques mais inversées. La conclusion est donc que les résistances de remous sont plus freinatrices que les résistances frontales, à la vitesse de chute de ses objets.

Résistance ou traînée de vague

Lorsqu'un corps se déplace à la surface d'un liquide, il se crée une zone de turbulence provoquant des vagues dont les plus importantes sont la vague frontale à l'avant du corps et la vague de queue à l'arrière.

Comme toute résistance, elle dépend entre autre de la vitesse du nageur et de la forme de son corps, mais ici elle sera liée directement aux mouvements réalisés à proximité de la surface de l'eau.

Les vagues et les turbulences de l'eau créent une zone de haute pression ayant pour effet un frein important sur la progression du nageur. D'après Maglischo (1987) l'augmentation de la résistance est alors non plus proportionnelle au carré de la vitesse, mais au cube de la vitesse du nageur.

Certaines vagues extérieures au nageur peuvent être réduites par l'utilisation de lignes « antivagues », mais ce sont surtout les vagues dues aux mauvais positionnement ou pénétration dans l'eau qui limitent l'efficacité propulsive.

Les mouvements contribuant le plus à provoquer des vagues sont ceux de haut en bas et de bas en haut, particulièrement lorsqu'ils se réalisent près de la surface de l'eau. Il s'agit le plus souvent de phases d'entrée ou de sortie de l'eau des segments propulsifs.

Résistance ou traînée de frottement

Cette résistance est directement liée à la notion de couche-limite. En effet, la couche-limite définit la valeur de la résistance ou traînée de frottement du corps (Lachnitt 1978).

Lorsqu'un corps se déplace dans un fluide, les molécules de fluide qui sont le plus près du corps adhèrent à celui-ci, leur vitesse est nulle. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne normalement de la paroi, cette vitesse croît et atteint pratiquement

au bout d'une certaine distance la vitesse du fluide dans l'écoulement extérieur au corps. La mince couche de fluide dans laquelle la vitesse est croissante s'appelle la couche-limite. Du fait que deux couches infiniment voisines de fluide ont des vitesses différentes, il en résulte des forces de viscosité importantes (par cisaillement).

Pour Hay (1980) « il semble peu vraisemblable qu'une traînée de frottement exercée sur un nageur soit de grandeur suffisante pour être de quelque signification pratique ». Alors pourquoi les nageurs se rasent-ils entièrement avant les courses importantes ? Pourquoi portent-ils des maillots en tissu lisse sans plis ni espaces ? Ces méthodes ont fait et font encore leurs preuves alors que d'après Clarys (1978) la résistance due au frottement est négligeable pour un nageur. Maglischo (1987) émet l'hypothèse d'effets psychologiques et kinesthésiques sur l'amélioration des performances après le rasage. Il apparaît toutefois important de préciser que si l'effet du rasage permet au nageur de ne gagner qu'un centième de seconde sur un 100 mètres grâce à la réduction des résistances, cela peut suffire dans certaines conditions à la victoire (Biondi a perdu le 100 mètres papillon des Jeux de Séoul, en 1988 pour 1 centième de seconde).

Synthèse sur les résistances passives à l'avancement

Un schéma peut tenter de synthétiser les conclusions liées aux problèmes des résistances passives. Celui-ci imagine les formes de deux corps se déplaçant passivement dans le milieu aquatique. Le premier ayant les caractéristiques négatives de l'efficacité à l'avancement alors que le deuxième recherche les caractéristiques les plus favorables à la réduction des résistances à l'avancement *(fig. 37)*.

Dans le cas du corps A *(37a)* les résistances frontales, latérales et de queue vont freiner de manière importante sa pénétration dans le fluide. Alors que dans le cas de la forme du corps B *(37b)* les filets d'eau écartés par le solide restent collés à la paroi et se rejoignent à l'arrière. Ce n'est pas par hasard si cette forme en goutte d'eau, plus hydrodynamique que la sphère, correspond à celle en contact avec l'eau des bateaux destinés à se déplacer horizontalement, ou à celle du dauphin, le plus rapide des cétacés pouvant se déplacer dans l'eau à une vitesse allant jusqu'à 55 km à l'heure.

Il apparaît toutefois que la forme de pénétration dans l'eau dépend de la vitesse de pénétration. L'évolution de la forme immergée des bateaux peut d'ailleurs nous donner quelques informations. Gutelle (1979) montre que les angles d'entrée et de

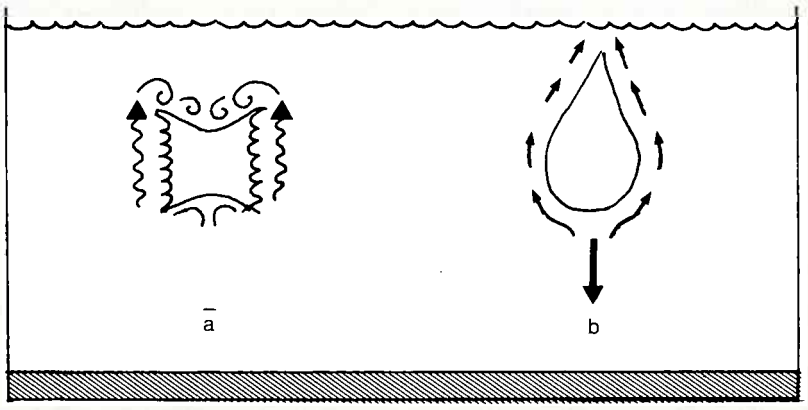


Figure 37. Résistances à l'avancement différenciées par la forme des corps se déplaçant passivement.

sortie des bateaux, sont liés au degré de vitesse. Ce degré de vitesse est fonction de la vitesse de déplacement et de la longueur de flottaison (on utilise également le nombre de Froude prenant en compte également l'accélération de la pesanteur). Les formes des plans de flottaison sont alors très différentes pour des degrés de vitesse différents *(fig. 38)*.

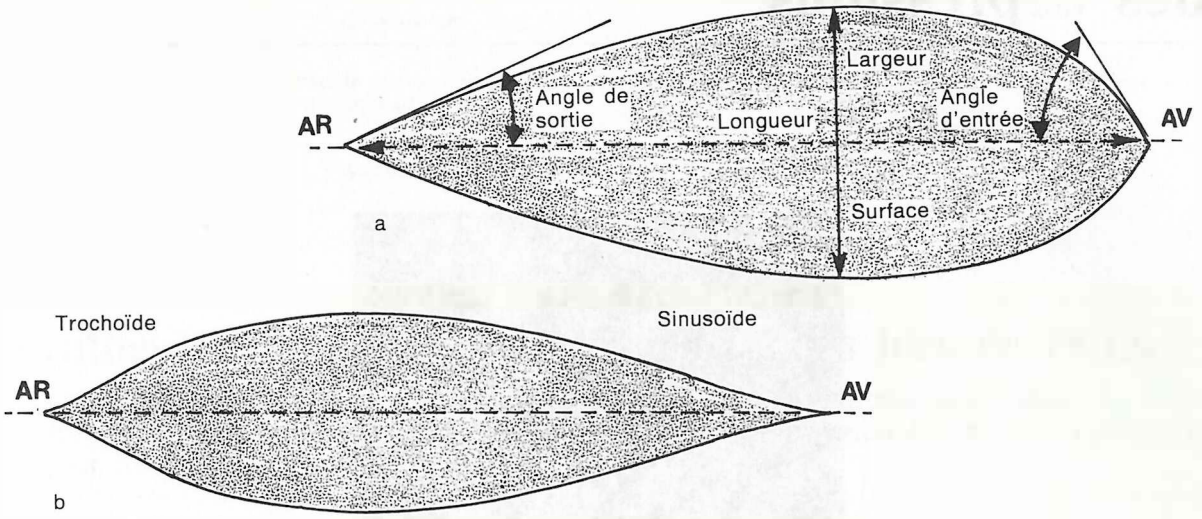


Figure 38. Formes du plan de flottaison pour des degrés de vitesse inférieurs à 0,5 (a) et voisins de 1 (b), (d'après Gutelle 1979).

A des degrés de vitesse inférieurs à 0,5 *(fig. 38a)*, l'angle d'entrée peut être extrêmement ouvert conduisant alors à des formes d'avant très pleines (exemple des péniches ou voiliers hollandais). En effet, à ces vitesses, c'est la traînée de séparation à l'arrière qui constitue la part prédominante de la résistance. Lorsqu'on atteint des degrés de vitesse de l'ordre de 1, la part de la résistance de vague s'accroît très rapidement. Elle justifie d'utiliser un angle d'entrée faible sans pour autant accroître la courbure sujette au développement de vagues. A l'arrière, la forme concave, à la condition d'une courbure faible, est avantageuse. C'est sur ces caractéristiques qu'a été conçue la forme de flottaison de la goélette América *(fig. 38b)*.

Mais ces conclusions ne correspondent qu'à la forme de pénétration de bateaux dont une seule partie est immergée. D'autre part, la source de propulsion des voiliers par exemple est réalisée en dehors de l'élément liquide.

Par contre, une étude expérimentale, sur l'aérodynamisme du vélo en cyclisme, valide fortement la forme de « goutte d'eau inversée » comme optimale. En effet l'institut Aérotechnique de Saint-Cyr a entrepris dès 1980 l'étude d'une nouvelle bicyclette destinée au record du monde de l'heure (MENARD, 1988). L'étude systématique de tous les éléments constituant le cadre, la fourche, le guidon et les roues a mis en évidence qu'une diminution appréciable de la traînée pouvait être obtenue par l'amélioration des formes des tubes. Les tubes profilés en forme de goutte d'eau, contrairement à une idée reçue, n'ont un fonctionnement optimum que lorsque la partie la plus bombée du profil est disposée face au courant d'air. L'écart entre le tube disposé dans le sens dit « normal » et le sens dit « inversé » a atteint 52 %. Menard (1988) précise « dès lors tous les tubes profilés des vélos de la nouvelle génération ont été mis en position inversée. Les gains ont été très spectaculaires ».

Cette conclusion concernant le vélo peut apparaître assez éloignée des préoccupations en natation, mais si effectivement la résistance de l'air est bien plus réduite que celle de l'eau, en revanche, les vitesses atteintes en soufflerie et en réel sont bien plus importantes que celles du nageur.