

## La Marche du Navire



**Ph. Allard**

PROFESSEUR en CHEF de l'ENSEIGNEMENT MARITIME

# TABLE des MATIÈRES

## 1 - INTRODUCTION À LA MÉCANIQUE DES FLUIDES

- Définitions
- Propriétés spécifiques des fluides
- L'air et l'eau
- Description de l'écoulement des fluides
- Le mouvement d'une particule fluide
- Exemples d'écoulement fluides
- Les sources de tourbillons

## 2 - LES ÉCOULEMENTS DANS LES FLUIDES RÉELS

- L'expérience de Reynolds
- Les formes d'écoulement
- Le nombre de Reynolds
- La couche limite
- La résistance de frottement
- Les régimes d'écoulement (tourbillons alternés)

## 3 - LA HOULE

- Caractéristiques principales des ondes de gravité
- Un modèle géométrique : la houle trochoïdale
- La vitesse des particules
- Relations entre les caractéristiques cinématiques
- Le mouvement dans la masse d'eau
- Energie de la houle

## 4 - LES RÉSISTANCES HYDRODYNAMIQUES À L'AVANCEMENT

- La résistance de frottement
- La résistance de forme
- La résistance de vagues
- Le bilan quantitatif
- Le cas du voilier

## 5 - LA SURVITESSE

Effet de pente de la surface  
Influence de la houle  
La mise en survitesse

## 6 - AÉRODYNAMIQUE EXPERIMENTALE

Equations de continuité et de Bernoulli, variation de pression engendrée par la courbure des filets fluides  
Résistance de l'air. Coefficients aérodynamiques  
La viscosité  
Représentations graphiques des coefficients aérodynamiques, interprétation  
La polaire d'une aile

## 7 - LA NOTION DE CIRCULATION

Circulation d'un vecteur  
Propriétés de la circulation de la vitesse  
Portance due à la circulation  
Tourbillons alternés

## 8 - LA GÉNÉRATION DE LA CIRCULATION AUTOUR D'UNE AILE

## 9 - LA DYNAMIQUE DES VOILES

Aile rigide et voile, caractéristiques géométriques  
Le vent apparent  
Interaction entre deux voiles

## 10 - LA MÉCANIQUE DES MANOEUVRES EN MER

Résultante aérodynamique, centre vélique  
Résultante hydrodynamique, centre de dérive  
Polaires de vitesse d'un voilier, applications  
Equilibre des forces aux différentes allures, Stabilité de route  
Les moyens de réglages des focs et grands-voiles  
Les réglages au service des allures  
Le roulis rythmique

# INTRODUCTION A LA MECANIQUE DES FLUIDES

## 1- DEFINITIONS

La *mécanique des fluides* est la science qui étudie l'équilibre et le mouvement des fluides.

Elle comprend l'*hydrostatique* et l'*hydrodynamique* qui concernent les liquides, et aussi les gaz dans le domaine des basses vitesses où ils peuvent être considérés comme incompressibles, et l'*aérodynamique*, qui étudie les écoulements d'air considérés comme compressibles.

Bien que dans toute la suite de ce cours les vitesses envisagées soient faibles et les fluides considérés, air et eau, donc incompressibles nous avons regroupé dans une partie aérodynamique l'étude des écoulements autour d'une aile ou d'une voile, et dans une partie hydrodynamique l'étude des écoulements autour d'une coque. Cependant, du fait qu'il s'agit du même domaine de phénomènes le lecteur observera des redites ou des compléments d'information d'un chapitre à l'autre.

Comme toute science de la nature, la mécanique des fluides fait appel à la théorie et à l'expérience. Nous avons cherché ici à rendre quasi absent l'outillage mathématique pour nous concentrer sur l'aspect physique des phénomènes et en comprendre le mécanisme intime.

## 2 - PROPRIETES SPECIFIQUES DES FLUIDES

La notion de fluide s'applique essentiellement aux corps qui peuvent s'écouler, c'est-à-dire éprouver de grandes variations de forme sous l'action de forces relativement faibles.

On peut considérer un fluide comme un *milieu continu déformable*, cette hypothèse est parfaitement justifiée à l'échelle macroscopique à laquelle nous nous plaçons exclusivement.

En tout point d'un fluide existent des *contraintes*, quotient de la force par la surface sur laquelle elle s'applique. On distingue parmi ces contraintes les *forces de pression* qui sont normales aux éléments sur lesquels elles s'exercent et les *forces de viscosité*. L'expérience conduit à admettre que les forces de viscosité sont nulles dans un fluide réel en équilibre. Il n'en est pas ainsi dans un fluide en mouvement, mais les forces de viscosité décroissent avec la vitesse et s'annulent avec elle.

Un *fluide parfait* est un fluide idéal dans lequel il n'existe pas de contraintes de viscosité. Les actions des diverses parties d'un fluide parfait les unes sur les autres ainsi que sur les parois se réduisent à des forces normales.

Aucun fluide réel n'est parfait mais dans un certain nombre de cas, l'approximation obtenue dans le cadre de cette hypothèse serre d'assez près la réalité pour que le schéma fourni puisse être utilisé avec profit.

On sait aussi que les fluides sont compressibles. Dans le cas des liquides la compressibilité n'intervient que rarement dans les applications courantes. Elle ne manifeste son influence que dans la transmission des ébranlements (ondes acoustiques). La compressibilité des gaz est beaucoup plus grande ( $10^4$  fois celle des liquides) ; cependant il existe de nombreux cas pratiques où elle peut être négligée. Dans l'étude des écoulements d'air, par exemple, cette approximation sera justifiée lorsque la vitesse d'écoulement ne sera qu'une fraction faible de la célérité du son dans les mêmes conditions (330 m/s au niveau du sol). A titre d'illustration à 40 m/s la masse volumique de l'air n'a varié que de 1%.

### 3 - L'AIR ET L'EAU

Ces fluides réels sont décrits pour les phénomènes qui nous intéressent ici par un certain nombre de caractéristiques physiques :

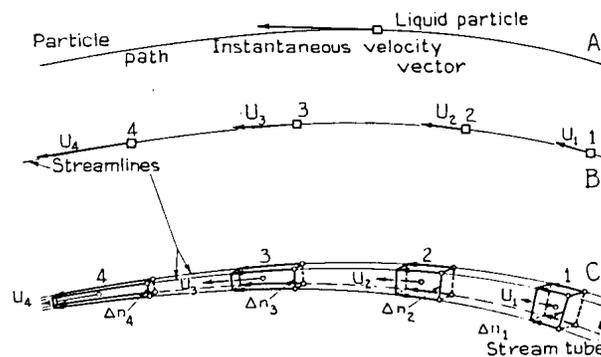
- la *masse volumique*  $\rho$
- la *viscosité dynamique*  $\mu$
- la *viscosité cinématique*  $\nu = \mu/\rho$

soit en particulier pour eux (à 15°C) :

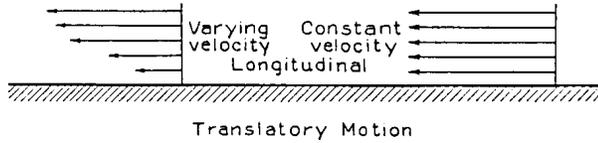
fluide	$\rho$	$\mu$	$\nu$
air	1,22 kg/m <sup>3</sup>	1,8.10 <sup>-5</sup> N.s/m <sup>2</sup>	14,5.10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s
eau salée	1026 kg/m <sup>3</sup>	122.10 <sup>-5</sup> N.s/m <sup>2</sup>	1,19.10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s

### 4 - DESCRIPTION DE L'ECOULEMENT DES FLUIDES

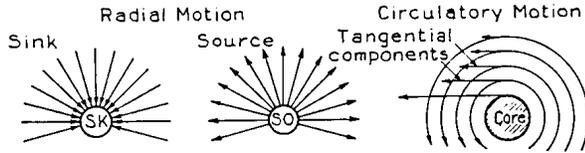
On supposera que les particules qui à l'instant  $t_0$  se trouvent sur une courbe  $C_0$  se déplacent en restant toujours en contact et se trouvent à chaque instant  $t$  sur une courbe  $C$  appelée *ligne fluide*. Cela revient à supposer que la vitesse varie de façon continue au sein du fluide. Les *trajectoires* (particle path) sont les courbes qu'engendrent les particules au cours de leur déplacement.



Les *lignes de courant* (streamlines) sont des courbes qui, à un instant déterminé  $t_0$ , sont tangentes au vecteur vitesse en chacun de leurs points. Une photographie légèrement floue du mouvement de particules solides mélangées au fluide montre exactement ces lignes de courant.



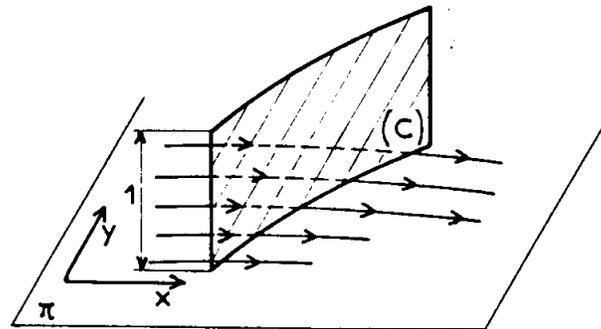
Elles décrivent l'allure général de l'écoulement : longitudinal, circulaire, radial, de vitesse uniforme ou non, avec des puits ou des sources, etc.



Un *tube de courant* (stream tube) est la surface constituée par les lignes de courant qui s'appuient sur une courbe fermée.

Un cas particulier important est celui des écoulements stationnaires ou permanents, pour lesquels la vitesse en un point quelconque est indépendante du temps : les trajectoires coïncident alors avec les lignes de courant. Ce sont les *filets fluides*. Dans un écoulement stationnaire un tube de courant est fixe dans le temps et dans l'espace et tout se passe comme si le fluide s'écoulait à l'intérieur de parois rigides.

Un fluide est en *écoulement plan* ou *bidimensionnel* lorsque les vitesses des particules restent constamment parallèles à un plan fixe  $\pi$  et que de plus les vitesses de celles qui se trouvent sur une normale à ce plan  $\pi$  sont égales en tout point, à chaque instant. Les lignes de courant sont alors planes. Dans l'étude de tels écoulements, on envisage toujours pour l'évaluation des débits à travers une courbe quelconque C, une épaisseur de fluide égale à l'unité normalement au plan  $\pi$ .

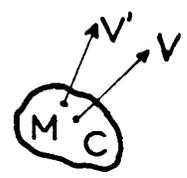


Les lignes de courant sont alors tracées ou graduées en fonction des différences de débit entre elles. Les lignes de courant sont alors plus resserrées là où la vitesse est élevée.

## 5 - LE MOUVEMENT D'UNE PARTICULE FLUIDE

On appelle *particule fluide* un "paquet" de molécules du fluide qui garde son individualité au cours du mouvement. Cette individualité se traduit par le fait que les molécules de la particule restent à l'intérieur d'une surface matérielle du fluide. Pour fixer les idées, un cube de 1 mm de côté contient environ  $3 \cdot 10^7$  molécules d'air et un nombre encore plus grand de molécules d'eau. Un tel paquet constitue donc bien à lui tout seul un milieu continu.

Au cours du mouvement cette particule subit des changements de position, d'orientation, de taille et de forme. Si on examine les déplacements ou les vitesses des points M de la particule par rapport à son centre C on montre que à chaque instant le mouvement de cette particule est la composition de trois mouvements élémentaires :



- une *translation d'ensemble*, à la vitesse  $V$  de son centre  $C$ , dans laquelle les positions relatives des points  $M$  sont inchangées de même que les directions des axes de la particule

- une *rotation d'ensemble* autour de son centre  $C$ , à la vitesse angulaire  $\Omega$ , dans laquelle les positions relatives des points  $M$  sont inchangées mais où les axes de la particule tournent solidairement dans le même sens.

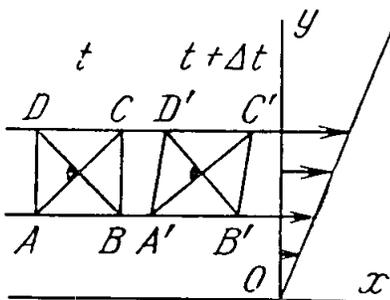
- une *déformation* dans laquelle les positions relatives des points  $M$  varient, par contraction ou dilatation, et où les axes de la particule peuvent être déviés de façon quelconque.

La direction et la vitesse de la rotation sont globalement exprimés par un vecteur appelé *vecteur tourbillon*. Si en tout point du fluide ce vecteur est nul on dit que l'écoulement est *irrotationnel*.

## 6 - EXEMPLES D'ÉCOULEMENTS FLUIDES

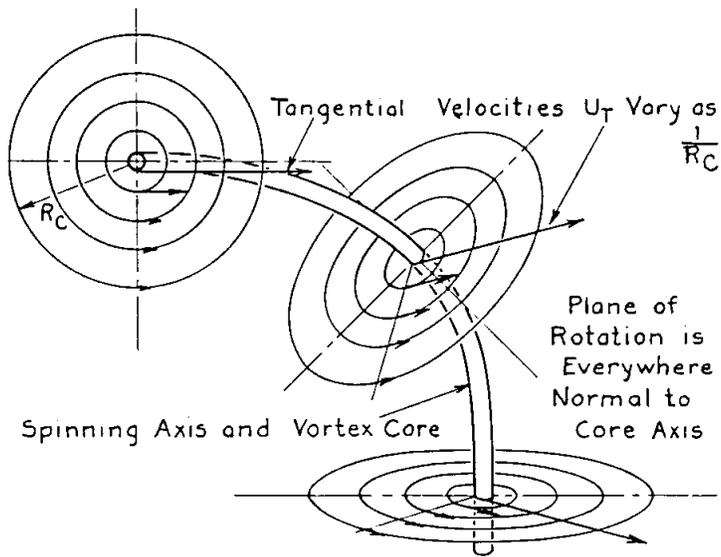
Il est fondamental de comprendre que le *tourbillon est une grandeur à signification locale* et non pas globale. Il y a rotation de la particule sur elle même et à son échelle sans aucun rapport avec l'éventuelle existence de lignes de courant fermées. Illustrons cette mise en garde par deux exemples :

### 6.1 Écoulement de Couette



Cet écoulement plan est caractérisé par un champ de vitesse parallèle à l'axe des  $x$  et tel que  $V=k.y$ . Il est donc caractérisé par des lignes de courant rectilignes et aucune rotation au sens banal du terme n'y apparaît. Et pourtant le calcul montre qu'il est rotationnel. Une particule fluide qui était un carré  $ABCD$  à l'instant  $t$  se transforme en un losange  $A'B'C'D'$  à l'instant  $t+\Delta t$ . Les axes de cette particule sont à ces instants les diagonales du carré et du losange. Ces axes restent perpendiculaires mais ils tournent à la vitesse angulaire  $\Omega = -k / 2$ .

## 6.2 Vortex



Dans cet écoulement les lignes de courant sont des cercles concentriques où la vitesse est constante et inversement proportionnelle au rayon de la ligne de courant. Cette vitesse n'est pas définie sur l'axe du vortex qui constitue une singularité dans l'écoulement. Le calcul montre aisément que cet écoulement est irrotationnel.

## 7 - LES SOURCES DE TOURBILLON

On démontre (Lagrange) que, dans un *fluide parfait*, si le mouvement d'une portion du fluide est irrotationnel à un instant donné alors il l'était avant et le restera après cet instant. En particulier si le mouvement est parti du repos alors il est toujours irrotationnel.

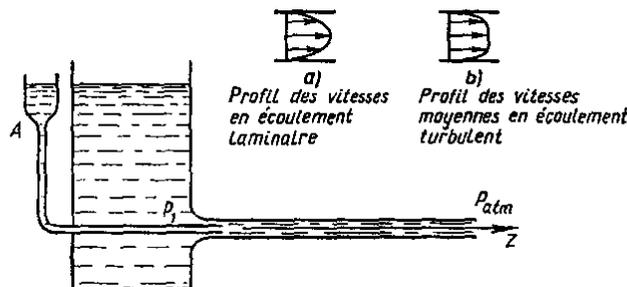
Les tourbillons ne se créent et ne disparaissent dans un fluide que quand une au moins des hypothèses du théorème précédent n'est pas vraie, c'est-à-dire que soit le fluide est visqueux, soit le champ des vitesses n'est pas continu.

C'est ainsi que dans les écoulements des fluides réels les tourbillons vont apparaître aux frontières du milieu : parois d'un bassin, coque d'un navire, aile d'un avion, surface libre en contact avec le vent, etc. Et ce n'est qu'ensuite, sous l'effet de la viscosité, que les tourbillons vont diffuser dans la masse du fluide.

# LES ECOULEMENTS DANS LES FLUIDES REELS

## 1 - L' EXPERIENCE DE REYNOLDS

Considérons l'expérience classique suivante. D'un grand réservoir s'écoule un liquide par un long tube circulaire en verre sous l'action d'une pression  $p_1 > p_{atm}$ . Par un entonnoir A dans le tube est amené un filet mince du même liquide, mais coloré. Le débit du liquide sortant peut être réglé en élevant ou en abaissant le niveau de liquide dans le réservoir.



Ayant déterminé le débit du liquide écoulé et connaissant le diamètre  $D$  du tube on peut calculer la vitesse moyenne  $V$  d'écoulement du liquide dans le tube. En observant le courant dans le tube on constate qu'à de petites vitesses d'écoulement  $V$  le liquide coloré présente un filet mince s'étendant sur toute la longueur du tube. L'écoulement est non perturbé et strié.

En augmentant la vitesse  $V$  on découvre qu'à une certaine vitesse le jet du liquide coloré diffuse en colorant le liquide dans tout le tube. On en conclut que les vitesses des particules admettent des composantes perpendiculaires à l'axe du tube; on est donc en présence d'un écoulement avec agitation transversale.

En reprenant la même expérience mais avec un tube de diamètre plus grand que le précédent on observe le même phénomène mais la diffusion du liquide coloré se produit à une vitesse  $V$  inférieure à celle du premier cas. La même expérience réalisée encore une fois avec le premier tube mais avec un autre liquide, à coefficient de viscosité cinématique  $\nu = \mu/\rho$  supérieur au premier, montre que le liquide coloré diffuse à une vitesse d'écoulement  $V$  supérieure à la première.

## 2 - LES FORMES D'ECOULEMENT

Les écoulements ordonnés, calmes, stratifiés, sans agitation transversale, sont appelés *laminaires*. Les écoulement désordonnés, diffusifs, instationnaires, où les particules fluides possèdent outre la vitesse moyenne de l'écoulement des mouvements qui les séparent, sont dits *turbulents*.

Le profil parabolique de la distribution des vitesses suivant la section d'un tube circulaire est caractéristique des écoulements laminaires. En régime turbulent le profil des

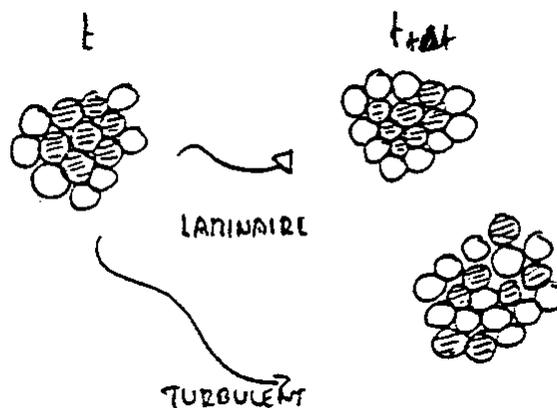
vitesse est moins allongé, car grâce à la diffusion et aux mouvements dans la direction transversale, la vitesse moyenne reste uniforme presque dans toute la section du tube sauf dans une mince couche au voisinage des parois du tube où, à cause de l'adhérence, la vitesse chute brusquement à zéro.

### 3 - LE NOMBRE DE REYNOLDS

Nous avons vu que si on change les paramètres, géométrique  $D$  ou mécanique  $v$ , la *vitesse critique* au delà de laquelle il y a un brusque changement de régime d'écoulement varie. Mais si on introduit le nombre sans dimension  $Rn = V.D/v$  on observe que la vitesse critique correspond toujours à une même valeur critique de  $Rn$ . Le nombre de Reynolds  $Rn$  caractérise ainsi le régime d'écoulement.

La théorie montre qu'il exprime en fait le rapport entre la force d'inertie et la force cohésive de frottement visqueux subie par chaque particule du fluide. Ainsi un écoulement à grand nombre de Reynolds correspond à l'écoulement d'un fluide soit peu visqueux soit soumis à une grande variation de vitesse en son sein.

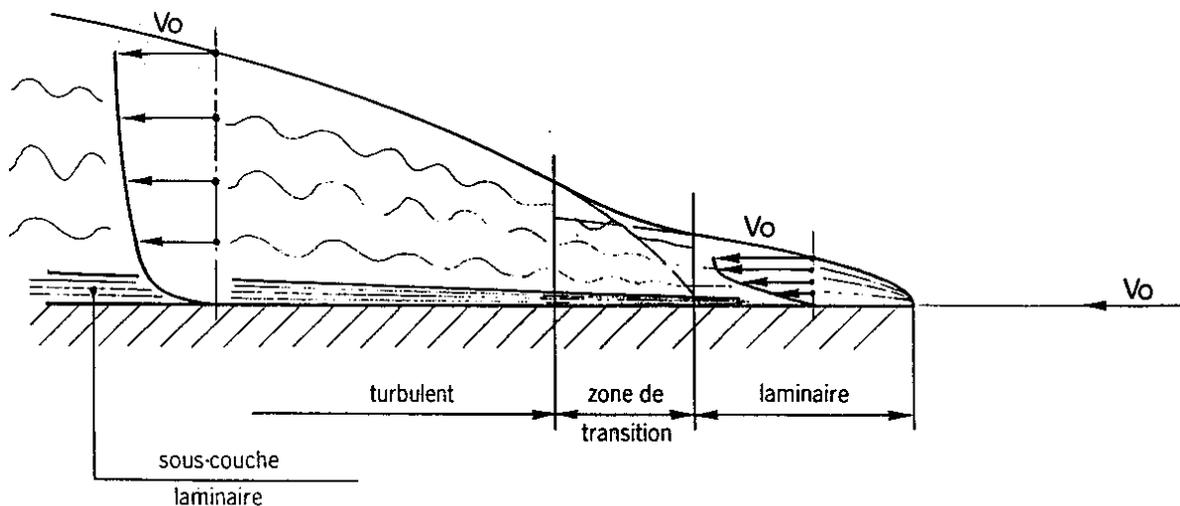
Le changement de régime laminaire-turbulent s'effectue donc lorsque les forces d'inertie du mouvement dépassent en intensité un certain multiple, la valeur critique, des forces de cohésion interne du fluide. Ces dernières forces deviennent alors inopérantes à maintenir les particules au contact. Et il apparaît donc une diffusion de la matière au sein du fluide qui est due aux mouvements des particules, elles mêmes, qui peuvent s'arracher de leurs voisins de façon erratique. La *turbulence* est provoquée par une rupture de la cohésion au sein du fluide :



Dans la définition du nombre de Reynolds le paramètre géométrique est de façon générale une dimension de référence qui caractérise le corps étudié (diamètre du tube ici, diamètre d'une sphère en chute, corde d'un profil d'aile ou d'une dérive etc). Par ailleurs le nombre de Reynolds constitue un facteur de *similitude mécanique* car deux écoulements sont de même nature s'ils ont même nombre de Reynolds.

#### 4 - NOTION DE COUCHE LIMITE

Prandtl a montré que, pour un fluide en mouvement, toutes les pertes dues au frottement ont lieu à l'intérieur d'une couche mince adjacente à la paroi (appelée la *couche limite*) et que l'écoulement en dehors de cette couche peut être considéré comme s'effectuant sans frottement. En général, la couche limite est très mince aux limites amont d'un objet immergé, mais elle augmente d'épaisseur en raison de l'action continue du frottement visqueux. Par exemple pour une plaque plane :

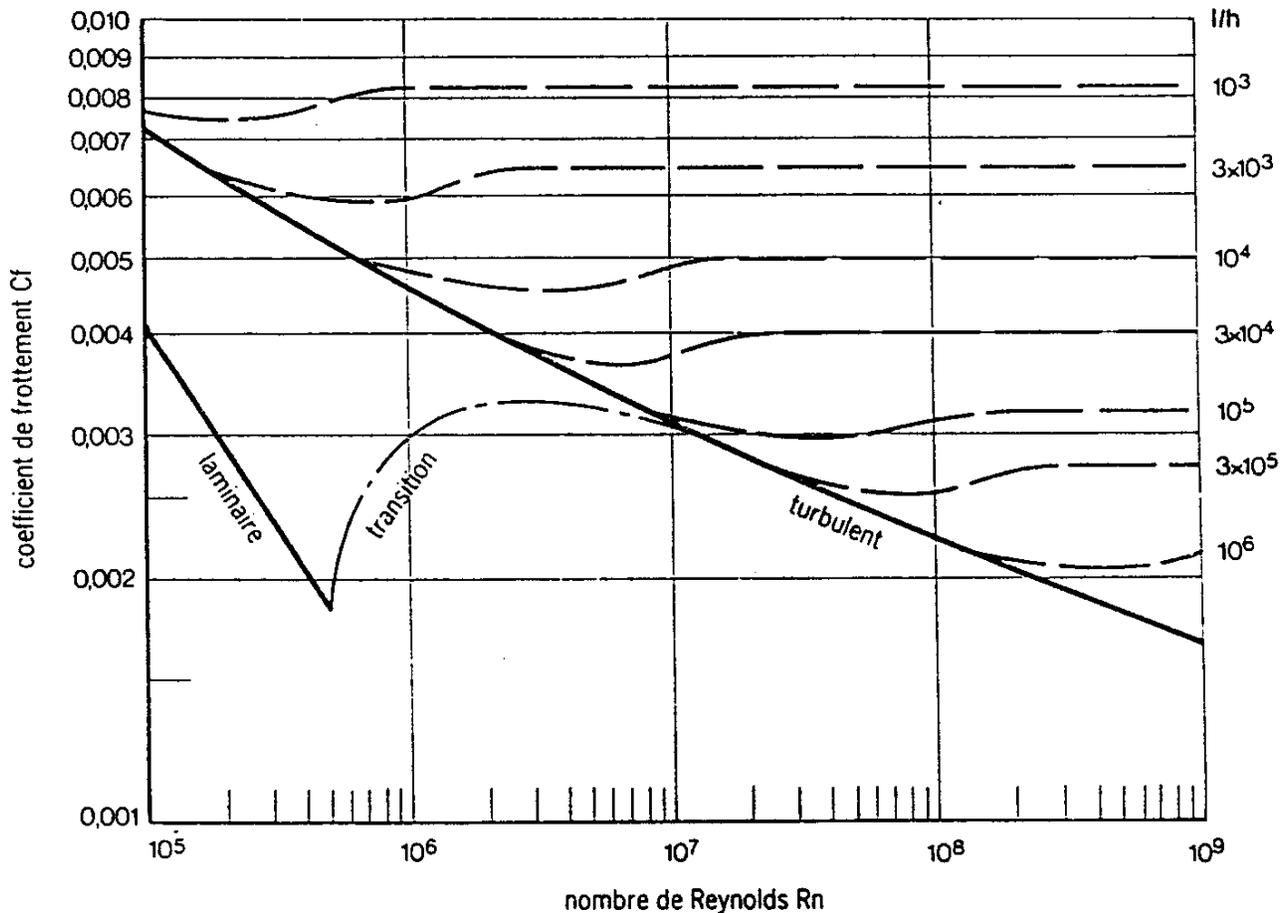


*Les différents éléments caractéristiques de la couche limite sur une plaque plane.*

Pour des nombres de Reynolds faibles ( $< 5 \cdot 10^5$ ), la couche limite toute entière est soumise aux forces de viscosité et l'écoulement y est laminaire. Pour des valeurs moyennes ( $5 \cdot 10^5 < Rn < 2 \cdot 10^7$ ) de ce nombre la couche limite est laminaire à l'origine et devient turbulente au delà d'une zone de transition. Pour des nombres de Reynolds plus élevés, la couche limite toute entière est turbulente.

## 5 - FROTTEMENT ET RUGOSITE

Les forces de frottement qui se localisent donc à l'intérieur de la couche limite constituent la *résistance de frottement* dont la valeur s'exprime à l'aide d'un coefficient de frottement  $C_f$  et de la surface  $S$  au contact du fluide :  $R_f = C_f \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot S$ . La valeur de  $C_f$  est fonction de l'écoulement, c'est à dire du nombre de Reynolds, et des imperfections que peut présenter la surface. En particulier la rugosité conditionne l'épaisseur de la couche limite. La courbe suivante montre comment  $C_f$  varie en fonction de la rugosité relative :



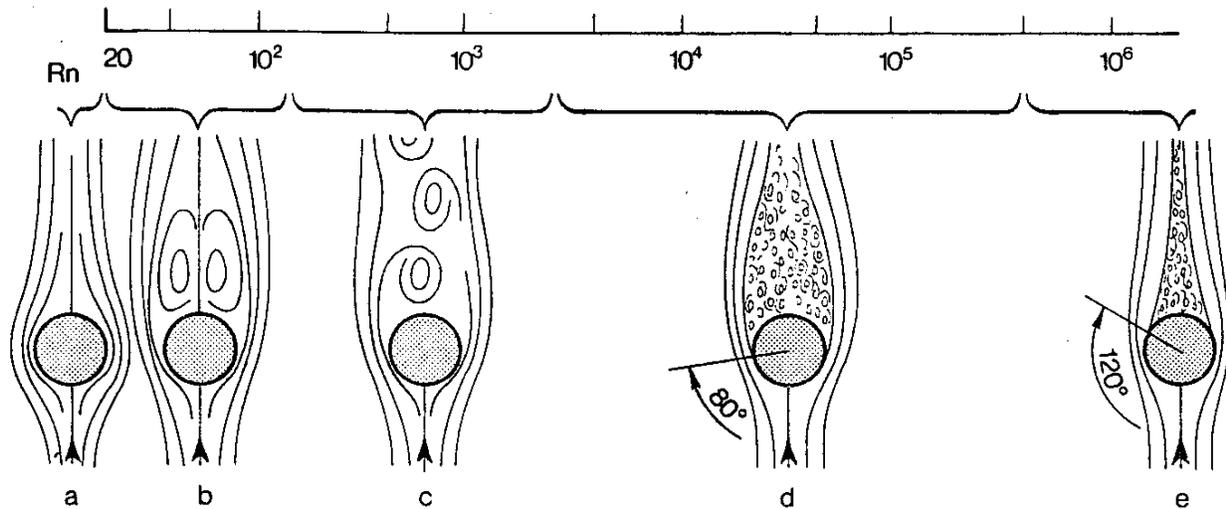
— Courbes des coefficients de frottement pour des surfaces de rugosité  $l/h$  variables.  $l$  est la longueur de la surface et  $h$  la hauteur des irrégularités.

A titre d'exemples voici des hauteurs de rugosités admises en pratique :

- surface poncée et polie : 0,0005 mm
- peinture marine poncée : 0,05 mm
- métal galvanisé : 0,15 mm
- voile : 0,2 mm
- bois nu : 0,5 mm
- bernacles : 5 mm

## 6 - REGIMES D'ÉCOULEMENT DERRIÈRE UN CORPS

Au cours du mouvement d'un fluide autour d'un corps les particules contournent ce corps en le longeant mais si leur vitesse devient trop grande ou si la forme du corps varie trop brutalement elles n'y parviennent plus. Les filets fluides décollent alors et des tourbillons peuvent se former. Cette dissipation d'énergie se traduit par une *résistance* supplémentaire dite *de forme*. A titre d'illustration la figure suivante représente, en fonction du nombre de Reynolds, la variation du régime d'écoulement autour d'un cylindre de longueur très grande par rapport à son diamètre (un hauban par exemple) :



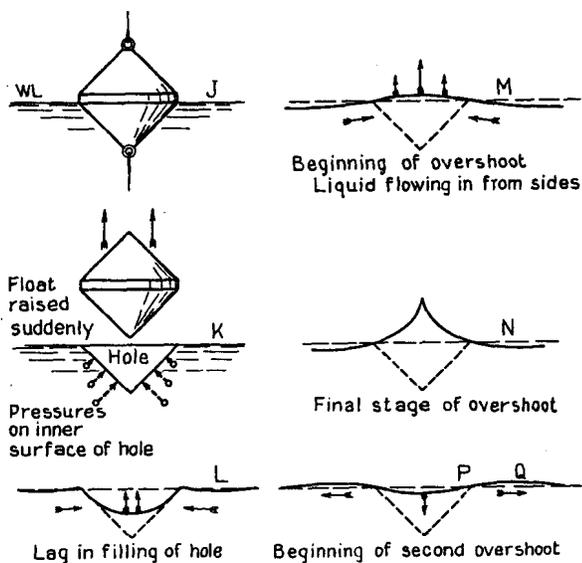
Jusqu'à  $Rn = 20$  se produit un épaississement de la couche limite en arrière du cylindre (a). Au-delà de  $Rn = 20$  apparaît un décollement des filets sur l'avant du milieu et la formation de deux tourbillons fixes symétriques (b) qui augmentent progressivement de volume et s'éloignent pour  $Rn = 100$  à  $150$ . Lorsque la vitesse continue à augmenter les tourbillons prennent naissance alternativement sur les deux cotés du cylindre, c'est le régime des *tourbillons alternés* (c). Ce régime se maintient jusqu'à  $Rn = 2500$  à partir duquel les tourbillons diffusent en donnant naissance à un régime turbulent formant un large sillage dont le point de décollement est sensiblement à  $80^\circ$  de l'axe (d). Pour une valeur de  $Rn = 300\ 000$  à  $500\ 000$  le mouvement turbulent atteint toute la couche limite et le point de décollement recule en arrière du milieu jusqu'à  $120^\circ$  environ (e).

# LA HOULE

## 1 - CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES ONDES DE GRAVITE

Une onde de gravité est une ondulation de la surface de l'eau, généralement périodique dans le temps et dans l'espace. A tout instant certaines des particules fluides sont élevées au dessus, et d'autres abaissées au dessous, du niveau de leurs position au repos.

En général, les ondes de gravité sont dues à des différences locales de pression produites par une source extérieure, tel que le vent, la chute d'un corps ou le déplacement d'un navire.



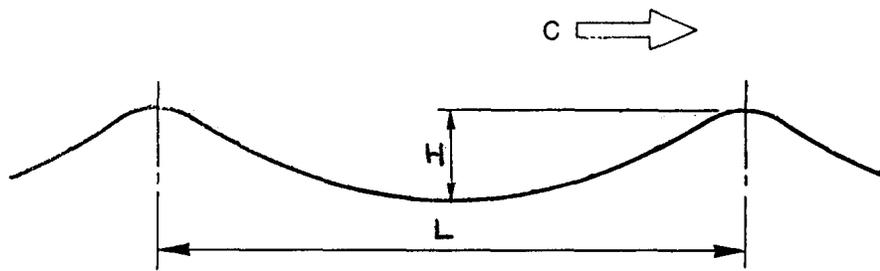
Les forces de pesanteur agissant sur les particules déplacées leur communiquent une vitesse qui persiste après que celles-ci aient repris leurs positions normales. Elle les entraîne au delà de ces positions dans la direction opposée. Le mouvement périodique ainsi créé persiste jusqu'à son amortissement.

Le déphasage entre les mouvements de particules adjacentes produit une ondulation qui se déplace latéralement sur la surface à partir de la perturbation. Le mouvement de montée et descente de chaque particule fluide de la surface s'étend seulement sur la hauteur de crête à creux; son mouvement horizontal est limité à un aller et retour du même ordre de grandeur.

Comme résultat de l'action initiale, les crêtes et creux de l'onde se déplacent sur la surface de l'eau à une vitesse particulière qui dépend de la longueur de l'onde. Cependant, c'est fondamentalement la forme de l'onde et non un groupe quelconque de particules fluides qui se déplace sur et à travers l'eau. Cette combinaison de mouvements est importante à comprendre car c'est la caractéristique de tout mouvement ondulatoire.

Les mouvements de montée et descente et d'aller et retour de chaque particule fluide se composent en un mouvement orbital, de nature cyclique. Quand les crêtes sont rectilignes

et infiniment longues, perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde il s'agit d'une houle cylindrique dont les traits principaux sont illustrés ci-dessous :

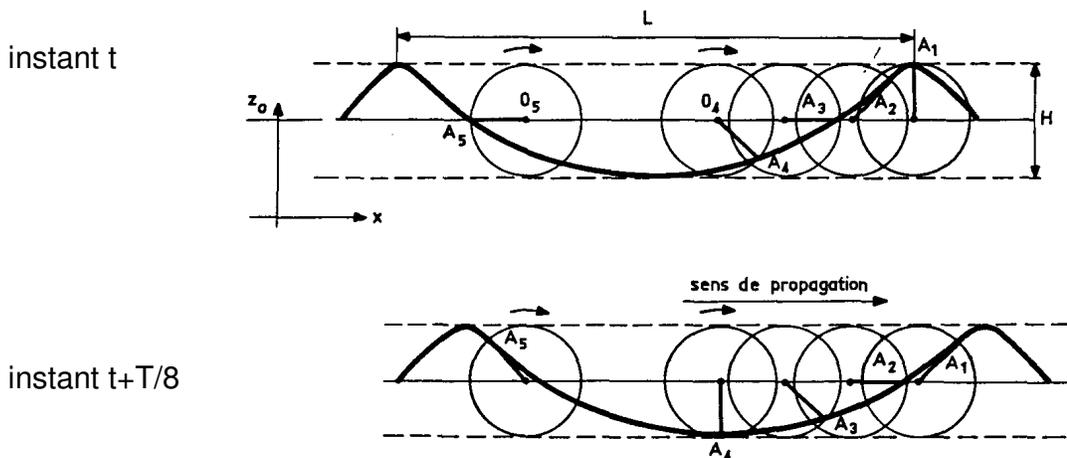


L longueur d'onde  
H hauteur  
C célérité

$H/L$  cambrure  
 $2H/L$  pente moyenne

## 2 - UN MODELE GEOMETRIQUE DE HOULE

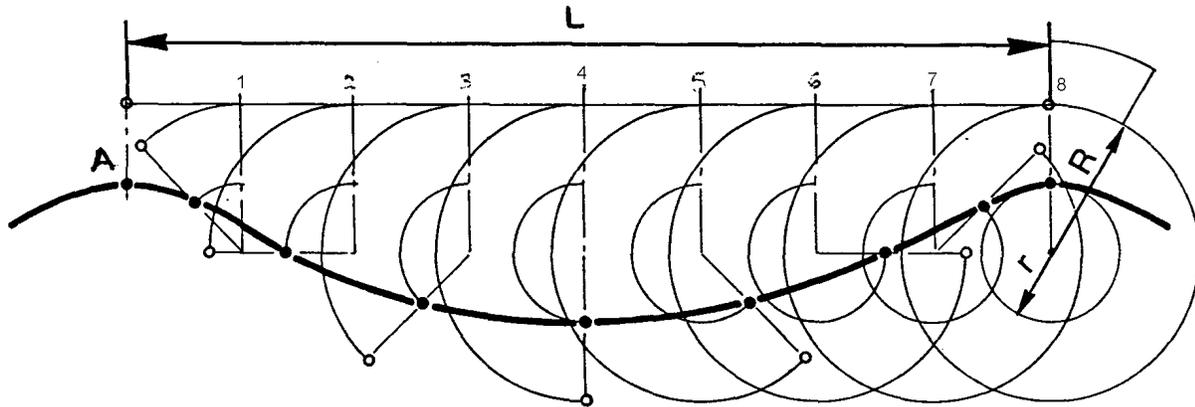
Les formes de houle réelle sont des solutions particulières des équations de la mécanique des fluides mais elles sont trop complexes pour être d'un usage pratique en architecture navale. C'est pourquoi plusieurs représentations géométriques ont été proposées depuis plus d'un siècle et demi de recherche. La houle trochoïdale de GERSTNER s'est révélée comme la plus utile. Elle est basée sur un mouvement circulaire des particules fluides, avec un déphasage uniforme entre les positions de particules sur des orbites uniformément espacées dans le sens de propagation de l'onde :



Ce modèle combine de façon satisfaisante : (1) un traitement mathématique aisé, (2) une représentation géométrique relativement simple et (3) un accord raisonnable avec le phénomène naturel observé. Il aboutit à une houle de célérité  $C$  qui dépend seulement de la longueur d'onde  $L$  et est indépendante de la hauteur  $H$ , alors que pour certaines ondes

naturelles la célérité est affectée par cette hauteur.

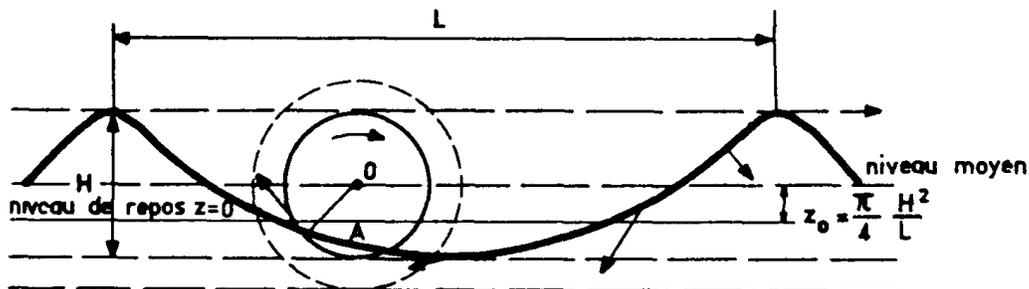
Le résultat final de l'étude de GERSTNER est une onde de gravité dans laquelle la surface libre, ainsi que toutes les surfaces d'égale pression, ont la forme de trochoïdes. Une trochoïde est définie graphiquement comme la courbe engendrée par un point A sur un rayon  $r = H/2$  d'un cercle de rayon  $R = L/2p$  qui roule sur une droite :



Le creux maximal est égal au diamètre du cercle générateur, soit  $H_{\max} = L/p$ . La cambrure  $H/L$  vaut alors  $1/p = 0,31$ . Dans ce cas, la trochoïde est une cycloïde; le sommet de l'onde est un point de rebroussement. Ceci n'existe pas dans la nature.

### 3 - LA VITESSE DES PARTICULES FLUIDES

La vitesse angulaire sur toutes ces orbites circulaires est la même,  $\omega = 2p/T$ . Le schéma suivant permet de voir que les vitesses orbitales  $V$  des particules sont tangentes à la crête et au creux et sont dirigées dans le sens de propagation sur la crête et en sens inverse dans le creux :



#### 4 - RELATIONS CARACTERISTIQUES DE LA HOULE TROCHOÏDALE

La théorie de GERSTNER, conçue nous l'avons dit pour une profondeur infinie, aboutit à des relations simples entre les différents paramètres descriptifs de la houle :

longueur d'onde

$$L = \frac{2\pi}{g} C^2 \qquad L = \frac{g}{2\pi} T^2$$

célérité

$$C = \frac{g}{2\pi} T$$

vitesse orbitale

$$V = \frac{\pi.H}{T}$$

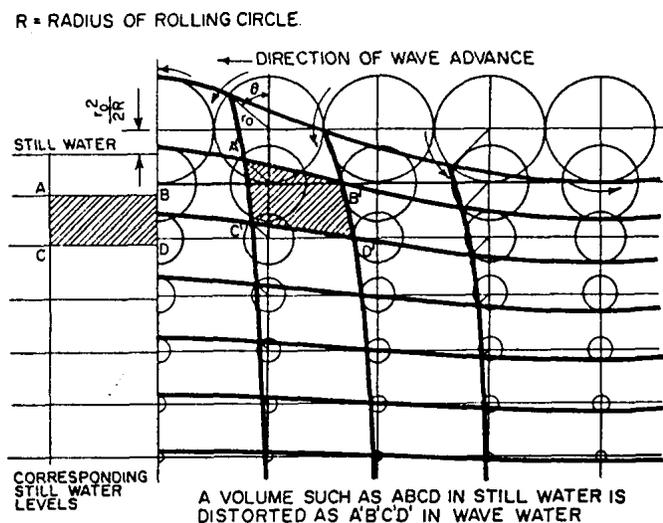
D'où par exemple, pour deux houles de périodes 5s et 10s et de même hauteur 3m :

T	L	C	V	cambrure	pente moyenne
5 s	39 m	15 nds	3,7 nds	0,08	15%
10 s	156 m	30 nds	1,8 nd	0,02	4%

#### 5 - LE MOUVEMENT DANS LA MASSE D'EAU

La théorie de la houle trochoïdale montre que, en profondeur infinie, les rayons des orbites décroissent exponentiellement avec la profondeur :

Les surfaces d'égal pression, planes et horizontales au repos, sont encore des trochoïdes mais de moins en moins cambrées. Une cellule de fluide telle ABCD se déplace et se déforme tout en conservant le même volume.



## 6 - ENERGIE DE LA HOULE

On a remarqué sur les schémas précédents que les centres des orbites, c'est à dire la cote moyenne des particules au cours de leur mouvement, sont surélevés au dessus de leurs niveaux de repos. Ce qui représente une certaine énergie potentielle dans le champ de pesanteur.

De plus les particules étant en mouvement ont une énergie cinétique. La somme de ces deux énergies, pour un volume limité sur toute la profondeur par une longueur d'onde et l'unité de largeur, vaut :

$$E = \frac{1}{8} \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot L \cdot \left( 1 - \frac{\pi^2 H^2}{2L^2} \right) \approx k \cdot H^2 \cdot L$$

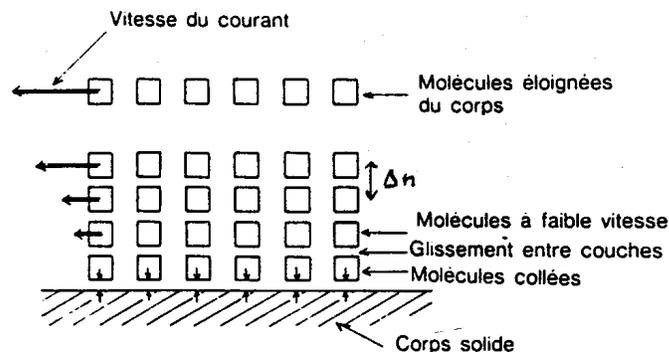
car la cambrure est toujours faible ( < 0,31 ).

# LES RESISTANCES HYDRODYNAMIQUES A L'AVANCEMENT

Le navire étant à l'interface de l'eau et de l'air est soumis à l'action de celui-ci sur ses superstructures. Cette force due à la prise au vent de la partie émergée s'appelle le fardage. Elle est favorable lorsque le vent vient de l'arrière, bien qu'elle soit minime car le vent apparent est alors faible, et nuisible lorsque le navire remonte au vent. Ceci étant rappelé nous traiterons uniquement ici des résistances dues à l'eau. Leur étude relève de l'hydrodynamique qui est un domaine partiellement empirique de la mécanique des fluides visqueux car les équations générales de celle-ci n'ont pas de solution complète dans les cas concrets.

## 1 - LA RESISTANCE DE FROTTEMENT

Depuis le pont du navire on peut constater la présence, le long de la coque, d'une petite épaisseur d'eau agitée intérieurement, qu'on appelle la *couche limite* et dont l'existence s'explique comme suit :



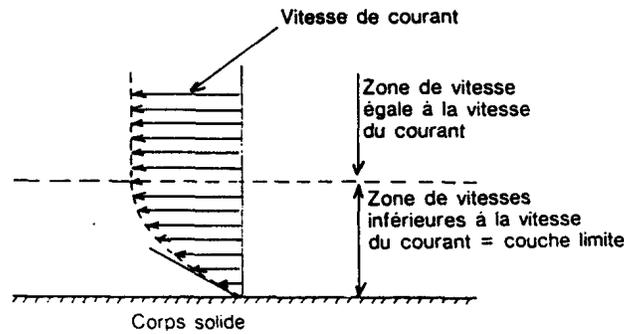
- D'une part une *force tangentielle de viscosité*  $f$  apparaît entre deux particules fluides en contact par la surface  $s$  et dont les vitesses, parallèles à cette surface  $s$ , diffèrent de  $\Delta V$ . Cette force  $f$  dirigée à l'opposée de la vitesse, tend à freiner l'élément le plus rapide et a pour valeur numérique :

$$f = \mu \cdot \frac{\Delta V}{\Delta n} \cdot s$$

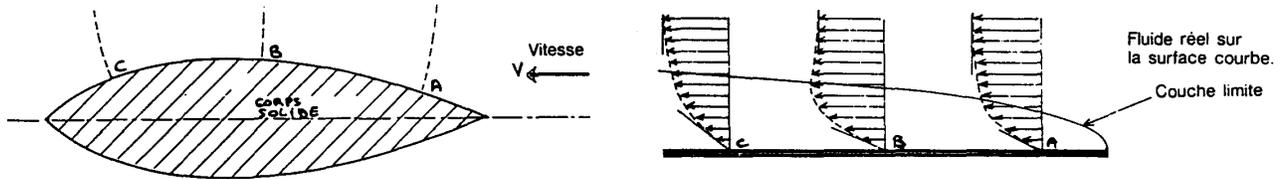
où  $\mu$  est le coefficient de viscosité dynamique et  $\Delta n$  l'écartement des deux éléments liquides mesuré normalement à la surface  $s$ .

- D'autre part les fluides réels, comme l'eau, ont la propriété d'*adhérer aux parois solides*.

Dans ces conditions, lorsque  $\mu$  est faible, comme c'est le cas pour l'eau, les particules liquides en contact avec la carène sont entraînées dans le mouvement du navire alors que, lorsqu'on s'éloigne perpendiculairement à cette carène, la vitesse des particules diminue pour atteindre, rapidement, celle de l'eau libre.



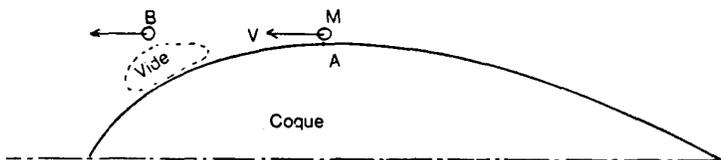
La zone où le gradient de vitesses  $\Delta V/\Delta n$  est élevé constitue précisément, la couche limite, c'est-à-dire la seule région où, en pratique, se manifestent les forces de viscosité.



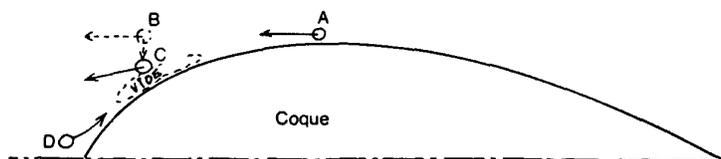
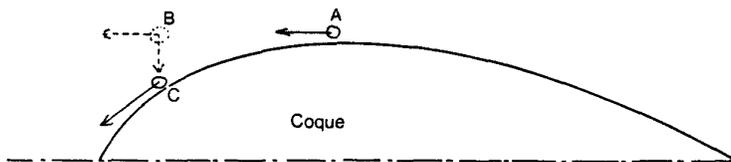
Normalement, si la carène du flotteur est bien profilée la couche limite enveloppe complètement la carène, son épaisseur variant de quelques centimètres à l'avant à quelques décimètres à l'arrière. L'énergie absorbée par le travail des forces de viscosité dans cette couche limite correspond à une force qui tend à s'opposer à la progression de la carène et qu'on appelle la **résistance de frottement**.

## 2 - LA RESISTANCE DE FORME

Intéressons nous à une particule fluide qui se déplace sur l'arrière du navire.



Processus du décollement

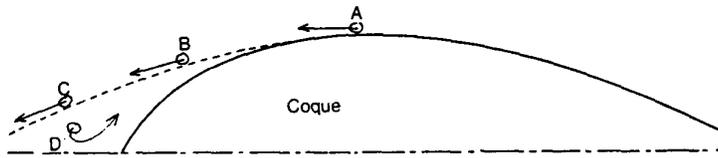


Au point A elle est animée d'une vitesse  $V$  dirigée vers l'arrière. Si elle était seule, par inertie elle continuerait à se déplacer vers l'arrière à la même vitesse et se retrouverait en B, créant ainsi une poche de vide le long de la coque.

Cette poche de dépression aspire la particule qui vient ainsi recoller à la coque en C. C'est ainsi que le fluide suit la coque depuis l'avant jusqu'à l'arrière.

Supposons maintenant que la vitesse de la particule soit très grande, la petite poche de vide ne suffit plus à l'aspirer, elle infléchira sa course sans arriver à la recoller

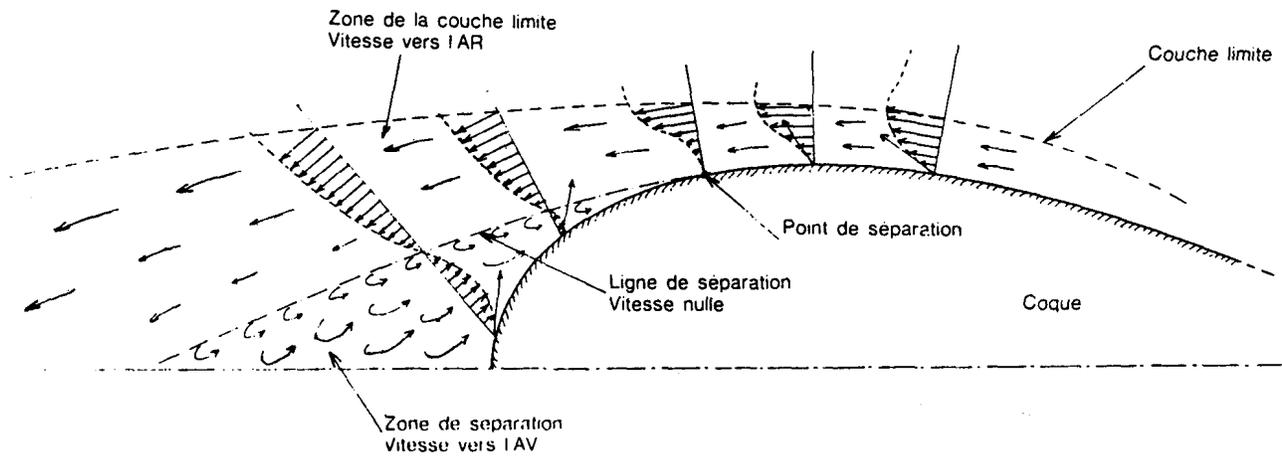
à la coque. La poche de vide sera alors comblée par une autre particule fluide venant de l'arrière



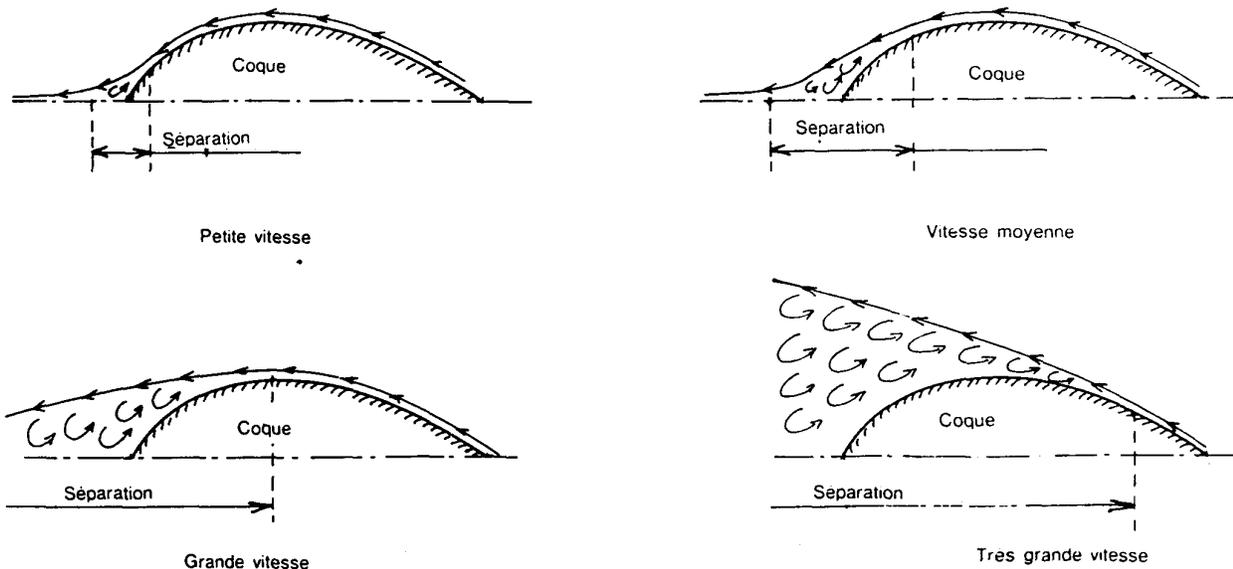
Suivons alors point par point notre particule initiale. En A elle est collée à la coque; en B, emportée par sa vitesse, elle se décolle; en C elle poursuit son chemin loin de la coque.

Pour que ce phénomène appelé *séparation* ou *décollement* se produise, il faut, d'une part que la vitesse soit grande, d'autre part, que l'arrière soit très courbe ou interrompu. En effet si la coque avait suivi la ligne en tirets le décollement ne se serait pas produit.

Le tracé du gradient de vitesse permet de bien se rendre compte du phénomène :



La position du point de séparation dépend de la vitesse du courant; plus la vitesse est grande plus le point de séparation se déplace vers l'avant :

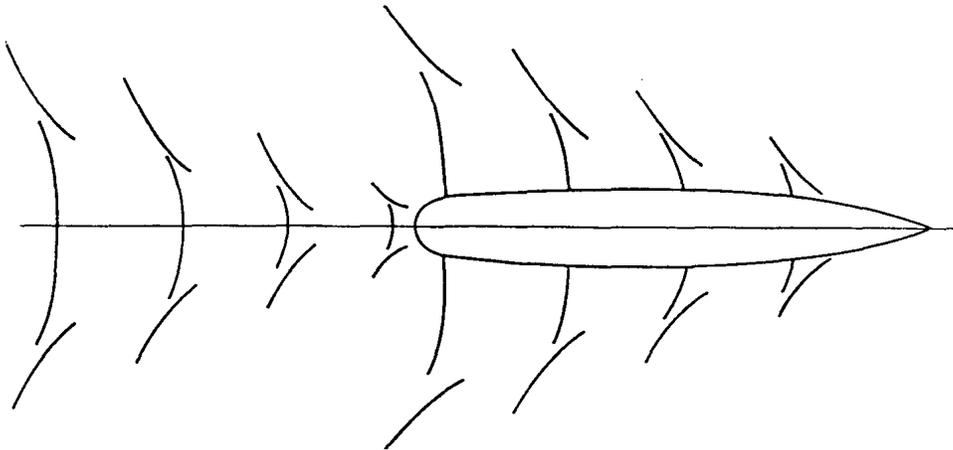


L'inversion de la vitesse d'écoulement donne naissance à des tourbillons. La carène semble alors traîner derrière elle un gros sillage tourbillonnaire où ces tourbillons sont souvent parfaitement visibles. A ce sillage tourbillonnaire correspond également une déperdition d'énergie due à la viscosité qui donne naissance à la **résistance de forme** ou **résistance de séparation** ou **résistance de remous**.

### 3 - LA RESISTANCE DE VAGUES

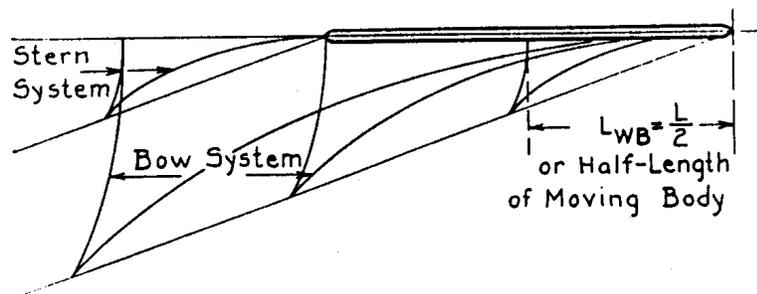
Lorsqu'un navire se déplace à vitesse rectiligne uniforme  $V$  à la surface d'un plan d'eau calme de grandes dimensions on constate qu'il crée un champ de vagues se déplaçant à cette même vitesse et appelées **vagues d'accompagnement**.

Ce champ de vagues comprend deux ensembles partant l'un de l'avant et l'autre de l'arrière du navire et constitués chacun d'un système de vagues **transversales** par rapport au navire et d'un système de vagues **divergentes** dont les lignes de crêtes démarrent à peu près tangentiellement à la vitesse de route du navire.



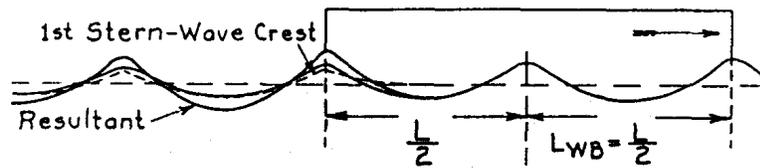
L'entretien des champs de vagues précédents nécessite une dépense d'énergie à laquelle correspond la **résistance de vagues** de la carène. Or on sait qu'une houle régulière de creux  $H$  et se déplaçant avec la célérité  $C$  a pour longueur d'onde  $L = 2\pi/g.C^2$  et contient une énergie de la forme  $E = k.H^2$  (cf La houle). En particulier les systèmes de vagues **transversales** ont  $L_w = 2\pi/g.V^2$  comme longueur d'onde, qui est donc variable avec la vitesse du navire.

Etudions complètement le phénomène dans le cas d'une carène symétrique aux extrémités :



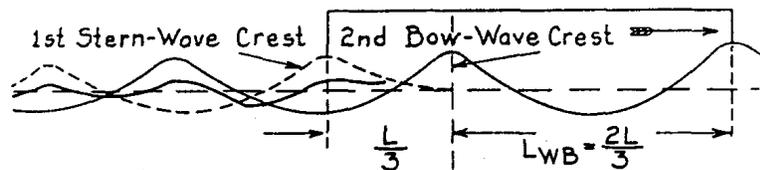
Chaque système commence par une crête mais lorsque celui issu de l'avant atteint l'arrière il interfère avec celui-ci et c'est leur combinaison que l'on observe à l'arrière.

L'onde résultante à l'arrière (stern) présente une crête seulement quand une crête du système de l'avant (bow) se superpose à la crête initiale :



Ceci se produit lorsque la longueur  $L$  du navire est dans les rapports 1, 2, 3,...avec  $L_W$ . La pression de la crête résultante produit une poussée qui diminue la résistance due à la vague d'étrave.

Quand la vitesse est telle que la longueur de la coque vaut  $1/2, 3/2, 5/2, \dots$  longueur d'onde  $L_W$  la crête de la poupe est partiellement compensée par le creux du système avant et l'onde résultante a une amplitude insignifiante qui ne réduit plus la résistance sur l'étrave :



Dans le cas d'une carène réelle un creux peut même exister à l'arrière et augmenter ainsi la résistance. En résumé cette résistance de vagues varie avec la vitesse du navire en passant par une succession de maximum et de minimum.

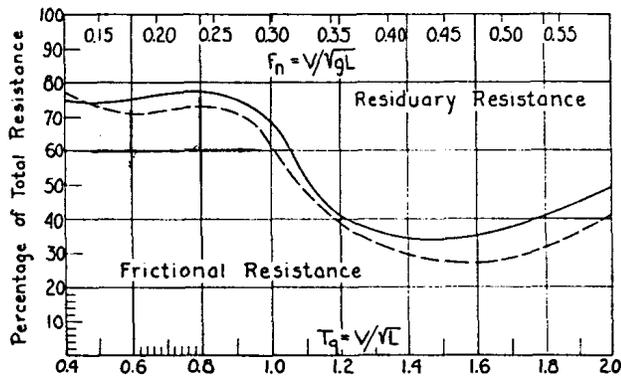
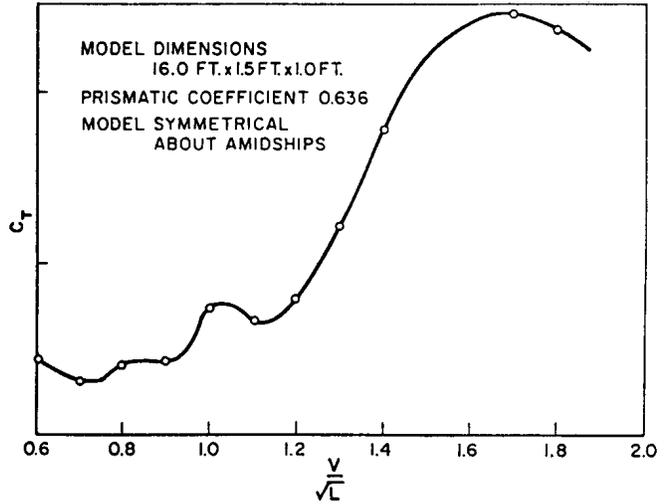
#### 4 - LE BILAN QUANTITATIF

Bien que l'on considère souvent séparément ces trois types de résistance il n'y a pas, en réalité, une totale indépendance entre elles. Par exemple la forme des vagues d'accompagnement modifie la surface de la carène et les contours de la couche limite, d'autre part cette couche limite, qui entoure la carène peut modifier les vagues d'accompagnement, surtout à l'arrière.

La complexité mathématique des phénomènes précédents rend leur prédiction numérique extrêmement difficile et les résultats connus proviennent essentiellement d'essais de maquettes en bassin. La théorie de la *similitude* qui est à la base de cette technique établit que toutes les résistances sont de la forme  $R = C \cdot \frac{1}{2} \rho S V^2$ . Le coefficient  $C$  est sans dimension, il dépend des conditions de l'écoulement (vitesse, viscosité, turbulence, rugosité,...) et ce sont en général ses valeurs qui sont tracées. Ces graphiques sont exprimés en fonction de paramètres caractéristiques de l'écoulement : le *nombre de Reynolds*  $Rn = V.L/v$ , le *nombre de Froude*  $Fn = \sqrt{g.L}$  ou le *degré de*

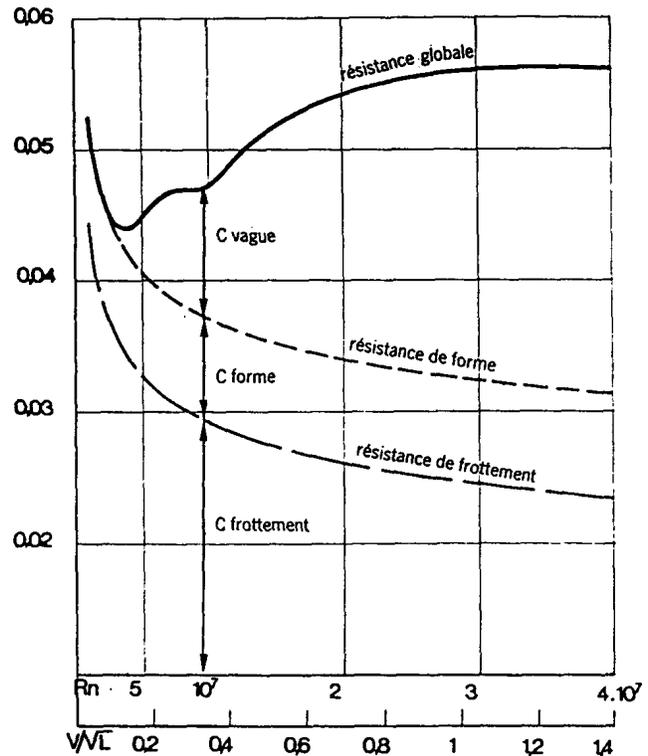
vitesse  $v / \sqrt{L}$  :

Cette courbe du coefficient de résistance totale montre, d'une part, l'importance de la résistance hydrodynamique à vitesse élevée et, d'autre part, ses fluctuations dues à la résistance de vagues sous l'effet des interférences étudiées précédemment. ( V en noeud et L en pied )



Ici il s'agit de la description des parts relatives de la résistance de frottement et des autres résistances regroupées sous le terme de *résistance résiduaire*. ( V en noeud et L en pied )

Ce dernier graphique donne un exemple précis des valeurs des coefficients propres à chacune des résistances considérées dans cette étude. ( V en m/s et L en m )

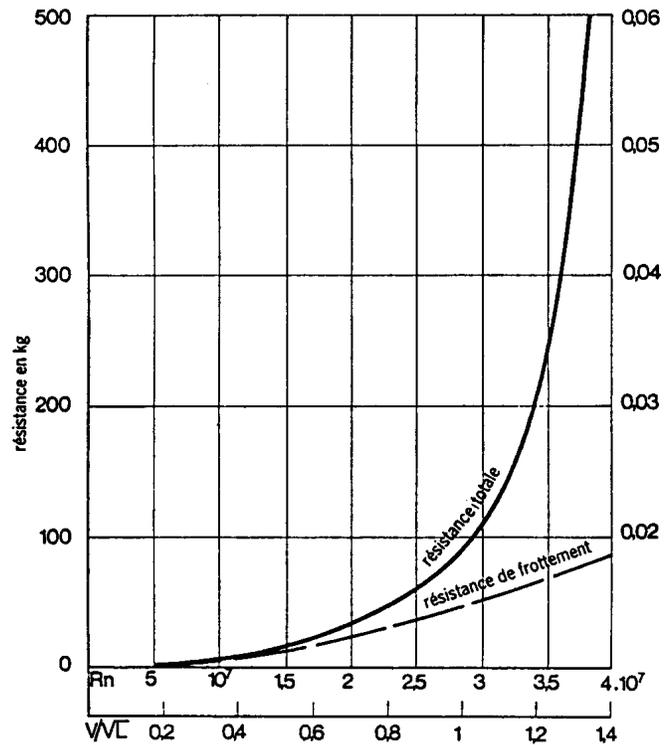


## 5 - LE CAS DU VOILIER

Toute l'étude précédente s'applique bien sûr à un voilier.

La courbe suivante fournit un exemple quantifié des résistances de frottement et totale pour un voilier de 10 m de flottaison.

( V en m/s et L en m )



Pour un voilier la puissance propulsive étant limitée par celle du vent et la taille de la voilure elle ne peut vaincre n'importe quelle résistance. La vitesse pratiquement maximale se situe au dernier minimum de la résistance de vagues pour lequel  $L \cong L_W$  :

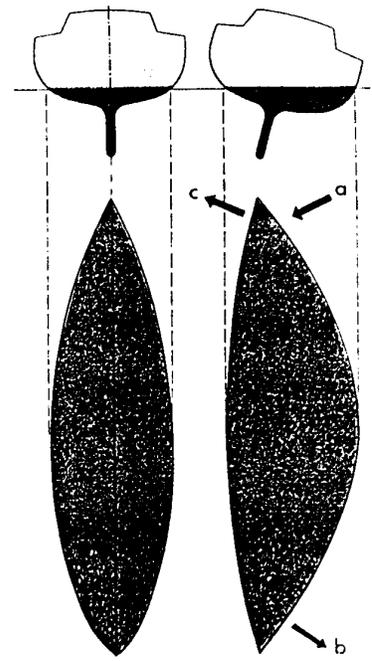
$$\text{soit } L \cong \frac{2\pi}{g} V^2 \text{ d'où } V \cong 2,43\sqrt{L} \text{ avec } L \text{ en m et } V \text{ en nd}$$

De plus, dès que le voilier gêne la symétrie des formes disparaît et par conséquent celle des écoulements, le champ de pression autour de la carène est perturbé :

la résistance de déviation des filets fluides augmente en a

la pression diminue en b

et la voilure a alors tendance à loffer vers c



globalement la résistance de forme augmente dans les proportions approximatives suivantes :

gîte	5°	10°	15°	20°	25°	30°
variation	1%	2%	4%	7%	13%	25%

## 6 - LA FORME DE LA COQUE ET LA RESISTANCE

Les trois résistances analysées ici sont dues respectivement à des forces :

- tangentielles, de viscosité, appliquées sur toute la surface de la carène;
- normales, de pression liée à la déviation des filets fluides par la coque et aux tourbillons du sillage;
- normales, de pression liée à la surélévation de la surface par les vagues.

Elles sont donc influencées par la forme de la coque. Celle-ci est décrite par plusieurs paramètres géométriques ou coefficients globaux :

- la longueur à la flottaison  $L$
- le volume de carène  $\nabla$
- la surface du maître couple  $A_M$
- le coefficient prismatique  $C_P = \nabla / L \cdot A_M$
- etc

qui permettent d'exprimer approximativement d'autres caractéristiques géométriques, par exemple la surface mouillée de la carène peut être estimée par une formule simple et ancienne :

$$\Sigma = 2 \cdot L \cdot \sqrt{A_M}$$

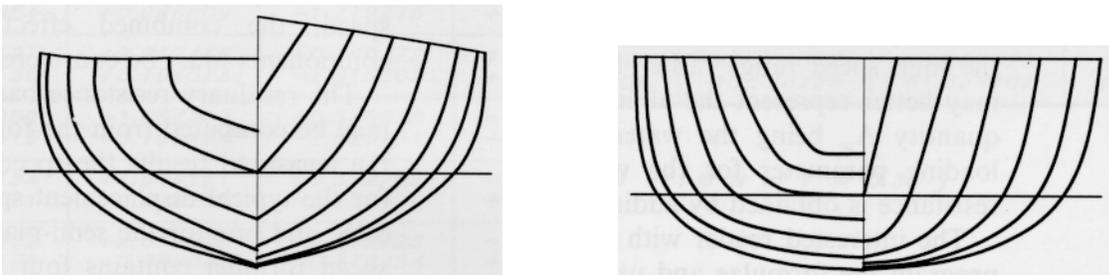
et l'expérimentation en bassin d'essais de carène fournit à son tour des formules empiriques plus ou moins simples pour estimer les différentes sources de résistance. Par exemple la résistance de frottement est donnée par :

$$R_F = \frac{1}{2} C_F \cdot \rho \cdot \Sigma \cdot V^2$$

où le coefficient de frottement  $C_F$  dépend du régime d'écoulement, décrit ici par le nombre de Reynolds  $Rn$  :

$$C_F = \frac{0,075}{(\log(Rn) - 2)^2}$$

Plus particulièrement dans le cas des voiliers, le bassin d'essais de Delft (Pays-Pas) a étudié une série systématique de 22 variantes d'un modèle à déplacement moyen à lourd et 17 variantes d'un modèle à déplacement léger :



dont les formes sont caractérisées par 6 paramètres :  $\nabla_C$  (volume de carène),  $L_{WL}$  (longueur à la flottaison),  $B_{WL}$  (largeur à la flottaison),  $T_C$  (tirant d'eau),  $LCB$  (position longitudinale du centre de carène) et  $C_P$  (coefficient prismatique) aux valeurs comprises dans certains intervalles.

Il en est résulté, entre autre, une expression empirique de la résistance résiduaire (somme de la résistance de vague et de la résistance visqueuse de pression) valable pour les faibles vitesses ( $0,125 < Fn < 0,450$ ) :

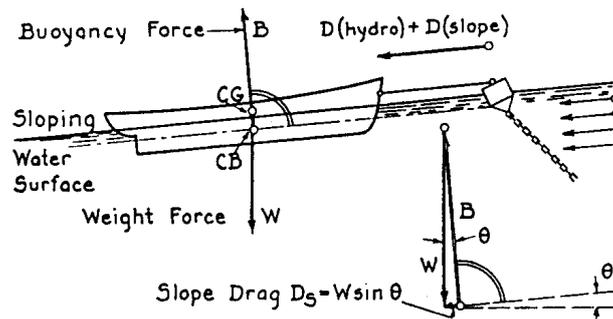
$$\frac{R_R}{\Delta_C} \cdot 10^3 = a_0 + a_1 \cdot C_P + a_2 \cdot LCB + a_3 \cdot \frac{B_{WL}}{T_C} + a_4 \cdot \frac{L_{WL}}{\nabla_C^{1/3}} + a_5 \cdot C_P^2 + a_6 \cdot C_P \cdot \frac{L_{WL}}{\nabla_C^{1/3}} + a_7 \cdot LCB^2 + a_8 \cdot \left( \frac{L_{WL}}{\nabla_C^{1/3}} \right)^2 + a_9 \cdot \left( \frac{L_{WL}}{\nabla_C^{1/3}} \right)^3$$

dans laquelle les coefficients  $a_0, \dots, a_9$  varient avec le nombre de Froude  $Fn$ .

# LA SURVITESSE

## 1 - L'EFFET DE PENTE DE LA SURFACE

Un navire au repos ou en déplacement sur une eau dont la surface libre, ainsi que les surfaces d'égale pression situées au dessous, ne sont pas horizontales se trouve dans la même situation qu'un objet posé sur un plan incliné.

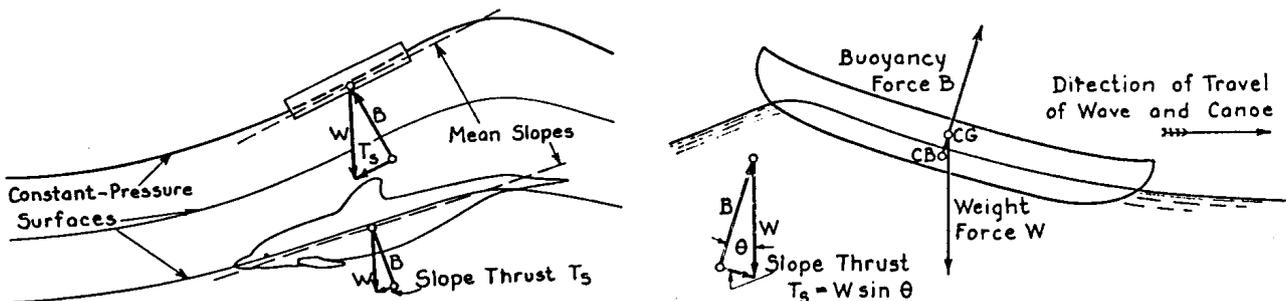


En effet la poussée d'archimède  $B$  étant due aux forces de pression statique de l'eau sur la carène sa résultante est perpendiculaire aux surfaces d'égale pression. Si celles-ci ne sont pas horizontales la poussée se trouve alors décalée par rapport à la verticale d'un angle  $\theta$ . Sa résultante avec le poids  $W$  n'est plus nulle mais dirigée vers le bas. Elle joue le rôle de résistance supplémentaire si le navire remonte la pente (ici notée  $D_{\text{slope}}$ ) ou de poussée s'il la descend.

Cette force a pour module  $W \cdot \sin \theta$ . Ainsi pour le voilier de 10 m déjà mentionné (cf Les résistances hydrodynamiques §5) en supposant un déplacement de 4 tonnes et une surface libre de pente 4% elle vaut 160 kgf. Ce qui correspond à la résistance totale qu'il rencontre à 7,3 noeuds c'est à dire à 95% de sa vitesse critique .

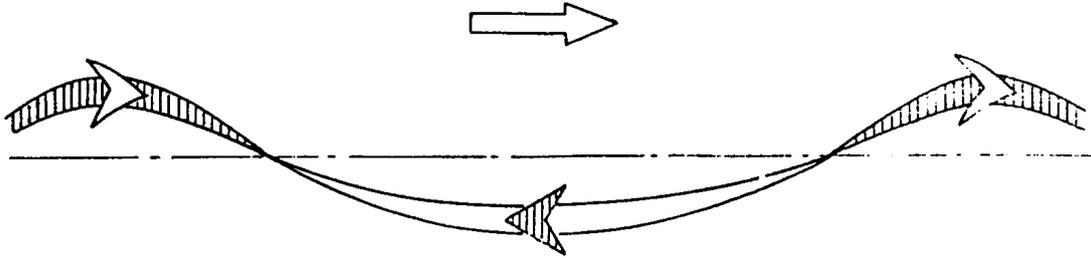
## 2 - L'INFLUENCE DE LA HOULE

La pente de la surface peut être celle d'un fleuve, celle d'une vague d'étrave comme pour le marsouin ci-dessous ou plus fréquemment celle des vagues formant une houle.



L'exemple chiffré précédent provient d'ailleurs d'une houle de période 10 s et de hauteur 3 m.

Nous avons vu de plus dans l'étude de la houle que la vitesse orbitale des particules d'eau est tangente à la surface libre aux crêtes et aux creux. En particulier dans le sens de propagation de la houle pour les crêtes :



Toujours pour la même houle nous avons vu qu'elle vaut 1,8 noeud.

### 3 - LA MISE EN SURVITESSE

Un bateau se déplaçant dans le sens des vagues sera placé, sur les crêtes, dans une eau se déplaçant dans le même sens que lui, il restera ainsi plus longtemps dans ce courant favorable que dans le courant contraire qu'il rencontrera dans les creux. Il en tirera donc un gain globale. A la limite, si la somme de la vitesse du bateau sur l'eau et de la vitesse orbitale est égale à la célérité de la houle, le bateau se maintient sur le sommet de la vague et sa vitesse sur le fond est alors très supérieure à ce qu'elle serait en eau plate.

Ce n'est pas le cas avec notre exemple de houle dont la célérité est de 30 noeuds. Le phénomène nécessite plutôt un courte période de houle, entraînant une grande vitesse orbitale et une faible célérité, ou bien une grande hauteur, environ 36 m pour cette même houle de période 10 s.

La survitesse décrite plus haut s'obtient aussi partiellement par l'effet de pente sur la face avant de la vague. C'est d'ailleurs le phénomène qui prévaut dans notre exemple. En effet si notre voilier était à sa vitesse critique, en affrontant une résistance de 240 kgf, la poussée supplémentaire de 160 kgf lui permet de gagner environ 10% de vitesse.

# L'Aérodynamique expérimentale

## 1. GÉNÉRALITÉS SUR LES FLUIDES EN MOUVEMENT

### 1.1. Pression statique.

Dans un *fluide au repos*, il est aisé de mesurer la *pression*, ou force élastique s'exerçant par unité de surface. Cette grandeur est mesurée, par exemple, par un baromètre pour l'atmosphère, ou par un manomètre pour un gaz emprisonné dans un espace clos. On sait que les indications fournies par ces instruments sont indépendantes de l'orientation de leurs orifices de prise de pression. La pression est donc identique dans toutes les directions issues d'un même point.

Dans un *fluide en mouvement*, on conçoit qu'il existe une grandeur analogue, quoique celle-ci soit plus délicate à mesurer. On la désigne par *pression statique*  $p$  s'exerçant au point A considéré. On peut la définir physiquement de la façon suivante : Supposons qu'au point A, appartenant au fluide considéré, soit disposée une sonde, orientée de façon quelconque, mais *assujettie au même mouvement que ce point A* (fig. 1). L'indication recueillie par un manomètre, relié à cette sonde, correspondrait à la pression statique en ce point A.

Un tel procédé de mesure est, évidemment inutilisable. Nous décrirons ci-après les instruments utilisés en pratique.

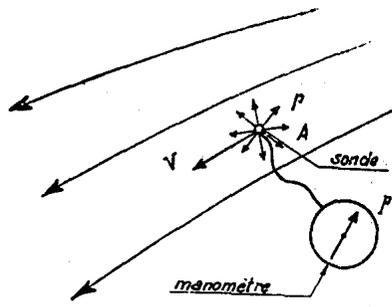


Fig. 1

### 1.2. Écoulement permanent, filets fluides.

Considérons une « *veine fluide* » (courant d'air par exemple) animée d'une vitesse horizontale  $V$  uniforme. La pression statique  $p$  est constante en tous les points de cette veine (1).

Si l'on plonge dans une telle veine un corps étranger immobile, ou animé d'un mouvement différent, on observe que la vitesse  $V$  et la pression  $p$  sont *perturbées* dans toute une zone entourant cet obstacle au mouvement de la veine.

Cependant, pour les corps dits « *fuselés* » que l'on considère ordinairement en aérodynamique, on constate en général, une *permanence* dans cette perturbation : en un même point de la zone troublée,  $v$  et  $p$  restent constants dans le temps. Tout se passe comme si l'air suivait une multitude de petits canaux rigides juxtaposés, dont les directions ne se recouperaient pas (fig. 2a).

L'écoulement est dit « *permanent* » et l'on donne à ces canaux fictifs, le nom de « *filets fluides* » ou « *tubes de courant* ». Leur matérialisation aide beaucoup à la compréhension physique des phénomènes étudiés en aérodynamique.

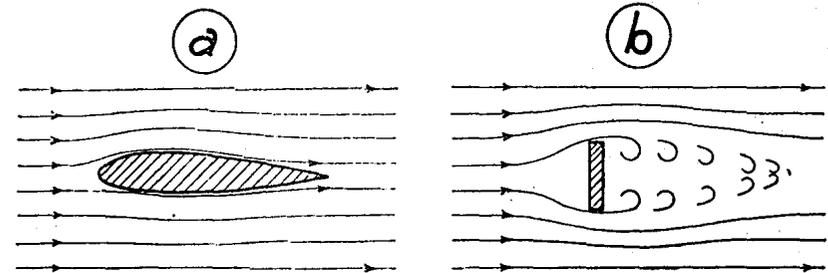


Fig. 2

*Remarque* : Il existe également un autre mode d'écoulement autour d'un obstacle, qui se manifeste par une absence totale de permanence dans le temps. La pression et la vitesse en un même point varient en chaque instant d'une manière désordonnée. On qualifie souvent cet écoulement de « *turbulent* ». Il existe, par exemple, à l'arrière d'un obstacle présentant des arêtes vives (fig. 2b). On s'efforce, en aérodynamique, d'éviter ces écoulements qui donnent lieu à des *dissipations d'énergie* (mouvements tourbillonnaires).

### 1.2. Écoulement permanent des fluides parfaits et incompressibles.

#### 1.20. REMARQUES PRÉLIMINAIRES.

Les relations fondamentales exposées ci-après concernent des fluides dits « *parfaits* ». Elles supposent en effet, que le fluide envisagé n'est aucunement *visqueux*.

Dans cet état idéal, les différents filets fluides qui composent la veine considérée sont supposés n'exercer aucun frottement entre eux ni sur les parois ou obstacles fixes.

Elles supposent en outre, que le fluide est *incompressible*. Cette incompressibilité se manifeste par une constance de la densité et donc de la *masse spécifique*  $\rho$  du fluide (1) le long de la veine considérée.

Ces hypothèses simplificatrices sont admissibles pour étudier les caractéristiques d'ensemble des phénomènes aérodynamiques aux vitesses aéronautiques actuelles.

Nous verrons cependant que les facteurs viscosité et compressibilité doivent intervenir, en pratique pour certaines considérations plus poussées.

(1) En négligeant l'influence de la pesanteur (décroissance de la pression atmosphérique, par exemple).

### 1.21 EQUATION DE CONTINUITÉ.

Dans un filet fluide de dimensions variables (fig. 3a) considérons deux « sections droites » 1 et 2 de surfaces respectives  $S_1$  et  $S_2$  et désignons par  $V_1$  et  $V_2$  les vitesses du fluide au niveau de ces sections.

Le volume de fluide traversant ces sections pendant l'unité de temps est :

$$\text{section 1 : } S_1 V_1 ; \text{ section 2 : } S_2 V_2$$

Comme la masse spécifique  $\rho$  est constante, ces volumes doivent être égaux (conservation des masses) d'où :

$$S_1 V_1 = S_2 V_2$$

soit ; d'une façon générale :

$$SV = \text{Const}^{\text{e}}$$

C'est l'équation de continuité qui exprime que la vitesse décroît quand la section augmente, ou inversement.

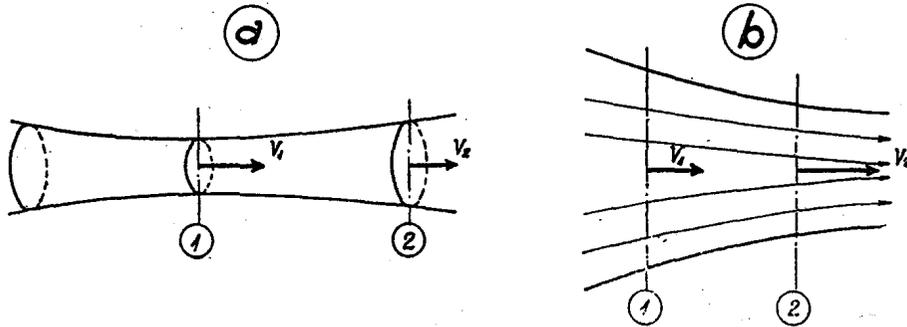


FIG. 3

#### Application.

Cette relation s'utilise directement pour déterminer les vitesses moyennes à l'intérieur d'ajutages convergents ou divergents (fig. 3b) (2). Il suffit, en effet, de mesurer  $V$  au niveau d'une section, pour connaître cette grandeur au niveau de toutes les autres.

### 1.22 EQUATION DE BERNOULLI.

Cette équation, que nous donnerons sans démonstration, exprime la relation qui existe entre les pressions statiques  $p_1$  et  $p_2$  et les vitesses  $V_1$  et  $V_2$  au niveau des deux sections 1 et 2 d'un même filet fluide (fig. 3a).

Elle s'exprime ainsi :

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2$$

(2) A condition, toutefois, que l'hypothèse d'incompressibilité reste acceptable

soit, d'une façon générale :

$$p + \frac{1}{2} \rho V^2 = \text{Const}^{\text{e}}$$

Nous donnerons ci-dessous les applications principales de cette relation fondamentale, ainsi que son interprétation physique.

### 1.23 VARIATIONS DE PRESSION ENGENDRÉES PAR LA COURBURE DE FILETS FLUIDES.

#### 1.231 Gradient de pression normalement à la direction des filets.

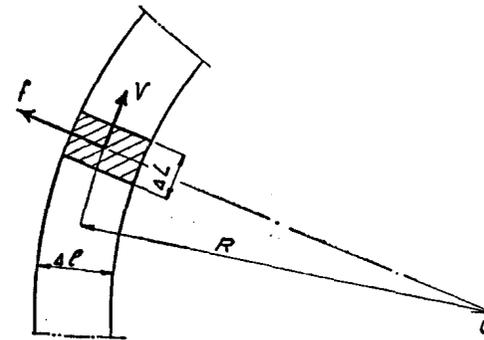


FIG. 4

Considérons un filet fluide qui, par suite de la proximité d'un obstacle, possède une forme courbe (fig. 4) cette courbure s'opérant dans le plan de la figure (écoulement-plan).

Considérons un élément de volume du fluide, de dimensions :  $\Delta e$  normale au plan de la figure,  $\Delta l$  suivant la direction du filet et  $\Delta l$  dans le sens radial. Soit  $R$  le rayon de courbure du filet au niveau de cet élément et  $V$  sa vitesse.

La masse  $m$  de cet élément a pour valeur :

$$m = \rho \Delta l \cdot \Delta l \cdot \Delta e$$

Par suite de la courbure de la trajectoire, elle engendre une force centrifuge :

$$f = m \frac{V^2}{R} = \rho \Delta l \cdot \Delta l \cdot \Delta e \frac{V^2}{R}$$

La section de l'élément normale à la force  $f$ , étant :

$$\Delta S = \Delta l \cdot \Delta e$$

cette force, produit dans l'ensemble de la dimension  $\Delta l$ , un accroissement de pression statique :

$$\Delta p = \frac{f}{\Delta S} = \rho \frac{V^2}{R} \Delta l$$

L'accroissement de pression par unité de longueur dans le sens radial, ou *gradient de pression* dans cette direction, vaut donc :

$$\frac{\Delta p}{\Delta l} = \rho \frac{V^2}{R}$$

Ce gradient est *positif* (augmentation de  $p$ ) quand on s'éloigne du centre de courbure, il est *néglatif* (diminution de  $p$ ) quand on s'en rapproche.

### 1.232 Application.

La relation ci-dessus permet de mettre clairement en évidence les *variations de pression* constatées autour d'un obstacle en examinant seulement l'allure des lignes de courant qui le contournent.

Considérons, par exemple, le *profil d'aile* représenté figure 5a. En cheminant de  $a'$  en  $a$  ou de  $b'$  en  $b$  on s'éloigne du centre de courbure des filets. Donc la pression est plus forte en  $a$  et  $b$  qu'en  $a'$  et  $b'$ .

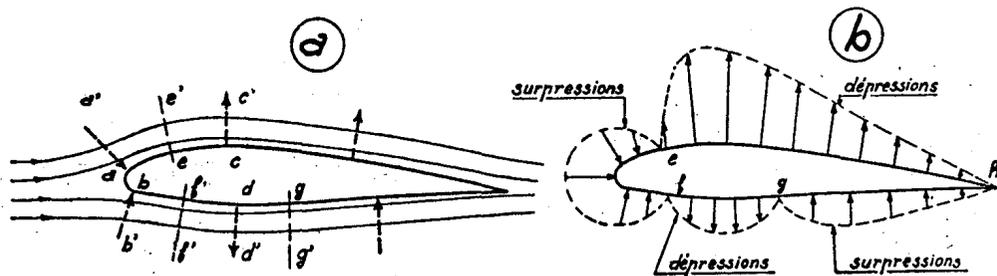


FIG. 5

Les points  $a$  et  $b$  sont donc soumis à des *surpressions* par rapport à la pression statique ambiante (points  $a'$  et  $b'$  hors de la zone perturbée). On constate par contre, que les points  $c$  et  $d$  sont soumis à des *dépressions* (pressions inférieures à celles régnant en  $c'$  et  $d'$  qui sont plus éloignés du centre de courbure). Suivant  $e e'$ ,  $f f'$  et  $g g'$  où les lignes de courant présentent des *inflexions*, le gradient de pression est nul ( $R = \infty$ ). Les points  $e / g$  ne subissent donc aucune surpression ou dépression. Ils sont soumis à la « pression statique ambiante » de la zone non perturbée. On arrive ainsi à une représentation schématique des *différences*  $\Delta p$  existant entre les pressions au niveau du profil et la pression statique ambiante, telle que celle donnée par la figure 5b (1).

(1) Ces différences  $\Delta p$  constituent les « *pressions effectives* » appliquées au profil.

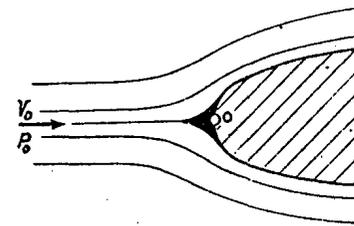
### 1.233 Remarques.

a) La figure 5b permet déjà de se rendre compte du phénomène de *portance* d'un profil d'aile. Cette portance est due à la prépondérance des « effets de pression » dirigés de bas en haut. On pourrait d'ailleurs déterminer, par intégration, la résultante générale de ces effets de pression. On constaterait que, pour un corps quelconque isolé, cette résultante possède toujours une composante dirigée en sens inverse du mouvement relatif. On conçoit ainsi, qu'en l'absence de tout frottement (fluide supposé parfait) il existe, une certaine *résistance à l'avancement* (ou traînée de forme) que nous définirons ultérieurement.

b) Cette figure permet également de concevoir, physiquement, l'allure donnée aux *profils d'ailes sustentatrices*, de façon à obtenir une *portance élevée* et une *traînée faible*.

## 1.3 Interprétation physique du théorème de Bernouilli :

### 1.31 PRESSION D'IMPACT A L'AVANT D'UN OBSTACLE.



F.G. 6

Soient  $V_0$  et  $p_0$  la vitesse et la pression statique d'une veine fluide uniforme. Si l'on dispose un obstacle dans cette veine, les filets fluides se séparent en avant de cet obstacle de façon à le contourner (fig. 6).

Il existe donc une certaine région de centre  $O$  (appelée parfois *point d'impact*) où la vitesse du fluide est nulle.

Si l'on désigne par  $p_1$  la pression existant dans cette région, cette pression doit être telle que l'on ait, d'après la loi de Bernouilli :

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2 = p_1 + 0$$

Il existe donc en  $O$  une *surpression*, ou *pression d'impact* :

$$\Delta p = p_1 - p_0 = \frac{1}{2} \rho V_0^2$$

### 1.32 PRESSION DYNAMIQUE, PRESSION TOTALE.

En aérodynamique, on donne d'une façon générale, le nom de *pression dynamique* à la grandeur :

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2$$

Cette appellation est donnée par opposition à la pression statique définie ci-dessus. La pression dynamique traduit « l'effet de la vitesse », on dit encore qu'elle constitue la « pression génératrice de la vitesse ».

On désigne enfin par *pression totale* la somme de la pression statique  $p$  et de la pression dynamique  $q$ . Le *théorème de Bernouilli*, relatif aux fluides parfaits, s'énonce donc finalement :

$$\text{Pression totale} = \text{pression statique} + \text{pression dynamique} = \text{Constante}$$

soit :

$$p + q = C^te$$

### 1.33 Remarque.

Le théorème de Bernouilli permet de se rendre compte très utilement de l'influence prépondérante des dépressions dans les actions d'un fluide sur les obstacles (portance d'une aile par exemple).

En effet, une *surpression* ne peut en aucun cas dépasser la pression dynamique  $q$ , puisque nous avons obtenu ci-dessus cette valeur comme pression d'impact (dans le cas limite  $V = 0$ ).

Nous pouvons donc écrire :

$$\frac{\Delta p}{q} \leq + 1$$

Par contre, les *dépressions* peuvent atteindre, en valeurs absolues, des valeurs très supérieures à  $q$ . Supposons, en effet que la vitesse  $V_1$ , sur le contour d'un obstacle devienne égale à  $2 V_0$ , nous aurons, au point considéré une pression  $p_1$  telle que :

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho 4 V_0^2 = p_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2$$

$$\text{soit : } \Delta p = p_1 - p_0 = \frac{1}{2} \rho V_0^2 (1 - 4) = - 3 q$$

$$\text{d'où } \frac{\Delta p}{q} = - 3$$

Les actions aérodynamiques agiront donc essentiellement sous forme de *dépressions*.

## 1.4 Instruments de mesure des pressions et des vitesses.

TUBE DE VENTURI (fig. 9).

Il sert également à la mesure des vitesses. Il est basé sur la différence des pressions statiques provenant d'une différence de vitesse obtenue dans un ajutage convergent-divergent.

En désignant par  $S_0$  et  $V_0$  la section et la vitesse à l'entrée et par  $S_1$  la section au col, on obtient, à ce col, une vitesse  $V_1$  telle que :

$$S_0 V_0 = S_1 V_1 \quad (\S 1.31) \quad \text{d'où : } V_1 = V_0 \frac{S_0}{S_1}$$

et d'après le théorème de Bernouilli, en désignant par  $p_0$  et  $p_1$  les pressions statiques correspondantes :

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2 = p_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = p_1 + \frac{1}{2} \rho V_0^2 \frac{S_0^2}{S_1^2}$$

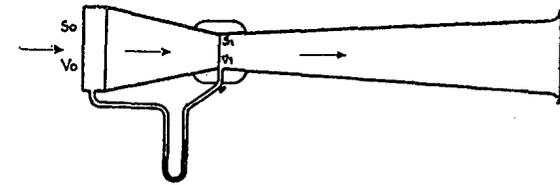


FIG. 9

Le manomètre donne donc une indication :

$$\Delta p = p_0 - p_1 = \frac{1}{2} \rho V_0^2 \left( \frac{S_0^2}{S_1^2} - 1 \right) = m \frac{1}{2} \rho V_0^2$$

en désignant par  $m$  la « constante du Venturi » :

$$m = \left( \frac{S_0^2}{S_1^2} - 1 \right)$$

## 2. RÉSISTANCE DE L'AIR. COEFFICIENTS AÉRODYNAMIQUES.

### 2.1 Action aérodynamique totale.

Considérons (fig. 10) un corps animé d'une *vitesse relative*  $V$  par rapport à l'air (corps fixe dans un air en mouvement, corps mobile dans un air au repos, ou corps mobile dans un air en mouvement)

L'action de l'air sur ce corps se traduit par une *force résultante*  $F$ , généralement oblique par rapport à la direction de la vitesse relative (fig. 10). Cette force qui se désigne par « *action aérodynamique totale* » ou plus simplement par « *résistance de l'air* », a pour expression générale :

$$F = \frac{\rho}{2} V^2 S C_r$$

Dans cette expression :

$S$  est une surface caractéristique du corps que l'on désigne par *surface de référence*. Nous précisons ci-après le choix de cette surface arbitraire dans le cas des avions.

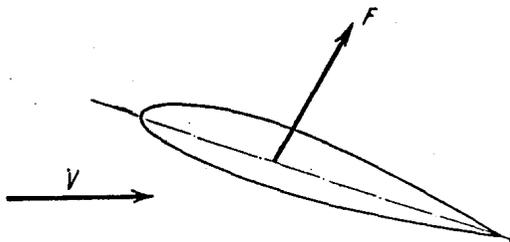


FIG. 10

$C_r$  est un *coefficient sans dimension* que nous désignerons par *coefficient aérodynamique total*.

Il est aisé de voir que ce coefficient est bien sans dimension (coefficient absolu indépendant des unités utilisées). En effet, l'expression ci-dessus peut se mettre sous la forme :

$$F = q S C_r = (\text{pression dynamique} \times \text{surface}) C_r$$

Or le produit : (pression  $\times$  surface) = force. Il faut donc bien que  $C_r$  soit un simple coefficient.

*Remarques.*

a) Il est utile de remarquer que la valeur de  $C_r$  est liée intimement, pour un même corps, à la grandeur de la surface de référence  $S$ , arbitrairement choisie.

### 2.2 Projections de la résultante $F$ : coefficients $C_z$ et $C_x$ .

Pour l'étude des phénomènes aérodynamiques, il est commode d'évaluer les projections de la force résultante  $F$  sur un *système d'axes lié à la vitesse relative*  $V$ .

Les éléments étudiés présentant, en général, un plan de symétrie parallèle à la vitesse  $V$  (plan de symétrie d'un avion, par exemple), on sait à priori que la résultante  $F$  est située dans ce plan. Il suffit donc, en pratique, d'envisager un système de deux axes dans ce plan.

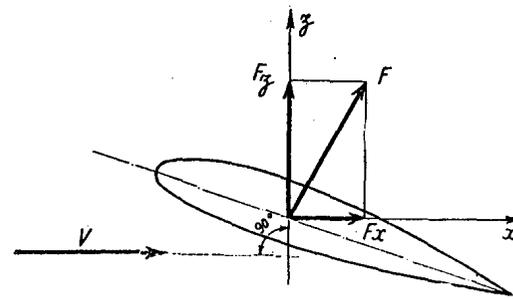


FIG. 11

On définit ainsi (fig. 11) :

- une composante  $F_z$  normale à la vitesse relative et orientée positivement de bas en haut, appelée *portance*.
- une composante  $F_x$  parallèle à la vitesse relative et orientée positivement dans le sens de cette vitesse, appelée *traînée*.

Ces composantes s'expriment en fonction de deux *coefficients sans dimension*  $C_z$  et  $C_x$ , qui ne sont autres que les *projections* du coefficient global  $C_r$ . On obtient ainsi les relations fondamentales : (1)

$$\begin{aligned} \text{Portance : } F_z &= \frac{1}{2} \rho V^2 S C_z = q S C_z \\ \text{Traînée : } F_x &= \frac{1}{2} \rho V^2 S C_x = q S C_x \end{aligned}$$

### 2.3 Causes de la résistance de l'air.

Les éléments de mécanique des fluides parfaits, donnés au paragraphe 1, nous permettent de voir que, dans un tel fluide (fluide parfait), les actions aérodynamiques définies ci-dessus, seraient dues uniquement à des « effets de pression » (§ 1.332). Ces effets dépendent essentiellement des caractéristiques géométriques du corps étudié (forme des lignes de courant en écoulement permanent).

Mais, en fait, l'air est un fluide visqueux, et cette viscosité engendre des frottements.

Les actions aérodynamiques et, par suite, les coefficients absolus définis ci-dessus, sont dus, en définitive, à une combinaison d'effets de pression et d'effets de frottement. Les premiers agissent normalement aux surfaces des corps et les autres tangentiellement à ces surfaces.

### 2.4 Partage de la traînée.

L'influence des frottements se fait essentiellement ressentir sur la traînée  $F_x$ , c'est ainsi que l'on décompose cette force en :

- traînée due aux pressions ou « traînée de forme » :  $F_{x1}$ , due à l'obliquité de la résultante de ces pressions
- traînée due aux frottements :  $F_{x2}$  (différence entre  $F_x$  et  $F_{x1}$ ).

### 3. LA VISCOSITE

Soit une veine fluide de vitesse  $V$  longeant une paroi fixe (fig. 19). Au voisinage immédiat de cette paroi, la vitesse réelle  $u$  de ce fluide est nulle, puis elle croît pour atteindre la vitesse  $V$  à une certaine ordonnée  $y$  au-dessus de la paroi.

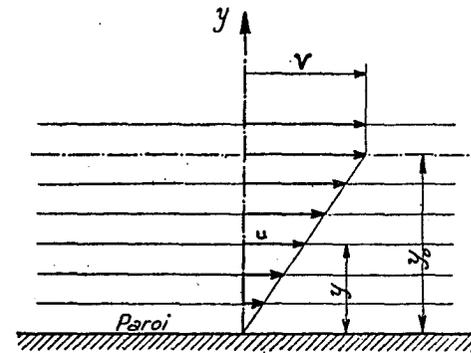


FIG. 19

La dérivée :  $u' = \frac{\Delta u}{\Delta y}$  qualifie

le gradient de vitesse au dessus de la paroi dans l'intervalle  $y = 0, y = y_0$ .

Ces différences de vitesse engendrent des frottements entre les différentes couches de fluide. Désignons par  $t$  la force de frottement par unité de surface (analogue à une fatigue tangentielle en résistance des matériaux).

On désigne par coefficient de viscosité absolu d'un fluide le rapport :

$$\mu = \frac{t}{u'}$$

Pour un même fluide, ce coefficient est sensiblement constant quelle que soit sa pression. Il varie faiblement avec sa température.

En fait, l'utilisation de ce coefficient, dans les calculs, ayant trait à la similitude, est liée intimement à la valeur de la masse spécifique  $\rho$  du fluide étudié.

C'est pourquoi l'on a défini un autre coefficient, appelé coefficient de viscosité cinématique qui a pour expression :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Notons que pour l'eau à 15°,  $\nu$  est environ 15 fois plus faible que pour l'air au sol.

## 4. REPRÉSENTATIONS GRAPHIQUES DES COEFFICIENTS AÉRODYNAMIQUES ET PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES RÉSULTATS.

### 4.1 Généralités.

L'utilisation pratique des coefficients aérodynamiques définis ci-dessus, pour une aile, s'effectue toujours en se servant de *représentations graphiques* de ces coefficients. Ces représentations graphiques ont pour avantages d'offrir une visualisation rapide des résultats en même temps qu'elles permettent de mettre clairement en évidence certaines *propriétés générales* exposées ci-après.

Signalons que l'étude des paramètres principaux influençant ces résultats sera effectuée au paragraphe suivant.

### 4.2 Représentation de $C_z$ et de $C_x$ en fonction de l'incidence.

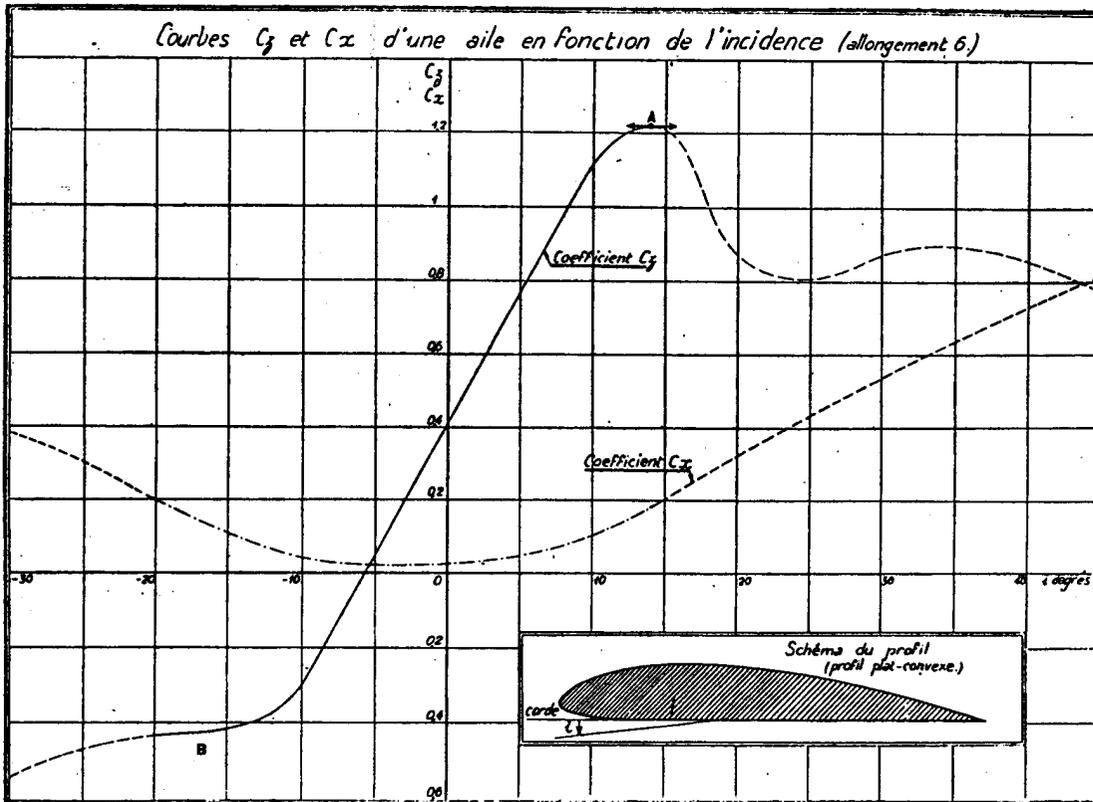


FIG. 27

La figure 27 représente un tel diagramme relatif à une *aile rectangulaire d'allongement 6* ayant le profil indiqué sur la figure. Examinons successivement l'allure et les renseignements fournis par l'une et l'autre des courbes  $C_z = f(i)$  et  $C_x = f(i)$  (désignés encore par « *courbes unitaires de portance et de traînée* »).

#### 4.21 VARIATIONS DE $C_z$ EN FONCTION DE L'INCIDENCE.

##### 4.211 Portance nulle : $C_z = 0$

Elle correspond au point de rencontre de la courbe avec l'axe des abscisses. On voit que pour l'aile étudiée (aile non vrillée) elle correspond à une *incidence négative* égale à  $-6^\circ$ . Il existe donc, dans ce cas, une sustentation positive pour des angles d'attaque géométriques négatifs.

##### 4.212 Partie linéaire.

Pour toute une gamme d'incidences comprise, ici, entre  $i = -10^\circ$  et  $i = +10^\circ$  la courbe de  $C_z$  se confond pratiquement avec une droite. Ce résultat est général pour tous les profils dont la *portance croît linéairement avec l'incidence*, dans une certaine zone ayant ordinairement l'importance de celle représentée.

##### 4.213 Maximum de portance.

En un certain point A, la courbe  $C_z$  passe par un *maximum positif*, pour décroître ensuite très rapidement. Ce phénomène de *chute de portance* a pour cause un *décollement* brusque des filets d'air sur l'extrados des profils (fig. 28). On dit que l'aile « *décroche* ». L'incidence correspondante ( $i = 14^\circ$  dans le cas figuré) s'appelle l'*incidence de décrochement*.

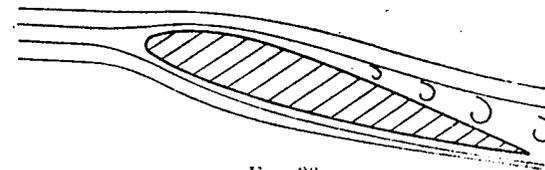
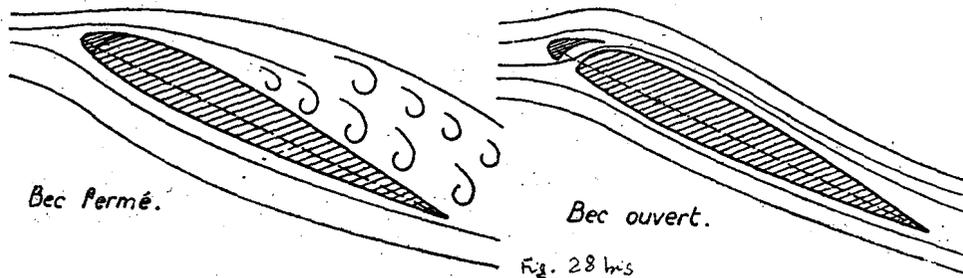


FIG. 28

Ce phénomène, dû principalement à la viscosité de l'air, On en retarde l'apparition à l'aide de certains *dispositifs hypersustentateurs*

Le dispositif améliorateur de circulation aérodynamique aux grands angles le plus utilisé est celui de l'aile à fentes et le plus répandu, parmi eux, est l'aile à fente avant unique.

Son principe consiste à faire précéder l'aile principale d'un petit profil ou bec, créant un orifice de communication convergent entre l'intrados et l'extrados. Son fonctionnement se trouve schématisé par la figure . L'air admis dans la fente avant est projeté avec rapidité sur l'extrados où il communique aux filets fluides un supplément d'énergie cinétique ayant pour effet de lui permettre de vaincre les frottements et de retarder ainsi le phénomène de décollement.



#### 4.22 VARIATIONS DE $C_x$ EN FONCTION DE L'INCIDENCE.

L'examen de la courbe correspondante, fig. 27, montre que la loi de variation de  $C_x$  est toute différente de celle de  $C_z$ .

La traînée (toujours positive) passe par un *minimum* au voisinage de l'angle de portance nulle. Elle croît fortement à partir d'incidences avoisinant celles des points A et B.

#### 4.23 ORDRES DE GRANDEUR DE $C_z$ ET DE $C_x$ .

Pour les ailes et allongements usuels, le  $C_z$  maximum est généralement de l'ordre de 1,2 (soit  $100 C_z = 120$ ) et le  $C_x$  minimum de l'ordre de 0,8.

Le  $C_x$  minimum est très variable avec le profil de l'aile. Notons que pour les profils modernes ( ), il est de l'ordre de 0,01 à 0,012, (soit  $100 C_x = 1$  à 1,2) dans les conditions d'essais en soufflerie.

#### 4.3 Représentation de $C_z$ en fonction de $C_x$ : Polaires.

##### 4.31 DÉFINITION.

On appelle *diagramme polaire*, ou, plus simplement *polaire* d'un profil, d'une aile, ou d'un avion, la courbe obtenue en portant en *abscisses* les coefficients de traînée  $C_x$  et en *ordonnées* les coefficients de portance correspondants  $C_z$ . On gradue cette courbe en valeurs de l'incidence  $i$  (fig. 29).

Cette représentation résume donc, en une seule courbe, les deux courbes unitaires étudiées ci-dessus.

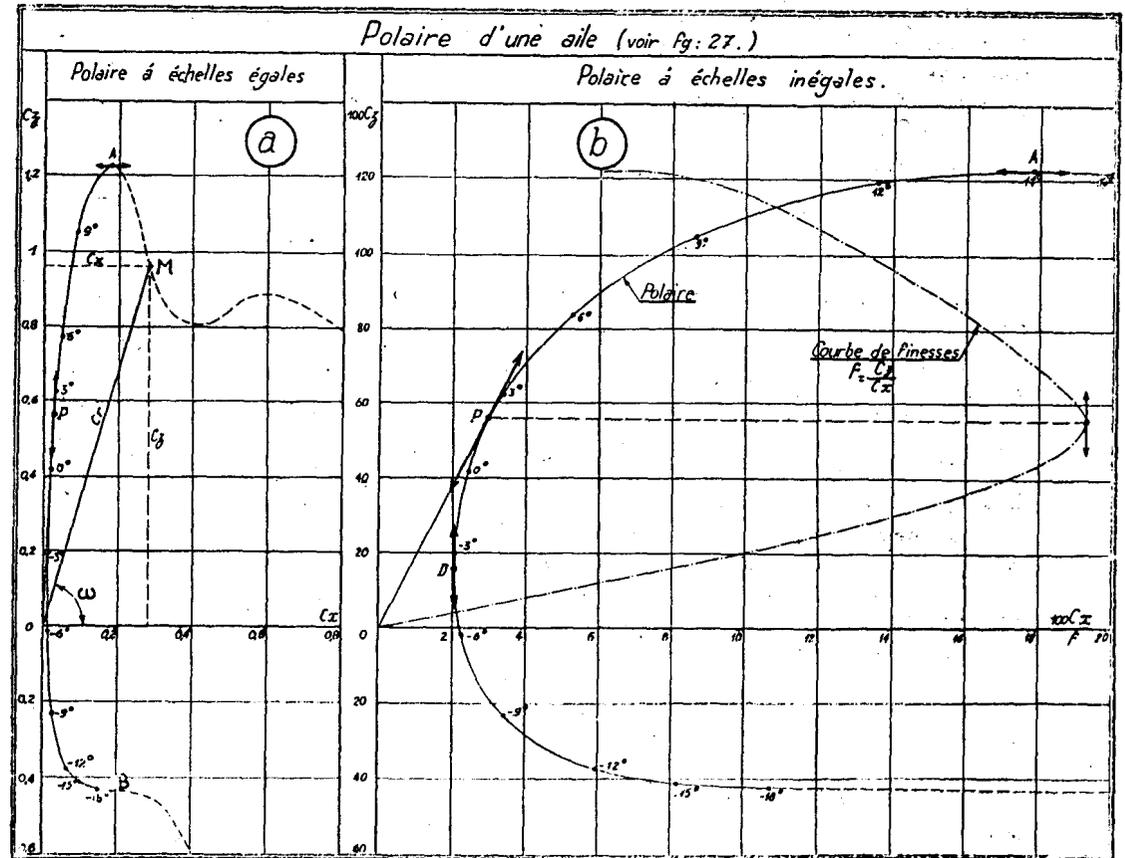


Fig. 29

#### 4.32 TRACÉ DE LA POLAIRE.

La figure 29a représente la polaire obtenue, pour l'aile étudiée figure 27, en utilisant pour ce tracé, des échelles égales pour  $C_z$  et  $C_x$ .

Cette représentation n'offre qu'un intérêt théorique (voir ci-après). En pratique, on trace les polaires en utilisant des échelles inégales pour  $C_z$  et  $C_x$  et en se limitant à la partie utile définie ci-dessus. On obtient ainsi un tracé tel que celui de la figure 29b où l'on a utilisé pour les  $C_x$  une échelle dix fois plus grande que pour les  $C_z$ . On utilise au surplus des graduations en 100  $C_x$  et 100  $C_z$  (afin d'obtenir des nombres commodes).

#### 4.33 PENTES DES RÉSULTANTES AÉRODYNAMIQUES : FINESSE.

L'origine du nom de *polaire* provient de ce que, dans ce mode de représentation à échelles égales (fig. 29a) on obtient directement en joignant un point M de la courbe à l'origine O le coefficient aérodynamique total  $C_r$  (vecteur OM) en grandeur et en direction. On obtient donc une représentation en coordonnées polaires de ce coefficient  $C_r$ .

L'angle  $\omega$  formé dans cette représentation à échelles égales, par le vecteur OM avec l'axe des  $C_x$ , caractérise une grandeur appelée  *finesse*  de l'aile étudiée en ce point M.

Dans la représentation pratique à échelles inégales on n'obtient pas directement ces renseignements, mais l'on a toujours en chaque point, compte tenu des échelles :

$$C_r = \sqrt{C_z^2 + C_x^2} \quad \text{et} \quad \boxed{\text{ finesse } f = \operatorname{tg} \omega = \frac{C_z}{C_x}}$$

La finesse caractérise un « indice de rendement aérodynamique » de l'aile au point considéré.

$$\text{ finesse } = \frac{\text{portance (ou grandeur utile)}}{\text{traînée (ou grandeur nuisible)}}$$

On peut tracer sur le diagramme polaire une courbe des finesesses, en fonction des  $C_x$  (Voir fig. 29 b).

Pratiquement, le renseignement le plus utile, pour la comparaison des qualités aérodynamiques de différentes ailes, est leur  *finesse maximum*  (maximum de l'angle  $\omega$ ).

Dans l'une ou l'autre représentation de la polaire (fig. 29 a ou 29 b) le point de contact P de la tangente à cette courbe, issue de l'origine, situe ce point de finesse maximum. On voit qu'il est donné avec une bien meilleure précision dans le cas de la figure 29b.

L'angle d'incidence correspondant à ce point P est appelé  *l'angle optimum* .

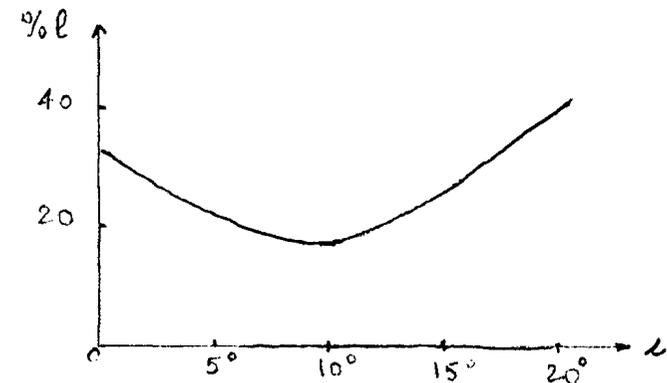
Pour l'aile étudiée figure 29 on a :

$$\text{ finesse max } = \frac{56}{2,9} = 19,3; \quad i \text{ optimum } = 2^\circ$$

(cet angle est obtenu avec précision en reportant la valeur correspondante de  $C_x$  sur le diagramme de la fig. 27).

#### 5. POSITION DE LA RESULTANTE F

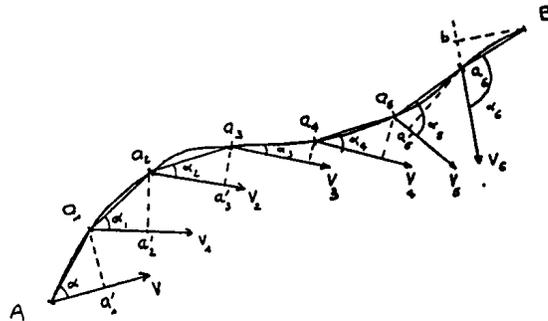
La résultante F coupe la corde du profil en un point P appelé  *centre de poussée* . Sa position depuis le bord d'attaque, exprimée en fraction de la corde l, varie avec l'incidence. En général on observe un avancement du centre de poussée jusqu'à l'incidence de décrochement puis un recul :



# LA NOTION DE CIRCULATION

## 1 - CIRCULATION D'UN VECTEUR

Considérons un domaine de l'espace où en chaque point existe un phénomène décrit par un vecteur  $V$ , par exemples la vitesse dans un écoulement fluide ou l'attraction de la pesanteur. Et envisageons une courbe joignant les points A et B en passant par les positions intermédiaires  $a_1, a_2, \dots$  où le vecteur prend les valeurs  $V, V_1, V_2, \dots$ . Substituons à la courbe AB la ligne brisée formée des cotés  $Aa_1, a_1a_2, \dots$  en supposant ceux-ci suffisamment nombreux et petits pour que de A à  $a_1$ , de  $a_1$  à  $a_2, \dots$  le vecteur reste constant dans chaque intervalle.



On appelle circulation élémentaire du vecteur sur le tronçon  $Aa_1$  le produit  $V.Aa_1 \cdot \cos \alpha_1 = V.Aa'_1$ . Certains auront reconnu ici le produit scalaire des vecteurs  $V$  et  $Aa_1$ . La **circulation** totale  $\Gamma$  du vecteur  $V$  le long de la courbe AB est la somme de ces produits élémentaires :

$$\Gamma_{AB} = V.Aa'_1 + V_1.a_1a'_2 + V_2.a_2a'_3 + \dots = \int_{AB} \vec{V} \cdot d\vec{l}$$

Le sens du parcours doit être indiqué lors du calcul et en particulier on a :  $\Gamma_{BA} = -\Gamma_{AB}$ . Une valeur positive indique que globalement la vitesse est plutôt dans le sens choisi pour le parcours.

La valeur de la circulation dépend, dans le cas général, du chemin suivi pour aller de A à B. Et donc si ce chemin est fermé la circulation correspondante est, dans le cas général, non nulle.

Nous connaissons déjà en mécanique générale la notion de travail d'une force, appliquée à un corps, pendant le déplacement de ce corps. Il s'agit en fait tout simplement de la circulation du vecteur force le long de la trajectoire parcourue par ce corps.

En mécanique des fluides on s'intéresse plutôt à la circulation du vecteur vitesse car elle jouit d'un certain nombre de propriétés fort utiles pour comprendre ou quantifier des phénomènes liés aux écoulements fluides.

## 2 - PROPRIETES DE LA CIRCULATION DE LA VITESSE

La courbe le long de laquelle on calcule la circulation peut être purement géométrique et fixe mais elle peut être aussi matérielle, c'est à dire formée de points du fluide qui restent en contact. La courbe matérielle ainsi définie se déplace et se déforme avec l'écoulement.

On démontre (Kelvin 1869) que *dans un fluide parfait incompressible la circulation le long d'une courbe matérielle reste constante au cours du temps*. Ce qui entraîne, lorsque l'écoulement part du repos, que la circulation le long de cette courbe matérielle reste nulle tant que cette dernière ne pénètre pas dans une zone où les forces visqueuses ne sont plus négligeables.

Nous savons (cf Introduction à la mécanique des fluides) que le mouvement d'une particule fluide se décompose en une translation d'ensemble, une déformation pure et une *rotation d'ensemble*. La vitesse angulaire de celle-ci étant représentée par le vecteur tourbillon. Et lorsque cette vitesse est nulle, c'est à dire la rotation absente, dans tout le domaine occupé par le fluide l'écoulement est dit irrotationnel.

On montre que *pour un tel écoulement irrotationnel* :

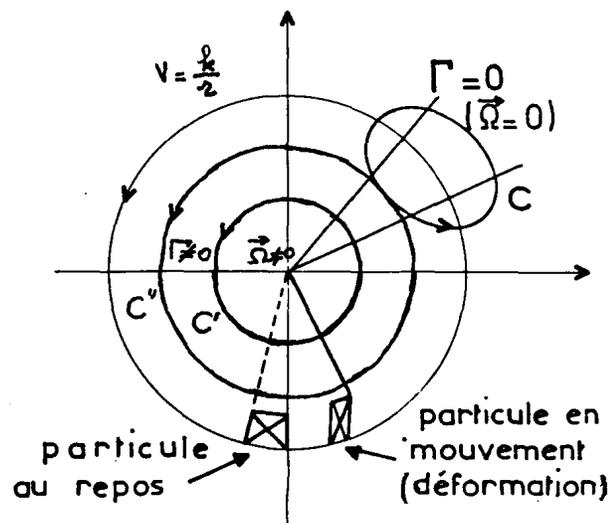
- la circulation ne dépend pas du chemin suivi;
- en particulier la circulation est nulle le long de tout contour fermé.

Lorsque l'écoulement est *presque totalement irrotationnel* sauf en quelques points singuliers rassemblés en *filets tourbillons* il possède alors des propriétés particulières :

- la circulation le long d'une courbe fermée qui n'entoure aucun filet tourbillon est nulle;
- mais si la courbe entoure un filet tourbillon la circulation prend une valeur constante caractéristique du filet tourbillon entouré et indépendante de la courbe considérée. On peut donc tracer dans l'espace où l'écoulement est irrotationnel des courbes fermées pour lesquelles la circulation est différente de zéro.

Un tel écoulement est dit *écoulement potentiel à circulation*. Un exemple, théorique et typique, en est fourni par l'écoulement appelé vortex (cf Introduction à la mécanique des fluides). Dans celui-ci la circulation le long de la courbe C qui n'entoure pas le filet tourbillon central est nulle alors que pour la courbe C' (de rayon R') la circulation est différente de zéro et a même valeur que celle calculée le long de la courbe C'' (de rayon R'') :

$$\Gamma = \frac{k}{R'} \cdot 2\pi R' = \frac{k}{R''} \cdot 2\pi R'' = k \cdot 2\pi$$



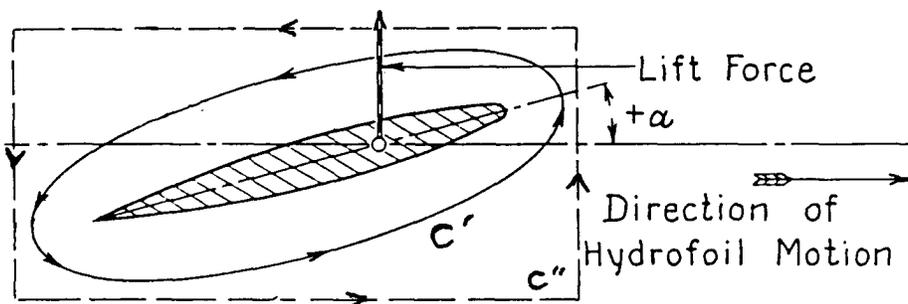
### 3 - PORTANCE DUE A LA CIRCULATION

Nous avons vu lors de notre approche purement expérimentale de l'écoulement d'un fluide réel autour d'une aile que :

- la résultante des forces de pression appliquées sur l'aile a une composante perpendiculaire au sens du mouvement, *la portance*.
- l'action du fluide sur l'aile se concentre dans une fine couche, *la couche limite*, où s'exerce la viscosité. En dehors de ce domaine le fluide s'écoule comme s'il était parfait.

Cette situation est un bon exemple d'écoulement potentiel à circulation. En effet l'écoulement étant parti du repos, où il est irrotationnel, le théorème de conservation (cf Introduction à la mécanique des fluides) impose qu'il le reste. Sauf localement au contact avec l'aile où le mouvement des particules est rotationnel du fait de la viscosité du fluide.

La circulation  $\Gamma$  calculée le long d'une courbe quelconque qui entoure l'aile est donc non nulle. Sa valeur et son signe sont d'ailleurs liés à l'intensité et au sens de la portance :

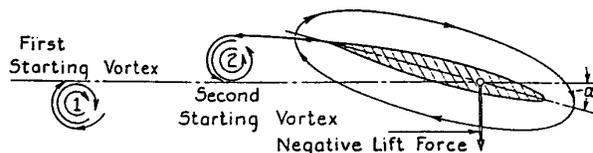
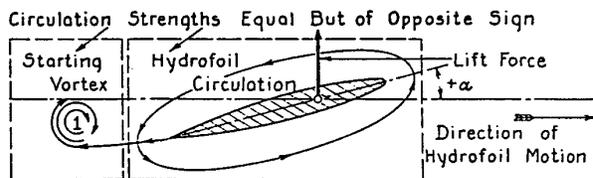


La portance vaut  $\rho.V.\Gamma$  par unité de largeur de l'aile et elle est orientée à gauche du courant ambiant lorsqu'un parcours dans le sens trigonométrique des courbes  $C'$  ou  $C''$  fournit une circulation positive.

### 4 - TOURBILLONS ALTERNES

Physiquement la circulation traduit de façon synthétique la répartition des vitesses des points dans l'écoulement. Nous montrons plus loin (cf La génération de la circulation autour d'une aile) que la valeur de la circulation calculée autour d'une aile est égale et opposée à celle calculée autour du tourbillon (1) qui se détache du bord de fuite.

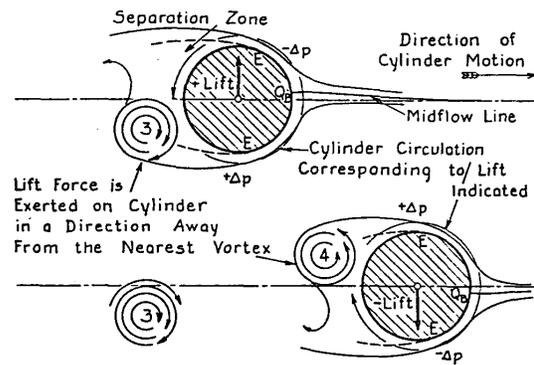
Si l'aile est symétrique et que l'on change soudainement le sens de son incidence  $\alpha$  alors un nouveau tourbillon (2) se détache du bord de fuite mais dont le sens est inversé. Il s'en suit que la circulation autour de l'aile et donc la portance sont changées de sens.



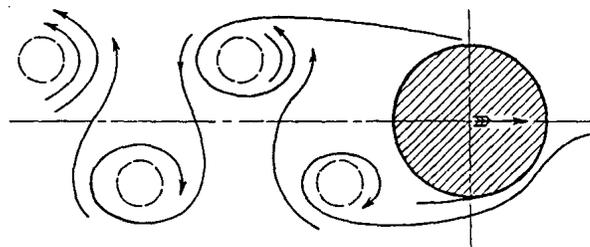
Le même phénomène se produit dans l'écoulement derrière un cylindre circulaire perpendiculaire à la vitesse du fluide. Le changement de sens de la circulation autour du cylindre n'est pas provoquée volontairement mais à la suite de la séparation de la couche limite. Lorsque nous avons rencontré ce phénomène nous avons vu qu'à certaines vitesses ( $R_n$  entre 20 et 100) l'écoulement est formé de deux tourbillons symétriques.

Mais à de plus grandes vitesses ( $R_n$  entre 100 et 2500) il est instable et à la moindre perturbation de l'écoulement un des tourbillons (3) se détache. Aussitôt la circulation autour du cylindre s'ajuste et produit une portance du côté opposé.

Mais dans cet écoulement dissymétrique et toujours instable un tourbillon (4) se développe et finit par se détacher à son tour. Un nouveau changement de sens de la circulation et donc de la portance se produit alors.



Finalement derrière le cylindre se forme une double ligne de tourbillons alternés. Chaque tourbillon ayant provoqué, dans les instants qui ont suivi son détachement, l'application d'une force transversale au cylindre, celui-ci subit une alternance de force.



Ce phénomène se rencontre pour les haubans dans le vent et les hélices dans l'eau. Ils entrent alors en vibration sous l'effet de cette force alternée, on dit alors qu'ils "chantent". Mais il se produit aussi dans l'écoulement autour du spinnaker et est à l'origine du roulis rythmique, nous y reviendrons.

# LA GENERATION DE LA CIRCULATION AUTOUR D'UNE AILE

Les expériences menées en souffleries décrivent un écoulement caractérisé par un point d'arrêt sur l'avant et un autre positionné juste au bord de fuite (fig.1) :

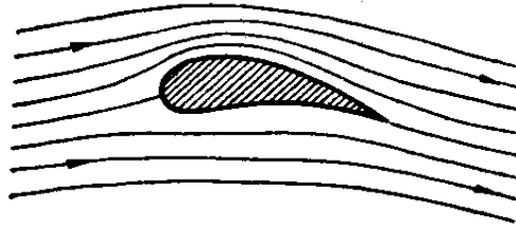


FIG. 1 — Écoulement autour d'une aile.

Or la théorie n'aboutit à un tel résultat qu'en superposant à l'écoulement du fluide parfait (fig.2a) un vortex, fictif et situé on ne sait trop où (fig. 2b), ayant une « circulation » particulière telle que la résultante des vitesses au bord de fuite soit nulle :

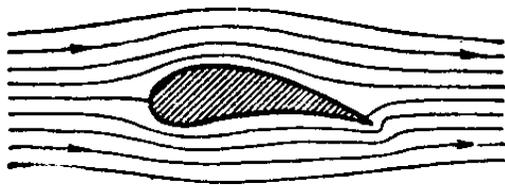


Fig. 2a — Écoulement à potentiel simple autour d'une aile.

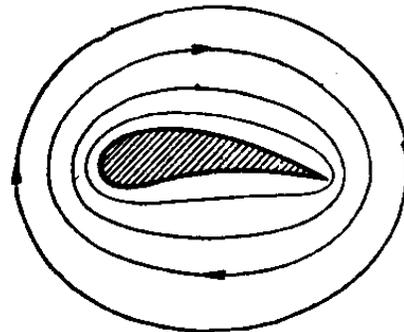


Fig. 2b — Écoulement avec circulation autour d'une aile.

Cette condition particulière est due à Joukowski. Une telle démarche abstraite est efficace mathématiquement, et donc techniquement, mais elle interdit une compréhension véritable du concept de circulation et ses conséquences. C'est pourquoi nous allons analyser ici l'influence remarquable exercée par le bord de fuite d'une aile.

L'observation montre que la circulation autour d'une aile formée d'un bord d'attaque arrondi et d'un bord de fuite tranchant, dans une translation à vitesse constante, est indépendante du passé de cet écoulement. A titre d'explication nous allons supposer que le mouvement a été établi depuis le repos et que l'aile a été amenée rapidement à sa vitesse finale sans changer la direction du mouvement.

## Première phase :

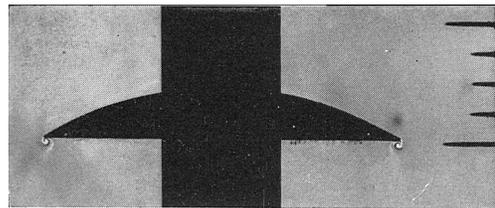
Immédiatement après que l'aile ait commencé à avancer, le mouvement du fluide est partout irrotationnel, parce que la propagation du tourbillon au delà de la surface de l'aile (où il est généré) par diffusion visqueuse, et à un moindre degré aussi par convection, s'effectue avec un taux fini. Le mouvement initialement irrotationnel est caractérisé par une circulation toujours nulle (Kelvin), et il y a une position correspondante du point d'arrêt arrière qui dépend de l'orientation de l'aile par rapport à la direction du mouvement.

La position initiale du point d'arrêt arrière ne coïncide pas avec le bord de fuite aigu, en général, et en conséquence il y a un écoulement **autour** du bord de fuite avec un maximum de vitesse au bord; l'écoulement près du bord de fuite ressemble initialement à celui de la figure 2a.

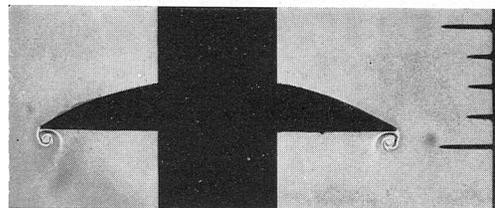
La décélération extrêmement forte du fluide s'écoulant depuis le bord de fuite vers le point d'arrêt mène presque immédiatement au développement à cet endroit d'un flux de retour dans la couche limite et à la séparation de celle-ci (qui à ce stade est encore très fine) du bord de fuite aigu.

## Deuxième phase :

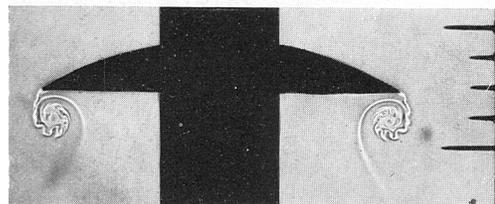
Dans la phase suivante du mouvement, le tourbillon propagé depuis le bord de fuite par la couche limite séparée affecte l'écoulement irrotationnel près du bord de fuite, et le modifie donc en réduisant le taux de propagation du tourbillon. Ce processus se produit près de n'importe quel bord tranchant, et on peut envisager l'écoulement près du bord de fuite comme momentanément isolé. La forme et la position de la couche limite séparée issue d'un bord saillant, presque immédiatement après qu'il ait commencé à avancer, est montrée par la suite de photographies ci-contre :



1



2



3



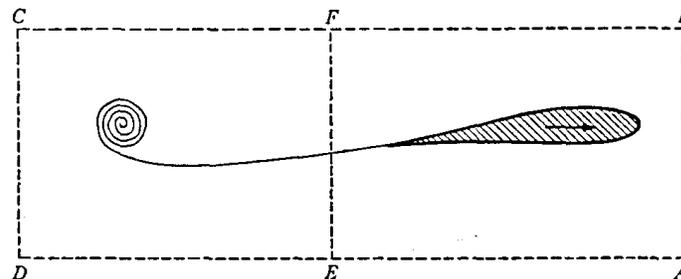
Cette photographie prise peu de temps après le début du mouvement apporte plus d'information au sujet des lignes de courants sur les deux cotés de la couche cisailée.

Avant qu'aucun tourbillon se soit propagé depuis l'arête saillante, l'écoulement est irrotationnel, et aux instants suivants le tourbillon qui s'écoule depuis le bord modifie cet écoulement irrotationnel sur une région près du bord qui augmente en taille.

Le tourbillon détaché est emporté par le fluide au delà de l'arête. Cela nécessite ainsi un apport continu de tourbillon supplémentaire issu du bord de façon à être capable d'induire une vitesse près de l'arête qui compense exactement la vitesse *autour* de celle-ci due à l'écoulement irrotationnel fondamental.

### Troisième phase :

L'intense tourbillon issu du bord de fuite dans les premiers stades du mouvement est transporté loin en aval. Le sens du tourbillon emporté est le même que celui du mouvement autour du bord de fuite dans l'écoulement initialement totalement irrotationnel (i.e dans le sens des aiguilles d'une montre pour la fig.2), et il est évident qu'une circulation de sens contraire doit exister autour de l'aile :

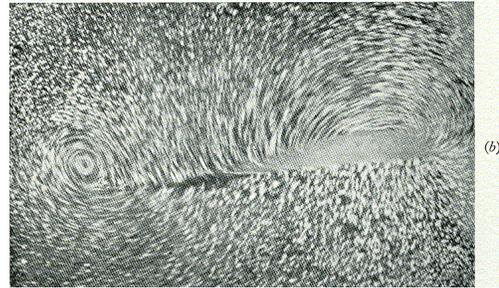
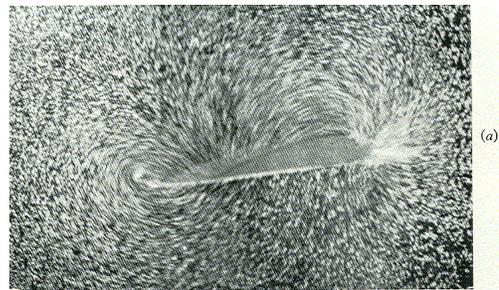


Considérons pour cela le circuit matériel ABCD de la figure ci-dessus qui est suffisamment grand pour contenir la position initiale de l'aile (qui est approximativement celle du tourbillon détaché initialement) et sa position actuelle. La circulation le long de ABCD était initialement nulle, et reste donc encore nulle à l'instant considéré. La circulation le long de ABFE est donc égale et opposée au flux de tourbillon à travers la section EFCD, qui contient pratiquement tout le tourbillon détaché depuis l'aile jusqu'à l'instant considéré.

Les photographies ci-contre sont prises : (a) peu après le départ de l'aile, (b) quand celle-ci a avancé à vitesse stable d'environ sa longueur.

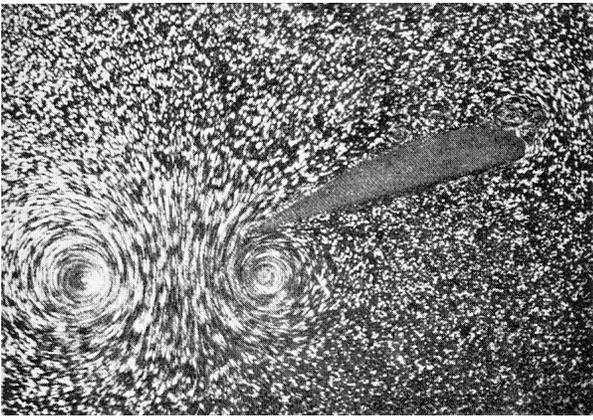
Elles suggèrent que la dispersion est quasiment complète au bout d'une ou deux longueurs parcourues à vitesse constante.

C'est pourquoi le fluide contenu par ABFE est en mouvement irrotationnel ( excepté dans la fine couche limite et le sillage ), et la circulation le long de ABFE est aussi la circulation stationnaire autour de l'aile.



De cette façon un régime d'écoulement s'est établi dans lequel la circulation autour d'une aile est non nulle. Le sens de cette circulation produite - le sens inverse des aiguilles d'une montre pour les ailes des figures précédentes - est opposé à celui de l'écoulement autour du bord de fuite tranchant dans le mouvement initialement totalement irrotationnel. Et il est tel qu'il recule le point d'arrêt arrière vers le bord de fuite. On ne peut pas déterminer la valeur exacte de la circulation établie autour de l'aile par cette analyse du processus de dispersion du tourbillon, mais on peut démontrer que *n'importe quelle valeur* constante de la circulation autre que celle qui place le point d'arrêt juste au bord de fuite remettrait immédiatement en jeu la séquence des transformations décrites précédemment et produirait un ajustement supplémentaire de la circulation, toujours de façon à ramener le point d'arrêt vers le bord de fuite. La circulation décrite par la condition de Joukowski est la seule valeur constante pour une aile en mouvement stationnaire.

La circulation exigée par la condition de Joukowski est clairement dépendante de la vitesse stationnaire autour de l'aile. Puisque la condition impose la compensation des contributions, à la vitesse autour de l'arête vive, due à la circulation et due au mouvement de l'aile, il s'en suit que *la circulation est proportionnelle à la vitesse de l'aile*. Le tourbillon doit donc se détacher de l'aile dès que sa vitesse change, et pas seulement quand elle part du repos :



Cette dernière photographie montre l'effet très net sur une aile partant du repos et s'arrêtant soudainement peu après. Le tourbillon évacué en résultat de ce rapide changement de vitesse est habituellement concentré, et on peut alors parler d'un "tourbillon de départ" et aussi d'un "tourbillon d'arrêt". Ces tourbillons sont ici de même intensité et de sens contraire.

Des tourbillons de départ, d'arrêt, d'accélération et de décélération peuvent aussi être clairement mis en évidence en plongeant une lame large dans un récipient d'eau et en la déplaçant dans son plan, l'existence d'un tourbillon détaché étant rendue visible par la dépression de la surface en son centre.

# LA DYNAMIQUE DES VOILES

**N**OUS ne dirons jamais assez l'importance de la bonne qualité des voiles, des drisses et des écoutes sur un bateau de grand voyage.

Tout comme le gréement, la garde-robe d'un voilier hauturier doit être particulièrement soignée, réalisée dans des textiles modernes et résistants, ni trop lourds, ni trop légers, dans des grammages correspondant aux surfaces des voiles, à la raideur et au déplacement du bateau. Les voiles seront cousues à double ou à triple couture, avec de puissants renforts aux points de tire et des placards de protection aux endroits qui portent.

Bandes de ris, bosses de ris, goussets de lattes, seront montées de manière à pouvoir résister longtemps aux vibrations et aux ragages.

Le fil à voile, qui ne pénètre pas dans la trame synthétique comme dans du coton et reste toujours très fragile à l'usage, sera protégé du ragage répété des espars et du haubannage et des trop longues exposition au soleil dans des sacs ou sous des housses de mouillage.

Des voiles bien entretenues durent longtemps.

Bien taillées, elles permettent ces merveilleux équilibres dans le petit temps comme dans la brise et améliorent l'assiette et le passage dans la mer formée et contre les vagues en laissant dans les mains une barre douce et vivante...

"Bien établies dans l'alizé, leurs grandes ailes blanches, poussant le bateau sur la hanche, déroulent une écume étoilée".

Bien comprendre comment "marche" une voile est d'une telle importance pour comprendre un gréement et orienter des choix que

nous allons rentrer dans le détail de sa mécanique.

Les voiles fonctionnent sur le même principe que les ailes d'avions ou les ailerons de quille (fig. 50).

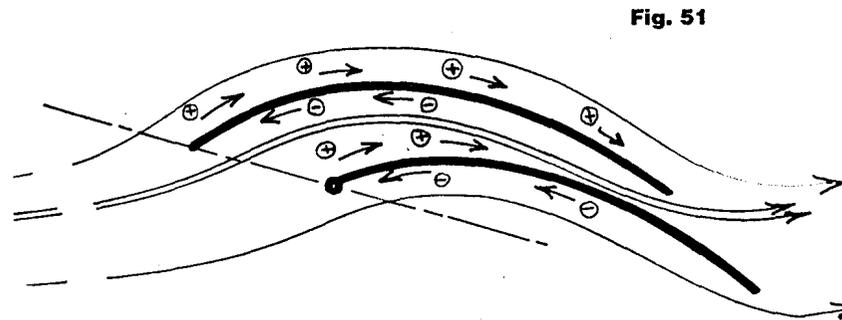
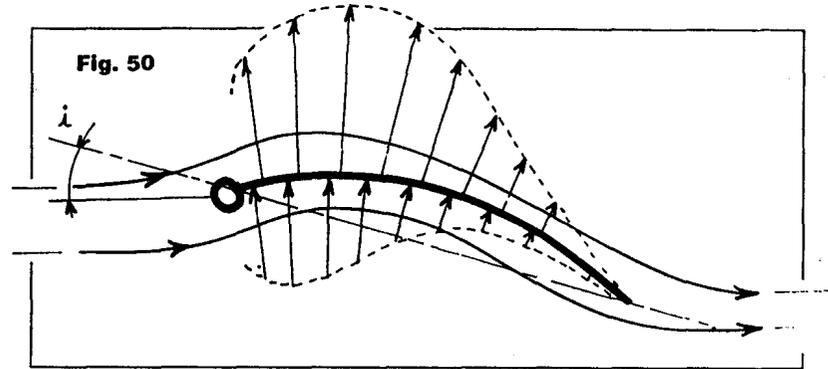
Il s'agit toujours d'angles d'incidences d'un plan porteur modifiant la course d'un fluide environnant, l'air ou l'eau. Le plan d'une voile, modifiant la course du vent, et séparant le flux en deux, va entraîner un court instant des changements de vitesse entre ses deux flux qui doivent se "retrouver" après le passage de son profil : une accélération des filets d'air sous le vent de la voile en raison de la plus grande distance à parcourir, créant ainsi une dépression sur la face externe "l'extrados", et une décélération des filets d'air au vent de la voile en raison de la plus courte distance à parcourir, créant ainsi une surpression sur la face interne "l'intrados".

Cette variation de pression, qui est le principe de base de l'aérodynamisme, est surtout sensible sur la partie avant du profil, le bord d'attaque, car c'est là que le vent subit l'inflection et la déflexion la plus importante.

La partie arrière, le bord de fuite, a également son importance puisque c'est là-bas que se fait l'étranglement de jonction des filets d'air.

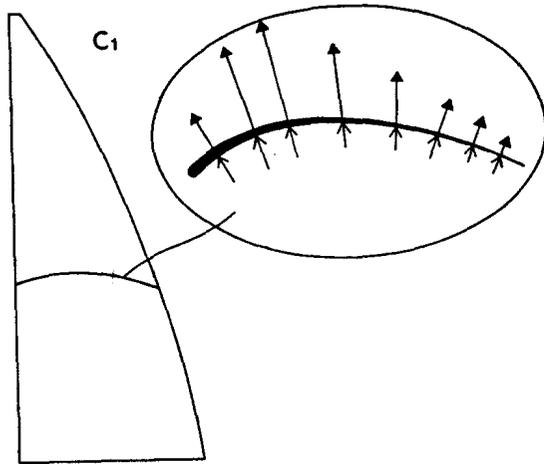
La différence entre une aile d'avion et une voile est fondamentale : l'aile d'avion étant épaisse et rigide, elle pourra présenter le profil idéal pour créer une différence de pression très performante pour des angles d'incidences précis. La voile étant mince et déformable, elle ne pourra prétendre à la même performance, mais pourra s'inspirer de l'aile épaisse en interaction avec une autre voile, et d'autre part utiliser cette possibilité de déformation pour ajuster sa forme et sa gran-

deur aux différentes (forces et directions) des conditions météorologiques : toute la voile est là (fig 51) ! □



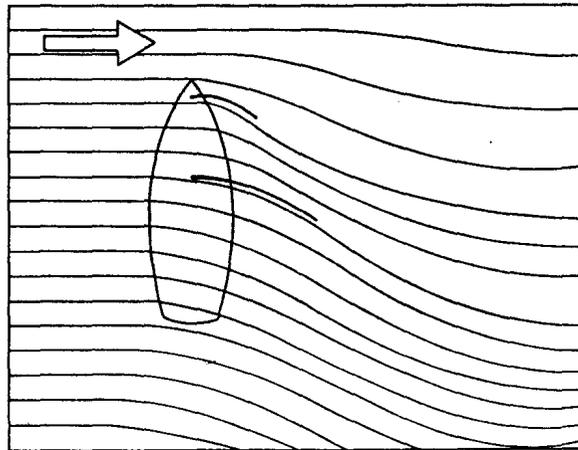
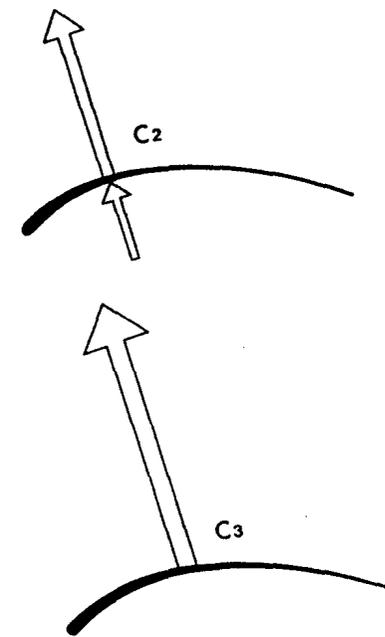
1) Une voile fonctionne selon le même principe qu'une aile d'avion. Le vent dévié par la voilure entraîne une modification du champ de pression autour de celle-ci : une dépression sous le vent de la voile (extrados) et une surpression sur la face au vent. On remarquera que cette variation de pression est surtout sensible sur la partie avant du profil, là où le vent subit l'inflection la plus importante. Toute la force propulsive d'une voile dépend de cette inflection en fonction de la force du vent et de l'angle d'incidence.

Si l'on considère l'interaction entre deux voiles (accélération sur l'extrados et décélération sur l'intrados de chacune d'entre elles) et si l'on regarde les vitesses relatives à l'intérieur du système formé par les deux voiles, on constate que l'ensemble fonctionne comme un seul profil très épais.



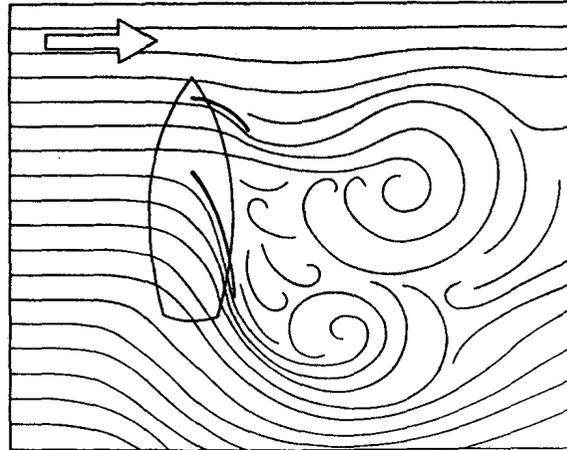
C Quand le vent souffle sur une voile, il fait naître une pression en tous les points du côté concave, et une succion en tous les points du côté convexe (1). Toutes ces petites pressions différentes

peuvent être considérées comme une seule pression, et toutes les petites succions comme constituant une seule succion (2). La force de succion peut être égale au double de la pression. Ensemble, succion et pression constituent une force (3).



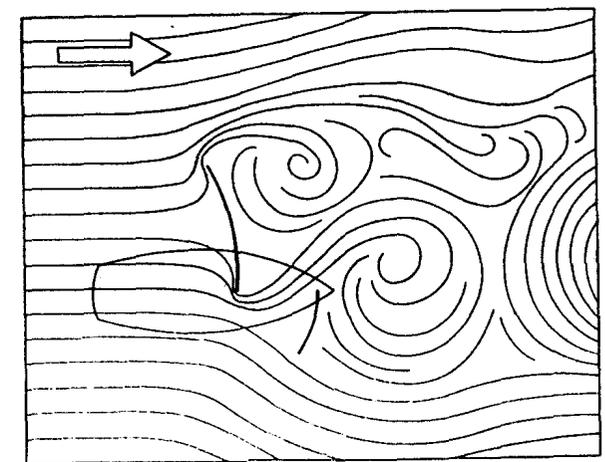
F1

F Aux allures portantes, la meilleure utilisation de l'énergie du vent consiste à



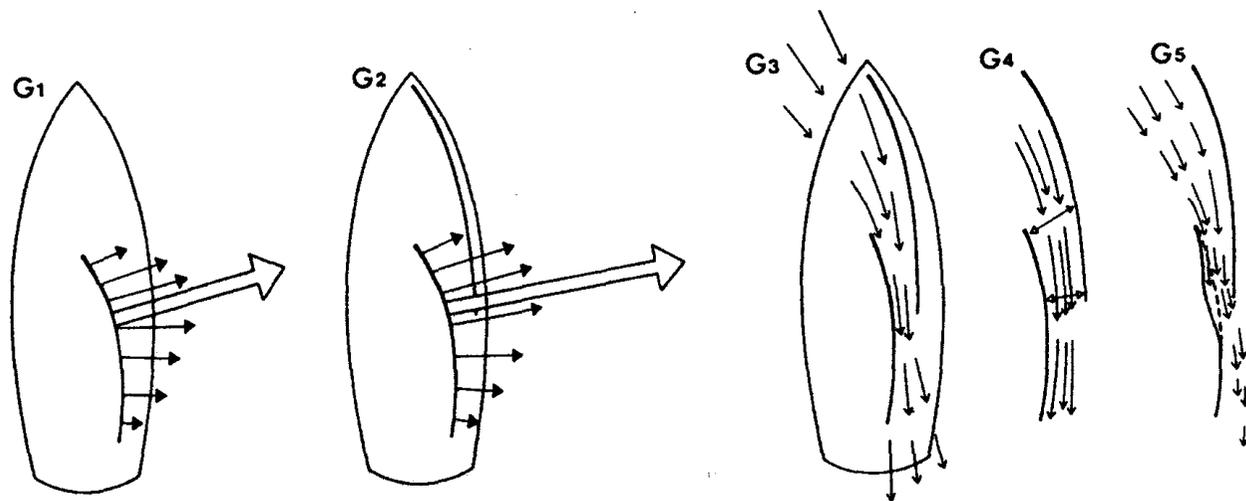
F2

infléchir l'écoulement d'air (1). En bordant trop les voiles au large (2) on les conduit à « décrocher », ce qui crée des turbulences sous le vent, avec déperdition de l'énergie du vent et par conséquent perte de vitesse. Au vent arrière, la vitesse assez réduite est due non



F3

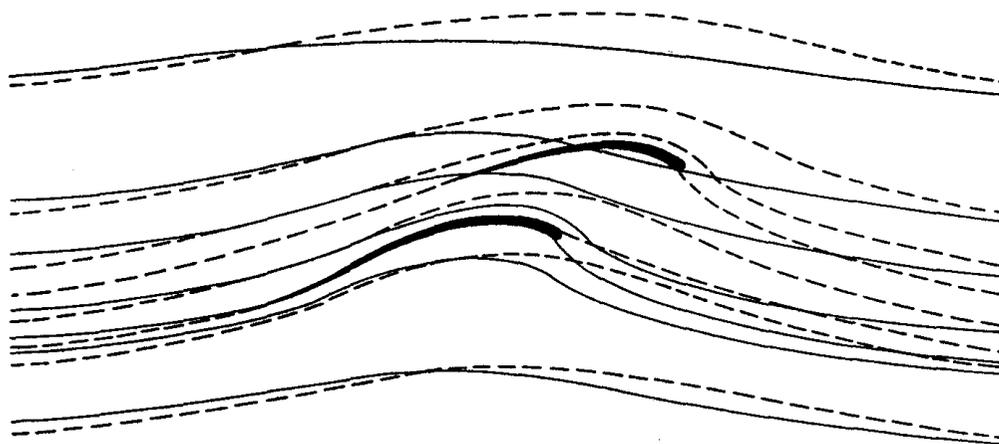
seulement à la faible vitesse du vent apparent mais aussi à la perte de la plus grande partie de l'énergie du vent du fait des turbulences qui se produisent en avant des voiles (3).



**G** La force développée par le vent sur la grand-voile (1) peut être augmentée en hissant une voile d'avant (2), mais seulement si l'interaction entre grand-voile et voile d'avant est correcte. Si la fente est de bonne dimension (3), cela fait naître un effet de réaction et une succion importante sur le côté convexe de la grand-voile. Si la fente est trop large (4) le vent ne sera pas accéléré, n'étant pas « pincé » entre les voilures. Si la fente est trop étroite (5), le foc déventrera la grand-voile.

a ———  
b - - - -

H



**H** Grand-voile et foc combinés donnent à l'écoulement d'air une courbure plus accentuée que la grand-voile seule. (a) Écoulement d'air sur la grand-voile seule. (b) Écoulement d'air sur grand-voile et foc.

# CARACTERISTIQUES D'UNE VOILE

■ Schématiquement la forme d'une voile peut se définir par trois caractéristiques : le creux, la chute, la finesse.

Définissant un plan déformable (évoluant dans un flux compressible) ces trois caractéristiques évoluent en fonction de l'incidence du flux par rapport au plan de voilure et de la force du vent. Plus l'incidence est aiguë (allures de finesse), plus les moyens de réglage (drisse, hâle-bas, barre d'écoute, ceils d'étauage, rails, écoutes...) sont essentiels pour obtenir le meilleur profil - portance-trainée - et plus le vent force, plus le contrôle des déformations subies par le tissu sont importantes. □

## LE CREUX

■ Le creux d'une voile se mesure par le rapport entre la flèche maximum et la corde du profil (segment de droite reliant le bord d'attaque au bord de fuite) de la voile. On exprime ainsi des creux de valeurs différentes (1/8, 1/15) et d'autant plus importantes que la voile est creuse.

L'emplacement de la flèche ou du creux proprement dit, peut varier horizontalement.

Pour exprimer cette position, on utilise la règle du pourcentage : 50 % signifie que le creux est situé au milieu de la voile (considéré comme position reculée), 40 % signifie que le creux est placé vers le tiers avant de la voile (considéré comme position intermédiaire), et 35 % indique qu'il est pratiquement au tiers avant de la voile (considéré comme position avancée).

En pratique, on observe le creux d'une voile d'avant en se plaçant au vent et pratiquement au milieu de celle-ci. (Pour observer le creux d'une grand-voile et plus généralement d'une voile bomée, il suffit de se placer au vent et sous la bôme, le regard dirigé vers le point de drisse).

Si le vent force, l'allongement du tissu accroît la valeur du creux tout en le déplaçant vers l'arrière.

A l'inverse, si le vent chute, la tension du tissu diminue la valeur du creux tout en le replaçant vers l'avant.

La répartition verticale du creux d'une voile (angles successifs de la corde des différents profils de la bôme à la tête) est relativement importante dans la mesure où elle permet de donner une bonne qualité d'écoulement au vent apparent à différentes hauteurs, de contrôler plus ou moins le vrillage, et de limiter la trainée induite par un même angle d'incidence.

En pratique, on peut ainsi donner un surcroît de puissance (augmentation du creux) dans la partie haute d'une voile qui ne travaille pas en relation avec une voile d'avant, comme c'est le cas pour le gréement bermudien ou dans les gréements 7/8°.

Au niveau de la forme (la chute de la voile), l'expérience prouve que la trainée induite est minimum lorsque celle-ci se rapproche de la forme elliptique. Dans la pratique, cela se traduit par la forme presque elliptique de la chute d'une voile lattée, (le profil d'une dérive ou d'un safran).

Au niveau d'une surface (le plan de la voile), l'expérience prouve que la trainée induite est minimum lorsque celle-ci se galbe selon des courbes également assez proches d'une courbe elliptique.

En effet, lorsqu'une surface plane est angulée avec le vent, l'air contourne avec difficulté cet angle brutal que forme son bord d'attaque, et les filets d'air ont tendance à tourbillonner sur l'extrados au détriment de la force de succion qui est une des plus grandes composantes de la force vélique aux allures de finesse.

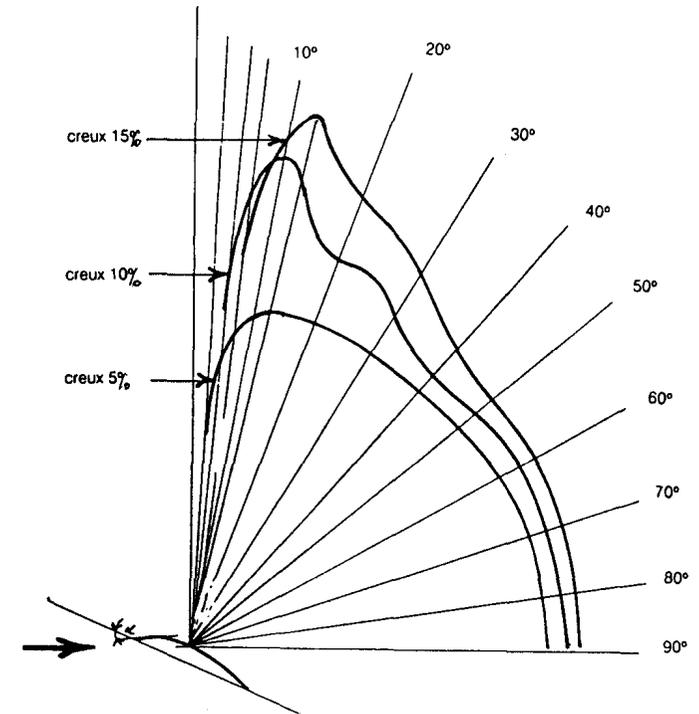
Lorsque cette surface est courbe, le bord d'attaque peut être orienté selon la direction des filets d'air (on appelle angle d'incidence l'angle formé par la corde du profil de la voile avec la direction du vent apparent) même si la corde de son arc fait un angle avec le vent.

Cette différence est d'une importance capitale car dans ces conditions le bord d'attaque de la voile sépare sans tourbillons les filets du flux.

Cette séparation du flux en deux parties, l'une en surpression sur l'intrados et l'autre une dépression sur l'extrados grâce à la présence d'un plan courbe ou du creux de la voilure, crée l'essentiel de la force vélique.

Pour mettre en évidence l'importance de la dépression de l'extrados dans la composition de la force vélique, faites l'expérience suivante : Tenez une feuille de papier entre le pouce et l'index de chaque main. Le bord d'attaque étant positionné horizontalement face à vous, la feuille pendante verticalement sous son propre poids, soufflez au ras du bord d'attaque sur la partie extérieure de la feuille. Celle-ci se soulève sous l'effet de dépression du flux plus aisément que sous l'effet de compression, c'est-à-dire plus aisément que si vous souffliez au ras du bord d'attaque, sur la partie interne de la feuille.

Fig. 52



Ainsi, la courbure, donc la valeur et la position du creux est une composante essentielle du profil d'une voile (fig. 52). Schématiquement, plus la position de ce creux est reculée, plus l'angle d'incidence est faible, (l'angle de remontée au vent sera plus fermé) et à l'inverse, plus la position du creux est avancée, plus l'angle d'incidence est grand (l'angle de remontée au vent sera plus ouvert). En valeur, plus le creux est important, plus la voile est puissante, et à l'inverse moins il est important, moins elle est puissante. □

Ce graphique montre l'importance du creux ( $\alpha$ ) que l'on donne à une voile quant à sa résultante propulsive et sa finesse.

— Si un creux de 5% permet de mieux serrer le vent qu'un creux de 15%, la résultante propulsive est inversement incomparable.

Le vrillage de la voile permet de régler les différences d'angle entre l'axe de la bôme et la corde de la voile aux profils successifs.

Ces angles diminuent proportionnellement avec la force du vent.

## LA FINESSE

■ Dans la logique de ce que nous venons de voir, la finesse d'une voile est directement liée à la position du creux, mais elle s'exprime en tenant compte du volume de la voile dans sa partie avant qui renseigne sur l'étendue du creux.

(La finesse d'une voile s'observe en se plaçant près de la bordure et au vent de celle-ci).

L'emplacement du creux et la valeur du volume de la partie avant d'un foc ou d'une grand-voile conditionnent les possibilités de remontée au près.

Si le creux est sur l'avant, l'angle entre la corde et le vent apparent sera relativement ouvert, l'attaque est large, le bateau ne peut serrer le vent au plus près.

A l'inverse, si le creux est sur l'arrière, l'angle entre la corde et le vent apparent sera plus fermé, l'attaque est fine, et le bateau peut serrer le vent au plus près.

D'autre part, avec un volume important la puissance est grande, mais la composante latérale qui fait gîter le bateau est importante.

A l'inverse, avec un faible volume, la puissance est moindre mais la composante latérale qui fait gîter le bateau est également moins importante.

Ainsi la finesse d'une voile a pour influence principale de jouer directement sur la puissance et les incidences du bord d'attaque et du bord de fuite (fig.53).

Mais il y a des limites : une voile trop plate sur l'avant qui a une attaque trop fine, décroche facilement et présente un bord de fuite qui referme provoquant une traînée plus forte et des turbulences sur l'extrados de la chute.

Une voile, trop creuse sur l'avant, qui a une attaque trop grande, décroche également facilement en raison de l'inertie des molécules d'air qui n'arrivent plus à prendre l'important virage qu'on leur impose et se décolent de la voile pour reprendre la direction du flux général. Avec l'importance du triangle avant dans les gréements modernes, on donne plus de finesse sur la grand-voile (recul et réduction du creux) car celle-ci recevant des filets d'air déjà défléchis devra être plus bordé que le foc, et on augmente la puissance propulsive de ce dernier par l'augmentation du creux, qui reste reculé pour avoir un angle d'incidence réduit.

## LA CHUTE

■ La chute d'une voile engendre théoriquement le minimum de traînée induite lorsqu'elle se rapproche de la forme en plan d'une ellipse (voile lattée).

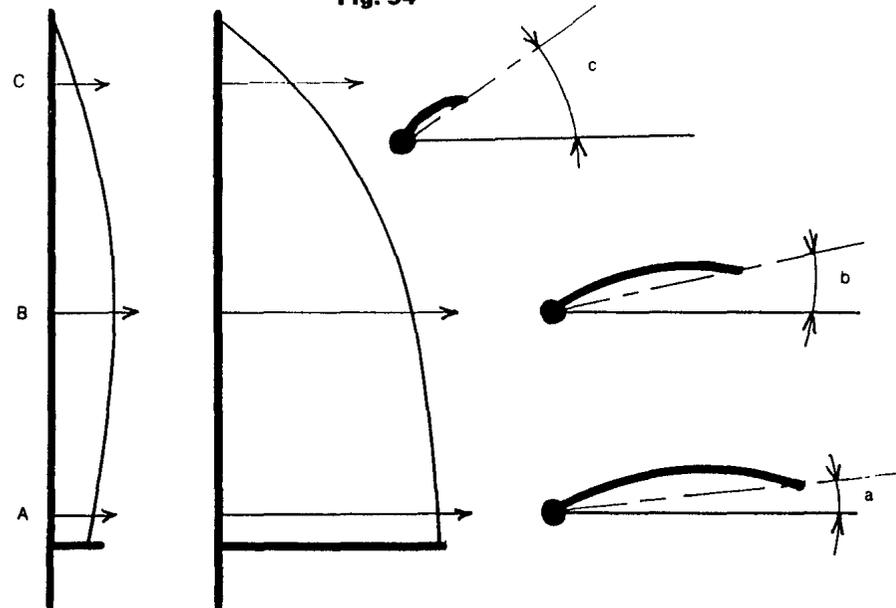
En pratique, avec l'interaction des voiles dans leurs parties hautes, l'écoulement de l'air s'effectuant entre l'extrados et l'intrados de l'une et de l'autre voile, doit se faire le plus régulièrement possible (on peut d'ailleurs considérer l'ensemble comme formant un seul profil très épais) la forme des voiles modernes tend vers des chutes sensiblement plus droites. D'autre part, et dans la plupart des cas, on recherche une chute dont la forme dans l'espace se rapproche de celle d'une hélice. (Ce vrillage de la voile, toujours plus importante dans la partie haute de la voile (l'angle du vent apparent varie avec l'altitude), s'observe en se plaçant face au point d'écoute ou en bout de bôme) (fig. 54).

La régularité et le "parallélisme" des chutes entre le foc et la grand-voile est déterminante (surtout lorsque le recouvrement est important) si l'on veut avoir un très bon écoulement de l'air entre les deux voiles.

La forme de la chute d'une voile, constituant le côté d'un triangle, dépend également de la dimension des deux autres côtés, la bordure et le guindant, et donc de ce qu'on appelle l'allongement de la voile. On a coutume de considérer l'allongement comme le rapport entre la hauteur et la largeur de la voile (H/L), mais il serait plus juste, en raison de la courbure de la chute, et comme cela d'ailleurs est utilisé en aviation, de considérer le rapport entre la hauteur au carré et la surface de voilure ( $L^2/S$ ).

Quoi qu'il en soit, cette notion d'allongement trouve toute son importance aux allures de finesse parce qu'elle diminue très sensiblement les tourbillons et les turbulences en haut et en bas de la voile.

Fig. 54



Ces tourbillons et ces turbulences, appelés "traînée induite" représenteraient à eux seuls près de 9/10° de la traînée totale d'une voile.

L'existence de cette traînée étant due à d'irrépressibles tourbillons cherchant à rééquilibrer les différences de pressions entre l'intrados et l'extrados aux extrémités inférieures et supérieures de la voile, (ainsi il y a une circulation verticale montant dans l'intrados et redescendant sur l'extrados), il importe de réduire ces zones de turbulences en diminuant leurs profils (fig.55).

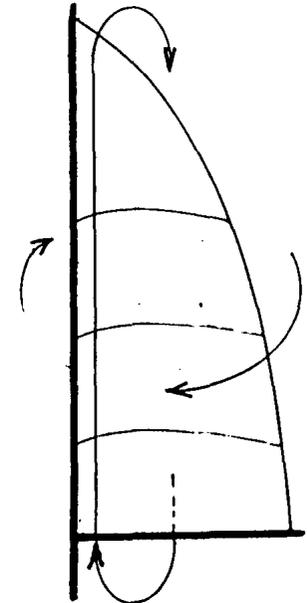
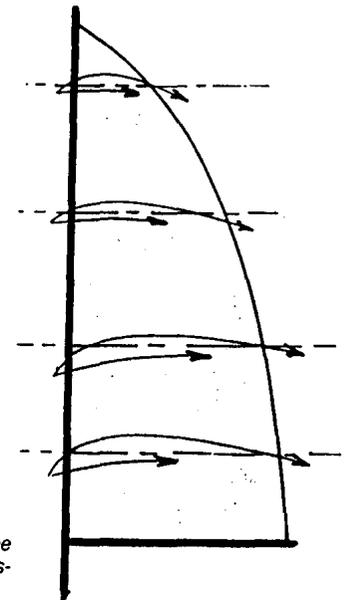
*Aux allures du près, la voile est prise entre une circulation de surpressions au vent et de dépressions sous le vent.*

*— La forme et le réglage des voiles jouent sur le déplacement des hautes pressions vers les basses pressions.*

*De même que sur une aile d'avion, il existe une circulation horizontale (extrados-intrados) et pour une circulation verticale montant dans l'intrados pour redescendre sur l'extrados.*

*— Une bôme ramenée près du pont supprime le retour perturbé de cette circulation.*

Fig. 55



Plus l'allongement est important, plus les profils placés vers les extrémités sont étroits, et moins les tourbillons de rééquilibrage de pression sont importants.

Ainsi, l'importance de la force vélique au près étant liée à l'écart de pression entre les deux faces de la voile, et les tourbillons de rééquilibrage étant liés à la valeur de cet écart, la traînée induite diminue avec l'allongement et atteste la supériorité des voiles élancées aux allures de finesse.

Cette supériorité des voiles élancées est très restrictive, elle dépend des caractéristiques du bateau et surtout des angles d'incidences considérés (les allures).

Si schématiquement on fait varier l'angle d'incidence, on remarque en effet qu'entre 5 et 20°, c'est la voile marconi à grand élancement (H/L = 6/1 ou 5/1 qui est également le rapport d'allongement d'une aile d'albatros) qui apporte le plus de puissance vélique.

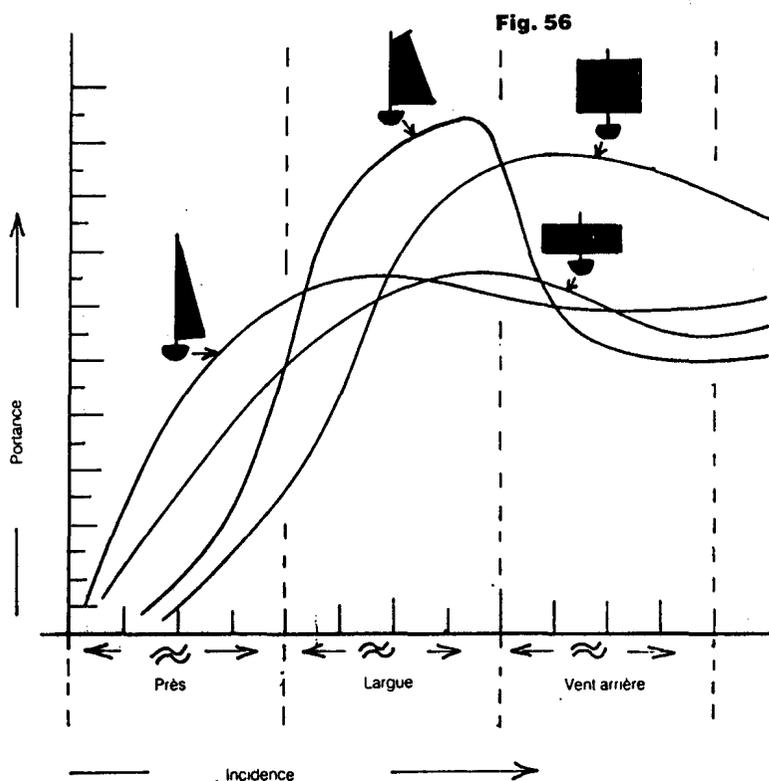
A partir de 20 à 25° d'incidence (avec le vent réel, il s'agit du vent de travers et donc d'un angle de plus ou moins 90°) c'est la voile à faible allongement (3/1) qui apporte le plus de puissance vélique.

Au grand largue, vers 38° (plus ou moins 130° d'incidence vent réel) la plus grande force vélique est donnée par une voile de rapport 1/1, une voile carrée !

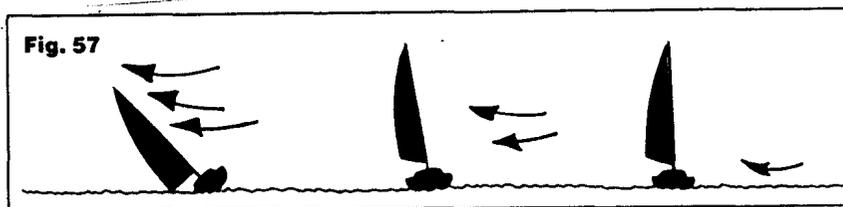
Et enfin, de 45 à 50° (plus ou moins 170° d'incidence vent réel) c'est une voile d'allongement horizontal 1/3 qui "ramasse" le meilleur rendement (fig. 56).

Il est évident que pour la grande croisière, comme pour les plans de bateaux, les plans de voilure permettront d'accentuer certaines caractéristiques, mais devront s'accommoder de compromis pour satisfaire au mieux tous les cas de figures.

Rappelons quelques notions fondamentales du jeu du vent dans les voiles. □



Ce graphique montre la portance (polaire) de voiles différentes en fonction de l'incidence.  
 — On remarque que c'est la voile à grand allongement qui est la plus performante au près.  
 — Par contre, c'est la voile au tiers qui est la plus performante au large, et la voile d'allongement 1 (la voile carrée) qui est la plus efficace au vent arrière.



Légende 57 :

La force du vent (nulle au niveau de la mer) augmente avec l'altitude. Le vent apparent adonne avec la hauteur.

## LE VENT APPARENT

■ Le vent apparent est la résultante entre le vent réel (le vent atmosphérique) et le vent relatif (le vent créé par le déplacement du bateau).

C'est le vent apparent qui intervient dans l'angle d'incidence et qui actionne la voile : il est plus fort que le vent réel lorsque le bateau remonte du largue au près, et moins fort que le vent réel lorsque le bateau abat du largue au vent arrière.

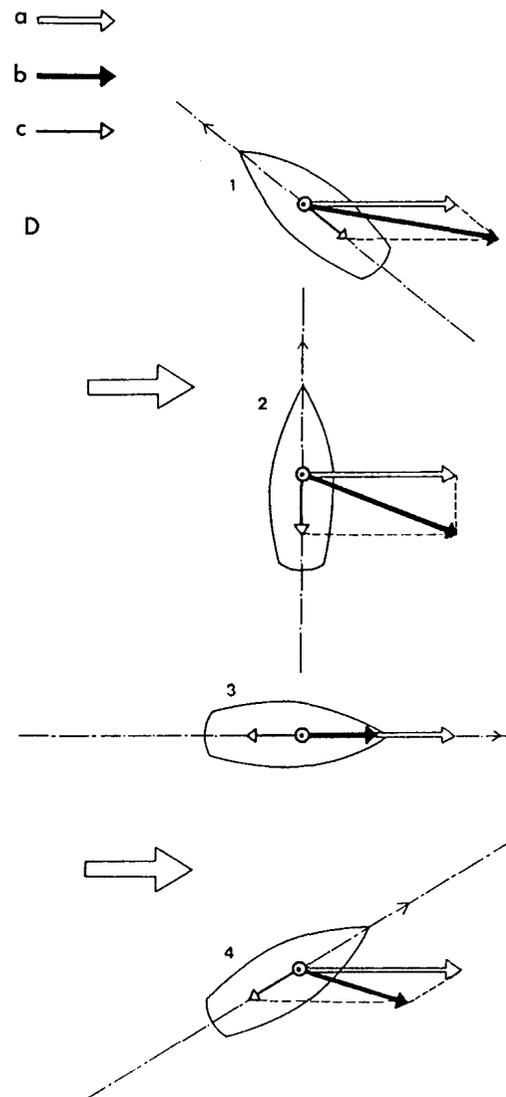
D'autre part, alors que le vent relatif est le même sur toute la hauteur de la voile, le vent réel varie avec l'altitude. En effet, freiné à l'approche de la surface de l'eau, le vent réel force et abandonne au fur et à mesure qu'il s'élève dans la voilure.

Partant d'une vitesse zéro à la surface de la mer, plus le vent établi est fort, et plus l'augmentation de vitesse doit être rapide en s'élevant (fig. 57)

Ceci veut dire que les profils du haut de la voile ne reçoivent pas le même vent que ceux du bas.

Pour que ceux-ci reçoivent le vent avec le même angle d'incidence, il faudra qu'avec un vent adonnant en hauteur la voile s'ouvre progressivement vers le haut.

Cette évolution du vent apparent matérialise la croissance progressive de l'angle de calage qu'est le "village" d'une voile. □



D Vent réel et vent apparent à différentes allures : (1) petit largue, (2) vent de travers, (3) vent arrière, (4) grand largue. Vent réel = a ; vent apparent = b ; vitesse du vent = c.  $c = \sqrt{a^2 + b^2}$

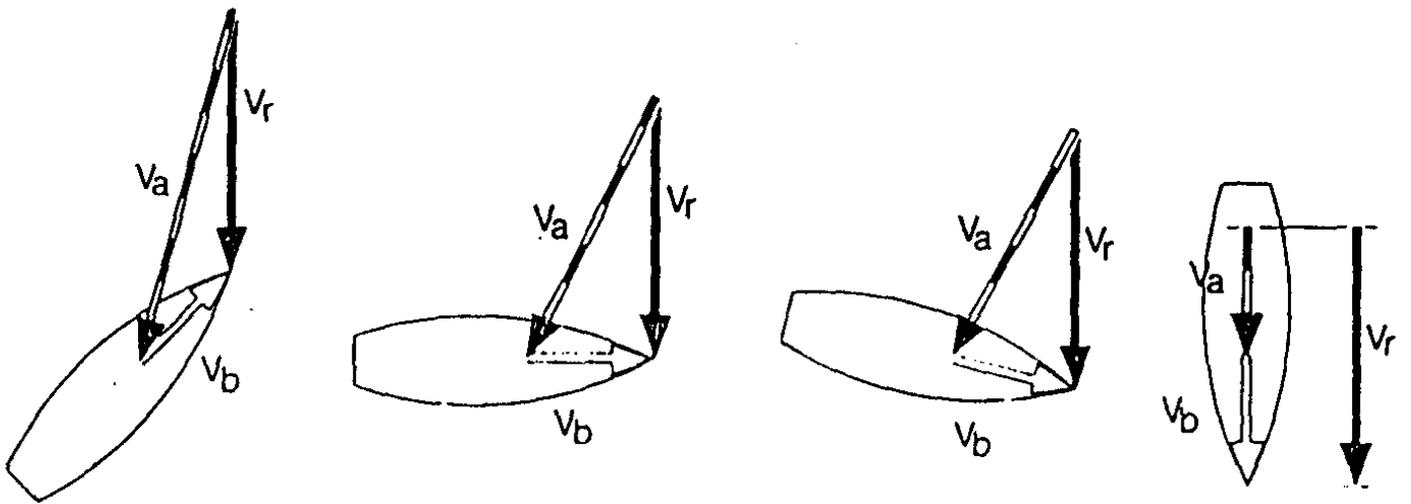


Fig. 1-5 — Pour des vitesses constantes du bateau et du vent réel, la vitesse et la direction du vent apparent changent de façon continue selon l'allure. Plus fort que le vent réel au près, il devient plus faible passé le vent de travers, mais il vient toujours de l'avant.

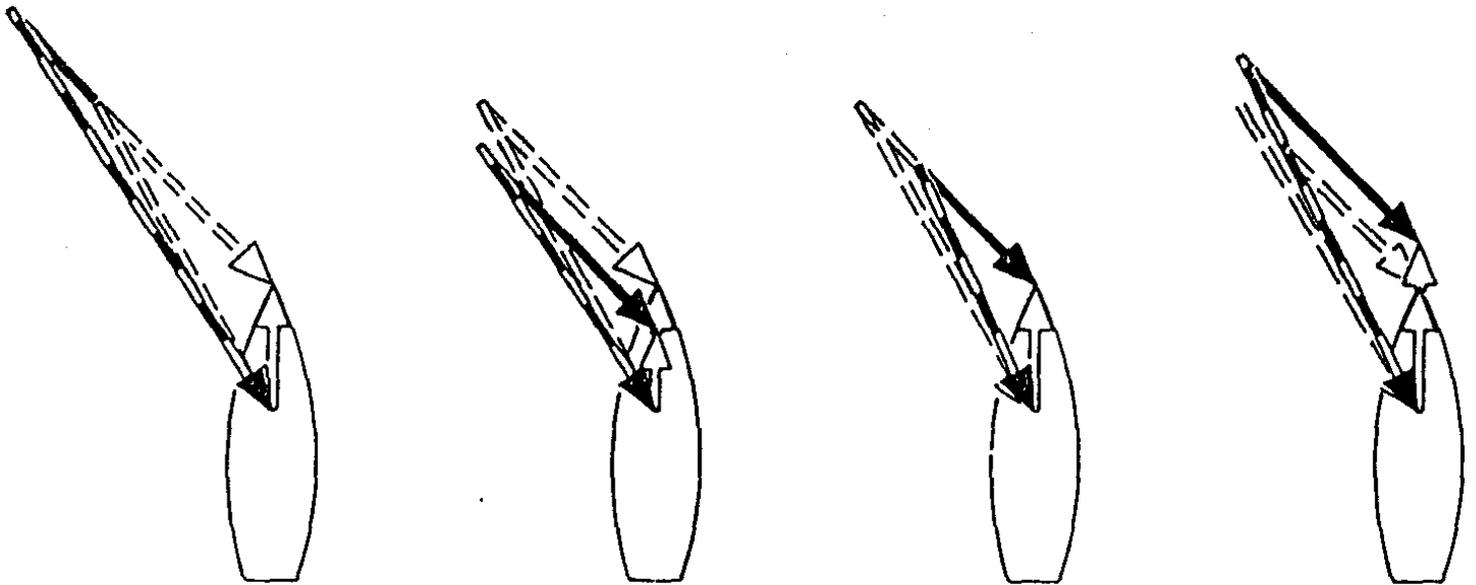


Fig. 1-6 — Une variation de la vitesse du bateau ou du vent réel provoque toujours une modification du vent apparent en vitesse et en direction. Voici quatre exemples :

- a) Le vent réel force, le vent apparent force également et adonne ; on peut selon les besoins loffer ou conserver le cap et laisser le bateau accélérer ;
- b) le bateau est freiné par une vague, le vent apparent diminue mais adonne. C'est pourquoi il faut loffer en montant à la lame ;
- c) Le vent réel faiblit, le vent apparent diminue également et de plus refuse ; si l'on est déjà à l'angle d'incidence limite des voiles, une seule solution : laisser porter ;
- d) Le bateau accélère (sur le dos d'une vague par exemple), le vent apparent force mais refuse. Il faut border les voiles, mais si celles-ci sont déjà à l'angle d'incidence limite il faut laisser porter.

## PRENDRE LE VENT

■ Prendre le vent n'est pas une chose aisée.

Observez la girouette d'un bateau au mouillage et voyez comme elle joue constamment au gré des fluctuations rapides du vent tant en force qu'en direction.

Voyez sous le vent d'une côte comment le vent peut courir au-dessus de l'eau sans rider sa surface, comme un air sec ou humide, froid ou chaud, provoque de brutales disgressions, comment il s'abat, comme il vrille, puis comment il peut être dévié et freiné au large au contact d'une mer agitée...

La voile étant en ralingue, la quille ou la dérive n'accrochant pas, le bateau dérive lentement.

En embraquant de l'écoute, la bôme vient lentement dans le lit du vent.

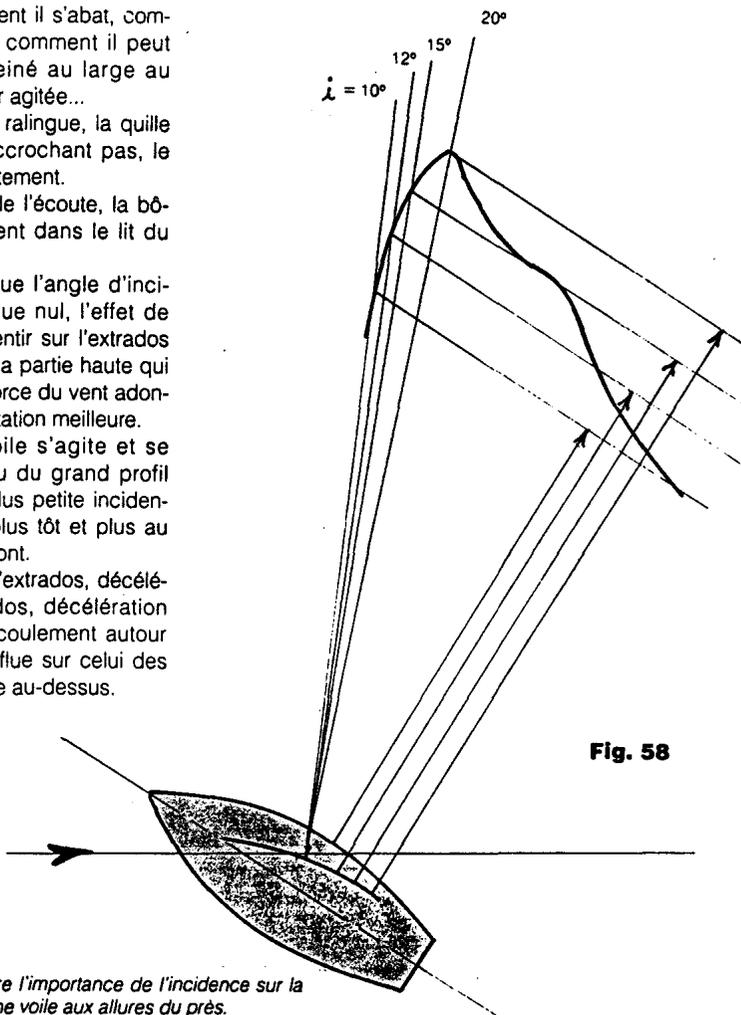
Soudain, alors que l'angle d'incidence est presque nul, l'effet de succion se fait sentir sur l'extrados de la voile dans sa partie haute qui bénéficie par la force du vent adonante d'une orientation meilleure.

Peu à peu la voile s'agite et se creuse au niveau du grand profil qui présente la plus petite incidence et qui dévie plus tôt et plus au vent le flux en amont.

Accélération sur l'extrados, décélération sur l'intrados, décélération sur l'intrados, l'écoulement autour du grand profil influe sur celui des profils placés juste au-dessus.

Le bord d'attaque venant s'aligner dans le sens des filets d'air la voile se profile toute entière, la poussée vélique est optimum, le bateau dérape à peine, accroche son plan de dérive, gîte, puis s'élançe vers l'avant...

On peut juger du creux, de la finesse et du calage d'une voile en observant la manière dont elle prend le vent et fait partir le bateau : plus la voile se creuse, plus vous devez border pour que le bord d'attaque se glisse dans le vent (fig. 58). □



Ce graphique montre l'importance de l'incidence sur la force propulsive d'une voile aux allures du près.  
— Entre 10° et 20° d'incidence, la force propulsive augmente considérablement.

## AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ALLONGEMENT

■ Près des extrémités supérieures et inférieures de la voile, les tourbillons perturbent les vitesses d'écoulement et tendent vers un rééquilibrage des différences de pressions entre l'extrados et l'intrados.

La puissance vélique tire directement sa force de cette différence de pression, (le rééquilibrage des pressions annule presque totalement l'efficacité des profils voisins et ainsi de suite.

Or, le champ d'efficacité d'une voile étant généralement améliorée vers le haut, on aura tout intérêt à diminuer le profil de ces zones néfastes situées aux extrémités supérieures et inférieures de la voile.

A rayon de courbure égal, plus les profils de tête et de bordure sont importants, (une voile aurique par exemple) et plus les tourbillons de rééquilibrage de pressions sont importants et dommageables pour les profils voisins aux faibles angles d'incidence.

A l'inverse, plus les profils de tête et de bordure sont étroits, (une voile à grand allongement), et moins les tourbillons sont dommageables (fig.59)

Ici s'explique l'intérêt que l'on observe en course à ramener la bordure le plus près possible du pont.

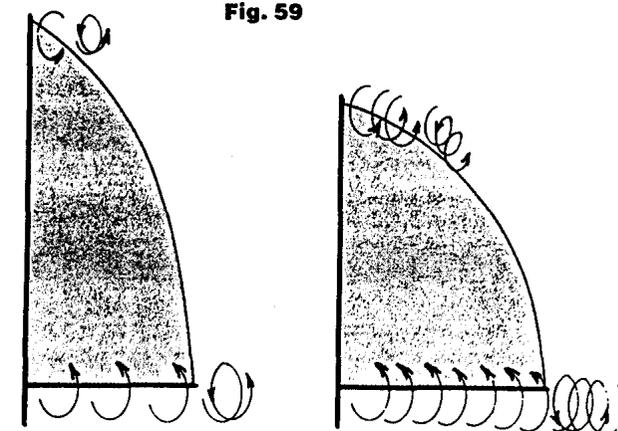
Cette position surbaissée supprime en effet une grande partie des tourbillons et augmente sensiblement l'efficacité du bas de la voile et par répercussion le champ d'efficacité vers le haut des profils voisins.

Mais les inconvénients de l'allongement sont en premier lieu la remontée au centre vélique, l'augmentation du bras de levier entre celui-ci et la coque, et donc l'augmentation de la gîte avec une remontée sensible du centre de gravité de gréement du mât et du haubannage.

Au niveau des performances, s'il est vrai que le grand allongement permet une meilleure finesse et un meilleur rapport portance/trainée, il s'avère bien moins tolérant dans les réglages et favorise plus tôt le décrochement.

De plus, si les différences sont spectaculaires entre une voile de rapport 1/1 à 3/1, les grains entre 3/1 et 6/1 sont relativement faibles pour n'intéresser que la course.

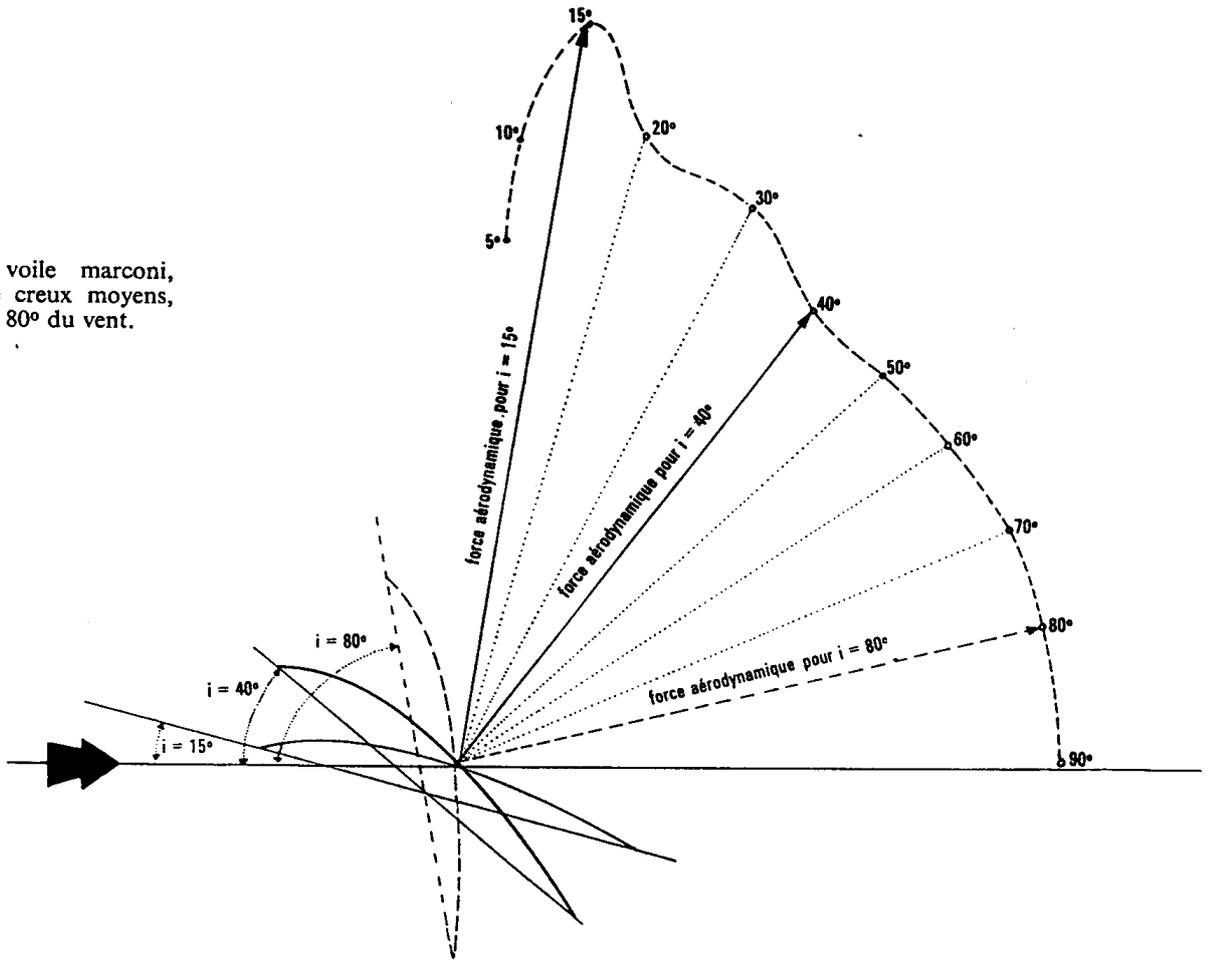
En grande croisière, l'allongement signifie augmentation du fardage et remontée du centre de gravité qui influent sur les moments du tangage et du roulis, et induisent finalement un contrôle plus pointu, plus délicat et plus fatigant du bateau. □



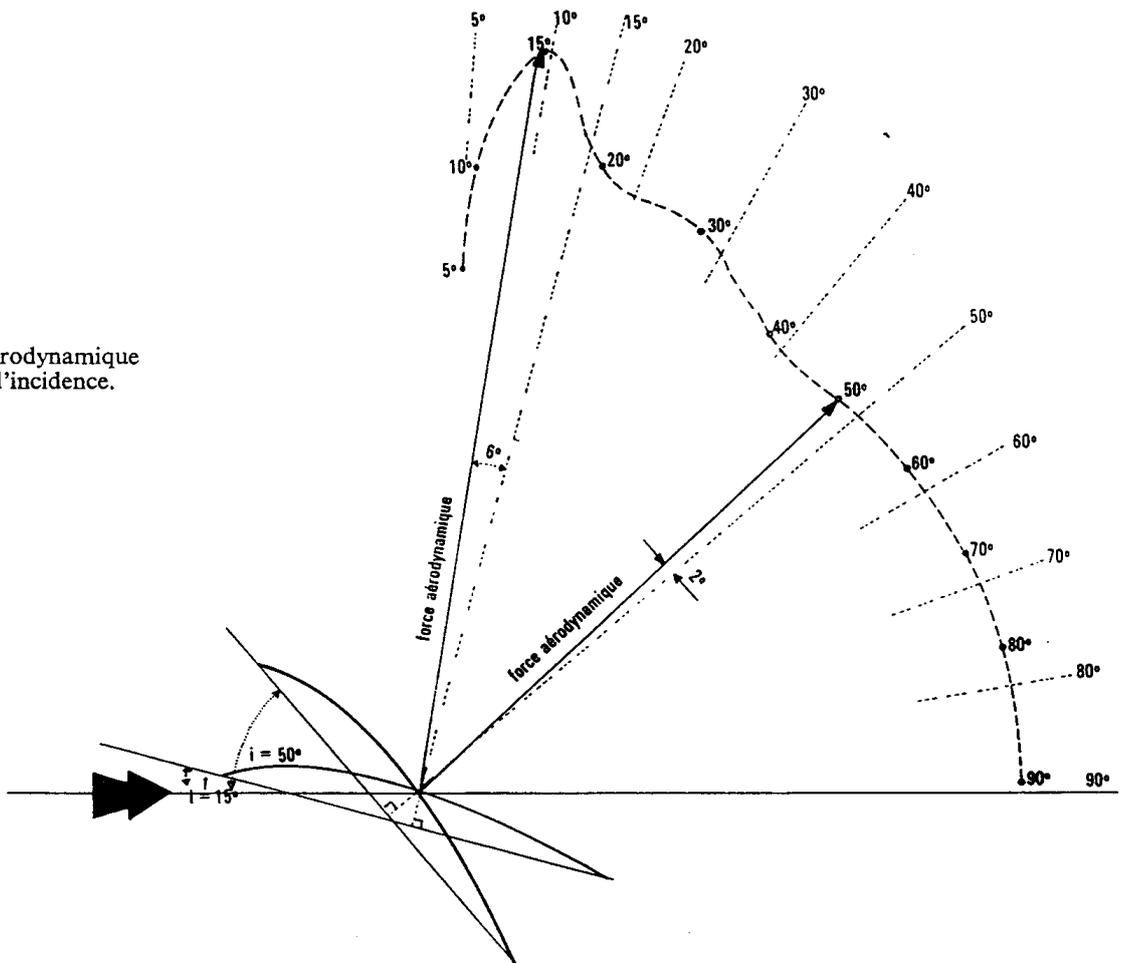
Aux allures de finesse, l'effet aérodynamique est lié à l'importance des profils. Plus les profils sont importants aux extrémités, plus l'air est aspiré, plus l'air est aspiré vers l'extrados en écoulements marginaux. A surface égale mais d'allongements différents, les profils étroits entraînent des rééquilibrages de pression qui s'étendent moins loin derrière la tête et la bordure de la voile, et ce sur des profils plus étroits.

Les résistances nuisibles de trainée induite diminuent donc avec l'allongement, d'où la supériorité des voiles élancées au près.

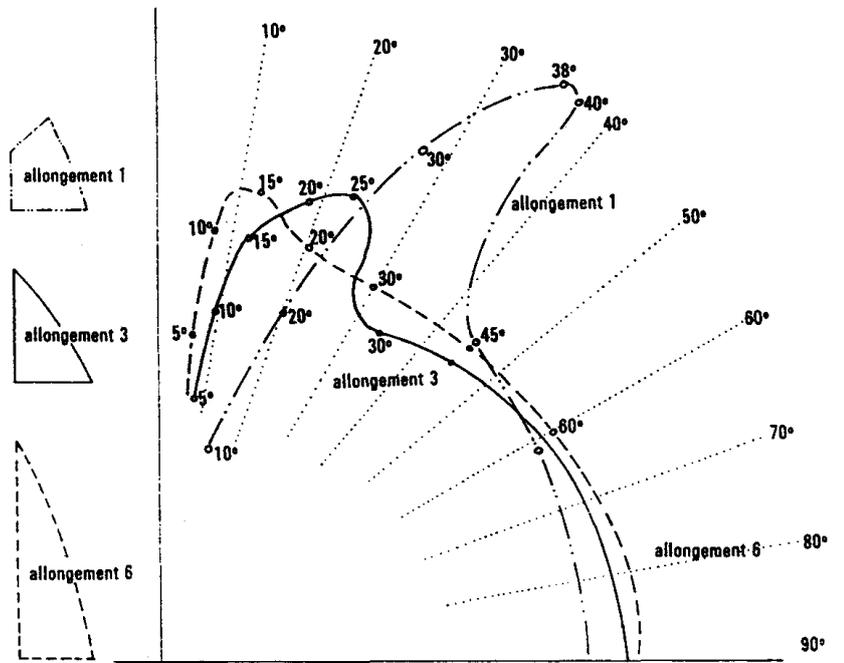
Rendement d'une voile marconi, d'allongement et de creux moyens, orientée à 15°, 40° et 80° du vent.



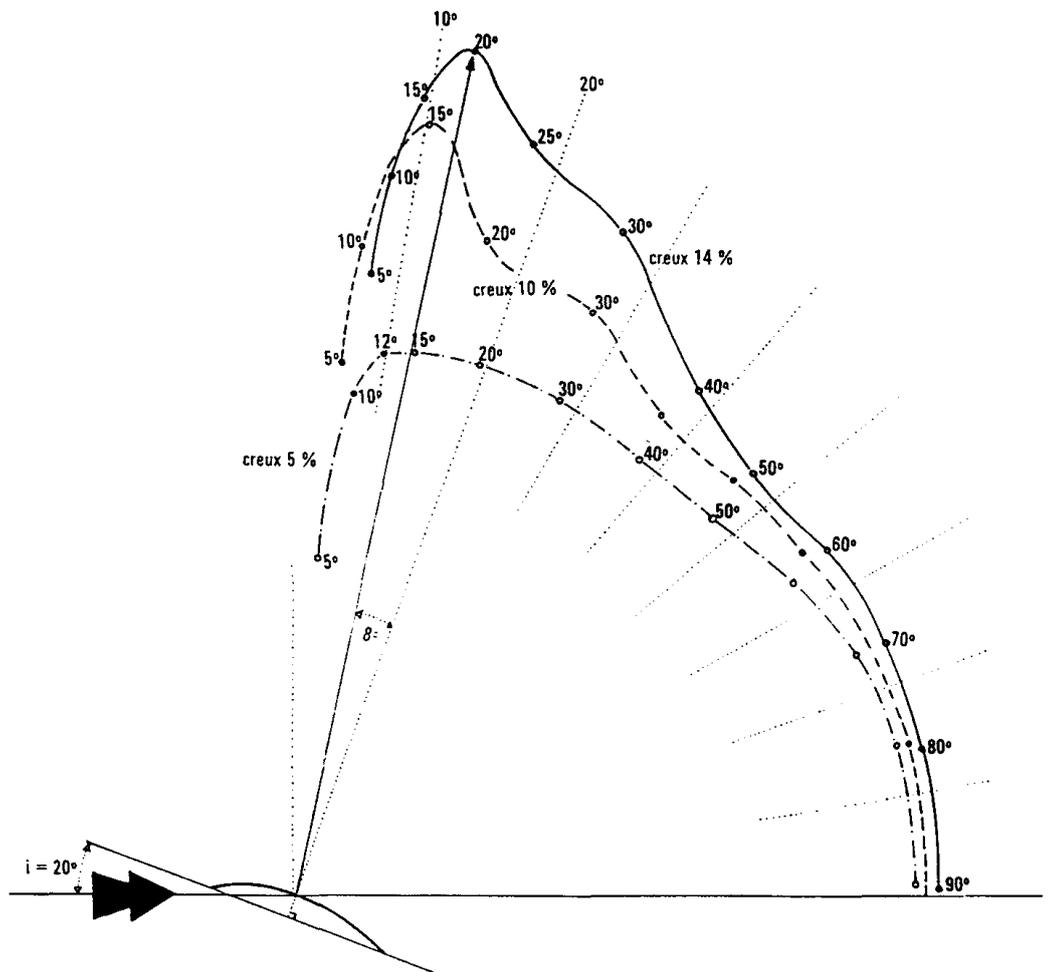
Orientation de la force aérodynamique en fonction de l'angle d'incidence.



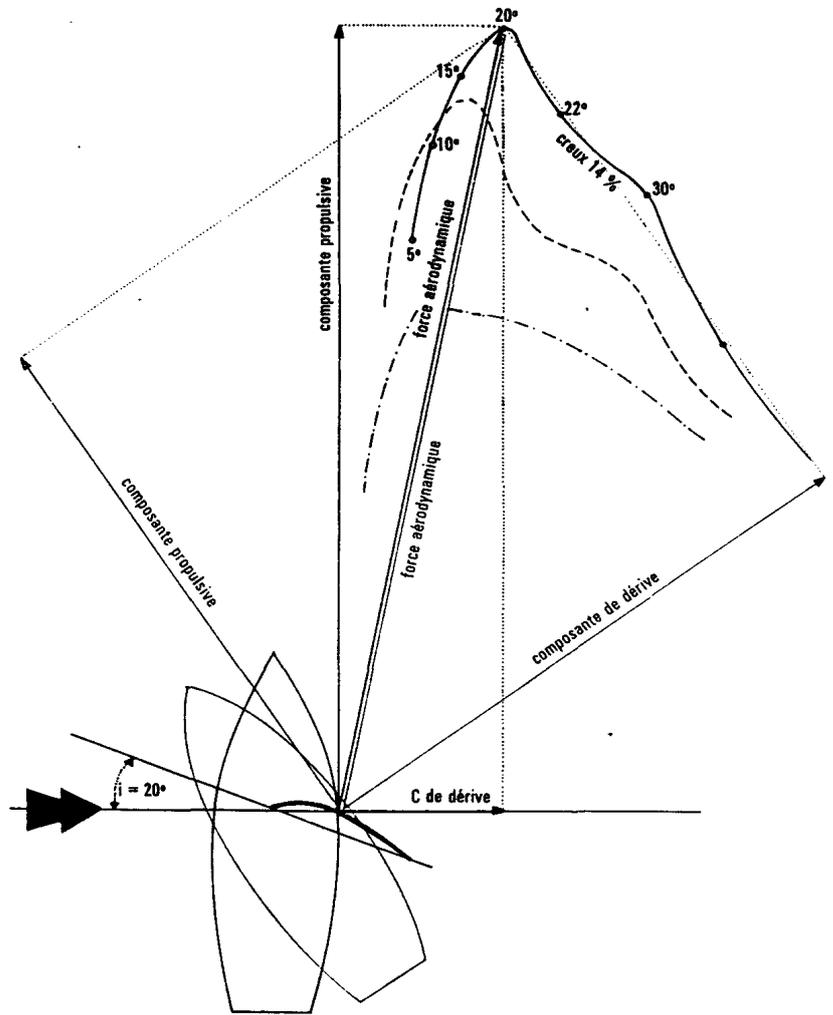
Différences de rendement de voiles d'allongement 6, 3 et 1, aux divers angles d'incidence.



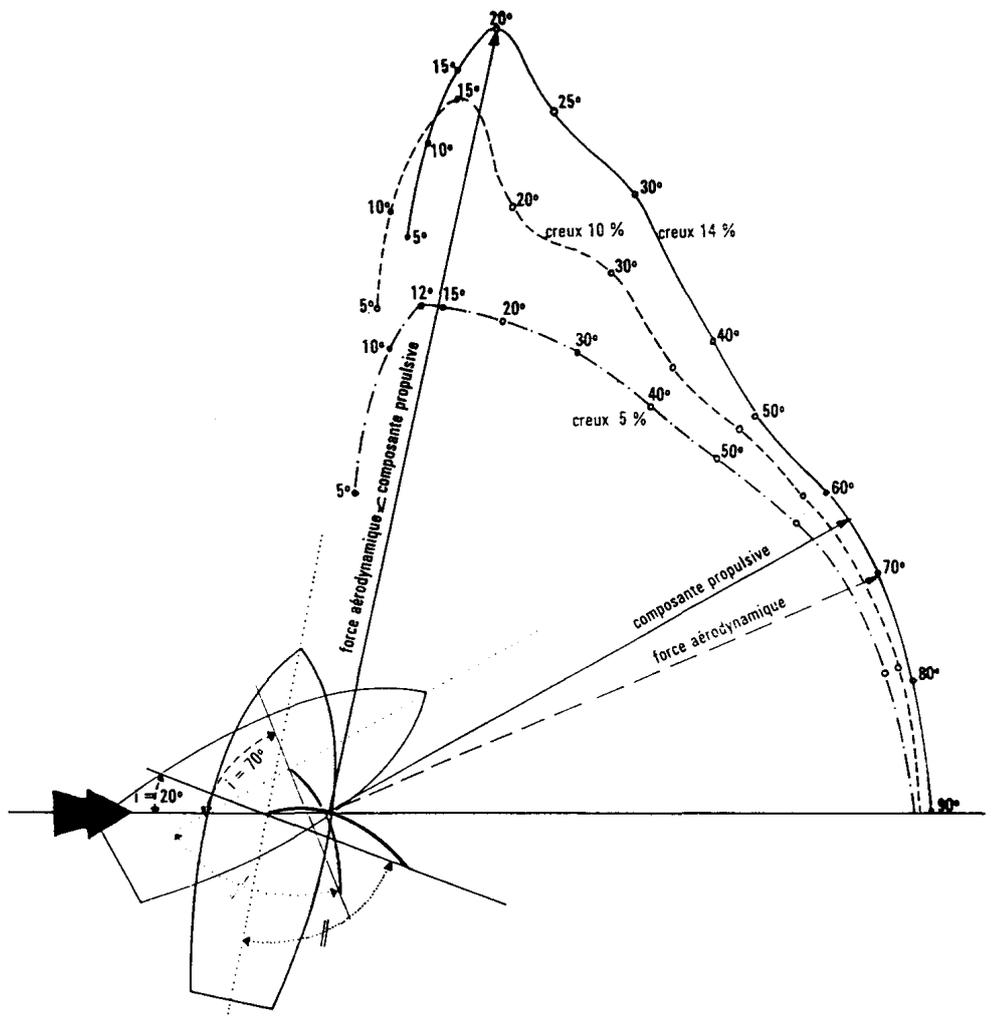
Influence du creux (réglé ici à 5%, 10% et 14%) sur la force développée par une même voile.

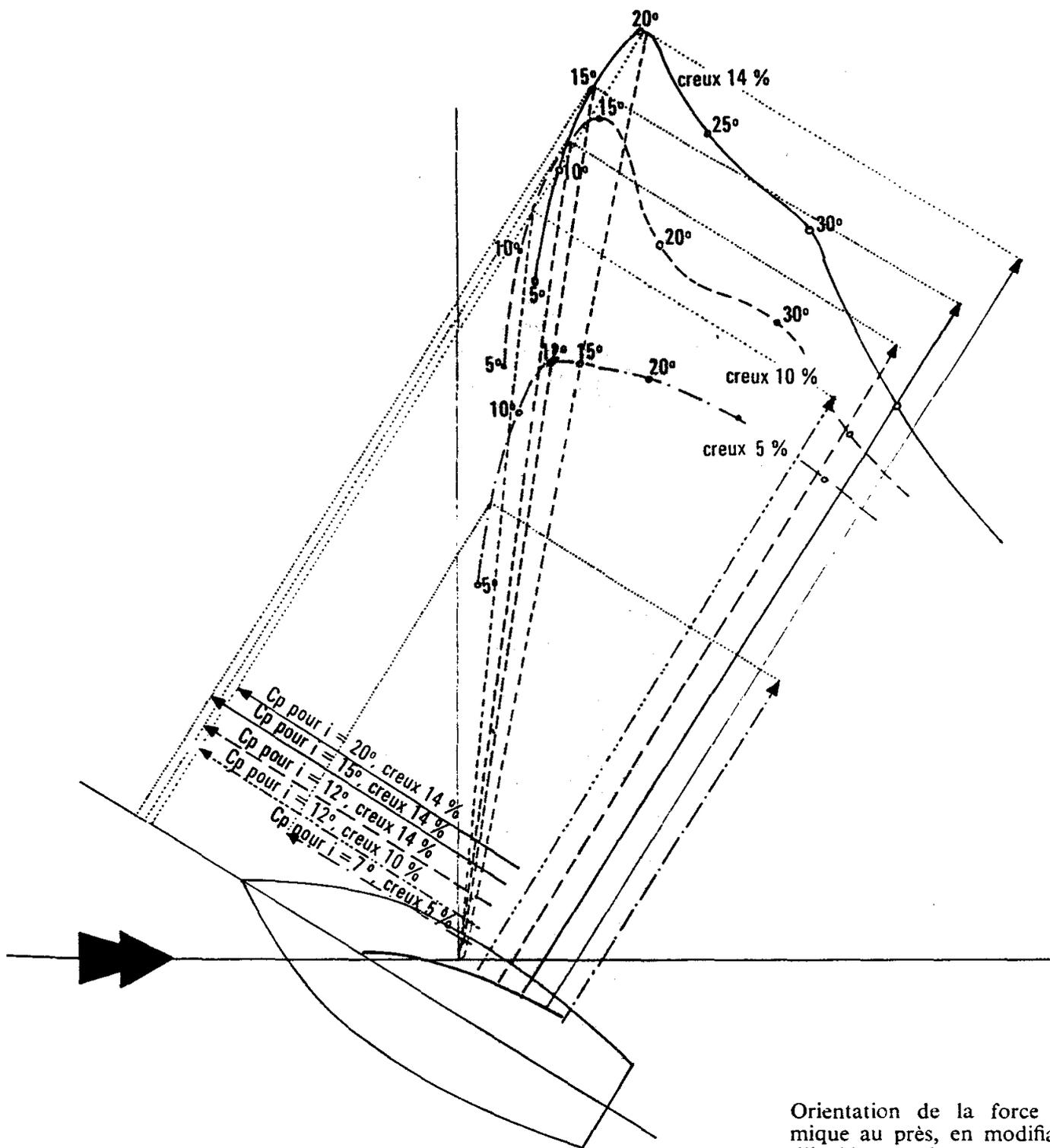


Orientation de la force aérodynamique au vent de travers et au petit large.



Grandeur et orientation de la force aérodynamique au large et au grand large.



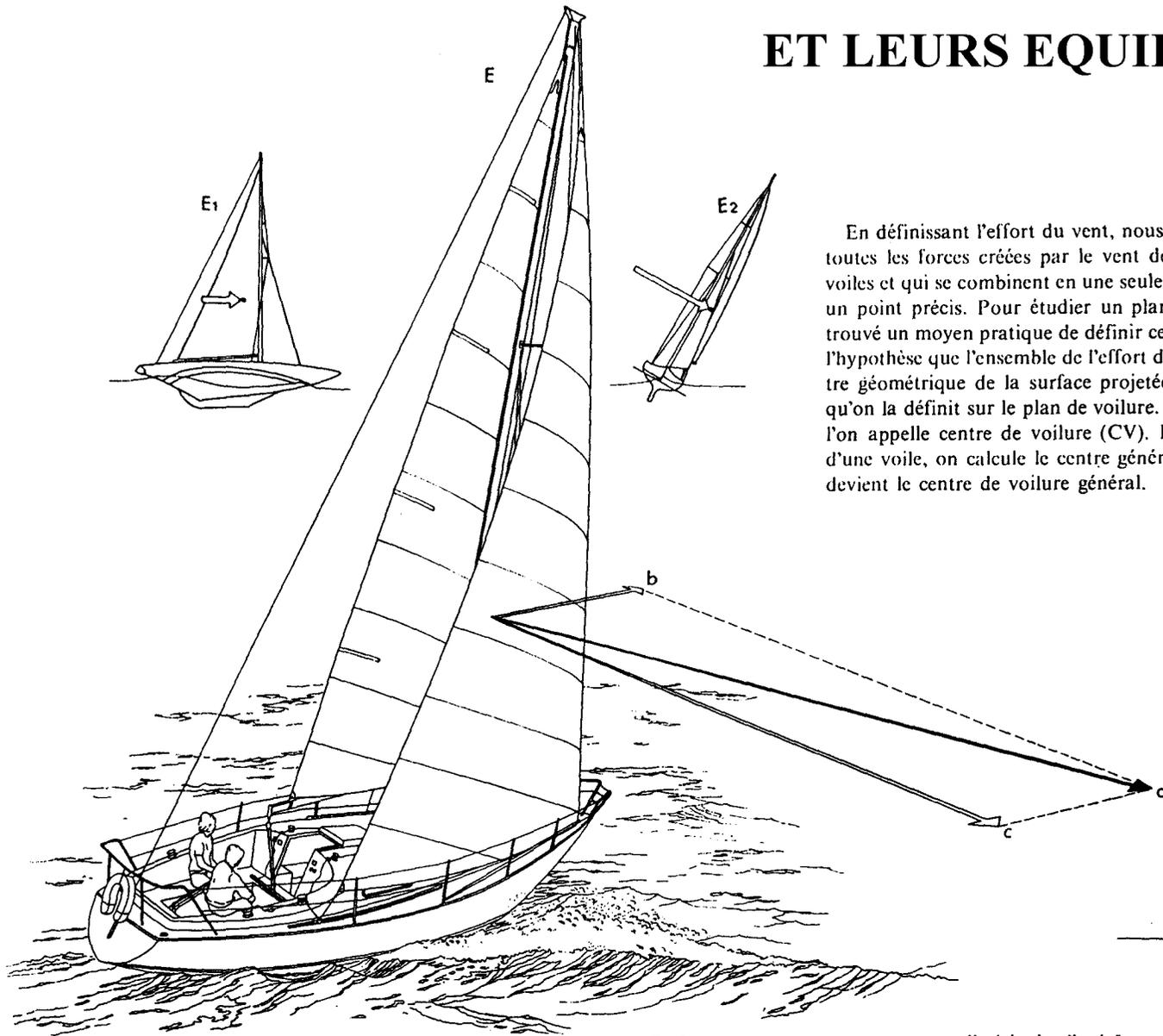


Orientation de la force aérodynamique au près, en modifiant l'angle d'incidence et le creux.

— Il ne s'agit pas de régler les voiles à l'angle de déflexion optimum, mais à un angle pour lequel, la composante propulsive restant convenable, la composante de dérive et de gîte se trouve aussi réduite que possible.

— On n'a aucun intérêt à donner à la voile un creux supérieur à 10 % : on ne ferait qu'augmenter la valeur de la composante de dérive et de gîte.

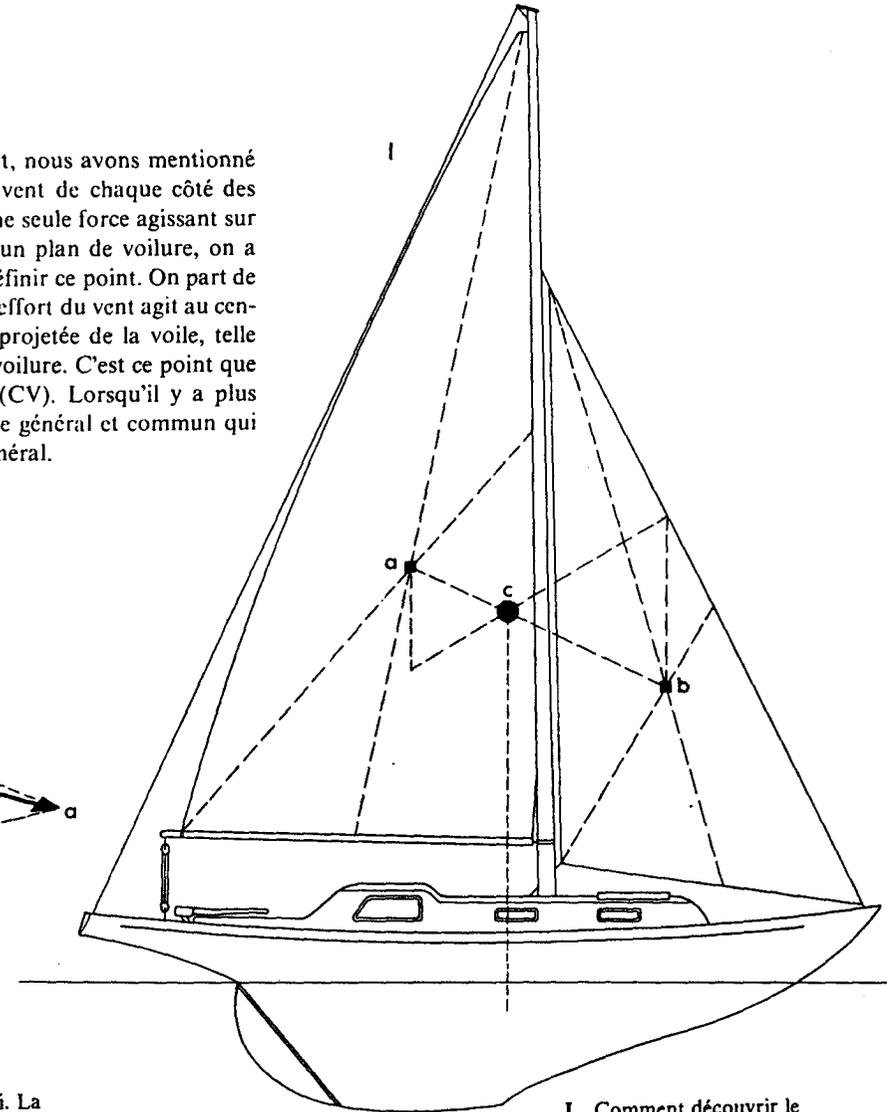
# LES FORCES EN JEU ET LEURS EQUILIBRES



En définissant l'effort du vent, nous avons mentionné toutes les forces créées par le vent de chaque côté des voiles et qui se combinent en une seule force agissant sur un point précis. Pour étudier un plan de voilure, on a trouvé un moyen pratique de définir ce point. On part de l'hypothèse que l'ensemble de l'effort du vent agit au centre géométrique de la surface projetée de la voile, telle qu'on la définit sur le plan de voilure. C'est ce point que l'on appelle centre de voilure (CV). Lorsqu'il y a plus d'une voile, on calcule le centre général et commun qui devient le centre de voilure général.

**E** Le vent apparent développe une force (*a*), qui s'exerce à peu près perpendiculairement à la voile. Cette force peut être divisée en une composante dirigée vers l'avant (*b*) dans la direction de la progression du bateau, et une composante transversale (*c*)

perpendiculaire à celle-ci. La composante dirigée vers l'avant, modérée, donne la vitesse (1), tandis que la force transversale provoque le gîte et la dérive (2).



**I** Comment découvrir le centre de voilure (CV), (*a*) CV de la grand-voile (centre géométrique de la surface), (*b*) CV du foc, (*c*) CV global.

Nous avons vu que c'est la force transversale agissant sur la voile qui pousse le bateau sous le vent. La forme de la partie immergée de la coque est telle qu'elle s'oppose dans une certaine mesure à ce mouvement, mais son action ne peut suffire. Pour réduire cette dérive latérale, on peut monter sous la coque un aileron : doté d'une très faible résistance au mouvement en avant, il s'oppose fortement au mouvement latéral.

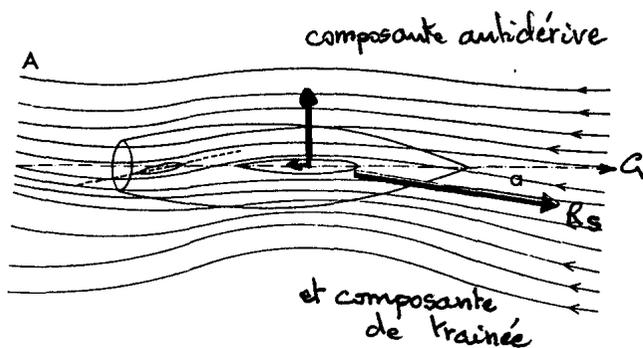
Lorsqu'en route cet aileron se trouve repoussé de côté, il se produit une situation comparable à celle que nous avons décrite pour le safran et pour les voiles, c'est-à-dire l'apparition de pressions élevées d'un côté de l'aileron et d'une dépression de l'autre côté. Il en résulte une force transversale agissant sur l'aileron et qui s'oppose à la dérive. L'angle entre le cap au compas et la route réelle s'appelle angle de dérive. Ce que l'on appelle angle de dérive, ou dérive, est donc non pas une distance ou une route, mais un angle entre deux routes.

Si les grand-voiles ont des profils assez comparables, l'étude des profils d'ailerons a fait l'objet de recherches considérables. Mais tous les ailerons ont deux caractères communs : une forte résistance au dérapage et une faible résistance au mouvement en avant. Quelle que soit leur forme, il faut cependant admettre un faible dérapage pour permettre à l'eau de frapper l'aileron sous l'angle oblique indispensable pour faire naître la résistance transversale.

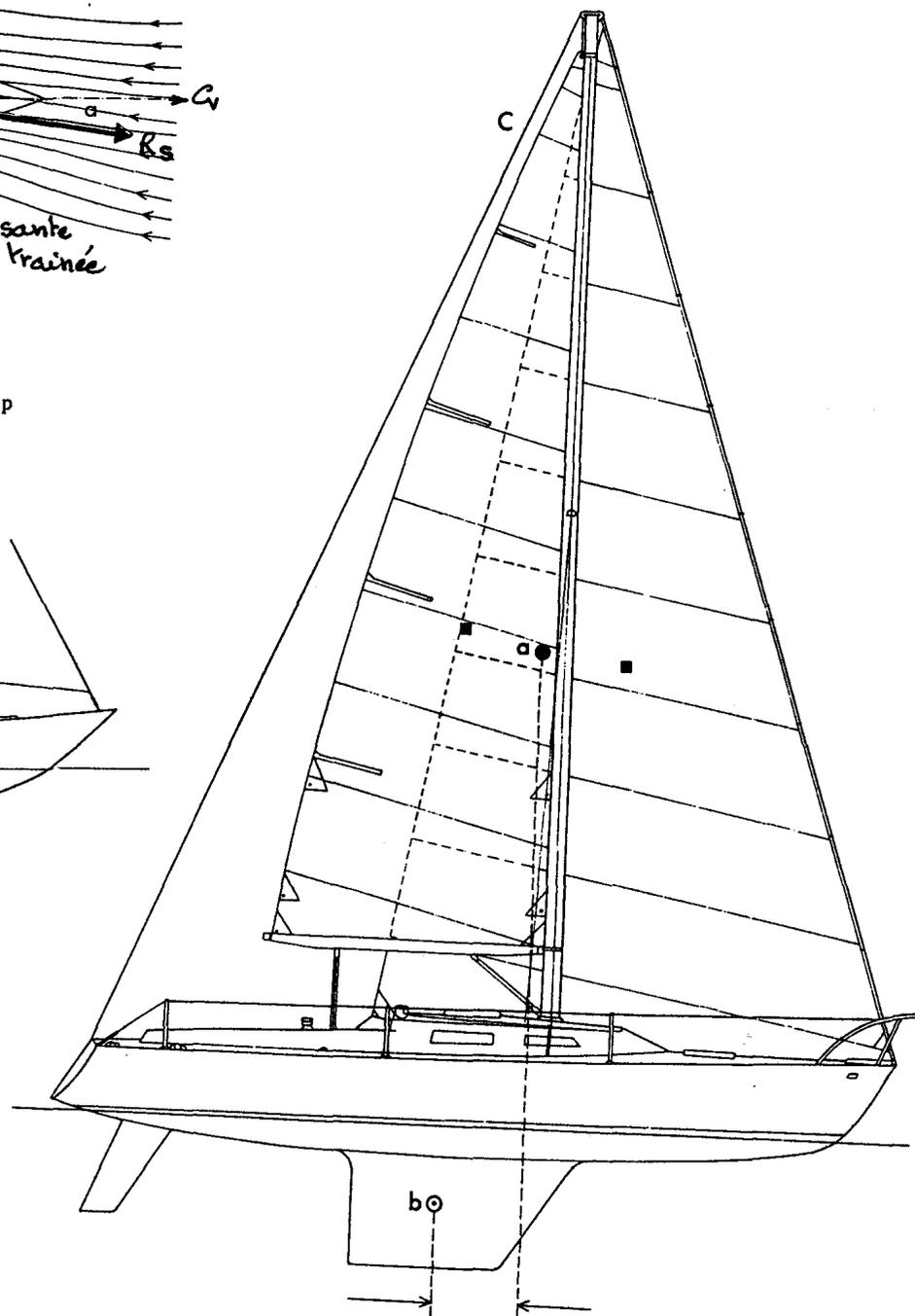
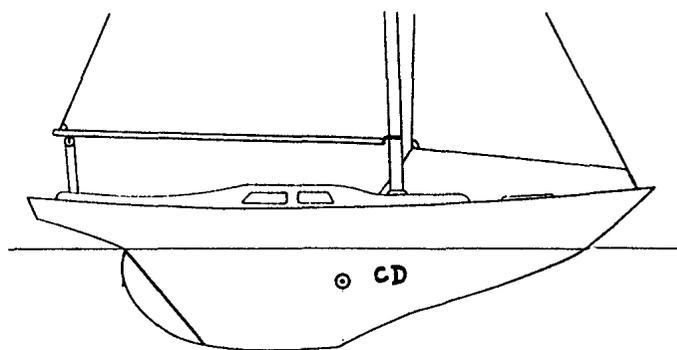
Cette force transversale est elle aussi composée d'un grand nombre de forces mineures réparties sur toute la surface de l'aileron ; ces forces peuvent être considérées comme une force unique appliquée en un seul point. Reste à savoir où se trouve son point d'application.

La forme des œuvres vives d'un bateau est plus compliquée encore que celle de la voile. Elle se compose d'une partie de la coque, de l'aileron et du gouvernail. Définir le centre réel d'application de la force transversale est extrêmement compliqué, de sorte que, dans ce cas, l'on a également recours à un truc : on prend la projection transversale des œuvres vives, c'est-à-dire le profil de la coque au-dessous de la flottaison et l'on définit son centre géométrique.

Le centre géométrique du profil immergé s'appelle centre de dérive (CD).



A Ecoulement de l'eau autour de la quille et du gouvernail. (a) L'angle de dérive est l'angle entre le cap suivi et la route effective.



C Pour que les voiles soient bien équilibrées, le centre de voilure (a) doit se trouver de 5 à 15 % de la longueur de flottaison en avant du centre de dérive (b) selon la forme de la coque et des voiles.

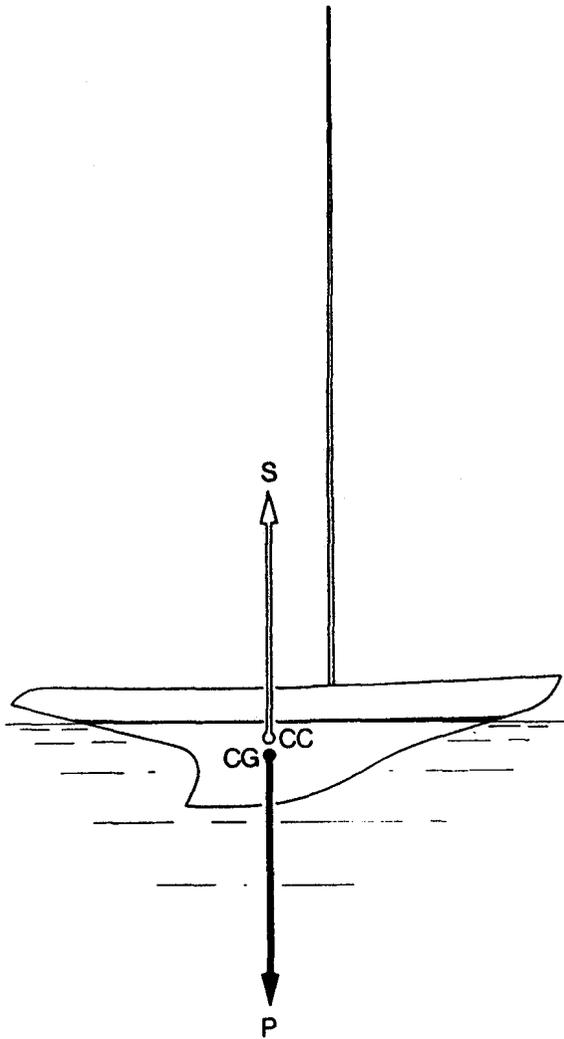


Fig. 3-1 — Équilibre des forces de pesanteur et de sustentation à l'arrêt.

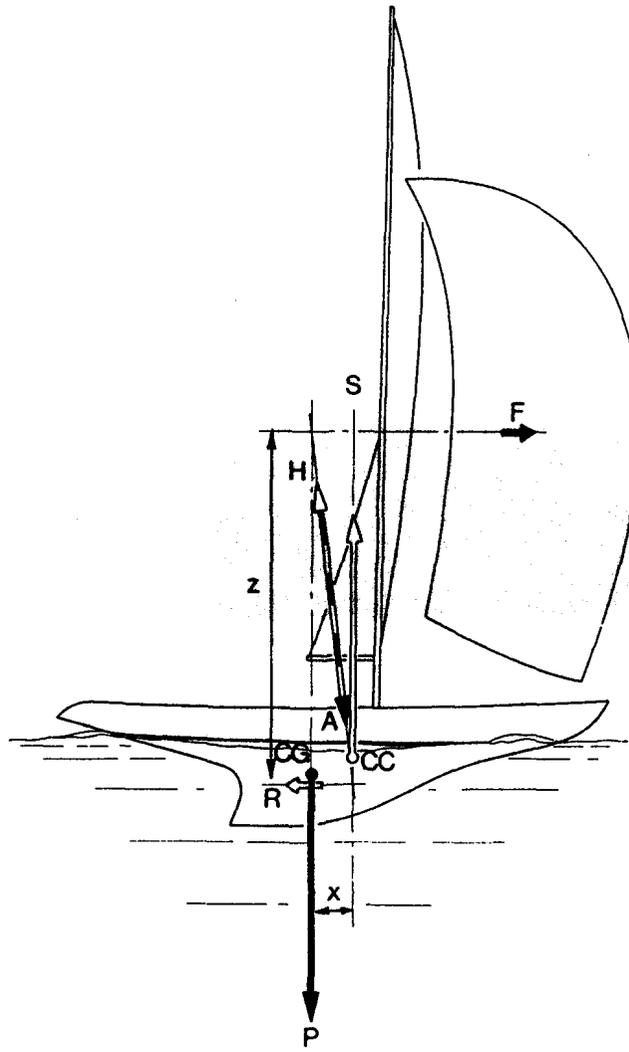


Fig. 3-2 — Équilibre en marche sous l'action d'une force propulsive parallèle au plan de flottaison. (vent arrière)

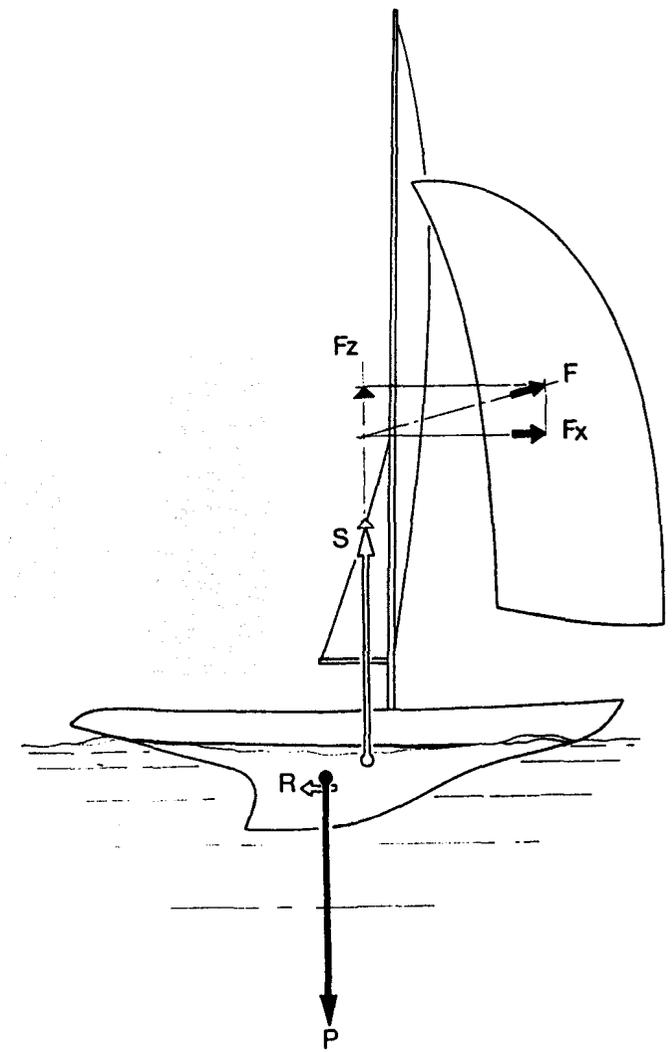


Fig. 3-3 — Modification de l'équilibre avec une force inclinée vers le haut. La force de sustentation est réduite de la valeur de la composante verticale.

**G** Action du gouvernail.  
 (a) Force exercée sur le safran du gouvernail par le courant d'eau dévié. (b) Force d'évolution. (c) Résistance ajoutée.

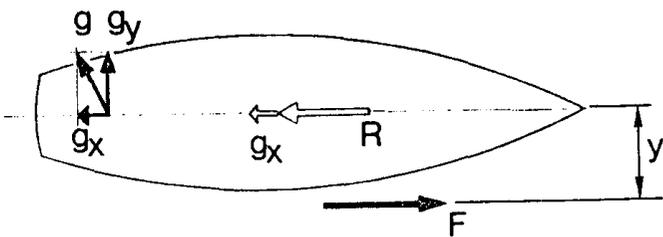
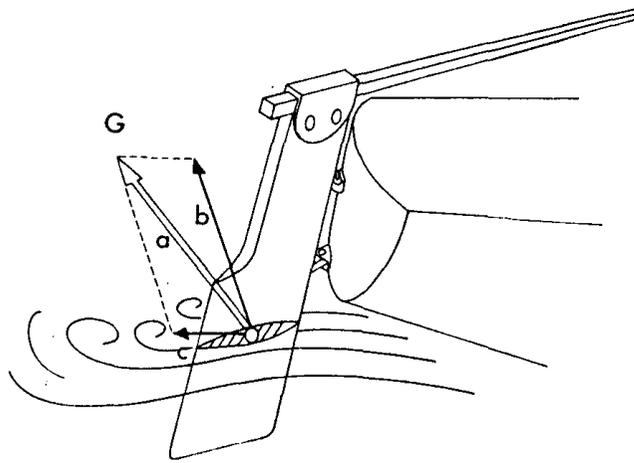


Fig. 3-4 — L'action du gouvernail, nécessaire pour compenser l'action d'une force propulsive décalée latéralement, provoque l'apparition d'une résistance  $g_x$  qui vient se déduire de la force disponible pour la propulsion de la coque.

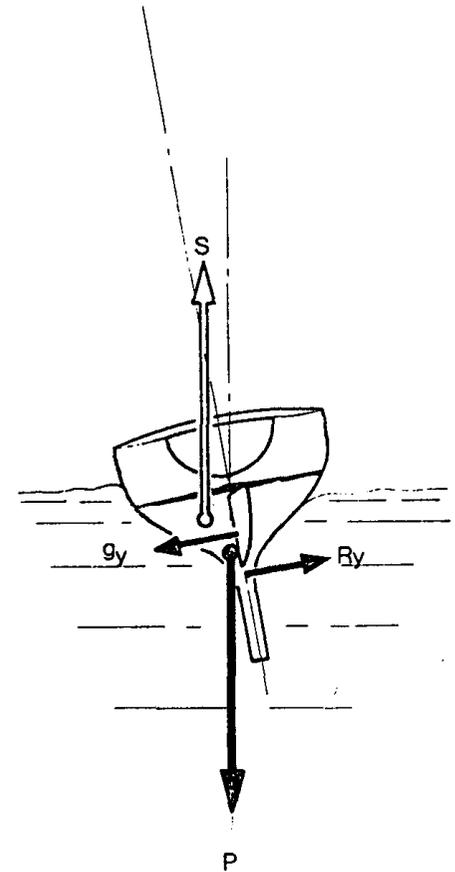


Fig. 3-6 — La différence de hauteur entre les forces transversales développées par le gouvernail et la coque crée un couple augmentant la gîte.

A. Le bateau est au près, parfaitement équilibré : la force aérodynamique ( $F_a$ ) et la force hydro-dynamique ( $F_h$ ) sont « en ligne ». Il n'y a rien à dire.

B. Le même bateau gîte. Le centre de voilure est déporté sous le vent. Les deux forces sont décalées, un couple apparaît, qui tend à faire loffer le bateau : celui-ci est ardent.

C. Le bateau gîte à contre, le couple est inversé. Le bateau est mou.

D. On choque un peu l'écoute de foc dans l'espoir, peut-être, de reculer le centre de voilure et de rendre le bateau ardent. Le centre de voilure recule effectivement. Mais, le foc étant un peu débordé,  $F_a$ , quoique orientée plus sur l'avant, est plus faible. En conséquence, la vitesse diminue; le centre de dérive recule. Le couple est faible. Le bateau ne devient que très légèrement ardent.

E. Le foc est amené. Le centre de voilure recule sensiblement. L'écoulement sous le vent de la grand-voile étant perturbé,  $F_a$  est très faible et mal orientée. La vitesse diminue considérablement, le centre de dérive recule de même. Le bateau devient mou.

F. Le vent fraîchit. Le creux des voiles a tendance à se déplacer vers l'arrière, le centre de voilure recule,  $F_a$  est mal orientée, la vitesse diminue. Le centre de dérive recule, mais pas au point d'empêcher le bateau d'être très ardent.

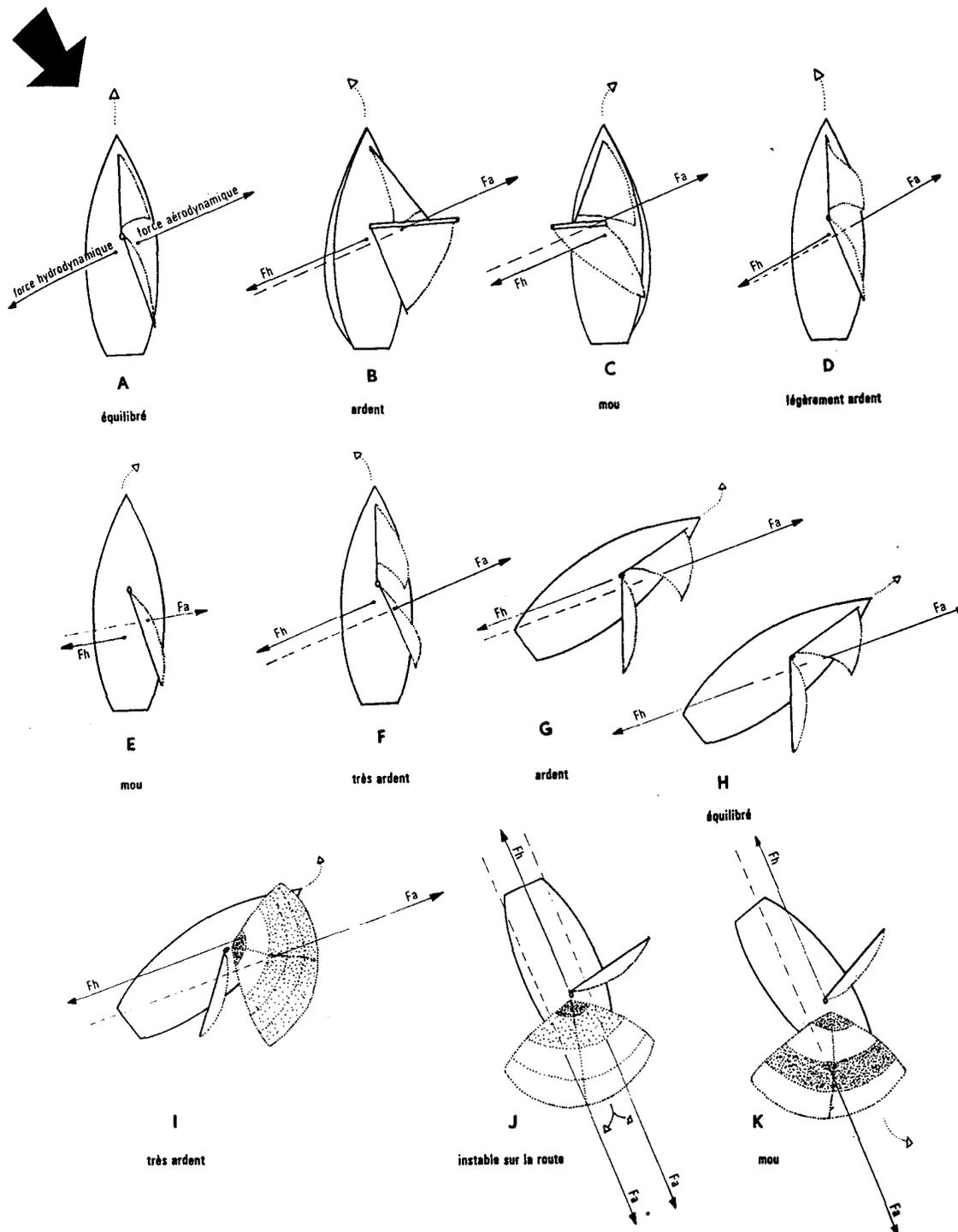
G. Le bateau est maintenant au large. A cette allure, il est généralement ardent.

H. Sur un dériveur, toutefois, en relevant partiellement la dérive, on parvient à reculer suffisamment le centre de dérive pour équilibrer le bateau. Naturellement, il suffit que celui-ci prenne un peu de gîte pour qu'il soit de nouveau ardent.

I. Au large sous spi.  $F_a$  augmente, le centre de voilure se trouve déporté en avant et en abord. La vitesse est grande, le centre de dérive est très en avant. Même si l'on relève la dérive sur dériveur, on ne peut réussir à le faire reculer suffisamment pour que le bateau ne soit pas ardent.

J. Au grand large sous spi; il y a de la mer et le bateau roule bord sur bord. La grand-voile étant peu efficace à cette allure, le centre de voilure est situé très en avant. Selon les mouvements du bateau,  $F_a$  se trouve tantôt au vent, tantôt sous le vent de  $F_h$ . Le bateau est alternativement mou et ardent. Le barreur a du travail.

K. Au vent arrière. Le spi est au vent,  $F_a$  est donc également au vent de  $F_h$ . Le bateau est mou, d'autant plus que le spi a tendance à le faire contre-gîter.



# LA STABILITÉ DE ROUTE

Si la combinaison coque-voile se traduit par un équilibre en valeur des forces en présence, elle s'exprime également par un équilibre de celles-ci en direction.

Nous avons vu en effet (fig. 3-10) que pour que le voilier soit en équilibre stable il fallait que les forces  $F_H$  (voilure) et  $R_H$  (coque) soient non seulement égales mais se trouvent dans un même plan vertical, faute de quoi un couple serait créé qui ferait dévier le voilier de sa route.

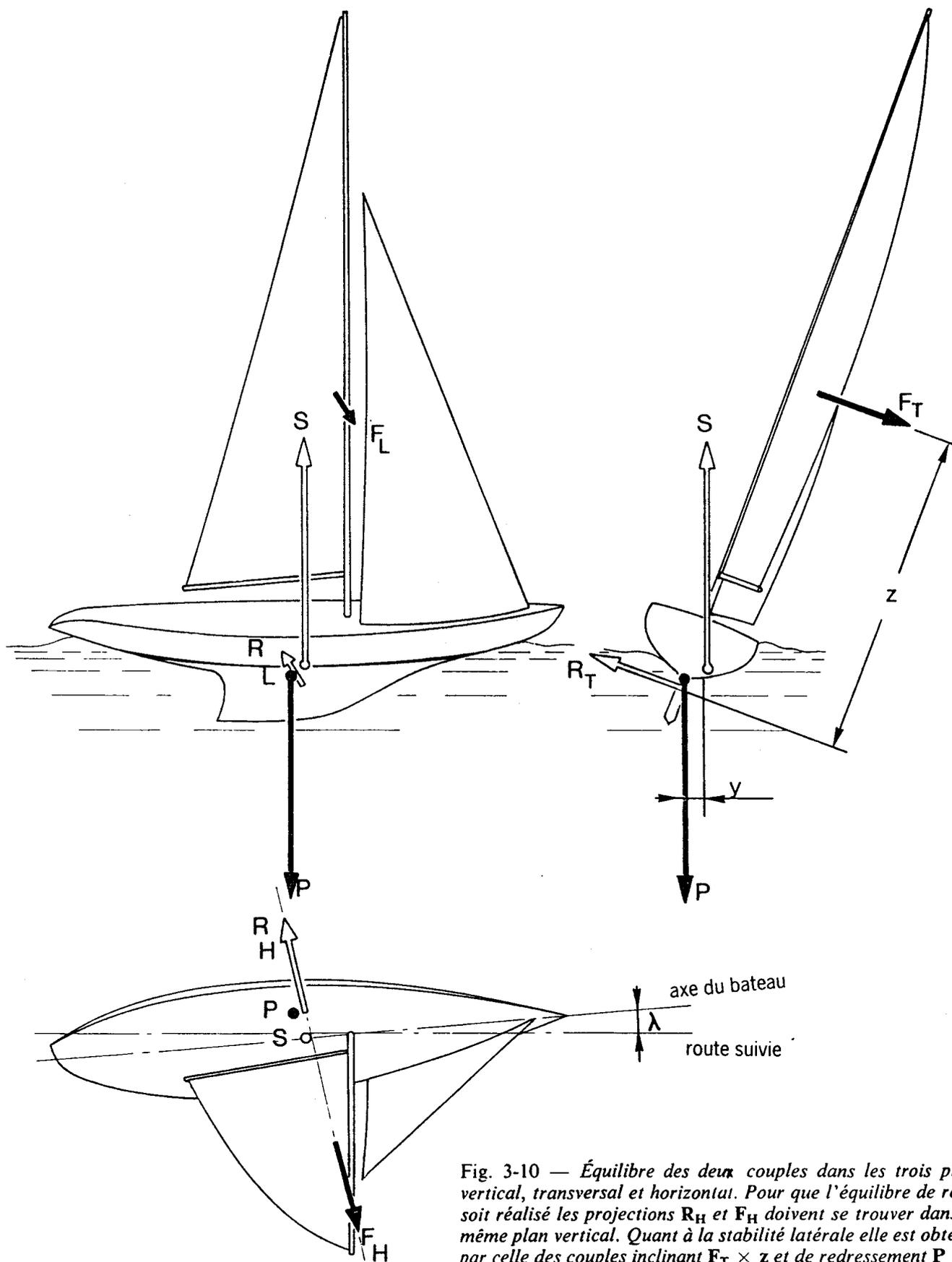


Fig. 3-10 — Équilibre des deux couples dans les trois plans vertical, transversal et horizontal. Pour que l'équilibre de route soit réalisé les projections  $R_H$  et  $F_H$  doivent se trouver dans un même plan vertical. Quant à la stabilité latérale elle est obtenue par celle des couples inclinant  $F_T \times z$  et de redressement  $P \times y$ .

L'équilibre de ces forces constitue ce que l'on nomme la stabilité de route et qui se traduit par une plus ou moins grande facilité à maintenir le voilier sur un cap donné. On dit alors que le voilier est ardent s'il a tendance à loffer ou mou s'il abat. Ceci ne signifie pas cependant que la barre doive être absolument neutre, dans l'axe, et ne demande aucun effort du barreur, nous verrons plus loin pourquoi.

On distingue généralement une stabilité de route statique et une stabilité dynamique.

La première représente la qualité du voilier à revenir seul, sans action du barreur, sur sa route initiale lorsqu'il en a été dévié par l'action momentanée d'une force extérieure (vagues, vent).

La seconde qualifie la qualité du bateau à réduire les oscillations provoquées, de part et d'autre de la trajectoire originale. Il est d'autant plus stable que ces oscillations sont rapidement réduites, il est instable si elles s'accroissent. En dehors du vent arrière, où d'autres éléments que ceux liés à la seule carène interviennent, la stabilité de route dynamique n'est généralement pas un problème grave et de plus son interférence avec le régime des vagues en rend l'étude extrêmement complexe.

C'est pourquoi nous nous en tiendrons à l'étude de la stabilité de route statique.

Les perturbations apportées à la stabilité de route ont deux origines bien distinctes, l'écart entre les forces  $F_H$  et  $R_H$  d'une part et la dissymétrie des formes de la carène due à la gîte, ainsi que la modification de la forme de sa surface latérale qui en résulte d'autre part.

De plus il ne faut pas oublier que tout écart du voilier de sa trajectoire aura un effet sur l'intensité des forces  $F_H$  et  $R_H$ , différent selon l'allure.

## 1. ÉQUILIBRE DES FORCES

Les causes de l'écart entre les forces  $F_H$  et  $R_H$  diffèrent selon l'allure sous laquelle le voilier navigue.

### a) Au vent arrière

Nous avons déjà étudié ce problème au chapitre IV et nous avons vu que sa seule solution viable consistait à ramener par tous les moyens possibles les deux forces dans le même plan vertical/longitudinal, sans intervention du gouvernail et avec le minimum de déformation de la carène. Il est évident que cette condition est plus facile à remplir avec un spinnaker qu'avec un gréement de cat-boat.

Par ailleurs le fait de s'écarter du plein vent arrière en loffant aura pour effet d'augmenter l'intensité de  $F_H$  et, par conséquent, l'angle de

gîte et de dérive et le moment de rotation. Pour compenser l'accroissement de  $F_H$  il faut que  $R_H$  augmente également et pour cela qu'apparaisse un angle de dérive de même sens que celui de la déviation initiale. L'équilibre au vent arrière est donc naturellement instable.

### b) Aux autres allures

Aux allures différentes du pur vent arrière on peut espérer que les deux forces  $F_H$  et  $R_H$  soient situées dans un même plan vertical (fig. 7-5).

Les points d'application ou centre de poussée de ces forces sont respectivement le centre de voilure CV pour  $F_H$  et le centre de dérive CD pour  $R_H$ .

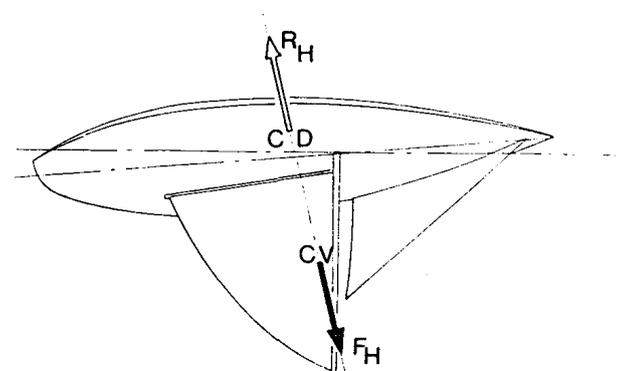
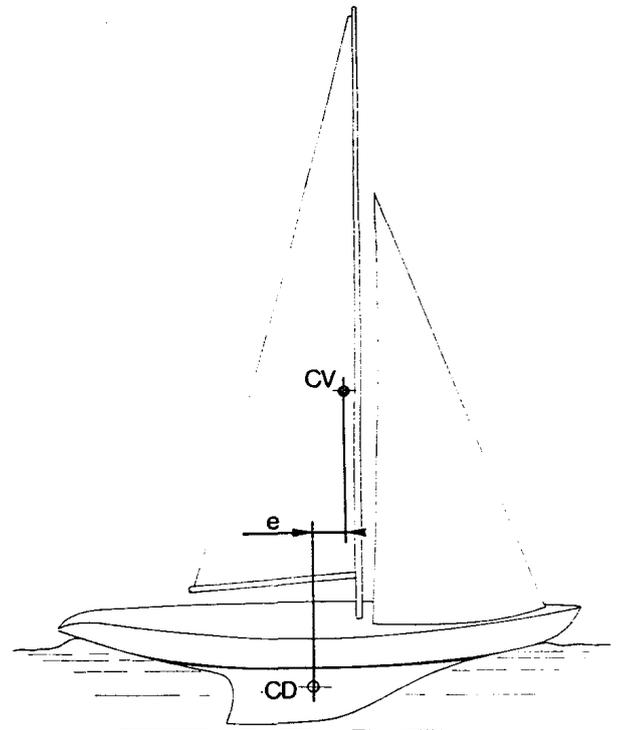


Fig. 7-5 — Décalage longitudinal des centres de dérive et de voilure.

Nous savons que la position longitudinale réelle de ces centres dépend de l'angle d'incidence avec l'air ou l'eau (chapitre II-4); sauf pour des corps de formes simples, elle ne peut être déterminée qu'expérimentalement puisqu'elle dépend essentiellement de la forme des écoulements sur toute la longueur du corps.

L'architecte naval ne peut donc avoir recours, pour déterminer la position de ces centres qu'à des méthodes approximatives, d'autant que de toute façon, sauf pour un voilier à plan de dérive à géométrie variable (dériveur), la position du centre de dérive ne pourra être retouchée au cours de son excursion provoquée par la variation de l'angle d'incidence.

### c) Le décalage des centres de voilure et de dérive

Le décalage longitudinal des centres de dérive et de voilure que nous observons dans le plan horizontal est donc un élément très important de la conception du voilier et un de ceux pour lequel l'architecte dispose du moins d'éléments chiffrés.

On peut dire simplement que cet écart longitudinal sera d'autant plus grand que l'écart vertical sera lui-même plus important (inconvenient des voilures à grand allongement) que la gîte considérée sera plus élevée, que la carène sera moins large.

Ce dernier point est particulièrement sensible sur les catamarans où, le centre de dérive étant rejeté complètement sous le vent, l'écart entre les projections sur le plan axial des centres de pression s'inversera, le centre de voilure passant en arrière du centre de dérive (fig. 7-6).

Lorsque le voilier est au près, le fait d'être écarté de sa route en loffant aura pour effet de réduire l'angle d'incidence des voiles et d'augmenter l'angle de dérive. En conséquence  $F_H$  diminue, de même que la gîte et le moment de rotation.

Pour retrouver une force  $R_H$  réduite à la nouvelle valeur de  $F_H$  il faut que l'angle de dérive diminue, ce qui ramène le bateau sur sa trajectoire initiale.

L'équilibre au près est donc naturellement stable.

Par ailleurs, il ne faut pas oublier que, du fait du pivotement des voiles, lorsque l'on passe du près à des allures plus arrivées, le point d'intersection de l'axe de  $F_H$  avec l'axe longitudinal de la carène recule considérablement (fig. 7-7). Il en résulte qu'un bateau, correctement équilibré au près deviendra ardent dès qu'il abattra. La présence d'un spi, en donnant plus d'importance à la force développée par la voile d'avant, ravantera le centre de voilure.

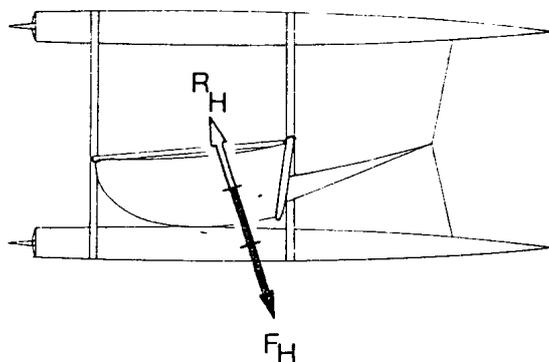
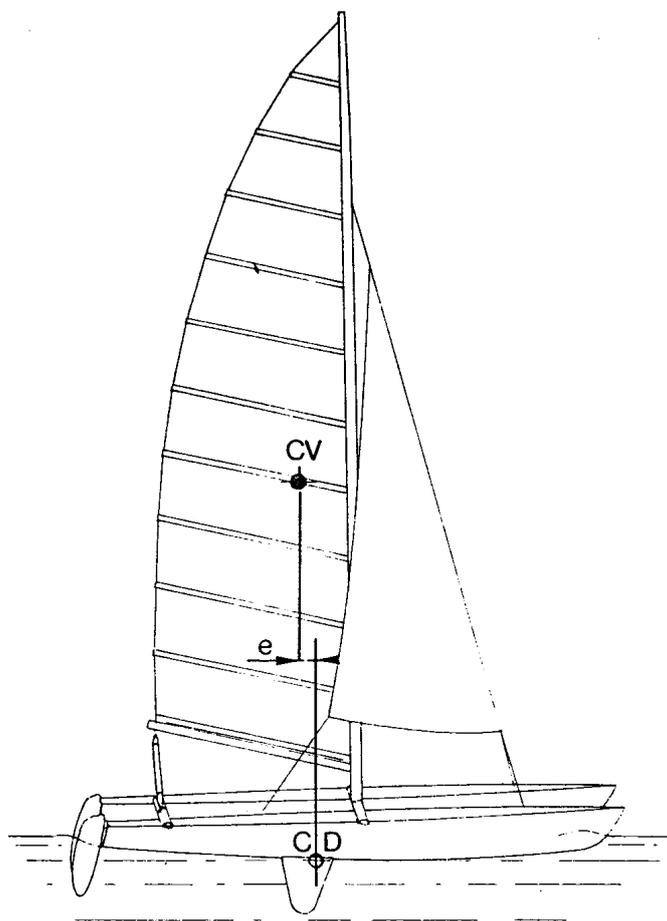


Fig. 7-6 — Sur un catamaran le décalage latéral des centres de voilure et de dérive entraîne une inversion de leur réglage longitudinal par rapport à un voilier classique.

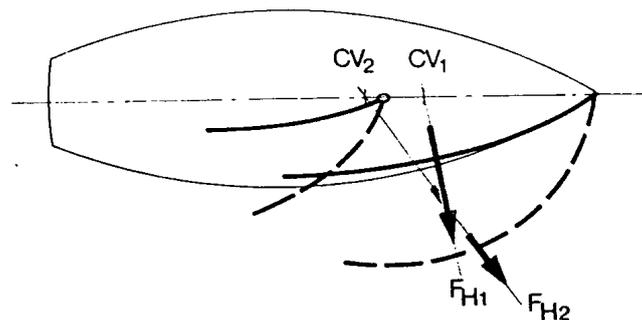


Fig. 7-7 — En passant du près au large le changement de direction de la force développée par la voilure entraîne un recul du centre de voilure.

Quant à l'influence de la gîte, elle se manifeste surtout lorsqu'elle augmente, sur une risée par exemple, il en résulte alors des aulofées, parfois spectaculaires.

La réaction naturelle est généralement d'agir sur le gouvernail, moyen immédiatement accessible, et instinctif, de corriger un écart de route. C'est là qu'en général les choses s'aggravent car, comme nous l'avons vu au chapitre IV, la force latérale développée par le safran provoque un moment de chavirement supplémentaire qui vient encore augmenter la gîte (fig. 7-8). Si l'on ajoute encore le moment de chavirement créé par la force centrifuge qui apparaît lors du virage du voilier (fig. 7-9) on comprend facilement pourquoi une aulolée peut facilement conduire à un chavirage ou tout au moins à une situation fort inconfortable sinon dangereuse. La seule leçon à déduire de ceci c'est qu'il faut **toujours** corriger une aulolée par une action immédiate sur les voiles et **jamais** sur la barre. Il est nécessaire de tirer de ceci les conclusions qui s'imposent quant à l'implantation de l'accastillage et la rapidité de son accessibilité.

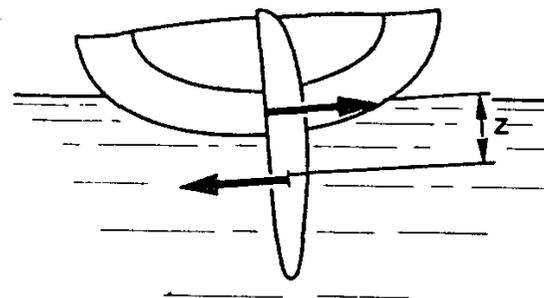


Fig. 7-8 — *Le moment de la force développée par le safran, sensible surtout sur un dériveur, le sera d'autant plus que la dérive sera plus relevée.*

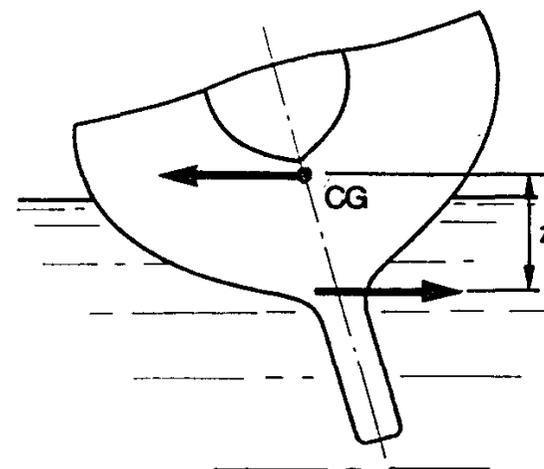


Fig. 7-9 — *Lors d'un virage la force centrifuge et le décalage entre le centre de gravité et le centre de dérive créent un couple de chavirement. Ici le voilier, vu d'arrière, vire à tribord.*

## Une application pratique : le louvoyage

■ C'est l'allure qui demande le plus d'attention et le plus de réglages. Le cap que fera le bateau avec le vent apparent dépendra du voilier et de son plan de voilure, mais aussi pour beaucoup de la force du vent et de l'état de la mer.

Par mer abritée, sous le vent d'une côte, le bateau pourra remonter jusqu'à 25-30° du vent apparent en conservant une vitesse optimale.

Par mer formée, en bute contre les vagues, le bateau a besoin de puissance et devra débrider sa progression jusqu'à 35-40° du vent apparent.

Dans tous les cas, quels que soient la force du vent et l'état de la mer, de 25 à 40° du vent, les réglages et les combinaisons des voiles doivent tendre vers un comportement précis du bateau :

- Celui-ci doit rester équilibré à la barre qui doit rester vive mais douce, une barre qui force trahit un mauvais équilibre du bateau ou trop de voilure, il faut régler ou réduire la voilure.

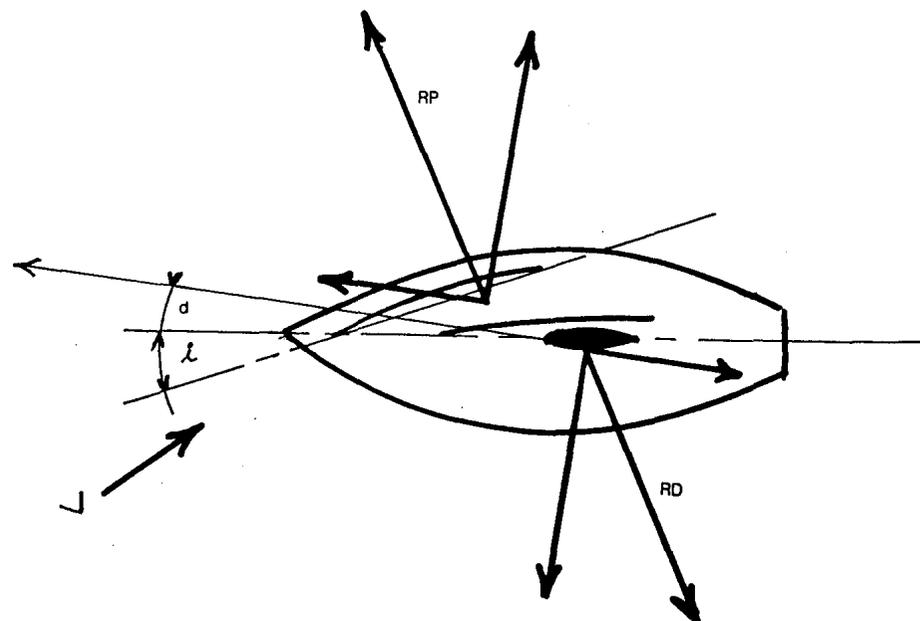
- La gîte doit être modérée. Un voilier qui gîte trop devient très ardent et dérape, le passage dans la mer formée doit être négocié (les mouvements naturels du voilier sont de lofer dans la vague et d'abattre dans le creux), et peuvent être assistés du barreur avec, par mer de face, la nécessité de débrider et de réduire pour conserver de la puissance.

De nombreux réglages de voilures par variation de tension de la drisse,

se, de l'étau, des écoutes, de la bordure, du nerf de chute ou du hâle-bas par déplacement du chariot d'écoute de grand-voile ou du point de tire des voiles d'avant, jouant sur l'intensité et la réduction du creux, le vrillage et l'angle d'ouverture, la tension de la chute, et la finesse des voiles permettent d'agir et de contrôler cette marche au près serré (fig. 61).

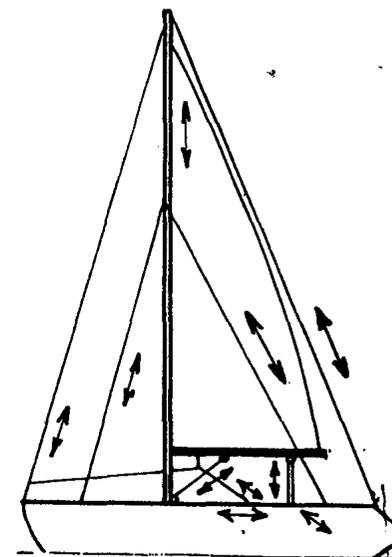
Si une importante diminution de la force du vent apparent (traduite par l'apparition de longs plis parallèles au guindant du foc ou des espars de grand-voile) indiquent que la tension sur le tissu est devenue trop importante et qu'il convient de relâcher la tension sur les drisses, ou si à l'inverse une importante augmentation du vent apparent (laisse apparaître des plis perpendiculaires au guindant et aux espars)) indiquent un allongement du tissu qu'il convient de reprendre par la tension des drisses, d'autres actions séparées ou combinées influencent de façon notable sur la forme du génois et de la grand-voile.

La description des moyens de réglages et leurs schémas d'application en fonction du vent, ne doivent pas être compris comme du "pinaillage" de course, mais bien, à des degrés divers, comme les moyens d'une meilleure maîtrise de son voilier, d'une meilleure finesse, d'une puissance et d'une sécurité accrue dans la brise, et par voie de conséquence d'une meilleure compréhension des caractéristiques de chaque gréement. □



**Fig. 61**

*L'ensemble des réglages conditionne l'équilibre aérodynamique du bateau sous voiles et inversement.*



## DÉCROCHER

■ Le flux d'air placé en amont du profil de la voile se fend littéralement en deux, les molécules sont de plus en plus vivement comprimées sur l'intrados et attirés vers l'extrados, le vent apparent adonne sur le bord d'attaque, la voile trouve lentement son meilleur réglage et tire de son maximum.

Le bateau remonte avec vigueur contre le vent, la voile ne subit plus les petites variations du vent réel, l'écoulement est régularisé.

Sous l'eau, le plan antidérive décompose la poussée résultante en deux forces de plus en plus favorables.

Avec la vitesse, l'angle d'incidence des filets d'eau sur le profil de quille se réduit, le plan antidérive travaille plus efficacement et peut résister à une force vélique plus importante.

Pour augmenter cette force vélique, nous pouvons rechercher davantage de puissance en augmentant le creux, ou en ouvrant l'angle d'incidence en abattant.

Mais la limite est très proche où les filets d'air commencent à s'agiter, à décoller de la surface de la voile, puis à décrocher carrément pour aller reprendre un aval la direction du flux général.

Ce décrochage des filets d'air apparaît d'abord sur l'extrados du bord de fuite et remonte lentement vers le bord d'attaque au fur et à mesure que l'angle d'incidence augmente par l'abattée (ou l'ouverture de la voile).

Une forte augmentation du vent apparent peut également conduire au décrochage.

Dans les deux cas, la dépression créée par le flux d'air accéléré, principale composante de la force vélique, est fortement dépréciée : le bateau ralentit brusquement. Abattre toute voile bordée est un bon moyen d'arrêter un bateau. □

## ETARQUER LA VOILURE

■ Une voile parle d'elle-même lorsqu'il s'agit de la gréer pour peu que l'on sache observer les tensions réparties sur le guidant, la bordure et la chute toutes contrôlables de façons diverses et combinées par les points de drisse, d'amure, de chute et de hâle-bas. Une voile est étarquée en fonction de sa forme, de sa charpente et pour une certaine force de vent, voire une allure précise, et ces tensions pourront être relâchées ou reprises au gré des changements de l'une ou l'autre de ces conditions.

Les repères visuels sont simples, logiques, et s'expriment par des plis dans le tissu par défaut ou par excès de tension : (fig. 60).

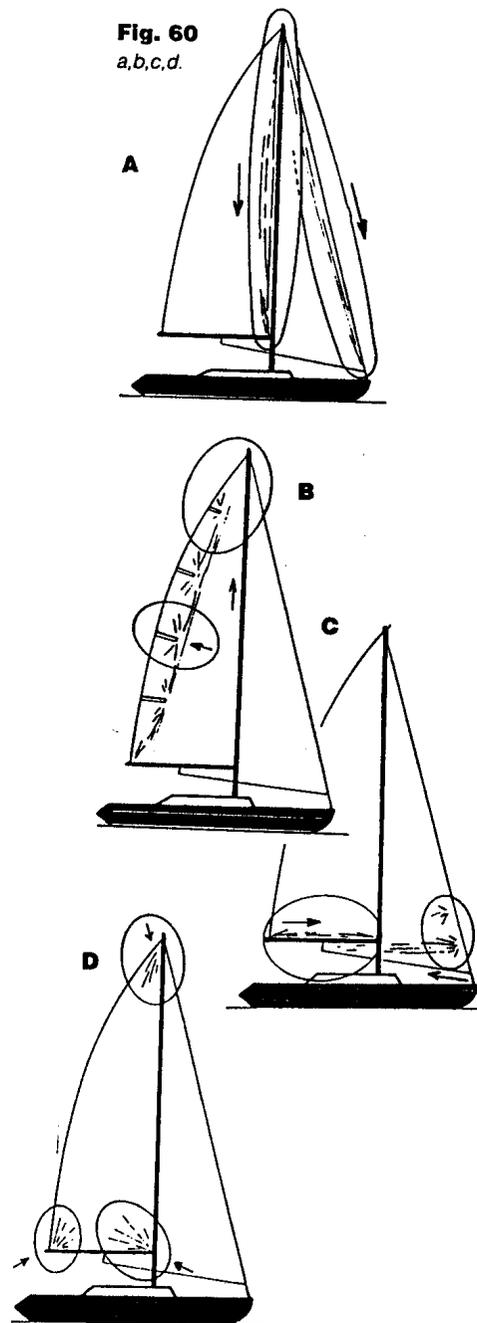
### (1) • Les plis verticaux

Le long de la ralingue de grand-voile ou du guidant d'un foc, ils indiquent un excès d'étarquage de la drisse.

S'ils persistent en prenant le vent, il faut relâcher la tension de la drisse, ou éventuellement le palan du vit de mulet monté sur rail.

S'ils apparaissent en naviguant, ils traduisent une diminution de la force du vent et il convient également de relâcher la tension des drisses.

Fig. 60  
a,b,c,d.



### (2) • Les plis horizontaux

Le long de la bôme ou le long de la bordure du foc, ils indiquent un excès d'étarquage en bout de bôme et un défaut d'étarquage au point d'amure du foc, qui tire alors sur l'emplacement du premier mousqueton. Il faut relâcher la tension de la bordure de bôme et reprendre plus en avant la position du point d'amure du foc.

Avec une diminution de la force du vent de longs plis parallèles à la bôme apparaissent et il convient de relâcher la tension de la bordure.

### (3) • Les plis transversaux

Du point de drisse au point d'écoute dans la ligne des goussets de lattes, ils trahissent un défaut de tension au niveau de la drisse et du point d'écoute de bordure, ou un excès de tension longitudinal des lattes dans leur gousset.

### (4) • Les plis rayonnants

Au point d'amure de grand-voile, ils trahissent une mauvaise position d'étarquage au niveau de l'œillet qui peut être trop haut ou trop reculé ou trop rentré.

Au point de drisse, ils trahissent un dévers trop important ou une mauvaise position d'étarquage au niveau de la tête. En bout de bôme, une mauvaise position d'étarquage du point d'écoute.

En bout d'un gousset, une latte qui force trop.

Sur les bords d'un gousset, une latte trop courte.

Sur les mousquetons de foc, un défaut d'étarquage de la drisse.

Sur les coulisseaux de bôme ou de grand-voile, un défaut d'étarquage de la drisse ou de la bordure. □

# LES MOYENS DE RÉGLAGES DES FOCES ET GRANDS-VOILES

## ■ (1) • L'étai

Selon la taille des bateaux et le type des gréements, l'action sur l'étai a pour effet de modifier la finesse d'attaque.

Il peut s'effectuer sur la tension mécanique du ridoir du pataras ou du palan des bastaques qui modifient la partie haute du mât. (Pour des raisons de frictions liées à la rotation, l'étai équipé d'un enrrouleur de foc devra généralement être plus tendu qu'un étai équipé d'un foc "normalement" endraillé).

### (1) - Diminution de la tension

- Le mât est droit
- La flèche de l'étai augmente
- Le creux du génois et de la grand-voile augmente et recule
- La chute de la grand-voile referme
- Le génois devient plus puissant
- La finesse augmente
- La barre devient plus ferme
- L'attaque et la gîte augmentent.

### (2) - Augmentation de la tension

- Le mât se cintre vers l'arrière
- La flèche de l'étai diminue
- Le creux du génois et de la grand-voile avance et diminue
- La chute de la grand-voile ouvre
- Le génois devient plus puissant
- La finesse diminue
- La barre devient plus douce
- L'attaque devient plus fine et la gîte diminue.

## (2) • La drisse

L'action sur la drisse de focs ou de grand-voile a pour effet de rééquilibrer les tensions et de remodeler la position du creux.

Elle s'effectue directement sur le taquet, l'enrouleur ou le winch du mât, ou indirectement sur le palan d'amure d'une voile d'avant et l'œil du cunningham d'une grand-voile (creux important dans la bordure).

### (1) - Diminution de la tension

- Le creux du génois et de la grand-voile augmente et recule vers la chute
- L'attaque devient plus fine
- Le génois et la grand-voile sont puissants
- Les chutes ont tendance à fermer
- La barre est ferme
- Le bateau gîte et devient ardent.

### (2) - Augmentation de la tension

- Le creux du génois et de la grand-voile (cunningham) diminue et se déplace vers l'avant
- L'attaque est plus fine
- Le génois et la grand-voile sont moins puissants
- Les chutes ont tendance à ouvrir
- La barre devient plus douce
- Le bateau gîte moins et fait un meilleur cap.

## (3) • Les écoute

L'action sur les écoute de focs ou de grands-voiles a pour effet de modifier l'intensité du creux.

Elle s'effectue au winch ou au palan et agit éventuellement en combinaison avec le rail d'écoute ou le chariot de grand-voile.

### (1) - Diminution de la tension

- Le génois et la grand-voile se creusent
- Les chutes s'ouvrent
- Les voiles sont puissantes
- La barre est ferme
- Le bateau gîte
- L'attaque augmente

### (2) - Augmentation de la tension

- Le génois et la grand-voile s'aplatissent
- Les chutes ferment
- Les voiles sont moins puissantes
- La barre est plus douce
- Le bateau gîte moins
- L'attaque diminue

## (4) • Rail et chariot

Les actions sur le rail d'écoute et sur le chariot de grand-voile ont pour effet, en modifiant la tension sur la chute, d'accentuer l'ouverture, la fermeture ou le vrillage de celle-ci.

On diminue la tension du point de tire sur le rail d'écoute en reculant celui-ci par rapport à sa position normale, on l'augmente en l'avancant.

Pour la grand-voile, on diminue la tension du chariot sur la barre d'écoute en plaçant le chariot au vent de sa position normale, et on l'augmente en le plaçant sous le vent.

### (1) - Diminution de la tension

- La chute du foc ouvre
- La bordure est plus tendue
- Le vrillage de la chute du foc et de la grand-voile augmente
- Les voiles sont puissantes
- La barre est ferme
- Le bateau gîte et devient ardent
- L'attaque est augmentée.

### (2) - Augmentation de la tension

- La chute du foc se referme
- La bordure est moins tendue
- Le vrillage du foc et de la grand-voile diminue
- Les voiles sont moins puissantes
- La barre est plus douce
- Le bateau gîte moins
- L'attaque est diminuée

## (5) • Hale-bas et nerf de chute

L'action sur le hale-bas et les nerfs de chute et de bordure a pour effet, comme l'étaillage de la bordure le long de la bôme, de modifier la tension sur les bords de la voile.

### (1) - Diminution de la tension

- La chute et la bordure se détendent (nerfs de chute)
- La bôme remonte (hale-bas)
- Le creux de la bordure et l'ouverture de la chute augmentent sensiblement
- Supprime la tension de la chute dès que le vent mollit

### (2) - Augmentation de la tension

- La chute et la bordure se tendent (nerfs de chute)
- La bôme descend (hale-bas)
- Le creux de la bordure et l'ouverture de la chute diminuent sensiblement
- Supprime les vibrations de la chute dès que le vent forçit. □

## LES REGLAGES AU SERVICE DES ALLURES

### ■ (1) • Le près serré

En grande croisière, le près serré, c'est-à-dire un cap très pointu de 25 à 40° du vent apparent, ce qui est très performant et, (pour des carènes lourdes ça peut se traduire sur le fond par des bords de 90° d'un bord sur l'autre), sera généralement l'allure de sauvegarde qui permettra de se dégager à temps d'un mauvais pas au vent d'une côte ou de lutter contre le courant pour y gagner un abri.

Plus que la force du vent, c'est l'état de la mer qui détermine le cap.

Lorsque la mer est plate, abritée sous le vent d'un relief côtier, et jusqu'à 20 nœuds de vent (force 5), plus ou moins en fonction des voiliers, c'est le cap du bateau qui prédomine sur la vitesse.

L'essentiel, et plus particulièrement sur les coques modernes orientées vers la stabilité de forme, c'est que le bateau reste le moins gité possible et conserve une barre douce. Contrairement à ce que les sensations procurent : un bateau trop gité et qui tire à la barre n'est plus du tout véloce au près serré, mais donnera une meilleure puissance avec une barre assez neutre et une assiette plutôt plate (environ 15°)

qui nécessite plus ou moins rapidement des réductions de voilure (fig. 62).

*Le vent force* : Après être passé du génois au foc de route sans recouvrement, la réduction de voilure se fera dans la grand-voile.

La prise du premier ris, qui diminue en hauteur et aplatit la grand-voile, agit davantage sur la diminution de l'angle de gîte que sur la vitesse du bateau.

Tant que la mer ne gêne pas la progression contre le vent, les écoutes sont bien bordées, le point de tire du foc peut être rentré et reculé de manière à aplatir le creux de celui-ci et gagner en cap.

De même, le chariot de grand-voile qui était placé au vent pour creuser la voile dans le petit temps est au milieu ou légèrement descendu jusqu'à la limite de déventement du bord d'attaque de grand-voile.

Ici, pour la finesse du réglage des voiles, mieux que la girouette ou le pénon dans les haubans, notons l'utilisation de brins de laine qui peuvent être cousus sur l'arrière du guindant du foc de route et sur la chute de la grand-voile.

(Ces brins de laine matérialisant l'écoulement de l'air indiquent au barreur que celui-ci fait trop de cap ou que l'écoute n'est pas assez bordée si le brin décroche au vent, ou au contraire que la voile est trop bordée si c'est le brin sous le vent qui décroche).

Avec un creux sur l'arrière qui permet une attaque fine, les chutes, plus ou moins ouvertes, doivent être parallèles. La surface de la grand-voile touche presque la barre de flèche sous le vent.

Le jeu de barre a son importance : si les voiles sont trop creuses et rendent le bateau ardent en obligeant le barreur à maintenir la barre au vent, il vaut mieux serrer davantage ou déborder encore la barre d'écoute et naviguer avec une grand-voile qui faseye au niveau du bord d'attaque que de trop gîter.

Si cette action ne suffit plus à ré-équilibrer la barre, on peut encore chercher à réduire la gîte en abaissant les points d'amure au maximum et en aplatissant davantage les voiles (en reculant le point de tire du foc), en lâchant complètement le chariot et en souquant les écoutes.

Si la barre est encore trop dure, il faut réduire à nouveau la voilure.

S'il est un domaine où la croisière a tout à gagner des expériences de la course, c'est bien celui des réglages et des réductions de voilures. Je suis étonné de la contradiction qui règne entre l'influence réelle de la course dans l'appareillage électronique sophistiqué, (au 3/4 inutilisable dans la grande croisière), et celle, montrant un certain désintérêt dans le domaine essentiel de la voilure, comme si la bonne marche et le bon équilibre d'un bateau dans la brise n'était pas important en croisière hauturière.

Sincèrement, la bonne coupe des tissus, ainsi que tous ces systèmes simples permettant de régler le creux et la chute des voiles tels que rails d'écoute, palans d'amures, barre d'écoute, hale-bas, nerfs de chute (fermetures éclairs), œil de cunningham, palans de bastaques ou de pataras etc... qui permettent d'améliorer considérablement le comportement, le confort et la sérénité d'un voilier dans la brise (fastidieux bord de près), devraient être à l'honneur sur les bateaux de grand voyage.

*Si nous sortons de la zone abritée, et que la mer vient à frapper contre l'étrave, il devient nécessaire de débrider les réglages et le cap du bateau de manière à favoriser la puissance pour passer dans les vagues.*

Pour gagner en puissance, les voiles seront légèrement débordées et creusées davantage sur l'avant. Le point de tire du foc sera ramené sur l'avant et écarté de manière à creuser modérément le bord d'attaque de la voile d'avant.

La finesse est augmentée, le bateau serre moins le vent mais il gagne en puissance pour défoncer les vagues.

Dans le même temps, la bastaque au vent ou le pataras sera souqué de manière à réduire les mouvements du mât et à replacer, tout en l'absorbant, le creux sur l'avant du foc et de la grand-voile.

Les nerfs de chute et de bordure seront tendus, ce qui peut également être contrôlé par l'étauquage du hale-bas pour la chute de grand-voile et l'étauquage du cunningham qui empêche le creux de reculer.

Le chariot de grand-voile est recentré, l'écoute est souquée modérément.

Les tensions ainsi reprises aplatissent les voiles sur l'arrière et, en ouvrant légèrement leurs chutes, minimisent le renvoi entre les deux voiles.

Le cap vient d'être sensiblement amélioré avec une barre plus douce.

*Si le vent vient encore à forcer, une réduction de voilure devra se faire de manière à conserver de la puissance (il faut un minimum de creux sur l'avant, des voiles trop plates manquent de puissance dans la brise et la mer formée) à éviter au bateau une gîte excessive et à maintenir une barre douce.*

La rencontre brutale avec une vague, qui a pour effet de faire lofer le bateau (déplacement vers l'avant du centre de dérive) tout en le stoppant à la gîte (voiles trop bordées par rapport au vent apparent qui adonne brutalement) pouvant, lors d'un dégageant, mettre le bateau en position critique, (le rendant vulnérable au prochain assaut), doit inciter le barreur à accompagner la puissance des voiles par des mouvements de barre au passage de chaque vague (fig. 63).

*Au près serré le gréement de sloop en tête pour les quillards et de 3/4 ou 7/8 pour les dériveurs lestés et intégraux, montrent un certain avantage au niveau des performances.* Le sloop en tête présente une envergure très favorable à la finesse pour le meilleur rapport portance-trainée.

Au-delà d'une certaine taille et d'une certaine force de vent, c'est cependant un gréement "sportif" plus sensible et moins tolérant que les autres.

Les gréements 3/4 ou 7/8 présentent l'avantage de voiles d'avant plus basses et plus petites. Le mât peut être plus facilement cintré et participer à un meilleur réglage des voiles.

Dans les deux cas, le gréement (hauteur, emplacement, haubannage), et sa voilure (coupes et surfaces des voiles), auront été retenus pour un type de carène parfaitement adapté et équilibré aux sections, aux surfaces, aux volumes et au plan antidérive.

## (2) • Au près bon plein

Le bon plein, allure débridée permettant de remonter le vent apparent selon un angle variant de 40° à 80° sera plus volontiers l'allure préféré du bateau de grand voyage pour croiser sous le vent d'une côte.

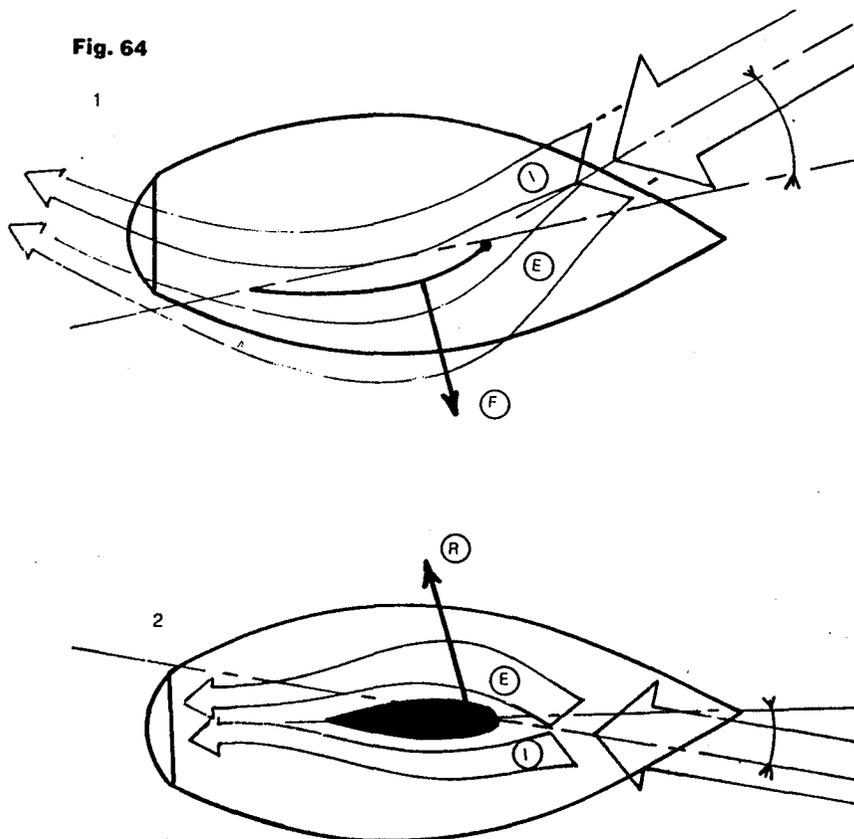
A cette allure, le principal défaut est de vouloir surtoiler le bateau.

Beaucoup ont le réflexe de renvoyer de la toile dès qu'il s'écarte du près serré.

Certes, à cette allure débridée le voilier peut prendre davantage de vent, mais il est souvent préférable de jouer sur les réglages et la forme des voiles que sur une surcharge qui aurait pour effet de rendre le bateau très ardent avec une barre dure.

Répetons-le, ce n'est pas cette sensation de barre dure et de voilier arc-bouté dans la mer et prêt à bondir, qui donne les meilleures performances, mais bien au contraire cette sensation de barre douce et de puissant équilibre qui favorise à la fois le contrôle et la vitesse (fig. 64).

Fig. 64



*Corrélation aérodynamique et hydrodynamique :*  
1) La force F est la résultante des forces créées par la différence de pression dans la séparation du flux entre l'extrados et l'intrados du profil de la voile.  
2) La force R opposée est la résultante des forces créées de la même manière par la séparation du flux entre l'extrados et l'intrados du profil de la quille.  
Les bonnes performances d'un bateau dépendent du bon équilibre de cette corrélation.

*Pour redonner de la pleine puissance, sans pour cela (pas encore), lâcher un ris ou remettre le génois, il est essentiel de relâcher les tensions en mollissant un peu le hale-bas, les nerfs de chute et de bordure, mais surtout de choquer les écoute de foc et de grand-voile en ayant pris soin de lâcher la barre d'écoute et d'écarter (en l'avançant) le point de tire du foc.*

Si l'on se contentait de déborder les écoute de foc et de grand-voile sans toucher au réglage des points de tire, cela aurait pour effet d'accentuer le vrillage vers le bas et de fermer les chutes avec pour conséquence néfaste de freiner et de faire gîter le bateau.

Dès que l'on débride, il est important de contrôler le bord de fuite des voiles qui doivent être vrillées avec une chute qui ouvre, et qui commence à déventer par le haut. En relâchant la tension du pataras, le creux du foc ou du génois augmente et recule, la voile d'avant devient plus puissante.

Le creux de la grand-voile augmente, rendant celle-ci plus puissante, mais la chute referme un peu, il faut choquer le hale-bas.

A cette allure, et plus particulièrement dans la brise, le passage des vagues modifie continuellement la force et la direction du vent apparent.

La voile d'avant pourra être bordée de manière optimum en fonction du cap choisi, la grand-voile légèrement plus débordée pourra aider le bateau à maintenir la vitesse en combinaison avec le pilote ou la barre.

Au près bon plein, les voiles marchent en puissance, mais peuvent facilement faire gîter le bateau dans une mer agitée et dans les surventes.

*Si en forçant le vent vient à rendre la barre un peu dure et le bateau ardent, il est toujours plus efficace de commencer par réduire la puissance des voiles, donc de diminuer et d'avancer le creux de celles-ci par les tensions citées précédemment.*

*Si le vent reste stable et la mer très maniable, l'envoi d'une trinquette, tout en augmentant la surface totale de la voilure, améliore considérablement l'écoulement d'air entre les deux voiles. Non seulement, le foc de route tire mieux mais sa composante de gîte diminue.*

Le bateau navigue moins gîté, la barre est douce, la puissance est accrue.

Le gréement de cote montre ici un avantage sur le sloop 7/8 et à plus forte raison sur le sloop en tête par sa voilure étalée et divisée sur l'avant.

Avec ou sans bout-dehors, l'étai et le bas étai qui porte la trinquette bômée ou non bômée doivent être rigoureusement parallèles et présenter un couloir, ni trop large, ni trop étroit, parfaitement réglé en fonction des formes et des surfaces des voiles d'avant.

### (3) • Le largue

Le bateau abat et navigue avec un vent de travers qui fait un angle variant entre 80 et 120° du vent apparent.

La stabilité latérale est nettement améliorée, la résultante des pressions de la poussée vélique se décompose avec une portance accrue au détriment de la traînée et de la gîte.

Les voiles vont être débordées largement.

Attention, comme précédemment, si l'on se contente de choquer les écoutes, le point de tire du foc et de la bôme vont avoir tendance à monter et à faire fermer les chutes. Pour éviter l'ascension du point d'écoute du foc et du bout de la bôme de grand-voile, entraînant du même coup par un vrillage important une augmentation de la traînée et de la composante de gîte, il faut choquer complètement le point de tire du foc, écarté et avancé, et larguer sous le vent le charriot de barre d'écoute.

Le hale-bas peut être maintenu plus ou moins sous tension pour tendre un peu la chute de grand-voile, mais devra être molli, si le vent monte.

Au largue le réglage des voiles donne une meilleure assiette et un meilleur contrôle de barre avec des écoutes plutôt choquées que bordées.

Dans une mer formée, celles-ci peuvent être réglées de manière à ce que le bord d'attaque des voiles faseyent très sensiblement par rapport au cap choisi de manière à être mieux contrôlées à la barre avec un bateau plus plat.

Au passage d'une survente, ou dans le creux d'une vague, on peut avoir besoin de choquer rapide-

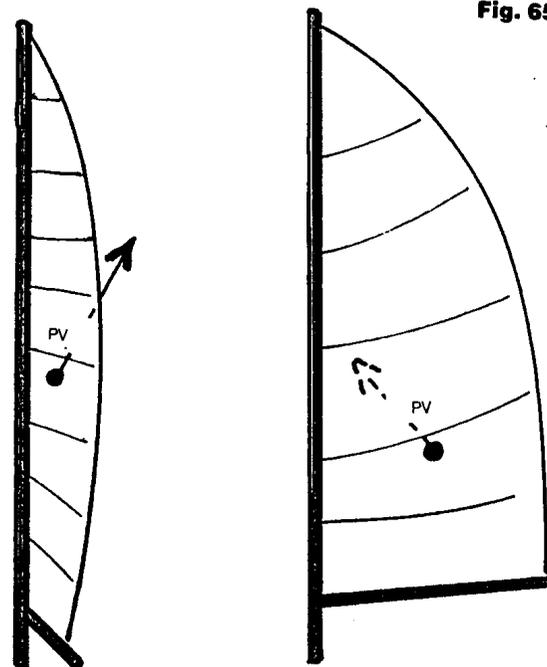
ment afin d'éviter un départ exagéré au lof.

Si la barre devient dure et le bateau trop ardent, il faut réduire la surface de grand-voile avec un ris et chercher à aplatir le foc en reculant le point de lire.

A cette allure particulièrement puissante, il devient primordial de garder une barre très douce.

Un bateau qui navigue vent de travers avec une tendance exagérée à lofer et une barre dure, est un bateau déséquilibré par une composante de traînée importante dont l'effet néfaste est d'imposer des efforts importants au gréement et au safran.

Plus qu'à n'importe quelle autre allure, l'allure du largue est celle où les réglages de voilures doivent aider à conserver une assiette latérale le plus plat possible et une barre neutre (fig. 65).



2) Le centre de poussée vélique (PV) ne correspond pas au centre géométrique de la voile : il se trouve déplacé vers le haut et vers l'avant aux allures du près et vers le bas aux allures portantes. Ceci s'explique par le mauvais rendement des profils intérieurs, au profit des profils supérieurs de la voile Marconi aux allures de finesse.

Là encore, l'apport d'une trinquette, voire d'une trinquette génoise par petit temps, procure un gain de vitesse non négligeable sans pour autant accentuer sensiblement la gîte.

Le gréement de cotre, avec ou sans bout-dehors, présente ici encore un certain avantage par son centre vélique abaissé et sa voilure divisée sur l'avant qui permet une meilleure dynamique au largue.

Mentionnons aussi les vieux gréements de cotre bermudien ou aurique, dont les profils importants au niveau de la bordure et des parties hautes procurent une puissance très supérieure mais demande des carènes plus profondes (ou très larges) supportant des angles de gîte relativement importants.

A partir d'une certaine taille (au-delà de 14-15 mètres) les gréements de ketch et de goélette moderne (les deux mâts égaux) autorisent d'intéressants réglages de voilure avec une plus grande marge d'adaptation et d'équilibre dans la brise.

Les vieux ketch ou goélette bermudien ou aurique, (au-delà de 18, 20 mètres et avec équipage) qui développent une puissance impressionnante aux allures du largue avec de faibles allongements dynamiques réunissent sans doute les meilleurs avantages de combinaisons en fonction de l'état de la mer.

Avec des possibilités de réglages simples par de nombreux points d'étauillage allant des points d'écoutes aux palans de cornes ou de vergues, ces vieux voiliers démontrent leurs étonnantes qualités pour les allures arrivées.

#### (4) • Le grand largue

Le bateau abat encore un peu plus et navigue entre 120 et 160° du vent apparent.

Ici les principes restent les mêmes qu'au largue avec toutefois quelques précautions :

Afin de redonner du creux dans les voiles d'avant et dans la grand-voile, les palans ou les ridoirs de pataras ou de bastaque seront mollis, mais en se faisant, (tout dépend de la coupe des voiles), nous refermons la chute de grand-voile et il faut compenser avec le hale-bas. Le centre vélique, ramener excessivement en avant, a pour effet de déséquilibrer quelque peu le bateau dans la brise ou dans le passage des vagues avec une tendance à enfourner.

D'autre part, avec la variation du centre de dérive, le point d'application de la force vélique de l'ensemble de la voilure (plus précisément la composante trainée - force de dérive) peut se trouver alternativement légèrement en avant ou en arrière de celui-ci provoquant des tendances à l'auloffée ou à l'abatée d'autant plus forte et incontrôlable que la carène présente un plan de quille ou de dérive à grand allongement.

Si nous sommes en dériveur, on pourra réduire cette tendance en remontant la dérive (le centre de dérive remonte mais aussi recule). Pour éviter un tel déséquilibre, il est toujours préférable de régler de façon optimum (le plus débordée possible, quitte à utiliser le tangon) la voile placée le plus en avant, en l'occurrence le génois, le foc de route, ou le spi. Dans ces conditions, la grand-voile a surtout pour rôle d'équilibrer le bateau à la barre et de ce fait pourra être vrillée de manière à déventer dans sa partie haute en mollissant le hale-bas.

A cette allure, plus que dans les surventes, c'est au passage des vagues, et plus particulièrement pour les bateaux présentant de grandes envergures, que le bateau peut s'engager dans de longues et puissantes auloffées.

Il est souvent aisée de corriger cette tendance à la barre, mais il peut être préférable dans la brise de rechercher la plus grande surface de voile projetée, c'est-à-dire un débordement des voiles proposant le maximum de force propulsive.

A partir de 45° d'incidence, et quel que soit l'allongement, la force vélique varie relativement peu.

Comme cette force vélique s'applique de façon pratiquement perpendiculaire au plan de la voile, on a tout intérêt à placer celle-ci le plus transversalement possible à l'axe du bateau dès que le vent apparent vient de travers.

*Au grand largue et jusqu'à des angles très ouverts, l'apport d'une trinquette sera bénéfique, même si elle renvoie un peu dans la grand-voile, à condition qu'elle ne gêne pas la voile d'avant. On peut d'ailleurs préférer foc de route et trinquette plutôt qu'un grand génois.*

Le gréement de ketch ou de goélette semble ici plus avantageux que le gréement fractionné de cotre, en permettant une plus grande étendue de la voilure et donc un meilleur équilibre sous voile par rapport à la carène.

Les vieux voiliers, aux voiles creuses, aux longs profils étalés, aux lourdes carènes de formes généreuses, déversant d'importantes surfaces mouillées de leurs quilles longues se montrent particulièrement à l'aise au grand largue dans la brise.

#### (5) • Le vent arrière

Le bateau navigue en faisant un angle variant de 160 à 180° avec le vent apparent venant de l'arrière.

Le vent apparent se confond avec le vent réel réduit du vent relatif qui est la vitesse du bateau.

La progression dans la brise à cette allure a quelque chose de grandiose, de captivant, mais demande une attention particulière pour le contrôle du bateau.

Ici, le point d'application de la force développée par la grand-voile, ou le foc tangonné, étant assez décentré par rapport à celle provoquée par la quille ou la coque dans son passage dans l'eau, il y a création d'un couple de rotation qui tend à faire pivoter le bateau du côté opposé.

La grand-voile placée du côté opposé à celui du génois contrebalance cette tendance et le bateau reste équilibré selon son axe longitudinal.

En règle générale, un gréement fractionné est plus stable au vent arrière car la différence entre la surface de la grand-voile et le génois est moins grande.

L'envergure et la forme de la carène seront déterminantes pour la stabilité au vent arrière.

Certains voiliers restent stables et très manœuvrants tandis que d'autres s'engagent facilement dans d'inconfortables roulis rythmiques.

Le principe de base de cette allure est la stabilité de route.

*Dans la brise, ou dans la mer formée, il devient indispensable d'assister les mouvements du bateau à la barre où toute faute de manœuvre peut facilement entraîner de catastrophiques départs au lof, ou au pire, d'empannages involontaires.*

L'envoi d'un big boy à la place du génois peut contribuer sur un gréement en tête à rééquilibrer la voilure, mais le sloop reste le gréement le plus désavantagé à cette allure.

Les trinquettes jumelles, techniques traditionnelles qui gardent leurs adeptes, ont leurs qualités et leurs défauts.

A leur avantage, il faut noter :

- C'est une installation simple et robuste.

- La grand-voile ferlée, le risque d'empannage est supprimé.

- Le mât et le gréement ne fatiguent pas.

- Par fort vent, le bateau tient la route, le gouvernail travaille peu.

- La réduction par enroupleur ou prise de ris est toujours équilibrée.

A leur désavantage, on peut relever :

- Avec cette grande stabilité, toute manœuvre rapide, si besoin est pour modifier le cap à cause d'un récif ou d'un cargo, est souvent longue et difficile.

- La possibilité de faire route au-delà du plein vent arrière se trouve très limitée.

- En cas de mise en travers par une lame, le risque de casse est plus grand.

- Le roulis rythmique est augmenté, la stabilité de route n'est pas évidente sur tous les bateaux.

- Deux voiles, deux drailles, deux tangons, ne sont pas forcément rentables.

Passons les fortunes carrées, les huniers volants et autres raffées (parfaitement utilisables en longues croisières sur certains gréements) pour considérer un instant la voile de spi.

Un bon spi n'est pas seulement une voile libre et amusante, bien construit et bien maîtrisé, il peut s'avérer très utile et très agréable dans les longues traites au portant.

Un spi est une voile d'avant symétrique, tenue uniquement par trois points : un point de drisse, un point d'amure et un point d'écoute.

Sa surface est toujours supérieure à celle limitée par ces trois points, et son orientation se définit par le plan passant par ces trois points et l'axe longitudinal du bateau.

*Au vent arrière* (mais on peut aussi l'utiliser au large, voire au bon plein si sa coque le permet), on utilise le maximum de sa surface projetée pour deux fonctions essentielles : la propulsion du bateau et l'équilibre sous voile.

*Par petit temps*, tant que la carène n'atteint pas sa vitesse limite, la stabilité et l'équilibre à la barre n'est pas compromise par la recherche de la plus grande surface de voile projetée par rotation de l'ensemble du spi autour du mât à partir du point de drisse...

*Dans la brise*, l'équilibre de barre devenant primordial, on cherchera à ramener l'axe de la force développée par le spi le plus près possible de l'axe longitudinal du bateau.

Lorsque le bord d'attaque du spi ne bouge pas, le fait de relâcher l'écoute peut rendre le bateau ardent, en la bordant le rendre mou. Mais il ne faut jamais lâcher l'écoute plus loin que l'étai sans risquer un sérieux départ à la gîte.

En règle générale, au vent arrière, on choisira de placer le spi perpendiculairement à l'axe longitudinal du bateau.

Le roulis rythmique, qui peut s'avérer très désagréable sous spi dès qu'à l'instabilité de la coque viennent s'ajouter les vagues, peut être diminué en modifiant la combinaison des voiles entre elles.

Pour maîtriser parfaitement les positions dans l'espace de ces trois points, il est indispensable de disposer d'un accastillage robuste et adapté (le prix de l'ensemble d'un spi et de cet accastillage est hélas très dissuasif pour la grande croisière).

A surface égale, un spi déploie généralement plus de puissance que n'importe quelle autre voile (une importante déflexion de son bord d'attaque) et constitue donc une aide très valable pour les grands bord de portant au large.

Il faut savoir que cette voile se grée avec certaines précautions : le barreur devra toujours positionner le bateau de manière à offrir le moins de résistance latérale possible par rapport au vent. On se sert avantageusement du déventement de la grand-voile pour les manœuvres d'envoi et d'amenée. L'empannage s'effectue à pleine vitesse en essayant de maintenir la voile gonflée durant le changement de passage du tangon.

*Au plein vent arrière*, le relâchement général des tensions, ne doit pas faire négliger le rôle (éventuel) des bastaques, du hale-bas et des retenues de bôme ; les grèements à faible élancements (abaissément du centre vélique) et fractionnés (étalement de la voilure) montrent un certain avantage.

L'équilibre des voiles et de la carène dépend beaucoup de la forme et de la puissance de celles-ci au vent arrière, mais aussi et surtout de l'état de la mer.

Le vent arrière est une allure enivrante par sa vitesse qui absorbe un peu de celle du vent et de la mer, mais l'ivresse, faite de puissance, peut tout faire basculer quand elle masque trop facilement le danger "qui roule sur les crêtes et gronde sous le muscle énorme des vagues"... □

# La réduction des voilures

**D**ISONS-le d'emblée, à l'instar des réglages de voiles, les réductions doivent être comprises comme manœuvres intervenant au niveau de critères de rendement et de performance et non de critères d'inconfort ou de sauvegarde du gréement.

On ne réduit pas parce qu'il devient trop acrobatique de se caler dans le cockpit, trop difficile de se déplacer à bord, de tenir la barre, ou encore moins parce qu'on a peur de casser le gréement (un bateau hauturier digne de ce nom doit pouvoir être couché sur l'eau sans aucune conséquence pour la tenue du gréement) car si telles sont les raisons, il y a belle lurette que les performances du bateau sont devenues désastreuses. En règle générale, on réduit trop tard : au-delà de force 4, on constate que la plupart des bateaux naviguent surtoilés. Pourquoi cela ?

Il semble que la principale raison vienne du fait que l'on juge plus facilement d'un excès de toile par l'inconfort et la dureté de la barre, que par la chute des performances.

D'autant que dans beaucoup d'esprits, gîte excessive et barre dure restent synonymes de puissance et de rendement !...

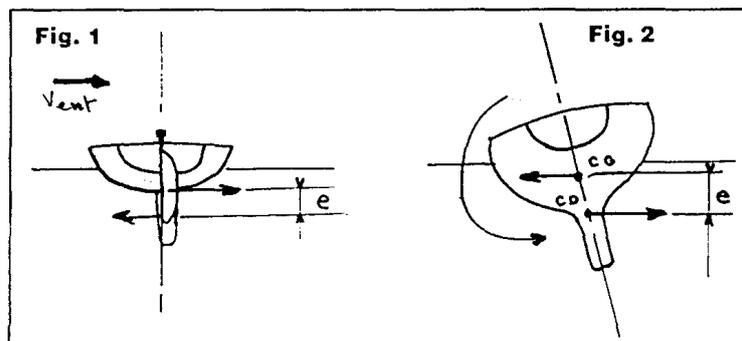
Et c'est pourtant tout le contraire : A chaque degré de gîte, les lignes d'eau de la carène se déforment (dissymétrie) et entraînent des forces de traînée supplémentaires.

Et ce n'est pas rien si on s'amuse à détailler les conséquences d'une gîte excessive :



**Fig. 1 :** Le décalage vertical entre le centre de dérive du safran et de la quille crée un couple chavirant plus réel sur les bateaux modernes que sur les bateaux anciens.

**Fig. 2 :** Le décalage entre le centre de gravité et le centre de dérive entraîne, avec la force centrifuge, un couple chavirant dont le moment dépend de la vitesse de rotation.



entre doublement en action : troisième coup de frein.

□ 4— Le décalage vertical entre la force latérale développée par le safran et celle développée par le plan anti-dérive provoque un moment de chavirement qui vient encore augmenter la gîte : renforcement de ce qui précède et quatrième coup de frein (fig. 1).

□ 5— Dans un coup de lof, la force centrifuge et le décalage entre le centre de gravité et le centre de dérive, créent également un moment inclinant qui s'ajoute au moment de chavirement (encore un coup de frein), et permet de comprendre cet enchaînement de l'aulofée qui conduit si facilement au chavirage (fig. 2).

□ 6— Enfin, le mauvais rendement due à l'inclinaison excessive du plan anti-dérive, fait à la fois déraiper le bateau (la route sur le fond est d'un très mauvais rendement), et entraîne des traînées supplémentaires, par une augmentation d'immersion de la carène inclinée...

De cette énumération, deux remarques essentielles s'imposent :

□ La gîte crée l'aulofée, qui augmente la gîte, qui augmente l'aulofée sous l'action du safran.

Autrement dit, la gîte déforme la carène, qui sollicite le safran, qui entraîne la gîte, qui déforme la carène, etc. Retenons cette règle :

□ Il faut toujours corriger une aulo-fée par une action sur les voiles, et non sur la barre.

La réduction de voilure sera donc le moyen de corriger la tendance au lof, d'un bateau rendu trop ardent par une gîte excessive.

Au près, la gîte est inévitable, et les architectes dessinent des carènes dont les déformations progressives chercheront à n'affecter que le moins possible la progression du voilier, mais il faut bien se dire que ce sera de toute façon au détriment de la vitesse.

De ce point de vue, les comportements seront très différents d'un bateau à l'autre, en fonction préci-

□ 1— L'inclinaison du plan de voilure (lorsqu'il n'est pas excessif, il permet avantageusement de délester les voiles), entraîne un plus grand décalage axial entre la force propulsive et la force de résistance à l'avancement.

Ce décalage provoque un premier couple de rotation, qui tend à faire lofer le bateau et entraîne donc un premier coup de frein dû au safran, qui viendra compenser cette rotation.

□ 2— L'enfoncement de la carène sous le vent (davantage d'eau déplacée) dû à une orientation inclinée de la force vélique, induit une traînée supplémentaire directement déductible de la composante propulsive : deuxième coup de frein.

□ 3— La déformation de la carène (dissymétrie des lignes d'eau) entraîne une rotation du côté opposé à la gîte, qui augmente considérablement la tendance au lof. Le safran

## □ COMMENT RÉDUIRE

L'ordre de réduction, doit avant tout respecter l'équilibre de voilure :

□ Dès que le vent fraîchit, certains bateaux deviennent ardents, alors que d'autres sont au contraire à peine équilibrés. Dans le premier cas, il faudra réduire dans la grand-voile, ou dans l'artimon s'il s'agit d'un ketch, car une réduction dans les voiles d'avant, aurait pour effet de rendre le bateau encore plus ardent, avec la conséquence désastreuse d'une barre maintenue au vent.

□ Dans le second cas, il faudra, au contraire, réduire dans les voiles d'avant, car une réduction dans la grand-voile aurait pour effet de rendre le bateau mou, avec la conséquence d'une perte en cap.

Ainsi, comme ces deux exemples le suggèrent, l'ordre de réduction des voiles doit se faire en fonction de l'équilibre de voilure de chaque bateau et non selon une règle, en fonction des caractéristiques de chaque bateau, de la force du vent, et aussi de l'état de la mer.

Pour ce qui est de ce dernier paramètre, il fait savoir que sur le même bateau, à l'allure du près, et avec la même force de vent, on ne procédera pas à la même réduction de voilure par mer plate et par mer formée.

□ Par mer formée, en effet, le bateau a besoin de puissance sur l'avant, et gagne à être ardent pour lutter efficacement contre l'impact des vagues qui ont tendance à le faire abattre : on réduira donc de préférence dans la grand-voile.

□ Par mer plate, le bateau sera trop ardent, et donc freiné par l'angulation du safran, pour combattre la tendance au lof : on réduira donc de préférence dans les voiles d'avant. Nous notons cette remarque :

Au près, plus que la force du vent, c'est l'état de la mer qui détermine la réduction de voilure.

L'ordre de réduction de voilure pouvant varier en fonction de l'état de la mer, on comprendra aisément qu'il puisse aussi varier en fonction des allures.

En effet, alors qu'au près les bateaux sont toujours ardents et gagnent donc à garder de la puissance sur l'avant, au large et au portant, le décalage de la force propulsive et la tendance à l'enfournement peuvent au contraire, amener à réduire cette puissance sur l'avant.

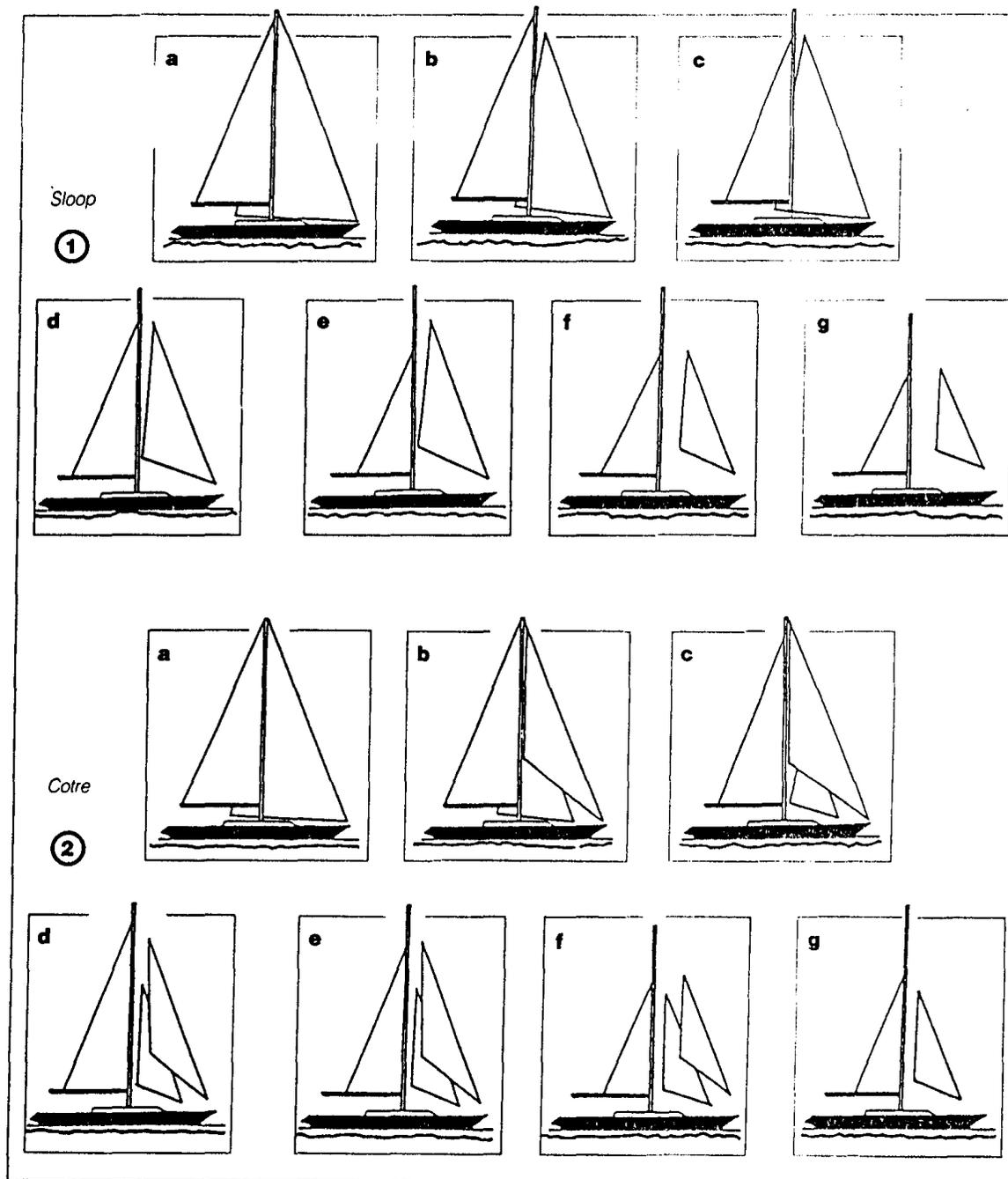
Nous notons donc également cette remarque :

Entre l'attaque frontale des vagues au près, et l'enfournement au portant, la réduction de voilure doit s'adapter à l'allure.

Ceci étant dit, et si dans le principe il est vrai que chaque bateau a son ordre propre de réduction de voilure, dans la pratique, on retrouve une façon de procéder à peu près identique pour chaque grément.

Ainsi, la plupart des sloops et des cotres modernes, après avoir rentré le génois léger pour le foc de route ou le yankee, chercheront à garder le plus longtemps possible cette voile d'avant, en procédant à des réductions de voilure dans la grand-voile, puis en équilibrant les réductions avec des changements de focs.

De même, la plupart des ketchs ou des goélettes modernes, après avoir également rentré leur génois léger, chercheront également à garder le plus de toile possible sur l'avant, en procédant à des réductions dans la grand-voile et dans la misaine (jusqu'à les amener complètement) au profit de l'artimon (ketch) et de la grand-voile (goélette) qui suivent alors une progression de réduction analogue à celle des voiles d'avant



## LE ROULIS RYTHMIQUE

En dehors de toute question de confort il est une forme de roulis qui peut devenir très dangereuse et compromettre la sécurité du voilier et qui pourtant n'a généralement pas pour origine les vagues. Il s'agit du roulis rythmique, dit aussi pendulaire, que l'on observe par vent arrière sous spinnaker et qui conduit souvent au chavirage pour les dériveurs légers ou tout au moins à une aulofée accompagnée d'un coup de gîte jusqu'à 90° pour les plus gros, ce que les Anglais nomment *broaching*.

C'est la hantise de tous les barreaux.

Son mécanisme, relativement simple a été parfaitement mis en évidence par C.A. MARCHAJ à l'Université de Southampton, les deux causes principales en étant d'origine aérodynamique :

— l'auto-excitation des mouvements d'une aile dans son plan par sa portance (phénomène constaté par ailleurs dans le vol des insectes) d'une part;

— la mise en oscillation par l'apparition des tourbillons alternés de BÉNARD et KARMAN (voir *ch. écoulements*) d'autre part.

L'appareillage réalisé par C.A. MARCHAJ permettait de faire osciller une voile, ayant les caractéristiques et les proportions de celles d'un *Finn* à l'échelle 1/5, dans un tunnel aérodynamique en contrôlant la force excitatrice et l'amortissement tout en mesurant la force propulsive développée.

La première constatation a été que même pour une grande amplitude des mouvements la diminution de la force propulsive ne dépassait pas 2 %.

La seconde fut que, une fois le mouvement amorcé, sans autre sollicitation extérieure, le bateau stable statiquement pouvait devenir instable dynamiquement lorsque les sollicitations de la voilure dépassaient les possibilités d'amortissement de la coque ou, en d'autres termes lorsque l'énergie développée par la voilure dans son mouvement latéral ne pouvait être absorbée par la somme des énergies potentielle et cinétique de la carène, c'est-à-dire d'une part son moment de redressement et d'autre part les forces d'amortissement représentées par l'inertie de sa masse (y compris la masse additionnelle), les forces de frottement et les vagues engendrées.

Pour comprendre comment peut se développer l'auto-oscillation reprenons le cas d'un cat-boat au vent arrière (fig. 8-21). Si pour une raison quelconque le voilier amorce un mouvement de roulis (vague, déplacement de l'équipier, etc.), la force et la direction du vent apparent sur la voile vont se trouver modifiées ainsi par conséquent que l'écoulement. De ce fait la direction de la force développée par la voilure va s'orienter dans le sens du mouvement (a) faisant apparaître une composante latérale  $F_y^*$ . L'énergie développée par cette force, ajoutée à celle développée par la force ayant engendré le mouvement initial sera absorbée par l'énergie potentielle développée par le moment de redressement de la carène et les différentes forces d'amortissement.

Le mouvement s'arrêtera donc à un certain angle de gîte avant de repartir en sens opposé sous l'effet de l'énergie cinétique emmagasinée par le voilier au cours du mouvement précédent.

Mais alors l'écoulement sur la voile va s'inverser ainsi que la direction de la force développée par la voilure (b). La nouvelle composante latérale va venir ajouter son énergie à l'énergie cinétique

\* La composante propulsive  $F_x$  peut d'ailleurs à cette occasion se trouver augmentée, en particulier lorsque le vent apparent normal est faible, comme c'est le cas par petit temps. Sa modification due au mouvement de roulis est alors très importante et le procédé serait largement utilisé en régate si les règles de course ne venaient en limiter les possibilités. Le gain sur la force propulsive ne pourra d'ailleurs pas être entièrement utilisé en raison des résistances additionnelles engendrées au niveau de la carène et des appendices par suite de leur déplacement latéral.

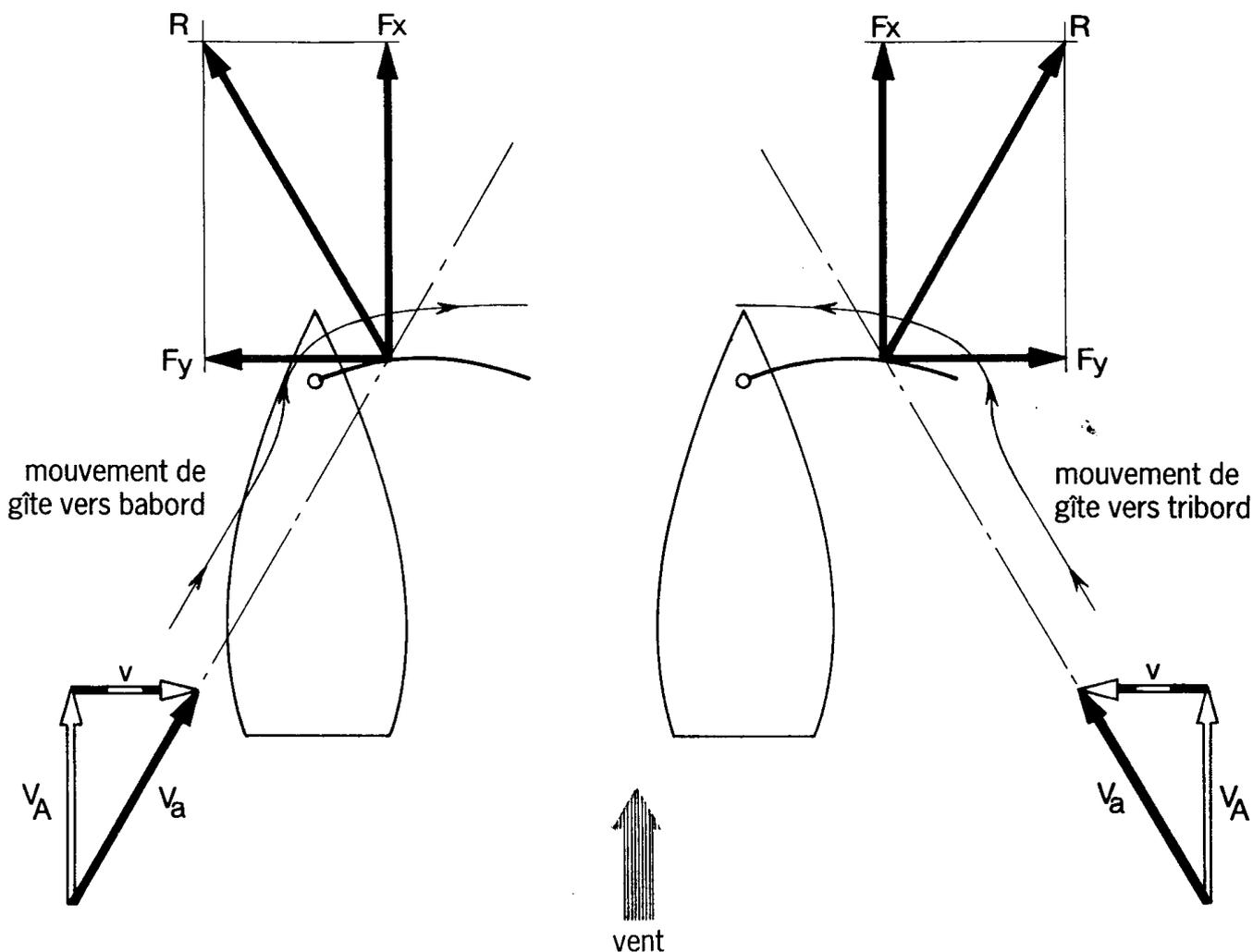


Fig. 8-21 — Selon le bord vers lequel gîte le voilier le vent apparent est modifié en force et surtout en direction ce qui a pour effet d'inverser l'écoulement sur la voile et de faire apparaître une composante latérale de la force de propulsion dans la direction du mouvement.

du voilier. Tant que le moment de redressement et les forces d'amortissement seront capables d'absorber le total de l'énergie mise en œuvre l'amplitude du mouvement sera décroissante (fig. 8-22 a) ou au pire constante (fig. 8-22 b). L'équilibre dynamique sera stable.

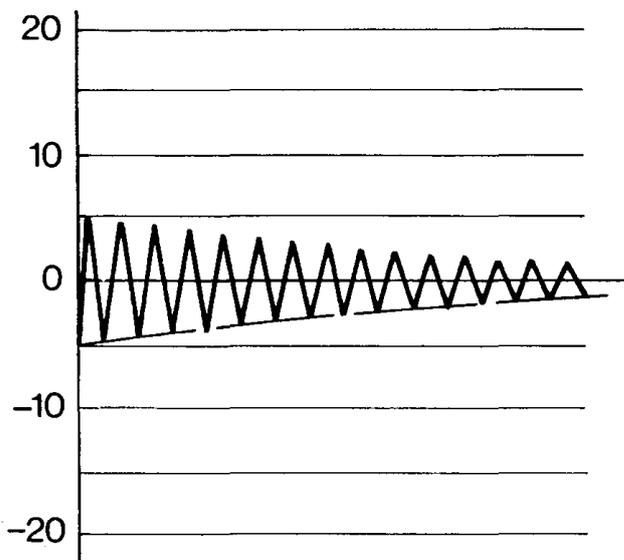
Mais si l'énergie mise en œuvre devient supérieure à celle que peut absorber la coque, l'amplitude du mouvement s'accroît (fig. 8-23) l'équilibre dynamique devient instable ce qui conduit directement au chavirage.

On peut parfaitement se représenter le phénomène à l'aide d'un pendule constitué d'un poids suspendu à une ficelle. Tant que les poussées

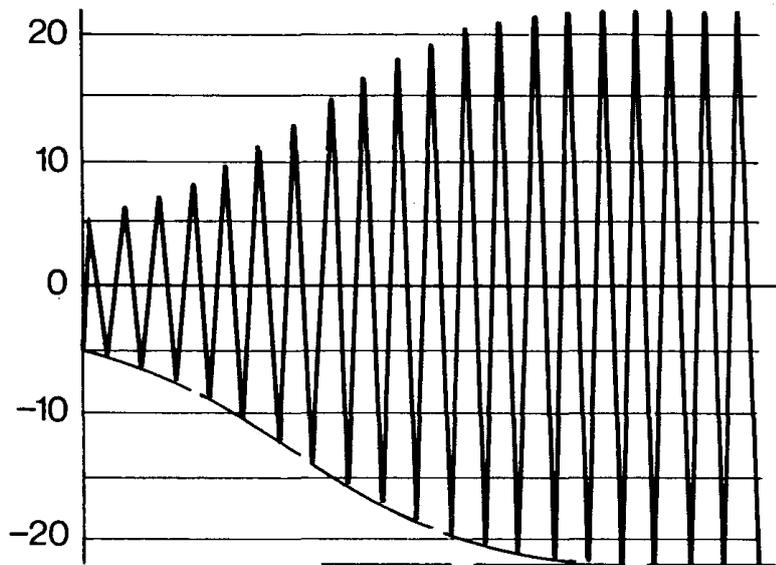
latérales exercées sur le poids restent modérées par rapport à l'impulsion initiale, l'amplitude des débats ira en diminuant. Un peu plus fortes, l'amplitude restera constante. Plus fortes encore et le pendule pourra aller jusqu'à faire le tour complet.

Un élément important qui dépend directement de la responsabilité du barreur vient encore aggraver l'effet néfaste de la voilure.

Au cours des mouvements de roulis, l'écart latéral entre force propulsive et résistance de la carène va varier, de même la dissymétrie des formes va entraîner un moment de giration, l'équilibre de route va donc se modifier conti-



a



b

Fig. 8-22 — L'équilibre est stable lorsque l'amplitude des mouvements de roulis décroît (a) ou au pire atteint une valeur d'équilibre (b).

nuellement entraînant un mouvement de lacet, le bateau ayant tendance à loffer du côté opposé au sens du roulis. La réaction instinctive du barreur sera donc de donner de la barre du côté où le bateau loffe. Malheureusement, ce faisant, il a toutes les chances, ainsi que nous l'avons vu au chapitre VII-1-c, de provoquer ainsi l'apparition d'un moment de chavirement supplémentaire auquel viendra encore s'ajouter l'effet de la force centrifuge.

Sur un dériveur cependant où l'action sur la barre peut être instantanée et facilement contrôlée, et la hauteur de la force exercée par le safran peut se trouver assez haute lorsque le safran est relevé, le contrôle par la barre peut être possible.

Sur un quillard il n'en est pas toujours ainsi et le pauvre barreur est souvent bien incapable de réprimer un geste tout instinctif et d'assurer à ses mouvements le déphasage nécessaire. Ce n'est d'ailleurs pas à lui qu'appartient la meilleure possibilité de réduire les effets du roulis pendulaire mais au régleur des voiles.

Sur ce point C.A. MARCHAJ a pu tirer des enseignements intéressants de l'étude de la variation de l'angle de réglage des voiles.

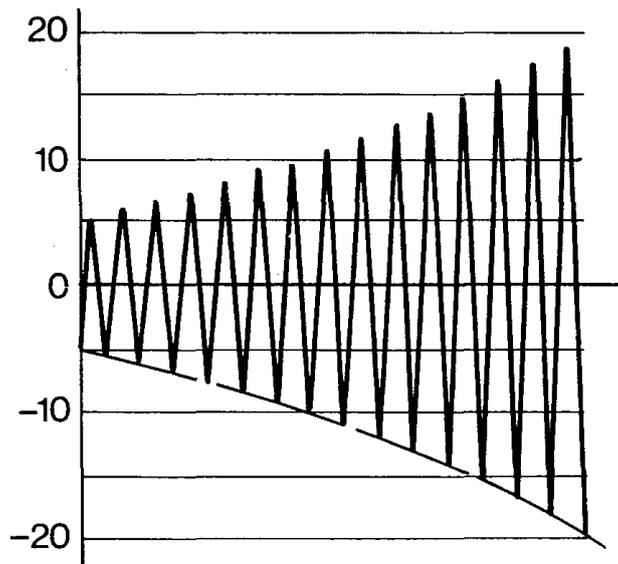


Fig. 8-23 — L'équilibre est instable lorsque l'amplitude des mouvements ne cesse de croître.

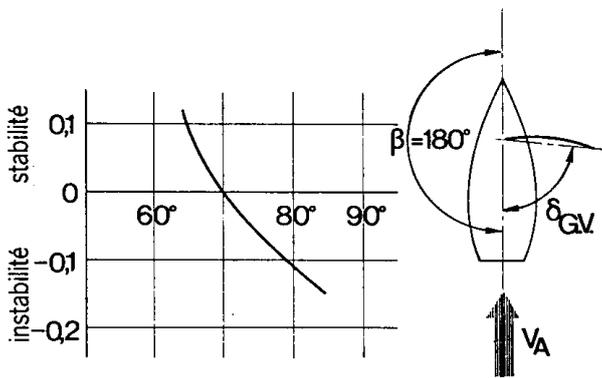


Fig. 8-24 — Vent arrière, la réduction de l'angle d'ouverture de la grand-voile permet de passer de la situation instable à la situation stable.

La figure 8-24 montre comment l'on peut ainsi passer de l'instabilité à la stabilité dynamique en bordant la grand-voile.

Des résultats analogues peuvent être obtenus en modifiant la route par rapport au vent (fig. 8-25). Ces deux possibilités pouvant être combinées pour choisir la route optimum.

Lorsque le voilier est suffisamment petit pour que l'écoute de grand-voile puisse être manœuvrée rapidement on pourra utiliser une méthode « dynamique » assurant un contrôle efficace et rapide du roulis pendulaire.

Elle consiste à border la voile rapidement au cours du mouvement de roulis au vent et à la choquer lorsqu'il repart sous le vent.

On agit ainsi d'une part sur la direction de la force propulsive, réduisant sa composante latérale, d'autre part on augmente l'effet amortisseur de la voilure.

Reste à savoir maintenant quels sont les « fauteurs de trouble » qui engendrent le mouvement pendulaire et s'il est possible d'éviter leur apparition.

Nous verrons au paragraphe suivant les effets des vagues sur les mouvements composites de la carène. Il est bien évident que l'on évitera tout déplacement de l'équipage qui pourrait entraîner un mouvement de roulis, mais c'est en définitive au niveau de l'écoulement de l'air sur les voiles que se trouve la cause principale, en particulier avec l'usage du spinnaker.

Au chapitre nous avons vu comment pour un nombre de REYNOLDS variant entre 150

et 2 500 se produisait dans le sillage d'un cylindre un régime de tourbillons alternés (fig. 2-18). On retrouve ce régime très facilement sur l'arrière d'une voile et en particulier d'un spinnaker (fig. 8-26).

Du fait de la vitesse de rotation du tourbillon attaché un écoulement vers ce tourbillon se produit entraînant l'apparition d'une force transversale. Celle-ci se réduit au fur et à mesure que le tourbillon s'écarte, puis s'inverse lorsque se crée, sur l'autre bord, le tourbillon suivant.

Le spinnaker est donc sollicité alternativement dans les deux sens ce qui engendre le mouvement pendulaire (fig. 8-27).

Deux éléments vont venir aggraver son action.

D'une part, si les bras et écoute sont relativement peu bordés et surtout si la drisse n'est pas à bloc, le spinnaker sera libre d'osciller sur chaque bord, augmentant ainsi la variation de la direction de sa force propulsive, déjà modifiée par celle de son vent apparent. Le premier moyen de réduire les effets des tourbillons alternés sera donc de brider bras et écoute, de baisser le tangon et de veiller à ce que la drisse soit hissée à bloc.

D'autre part, l'amplitude du roulis sera d'autant plus aggravée que la période des tourbillons sera plus proche de la période propre de roulis du voilier. Comme il est malheureusement difficile de modifier celle-ci il n'y a pas grand-chose à faire de ce côté.

On peut dire simplement que les grands voiliers seront souvent sujets plus tôt au roulis pendulaire,

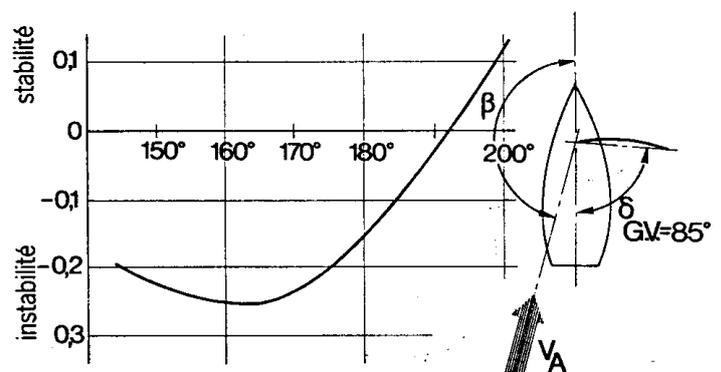


Fig. 8-25 — Passage de la situation d'instabilité à la situation de stabilité par modification du cap par rapport au vent apparent, pour un angle d'ouverture de la grand-voile constant.

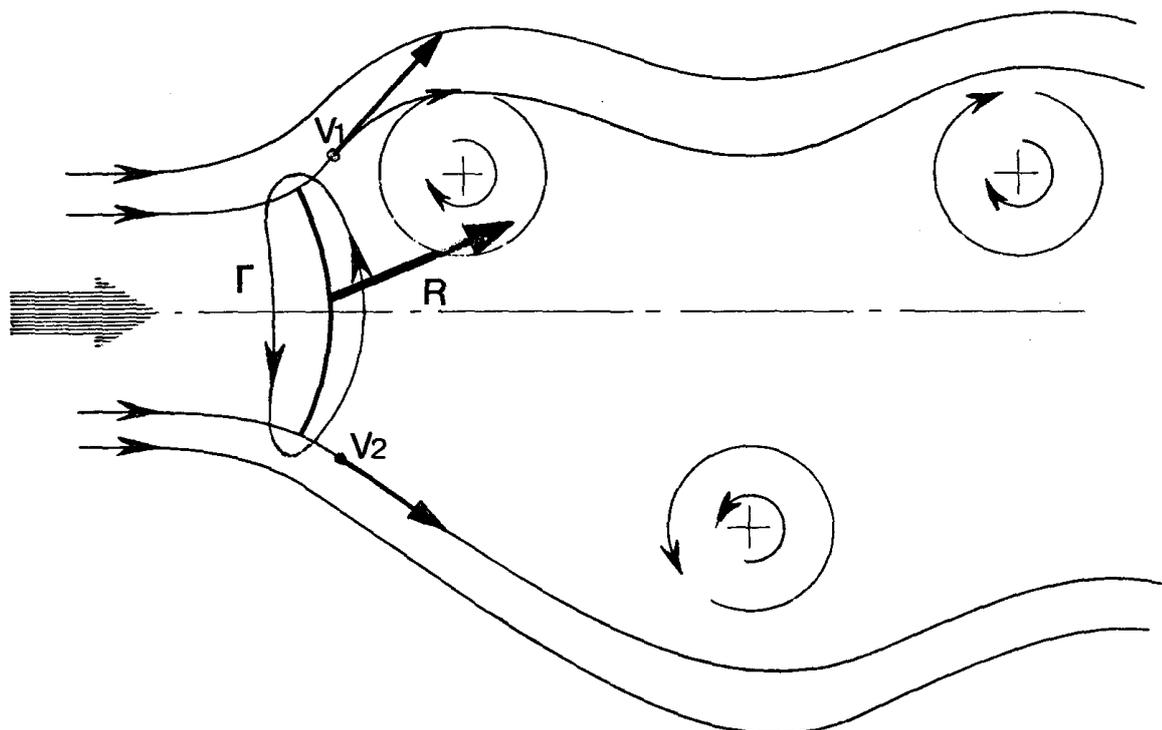


Fig. 8-26 — La formation de tourbillons alternés derrière une voile entraîne une différence de vitesse entre les écoulements  $v_1$  et  $v_2$  qui provoque une circulation autour de la voile et l'inclinaison de la résultante  $R$  alternativement sur un bord puis sur l'autre.

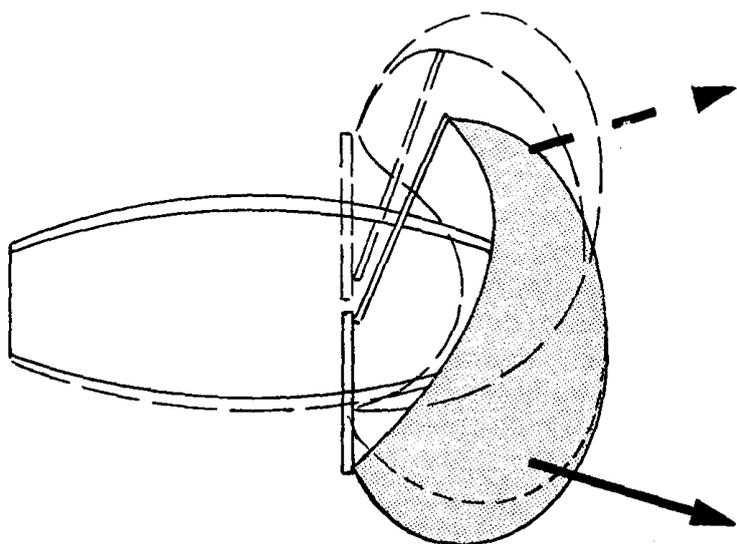


Fig. 8-27 — La modification de l'orientation de la force propulsive provoquée par la formation des tourbillons alternés est aggravée par la déformation de la voile vers le côté gité.

surtout si leur période propre est plus longue, que des petits voiliers à période courte. Mais ces derniers ayant une plus faible réserve de stabilité dynamique, les effets seront parfois plus rapides et plus graves.

Un moyen important de retarder l'apparition du roulis pendulaire réside, au niveau de la voilure, dans l'adjonction au spinnaker de voiles complémentaires qui, par leur présence, modifient l'écoulement de l'air et empêchent la formation des tourbillons alternés.

C'est d'abord la trinquette haute ou le tall-boy amuré sur la lisse au vent mais c'est surtout le big-boy qui semble le plus efficace en prolongeant la chute du spinnaker, à condition de ne pas chercher à lui donner un guindant de trop grande longueur qui l'écarte trop de celui-ci.

Le roulis pendulaire est sans doute un des problèmes les plus difficiles à résoudre au niveau de la conduite du bateau en raison du fait qu'il repose sur trois variables :

- période propre du voilier,
- période des tourbillons alternés,
- période de rencontre des vagues.