

CALCUL et TRACÉ des CARÈNES

(2 Parties)

D'après le document
de Jean ANGELI



Édition de 1942 —

SANS

JEAN ANGELI

Jean SANS
Expert Maritime près Cour d'Appel
de RENNES
PIECE N° _____

LE CALCUL DES CARÈNES

LIBRAIRIE MARITIME « Le Yacht »

55, Avenue de la Grande-Armée

PARIS XVI^e — 727-75-19

Copyright

LE CALCUL DES CARENES

1.- INTRODUCTION

Le calcul des carènes a pour objet la détermination, d'après le plan des formes, des caractéristiques géométriques et mécaniques d'une coque, telles que le déplacement, la position du centre de poussée, la valeur du moment de redressement aux différentes inclinaisons.

Le calcul de ces éléments relève de la Théorie du Navire, qui constitue un important chapitre de mécanique rationnelle et de géométrie appliquée à l'Art Naval.

La littérature technique ne manque pas d'excellents traités de théorie du Navire, mais les auteurs de ces ouvrages ayant principalement en vue le calcul des grands bâtiments, proposent généralement des méthodes certes fort précises mais d'une mise en œuvre longue et délicate.

L'appareil de calcul, comme tout instrument de mesure, doit être approprié au but poursuivi. Il est inutile de calculer avec la précision requise pour un croiseur de 10.000 Tonnes, la carène d'un yacht de 3 Tonnes à bord duquel le seul embarquement d'un passager supplémentaire fera varier de 2 à 3 % le déplacement prévu.

Or l'Architecte naval, qu'il s'agisse du professionnel, ou de l'amateur consacrant des loisirs toujours mesurés au dessin de ses futurs bateaux, ne dispose presque jamais du personnel nécessaire au calcul détaillé des carènes.

Il apparaît ainsi nécessaire de mettre à la disposition du dessinateur de yachts des méthodes de calcul sans doute moins rigoureuses que celles des Bureaux de la Marine, mais incomparablement plus expéditives.

L'exposé de ces méthodes fait l'objet de ce fascicule où l'on n'envisage que les calculs strictement nécessaires à l'élaboration d'un projet.

Les divisions de cet ouvrage sont l'image du processus logique du calcul d'une carène.- Partant du plan des formes, on détermine tout d'abord le déplacement, puis la surface de dérive et la surface mouillée qui renseigneront ultérieurement sur les possibilités de propulsion.- On étudie ensuite les caractéristiques de stabilité transversale depuis la position droite jusqu'au chavirement, laissant volontairement dans l'ombre la stabilité longitudinale dont l'étude ne paraît pas indispensable dans le cas d'un yacht de petit tonnage.

L'ensemble, dont la compréhension ne nécessite aucune préparation mathématique particulière, est constamment illustré d'applications numériques relatives au yacht de croisière dont le plan a été élaboré dans une précédente étude de cette collection (1).

(1) Jean ANGELI : Le Tracé des Carènes
Fascicule 1 - Yachts de Croisière
Fascicule 2 - (en préparation) Cruisers et Vedettes

PREMIERE PARTIE

CALCUL DES CARENES DROITES

2.- FLOTTABILITE

La qualité fondamentale d'un navire de surface est la flottabilité. - Archimède (287-212 Av.J.C.) en a, le premier, indiqué le principe: "... Tout corps plongé dans un liquide subit une poussée verticale, dirigée de bas en haut, passant par le centre de gravité du volume immergé et égale au poids du volume de liquide déplacé...".

En désignant par :

V le volume immergé de la carène en M^3

Δ le poids du volume d'eau V en Tonnes (1000 Kg)

P le poids du Navire en Tonnes

a la densité de l'eau = 1 pour l'eau douce et
1,026 pour l'eau de mer.

La condition de flottabilité d'un navire se traduit par :

$$(1) \quad P = \Delta = a V$$

Δ est usuellement désigné sous le nom de DEPLACEMENT.

En raison du caractère impératif de l'équation précédente, le premier soin de l'Architecte venant de tracer un plan de formes est de s'assurer que le déplacement de la carène est bien égal au poids prévu du bâtiment en armement normal.

Le calcul d'une carène commence donc obligatoirement par la détermination du volume V de la carène limitée à la flottaison tracée sur le plan.

Les formes des navires évoluant de façon arbitraire de l'avant à l'arrière, ce volume ne peut être calculé au

moyen de formules simples comme l'on ferait d'un cylindre ou d'un cône, par exemple.

Toutefois, quelles que soient les formes d'une carène de longueur de flottaison L (mètres) et de volume V (m^3), on peut toujours imaginer un cylindre fictif de section droite S_0 (m^2) telle que :

$$(2) \quad V = S_0 \cdot L$$

Le problème consiste donc à définir la section moyenne S_0 des couples immersés. On la détermine en traçant (fig.1) le

diagramme $O M C$ des aires des couples afin d'en déduire l'aire moyenne $A_0 = S_0$ telle que la surface du rectangle $O A B C$ soit égale à la surface du contour curviligne $O M C$.

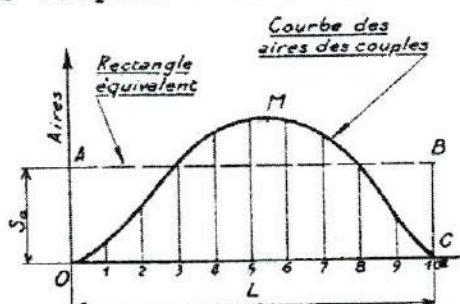


Fig.1

ou courbe des aires des couples). - Le problème consiste donc à calculer une surface limitée par un contour curviligne quelconque.

3.- MESURE DES SURFACES A L'AIDE DU PLANIMETRE

Le planimètre, dont le modèle d'Amsler (Fig.2) est le plus répandu, se compose essentiellement de deux tiges AB et CD articulées en C . - L'extrémité A de la plus longue

des tiges porte une pointe que l'on fixe en un point quelconque du plan de la figure, en dehors du contour à planimétrer.

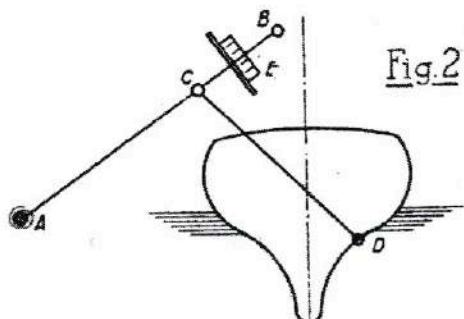


Fig.2

et un compteur de tours E .

L'extrémité D de l'autre tige porte une pointe mousse avec laquelle on décrit à la main le contour de la courbe. Sur la branche $C B$ sont montés une roulette appuyant sur le papier

On démontre que, lorsque la pointe D a parcouru dans un sens constant le contour de la courbe et est revenue au point de départ, l'indication du compteur est proportionnelle

à la surface inscrite dans le contour.

Les planimètres permettent des mesures très rapides et suffisamment précises entre les mains d'opérateurs soigneux, mais ils ne peuvent être utilisés que sur des plans à petite échelle, comportant donc d'inévitables erreurs de tracé, et ils ne laissent aucune trace des opérations, ce qui rend difficile la recherche d'une erreur éventuelle.

Pour ces diverses raisons, il est recommandable de limiter l'usage du planimètre aux avant-projets, et de calculer effectivement les aires à planimétrer dans le cas de projets définitifs.

4.- CALCUL DES AIRES PAR LA METHODE DES TRAPEZES

Cette méthode consiste à diviser la surface en tranches d'égale largeur et à assimiler les surfaces élémentaires ainsi obtenues à des trapèzes.

Les aires des surfaces élémentaires sont ainsi (Fig.3):

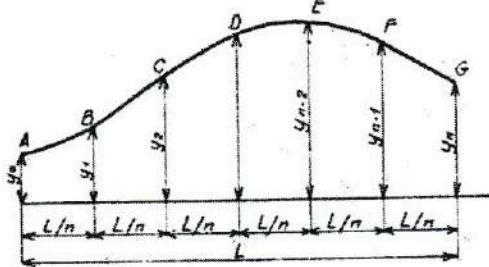


Fig.3

$$\frac{L}{n} \left(\frac{y_0 + y_1}{2} \right)$$

$$\frac{L}{n} \left(\frac{y_1 + y_2}{2} \right)$$

$$\frac{L}{n} \left(\frac{y_{n-2} + y_{n-1}}{2} \right)$$

$$\frac{L}{n} \left(\frac{y_{n-1} + y_n}{2} \right)$$

d'où la formule générale donnant la somme des aires élémentaires :

$$(3) \quad S = \frac{L}{n} \left(\frac{y_0}{2} + y_1 + y_2 + \dots + y_{n-1} + \frac{y_n}{2} \right)$$

5.- CALCUL DES AIRES PAR LA METHODE DE TCHEBYCHEV

La méthode des trapèzes ne donne des résultats suffisamment exacts qu'au prix d'un assez grand nombre de divisions, au moins 10 pour les calculs usuels. Elle exige donc des tableaux de calculs relativement importants et de multiples relevés d'ordonnées sur le plan, accroissant ainsi les chances d'erreurs.

Le Mathématicien Russe TCHEBYCHEV (1821-1894) a in-

diqué en 1874 un procédé de quadrature beaucoup plus expéditif à précision égale. - Suivant ce procédé, les ordonnées ne sont plus équidistantes mais distribuées suivant une répartition qui ne dépend que de leur nombre.

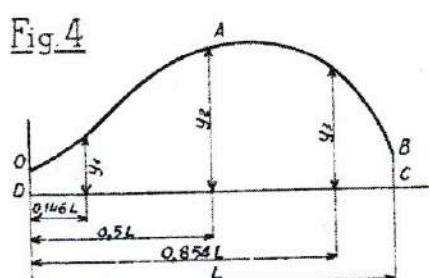
L'aire du contour est égale au produit de la base L par la moyenne arithmétique des ordonnées.

Le tableau ci-dessous donne les coefficients K de répartition des ordonnées.

TABLEAU I

Nombre d'ordonnées	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	K ₈	K ₉
2	0,211	0,789							
3	0,146	0,500	0,854						
4	0,103	0,406	0,594	0,897					
5	0,083	0,312	0,500	0,687	0,916				
6	0,067	0,289	0,367	0,633	0,711	0,933			
7	0,058	0,236	0,338	0,500	0,662	0,764	0,942		
9	0,044	0,199	0,236	0,416	0,500	0,584	0,764	0,800	0,956

La figure 4 montre à titre d'exemple comment doivent être distribuées les ordonnées d'une courbe dont on cherche la surface suivant la méthode de TCHERBYCHEV avec 3 divisions :



appréciable. On peut, en effet

Dans cet exemple, l'aire inscrite dans le contour O A B C D est :

$$S = L \left(\frac{y_1 + y_2 + y_3}{3} \right)$$

La distribution inégale des ordonnées ne constitue pas une difficulté d'exécution construire sur un fond milli-

métré un abaque donnant automatiquement en fonction de la longueur L de la base la distance de l'origine à laquelle doivent être mesurées les diverses ordonnées, lorsqu'on a fait choix d'un nombre donné de divisions.

La fig.5 montre un tel abaque construit pour 5 divisions.

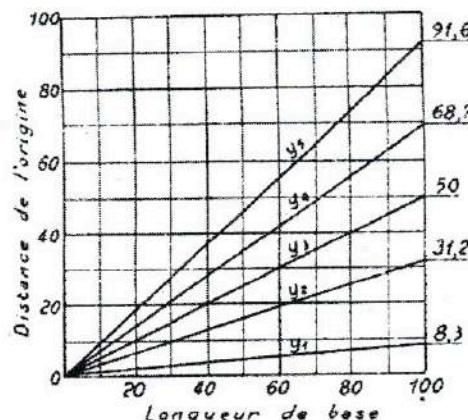


Fig.5

6.- COMPARAISON DES METHODES DES TRAPEZES ET DE TCHEBYCHEV.

Lorsqu'on calcule au moyen des deux procédés précédents les surfaces de contours géométriques parfaitement définis, on constate qu'à égalité de précision, la méthode de TCHEBYCHEV exige quatre à cinq fois moins d'ordonnées que la méthode des Trapèzes.

Le Tableau ci-dessous donne les résultats comparés dans le cas d'un cercle de rayon $R = 1$ et d'une ellipse de grand axe : 1 et de petit axe = 0,15.

	Ellipse S exacte = 0,1178		Cercle S exacte = 1,571	
	Calcul	Erreur	Calcul	Erreur
Tchébychev 5 divisions	0,1189	0,9%	1,575	0,3%
Trapèzes 20	0,1164	1,15%	1,564	0,4%
10			1,552	1,2%
5			1,519	3,3%

Ces exemples que l'on multiplierait aisément nous ont conduit à utiliser uniquement la méthode de TCHEBYCHEV pour les calculs de carènes, en limitant à 5 le nombre d'ordonnées.

7.- CALCUL DE L'AIRE D'UN COUPLE.

On considère à titre d'exemple le couple 5 du yacht-type (fig.6).

On relève sur un diagramme analogue à celui représenté figure 5 les distances entre le plan de flottaison et

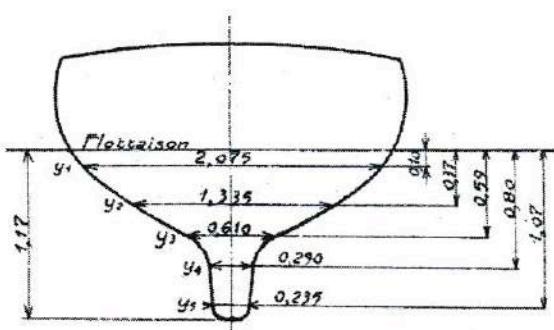


Fig. 6

les diverses ordonnées pour une profondeur de carène $H = 1.17$ M.

On mesure les ordonnées correspondantes sur le plan de formes, ce qui permet d'établir le tableau ci-dessous donnant immédiatement la valeur de l'aire du couple.

TABLEAU 2

Numéro du couple	5
Profondeur de carène = H	1,17
$H/5$	0,234
Ordonnées aux divisions :	
1	2,075
2	1,335
3	0,610
4	0,290
5	0,235
Somme des ordonnées = A	0,585
Aire du couple = $S = AH/5$	1,062

On calcule ainsi l'aire de chaque couple figuré sur le plan de formes, soit 9 couples dans le cas considéré.

Pour faciliter les opérations, on groupe les relevés et les calculs sur un même tableau. (Tableau 16 in-fine).

8.- COURBE DES AIRES DES COUPLES

Ayant ainsi calculé les aires des différents couples immergés de la carène, on construit (Fig.7) le diagramme des aires des couples, portant en abscisses, et à l'échelle près, les emplacements des couples de tracé et, en ordonnées, des segments proportionnels aux aires précédemment calculées.

La courbe ainsi obtenue doit être parfaitement continue et légèrement pincée aux deux extrémités. Si le tracé révèle des irrégularités sensibles, il faut tout d'abord vérifier les mesures et calculs relatifs aux points douteux, et si l'on ne relève pas d'erreurs de ce côté, revoir le plan des formes.

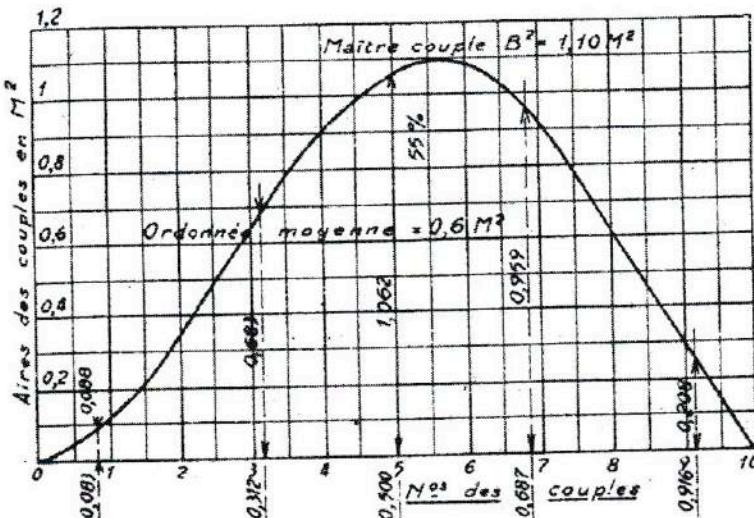


Fig. 7

A cet égard, la courbe des aires des couples du yacht considéré semble insuffisamment pincée dans la partie arrière. Il y aurait intérêt, lors d'un tracé définitif, à diminuer légèrement les sections des couples 8 et 9, ce qui aurait pour conséquence heureuse d'adoucir la coulée arrière et d'accroître l'harmonie des formes de la carène proprement dite et de la voûte dont elle doit constituer le prolongement naturel.

9.- CALCUL DU DEPLACEMENT

Ainsi qu'il a été dit au paragraphe 2, on détermine la section moyenne S_0 des couples immersés. Appliquant à la courbe des aires des couples (Fig. 7) la méthode de TCHEBYCHEV, on part sur ce diagramme n divisions réparties comme le spécifie le Tableau 1.- On mesure les ordonnées correspondantes dont la moyenne est égale à S_0 .

Le déplacement est calculé par la formule (2)

$$(2) \quad \Delta = \alpha V = \alpha S_0 L$$

TABLEAU 3

N° de la division	Ordonnées S (M^2)
1	0,088
2	0,683
3	1,062
4	0,959
5	0,208
Somme = Σ	3,000
$S_0 = \Sigma / 5$	0,60

Le volume de la carène est :

$$V = S_0 L = 0,6 \times 6 = 3,6 M^3$$

Le déplacement en eau douce est :

$$\Delta = 3,6 \times 1 = 3,6 \text{ Tonnes}$$

et, en eau salée, de densité $\alpha = 1,026$,

$$\Delta' = 3,6 \times 1,026 = 3,69 \text{ tonnes}$$

10.- AIRES DES LIGNES D'EAU ET VERIFICATION DU DEPLACEMENT

On vient de calculer le déplacement en assimilant la carène à un cylindre de section droite égale à la section moyenne des couples. On peut vérifier le déplacement ainsi calculé en assimilant la carène à un cylindre d'axe vertical et de section droite égale à la section moyenne des lignes d'eau.

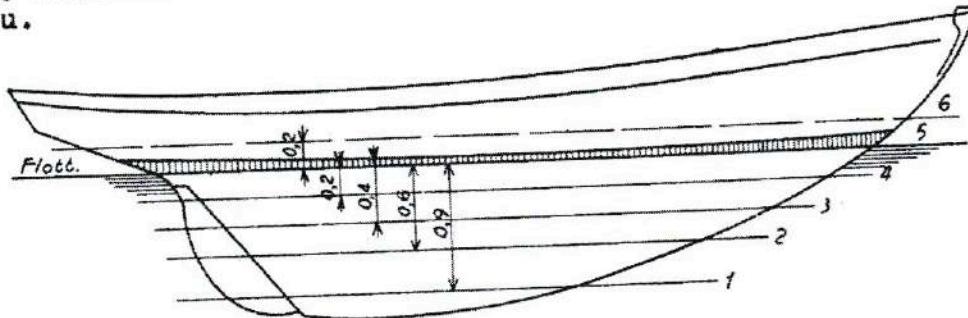


Fig. 8

La figure 8 montre la répartition des lignes d'eau considérées, soit 4 lignes d'eau immergées, la ligne N°5 correspondant à la flottaison, et, à titre documentaire, une ligne d'eau N°6 située au-dessus de la flottaison.

Le tableau 4 donne le détail des relevés et du calcul.;

TABLEAU 4

Numéro de ligne d'eau	1	2	3	4	5	6
d	0,9	0,6	0,4	0,2	0	-0,2
λ	3,56	4,62	4,73	5,32	6,00	6,73
Ordonnées aux divisions						
1	0,126	0,088	0,352	0,712	1,072	1,168
2	0,328	0,360	1,052	1,760	2,172	2,240
3	0,276	0,592	1,192	1,840	2,212	2,360
4	0,192	0,552	0,972	1,412	1,740	1,960
5	0,090	0,192	0,328	0,432	0,572	0,652
Somme Σ	1,012	1,784	3,896	6,156	7,768	8,380
Aire - $\lambda \Sigma / 5$	0,72	1,64	3,67	6,55	9,32	11,28

On construit ensuite le diagramme des aires des lignes d'eau (Fig.9) montrant la variation des surfaces horizontales immergées en fonction de leur distance au plan de flottaison. Ce diagramme, analogue au diagramme des aires des couples (fig.7) doit présenter une régularité satisfaisante. On calcule son ordonnée moyenne comme l'indique le tableau suivant.

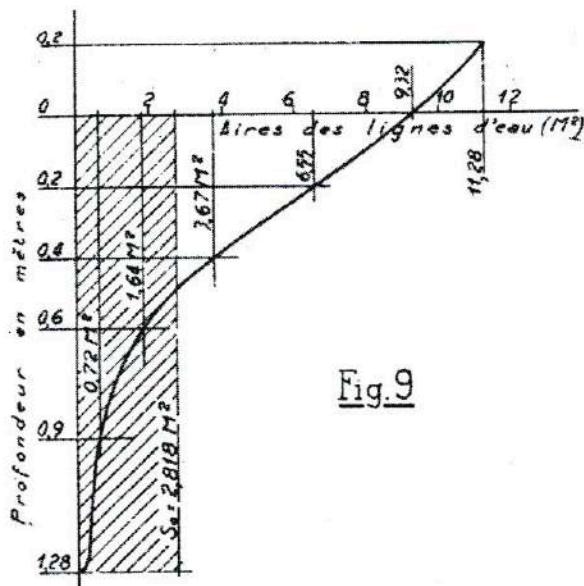


Fig.9

TABLEAU 5

Numéro de la division	Ordonnées S en M^2
1	0,28
2	0,74
3	1,45
4	3,67
5	7,98
Σ	14,09
$S_0 = \Sigma / 5$	2,818

Le volume de la carène est le produit de l'ordonnée moyenne par le tirant d'eau, soit :

$$V = 2,818 \times 1,28 = 3,60 M^3$$

ce qui vérifie exactement la valeur de V précédemment calculée.

On note, d'autre part, sur le diagramme fig.9 l'aire de la flottaison en charge, soit 9.32 m^2 . On en déduit que toute variation de 1 centimètre du tirant d'eau au voisinage de la flottaison normale se traduira par une variation du déplacement égale à :

$$9,32 \times 0,01 \times 1,026 = 0,095 \text{ Tonne} = 95 \text{ Kg.}$$

III.- ECHELLE DE DEPLACEMENT

L'échelle de déplacement, dont l'intérêt est plus marqué pour les navires de commerce que pour les yachts est un diagramme indiquant le déplacement correspondant aux différents tirants d'eau.

Etant donné le caractère approximatif des renseignements demandés à ce diagramme dans le cas d'un yacht, on calculera exceptionnellement l'échelle de déplacement par la méthode des Trapèzes. Partant du volume $V = 3,60 \text{ M}^3$ de la carène en flottaison normale, on ajoutera ou on retranchera de ce volume le volume moyen de tranches d'épaisseur modérée (10 centimètres) dont la section droite sera relevée sur le diagramme des aires des lignes d'eau. On limitera, pratiquement, les variations considérées du tirant d'eau au 1/4 de sa valeur normale.

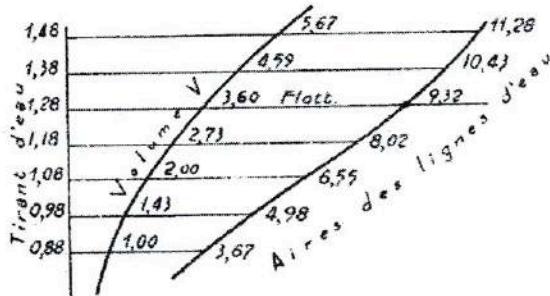


Fig. 10

La figure 10 montre le relevé des aires des lignes d'eau et la tracé de la courbe de déplacement résultant du tableau de calcul ci-dessous ; ayant admis 10 centimètres pour équidistance des lignes d'eau.

TABLEAU 6

Tirant d'eau (m)	0,88	0,98	1,08	1,18	1,28	1,38	1,48
Aire ligne d'eau (m^2)	3,67	4,98	6,55	8,02	9,32	10,43	11,28
Aire supér ou infér.	4,98	6,55	8,02	9,32	9,32	9,32	10,43
Somme- Σ	8,65	11,53	14,57	17,34	Base	19,75	21,71
$0,1 \Sigma / 2 (\text{m}^3)$	0,43	0,57	0,73	0,87		0,99	1,08
Volume (m^3)	1,00	1,43	2,00	2,73	3,60	4,59	5,67

L'échelle de déplacement permet, à la condition que la coque reproduise bien les formes du plan, d'apprécier par

lecture directe l'état de chargement du bateau dont on a mesuré le tirant d'eau effectif.

Elle permet également d'apprécier si le déchargement du lest mobile disponible permet de faire flotter un bateau échoué. Dans l'exemple considéré, en admettant que le yacht soit échoué par fond de 1,20 mètres mesuré à la sonde, on note sur le diagramme qu'un tirant d'eau de 1,20 mètre correspond à un volume $V = 2,90 \text{ m}^3$, inférieure de $0,70 \text{ m}^3$ au volume normal. En débarquant donc (eau de mer) $0,7 \times 1,026 = 718 \text{ Kg.}$ de lest, le bateau se retrouvera à flot.

12.- LE CENTRE DE CARENE

Le principe d'Archimède spécifie (paragraphe 2) que la poussée hydrostatique passe par le centre de gravité du volume immergé. La connaissance de ce point dit CENTRE DE CARENE est, comme on le verra plus loin, indispensable à l'étude de la stabilité du navire.

On sait que, par raison de symétrie, le centre de carène C_c du navire droit se trouve dans le plan longitudinal médian. On détermine sa position dans ce plan (Fig.11) par

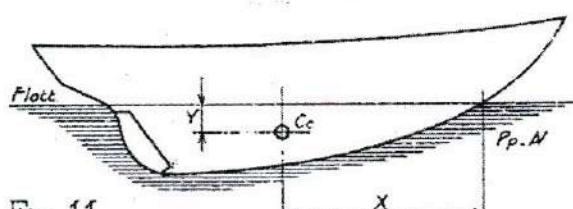


Fig.11

deux coordonnées, l'une X comptée horizontalement à partir de la perpendiculaire avant, l'autre Y , comptée à partir du plan de flottaison.

L'analyse des diagrammes des aires des couples (fig.7) et des aires des lignes d'eau (fig.9) permet de déterminer facilement X et Y .

En effet, à l'échelle près, X est égal à la distance du centre de gravité du diagramme des aires des couples à l'origine O des axes de ce diagramme. De même Y pour le diagramme des aires des lignes d'eau.

Le calcul de X et Y consistera donc à multiplier chaque ordonnée des tableaux 3 et 5 par sa distance à l'axe de référence ou, ce qui revient au même, par le coefficient K du tableau de TCHEBYCHEV (paragraphe 5), puis à diviser la somme de ces moments élémentaires par la somme des ordonnées considérées.

Il suffit pour cela de compléter les tableaux 3 et 5 comme suit :

TABLEAU 7

Numéro de la division	Valeur de K (Tableau 1)	Aires des Couples		Aires des lignes d'eau	
		Ordonnée S	Produit KS	Ordonnée S	Produit KS
1	0,083	0,088	0,007	7,98	0,662
2	0,312	0,683	0,214	3,67	1,145
3	0,500	1,062	0,531	1,45	0,725
4	0,687	0,959	0,658	0,74	0,508
5	0,916	0,208	0,190	0,28	0,257
Somme de S = Σ		3,000	-----	14,09	-----
Somme de KS = M		-----	1,600	-----	3,297

La longueur de flottaison étant $L = 6 \text{ m}$ et le tirant d'eau $T = 1,28 \text{ m}$, les coordonnées du centre de carène sont :

$$X = ML / \Sigma = 6 \times 1,6 / 3 = 3,20 \text{ M} \text{ soit } 53,3 \% L$$

$$Y = MT / \Sigma = 1,28 \times 3,297 / 14,09 = 0,30 \text{ M}$$

13.- SURFACE ET CENTRE DE DERIVE

La surface de dérive est délimitée par la projection, sur le plan longitudinal, du contour immergé de la carène. Il est utile d'en mesurer l'aire pour la comparer ultérieurement à la surface de la voilure afin d'estimer si le plan de dérive est suffisamment développé pour retenir efficacement le bateau sous voiles.

Il est surtout nécessaire de connaître la distance entre la perpendiculaire avant et le centre de gravité de la surface latérale ou CENTRE DE DERIVE. Ce Centre doit, en effet, toujours être en arrière de la perpendiculaire milieu et d'autant plus éloigné de cette dernière que le bateau est plus petit. Le centre de voilure doit, d'autre part, être en avant du centre de dérive, à une distance variant de 6 à 7 % de la longueur de flottaison pour les petits côtres à 1,5 % ou 2 % pour les grands voiliers de charge.

La surface de dérive n'ayant pas besoin d'être con-

nue avec une très grande précision, on la calculera suivant la méthode des trapèzes en relevant à cet effet, à chaque couple de tracé, sur le plan des formes les cotes H et X représentées fig.12.

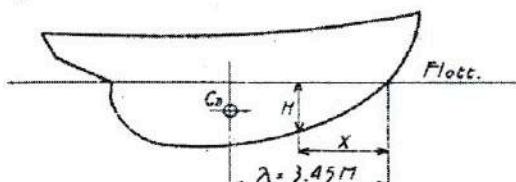


Fig.12

Le Tableau 8 montre la disposition du calcul qui ne présente aucune difficulté.

TABLEAU 8

Numéro du Couple	H mètres	X mètres	HX
0	0	0	0
1	0,343	0,6	0,21
2	0,600	1,2	0,72
3	0,826	1,8	1,42
4	1,015	2,4	2,44
5	1,170	3,0	3,51
6	1,240	3,6	4,47
7	1,260	4,2	5,28
8	1,280	4,8	6,15
9	1,280	5,4	6,90
10	0	6	0
Somme de H = Σ	9,014		
Somme de HX = M			31,10

$$\text{Surface de dérive : } S_d = \Sigma L / 10 = 9,014 \times 6 / 10 = 5,41 M^2$$

Distance du centre de dérive à la perpendiculaire avant = λ

$$\lambda = M / \Sigma = 31,10 / 9,014 = 3,45 M$$

14.- SURFACE MOUILLÉE DE LA CARENE

La résistance à l'avancement d'une coque dépend lar-

gement du frottement de l'eau sur la carène. Toutes choses égales d'ailleurs, la résistance de frottement est proportionnelle à la surface de la carène en contact avec l'eau. Il est donc intéressant de connaître cette surface mouillée, soit S_m , soit pour comparer plusieurs projets de bateaux, soit pour calculer la résistance de frottement d'une coque donnée.

La surface développée de la carène est assimilable à un rectangle de largeur égale à la moyenne des développements des couples et de longueur égale au développement du contour de la flottaison.

On mesure ces divers développements sur le plan de formes au moyen d'une bande de papier millimétré soigneusement appliquée sur les contours considérés. On peut également utiliser un curvimètre.

Le Tableau ci-dessous donne le détail des relevées et du calcul de la surface mouillée.

TABLEAU 9

Numéro du Couple	Développement (mètres)
0	0,00
1	0,90
2	1,65
3	2,40
4	2,95
5	3,75
6	3,90
7	3,60
8	3,40
9	3,10
10	0,00

Développement total = 25,65
Développement moyen = $25,65 / 10 = 2,57 M$

Développement de la flottaison : 6,50M

Surface mouillée : $S_m = 6,50 \times 2,57 = 16,6 M^2$

DEUXIEME PARTIE

CALCUL DES CARENES INCLINEES

15.- OBJET DU CALCUL DES CARENES INCLINEES

Un navire est un flotteur qui, dans les circonstances ordinaires de la navigation, est exceptionnellement droit. L'action du vent sur les voiles et sur les superstructures, la houle, ont pour effet le plus immédiat d'incliner transversalement les bateaux dont la carène cesse alors d'être symétrique par rapport au plan longitudinal.

Il importe de connaître les possibilités de redressement d'une carène inclinée afin d'apprécier les valeurs limites de l'inclinaison, compatibles avec la sécurité de la navigation. Tel est précisément l'objet de ce chapitre.

16.- DEFINITION DE LA STABILITE TRANSVERSALE

Un corps est en équilibre si l'ensemble des forces et moments auxquels il est soumis est nul.

L'équilibre est stable si toute sollicitation tendant à écarter le corps de sa position d'équilibre engendre une réaction tendant à l'y ramener. Il est instable dans le cas contraire.

Un navire droit, chargé symétriquement, est en équilibre (fig.13) car la poussée hydrostatique Δ , appliquée au centre de carène C_o situé dans le plan de symétrie, est égale et directement opposée au poids P du bâtiment, appliqué au centre de gravité G également situé dans le plan de symétrie.

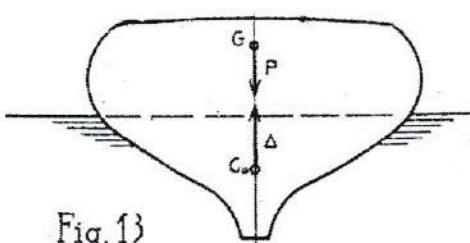


Fig.13

On apprécie la qualité stable ou instable de l'équi-

libre en considérant la navire incliné transversalement d'une bande θ de l'ordre du degré, sous l'effet d'une sollicitation extérieure, telle que l'effet du vent, la traction d'une amarre, par exemple (fig.14)

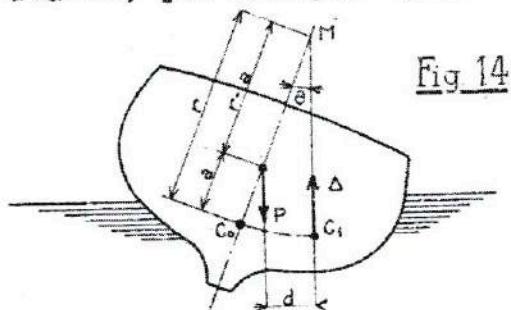


Fig. 14

L'inclinaison ne modifie pas la condition de flottabilité $\Delta = P$ (paragraphe 2) mais les formes habituellement données aux navires sont telles que la bande rend dissymétriques les sections immergées, et fait passer le centre de carène de C_0 en C_1 vers le bord incliné.

La réaction engendrée par l'inclinaison est un couple de forces GP et $C_1 \Delta$ égales et opposées dont le moment est :

$$(4) \quad M = Pd = P(r-a) \sin \theta$$

Dans le cas de figure représenté, ce moment tend à redresser le navire, car la direction de Δ coupe l'axe longitudinal en un point M dit METACENTRE situé au dessous du centre de gravité G . L'équilibre observé précédemment (fig. 13) est donc stable.

La notion du métacentre, étymologiquement centre autour duquel pivote le centre de carène lors d'une inclinaison modérée, est apparue pour la première fois en 1746 dans le "Traité du Navire" de Pierre Bouguer (1698-1758).

la distance $C_0 M = r$ est le RAYON METACENTRIQUE.

17.- DETERMINATION DU RAYON METACENTRIQUE INITIAL

On considère (fig.15) une tranche cylindrique de carène d'épaisseur x . On suppose le navire incliné transversalement d'un angle θ de l'ordre du degré. On cherche une relation entre les divers éléments géométriques de la carène et le rayon métacentrique précédemment défini.

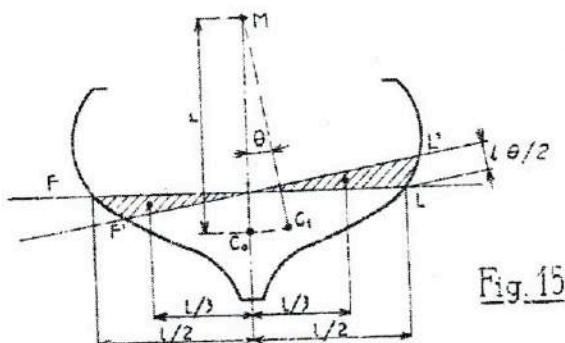


Fig. 15

L'inclinaison ne modifiant pas la condition de flottabilité, les sections des onglets immergés LOL' et émergé FOF' sont égales. - L'angle étant faible, ces sections sont assimilables à des triangles de base égale à la demie largeur

de flottaison ($l/2$) et de hauteur égale à $l\theta/2$.

La section de chaque onglet est donc :

$$(5) \quad s = \frac{1}{2} \times \frac{l}{2} \times \frac{l\theta}{2} = \frac{l^2\theta}{8}$$

Le volume de chaque onglet est le produit de la section s par l'épaisseur x de la tranche considérée, soit :

$$(6) \quad v = sx = l^2\theta x / 8$$

La poussée hydrostatique de chaque onglet passe par le centre de gravité D ou E de la section, et l'on sait que le centre de gravité d'un triangle est à une distance du sommet égale aux $2/3$ de sa hauteur. Le bras du levier sur lequel agit la poussée de chaque onglet est donc égal à $l/3$, d'où le moment hydrostatique d'un onglet par rapport à l'axe d'oscillation O :

$$(7) \quad m = l v / 3 = l^2\theta x / 24$$

On voit sur la figure 15 que les moments de l'onglet émergé et de l'onglet immergé s'ajoutent pour donner un moment résultant égal à $2 m$, tel que le centre de carène passe de C_0 à C_1 , se déplaçant ainsi d'une quantité égale à $r\theta$.

Le moment résultant étant égal au moment de la carène de volume V , on a donc :

$$(8) \quad 2 \frac{l^2\theta x}{24} = rOV$$

d'où la valeur du rayon métacentrique initial r :

$$(9) \quad r = l^2 x / 12 V$$

En généralisant pour l'ensemble de la carène composée de n tranches d'épaisseur x , on posera :

$$(10) \quad R = \frac{\sum l^3}{12V} \times \frac{L}{n}$$

$\sum l^3$ = somme des cubes des largeurs de la flottaison

L = longueur de la flottaison

n = nombre de tranches considérées.

On observera que l'équation (10) est de la forme

$r = i/v$, i étant une quantité désignée en mécanique rationnelle sous le nom de Moment d'Inertie. Dans le cas présent il représente le moment d'inertie de la surface de flottaison par rapport à l'axe longitudinal de symétrie.

Le calcul du rayon métacentrique s'effectue comme l'indique le tableau suivant après avoir relevé sur le plan des formes les largeurs l de la flottaison aux différents couples de tracé :

TABLEAU 10

N° du Couple	l mètres	l^3
0	0	0
1	0,648	0,27
2	1,216	1,80
3	1,688	4,79
4	2,050	8,63
5	2,212	10,78
6	2,245	11,38
7	2,126	9,67
8	1,814	5,98
9	1,194	1,70
10	0	0

$$\text{Somme des cubes } \sum l^3 = 55,05$$

$$\text{Volume de carène } V = 3,60 \text{ M}^3$$

$$\text{Longueur de flottaison } L = 6 \text{ M}$$

$$\text{Nombre de divisions } n = 10$$

$$r = 55,05 \times 6 / 12 \times 3,6 \times 10 = 0,77 \text{ M}$$

On a précédemment (paragraphe 12) situé le centre de carène C_0 du navire droit à 0.30 M. au-dessous de la flottaison. Suivant la fig.16, le métacentre M est ainsi situé à $0.77 - 0.30 = 0.47$ M au-dessus de la flottaison.

Supposons que l'étude du plan ait conduit l'architecte à situer le centre de gravité G du bateau en charge à 0.17 M au-dessous de la flottaison. Il en résultera :

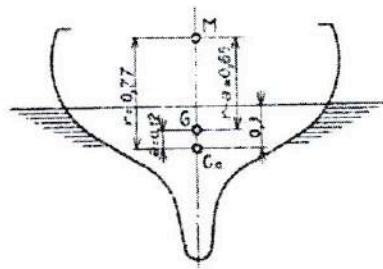


Fig. 16

$$a = 0,30 - 0,17 = 0,13 \text{ M.}$$

Connaissant a et r on pourra calculer par l'équation (4) la valeur du moment redresseur aux faibles inclinaisons.

Ainsi pour $\theta = 5^\circ$, le moment sera: (en tonnes-mètres)

$$M = P(r-a)\sin\theta = 3,69 (0,77 - 0,13) 0,087 = 0,205 \text{ TM}$$

Il serait imprudent de calculer au moyen de cette formule les moments redresseurs correspondant à des bandes de 10° et plus, car dès que l'inclinaison devient sensible, la carène cesse d'être symétrique, le moment d'inertie réel de la flottaison inclinée diffère sensiblement de celui que l'on a calculé pour la flottaison droite. Il en est de même du rayon métacentrique effectif.

18.- TRACE DES FLOTTAISONS ISOCARENES

Il résulte des considérations précédentes que l'on ne saurait poursuivre l'étude de la stabilité de la carène inclinée sans connaître la forme des flottaisons correspondant aux diverses inclinaisons. La seule donnée que l'on possède a priori à l'égard de ces flottaisons est qu'en vertu du principe d'Archimède elles limitent toutes des carènes d'un même volume. Elles sont donc ISOCARENES.

On trouvera dans les traités classiques de théorie du Navire de nombreuses méthodes de tracé des flottaisons isocarènes. Leur seul inconvénient est d'entraîner des calculs longs et délicats.

Considérant qu'il n'est pas nécessaire d'apporter à la détermination des flottaisons isocarènes d'un yacht les raffinements géométriques exigés pour un bâtiment de ligne, on déterminera non pas les flottaisons isocarènes, mais plus simplement des flottaisons ISOAIRES, c'est-à-dire telles qu'elles limitent dans chaque couple une section constante quelle que soit l'inclinaison du bateau.

Aux inclinaisons modérées, flottaisons isocarènes et flottaisons isoaires se confondent pratiquement. Aux grands angles de bande, les flottaisons isoaires diffèrent assez sensiblement des flottaisons isocarènes que l'on devrait seules considérer. En effet, au cours de l'inclinaison, l'immersion relative des différentes parties de la coque varie, la surface immergée des couples de la partie centrale s'accroît généralement tandis que les couples des extrémités tendent à émerger. On négligera ces variations estimées peu importantes dans le

cas d'une petite unité.

La figure 17 montre la construction géométrique extrêmement simple permettant de tracer sans aucun calcul une flottaison isoaire d'une flottaison connue.

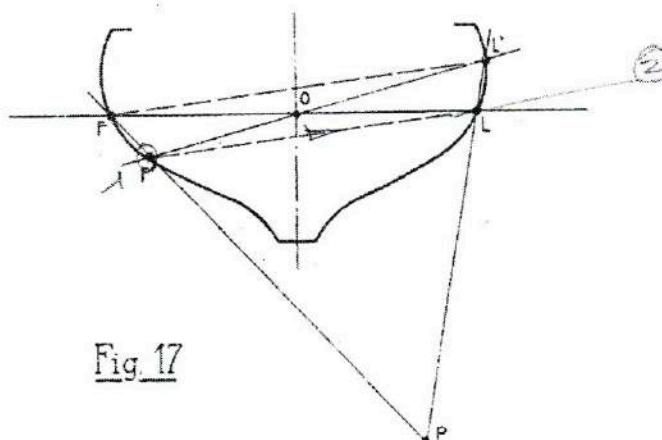


Fig. 17

On considère un couple quelconque et une flottaison connue, telle que la flottaison droite F.L.

On désire faire passer par un point arbitrairement choisi F' peu distant de F une flottaison $F' L'$ isoaire de $F L$.

On joint par une droite F' et L et on trace par F une parallèle $F'L'$ à $F L$. Cette parallèle coupe le contour du couple en un point L' tel que la droite $F'L'$ inscrit dans le couple une section égale à

celle limitée par la flottaison initiale F_L .

En effet, par hypothèse, les sections de l'onglet émergé $F'OF$ et immergé LOL' sont égales. Si l'on prolonge les droites FF' et Ll' , qui se confondent sensiblement avec le contour du couple, leur intersection P est le sommet de deux triangles FPL et $F'L'L$ de même surface.

Ces triangles ayant un angle au sommet commun, leurs côtés satisfont à la relation :

$$PF \times PL = PF' \times PL' \quad \text{d'où} \quad \frac{PF}{PF'} = \frac{PL}{PL'}$$

Cette dernière relation entraîne le parallélisme de FL' et $R'L$ et justifie la construction proposée.

La figure 13 donne le tracé des flottaisons isoaires du maître couple du yacht considéré comme exemple.

Le réseau des flottaisons isoaires détermine une enveloppe sur laquelle il est facile d'appuyer les flottaisons correspondant à une série d'inclinaisons régulièrement espacées, par exemple 10° , 20° , 30° , etc...

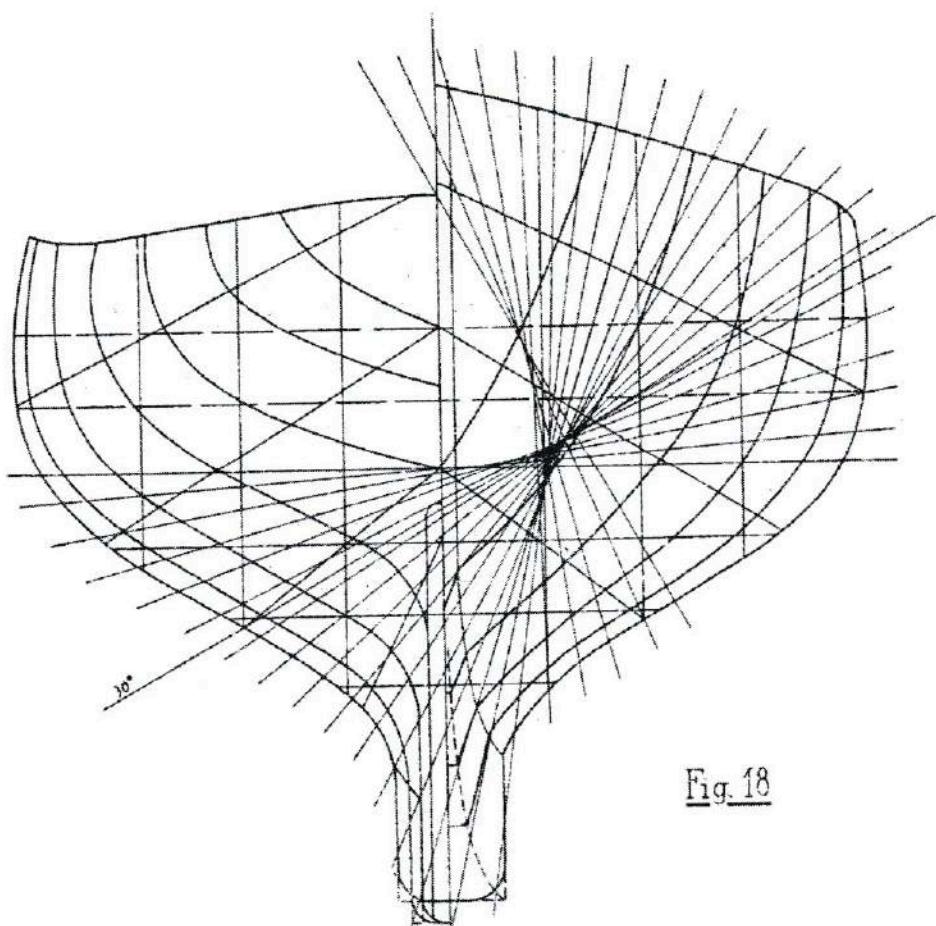
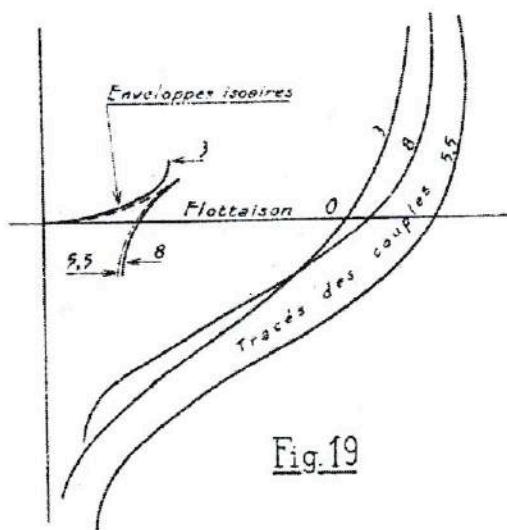


Fig. 18

En toute rigueur, on devrait effectuer ce tracé pour tous les couples, mais en général, les courbes enveloppes des flottaisons isoaires sont pratiquement confondues jusqu'aux inclinaisons d'une soixantaine de degrés pour tous les couples compris entre 25 % et 75 % de la longueur de flottaison, qui ont seuls un effet marqué sur la stabilité.



C'est bien ce que montre la fig. 19 reproduisant à l'échelle 1/20 les enveloppes des isoaires des couples 3, 5,5 et 8 du yacht considéré.

Fig. 19

19.- RAYON METACENTRIQUE D'UNE CARENE INCLINEE

On sait (paragraphe 17) que le rayon métacentrique d'une carène d'inclinaison quelconque est $r = I / V$ et l'on a établi pour la carène droite la relation (10) permettant le calcul du moment d'inertie de la flottaison par rapport à son axe de symétrie.

Les flottaisons inclinées n'étant pas symétriques, la relation (10) n'est plus applicable. On fait alors choix d'un axe arbitraire X situé en dehors du contour de la flottaison et dans le plan de cette dernière (fig.20) et l'on mesure les ordonnées $Y = A X$ et $y = B X$ correspondant à chaque couple.

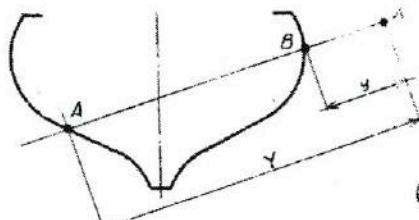


Fig.20

On démontre que le moment d'inertie I de la flottaison considérée est donné par la relation :

$$(11) \quad I = \frac{L}{n} \left[\frac{\sum Y^3 - \sum y^3}{3} - \frac{(\sum Y^2 - \sum y^2)^2}{4(\sum Y - \sum y)} \right]$$

La table des carrés et des cubes d'un formulaire quelconque permet de calculer facilement les différents termes de cette expression.

Le tableau 11 montre la disposition du calcul du rayon métacentrique pour une inclinaison de 30° .

TABLEAU 11

Calcul de ce rayon $\theta = 30^\circ$

Couple	Y	Y^2	Y^3	y	y^2	y^3
1	1,83	3,35	6,13	1,20	1,44	1,73
2	2,02	4,08	8,24	0,73	0,53	0,39
3	2,16	4,66	10,08	0,50	0,25	0,13
4	2,25	5,06	11,39	0,36	0,13	0,05
5	2,29	5,24	12,10	0,31	0,10	0,03
6	2,30	5,29	12,17	0,32	0,10	0,03
7	2,24	5,02	11,24	0,33	0,11	0,04
8	2,12	4,49	9,53	0,41	0,17	0,07
9	1,88	3,53	6,63	0,54	0,29	0,16
Sommes	19,09	40,72	87,53	4,70	3,12	2,63
	A	B	C	d	e	f

$$\begin{aligned}
 A &= 19,09 & B &= 40,72 & C &= 87,53 \\
 a &= 4,70 & b &= 3,12 & c &= 2,63 \\
 A - a &= 14,39 & B - b &= 37,60 & C - c &= 84,90 \\
 4(A - a) &= 57,56 & (B - b)^2 &= 1414 & \frac{(C - c)}{3} &= 28,30 \\
 I &= \left(28,30 - \frac{1414}{57,56} \right) \frac{6}{10} = 2,70 M^2 \\
 r &= I/V 2,70/3,60 = 0,75 M
 \end{aligned}$$

On effectue un calcul analogue pour chacune des inclinaisons envisagées. Le Tableau suivant donne les valeurs de r ainsi calculées.

TABLEAU 12

θ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
r	0,77	0,62	0,65	0,75	1,07	0,88	0,50	0,38
θ	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	
r	0,29	0,24	0,22	0,22	0,24	0,29	0,37	

20.- DEPLACEMENT DU CENTRE DE CARENE AU COURS DE L'INCLINAISON

Par définition (paragraphe 16) le métacentre est le point autour duquel pivote le centre de carène au cours de l'inclinaison du navire. Il en résulte que, au voisinage d'une inclinaison θ donnée, le centre de carène se déplace sur un arc de cercle de centre M et de rayon r égal au rayon métacentrique correspondant à l'inclinaison θ sur la Tableau 12.

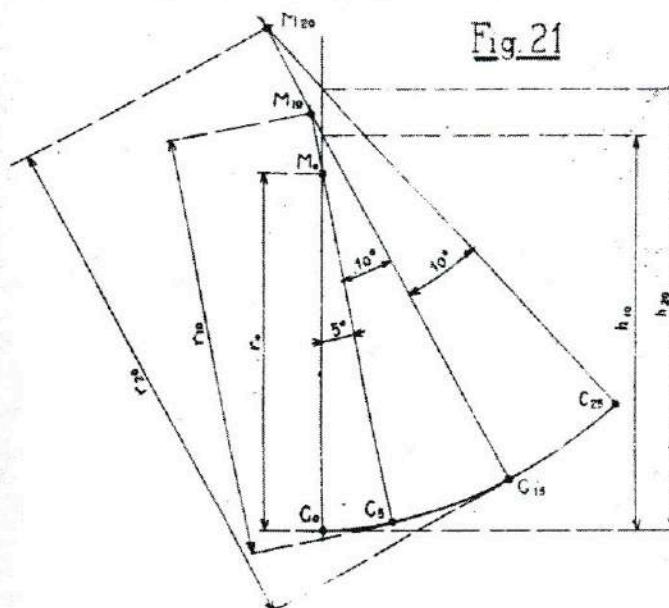


Fig.21

Cette propriété géométrique permet de construire facilement la courbe décrite par le centre de carène au cours de l'inclinaison (fig.21).

On part des données relatives au navire droit, savoir centre de carène C_0 et rayon métacentrique initial r_0 positionnant le métacentre initial M_0 .

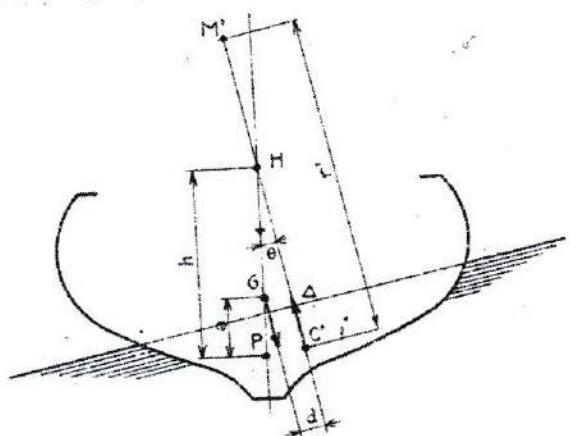
On admet que le rayon métacentrique ne varie sensiblement pas au cours d'une faible variation d'inclinaison, de l'ordre de 5° de part et d'autre de la bande pour laquelle on l'a calculé.

De M_0 comme centre, avec $r_0 = CoMo$ comme rayon on décrit un arc de cercle de 5° d'amplitude définissant en C_5 la position du centre de carène pour une inclinaison de 5° . On porte sur la droite $C_5 M_0$ la valeur du rayon métacentrique $r_{10} = C_5 M_{10}$ correspondant, sur le Tableau 12 à la bande de 10° , et, de M_{10} comme centre, avec un rayon r_{10} on décrit un arc de cercle de 10° qui, à son tour, définit en C_{10} la position du centre de carène pour une bande de 15° ; et ainsi de suite.

21.- MOMENT DE STABILITE DU NAVIRE INCLINE.

La figure 22, de construction analogue à celle de la figure 14 relative au navire droit, montre que le bras de levier du couple redresseur est :

$$(12) \quad d = (h - a) \sin \theta$$



h étant la HAUTEUR METACENTRIQUE définie par la distance CoH entre le centre initial de carène et l'intersection de l'axe de symétrie de la carène avec le rayon métacentrique r' correspondant à la bande θ .

On voit ainsi que, dans le cas du navire incliné, la hauteur métacentrique joue le rôle du rayon métacentrique du navire droit.

Le moment de stabilité est évidemment :

$$(13) \quad M = P (h - a) \sin \theta$$

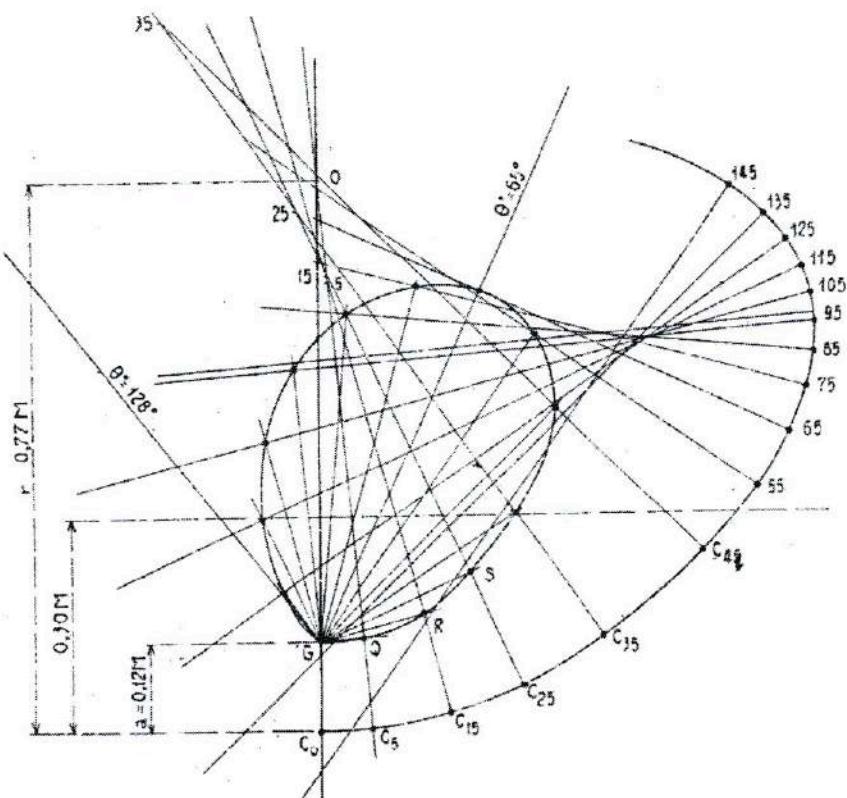
On relèvera sur l'épure des centres de carène (fig.21) les valeurs de la hauteur métacentrique, et l'on calculera les bras de levier (équation 12) et Moments de stabilité correspondants (équation 13)

On peut au reste relever directement les valeurs des bras de levier sur l'épure des centres de carène en portant sur la ligne de symétrie $Co Mo$ le centre de gravité G du navire et en mesurant les distances $G Q$, $G R$, $G S$ de ce centre aux divers rayons métacentriques. Il est intéressant d'effectuer cette construction qui permet une vérification rapide des calculs et qui donne une représentation très imagée des bras de levier.

En effet, en joignant par une courbe continue les points Q, R, S on trace le diagramme polaire des bras de levier mettant en évidence les angles θ' et θ'' pour lesquels le bras de levier est respectivement maximum puis nul.

TABLEAU 13

Inclinaison θ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°
* Hauteur métacent. h	0,77	0,69	0,66	0,69	0,73	0,76	0,72	0,66	0,59	0,51	0,42	0,33	0,23	0,10
* $h-a$ ($a=0,12$)	0,65	0,57	0,54	0,57	0,61	0,64	0,60	0,54	0,47	0,39	0,30	0,21	0,11	-0,02
* $\sin \theta$	0	0,174	0,342	0,500	0,643	0,768	0,867	0,940	0,985	1	0,985	0,940	0,887	0,768
Bras de levier $(h-a)\sin \theta$	0	0,10	0,19	0,29	0,39	0,49	0,52	0,51	0,46	0,39	0,29	0,20	0,10	-0,02
Moment $P(h-a)\sin \theta$	0	0,37	0,68	1,05	1,44	1,82	1,92	1,87	1,70	1,44	1,09	0,73	0,35	-0,06



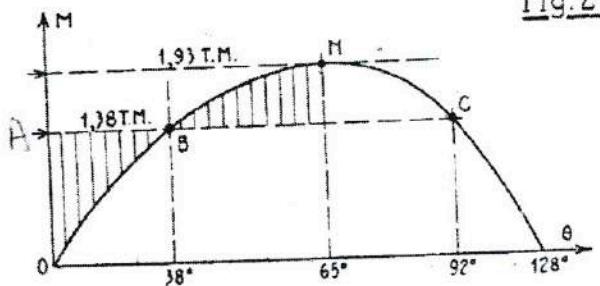


Fig.26

Ce moment critique dynamique est $O A = 1,38$ Tonne mètre tel que (fig.26) l'aire $O A B$ soit égale à l'aire $B N C$.

L'angle critique de stabilité dynamique est 38° et l'angle critique d'équilibre instable est 92° . On limitera donc à une trentaine de degrés la gîte ma-

xima admissible en sécurité.

On retiendra de cette analyse que l'angle critique dynamique (38°) ne dépasse guère la moitié de l'angle de moment statique maximum (65°) et que le moment critique dynamique ($1,38$ TM) est de l'ordre des $2/3$ du moment maximum statique ($1,93$ TM).

24.- RELATION ENTRE LES FORMES DE CARENE ET L'ALLURE DE LA COURBE DE STABILITE.

Il résulte des considérations précédentes que l'on doit s'efforcer d'obtenir une courbe de stabilité aussi remplie que possible, de façon à accroître la valeur du moment critique dynamique et aussi raide que possible au voisinage de l'origine afin d'obtenir pour de faibles variations de l'inclinaison de grandes variations du moment redresseur.

On apprécie cette dernière qualité en considérant la pente de la courbe des bras de levier ($h-a$) $\sin \theta$ (fig.24).

Cette pente, caractérisée par l'inclinaison de la tangente $O T$ sur l'axe $O \theta$ est égale à ($r - a$) -

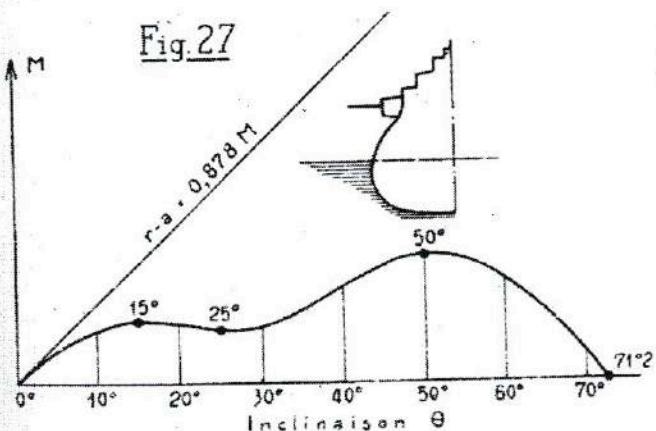
En principe on devrait donner à $r - a$ une valeur aussi grande que possible, mais pratiquement, des moments de rappel trop importants entraînant un roulis très vif (la période du roulis est fonction de $1 / \sqrt{r - a}$) fatiguant tout à la fois le matériel et le personnel, on ne dépasse guère les valeurs suivantes :

Grands yachts à voiles	1,50 Mètre
Petits yachts à voiles	0,90 "
Yachts à moteurs	0,70 "
Vedettes	0,60 "

Etant donné (paragraphe 17) que ($r-a$) est sensiblement fonction du moment d'inertie de la flottaison, donc du cube de la largeur de flottaison, on obtiendra une valeur satisfaisante de ($r-a$) en dessinant une flottaison suffisamment large.- On agira également sur ($r-a$) en abaissant le centre de gravité général, soit par allègement des superstructures et de la maturité (mâts creux) soit en développant vers le bas l'aile de portant porte-avions. Dans certains cas le centre de gravité G pourra même se trouver au-dessous du centre de carène Co du navire droit.- On ne considérera plus dans ce cas ($r-a$) mais ($r+a$) - (figure 14.)

En fait la seule considération de ($r-a$) ne suffit pas à l'application des qualités d'un navire. Il est essentiel que la courbe de stabilité soit bien continue et largement remplie. A cet égard, la forme des couples au voisinage de la flottaison fournit d'utiles renseignements.

La plus grande largeur de la coque d'un yacht à voiles doit être légèrement au-dessus de la flottaison droite afin que, le bateau s'inclinant, la largeur de la flottaison réelle croisse sensiblement. La hanche du bateau s'appuie alors d'autant mieux sur l'eau que l'inclinaison est plus marquée.



Inversement, des formes rentrées au-dessus de la flottaison sont à éviter, car elles entraînent fatallement un amincissement de la flottaison à mesure qu'augmente l'inclinaison.

La figure 27 reproduit à titre documentaire la courbe du bras de levier de redressement de l'ancien cuirassé "Gaulois".- Ce bâtiment, de même que son contemporain le "Bouvet" avait une impor-

tante rentrée permettant le tir axial des tourelles latérales. A l'époque (circa 1890) on n'attachait pas la même importance qu'aujourd'hui à l'étude dynamique de la stabilité et l'on s'attachait uniquement à obtenir pour le navire droit une valeur suffisante de ($r-a$). Cette valeur était très normale pour le Gaulois (0,878 M) mais l'énorme rentrée de la muraille au-dessus de la flottaison donnait une courbe de stabilité fortement ondulée, croissant jusqu'à 15° puis passant par un minimum pour 25°, et retrouvant un second maximum pour 50° de bande.

Les bâtiments de ce type possédaient donc deux zones d'instabilité qui en faisaient des navires dangereux. En fait, au cours de manœuvres à Brest par temps maniable, le Gaulois, sous la seule action du gouvernail, prit en évolution une bande d'une vingtaine de degrés sans pouvoir se redresser. On connaît la fin du "Bouvet" qui, aux Dardanelles, frappé aux environs de la flottaison, chavira instantanément avec tout son équipage.

ques et, comme nous l'avons dit dans le "Tracé des carènes", il faut se défier de leur allure mathématique et ne point faire de fausse science en les appliquant inconsidérément.

Nous indiquerons cependant les relations suivantes applicables principalement aux yachts, en mentionnant au passage les valeurs ainsi calculées et les valeurs réelles des éléments relatifs au yacht considéré dans cette étude.

Distance du centre de carène à la flottaison droite.

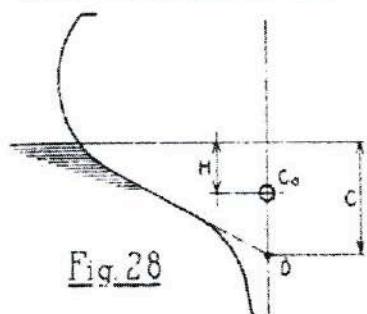


Fig. 28

$$H = 0,4 C$$

où C = profondeur de la carène au maître-couple. Dans le cas d'un bateau à quille, C est mesuré à l'intersection du plan de symétrie et du prolongement naturel des varangues (point D).

$$H \text{ formule} = 0,4 \times 0,76 = 0,304 \text{ M}$$

$$H \text{ réel} = 0,30 \text{ M} \text{ (paragraphe 12).}$$

Surface de la flottaison droite

$$S_f = 1,25 \sqrt{l / B^2}$$

$$S_f \text{ formule : } 9,20 \text{ M}^2 \text{ et } S_f \text{ réelle : } 9,32 \text{ M}^2$$

$$\text{Autre formule : } S_f = 0,7 L \frac{l}{B}$$

$$S_f \text{ formule} = 9,45 \text{ M}^2 \text{ et } S_f \text{ réelle} = 9,32 \text{ M}^2$$

Moment d'inertie de la flottaison

$$I = 0,04 L l^3$$

$$I \text{ formule} = 2,73 \text{ M}^4 \text{ et } I \text{ réel} = 2,70 \text{ M}^4$$

Rayon métacentrique initial

$$r = 0,072 l^3 / B^2$$

$$r \text{ formule} = 0,75 \text{ M} \text{ et } r \text{ réel} = 0,77 \text{ M}$$

Surface mouillée

$$S_m = 2,5 L \sqrt{B^2}$$

S_m formule = $15,8 \text{ m}^2$ et S_m réelle = $1,66 \text{ m}^2$

28 - DETERMINATION EXPERIMENTALE DU CENTRE DE CARENE ET DU CENTRE DE DERIVE.

On peut déterminer expérimentalement ces centres avec une très bonne approximation en recherchant le centre de gravité d'une maquette du diagramme des aires des couples (positionnement longitudinal de C_g), des aires des lignes d'eau (positionnement vertical de C_g) ou du contour longitudinal de la carène (centre de dérive).

Ainsi, pour déterminer la position du centre de dérive on découpe spigneusement dans une feuille de carton fort le gabarit du contour longitudinal, gouvernail compris. - On suspend successivement le modèle par 3 points A B C (fig. 29) en le faisant pivoter librement autour d'une pointe plantée dans le mur. Un fil à plombs attaché à la pointe permet de repérer sur le gabarit les 3 lignes A A', B B', et C C' dont l'intersection détermine le centre de gravité de la surface, donc le centre de dérive (paragraphe 13).

29.- DETERMINATION EXPERIMENTALE DU CENTRE DE CARENE DU NAVIRE INCLINE.

Le centre de carène (paragraphe 12) est le centre de gravité du volume immergé. Son emplacement dans le plan transversal est indépendant de la longueur relative de la carène. En particulier, si l'on réalise le schéma d'une carène très aplatie en découpant dans du bristol des gabarits des couples que l'on collera les uns sur les autres en respectant la coïncidence des axes de flottaison et de symétrie, le centre de cette carène schématique correspondra, à l'échelle près, au centre de la carène réelle à condition que le déplacement représenté par le poids de la maquette soit constant quelle que soit l'inclinaison considérée.

On réalisera donc une série de blocs de gabarits complets, c'est-à-dire reproduisant les formes depuis le dessous de quille jusqu'aux roofs. On découpera un de ces blocs suivant la trace de la flottaison normale et on le pèsera avec une balance de précision ou trébuchet.

Par tâtonnements, on rognera ensuite chacun des blocs à une flottaison d'inclinaison différente (fig.30) de telle sorte que chacun d'eux ait le même poids que le bloc de flottaison droite.

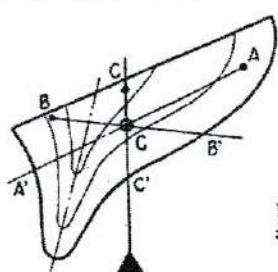


Fig.30

La condition de constance du déplacement étant satisfaite, on déterminera le centre de gravité de chaque bloc par la méthode exposée au paragraphe précédent. Ces différents centres sont, à l'échelle près, les centres de carène aux inclinaisons considérées.

30.- DETERMINATION EXPERIMENTALE DES BRAS DE LEVIER DE REDRESSEMENT.

On construit rigoureusement à l'échelle une maquette en bois verni, largement creusée à l'intérieur pour recevoir un lest disposé aussi bas que possible. On pèse la maquette dont le poids total P doit correspondre exactement au déplacement prévu, à l'échelle près.

On enlève une petite quantité P_1 de lest, de l'ordre de $P/20$. On détermine expérimentalement la position G_2 du centre de gravité de la maquette de poids $P - P_1$.

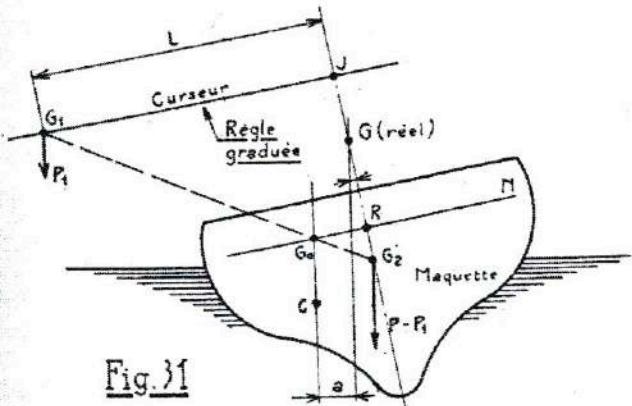


Fig.31

On dispose sur le pont de la maquette un mâtéreau K J portant une règle graduée J Q parallèle à la flottaison droite, un fil à plomb et un rapporteur, puis on ajuste sur la règle J Q un curseur de poids égal à P_1 .

La maquette ainsi équipée flottant sur un bassin abrité, on déplace systématiquement le curseur. De ce fait, le bateau s'incline. On note les déplacements L du curseur et les bandes correspondantes

Le dépouillement des mesures est particulièrement

simple. Quand la maquette est en équilibre à une bande donnée, le moment redresseur est nul par définition. Par suite, le centre de gravité général G_0 et le centre de carène C sont situés sur une même verticale.

Les poids P , P_1 ne variant pas au cours de l'expérience, G_0 se trouve toujours à l'intersection de la droite $G_1 G_2$ et d'une parallèle $K N$ à la flottaison droite telle que

$$(P - P_1) / P_1$$

JK/JG_2

d'où la définition graphique immédiate de G_0 sur une épure figurant le transversal du bateau. Portant sur cette épure le centre de gravité G du navire réel, on mesurera directement le bras de levier redresseur $d = (h - a) \sin \theta$ comme l'indique la figure 51.

TABLEAU 14
Devis de calcul
Yacht de croisière "Saphir"

Désignation	Symbol	Unité	Valeur
Longueur totale	L_0	Mètre	7,95
Longueur de flottaison	L	"	6,00
Élançement avant		"	0,75
Largeur maximale au fond	B	"	2,40
Largeur maximale à la flottaison	b	"	2,25
Franc bord minimum		"	0,66
Tirant d'eau		"	1,28
Mâitre couple	B_2	Mètres carrés	1,10
Volume de carène	V	"	3,60
Déplacement	Δ	Tonne	3,69
Aire de la flottaison		M^2	9,32
Surface mouillée	S	"	16,6
Distance du C_c à la PP avant		"	3,20
Distance du C_d à la PP avant		"	3,45
Distance du C_c à la flottaison		"	0,30
Rayon métacentrique initial	r	"	0,77
Distance du C_g au C_c	a	"	0,12
$r + a$		"	0,65
Moment d'inertie de flottaison	I	M^4	2,70
Moment de stabilité maximum	M	Tonne M	1,91
Inclinaison correspondante	θ_m	"	65°
Angle de chavirement	θ_a	"	128°
Moment critique dynamique	M_c	Tonne M	1,38
Inclinaison correspondante	θ_c	"	38°
Coefficient de finesse = $L/V\Delta$	φ	absolu	3,89
Coefficient prismatique = β/LB^2	β	"	0,56
Coefficient de surf. mouillée = $S/\Delta L$	δ	"	3,53
Coef. de remplissage flottaison = $S_f/\Delta L$		"	0,69
Coef. d'inertie flottaison = I/L^3		"	0,0395

TABLEAU 15

Calcul des aires des couples, du centre de carène et du centre de dérive.

Couple	Somme des éléments				
	1	2	3	4	5
Distance du couple à la PPN X	0,60	1,20	1,80	2,40	3,00
Profondeur de carène H	0,341	0,600	0,826	1,015	1,170
H/3	0,059	0,120	0,165	0,203	0,234
H ² /3	0,1176	0,360	0,6823	1,0302	1,6689
H ³ /5	0,0215	0,0720	0,1365	0,2060	0,2738
Coefficient de Tschitscherin K	l	Kl	l	Kl	l
0,592	0,0497	1,096	0,0919	1,560	0,1108
0,342	0,470	0,4022	0,828	0,2590	1,152
0,500	0,332	0,1660	0,595	0,2980	0,712
0,657	0,192	0,1123	0,380	0,2355	0,515
0,916	0,056	0,0512	0,110	0,050	0,112
Somme de l	51	1,642	2,970	4,872	7,872
Aire du couple S	S ₁ S ₂ S ₃ A ₁₁₁	" 0,156 " 0,681 "	0,924 " 1,062 "	4,325 " 1,088 "	4,396 " 1,088 "
Somme de Kl	S ₂ " 0,021 " 0,0160 "	0,3234 " 1,1811 " 1,157 "	1,1042 " 1,1042 "	1,2996 " 1,2996 "	0,9592 " 0,9592 "
Moment rapporté à l'atelier en S ₂ H ³	M ₁ -S ₂ X	0,0678 "	0,8275 " 1,157 "	2,170 "	3,106 " 3,106 "
HX	0,21	0,22	1,49	2,44	3,51

Distance du centre de carène à :

$$\text{Lég flocaison} \quad d = \frac{C}{B} = \frac{1,878}{6,029} = 0,312 \text{ m}$$

$$\text{La perpendiculaire devant} \quad X = \frac{D}{B} = \frac{19,53}{6,029} = 3,24 \text{ m}$$

$$\text{Distance du centre de dérive à la PPA} = \frac{E}{A} = \frac{11,10}{9,01} = 1,23 \text{ m}$$

JEAN ANGELI

LE TRACÉ DES
CARÈNES

VOILIERS DE CROISIÈRE

JEAN ANGELI

LE TRACE DES CARENES

FASCICULE I

VOILIERS DE CROISIERE

.....LA PRINCIPALE CHOSE QUE J'OBERVE EN ENSEIGNANT CETTE METHODE EST D'EN RENDRE L'USAGE SI GENERAL QUE L'ON PUISSE FAIRE DES VAISSEAUX DANS TOUTES LES PROPORTIONS QUI SERONT PRESCRITES ; MON DESSEIN N'A JAMAIS ETE DE RESTREINDRE CETTE METHODE A UNE MANIERE PARTICULIERE, CE QUI LA RENDRAIT DEFECTUEUSE, NI DE DONNER AUCUNES PROPORTIONS AUX MAITRES CHARPENTIERS POUR QU'ils LES SUIVENT, N'ETANT PAS PERSUADE MEME QUE LES GENS LES PLUS EXPERIMENTES EN PUISSENT DONNER SUREMENT DE CERTAINES, LEUR AYANT ETE PRESQUE IMPOSSIBLE, JUSQU'A CETTE HEURE, DE SAVOIR ASSEZ JUSTE LA DIFFERENCE DES FACONS DES VAISSEAUX POUR SAVOIR LA CAUSE DE LEURS DIFFERENTS EFFETS A LA MER.

BERNARD RENAU
Lettre à COLEERT datée de Brest, 30 Juin 1681.

I - INTRODUCTION

On croit assez volontiers, en examinant un des nombreux plans de formes reproduits dans les revues spécialisées, que le tracé d'une carène de yacht est une opération, certainement délicate, mais qu'un peu d'application permet de mener à bien.

L'aisance, parfois miraculeuse, avec laquelle filent certaines lignes de carènes contribue largement à accréditer ce sentiment.

Quelques heures passées à besogner sur un plan de formes qui se refuse obstinément à filer dans les trois vues suffisent à dissiper cette illusion, et quand bien même la rectification heureuse de quelques lignes donne, par approximations successives, un plan géométriquement correct, rien ne prouve que la carène ainsi définie soit bien appropriée à la destination envisagée.

Tous les Architectes, amateurs ou professionnels, ont connu au début de leurs études, cette période déprimante où, le premier enthousiasme passé, on désespère de représenter sur un plan les subtilités d'une carène harmonieuse.

Les anciens constructeurs allaient plus droit au but, et, attaquant résolument la troisième dimension, modelaient la carène dans un bloc de bois avant aucun tracé détaillé sur le plan. Il faut humblement reconnaître l'excellence de ce procédé primitif qui a

permis à des hommes de talent, tels que DAN HATCHER en Angleterre, et N.C. HERRESHOFF aux Etats-Unis, créateur des défenseurs de la Coupe America, de produire des carènes en tous points impeccables. Ce procédé demande toutefois une grande habileté manuelle et des moyens matériels qui en limitent l'extension.

Le dessin demeurant ainsi le seul moyen pratique de représenter une carène, nous avons cherché à définir une méthode permettant à un dessinateur non spécialisé dans ce travail, cas général des très nombreux amateurs, de tracer du premier jet des coques convenablement balancées dans leurs différents éléments.

Il est malaisé de définir une telle méthode devant uniquement guider le dessinateur sans l'emprisonner dans les règles trop étroites d'un canon rigoureux.

Il faut en effet que, du commencement à la fin du tracé, le dessinateur ait la liberté d'introduire ces éléments personnels qui sont la signature d'un plan.

La méthode décrite dans ce fascicule semble bien satisfaire aux désiderata contradiictoires d'une liberté orientée. Les règles précisées dans ces notes résultent de l'analyse d'une centaine de plans de bateaux ayant fait leurs preuves. Elles concernent uniquement les voiliers de croisière, classe très large allant du sloop de 20 pieds au yacht de haute mer.

Cette documentation sera complétée par un second fascicule concernant le tracé des yachts à moteurs et des vedettes.

2 - L'OUTILLAGE DU DESSINATEUR

la précision est la qualité fondamentale du dessin des carènes. Il est donc essentiel que le dessinateur ne soit pas trahi par la matière sur laquelle il exécute son tracé. A cet égard, le papier calque, très sensible aux variations hygrométriques de l'atmosphère, doit être proscrit pour l'établissement des plans définitifs. Le calque ne peut être admis que pour les études préliminaires à petite échelle ou bien pour la confection de la liasse reproductible destinée à la fabrication, cette liasse étant uniquement la copie cotée de documents établis sur un support aussi invariable que possible.

Les plans de formes seront ainsi tracés sur papier fort, Bulle ou Canson à lavis. On peut même concevoir, pour des travaux particulièrement délicats le tracé sur feuilles de tôle enduites au préalable d'une couche de peinture cellulosaïque blanche soigneusement poncée.

Le tracé sera effectué au crayon mi-dur, N° 2 à 3 H. Le crayon sera constamment tenu aiguisé en "bec de canard", de façon à obtenir du premier coup des lignes fines et bien noires.

Le choix de la planche, l'usage du Té et de l'équerre pour le tracé des droites de construction et de rappel ne méritent pas de mention spéciale, sauf que la planche doit mesurer au moins 1,20 M de longueur.

Les mesures seront reportées d'une vue sur l'autre au moyen d'un compas à pointes sèches. On s'efforcera de ne porter aucun repère au crayon, la pointe sèche donnant une trace incomparablement plus fine qu'un crayon souvent émoussé.

Les lignes courbes seront toutes tracées à la latte ou au pistolet.

La figure 1 reproduit en grandeur le contour de pistolets usuels pour le tracé des couples. La figure 2 donne le schéma des lattes utilisées pour le tracé des carènes. Ces lattes, longues de 0,8 à 1,2 M, sont généralement réalisées en matière translucide telle que le rhodoïd. Leur épaisseur est de l'ordre de 3 mm, leur largeur varie suivant les modèles, de 4 à 10 mm environ. La figure 2 montre les trois types usuels de lattes, lattes à bords parallèles, pour le tracé des courbes de rayon peu variable, lattes amincies aux extrémités, pour le tracé des lignes d'eau et des longitudinales, lattes amincies dans leur partie centrale, pour le tracé des couples dont le rayon de courbure diminue de part et d'autre du bouchain.

Les lattes constituent des pistolets universels que l'on maintient au contour voulu au moyen de plombs (fig. 3 et 4). Divers modèles de plombs existent dans le commerce. Il est essentiel que la base des plombs soit aussi étroite que possible dans la partie voisine du bec afin que l'on puisse rapprocher sans difficulté les plombs pour maintenir efficacement les lattes dans les régions fortement arquées. Le contact direct des plombs salissant le papier, leur base doit être garnie d'une plaque de bois, ou mieux, de rhodoïd, rapportée par vis.

Le maniement des plombs et des lattes ne présente pas de difficultés. On veillera toutefois, avant de faire suivre au crayon le contour de la latte, à ce que la déformation imposée à la latte soit bien continue. On s'en assure en levant un plomb sur deux et en observant si la latte ne tend pas alors à s'écartez de l'arquée initiale. On apprécie également la continuité d'une ligne avant ou après tracé, en examinant le dessin presque en bout: l'œil étant voisin du plan, le tracé apparemment raccourci révèle toutes ses irrégularités éventuelles.

Il convient enfin de se méfier de la facilité offerte par les pistolets. L'usage immoderé de ces instruments conduit à tracer des lignes mal adaptées aux exigences du modèle des carènes. Le dessinateur utilisant constamment des pistolets pour le tracé de la plupart des lignes d'un plan est comparable au peintre qui, sans les mélanger au préalable sur la palette, appliquerait directement sur sa toile les couleurs sortant du tube.

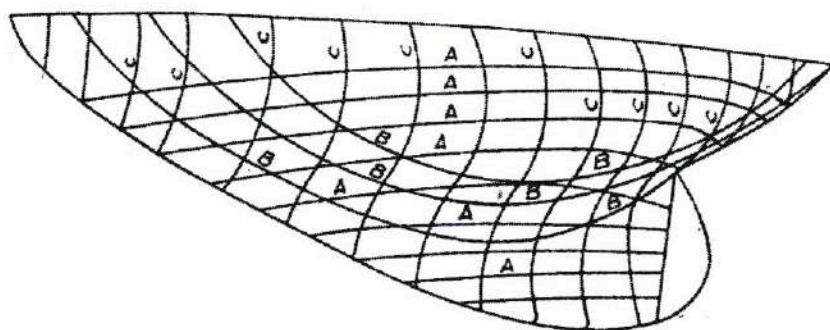
Les tracés mécaniques n'ont jamais produit cette harmonieuse souplesse des lignes qui fait le charme et la qualité intrinsèque des beaux dessins de coques.

3 - LIGNES REPRESENTATIVES D'UNE CARENE

Le volume d'une carène est représenté sur le plan des formes par quatre réseaux de lignes :

A - Les lignes d'eau, résultant de la coupe de la carène par des plans horizontaux parallèles au plan de flottaison. La ligne de flottaison est une de ces lignes d'eau.

B - Les longitudinales, résultant de la coupe de la carène par des plans verticaux parallèles au plan de symétrie de la coque. Le contour diamétral passant de l'étrave à l'étambot par la quille est une de ces sections longitudinales.



C - Les couples de tracé, résultant de la coupe de la carène par des plans verticaux normaux au plan de symétrie.

D - Les diagonales, résultant de la coupe de la carène par des plans normaux au vertical.

Le plan des formes résulte de la projection de ces quatre réseaux de lignes sur le plan de symétrie (élévation), sur le plan horizontal parallèle à la flottaison (vue en plan) et sur le plan transversal (vertical).

Le dessin est complété par la projection sur ces plans de quelques lignes gauches dont les plus importantes sont le lit du pont et de la ligne de râblure, définissant l'aboutissement de la surface extérieure du bordé sur les pièces de charpente, étrave, quille, étambot où le bordé s'encastre.

4 - INDICATIONS PRATIQUES CONCERNANT LE TRACÉ DES PLANS

Les plans sont tracés à une échelle variant avec l'importance de l'unité considérée. Il est essentiel que, pendant toute l'exécution du travail le dessinateur puisse, sans recul exagéré voir l'ensemble du plan afin d'apprécier d'un seul coup d'œil les proportions et l'harmonie des lignes tracées. Cette condition limite aux environs de 1,50 M la longueur maximum du plan. Il est, d'autre part, commode d'adopter une échelle permettant la lecture immédiate des dimensions sur un double décimètre.

Pour ces raisons, on adoptera de préférence l'échelle 1/5 pour les bateaux ne dépassant pas 6 M de longueur, 1/10 pour les bateaux de 6 à 12 M et 1/20 au-dessus.

Il est également recommandable, à moins d'être bien entraîné au dessin des plans de formes, de commencer l'étude par un dessin de petites dimensions, de 50 à 60 cm de longueur, à échelle moitié moindre, qui, plus condensé, révèlera mieux les erreurs de proportions.

Les plans des grands navires comportant réglementairement dix lignes d'eau équidistantes dans l'intervalle de la profondeur de carène, vingt couples partageant en intervalles égaux la longueur de flottaison et cinq longitudinales équidistantes, en plus de la section diamétrale, la plus éloignée du plan de symétrie étant à une distance de ce plan égale aux 3/4 de la demie largeur du navire.

L'échelle relativement grande à laquelle sont tracés les plans de yachts permet de diminuer sensiblement le nombre des sections. On se contente généralement de six lignes d'eau, et de trois longitudinales. Les couples sont équidistants du dixième de la longueur de flottaison. On trace en outre 4 ou 5 diagonales passant par des points convenablement espacés sur le maître couple. Pour que leurs intersections avec les divers couples soient bien définies, on oriente les diagonales de telle façon qu'elles coupent les couples sous des angles voisins de 90°.

5 - ANALYSE SOMMAIRE D'UN PLAN DE FORMES

Avant d'entreprendre le tracé des plans de formes, il est essentiel d'examiner soigneusement un grand nombre de plans de bateaux renommés pour leurs qualités nautiques, afin de saisir clairement les raisons de ces qualités à la lecture du plan.

On sera guidé dans cette interprétation par les considérations générales suivantes :

A - L'objet d'une coque de voilier est de faire progresser dans l'eau à la plus grande vitesse possible et sans gîte exagérée, un volume égal au déplacement du bateau, sous l'action d'une voilure ayant tendance à provoquer le chavirement.

B - Aux faibles inclinaisons, la résistance à l'avancement est d'autant plus faible que l'acuité des formes avant est plus grande. L'examen des lignes d'eau, de l'étrave au maître couple renseignera donc sur cette qualité. La résistance à l'avancement est également minime quand le modelage des formes de l'arrière donne dans cette région des longitudinales bien continues, d'autant plus tendues qu'elles s'éloignent du maître couple. C'est ce que l'illustre ingénieur DUPUY DE LOME énonçait il y a un siècle sous la forme suivante : "...La diminution des angles d'attaque à l'avant, ainsi que l'allongement des rayons de courbure des formes que le courant doit contourner, surtout pour l'arrivée à l'arrière de l'eau venant du fond, sont les principaux moyens de diminuer la résistance à la marche..."

C - Aux grandes inclinaisons, l'examen des diagonales projetées sur la vue en plan doit conduire aux mêmes observations, car les diagonales donnent une image approchée du modelage des formes immergées à la gîte. Certains architectes, en particulier le suédois KNUD H. REIMERS, vont même jusqu'à tracer les carènes uniquement par des diagonales.

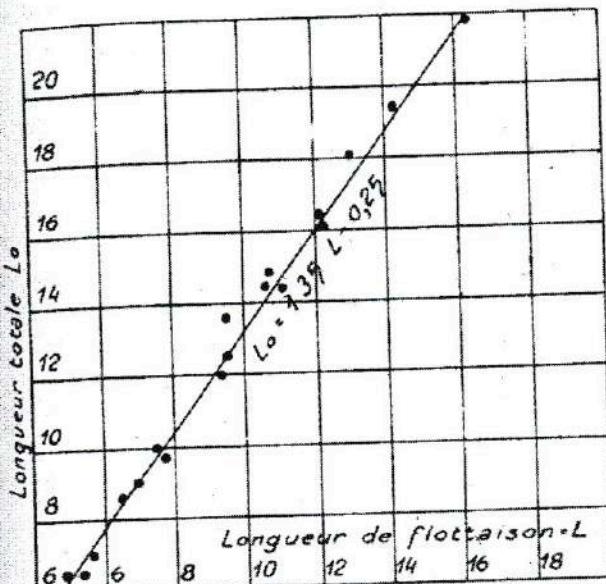
D - L'aptitude des formes à combattre le moment de chavirement due à la voilure sera estimée sur le plan transversal, en considérant les couples. Il est essentiel que dès le début de l'inclinaison, la flottaison s'élargisse du bord où s'incline le bateau. Le tournant des formes du maître couple, ou bouchain, renseigne assez bien sur ce point. Un bouchain immergé en position droite donne une coque aux roulis amortis. Un bouchain nettement dégagé au-dessus de la flottaison donne un bateau rouleur qui a besoin d'une gîte appréciable pour trouver un moment statique de redressement.

L'examen du transversal montre également l'équilibre existant entre les formes de l'avant et de l'arrière, conditionnant les réactions de tangage. Un avant très pincé avec des couples arrières plats produit un bateau maltraité par mer de l'arrière et piquant exagérément du nez dans la lame.

6 - LES PROPORTIONS ET DIMENSIONS DES VOILIERS DE CROISIERE

Ad. D'ETROYAT, constructeur naval, écrivait en 1856: "Il n'est pas aussi facile qu'on se l'imagine de composer le plan d'une embarcation. Il faut une grande habitude, du goût, du coup d'oeil, pour en assortir convenablement les formes, les contours aux usages de la navigation..."

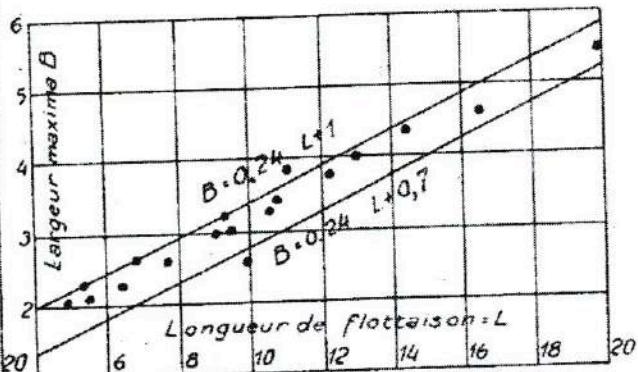
Il n'est pas indifférent de compléter l'expérience personnelle par quelques règles simples définissant les dimensions caractéristiques des coques de yachts de croisière. Lorsqu'on examine en effet les plans d'un grand nombre de bateaux réussis, on constate que la longueur totale de ces unités, leurs élancements, leurs francs bords, leur tirant d'eau, leur largeur sont à peu près constants pour une même longueur de flottaison.



Détermination des dimensions moyennes des bateaux à voûte:

Longueur totale

Largeur maximum



L'analyse méthodique d'une centaine de plans, l'établissement de graphiques tels que ceux figurés ci-dessus, nous ont permis de fixer les valeurs suivantes des principales dimensions en fonction de la longueur de flottaison, L_f , pour les trois types principaux, bateaux à voûte, bateaux à tableau, et bateaux dits "Norvégiens" à arrière pointu. Toutes les dimensions sont exprimées en mètres.

Tableau 1

Type	à voûte	à tableau	Norvégien
longueur de flottaison	L	L	L
Longueur totale	$1.35L - 0.25$	$1.275L - 1$	$L + 1.5$
Largeur maximum	$0.24L + 0.7$	$0.26L + 0.7$	$0.26L + 0.9$
Largeur au pont	$0.97B$	$0.97B$	$0.97B$
à 10% de L	$0.64L'$		$0.64L'$
à 20% de L		$0.72L'$	
Largeur du pont à 90% de L	$0.70L'$		$0.69L'$
à 100% de L	$0.67L + 0.7$	$0.62L' - 0.3$	
au tableau			
Tirant d'eau	$0.19L + 0.15$	$0.2L$	$0.17L + 0.2$
Flancement avant	$0.18L - 0.3$	$0.13L - 0.15$	$0.65(L_a - L)$
Franc bord avant	$0.11L + 0.4$	$0.125L + 0.25$	$0.125L + 0.25$
Franc bord minimum	$0.06L + 0.3$	$0.09L + 0.05$	$0.09L + 0.05$
Franc bord arrière	$0.07L + 0.3$	$0.11 + 0.05$	$0.11 + 0.2$
Emplacement du franc bord min	$80\% \text{ de } L$	$75\% \text{ de } L$	$70\% \text{ de } L$
Longueur de la partie habitable	$L - 2$	$0.85L - 1.75$	$L - 2.4$
Hauteur du roof au dessus flottaison	$0.06L + 0.7$	$0.08L + 0.6$	$0.08L + 0.6$

Les figures 5, 6, 7, donnent les schémas correspondants des bateaux considérés.

Les abaques (fig.9 et 10) permettent la détermination rapide des principaux éléments pour les deux types les plus répandus, bateaux à voûte et bateaux à tableau.

L'emplacement du maître couple varie de 52 à 58% de la longueur de flottaison. On le fixera à 55% en première approximation.

Le déplacement varie très peu d'un type à l'autre pour une même longueur de flottaison. Il est, pour les yachts actuels:

$$\Delta = (L + 1,5)^3 = 0,82/100$$

Les dimensions des yachts angulaires (genre Sea Bird) diffèrent peu de celles des types de base. Le déplacement est toutefois moindre, le coefficient 0,82 de la formule précédente devenant 0,75, et la largeur au pont dépasse d'environ 10% celle des yachts en formes.

La ligne de bouchain, dont le tracé est très important dans ce genre de bateaux, coupe l'étrave à une hauteur au-dessus de la flottaison égale à 0,13 L - 0,32. Son point le plus bas (fig.8) est situé aux environs de 55% de la longueur de flottaison, à un enfoncement variant de 3 à 4% de la largeur de flottaison.

En utilisant les formules précédentes, on ne perdra pas de vue que ces diverses relations, simplement destinées à guider le dessinateur dans le choix des dimensions et à lui permettre de tracer du premier jet une carène bien équilibrée, sont purement empiriques. Libre à l'architecte de donner ensuite aux dimensions ainsi calculées le coup de pouce personnel qui engendre les œuvres de talent. Ces formules n'exprimant que des résultats statistiques il faut se défier de leur allure mathématique et ne point faire de fausse science.

7 - METHODE DE TRACE

DIXON-KEMP, dans son œuvre classique "Yacht Architecture" publié en 1885, recommande de commencer le tracé d'un plan de formes en dessinant la partie avant de la flottaison, de l'étrave au maître couple puis la partie arrière de la longitudinale située à une distance du plan de symétrie voisine du quart de la largeur totale. Il donne un tableau de tracé de la flottaison avant et le tracé qu'il propose pour la longitudinale est une parabole en x^2 .

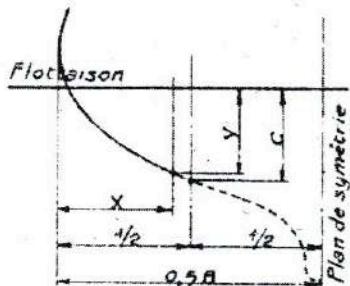
L'analyse d'un grand nombre de plans nous a prouvé que l'on pouvait perfectionner la méthode de Dixon KEMP et donner au dessinateur non plus une demi flottaison avant et une demi longitudinale arrière mais une flottaison et une longitudinale complètes, de l'étrave à la voûte arrière. Il est en effet curieux d'observer que presque tous les yachts actuels dérivent d'un plan type différemment dilaté soit dans le sens longitudinal, soit dans le sens transversal.

L'élément fondamental de base est le tracé du maître couple qui, témoignant de l'adaptation de la carène au genre de navigation envisagé, constitue en quelque sorte la signature de l'architecte.

Deux facteurs déterminent les cotes du maître couple, la largeur maxima B du bateau, relevée sur les abaques ou calculés par les formules du tableau I et le creux C au quart de la largeur totale. Ce creux est fonction de la longueur de flottaison L , de B et du déplacement Δ :

$$C = \Delta / 0,6 BL$$

On peut tracer à main levée le maître couple satisfaisant aux conditions B et C ou bien en calculer les cotes d'après le tableau II.



<u>Tableau II</u>							
$x/0,5B$	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7
y/C	-0,75	-0,06	+0,18	0,46	0,65	1	1,32

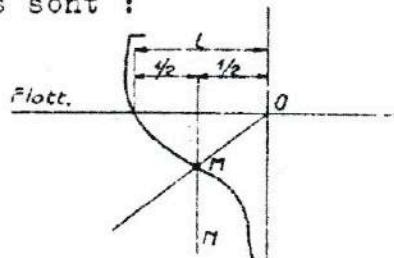
L'largeur correspondante de flottaison $l = 0,94B$

On raccorde la varangue du maître couple au plan de dérive par une courbe plus ou moins prononcée, suivant le type de bateau envisagé, n'oubliant pas que le pincement des fonds, favorable à la marche et à la solidité de la construction entraîne toujours un travail appréciable des bordés.

Le dessin du maître couple détermine la largeur maxima de la flottaison. La carène sera modelée au moyen de la flottaison et de deux lignes de base passant par le point M situé à la $4/2$ largeur de flottaison. Ces deux lignes sont :

La longitudinale MN

la diagonale MO



La flottaison, la longitudinale de base et la diagonale de base peuvent être tracées arbitrairement d'après l'expérience personnelle de l'architecte. L'analyse des plans de formes de nombreux bateaux prouve que les ordonnées de ces trois courbes varient peu de celles données ci-dessous (tableau III) en fonction de l'ordonnée maximum de chacune des courbes considérées:

Tableau III

Numéro du couple	0	1	2	3	4	5,5	7	8	9	10	11
Flottaison α	0	28,8	54	75	90	100	94,5	80,6	53	0 %
Longitudinale β	....	+92	-13	-61	-87,3	100	-82	-50,7	-4,5	+51	+112 %
Diagonale γ	0	33,2	60,3	80	93	100	91,2	72,8	42,9	0 %

Si l'on trace la flottaison et la longitudinale passant par les points calculés avec ces coefficients, on vérifiera que la longitudinale coupe la flottaison à 18,4% et 91,9% de la longueur de flottaison.

Si l'on préfère tracer arbitrairement la longitudinale et la flottaison, on s'assurera que les points avant et arrière de la flottaison où la largeur de cette dernière est la moitié de la largeur maximum correspondent bien aux abscisses où la longitudinale coupe le plan de flottaison.

Ayant tracé d'autre part le pont en plan et en élévation, on dispose d'un nombre de points suffisants pour dessiner avec une excellente approximation au moins deux couples de l'avant et deux couples de l'arrière.

En complétant la construction par le tracé d'une ligne d'eau au-dessus de la flottaison, et distante de cette dernière d'environ la moitié du franc-bord, on disposera des points complémentaires permettant de terminer le dessin des couples de l'avant.

De même le tracé d'une longitudinale auxiliaire équidistante du plan de symétrie et la longitudinale de base, et passant par les quelques couples déjà définis permettra de préciser quelques points des couples arrière et de terminer l'ensemble du vertical. On achèvera le plan de formes en traçant le réseau horizontal de lignes d'eau, de longitudinales et de diagonales permettant de vérifier le balancement des trois vues du plan.

8 - EXEMPLE D'APPLICATION DE LA METHODE

L'exemple suivant illustre l'évolution d'un plan tracé d'après la méthode précédemment définie :

On considère un yacht à voûte susceptible d'offrir une longueur habitable de 4 mètres, destiné à la croisière en haute mer dans la mesure où le permet un bateau de cette taille.

D'après le tableau I, la longueur de flottaison sera :
 $L = 4 + 2 = 6$ mètres. Utilisant les formules du tableau I ou l'abaque figure 9, les principales dimensions seront :

Longueur totale	$L_0 = (6 \times 1,35) - 0,25 = 7,85$ mètres
Largeur maximum	$B = (6 \times 0,24) + \begin{cases} 0,7 \\ 1,0 \end{cases} = 2,14 \text{ à } 2,44$ M
Tirant d'eau	$T = (6 \times 0,19) + 0,15 = 1,29$ M
Elancement AV	$= (6 \times 0,18) - 0,33 = 0,75$ M
Franc bord avant	$= (6 \times 0,11) + 0,4 = 1,06$ M
Franc bord minimum	$= (6 \times 0,06) + 0,3 = 0,56$ M
Franc bord arrière	$= (6 \times 0,07) + 0,3 = 0,72$ M
Déplacement	$\Delta = (6 + 1,5)^3 \times 0,82 / 100 = 3,47$ M ³

Le premier croquis indique que, pour des raisons de facilité d'aménagements et d'habitabilité, la longueur prévue doit être légèrement augmentée, soit 7,95 M et la largeur maxima tenue relativement forte, soit 2,40 M.

9 - PREPARATION DU PLAN

Suivant la figure II, on trace dans la partie supérieure de la feuille une droite représentant la trace du plan de flottaison. Réservant dans la partie droite de la feuille la place nécessaire au tracé du vertical (couple), on délimite la longueur $L = 6$ M de la flottaison par des perpendiculaires avant (couple 0) et arrière (couple 10), l'avant étant dirigé vers la droite de la feuille. On indique les points d'aboutissement de la carène correspondant à un élançement avant de 0,75 M et à une longueur totale $L_0 = 7,95$ M. On divise L en dix parties égales et en prévision du modelage des formes de la voûte, on trace une onzième division (couple 11) prolongeant la division précédente au-delà de la perpendiculaire arrière.

On trace d'autre part l'axe longitudinal, de part et d'autre duquel seront dessinés les couples avant (à droite) et arrière (à gauche) sur le transversal.

10 - TRACE DU PONT ET DU CONTOUR LONGITUDINAL

La largeur maximum du pont, que l'on admettra située au maître couple général, soit à 55% de la longueur de flottaison, sera égale à :

$$l' = 0,97 \ L = 0,97 \times 2,40 = 2,32 \text{ m}$$

Suivant le tableau 1, le contour du pont devra mesurer :

Au couple 1	0,64 f	= 0,64 × 2,32 = 1,50 M
Au couple 10	0,70 f	= 0,70 × 2,32 = 1,62 M

Par les points D E F (figure 12) correspondant à ces cotés portées aux couples 1 - 5,5 et 10 on fait filer à la latte une ligne aboutissant à l'étrave. Cette ligne est la vue en plan du pent.

Passant ensuite au contour longitudinal, on porte les points C H J correspondant aux valeurs du franc bord précédemment déterminées. On joint ces points par une courbe donnant la projection du livet du pont en élévation.

On trace ensuite le contour étrave-quille-vôûte, qui doit joindre les points G J en respectant le tirant d'eau fixé à 1,29 M. Ce tracé comporte une infinité de solutions. L'expérience et le goût du dessinateur sont les meilleures guides dans le choix du contour longitudinal. On observera seulement que, dans les yachts à voûte, la mèche du gouvernail aboutit au contour inférieur entre 20 et 85% de la longueur de flottaison et que l'aboutissement de la voûte sur le plan vertical tangent au tableau est situé aux environs des 2/3 du franc bord arrière au dessus de la flottaison.

11 - ESQUISSE DU MAITRE COUPLE

Le tracé du maître couple (fig.13) doit satisfaire à trois conditions :

- le maître couple doit passer par le point K du pont (couple 5,5) de largeur 1,16 M et de franc bord 0,690 mesuré sur le longitudinal.
- le maître couple doit être tangent à la verticale L M distante de 1,20 M (B/2) du plan de symétrie.
- pour respecter le déplacement prévu, le creux à la 1/2 largeur doit être (paragraphe 7)

$$c = \Delta / 0,6 BL = 3,45 / 0,6 \times 2,4 \times 6 = 0,40 \text{ m.}$$

d'où le point N. (figure 13).

On peut tracer à main levée l'esquisse du maître couple satisfaisant à ces trois conditions, ou bien calculer, en fonction du creux $C = 0,40 \text{ M}$ quelques points du maître couple en utilisant les coefficients du tableau II.

I2 - TRACE DU MAITRE COUPLE

Retenant l'esquisse précédente, on raccorde le contour au plan de dérive et à la quille. Dans le cas considéré où l'on désire un bateau bon marcheur et robuste, il sera bon de pincer légèrement le pied de la varangue (fig.14).

On mesure la largeur de flottaison $\ell = 2,25 \text{ M}$, on repère le point P situé à la $1/2$ largeur de flottaison, et on fait passer par P la longitudinale R P Q et la diagonale P O que l'on mesure :

Creux à la longitudinale = $C' = 0,43 \text{ M}$

Diagonale = $d = 0,705 \text{ M}$

On peut accessoirement vérifier le tracé du maître couple en mesurant la cote Z du creux aux $3/4$ de la largeur de flottaison et en appliquant la relation $\Delta = L \ell Z$ indiquée par V. BRIX (le Yacht n°2545, 2 Janv. 1932) pour le calcul rapide du déplacement. Dans le cas considéré, $Z = 0,26 \text{ M}$ d'où

$$\Delta = 6 \times 2,25 \times 0,26 = 3,54 \text{ M}^3.$$

soit à 2% près le déplacement prévu ($3,45 \text{ M}^3$).

I3 - TRACE DES LIGNES DE BASE

Le stade suivant consiste à tracer la flottaison, la diagonale et la longitudinale passant par les points P et S du maître couple.

Un dessinateur bien entraîné peut tracer directement ces courbes à la latte en s'inspirant des principes suivants, valables pour les coques de voiliers :

A - La flottaison avant doit être tendue mais non pincée. La flottaison arrière peut présenter un fort jarret, sa largeur au couple 9 étant facilement égale à 55% de sa largeur maximum.

B - La diagonale est une courbe assez remplie, plus tendue à l'avant qu'à l'arrière.

C - La partie avant de la longitudinale doit être une courbe de même famille que le contour de l'étrave et du tronc. La partie arrière de la longitudinale doit être d'allure parabolique, très tendue au-delà de la perpendiculaire arrière et sensiblement parallèle au contour de la voûte.

Toutes ces lignes doivent être parfaitement continues, car de leur continuité dépend le balancement ultérieur des formes de la carène.

Un dessinateur moyennement entraîné aura intérêt à faire passer ces courbes par la série des points calculés au moyen des coefficients du tableau III. Le plan considéré ici comme exemple d'application de la méthode comporte une flottaison, une longitudinale et une diagonale ainsi définies. Le tableau ci-dessous donne le détail du calcul (cotes calculées à la règle).

Dimensions de base mesurées sur la fig. 14:

<u>Flottaison</u>	$\frac{1}{2} \text{ largeur flottaison } l = 1,125 \text{ M}$
<u>Longitudinale</u>	$\text{Creux maximum de la longitudinale, } c = 0,43 \text{ M}$
<u>Diagonale</u>	$\text{Largeur maximum de la diagonale, } d = 0,705 \text{ M}$

<u>Numéro du couple</u>	0	1	2	3	4	5,5	7	8	9	10	11
<u>Flottaison</u> α	0	0,288	0,54	0,75	0,90	1	0,945	0,806	0,53	0	...
<u>Flottaison</u> αl	0	0,324	0,608	0,844	1,025	1,125	1,063	0,907	0,597	0	...
<u>Longitudinale</u> β	...	+0,92	-0,13	-0,61	-0,873	-1	-0,82	-0,507	-0,045	+0,51	+1,12
<u>Longitudinale</u> βc	...	+0,394	-0,056	-0,262	-0,377	-0,43	-0,353	-0,217	-0,019	+0,219	+0,482
<u>Diagonale</u> γ	0	0,332	0,603	0,80	0,93	1	0,912	0,728	0,425	0	...
<u>Diagonale</u> γd	0	0,234	0,426	0,563	0,653	0,703	0,642	0,512	0,299	0	...

Intersections de la longitudinale de base et de la flottaison aux points $X = 0,184 \times 6 = 1,104 \text{ M}$ et $X' = 0,919 \times 6 = 5,514 \text{ M}$ à partir de la perpendiculaire avant.

La figure 15 montre le tracé des trois lignes de base. Vérifier l'alignement TT' et vv' des points où la longitudinale coupe le livet de pont.

14 - TRACÉ DES COUPLES SUR LE TRANSVERSAL

On reporte sur les traces OS, QR et OP de la flottaison de la longitudinale et de la diagonale représentées par des droites sur le transversal (fig. 16) les cotes résultant du tracé précédent. On complète ces éléments par le tracé de la vue en tout du livet de pont et de la rabiture.

Les couples devront passer par les cinq points définis par flottaison, longitudinale, diagonale, pont et rabiture.

Le tracé des couples n'est bien défini que dans les régions où ces cinq points sont convenablement répartis pour lever toute ambiguïté. Dans l'exemple considéré, quatre couples seulement sont ainsi tracés, les couples 1, 3, 8 et 10.

15 - RECHERCHE DE POINTS AUXILIAIRES POUR LE TRACE DES COUPLES

Pour définir les autres couples de façon plus précise, on coupera la carène par une ligne d'eau EF au-dessus de la flottaison, passant aux environs du demi franc bord.

Les points E,G,H,F, d'une part, et les intersections de cette ligne d'eau avec les couples (1),(3),(5,5), (8), et (10) la définissent de façon précise.

On trace également une longitudinale équidistante de la longitudinale de base et du plan de symétrie. Les intersections du plan KL et des couples déjà tracés définissent bien cette longitudinale auxiliaire.

Cette longitudinale et la ligne d'eau précédente donnent pour chacun des couples insuffisamment définis sur le transversal deux points complémentaires permettant de terminer le dessin du transversal.

16 - ACHEVEMENT DU PLAN DE FORMES

L'achèvement du plan (fig.18) ne présente pas de difficulté. On complète le tracé précédent par une ou deux longitudinales, par une série de lignes d'eau et quelques sections diagonales. Noter à cet égard que, pour vérifier le tracé des courbes raccordant la carène au plan de dérive, il faut tracer une diagonale peu inclinée sur le plan de symétrie, coupant aux environs de 90° le tournant des varangues.(Diagonale D1).

La figure 18 représente au 1/20 le plan du bateau considéré. Pour la clarté du dessin, on n'a pas figuré les couples 5 et 6 sur le transversal. Ces couples devraient, bien entendu, être représentés sur un plan à plus grande échelle.

Sans entrer dans le détail des calculs dont nous comptions faire l'exposé dans un fascicule séparé consacré à la géométrie des carènes, indiquons que le déplacement réel de ce yacht est de 3,600 M³, soit presque exactement celui que l'on avait prévu (paragraphe 8 et 12). Pour calculer ce déplacement, on mesure (calcul ou planimètre) la surface immergée des couples; on trace ensuite à une échelle convenable la courbe des aires des couples représentée en trait mixte sur la figure 18 et, mesurant la surface comprise entre l'axe longitudinal et cette courbe, on définit facilement la section moyenne (ici 0,60 M²) qui, multipliée par la longueur de flottaison (6 mètres) donne le volume de la carène :

$$\Delta = 0,60 \times 6 = 3,60 \text{ M}^3$$

Ce volume exprimé en tonnes métriques, le déplacement du bateau en eau douce. En eau salée (densité 1,026) le déplacement correspondant serait : $1,026 \times 3,60 = 3,70$ tonnes, ou 3.700 kg.

17 - LE TRACE DES BATEAUX ANGULAIRES

Les qualités et les défauts des voiliers angulaires font l'objet de discussions ayant toutes chances de durer jusqu'au Jugement Dernier. Il est donc bien inutile de prendre position dans un litige aussi durable. Une étude sur le tracé des cruisers à voiles, ne considérant pas les voiliers angulaires, serait toutefois incomplète, les qualités nautiques de ces bateaux n'étant plus à établir depuis la traversée de l'Atlantique par T.F. DAY à bord du "Sea Fird" et le Tour du Monde de Harry PID-GEON à bord d'"Islander".

Les cruisers angulaires sont généralement du type à voûte, l'élançement arrière allongeant favorablement la flottaison à la gîte et faisant disparaître la cassure qu'elle présente le plus souvent dans la position droite. On a toutefois construit, surtout à l'étranger, des cruisers angulaires à tableau et même des pointus genre Norvégien.

On a indiqué précédemment (paragraphe 6 et figure 8) que la ligne d'angle de ces bateaux passe par deux points peu variables d'un modèle à l'autre. Le premier de ces points est celui où l'angle aboutit à l'étrave. Sa hauteur au-dessus de la flottaison est donnée par la relation : $0,13 L - 0,32$. Le second est le point le plus bas de la quille d'angle, situé à 55% de la longueur de flottaison, et immergé d'une quantité égale à 3 ou 4% de la largeur maximale de la flottaison.

L'analyse des plans d'un certain nombre de ces bateaux indique d'autre part que la largeur maximum B de la coque dépasse d'environ 10% celle des bateaux en formes de même longueur.

Cette analyse indique d'autre part (fig.19) que les fonds sont modelés en faisant pivoter une droite autour de deux pôles, l'un P_1 engendrant les fonds avant; l'autre P_2 engendrant les fonds arrière et que la pente du flanc au couple 10 dépasse d'environ 50% la pente du flanc au maître couple.

Observer au passage que la génération des fonds avant et arrière au moyen de deux pôles distincts P_1 et P_2 , n'est pas d'une géométrie très élégante, car, en réalité, les droites considérées s'appuient non sur des pivots mais sur une courbe directrice continue de l'avant à l'arrière. En fait, l'évolution sur la directrice s'effectue si rapidement quand on passe des formes avant aux formes arrière que l'erreur ainsi commise est absolument négligeable et se trouve corrigée, si besoin est, lors du tracé des longitudinales et des lignes d'eau.

18 - EXEMPLE DE TRACÉ D'UN YACHT ANGULAIRE

Considérons à titre d'exemple la transposition du bateau précédemment dessiné en formes. On conserve les mêmes valeurs de longueur totale, longueur de flottaison, d'élançement et de franc bords. Le tirant d'eau pourrait être légèrement diminué. On le conservera cependant car sa valeur n'influe pas sur la géométrie du tracé.

On trace tout d'abord la vue en plan du livet de pont en majorant de 10% les largeurs admises pour le bateau en formes. La largeur totale est ainsi : $2,32 \times 1,10 = 2,55$ M. On conserve la même élévation du livet de pont et le même contour longitudinal de la section diamétrale.

19 - TRACE DU MAITRE COUPLE

Le tracé du maître couple (Fig.20) doit satisfaire à trois conditions :

- Passer par le point A du livet de pont relevé sur la vue en plan et sur l'élévation du pont ($1/2$ largeur - 1,275 M et franc bord 0,69 M).
- Passer par le point B du creux maximum de la quille d'angle. Ce creux sera admis égal à environ 3% de la largeur maxima, soit 0,08 M.
- Correspondre au déplacement prévu. Ce déplacement, pour un bateau angulaire, est (paragraphe 6) :

$$\Delta = (L + 1,5)^3 \times \frac{0,75}{100}$$

$$\Delta = (6 + 1,5)^3 \times \frac{0,75}{100} = 3,18 \text{ M}^3$$

Ayant porté sur le transversal la trace A du livet de pont, on choisit une pente du flanc comprise entre 20% pour les cruisers et 35% pour les canots. Soit 22,5% dans le cas considéré. On trace le flanc en conséquence. Il en résulte une largeur de flottaison (fig.20) de 2,25 M.

La cote Z correspondant à $\Delta = 3,18 \text{ m}^3$ sera donnée par la formule de BRIX (paragraphe 12) :

$$Z = \Delta / L \ell = 3,18 / 6 \times 2,25 = 0,232 \text{ M.}$$

On porte cette cote à une distance du plan de symétrie égale aux $3/4$ de la largeur de flottaison, fixant un point D qui, joint à l'angle B donne le tracé de la varangue.

20 - TRACE LONGITUDINAL DE LA QUILLE D'ANGLE -

La quille d'angle doit couper l'étrave à une hauteur au dessus de la flottaison égale à :

$$0,13 L - 0,32 = (0,13 \times 6) - 0,32 = 0,46 \text{ m}$$

Par ce point et le point B déjà déterminé au maître couple, on fait filer à la latte la projection longitudinale de la quille d'angle. Cette ligne doit être parfaitement continue, plus tendue à l'arrière qu'à l'avant. Dans sa partie arrière, elle doit être notablement moins inclinée que le contour de la voûte.

Détermination du Pôle P_i

On trace au sentiment la projection BG de la quille d'angle sur le transversal (fig.21). Cette projection est une courbe très peu arquée, à convexité tournée vers le haut. Elle se confond même avec une droite dans certains bateaux.

On note sur le longitudinal la cote 0,34 M où passe l'angle au-dessus de la flottaison au couple 0. Cette cote, reportée sur le transversal donne le point H situant l'angle au couple 0. A la largeur près de la face avant de l'étrave, la varangue de ce couple coupe le plan de symétrie au niveau de la flottaison d'où le point E et, joignant HE par une droite, détermination du pôle P_i à l'intersection de l'HE et de BC.

21 - TRACE DES COUPLES DE L'AVANT

On connaît (longitudinal) les cotes de hauteur de l'angle aux divers couples. Ces cotes, reportées sur la projection BG de l'angle (Fig.22) définissent les points K L etc.. où les couples aboutissent à la quille d'angle. Reporter les largeurs correspondantes sur la vue en plan pour vérifier le tracé de l'angle.

Les varangues des couples avant sont déterminées en traçant une série de droites pivotant sur le pôle P_i et passant par K, L, etc...

Les flancs sont simplement tracés en joignant les mêmes points aux projections correspondantes sur livet de pont (fig.23)

22. DETERMINATION DU POLE P_2

On sait (paragraphe 17) que la pente du flanc au couple 10 est moitié plus forte que celle du flanc au maître couple. Dans le cas présent, cette pente sera : $22,5 \times 1,5 = 33,8\%$.

Par le point 10 (Fig.24) de la projection du livet de pont au couple considéré sur le transversal, on trace une droite 10-M de pente 33,8 % déterminant le flanc à ce couple.

On mesure sur le longitudinal la hauteur (0,26 M) de l'angle au couple 10, qui définit le point N sur la droite 10-M

A la largeur près de l'étambot, la varangue du couple 10 doit passer par P, intersection du plan de symétrie et de la flottaison (figure 25). On joint NP.

L'intersection des prolongements de NP et BC (varangues au maître couple et au couple 10) donne le pôle P.

22 - TRACE DES COUPLES DE L'ARRIERE ET ACHEVEMENT DU PLAN DE FORMES

Le tracé des couples de l'arrière s'inspire des principes exposés au paragraphe 22 pour le tracé des couples de l'avant. On balance sur le transversal et sur la vue en plan les projections de la quille d'angle (fig.26) et l'on joint les points de la quille d'angle correspondant aux divers couples par des droites pivotant sur le pôle P_2 , ce qui détermine les varangues.

Les flancs sont tracés en joignant l'angle au livet de pont à chaque couple.

On termine le plan (fig.29) en traçant quelques longitudinales, quelques lignes d'eau et la flottaison. Il n'est pas nécessaire de tracer les diagonales des bateaux angulaires.

La figure 28 donne, à titre documentaire, la superposition des transversaux du bateau angulaire et du bateau en formes que nous avons dessinés pour illustrer la méthode.

On voit que les couples des deux plans, tout en offrant certains points de ressemblance, en particulier l'acuité des couples avant, ne peuvent pratiquement pas se déduire les uns des autres, ce qui condamne la méthode expéditive de tracé d'un bateau angulaire qui consiste à envelopper par deux droites chacun des couples d'un bateau en formes.

On remarque, d'autre part, que la longitudinale de base du bateau en formes (fig.18) est très comparable à la longitudinale correspondante du bateau angulaire (Fig.29). Cette dernière serait même légèrement plus tendue, ce qui explique sans doute la marche satisfaisante des bateaux de ce type, malgré la cassure de la flottaison.

Indiquons pour terminer, que le déplacement planimétrique du bateau angulaire considéré est de 3,24 M³ soit à 2% près le déplacement prévu (paragraphe 19).

TROISIEME PARTIE

CONSTITUTION DU DOSSIER DE CALCULS

FORMULES EMPIRIQUES POUR L'ETABLISSEMENT DES PROJETS

EXPERIENCES SUR MAQUETTES

25.- COEFFICIENTS CARACTERISTIQUES

Afin de pouvoir aisément comparer les caractéristiques de diverses carènes, les architectes navals ont depuis longtemps défini les quelques coefficients suivants :

- Coefficient de finesse globale φ

$$\varphi = L / \sqrt[3]{V}$$

φ représente en mètres la longueur de flottaison d'un navire d'une tonne de déplacement en eau douce (1 m³).

- Coefficient prismatique β

$$\beta = V / LB^2$$

où B^2 = Section du Maître couple.

β , qui est égal à 1 pour une carène cylindrique, caractérise le remplissage de la courbe des aires des couples.

- Coefficients de forme du Maître couple γ et μ .

On distingue :

$$\text{Le coefficient d'allongement } \mu = t / l$$

$$\text{Le coefficient de remplissage } \gamma = B^2 / lt$$

où t = profondeur de la carène
 l = largeur de la flottaison.

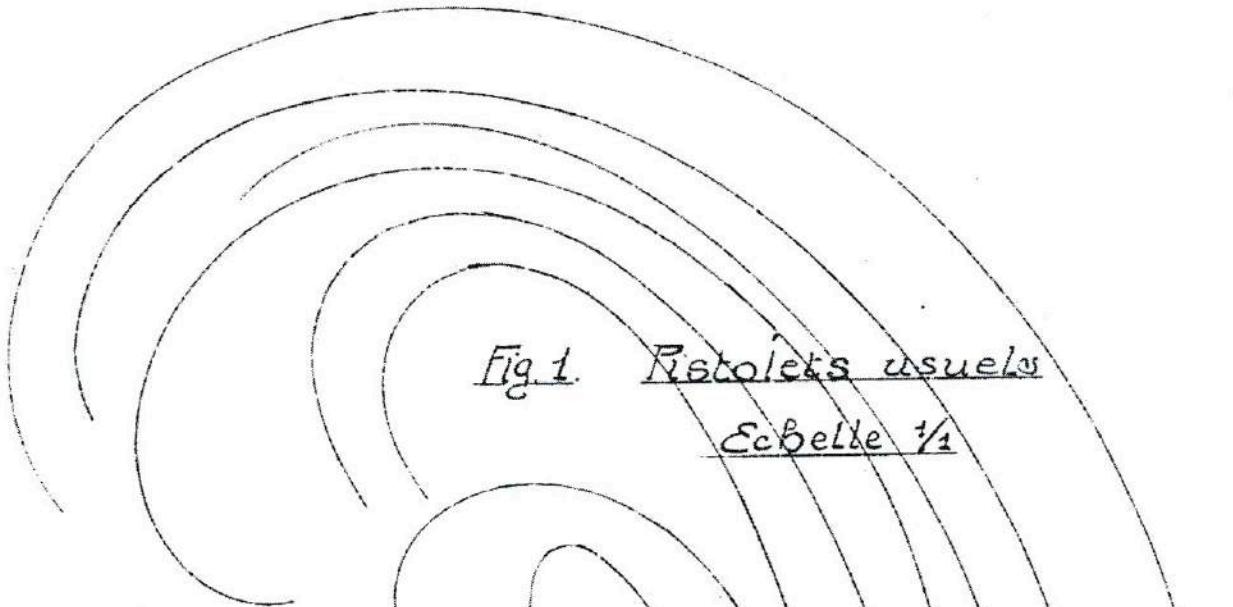
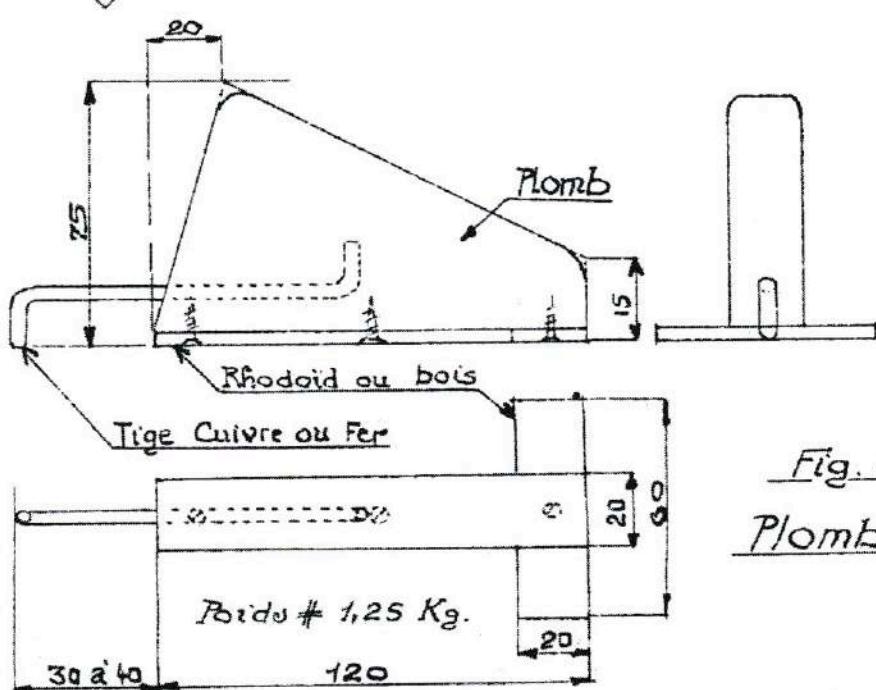
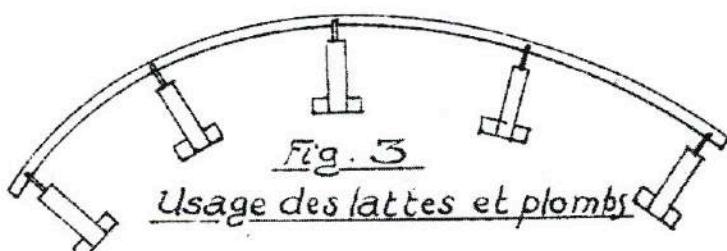
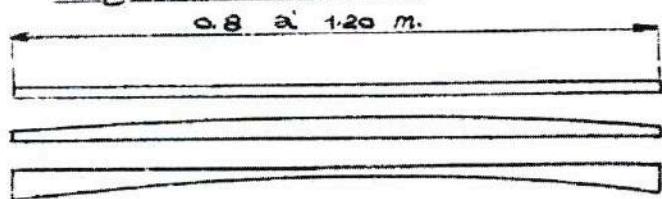


Fig. 2. Lattes



Jean Angeli 27/12/41

Fig. 5

Dimensions des Yachts à Voile

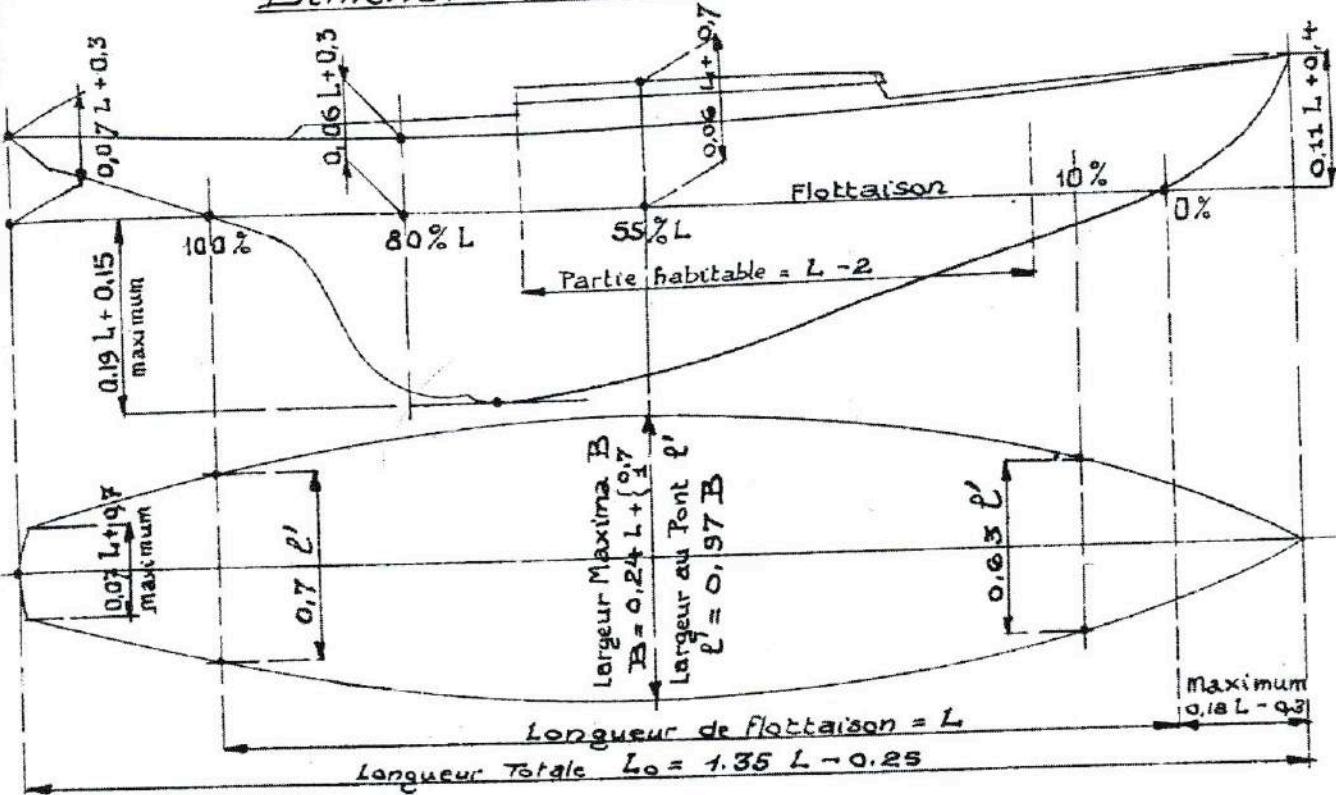


Fig. 6

Dimensions des Yachts à tableau

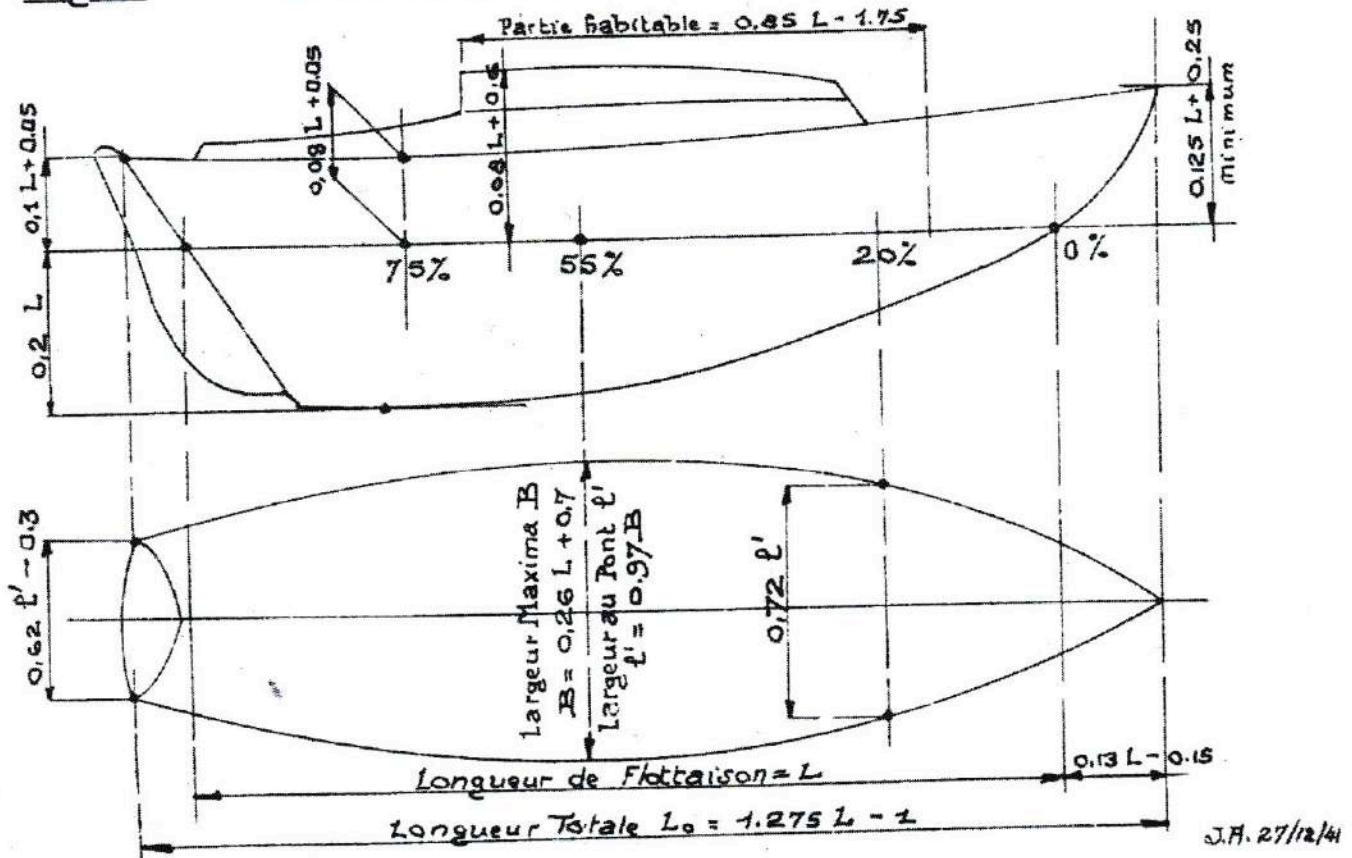


Fig. 7
Dimensions des Yachts Norvegiens

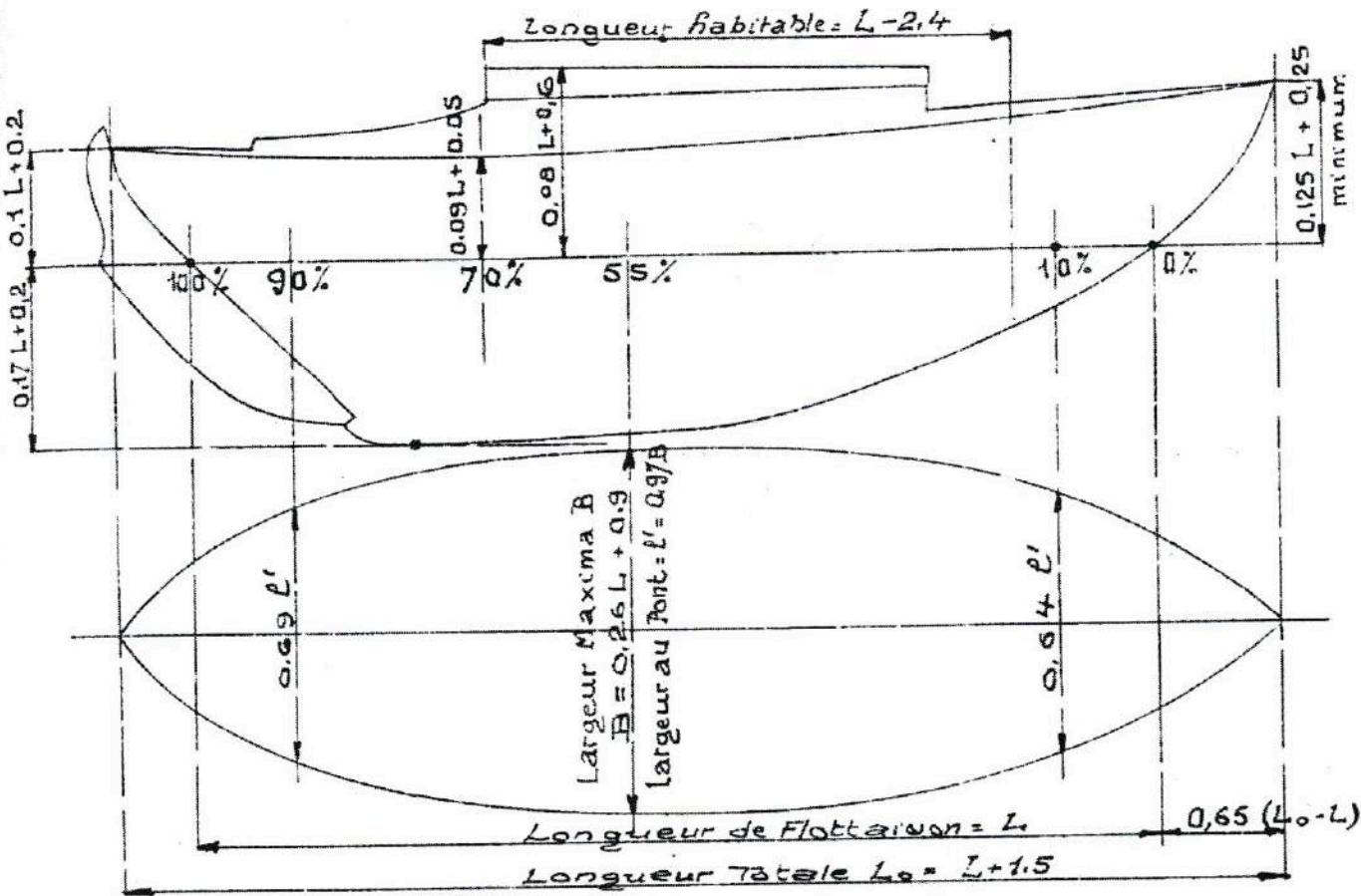
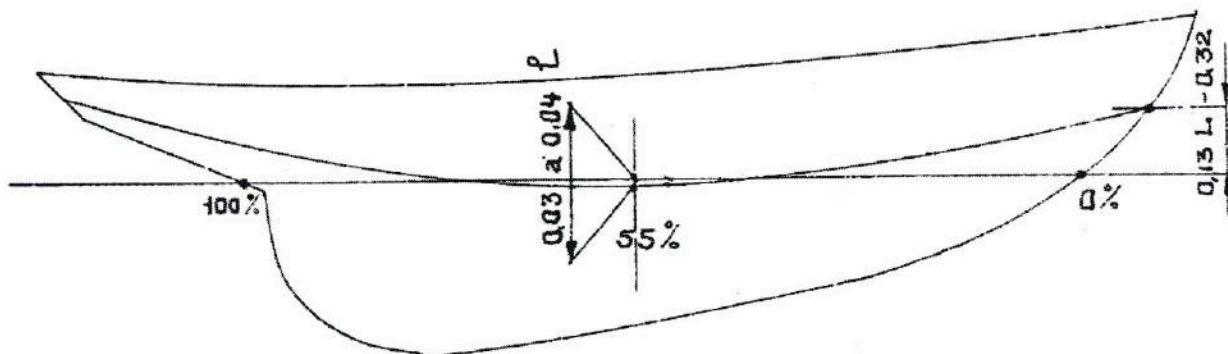
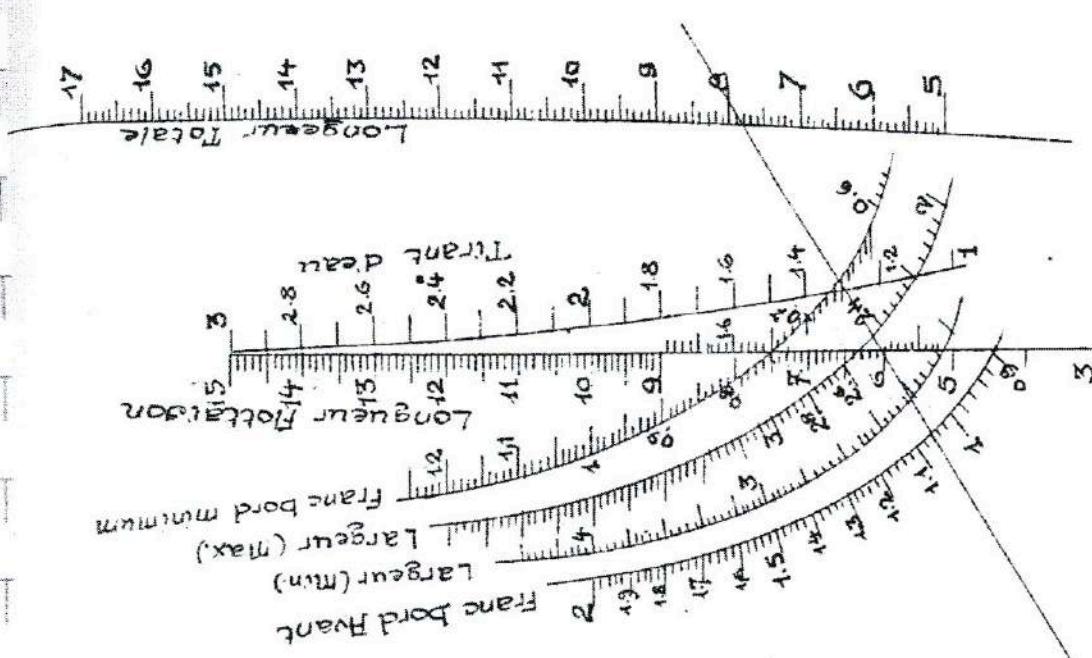


Fig. 8

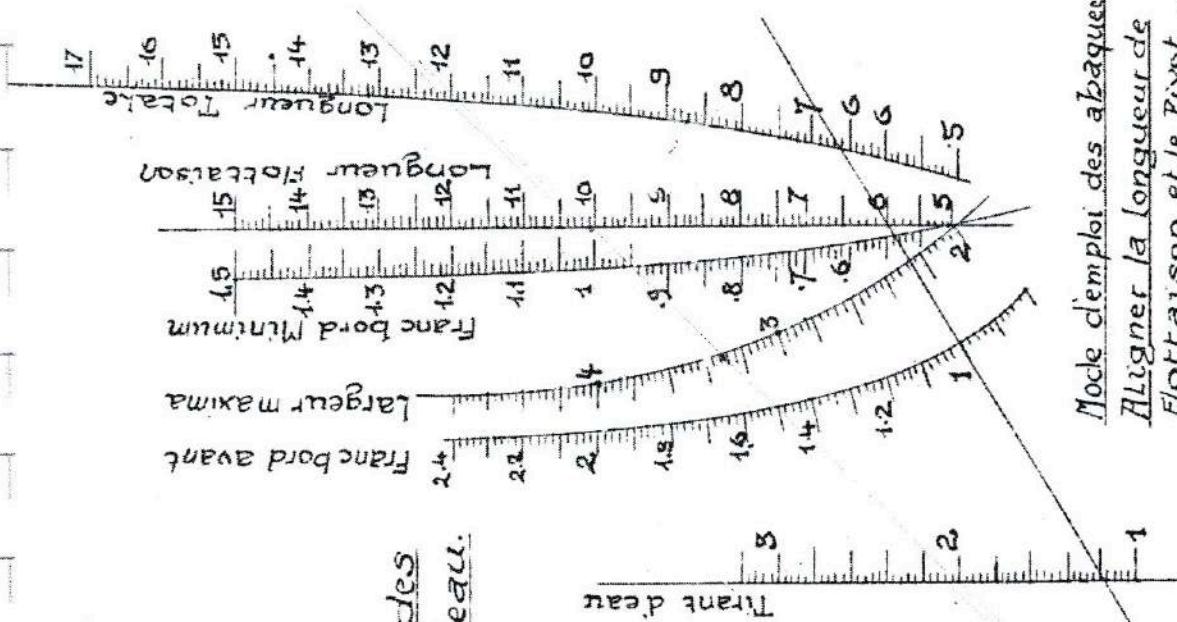


L'élément de Tracé le plus caractéristique est l'élevation de la quille d'Angle. Pour les autres dimensions, appliquer les relations précédentes, majorer de 10% la largeur du Pont



Dimensions des Yachts à tableau.

Fig. 10



Pivot

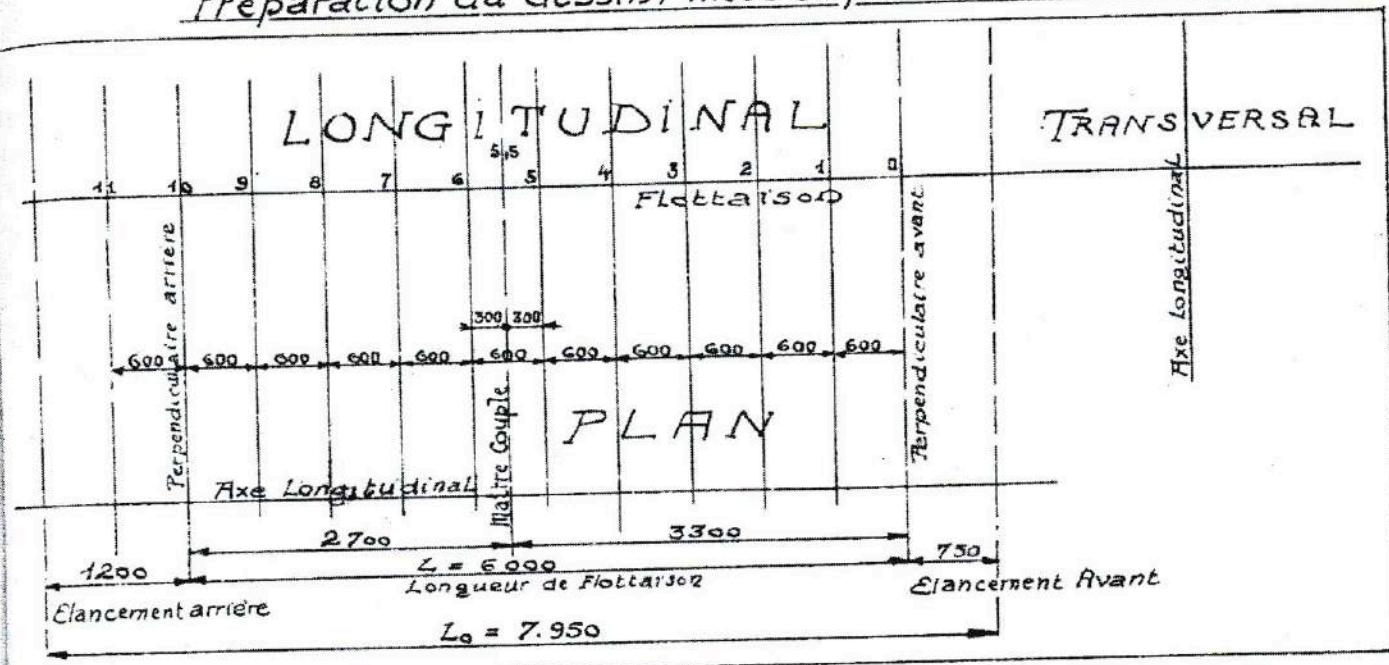
Pivot

Fig. 9

Jean Fliegel 27/12/81.

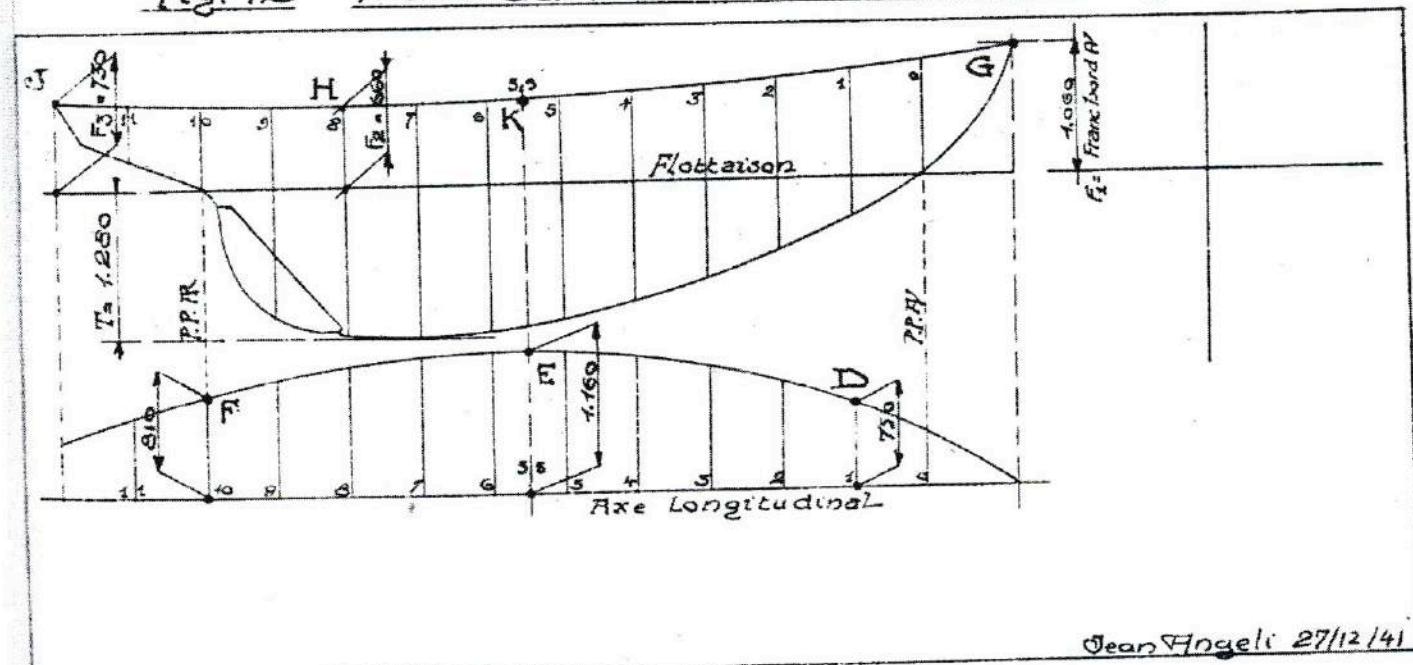
Fig. 11

Préparation du dessin, mise en place des axes et divisions



Mettre en place l'axe longitudinal sur la vue en plan et sur la vue transversale. Tracer la ligne de Flottaison. Porter L_a , L_i , et diviser la longueur de Flottaison en 10 segments égaux.

Fig. 12 Trace du Pont et du Contour Longitudinal



Jean Angelis 27/12/41

Fig. 13

Tracé du Maître-Couple

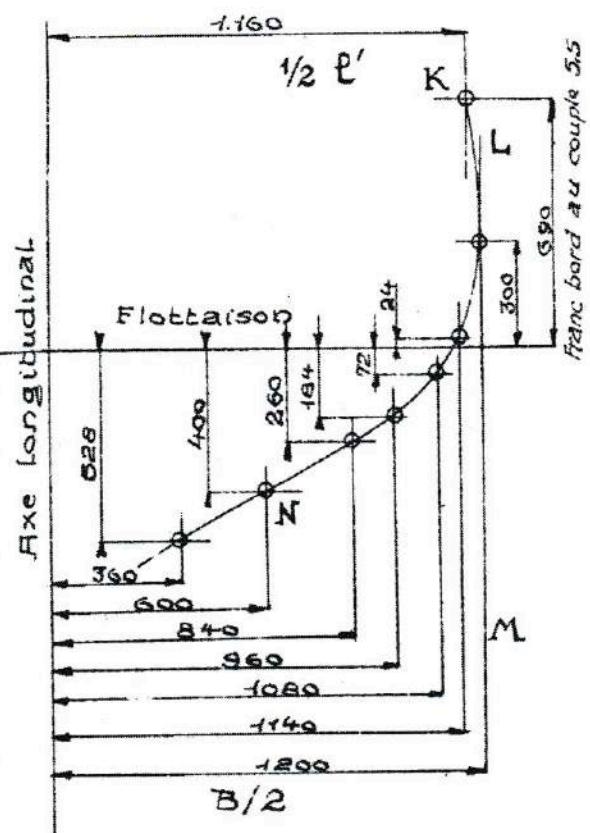
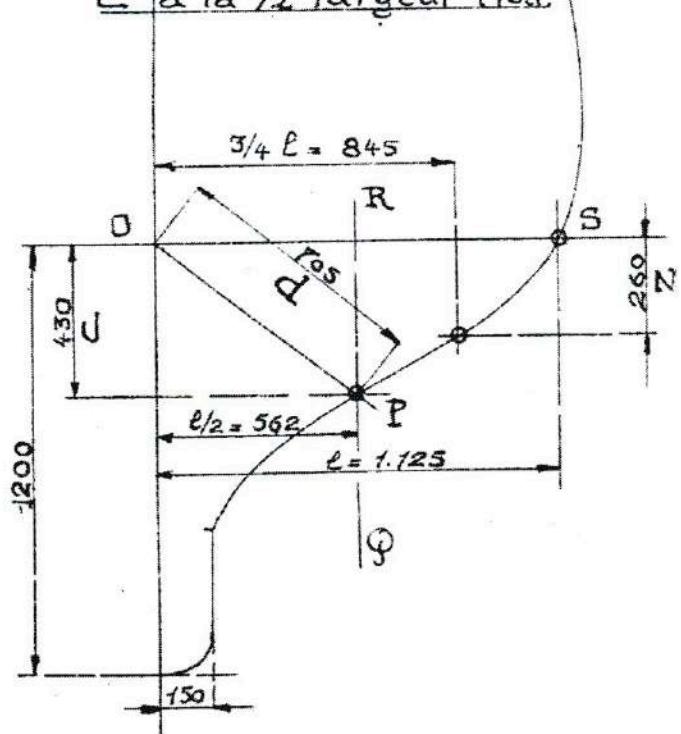


Fig. 14

Raccordement du maître couple avec la quille, mesure de Z_1 , et de la largeur flottaison ℓ , de la diagonale d , du creux C à la $\frac{1}{2}$ largeur flott.



Tracé des Lignes de base, flottaison, longitudinale et diagonale

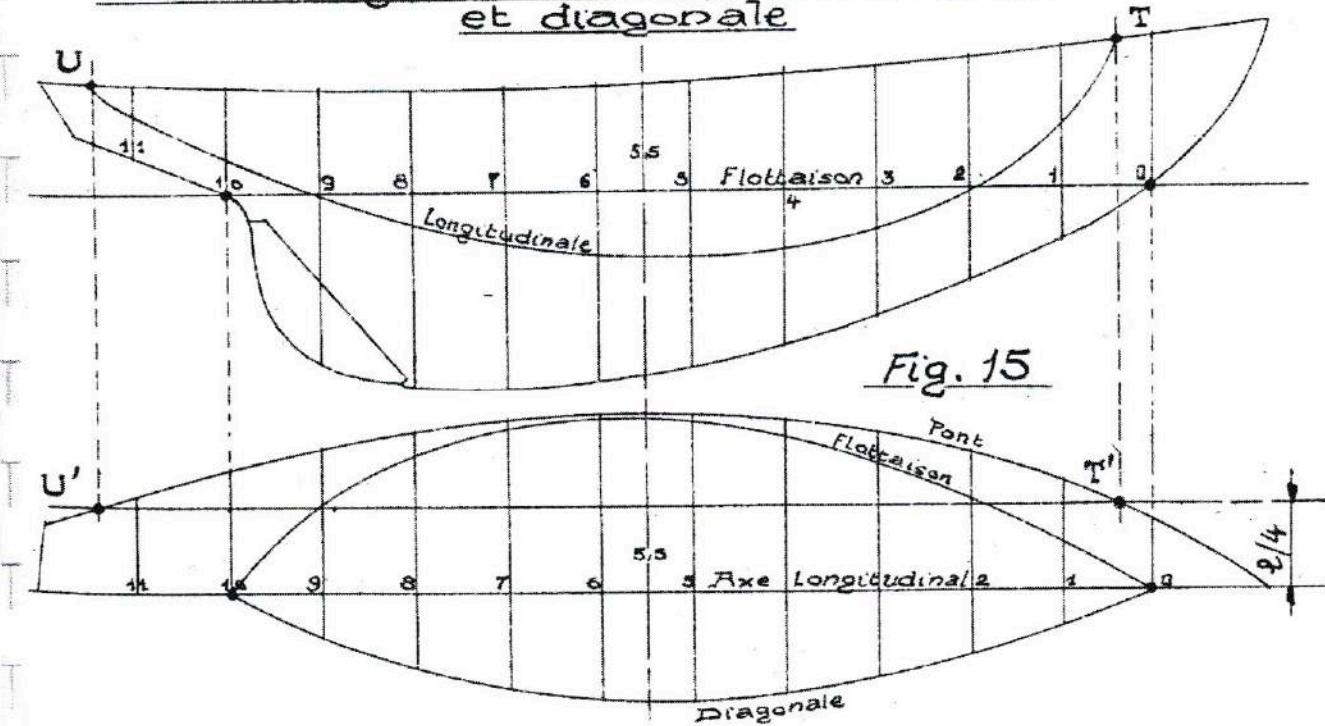
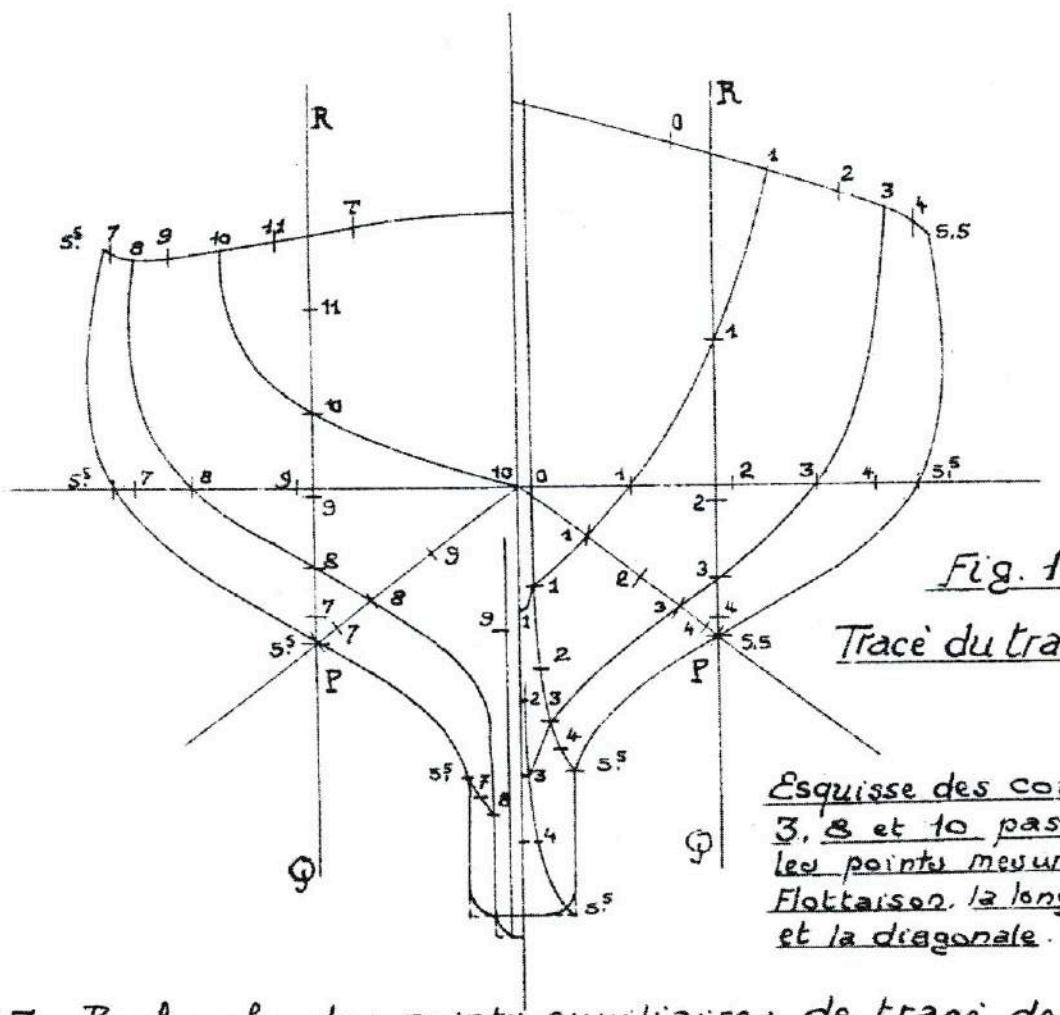


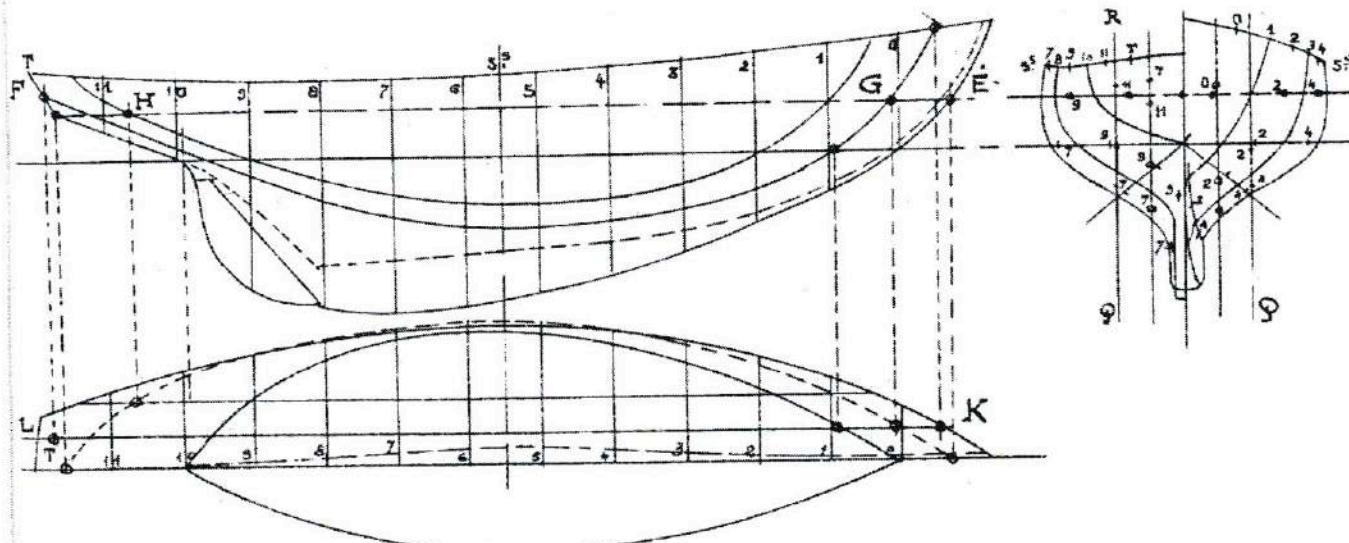
Fig. 15

Jean Angeli 27/12/41



Esquisse des couples 1, 3, 8 et 10 passant par les points mesurés sur la Flottaison, la longitudinale et la diagonale.

Fig. 17 Recherche des points auxiliaires de trace des couples



Génération des fondus PR

Pôle P_1

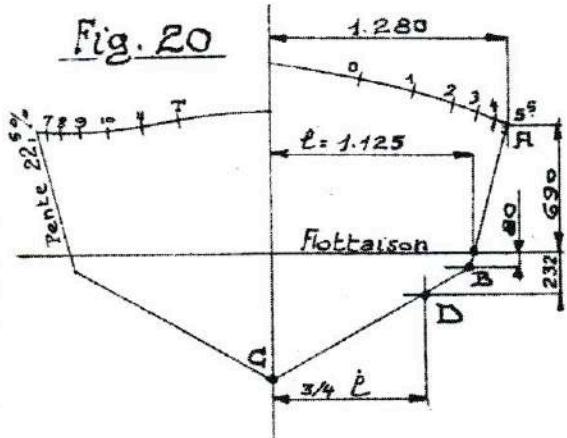
Fig. 19

Génération des couples des yachts angulaires

Génération fonds PR

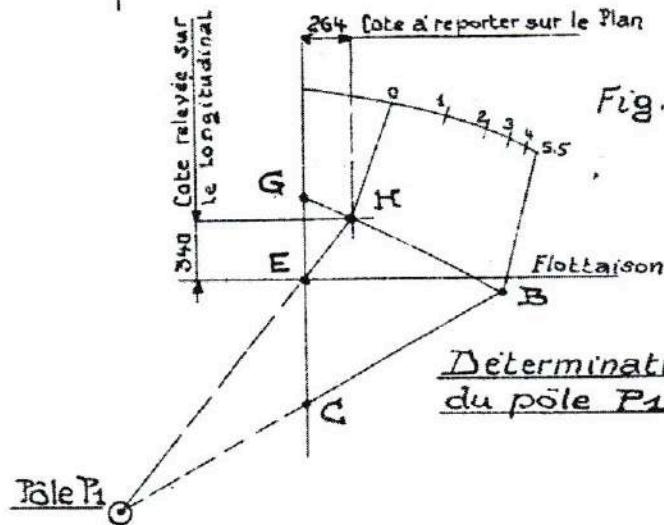
Pôle P_1

Fig. 20



264 Cote à reporter sur le Plan

Fig. 21



Détermination du pôle P_1

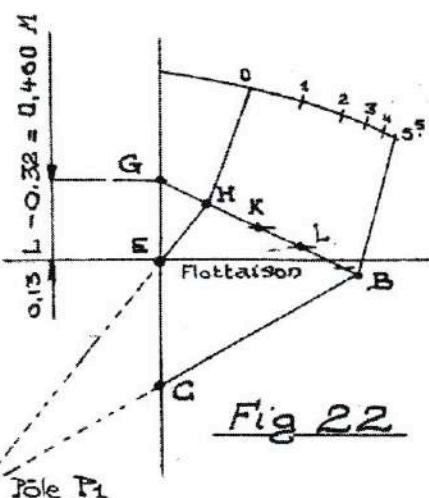


Fig. 22

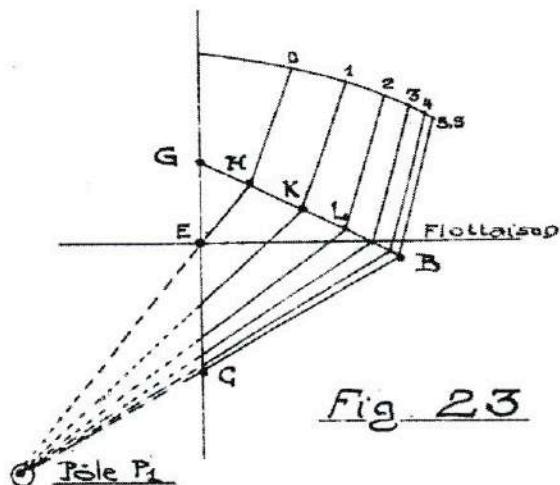


Fig. 23

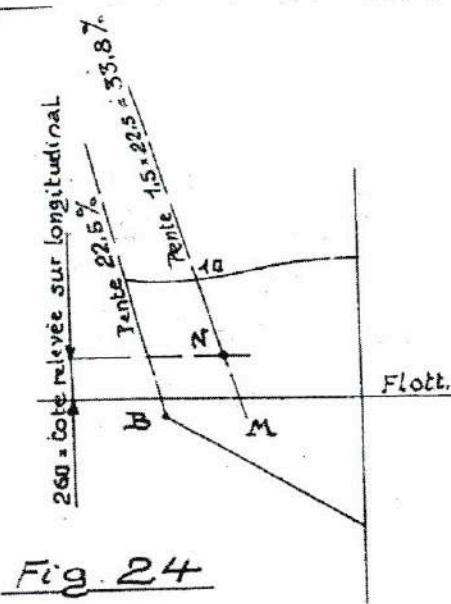


Fig. 24

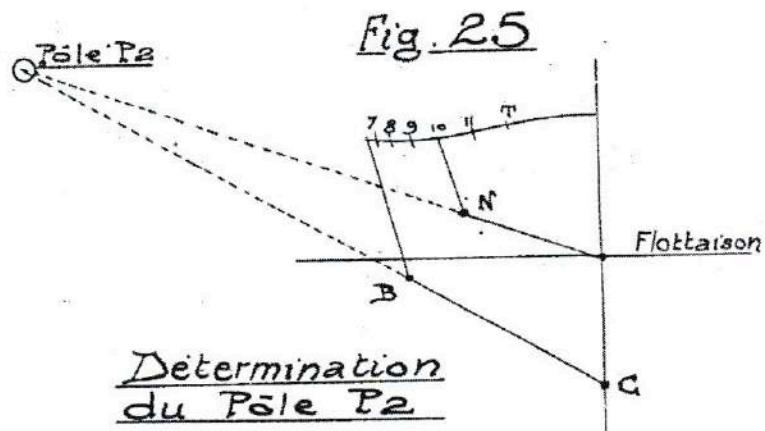


Fig. 25

Détermination
du Pôle P2

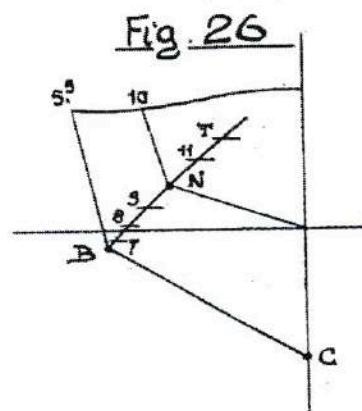


Fig. 26

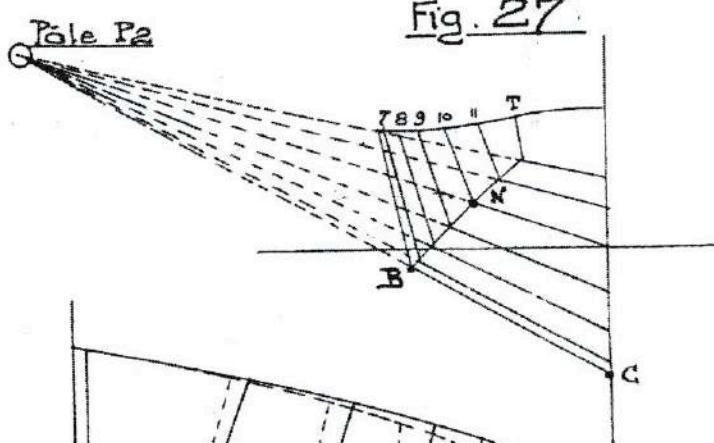


Fig. 27

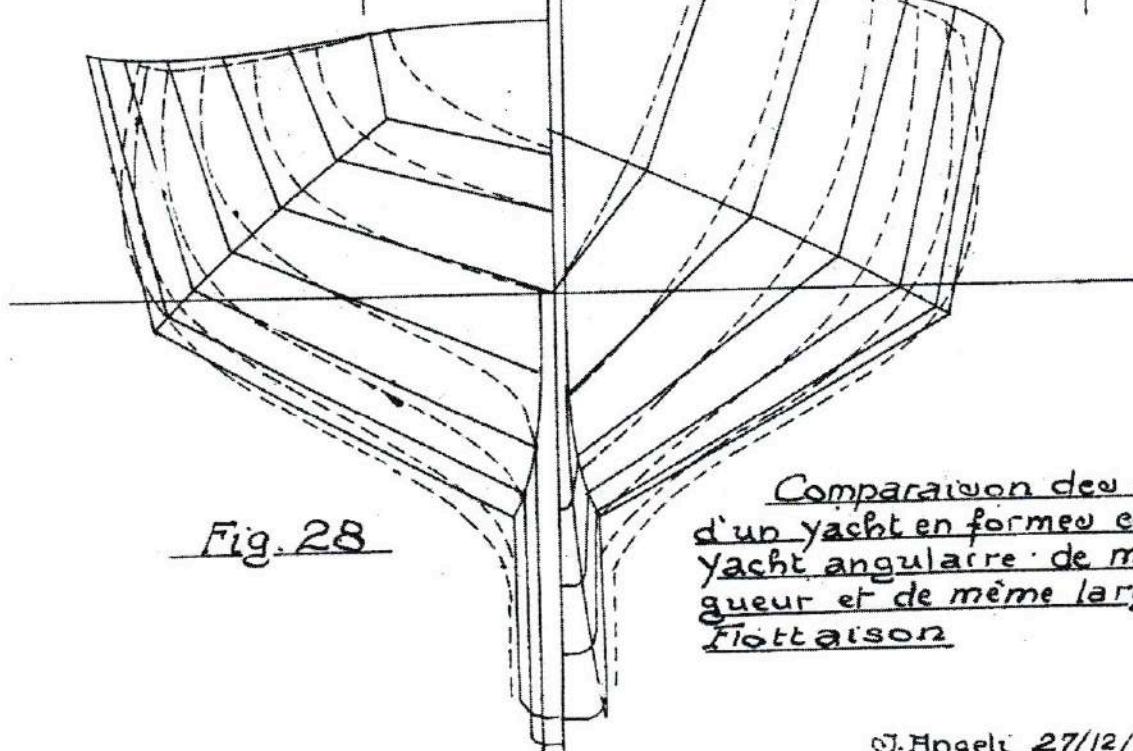


Fig. 28

Comparaison des sections
d'un yacht en forme et d'un
yacht angulaire de même lon-
gueur et de même largeur de
Flottaison

J. Angel 27/12/41