

Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales

Caractéristiques nautiques et performances des navires antiques :

*l'apport de l'architecture navale associée aux données
archéologiques*

Volume de textes et figures

Mémoire présenté en vue du
Diplôme de l'EHESS

par
Philippe Allard

Directeur du mémoire : A.Tchernia

1997

Édition révisée (2018)

REMERCIEMENTS

Je tiens a remercier Monsieur André TCHERNIA et l'ÉCOLE des HAUTES ÉTUDES EN SCIENCES SOCIALES qui ont pu m'offrir une structure académique souple particulièrement adaptée à mes contraintes professionnelles et à la nature indépendante de mon esprit.

Mes remerciements s'adressent aussi à Messieurs Patrice POMEY, Michel RIVAL et Robert ROMAN qui constituent à eux seuls l'équipe d'archéologie navale du centre Camille Jullian de l'Université d'Aix-Marseille 1. Ils ont su avec spontanéité et amitié m'accueillir dans leur domaine et m'intégrer a leurs travaux. J'ai trouvé avec eux des guides chaleureux pour la formation de ma culture archéologique et de mon expérience pratique des fouilles sous-marines.

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE

**Ecole des Hautes Etudes
en Sciences Sociales**

Centre de la Vieille Charité
2, rue de la Charité - 13002 Marseille
Tél. 91 91 92 62
Fax. 91 91 34 01

15 juillet 1997

Cher Ami,

Votre téléphone n'existe plus;
j'espère que ce mot vous
a atteint.

Je vous salue de vous avoir le plaisir
de signer votre Diplôme, qui vous
sera adressé ultérieurement
avec la signature du
président de l'EHSS. Ce plaisir
est partagé car vous avez
obtenu la seule mention
de l'année par l'École : « susceptible
d'être publiée », que deux mémoires
seulement ont mérité à cette
rencontre.

Tous mes vœux de bienvenue
douce, et mes meilleurs vœux
pour vos nouvelles entreprises

André Tchekina

ABSTRACT

This thesis is an attempt to associate modern naval architecture and archeological data. As once the vestiges of a wreck are sufficient in number and well preserved enough to reconstitute the structure and the form of the ship it becomes possible to apply to it the permanent laws of mechanics and technical know-how of the naval architecture, either traditional or contemporary. As physical reconstruction is too expensive in both time and money an alternative to experimental archaeology is to forecast performances by calculations.

The intervention of either engineer or naval architect in nautical archaeology studies can meet with reservation from other searchers due to the esoteric nature of method and results, and their corresponding loss of control on the discipline. To avoid this conflict, it is necessary to have a pedagogical approach and to define clearly the terms and notions employed. Similarly the reasoning has to be explicit as well as the formulation of hypotheses in order that the other researchers can make a critical examination of them. If they are convinced by the demonstration, they can then be fully confident in publishing results. It is not of so much concern to transform nautical archaeologists into naval architects but to warn them of the capacities and limits of employed methods.

It is with this in mind that I have approached the present study by outlining me the following objectives:

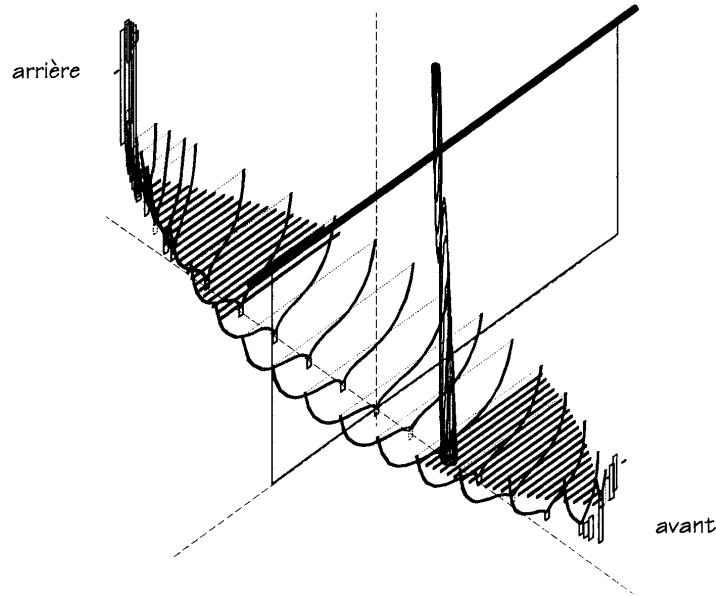
- to make a personal synthesis of current knowledge on the theory of ship, naval architecture and navigation;
- to realize a simple didactic statement to transfer this knowledge to the nautical archaeologist community;
- to conceive an estimative methodology of nautical characteristics and performances of ships;
- to implement this methodology on specific examples.

The study of ship behavior makes clear the problems that need to be considered. Some of the first to appear are these that concern the buoyancy and the weight of the ship as well as the stability of its balance during an incline. This can be categorized into the **statics of ship**. Thereafter, when the ship moves, a resistive force appears that opposes the water to the passage of the hull and against which it is necessary to compensate by producing a motor force, wind origin with a sail, or muscular and human origin with oars. The totality of the then raised problems and the obtained performance calculation constitutes a part of the **dynamics of ship**. Finally, when these performances are known we can put the problem of the use of the ship through, on the one hand, methods of navigation or handling, and on the other hand, its management as a mode of transportation. These last aspects of the study categorized in the **handling of ship**. This memoir deals with all these issues.

As specific cases the methodology is applied to the wreck n° 9 of the Place Jules Verne in Marseilles and to the wreck of Kyrenia that has been the object of a reconstruction and the results of sea trials in order to compare them to theoretical predictions. Finally the result is a complete methodology to forecast performance of ancient ships and peculiarly a real *velocity prediction program* (VPC).

Preview of method and results

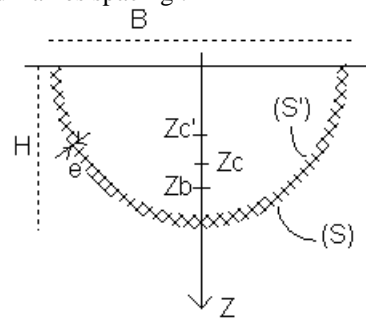
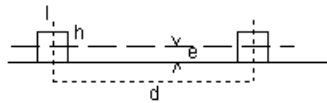
A computer aided description of a wooden structure (here Kyrenia II) :



a quick method to estimate its weight from thickness planking and frames spacing :

$$d \cdot e = 2 \times \frac{1}{2} h \cdot l \quad \text{d'où} \quad e = \frac{h \cdot l}{d}$$

fig. III.2

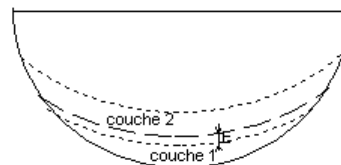


an other one to estimate the specific weight of cargo with amphorae according to their arrangement :

en carré: $d = \frac{P}{D^2 \cdot H}$ en quinconce: $d = \frac{2P}{\sqrt{3} \cdot D^2 \cdot H}$
 en carré: $I = \frac{D}{\sqrt{2}}$ en quinconce: $I = \frac{D}{\sqrt{3}}$



fig. III.4

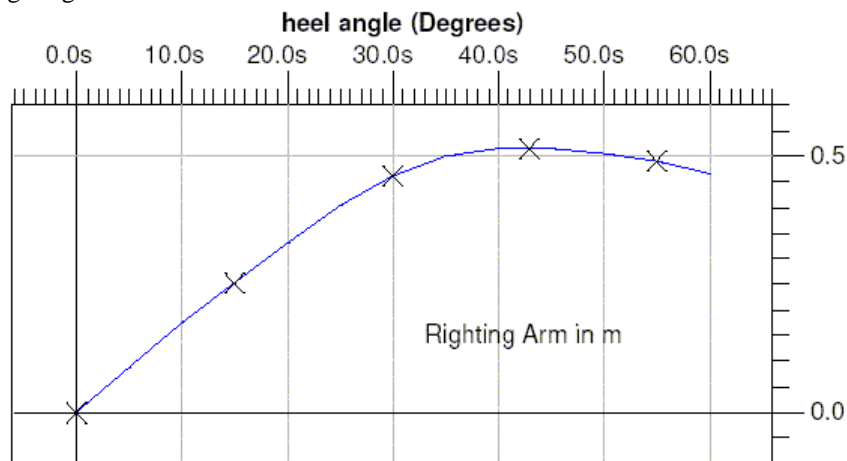


Amphore	Hauteur en m	Diamètre en m	Poids en kg	Rangement	Poids spéc. en kg/m ³
Dressel 1 B de vin	1,16	0,32	50	carré	421
Dressel 1 B de vin	1,16	0,32	50	quinconce	486
Dressel 2/4 de vin	0,92	0,32	43	carré	456
Dressel 2/4 de vin	0,92	0,32	43	quinconce	527
Dolium de vin	2,00	1,60	2250	quinconce	507

a panel of formulas to estimate ship geometry characteristics (here the wetted surface):

Navire	T en m	V en m ³	L en m	B en m	Am en m ²	Cms en m ²	Aw en m ²	Cwp	Cb	C23	Scb	S réelle	S Dupré	S Kirk	S Gerritsma	S Holtrop
Kyrénia	0,39	1,31	11,45	1,96	0,2	0,229	9,6	0,430	0,098	0,584	1,014	17,48	9,44	12,30	15,51	15,22
Kyrénia	0,78	8,46	13,09	3,26	1,1	0,421	25,3	0,594	0,202	0,643	0,807	36,84	27,07	31,40	32,65	33,01
Kyrénia	1,17	19,95	13,35	3,76	2,3	0,528	32,8	0,655	0,290	0,678	0,778	49,97	40,67	48,77	44,07	46,02
Kyrénia	1,56	33,60	13,58	4,04	3,8	0,597	36,6	0,668	0,347	0,691	0,762	61,13	52,68	64,88	53,03	57,23
Kyrénia	1,93	47,56	13,80	4,19	5,2	0,646	38,7	0,669	0,386	0,696	0,751	71,25	63,07	79,40	60,11	67,11
erreur relative moyenne :													-15%	5%	-14%	-7%
JV n°9	0,13	0,46	6,02	1,09	0,1	0,491	5,1	0,775	0,351	0,726	0,851	6,26	3,19	5,69	6,21	4,85
JV n°9	0,26	1,25	6,49	1,34	0,2	0,606	6,8	0,780	0,434	0,743	0,811	8,52	5,95	8,32	8,31	7,62
JV n°9	0,40	2,26	6,85	1,47	0,4	0,676	7,6	0,759	0,478	0,739	0,786	10,75	8,66	11,30	10,10	10,05
JV n°9	0,53	3,29	7,12	1,54	0,6	0,716	8,3	0,752	0,500	0,738	0,776	12,67	10,93	13,95	11,55	12,15
JV n°9	0,66	4,40	7,39	1,60	0,8	0,744	8,7	0,738	0,512	0,732	0,766	14,56	13,05	16,68	13,00	14,25
erreur relative moyenne :													-14%	10%	-9%	-4%

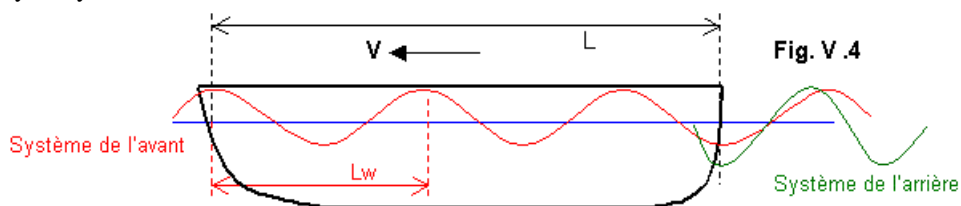
leading finally to a righting arm curve with :



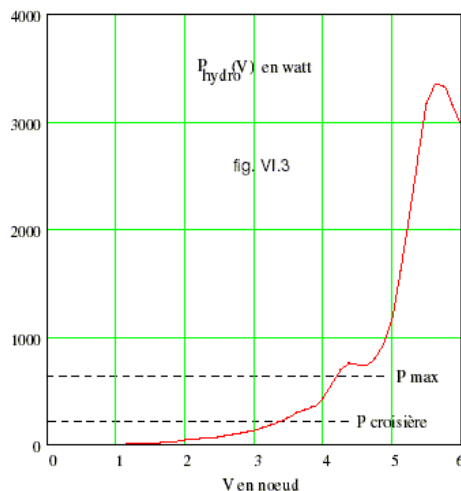
Weight = 16.500 MT LCG = 0.037a TCG = 0.000 VCG = 1.200

GMt = 1.002 m

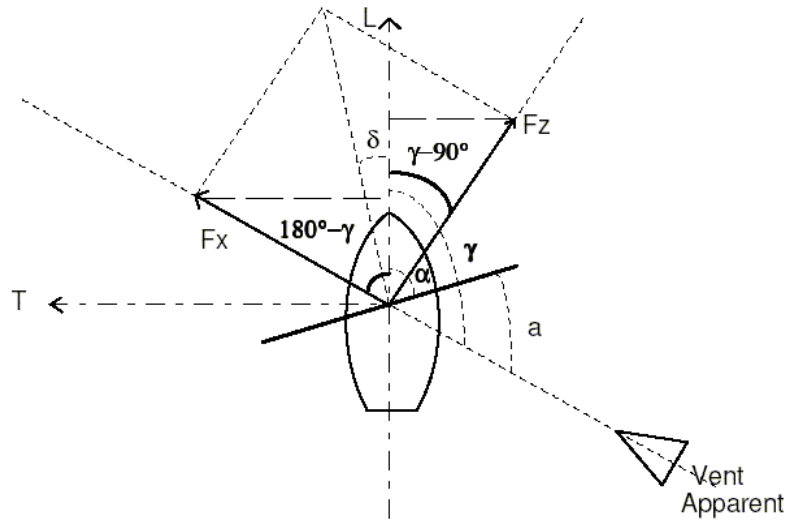
An analysis of hydrodynamic resistance:



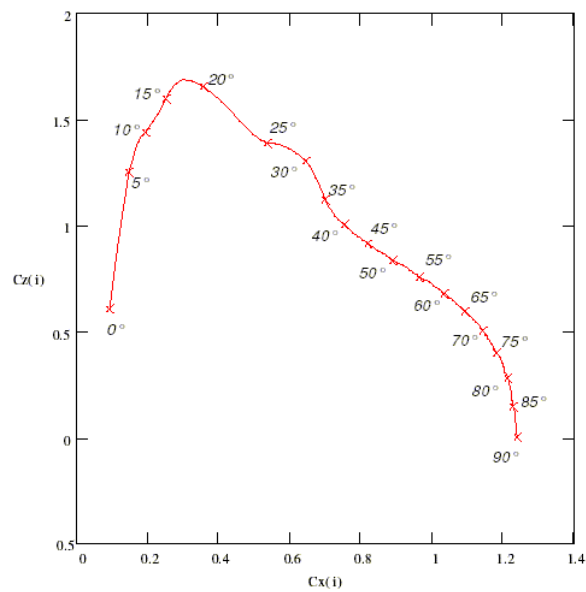
leading to calculation of power to row a boat (here the wreck Marseille 3 – Jules Verne 9):



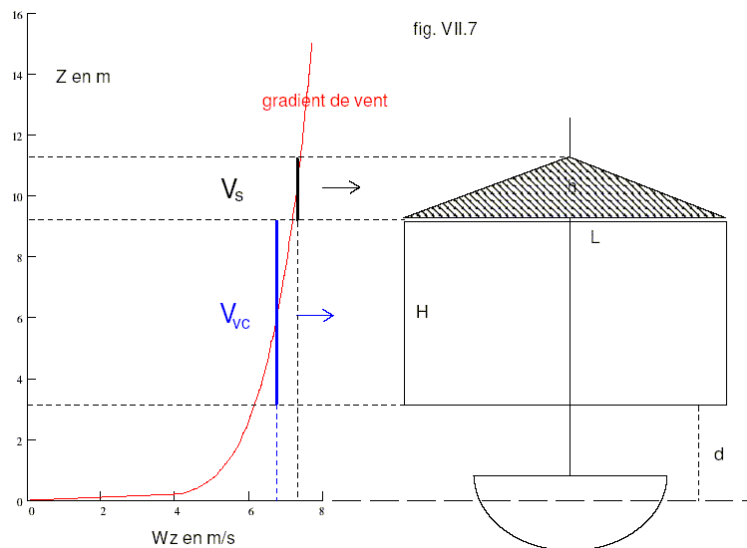
An analysis of aerodynamic forces on sailing boat:



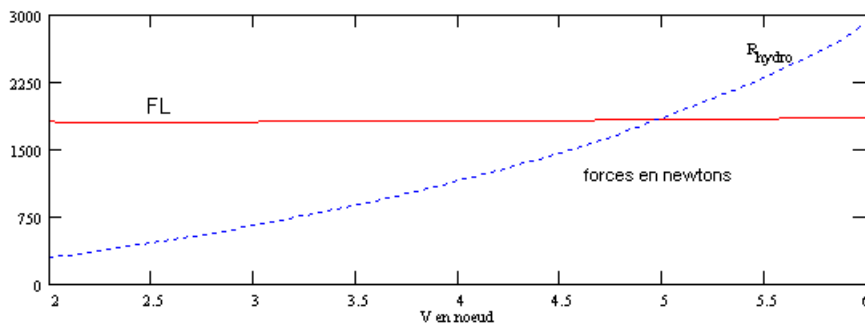
gathered with aerodynamic polar curve of a square sail:



and calculation of efficiency of a special sail as *siparum* :

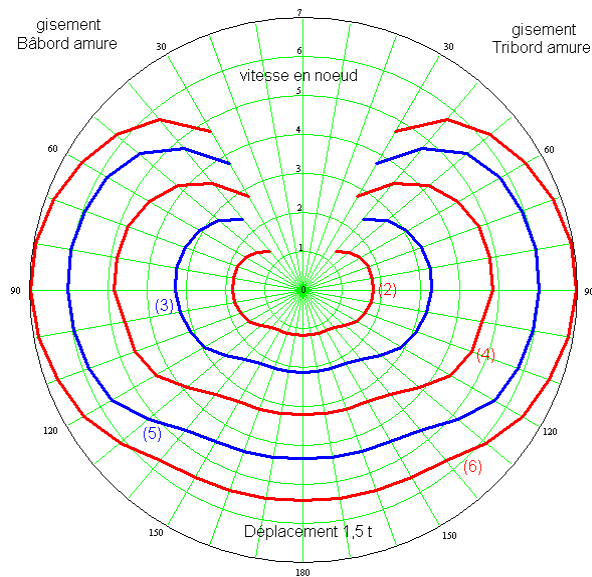


leading to the study of equilibrium between aerodynamic driving force and hydrodynamic resistance according to wind speed and direction :

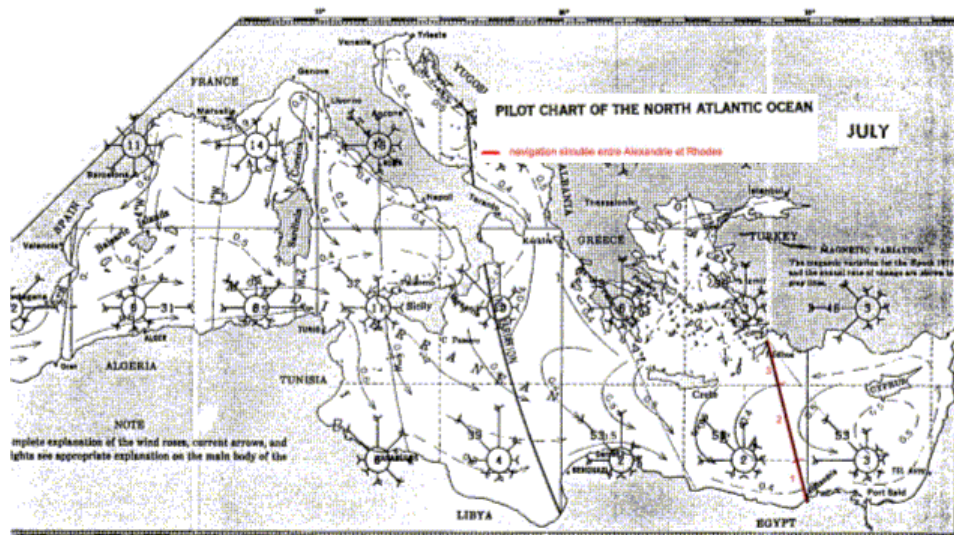


déplacement $P = 1,3 \text{ t}$ force du vent $B = 4$ gisement $\gamma = 90^\circ$
 vitesse $V = 5 \text{ nd}$ gîte $\beta = 3^\circ$ dérive $\text{der} = 1^\circ$

and synthesized in a polar plot of performance (here for Kyrenia II) :



that is used with climatic data to predict practical speed and then duration of an actual sailing voyage :



Tronçon	Longueur en mille	Zone traversée	Vitesse surface	Vitesse courant	Route courant	Vitesse fond	Durée du tronçon	Durée du voyage
1	82	1 SE	2,9	0,4	70	2,9	1,2	
2	153	1 NE	2,9	0,5	180	2,4	2,6	
3	89	2 SE	3,5			3,5	1,1	4,9

CONTENTS

INTRODUCTION

Part 1 : STATICS OF SHIP

I- GEOMETRY AND STRUCTURE OF SHIP

- I.1- coordinate system
- I.2- the data structure
- I.3- the Jules Verne n°9 wreck
- I.4- the Kyrenia ship
- I.5- comments on lines plans

II- HYDROSTATIC CHARACTERISTICS

- II.1- the hull
- II.2- the Simpson's rule
- II.3- calculations for upright hull
- II.4- heel
- II.5- form coefficients of a hull
 - II.5.1- block coefficient
 - II.5.2- prismatic coefficient
 - II.5.3- main section area coefficient
 - II.5.4- prismatic vertical coefficient
 - II.5.5- waterplane area coefficient
 - II.5.6- lateral area coefficient
- II.6- the hydrostatic documents
- II.7- approximate formulas for the hydrostatic characteristics
 - II.7.1- main section area
 - II.7.2- water plane area
 - II.7.3- water plane moment of inertia
 - II.7.4- hull volume
 - II.7.5- ship tonnage
 - II.7.6- centre of buoyancy height
 - II.7.7- transversal metacentric height
 - II.7.8- wetted surface

III- LOADING OF SHIP

- III.1- the centre of gravity of ship
- III.2- weight calculation for light ship
- III.3- approximate weight calculation
- III.4- specific gravities of goods
- III.5- example of application
- III.6- estimation of deadweight

IV- TRANSVERSE STABILITY OF SHIP

- IV.1- static balancing of ship
- IV.2- curve of righting arms
- IV.3- stability of balance
- IV.4- ballast of Jules Verne n°9
- IV.5- the case of Kyrenia II

Part 2 : DYNAMICS OF SHIP

V- HYDRODYNAMIC RESISTANCE IN CALM WATER

- V.1- towing resistance
- V.2- origin of hydrodynamic resistance
- V.3- measure and calculation of resistance
- V.4- frictional resistance
- V.5- wave resistance
- V.6- pressure resistance
- V.7- model-ship resistance
- V.8- application to wreck n°9 of Place Jules Verne
- V.9- application to Kyrenia II

VI- PROPULSION BY ROWING

- VI.1- introduction
- VI.2- generalities
- VI.3- functioning of row
- VI.4- influence of fouling
- VI.5- influence of sea state
- VI.6- equilibrium running
- VI.7- a case study
- VI.8- application to Kyrenia II

VII- PROPULSION BY SQUARE SAIL

- VII.1- introduction
- VII.2- notions of experimental aerodynamics
- VII.3- polar curve
- VII.4- geometrical characteristics of a foil
- VII.5- influence of woven porosity
- VII.6- apparent wind
- VII.7- gain with a top sail
- VII.8- effect of wind on sails
- VII.9- optimal setting of yard
 - VII.9.1- maximizing of propulsive component
 - VII.9.2- minimizing of leeway
 - VII.9.3- setting of sail close to separation of flow
- VII.10- application to the sail of Kyrenia II
- VII.11- limits of square sail

VIII- PERFORMANCES OF HULL-SAIL COMBINATION

- VIII.1- aerodynamic study for a given wind
- VIII.2- heel due to wind
- VIII.3- leeway due to wind
- VIII.4- drift induced by leeway
- VIII.5- hydrodynamic resistance
- VIII.6- running velocity
- VIII.7- polar plot of Kyrenia II
- VIII.8- calculation scheme
- VIII.9- comparison with sea trials of Kyrenia II

Part 3 : HANDLING OF SHIP

IX- NAVIGATION UNDER SAIL

- IX.1- polar plot of boat velocity
- IX.2- tacking
- IX.3- surface isochronal
- IX.4- the problem of steering
- IX.5- speed over the ground
- IX.6- climatical data for a region
- IX.7- study of a journey

CONCLUSION

ABREVIATIONS AND BIBLIOGRAPHY

INDEX & LEXICAL DATABASE

Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales

Caractéristiques nautiques et performances des navires antiques :

*l'apport de l'architecture navale associée aux données
archéologiques*

Volume de textes et figures

Mémoire présenté en vue du
Diplôme de l'EHESS

par
Philippe Allard

Directeur du mémoire : A.Tchernia

1997

Édition révisée (2018)

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

1ère Partie : STATIQUE DU NAVIRE

I- GEOMETRIE ET STRUCTURE DU NAVIRE

- I.1- éléments de références
- I.2- méthode de description
- I.3- structure de l'épave Jules Verne n°9
- I.4- le navire de Kyrénia
- I.5- observations sur le plan des formes

II- LES CARACTERISTIQUES HYDROSTATIQUES

- II.1- la carène
- II.2- méthode d'intégration de simpson
- II.3- calculs des carènes droites
- II.4- inclinaison transversale
- II.5- coefficients caractéristiques de la carène
 - II.5.1- coefficient de remplissage parallélépipédique
 - II.5.2- coefficient de remplissage cylindrique
 - II.5.3- coefficient de remplissage du maître couple
 - II.5.4- coefficient de remplissage vertical
 - II.5.5- coefficient de remplissage de la flottaison
 - II.5.6- coefficient de remplissage transversal

II.6- les documents hydrostatiques

II.7- formules d'approximations des caractéristiques hydrostatiques

II.7.1- aire du maître couple

II.7.2- aire de la surface de flottaison

II.7.3- moment d'inertie de la surface de flottaison

II.7.4- volume de la carène

II.7.5- tonnage du navire

II.7.6- hauteur du centre de carène

II.7.7- rayon métacentrique transversal

II.7.8- surface mouillée

III- LE CHARGEMENT DU NAVIRE

III.1- centre de gravité du navire

III.2- calcul du devis de poids du navire lège

III.3- estimation du devis de poids d'une coque

III.4- poids spécifiques des marchandises

III.5- exemple d'application

III.6- estimation du port en lourd

IV- LA STABILITE TRANSVERSALE DU NAVIRE

IV.1- la mise en équilibre du navire

IV.2- courbe des bras de levier de redressement

IV.3- stabilité de l'équilibre

IV.4- lestage de l'épave Jules Verne n°9

IV.5- le cas de Kyrénia II

2ème Partie : DYNAMIQUE DU NAVIRE

V- LA RESISTANCE HYDRODYNAMIQUE EN EAU CALME

- V.1- la résistance de remorquage
- V.2- l'origine de la résistance hydrodynamique
- V.3- mesure et calcul de la résistance
- V.4- la résistance de frottement
- V.5- la résistance de vague
- V.6- la résistance de pression
- V.7- la résistance de corrélation modèle-navire
- V.8- application à l'épave n°9 de la place Jules Verne
- V.9- application à Kyrénia II

VI- LA PROPULSION A L'AVIRON

- VI.1- introduction
- VI.2- généralités
- VI.3- fonctionnement de l'aviron
- VI.4- influence de l'état de la coque
- VI.5- influence de l'état de la mer
- VI.6- régime d'équilibre
- VI.7- une étude de cas
- VI.8- application à Kyrénia II

VII- LA PROPULSION DU NAVIRE A VOILE CARREE

- VII.1- introduction
- VII.2- notions d'aérodynamique expérimentale
- VII.3- diagramme polaire
- VII.4- caractéristiques géométriques d'une surface portante
- VII.5- influence de la porosité du tissu

VII.6- le vent apparent

VII.7- intérêt d'une voile située en hauteur

VII.8- l'effet du vent sur les voiles

VII.9- réglage optimal de la vergue

VII.9.1- maximisation de la composante propulsive

VII.9.2- minimisation de la dérive

VII.9.3- maintien de la voile à la limite du décrochage

VII.10- application à la voile de Kyrénia II

VII.11- les limites de la voile carrée

VIII- LES PERFORMANCES DE L'ENSEMBLE COQUE-VOILURE

VIII.1- étude aérodynamique pour un vent donné en force et direction

VIII.2- gîte due au vent

VIII.3- dérive due au vent

VIII.4- traînée induite par la dérive

VIII.5- résistance hydrodynamique

VIII.6- vitesse d'équilibre

VIII.7- polaire de vitesse du navire Kyrénia II

VIII.8- schéma des calculs

VIII.9- comparaison avec les essais de Kyrénia II

3ème Partie : EXPLOITATION DU NAVIRE

IX- LA NAVIGATION DU NAVIRE A VOILE

IX.1- la polaire de vitesse surface

IX.2- le louvoyage

IX.3- l'isochrone surface

IX.4- le problème de la tenue du cap

IX.5- la vitesse du navire sur le fond

IX.6- les données climatiques sur une région

IX.7- étude d'un voyage

CONCLUSION

ABREVIATIONS ET BIBLIOGRAPHIE

LEXIQUE Français-Anglais & INDEX

INTRODUCTION

A la fin des années 70, McGrail attirait l'attention sur le besoin aigu de méthodes quantitatives en archéologie navale où l'étude porte, à partir des vestiges que sont les épaves, non seulement sur la forme des navires mais aussi sur leur fonction et leurs performances. Cette quantification du domaine n'était pas pensée comme l'introduction des méthodes statistiques devenues courantes dans les sciences humaines et en archéologie générale mais plutôt, avec [Graham, 1977], comme l'application des méthodes quantitatives de l'architecte naval et des connaissances obtenues sur les navires modernes au profit des navires anciens.

En effet si l'archéologie cherche à connaître les cultures disparues en s'appuyant sur les traces qui en restent : les vestiges eux-mêmes d'abord, les textes anciens et l'iconographie; ces deux derniers types de documents posent de nombreux problèmes à la fois d'interprétation, de fidélité et de cohérence. Il y a par contre un élément qui n'a pas changé, depuis ces époques anciennes, c'est la nature et ses lois. Aussi lorsque, dans quelques cas malheureusement trop rares, les vestiges d'une épave sont suffisamment nombreux et bien conservés pour reconstituer la structure et la forme du navire il devient possible de lui appliquer les lois permanentes de la mécanique et tout le savoir faire techniquement sophistiqué de l'architecture navale, traditionnelle ou contemporaine.

Des réponses sont déjà apportées par l'archéologie expérimentale qui, prise dans son sens général [Coles, 1977], se fixe l'examen et la vérification de théories particulières au sujet de la construction et de la fonction des navires. Cette démarche est très ancienne puisque l'on peut faire remonter à 1861 la première reconstruction d'une trirème et dans ce domaine l'école scandinave s'est particulièrement distinguée. Cependant, sans rentrer dans le débat sur l'apport réel et le sens des différentes options (reconstruction, reconstitution, réplique, etc.) [McGrail, 1992], la reconstruction du navire en grandeur nature et les mesures en mer constituent un processus très coûteux et long alors qu'une partie essentielle des informations peut être obtenue par des calculs [McGrail, 1977-2].

Et en effet près de vingt ans après l'expression initiale des besoins en méthodes quantitatives la situation a sensiblement évolué et se manifeste par des communications techniques ([Crumlin-Pedersen, 1984], [Westerdhal, 1994]). Ces dernières sont principalement consacrées aux caractéristiques hydrostatiques [Marsden, 1993] mais on trouve quelques articles traitant d'hydrodynamique ou d'aérodynamique [Smitt, 1984] sans qu'il soit toujours possible de connaître tous les détails de la démarche suivie.

L'intervention de l'ingénieur ou de l'architecte naval dans les études d'archéologie navale peut rencontrer des réticences de la part des autres chercheurs du fait de la nature ésotérique des méthodes et résultats, et de leur perte correspondante de contrôle sur la discipline. Pour éviter cet écueil, il est nécessaire d'avoir une approche pédagogique et définir clairement les termes et notions employés. De même le raisonnement doit être explicite ainsi que la formulation des hypothèses afin qu'ils soient appréciés de façon critique par les autres chercheurs qui, s'ils sont convaincus par la démonstration, peuvent ensuite avoir pleinement confiance dans les résultats publiés. Il ne s'agit pas pour autant de transformer les archéologues navals en architectes navals mais de les avertir des capacités et limites des méthodes de calculs employées. Réciproquement il appartient aux archéologues de définir les hypothèses de travail de l'architecte, les données archéologiques jugées pertinentes, la nature des informations recherchées, etc. En fait c'est un véritable dialogue qui doit s'instaurer entre tous ces acteurs.

C'est dans cet esprit que j'ai abordé la présente étude en me fixant les objectifs suivants :

- faire une synthèse personnelle de connaissances actuelles de théorie du navire, architecture navale et navigation;
- réaliser un exposé didactique simple pour transférer ces connaissances vers la communauté des archéologues navals;
- concevoir une méthodologie de reconstitution ou d'estimation des caractéristiques nautiques et des performances des navires;
- mettre en oeuvre cette méthodologie sur des exemples concrets.

Lorsque l'on étudie un navire, plusieurs aspects de son comportement se présentent et constituent autant de problèmes à résoudre. En premier apparaissent ceux qui concernent la flottabilité et le poids du navire ainsi que la stabilité de son équilibre lors d'une inclinaison. On les regroupe dans le domaine de la **statique du navire**. Il faut éventuellement lui rajouter l'étude des efforts auxquels est soumis le navire, bien qu'immobile, sous le seul effet de la répartition des poids de son chargement et de la poussée d'Archimède sur la coque. Par la suite lorsque le navire est mis en mouvement apparaît la résistance qu'oppose l'eau au passage de la coque et qu'il faut compenser en produisant une force motrice, d'origine éolienne grâce à une voile ou d'origine humaine et musculaire grâce à des avirons. L'ensemble des problèmes alors soulevés et le calcul des performances obtenues constituent une partie de la **dynamique du navire**. L'autre partie, relative aux mouvements induits par la houle, est trop complexe pour être abordée ici. Enfin, lorsque ces performances sont connues se pose le problème de l'emploi du navire à travers, d'une part, les méthodes de navigation ou de manoeuvre utilisées et d'autre part sa gestion en tant qu'outil de transport. Ces derniers aspects de l'étude rentrent dans le cadre de l'**exploitation du navire**. Ce mémoire aborde substantiellement les deux premiers sujets pour fournir les outils et méthodes permettant de traiter pratiquement et concrètement le troisième, qui en est ainsi l'objectif et l'aboutissement.

Pour mener à bien ce travail j'ai dû utiliser deux outils informatiques, anglo-saxons, très différents : un logiciel de calculs hydrostatiques (*Autohydro*¹) destiné aux chantiers navals et un logiciel de calculs scientifiques (*Mathcad*²). Le premier présente surtout l'avantage de faire gagner du temps dans l'étude hydrostatique d'une carène car il est spécialisé dans cette fonction et ce domaine technique, de nature purement géométrique, est parfaitement connu. Il impose par contre une phase préliminaire de saisie ponctuelle de la forme et de la structure du navire qui est longue et fastidieuse en particulier lorsqu'il s'agit d'un navire à charpente en bois. L'étude des performances hydrodynamiques et aérodynamiques d'un navire pose, elle, des problèmes beaucoup plus fondamentaux quant à l'analyse et la modélisation des phénomènes mécaniques rencontrés. L'exposé les concernant constitue alors une première tâche et la résolution numérique des équations élaborées est la tâche suivante dans laquelle intervient massivement *Mathcad*. Le produit final d'une telle étude constitue, dans son aspect technique, ce que l'on appelle un *programme de prédiction de vitesse* (*Velocity Prediction Program* pour les anglo-saxons).

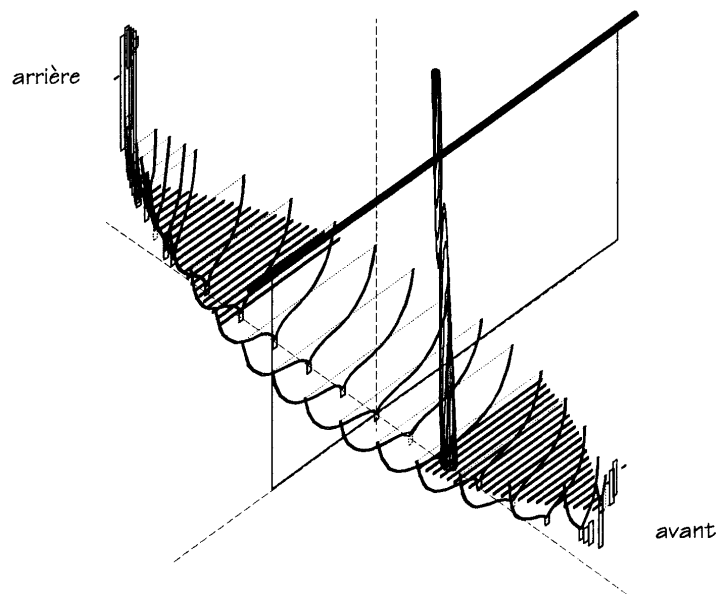
Une première version de l'étude, réalisée en 1995-96 et appliquée à l'épave n°9 de la place Jules Verne à Marseille, a permis de concevoir une méthode de calcul de l'ensemble des facteurs aérodynamiques et hydrodynamiques agissant sur un navire antique. Cette synthèse est personnelle et nouvelle car il n'existe pratiquement pas d'exposé complet et détaillé sur le fonctionnement global d'un navire à voile et à plus forte raison s'il porte une voile carrée. Dans sa forme définitive actuelle l'étude est étendue à l'épave de *Kyrenia* qui a fait l'objet d'une reconstruction et d'essais en mer à comparer aux prédictions théoriques.

¹ Développé par Autoship System Corporation : <http://cadcam.autoship.com>

² Pour des informations générales et les liens : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Mathcad>

Aperçu des étapes de la méthode et de ses résultats

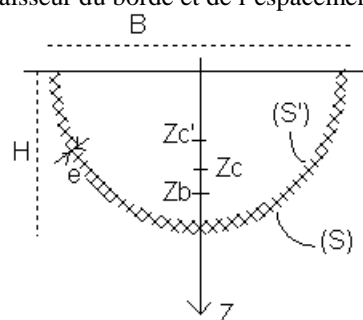
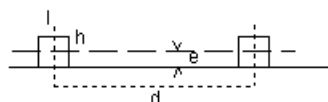
Une description informatisée de la structure en bois (ici Kyrenia II) :



une méthode rapide d'estimation de son poids en fonction de l'épaisseur du bordé et de l'espacement des membrures :

$$d \cdot e = 2 \times \frac{1}{2} \cdot h \cdot l \quad \text{d'où} \quad e = \frac{h \cdot l}{d}$$

fig. III.2



une autre pour le poids spécifique d'un chargement homogène d'amphores, selon son arrangement :

en carré: $d = \frac{P}{D^2 \cdot H}$

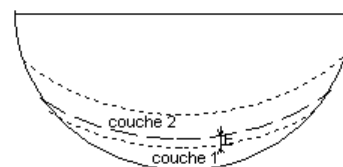
en quinconce: $d = \frac{2 \cdot P}{\sqrt{3} \cdot D^2 \cdot H}$

en carré: $I = \frac{D}{\sqrt{2}}$

en quinconce: $I = \frac{D}{\sqrt{3}}$



fig. III.4

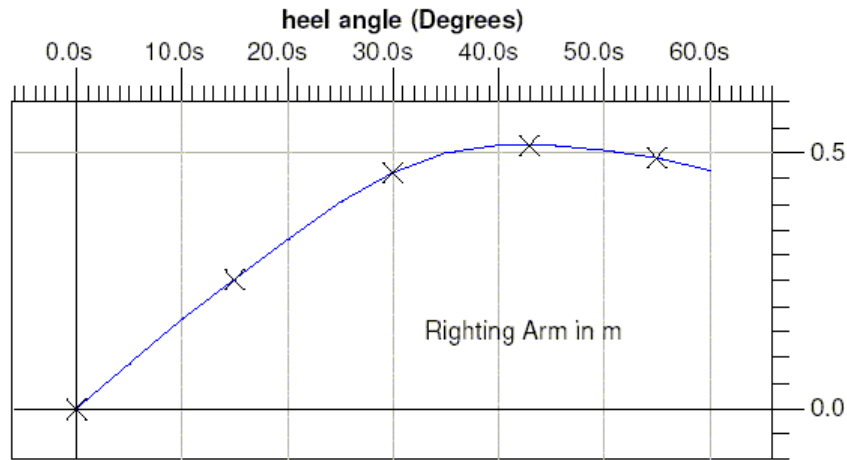


Amphore	Hauteur en m	Diamètre en m	Poids en kg	Rangement	Poids spéc. en kg/m3
Dressel 1 B de vin	1,16	0,32	50	carré	421
Dressel 1 B de vin	1,16	0,32	50	quinconce	486
Dressel 2/4 de vin	0,92	0,32	43	carré	456
Dressel 2/4 de vin	0,92	0,32	43	quinconce	527
Dolium de vin	2,00	1,60	2250	quinconce	507

une série de formules pour estimer les caractéristiques géométriques d'une carène (ici la surface mouillée):

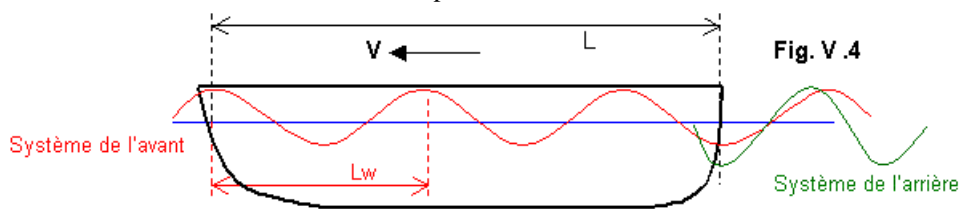
Navire	T en m	V en m ³	L en m	B en m	Am en m ²	Cms en m ²	Aw en m ²	Cwp	Cb	C23	Scb	S réelle	S Dupré	S Kirk	S Gerritsma	S Holtrop
Kyrénia	0,39	1,31	11,45	1,96	0,2	0,229	9,6	0,430	0,098	0,584	1,014	17,48	9,44	12,30	15,51	15,22
Kyrénia	0,78	8,46	13,09	3,26	1,1	0,421	25,3	0,594	0,202	0,643	0,807	36,84	27,07	31,40	32,65	33,01
Kyrénia	1,17	19,95	13,35	3,76	2,3	0,528	32,8	0,655	0,290	0,678	0,778	49,97	40,67	48,77	44,07	46,02
Kyrénia	1,56	33,60	13,58	4,04	3,8	0,597	36,6	0,668	0,347	0,691	0,762	61,13	52,68	64,88	53,03	57,23
Kyrénia	1,93	47,56	13,80	4,19	5,2	0,646	38,7	0,669	0,386	0,696	0,751	71,25	63,07	79,40	60,11	67,11
erreur relative moyenne :													-15%	5%	-14%	-7%
JV n°9	0,13	0,46	6,02	1,09	0,1	0,491	5,1	0,775	0,351	0,726	0,851	6,26	3,19	5,69	6,21	4,85
JV n°9	0,26	1,25	6,49	1,34	0,2	0,606	6,8	0,780	0,434	0,743	0,811	8,52	5,95	8,32	8,31	7,62
JV n°9	0,40	2,26	6,85	1,47	0,4	0,676	7,6	0,759	0,478	0,739	0,786	10,75	8,66	11,30	10,10	10,05
JV n°9	0,53	3,29	7,12	1,54	0,6	0,716	8,3	0,752	0,500	0,738	0,776	12,67	10,93	13,95	11,55	12,15
JV n°9	0,66	4,40	7,39	1,60	0,8	0,744	8,7	0,738	0,512	0,732	0,766	14,56	13,05	16,68	13,00	14,25
erreur relative moyenne :													-14%	10%	-9%	-4%

le tout aboutissant à la courbe de stabilité en charge (ici Kyrenia II) :

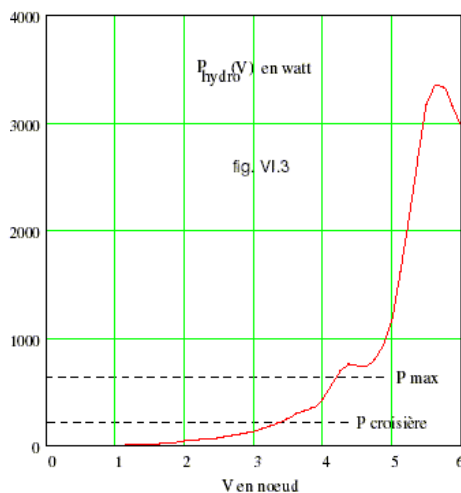


Weight = 16.500 MT LCG = 0.037a TCG = 0.000 VCG = 1.200
GMt = 1.002 m

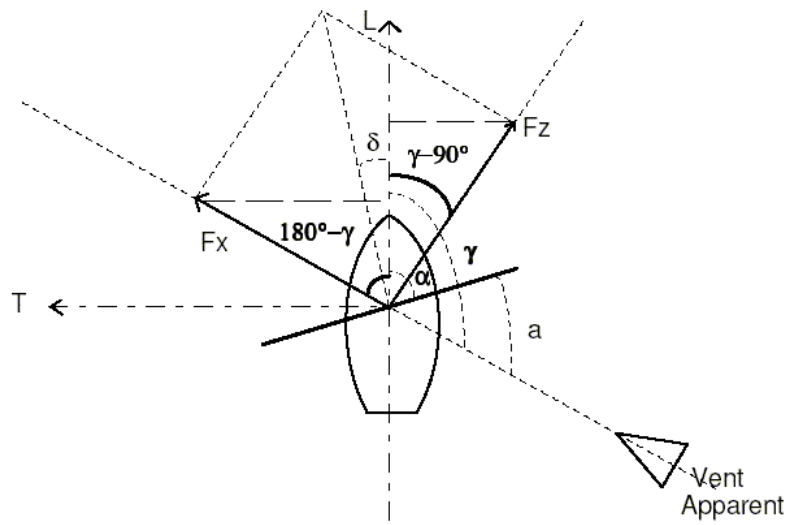
Une analyse des différentes sources de résistance subie par un navire :



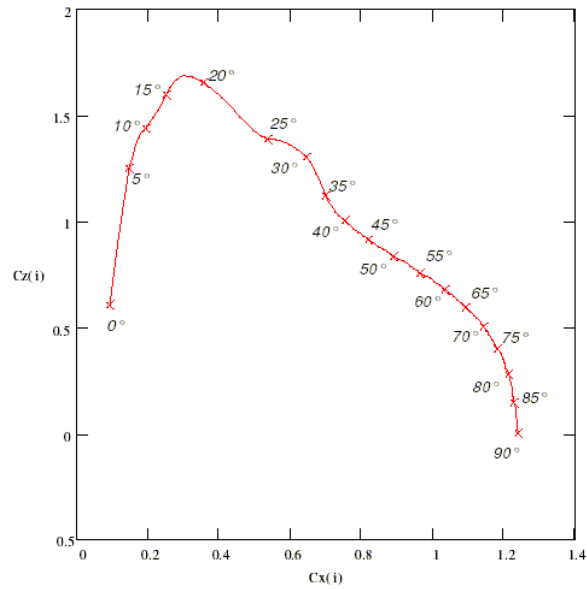
pour en déduire la puissance nécessaire à la propulsion (ici Jules Verne 9):



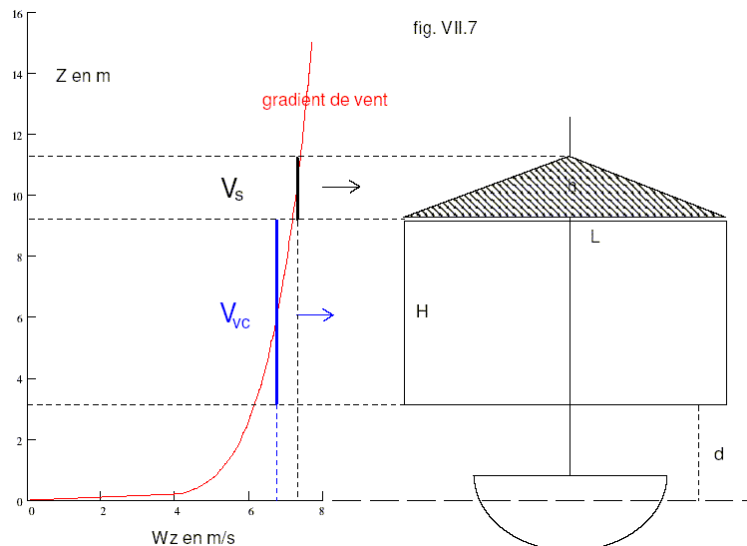
Une analyse des forces aérodynamiques appliquées à un voilier :



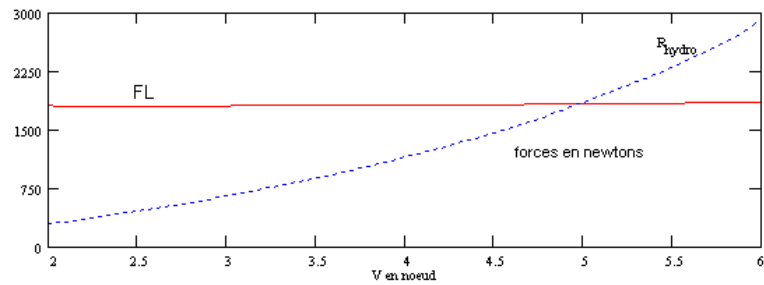
approfondie dans le cas particulier d'un gréement à voile carrée (ici la polaire de la voile) :



et complétée de l'étude de l'efficacité d'une voile spécifique comme le *siparum* :

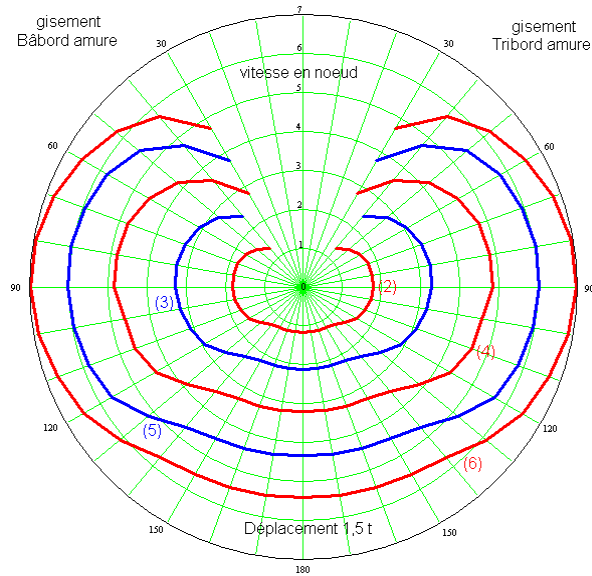


le tout menant à l'étude de l'équilibre entre force aérodynamique propulsive et résistance hydrodynamique, selon la force et la direction du vent :

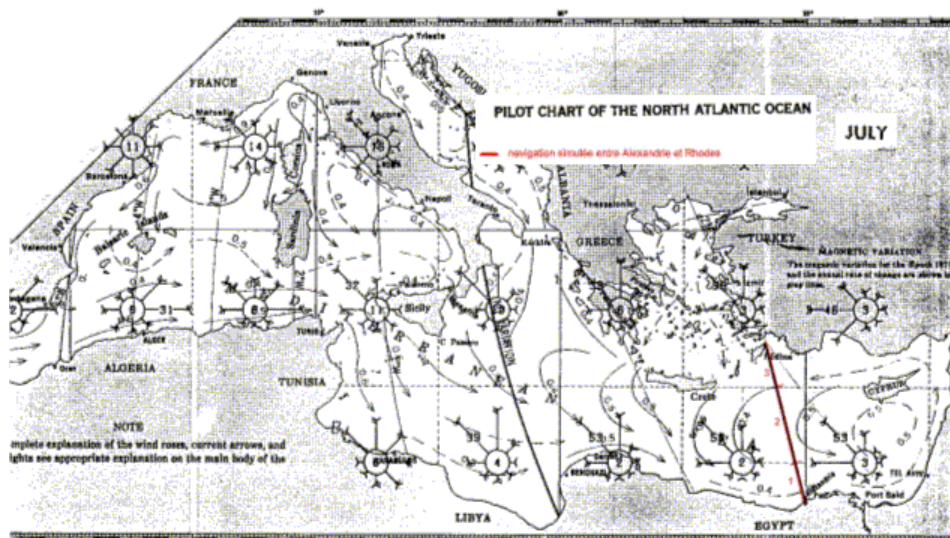


déplacement $P = 1,3$ t force du vent $B = 4$ gisement $\gamma_r = 90^\circ$
 vitesse $V = 5$ nd gîte $\beta = 3^\circ$ dérive $der = 1^\circ$

et synthétisée par la polaire de vitesse du voilier (ici pour Kyrenia II) :



qui est utilisée pour prédire, avec des données climatiques, la durée d'un voyage réel :



Tronçon	Longueur en mille	Zone traversée	Vitesse surface	Vitesse courant	Route courant	Vitesse fond	Durée du tronçon	Durée du voyage
1	82	1 SE	2,9	0,4	70	2,9	1,2	
2	153	1 NE	2,9	0,5	180	2,4	2,6	
3	89	2 SE	3,5			3,5	1,1	4,9

PREMIÈRE PARTIE

STATIQUE DU NAVIRE

GÉOMÉTRIE ET STRUCTURE DU NAVIRE

I.1- ÉLÉMENTS DE RÉFÉRENCE

Pour repérer les points d'un navire on utilise trois axes liés au navire :

- un axe longitudinal X orienté soit vers l'avant (habitude française) soit vers l'arrière (habitude anglo-saxonne);
- un axe transversal Y orienté vers bâbord (chez les Français) ou tribord (chez les Anglo-saxons);
- un axe Z perpendiculaire aux précédents et orienté vers le haut.

Dans tous les cas on veille à ce que ce repère soit un trièdre direct. Son origine est, elle aussi, choisie librement, par exemple à l'arrière (chez les français), à l'avant (chez les anglo-saxons) ou au milieu mais toujours dans le plan longitudinal de symétrie et au point le plus bas du navire (par exemple la quille ou la base du bordé). Cette cote définira plus loin la *ligne d'eau zéro*.

Les formes du navire sont ensuite décrites par les intersections avec trois *familles de plans* respectivement perpendiculaires aux axes et donnant chacune une *vue en projection*. L'axe X fournit les *sections transversales* ou *couples de tracé*, l'axe Y les *sections longitudinales* et l'axe Z les *sections horizontales* ou *lignes d'eau*. [Roman, 1987] donne une présentation détaillée de leur usage et on trouvera plus loin les *plans des formes* relatifs aux deux navires étudiés.

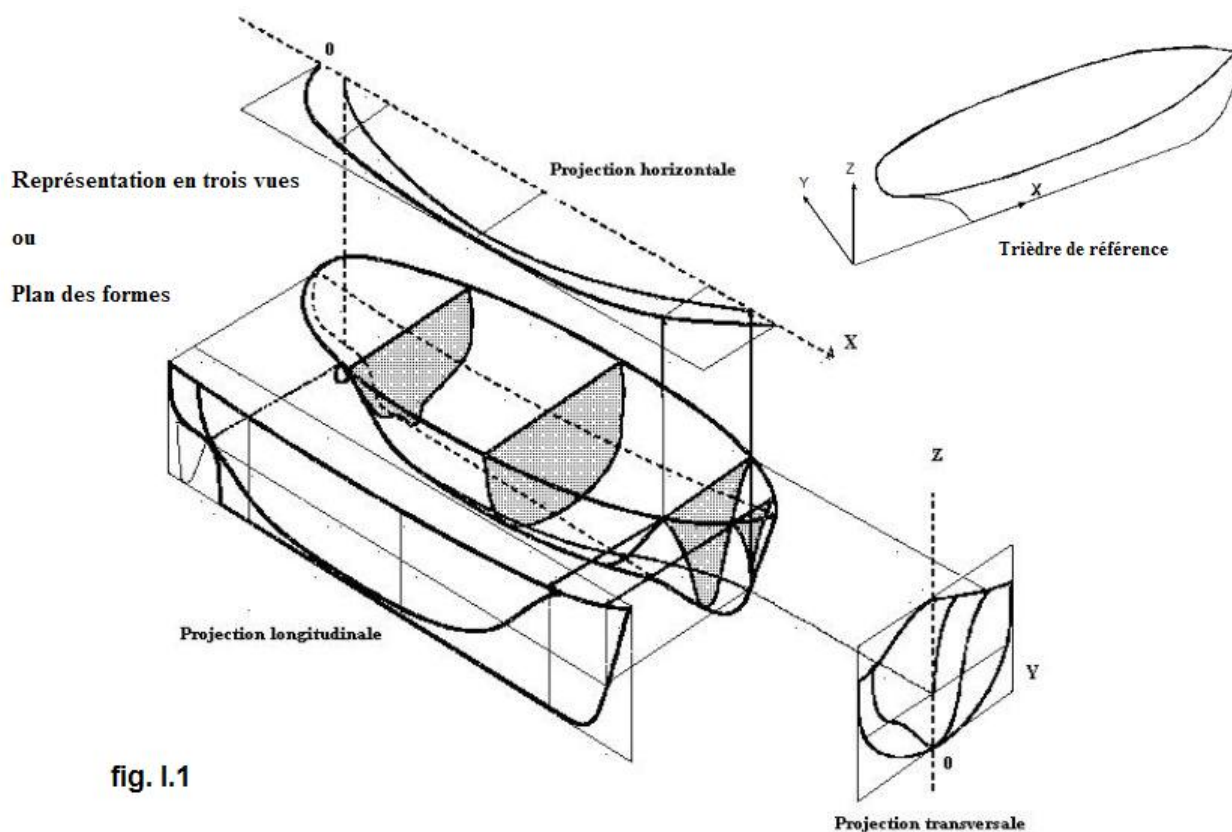
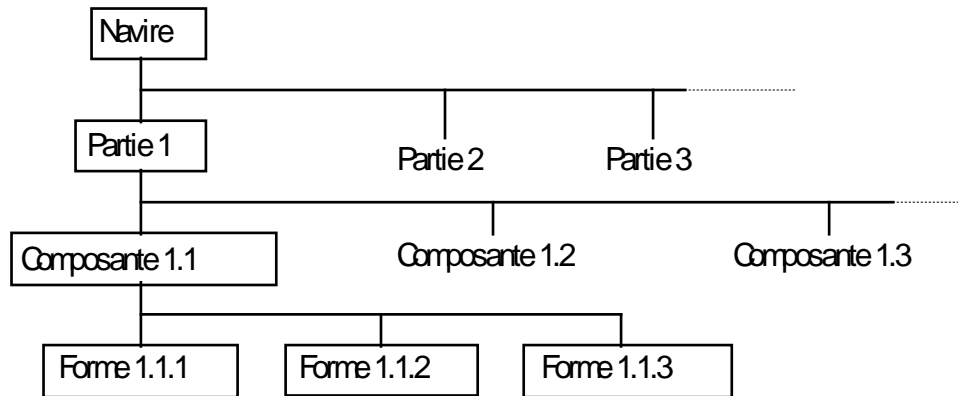


fig. I.1

I.2- MÉTHODE DE DESCRIPTION

Les calculs hydrostatiques seront exécutés plus loin à l'aide du logiciel *Autohydro*¹ qui offre à l'utilisateur la possibilité de définir les volumes selon la hiérarchie suivante :

fig. I.2



Une *forme* est constituée par les sections transversales du volume (au moins les deux d'extrémités) définies chacune comme une ligne polygonale par les coordonnées Y et Z de ses points.

Une *composante* regroupe sous son nom plusieurs formes, indique si celles-ci doivent être symétrisées par rapport au plan longitudinal et indique aussi si le volume de la composante s'ajoute ou se retranche à la partie dans laquelle elle est intégrée.

Une *partie* est caractérisée par sa classe :

- *flotteur* (displacer), son volume sera utilisé pour fournir la poussée d'Archimède;
- *compartiment* (container), son volume sera totalement ou partiellement rempli avec un matériau donné ayant une densité donnée.

¹ *Autohydro* est un logiciel professionnel coûteux mais depuis les années 2010 il existe des alternatives gratuites avec les logiciels FREEship et DELFTship.

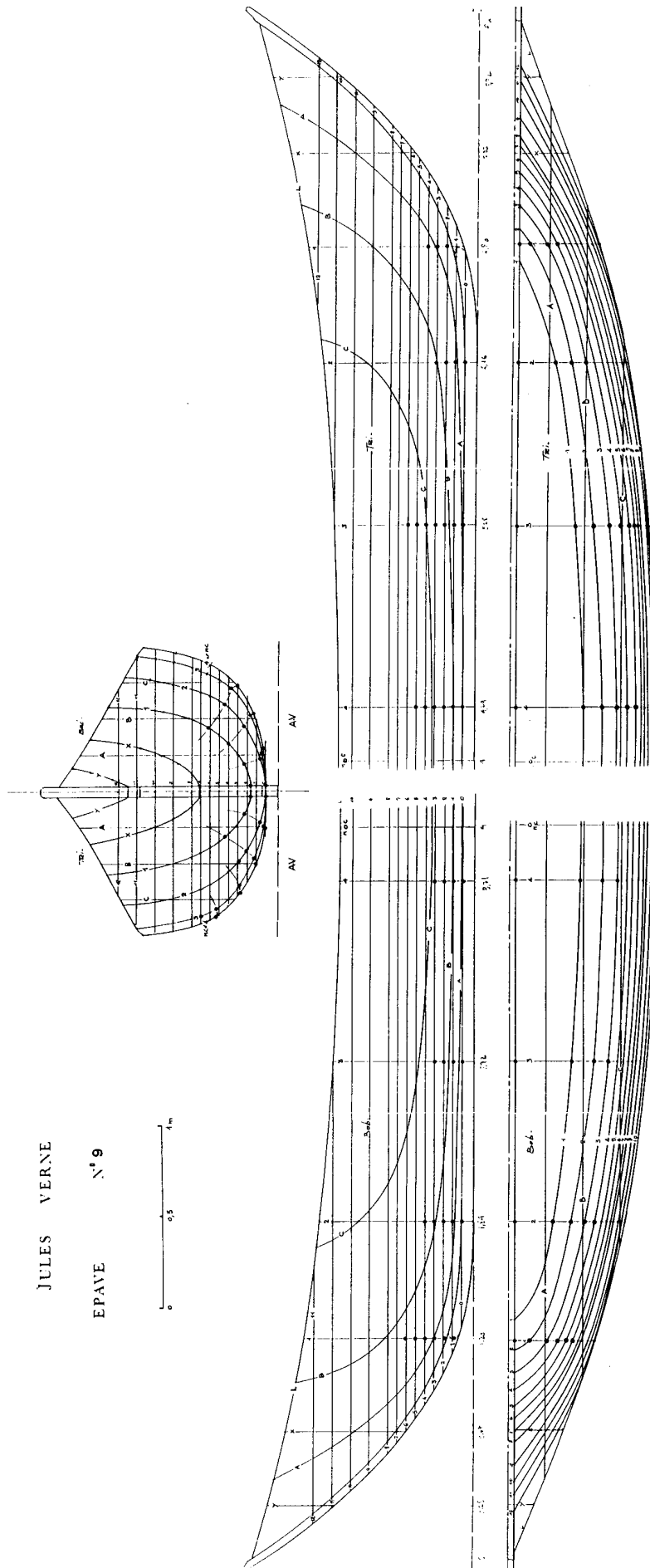
I.3- STRUCTURE DE L'ÉPAVE JULES VERNE n°9

Cette épave, non encore publiée, est l'une des nombreuses découvertes lors des fouilles effectuées à la place Jules Verne de Marseille pendant l'été 1993. Elle est datée du milieu de V^{ème} siècle avant J.C. et représente un bel exemple de navire grec cousu. Ses vestiges importants (5,4 m de long sur 1,5 m de large) ont permis à P.Pomey, et son équipe du Centre Camille Julian d'Aix en Provence, de reconstituer une première version de ses formes en s'inspirant du navire de Gollo dont la description est rapportée par (Pâris,1886).

Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

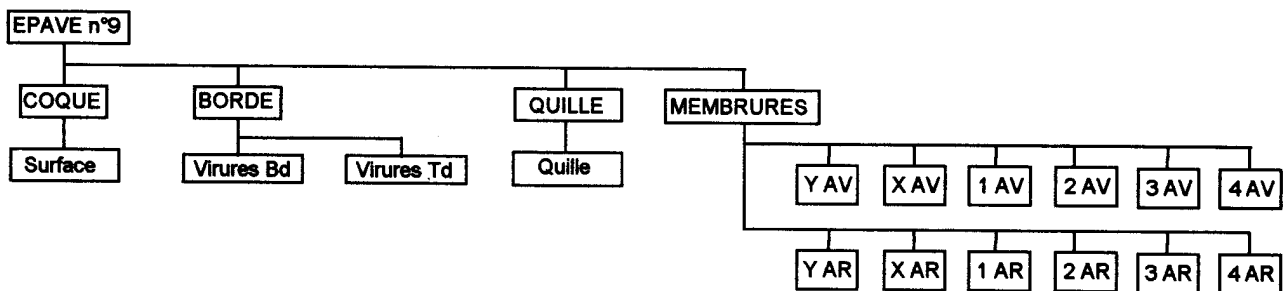
- longueur hors-tout : 8 m
- largeur : 1,6 m
- hauteur minimale du livet de pont : 0,7 m
- bordé : en pin d'Alep, de 2,5 à 3 cm d'épaisseur
- quille : en chêne, de 7 cm sur 6,5 cm
- membrures : en pin d'Alep, de 9 cm sur 8,5 cm environ, avec un pied étroit pour favoriser le passage et la mise en tension des ligatures aux virures
- liaison entre éléments de la structure axiale (quille) par une pièce en trait de jupiter bloquée par une clé verticale
- liaison des virures entre elles par : des chevilles espacées le long du can d'environ 20 cm et des liens en fil de lin traversant des évidements tétraédriques comme dans l'épave de Bon Porté.

C'est le plan issu de cette reconstitution, et donné plus bas, qui a servi de base de travail. La description des formes par les nombreuses sections transversales entraîne un temps de saisie important et constitue la phase ingrate mais cependant incontournable de la méthode proposée. L'éventuelle simplification polygonale des formes se retrouve dans l'allure des plans donnés ci-dessous :



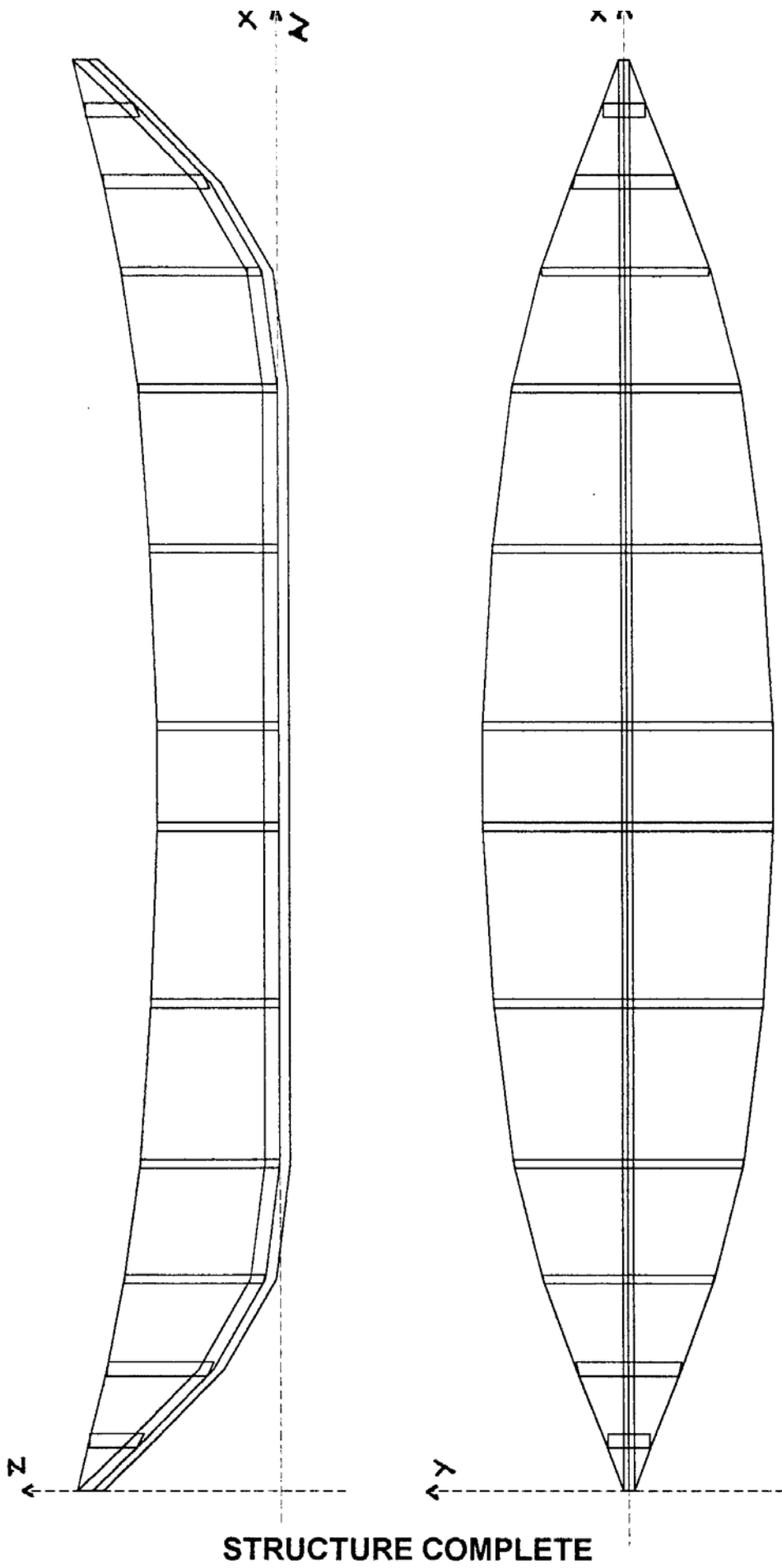
Pour les besoins ultérieurs des calculs du déplacement lège et des cas de chargement j'ai adopté la décomposition suivante :

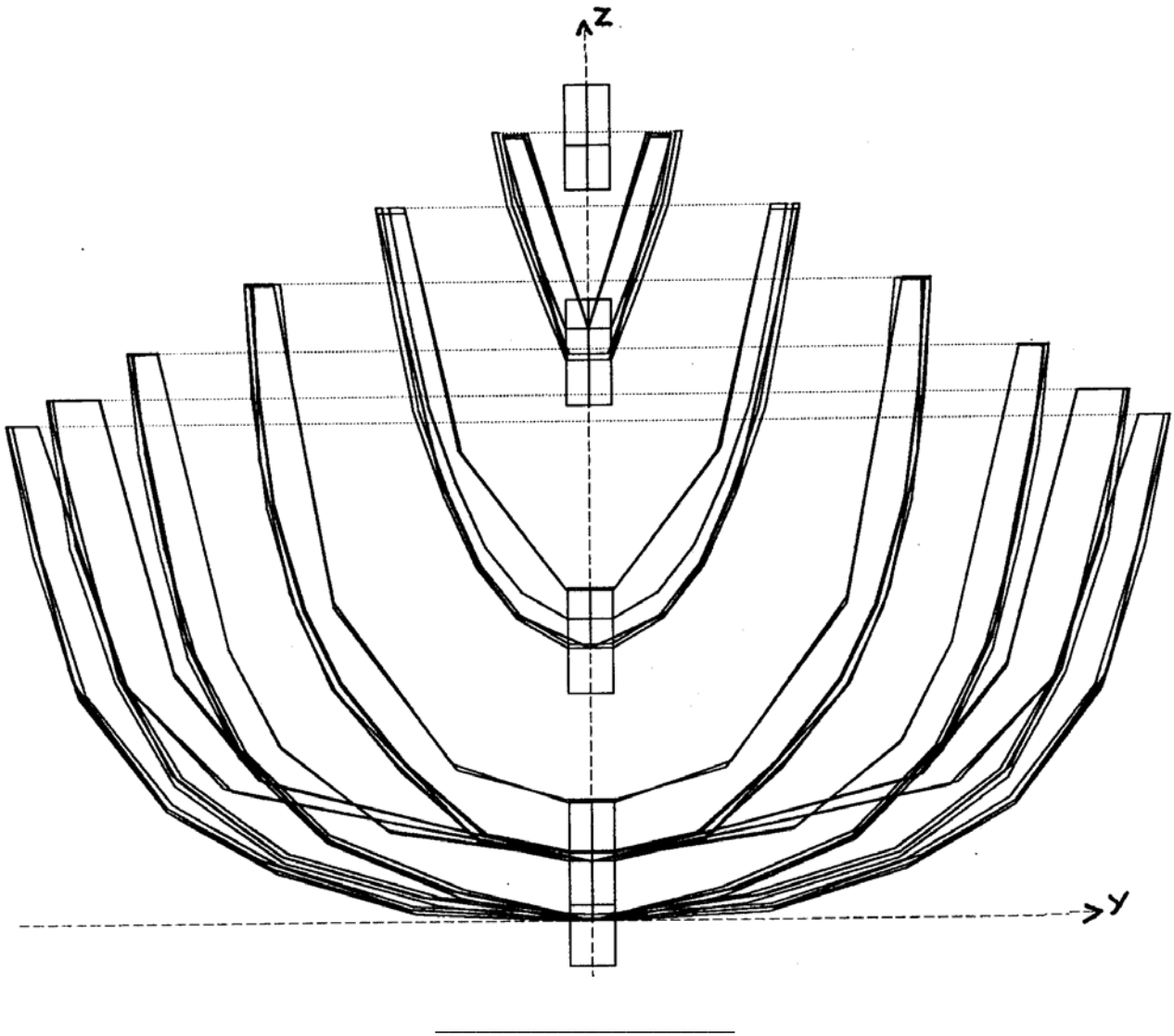
fig. I.3



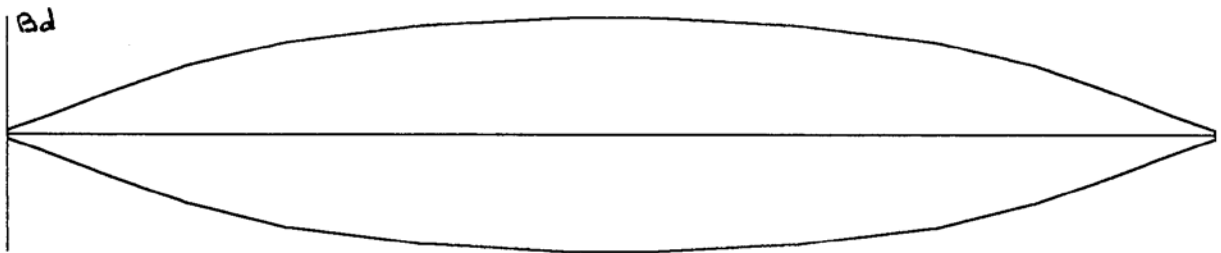
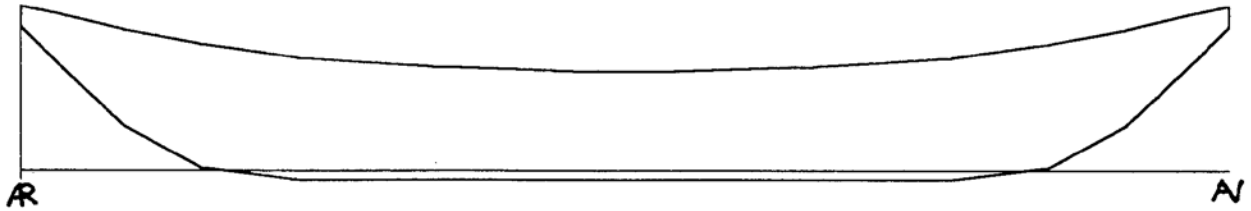
Cette décomposition en parties est dictée principalement par l'obligation propre au logiciel de distinguer des parties différentes pour des éléments de densités différentes. C'est ainsi, par exemple, que pour un navire dont la coque serait recouverte d'un doublage au plomb il faudrait prévoir en plus une partie DOUBLAGE en parallèle à COQUE.

Dans les plans qui suivent, l'origine a été placée à l'extrémité arrière et au niveau inférieur du bordé. Ils montrent d'abord l'ensemble de la structure sous quatre vues (de côté, de face, de dessus et en perspective) puis les détails des composantes de chacune des parties sous ces mêmes angles de vue.

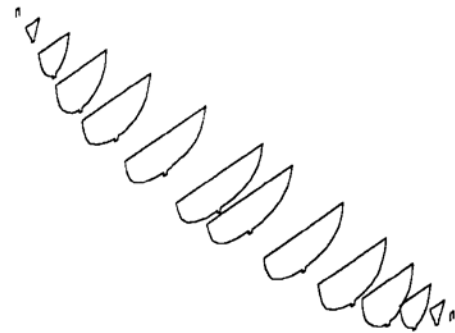
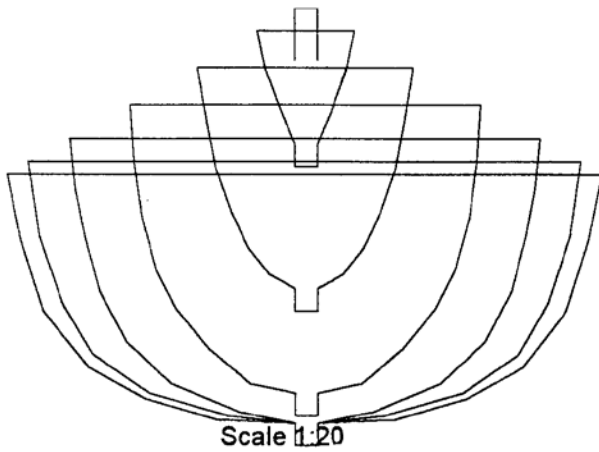




Type: Displacer
 Fluid: SEA WATER @ Specific Gravity = 1.025
 Component Effect Longitudinal Location in Meters
 SURFACE 1 8.000f to 0.000



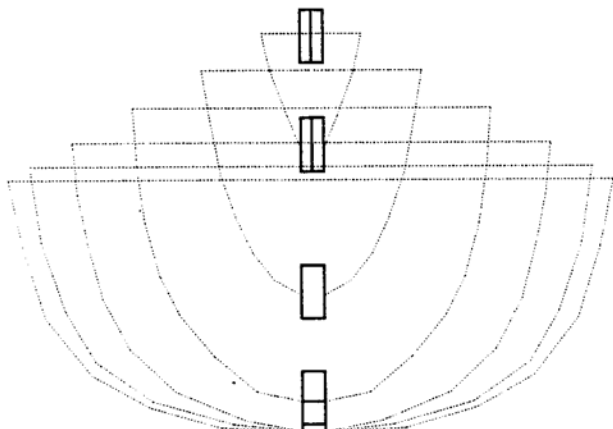
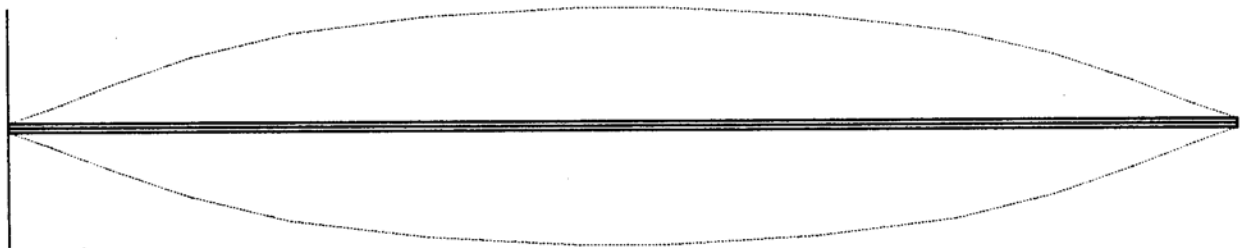
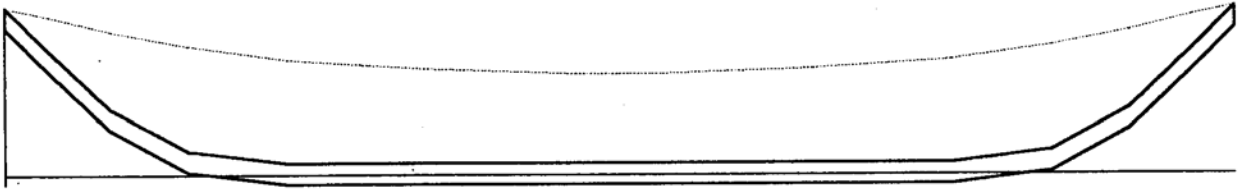
COQUE



Type: Container

Fluid: CHÊNE VERT @ Specific Gravity = 1.04

Component	Effect	Longitudinal Location in Meters
QUILLE	1	8.000f to 0.000



Scale 1:20

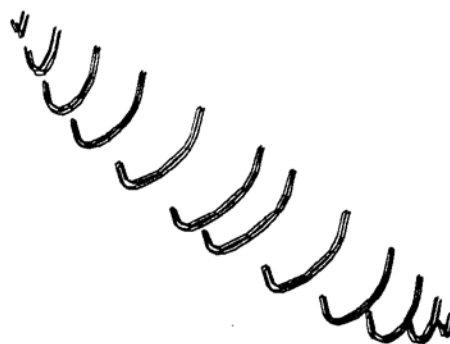
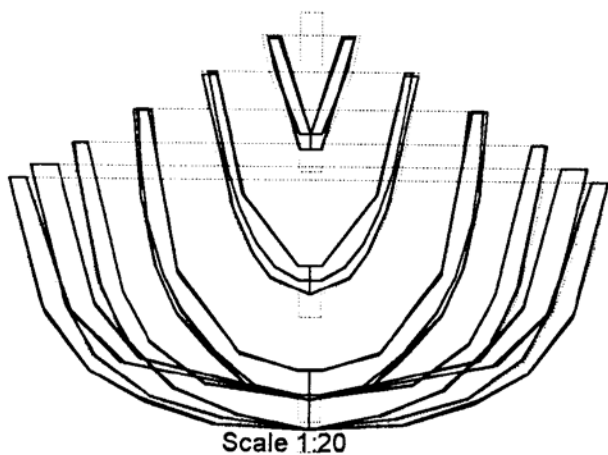
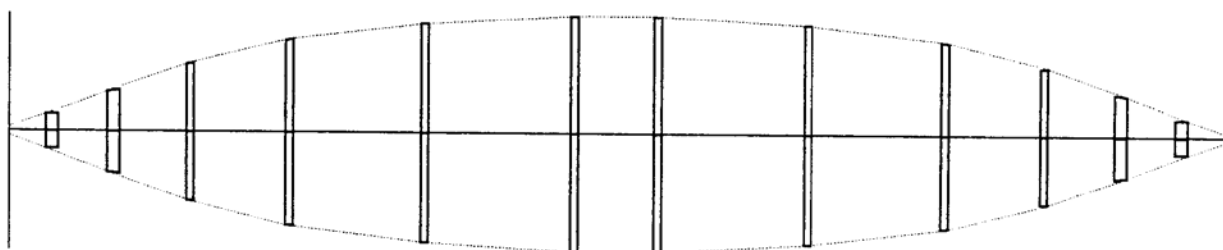
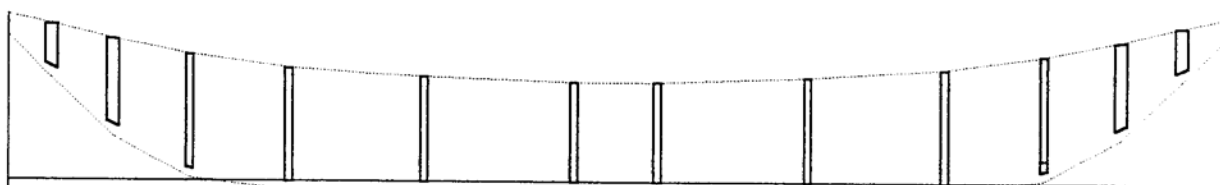


MEMBRURES

Type: Container

Fluid: PIN D'ALEP @ Specific Gravity = .65

Component	Effect	Longitudinal Location in Meters
MEMBRURE Y AV	1	7.760f to 7.680f
MEMBRURE X AV	1	7.360f to 7.280f
MEMBRURE 1 AV	1	6.840f to 6.792f
MEMBRURE 2 AV	1	6.192f to 6.144f
MEMBRURE 3 AV	1	5.296f to 5.248f
MEMBRURE 4 AV	1	4.304f to 4.256f
MEMBRURE 4 AR	1	3.744f to 3.696f
MEMBRURE 3 AR	1	2.752f to 2.704f
MEMBRURE 2 AR	1	1.856f to 1.808f
MEMBRURE 1 AR	1	1.208f to 1.160f
MEMBRURE X AR	1	0.720f to 0.640f
MEMBRURE Y AR	1	0.320f to 0.240f

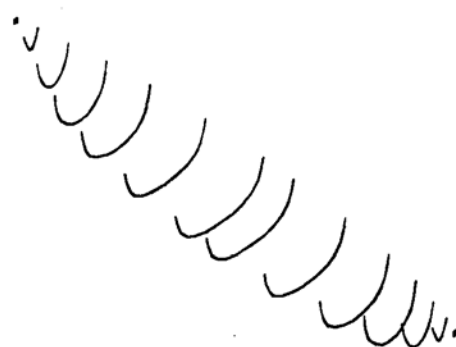
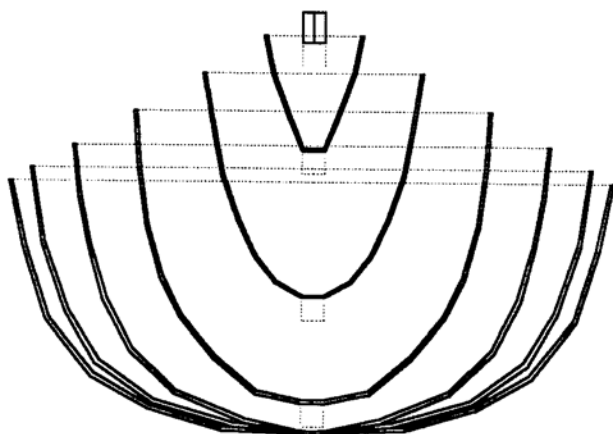
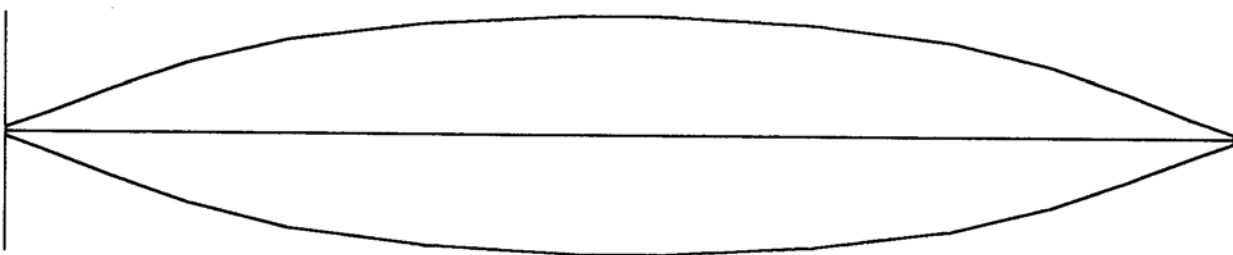
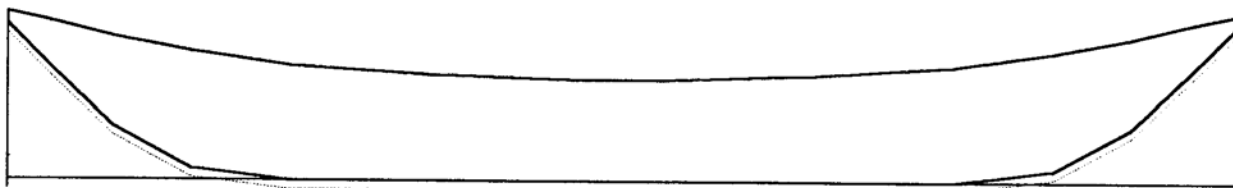


BORDE

Type: Container

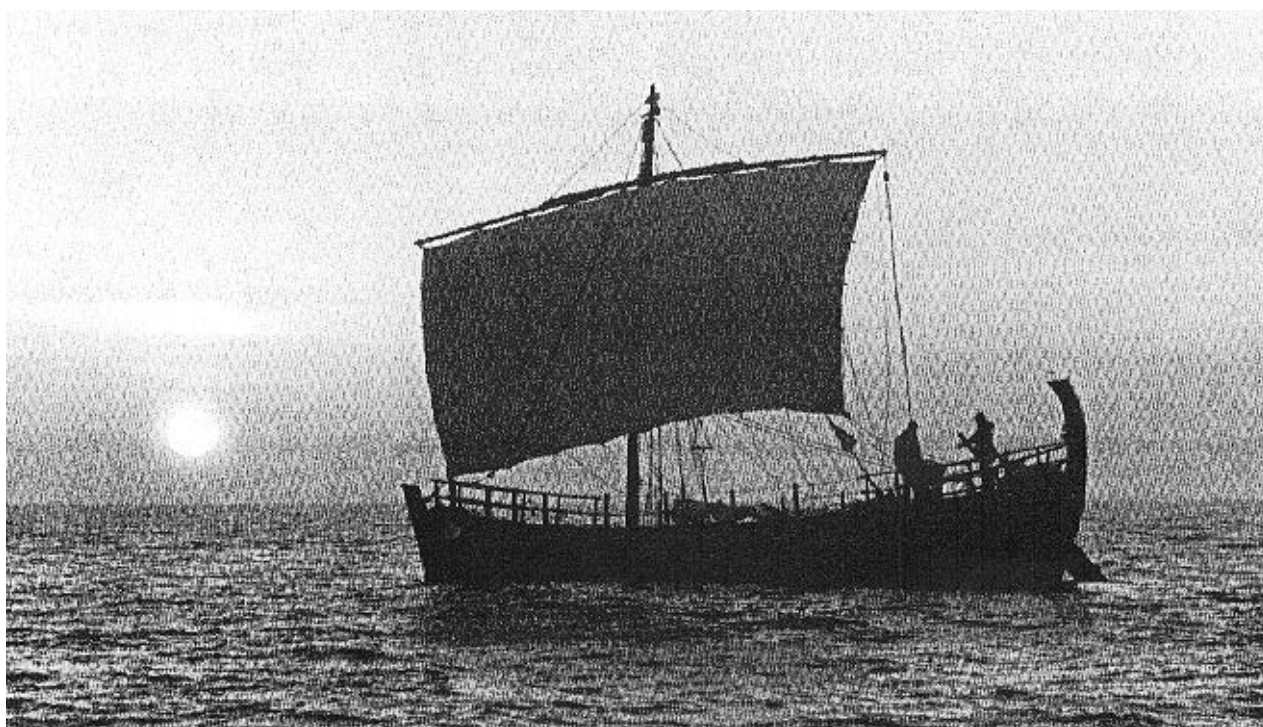
Fluid: PIN D'ALEP @ Specific Gravity = .65

Component	Effect	Longitudinal Location in Meters
VIRURES Bd	1	8.000f to 0.000
VIRURES Td	1	8.000f to 0.000



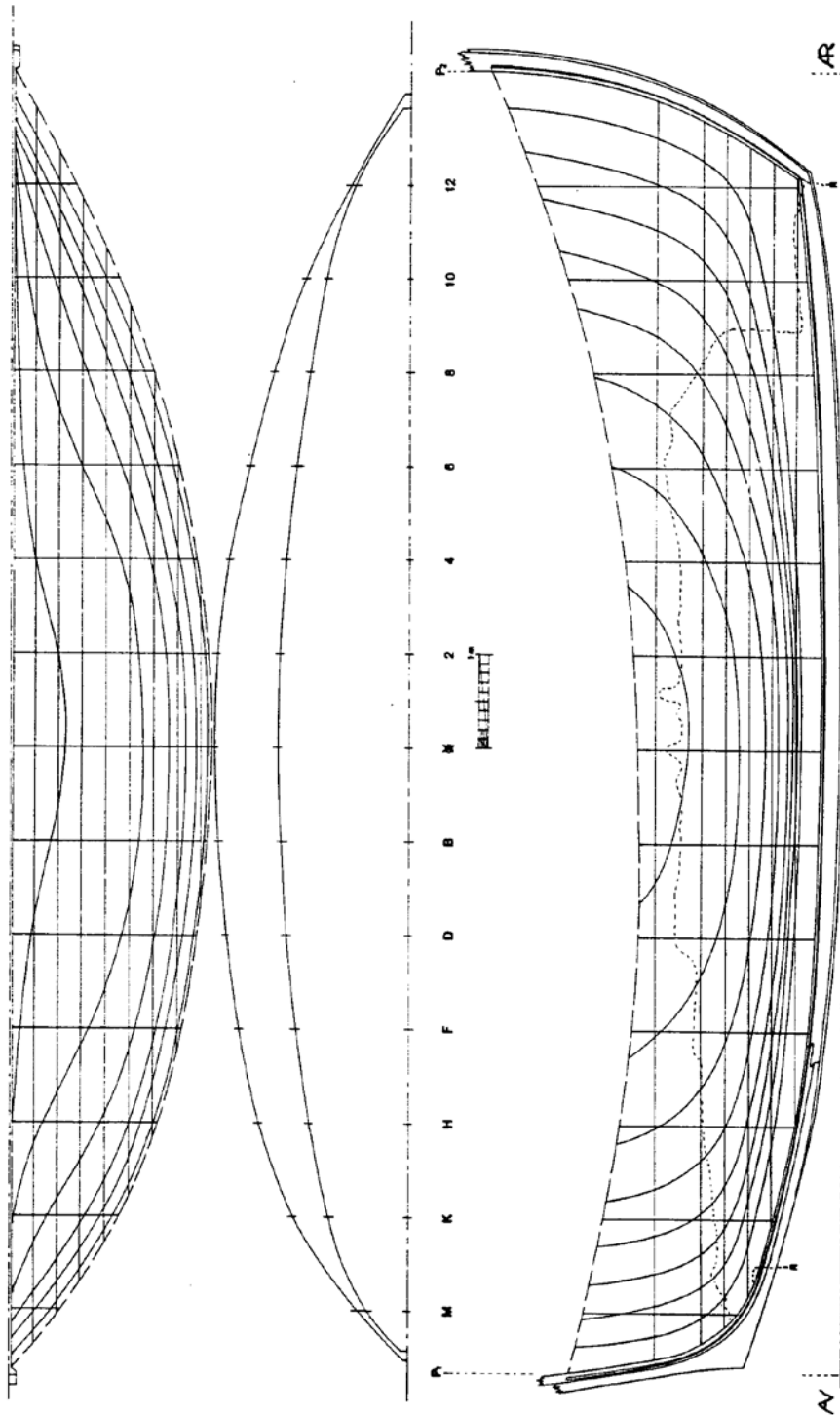
I.4 LE NAVIRE DE KYRENIA

L'épave de ce navire grec, de la fin du IV^{ème} siècle avant J.C., a été trouvée au début des années 60 au large de la côte nord de Chypre. Reconnue puis fouillée par l'Institute of Nautical Archaeology (INA) à partir de 1967 [Katzev, 1971], sa coque conservée presque au trois quarts fit l'objet d'une reconstitution par [Steffy 1985] et exposée au château des Croisés à Kyrenia [Katzev, 1980; Steffy, 1994]. A partir de 1982 l'Hellenic Institute for the Preservation of Nautical Traditions (HIPNT) et l'INA se lancèrent dans la construction d'une réplique navigante, le Kyrenia II [Katzev, 1986], et cet effort de deux ans et demi s'acheva, en 1986 et 1987, par deux croisières entre la Grèce et Chypre [Katzev, 1989]. Cette réalisation unique en matière d'archéologie expérimentale fournit ainsi des données concrètes sur les performances de navires antiques [Katzev, 1987] et qui seront confrontées plus loin avec les résultats de la méthode présentée dans ce mémoire.



Kyrenia II navigant sous voile (extrait de "Wooden Shipbuilding and the Interpretation of Shipwrecks", R.Steffy).

THE KYRENIA SHIP
4TH CENTURY B.C.
LENGTH (P.-P.) - 13.68 m
BEAM (Moulded) - 4.2 m
TONS BURDEN - c. 26



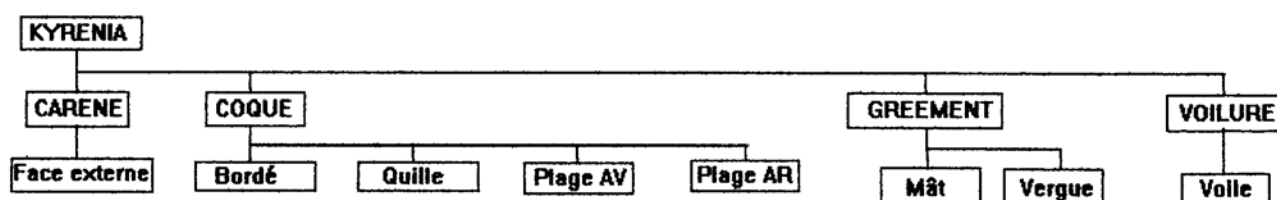
extrait de "Wooden Shipbuilding and the Interpretation of Shipwrecks", R.Steffy

L'ensemble des données, dont j'ai pu disposer ou que j'ai dû adopter, relatives à l'épave et à sa réplique se résument, pour mes besoins, aux caractéristiques suivantes (les hauteurs sont données depuis la base du bordé) :

- longueur hors-tout : 13,86 m
- largeur : 4,2 m
- hauteur minimale du bord supérieur du bordé : $Z=1,95$ m
- quille, bordé et membrures en pin (*Pinus brutia*)
- section de la quille : 25 cm x 12 cm
- épaisseurs : virures (3,7 cm), préceinte basse (8 cm), préceinte haute (6 cm), vaigrage (3 cm), pont (5 cm)
- membrures (varangues ou 1/2 couples et leurs allonges) de section carrée d'environ 9 cm et espacées de 0,25 m
- varangues, avec leurs allonges, montant jusqu'à environ $Z= 1,50$ m
- demi-couples commençant à 0,14 m du plan longitudinal et s'étalant, avec leurs allonges, jusqu'au sommet du bordé.
- vaigrage commençant vers $Z=0,35$ m et couvrant les demi-couples jusqu'à $Z=0,95$ m
- assemblage des virures par tenons et chevilles en chêne de Turquie (*Quercus cerris*), espacés entre eux de 12 cm
- assemblage des membrures par clous, en cuivre forgé, de 27 cm sur 1 cm
- pont partiel à l'avant, sur 3 m, et à l'arrière, sur 2,8 m, à $Z=1,85$ m
- mât en sapin d'environ 11 m sur 24 cm, dont le pied est vers 2,1 m en avant du maître couple et avec une quête d'environ 40 cm
- vergue en sapin d'environ 11,3 m sur 12 cm
- voile en lin de 11x6 m²
- l'épave possédait un doublage au plomb, il n'a pas été reproduit sur la réplique

La description de la structure de la réplique *Kyrenia II* avec le même degré de finesse que celui adopté pour l'épave n°9 de la place Jules Verne aurait représenté un travail considérable de saisie. La partie la plus pénible correspondant à la définition de la cinquantaine de membrures (varangue ou demi-couple plus allonge à chaque fois). Cette phase est indispensable, comme je le montrerai plus loin, pour calculer avec précision le devis de poids du navire lège mais je n'ai véritablement besoin que des formes de la coque pour la suite de l'étude hydrostatique et hydrodynamique. Cependant, comme je n'ai pu disposer des résultats des devis de poids menés à l'INA ou à l'HIPNT, je présenterai plus loin une méthode simplifiée de calcul du déplacement lège. Pour la description de ce navire, dans le cadre conceptuel du logiciel *Autohydro*, j'ai décomposé sa structure² comme ci-dessous en plaçant l'origine du repère au maître couple et à la base du bordé (à 20 cm au dessus du talon de la quille), qui marque ainsi la ligne d'eau zéro :

fig. I.4

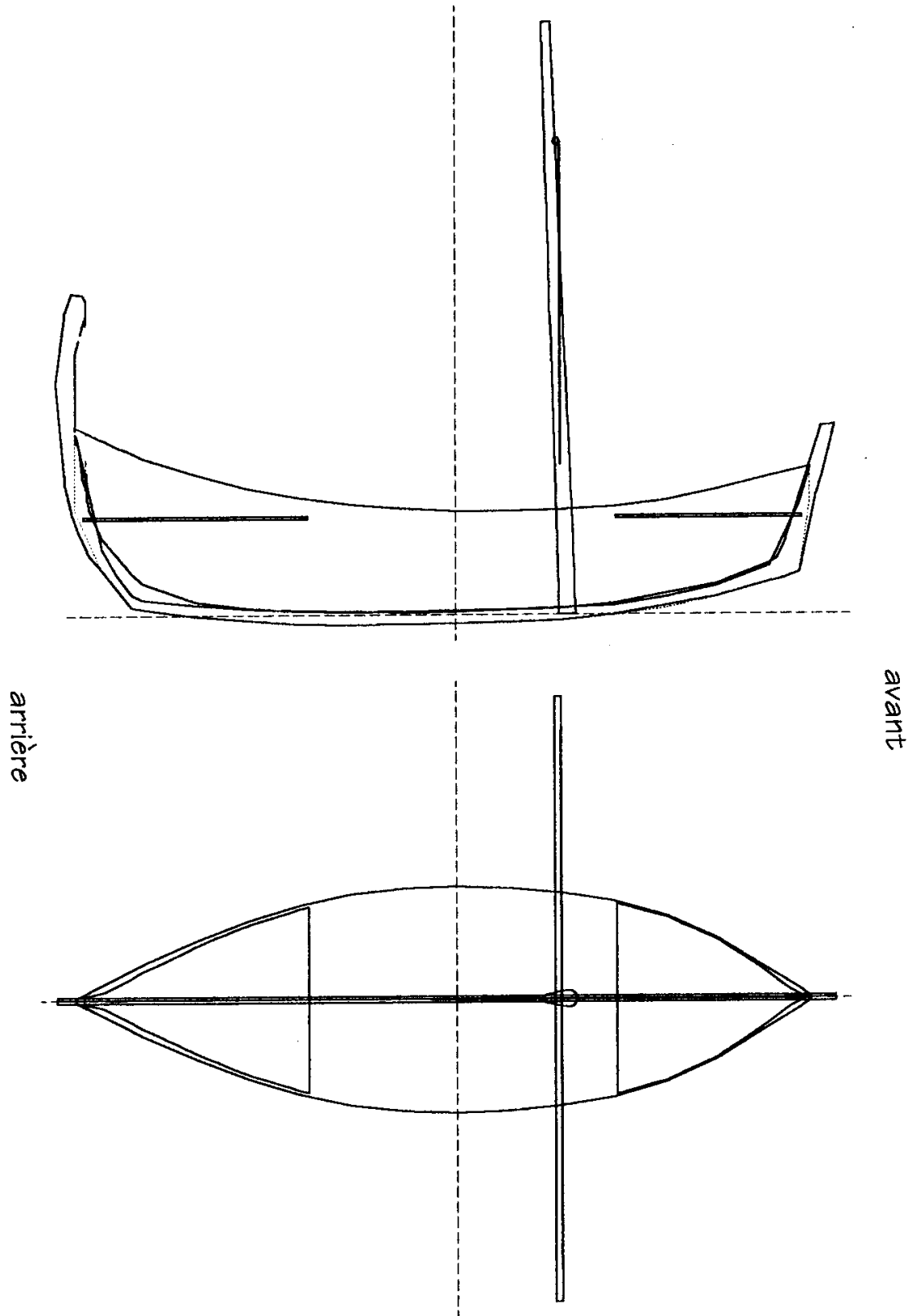


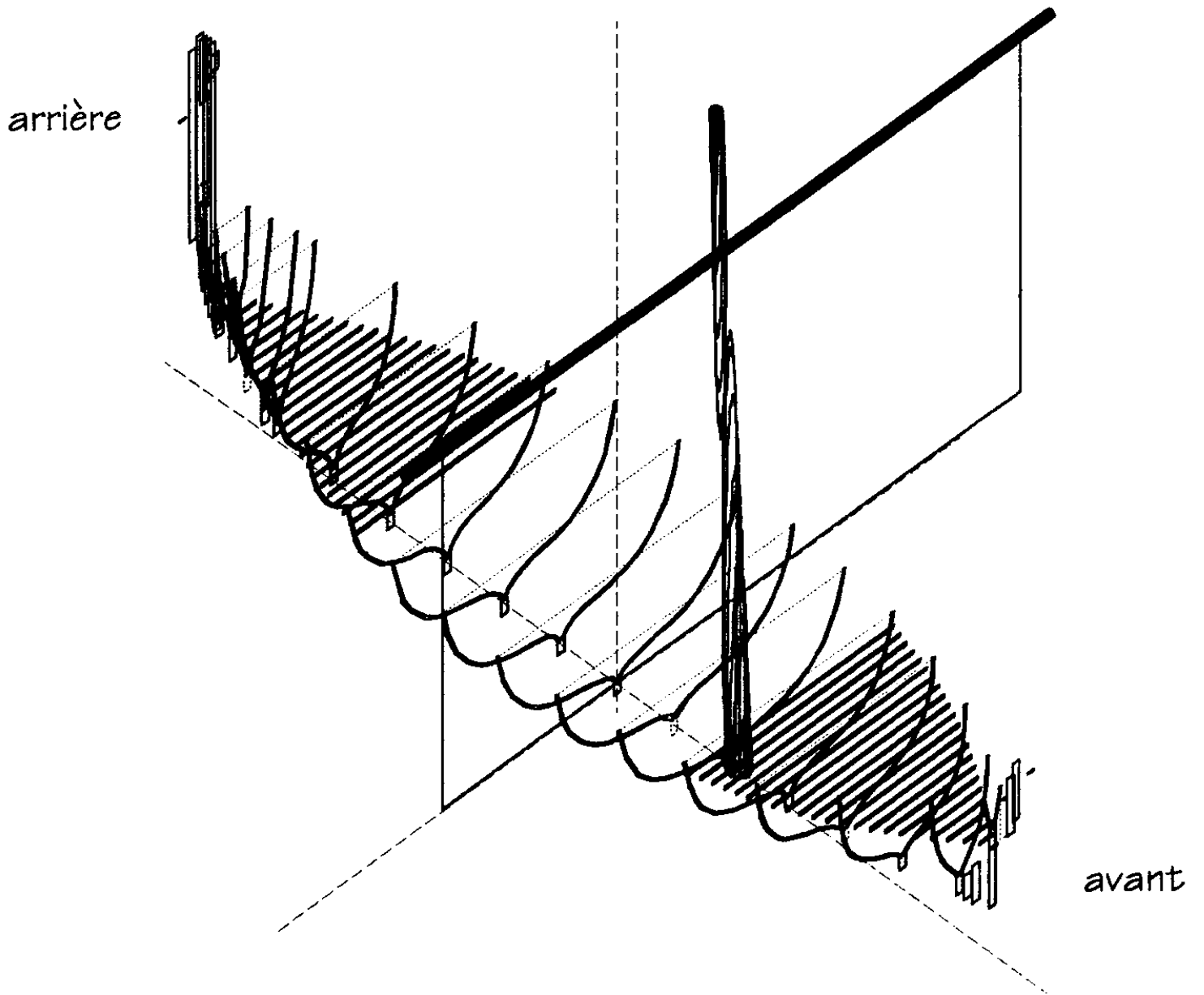
²Les noms des composantes apparaîtront dans certains documents mis en annexe.

Le choix de la base du bordé comme référence des cotes pour les deux navires a été dicté par le souhait de mieux mettre en évidence l'influence des formes de la carène selon le tirant d'eau, sans être trompé par la quille qui ne constitue qu'un appendice.

Les deux planches suivantes illustrent cette structure :

KYRENIA II
STRUCTURE COMPLETE

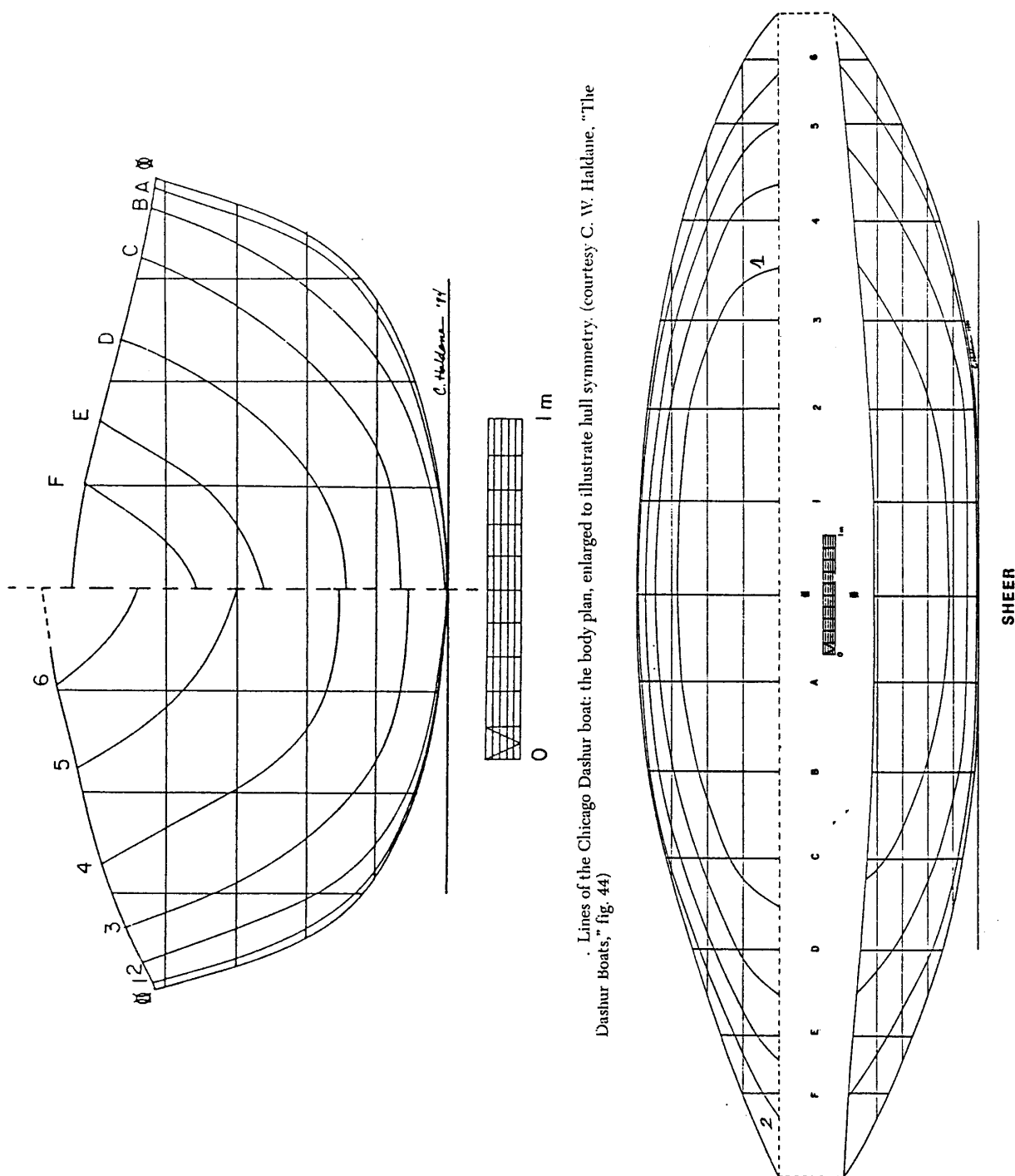




I.5- OBSERVATIONS SUR LES PLANS DES FORMES

Comme je l'ai déjà indiqué, l'étude qui suit a assez fondamentalement besoin du plan des formes d'une épave pour donner toute sa puissance. La littérature archéologique internationale fournit justement un certain nombre de ces plans pour celles qui furent heureusement assez conservées. Ainsi le lecteur trouvera ci-dessous ceux d'épaves qui constituent autant d'objectifs potentiels pour l'application de la méthode proposée de reconstitution des caractéristiques nautiques :

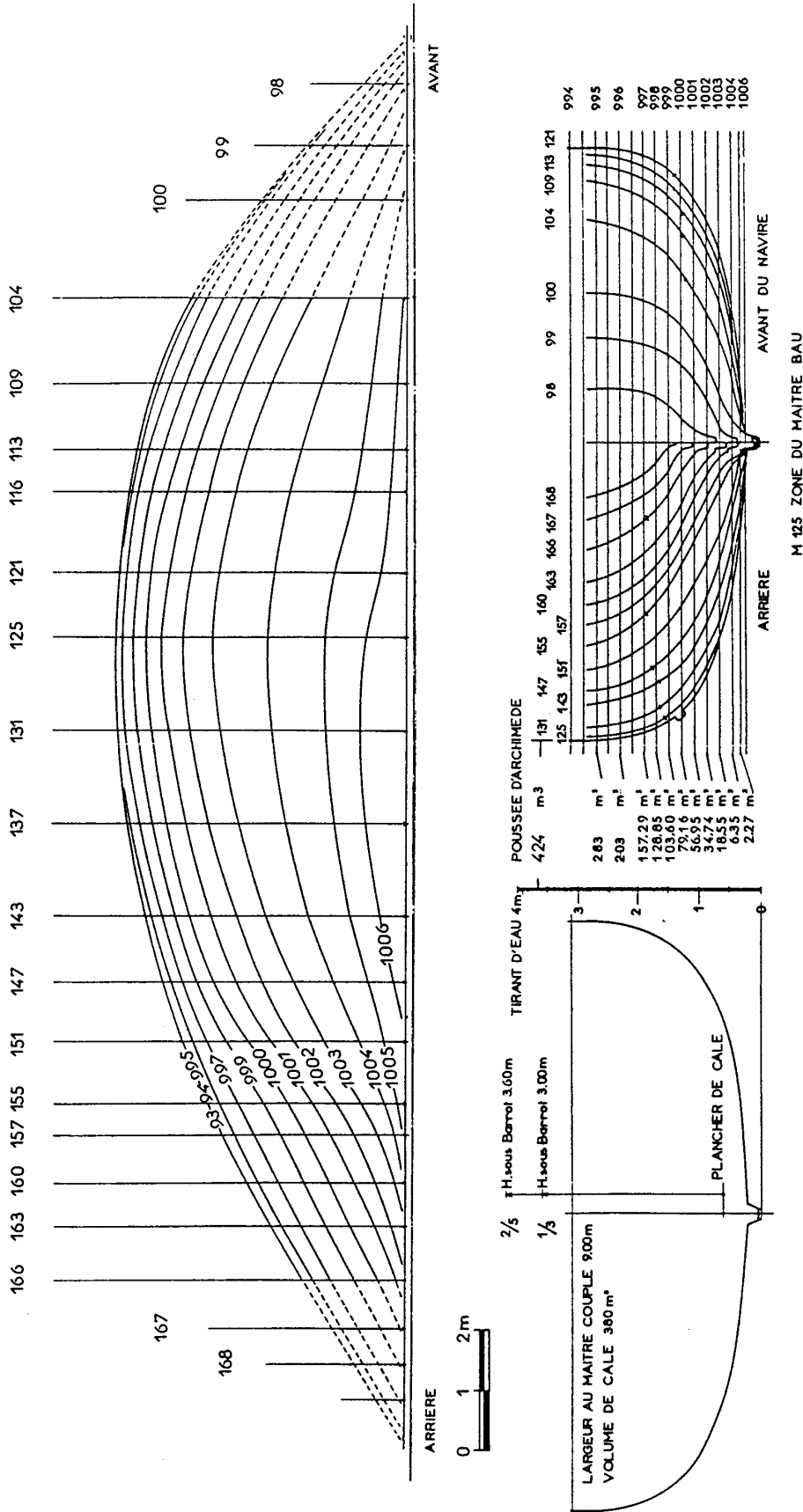
- **un des bateaux de Dashur** : daté du XIXe s. av J.C. et conservé au Chicago Field Museum of Natural History.



Lines of the Chicago Dashur boat: the body plan, enlarged to illustrate hull symmetry. (courtesy C. W. Haldane, "The Dashur Boats," fig. 44)

Lines of the Chicago Dashur boat: the sheer and half-breadth plans of the port side. (courtesy C. W. Haldane, "The Dashur Boats," fig. 45)

- le navire de la Bourse de Marseille : daté du Ier s. av J.C., il a déjà fait l'objet d'une étude hydrostatique par [Gassend, 1982] ainsi que d'une reconstruction partielle visible au Musée d'Histoire de Marseille.

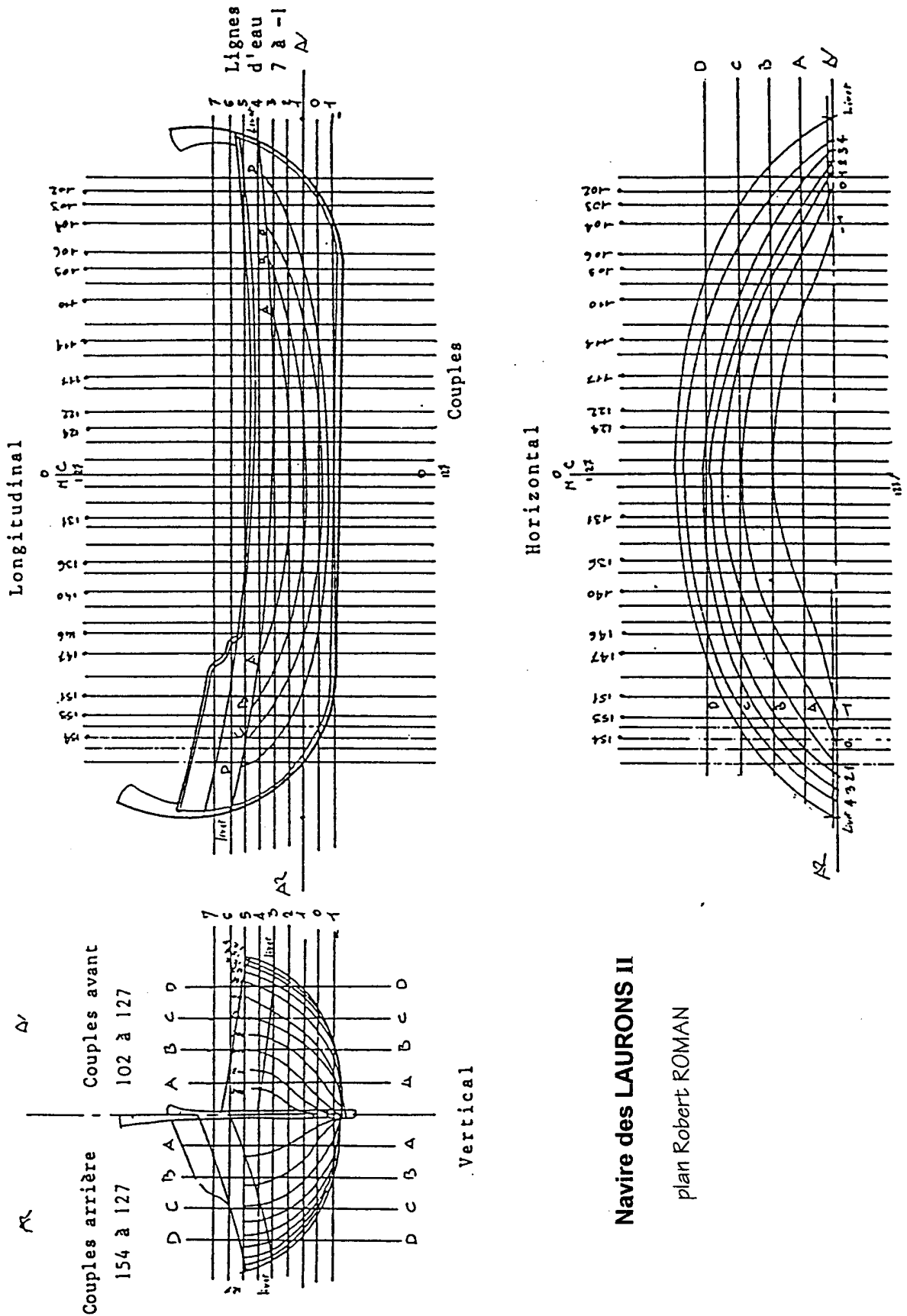


Plan des formes : en haut les lignes d'eau résultent de l'intersection des plans horizontaux avec la carène. En bas profils transversaux de la carène avec indication de la poussée d'Archimède exercée sur la carène (exprimée en mètres cubes) et le tirant d'eau du navire.

Navire de la BOURSE

plan J.M. GASSEND

- le navire des Laurons II : daté de la fin du IIe s. ap J.C., il a bénéficié d'une étude détaillée, hydrostatique et en partie dynamique, de [Roman, 1987].



Navire des LAURONS II

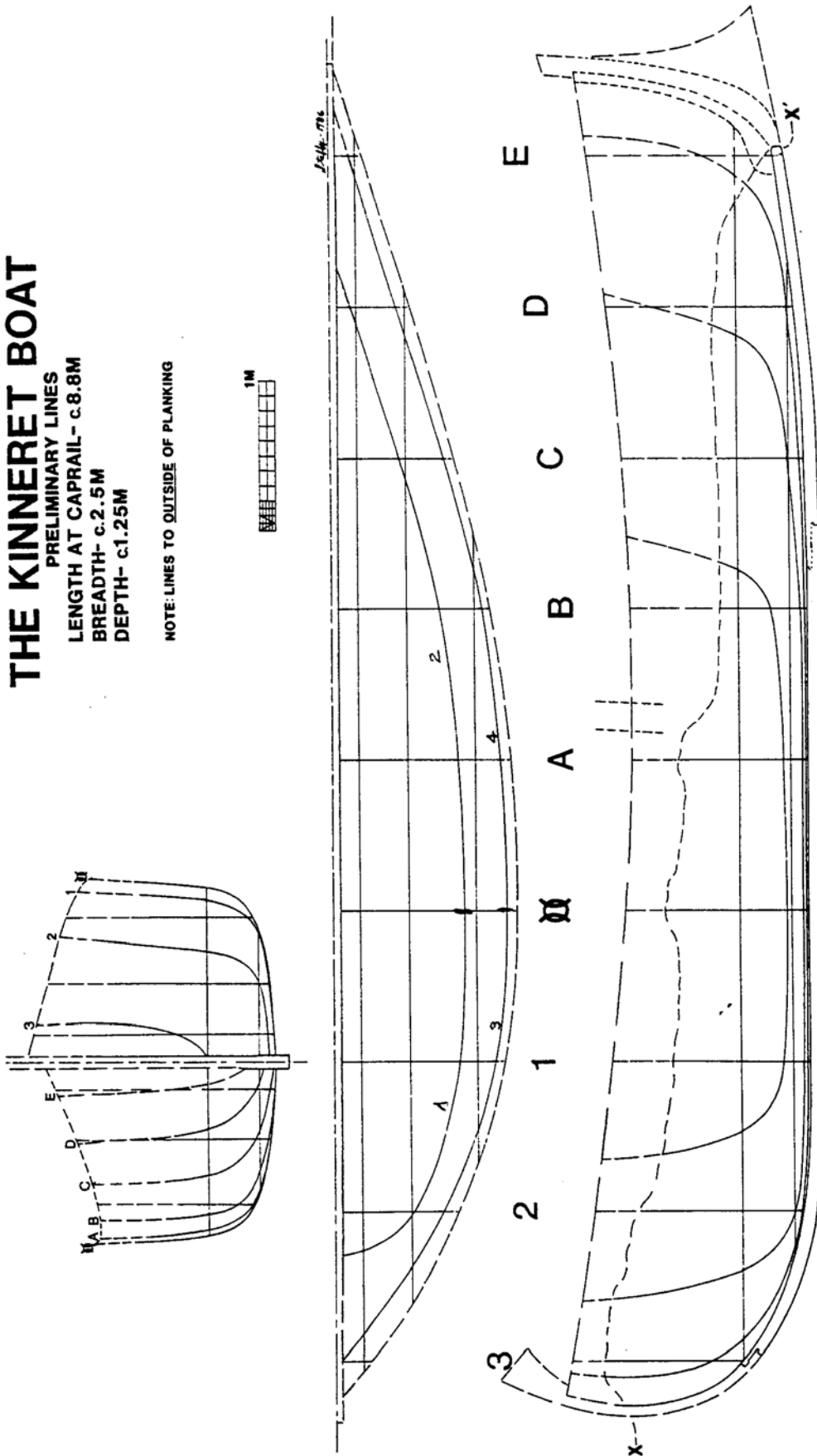
plan Robert ROMAN

- le bateau de Kinneret : sa datation reste approximative entre le Ier s. av et le IIe ap J.C.

THE KINNERET BOAT

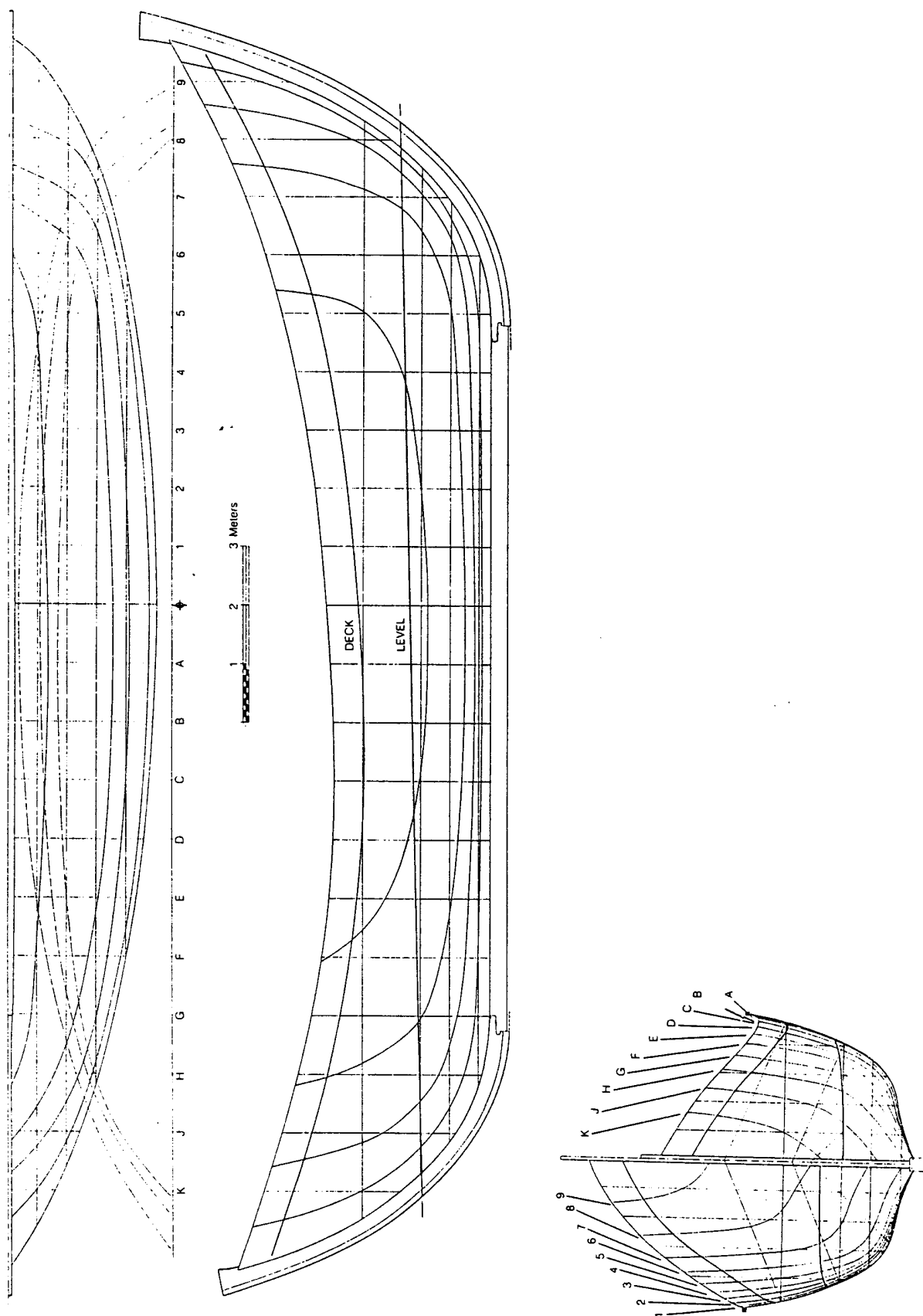
PRELIMINARY LINES
 LENGTH AT CAPRAIL- c.8.8M
 BREADTH- c.2.5M
 DEPTH- c.1.25M

NOTE: LINES TO OUTSIDE OF PLANKING



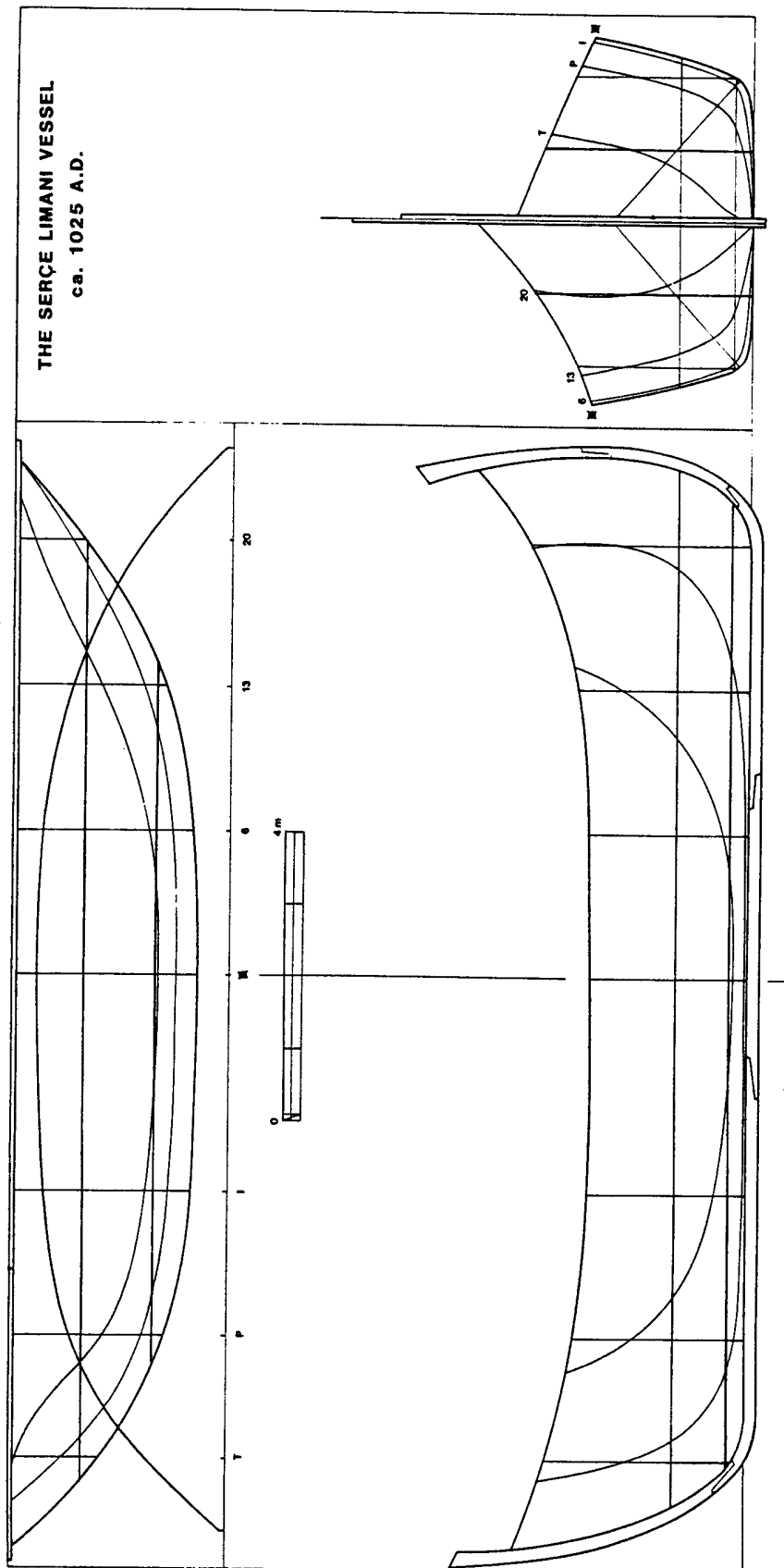
The lines of the Kinneret boat, showing two possible stem configurations.

- l'épave de Yassi Ada I : cette épave byzantine du VIIe s., trop peu conservée, est proposée avec une reconstitution très hypothétique.



The lines of the seventh-century Yassi Ada merchantman. The reconstruction is largely hypothetical, based on a 10 percent hull survival. (tracing and details by Susan Womer Katzev)

- **le navire de Serçe Liman** : cette épave médiévale (XIe s.) étudiée par J.R.Steffy est très importante par la position charnière qu'elle occupe dans l'évolution des procédés de construction.



Preliminary lines of the Serçe Limani vessel. (drawing by Claire Peachey)

Dans la suite du mémoire je montrerai comment à partir de ces plans, et avec une analyse mécanique, on peut déduire les performances de ces navires mais je souhaite ici faire quelques observations, purement géométriques, qui seront utilisées dans le chapitre suivant. En effet nous verrons les nombreux calculs auxquels est confronté l'archéologue-architecte naval et qui peuvent être simplifiés moyennant certaines approximations.

Ainsi l'observation des formes du maître couple montre qu'il peut souvent s'assimiler à une courbe simple :

- une demi-ellipse de grand axe la largeur et de demi-petit axe le creux (Jules Verne n°9, Kyrénia et la Bourse).
- une parabole, d'axe verticale et de sommet la base du couple, lorsque sa forme devient plus tendue (Dashur)
- une courbe algébrique générale de la forme $z = k.y^n$ qui permet de rendre compte facilement de couples assez anguleux (Kinneret et Serçé Liman).

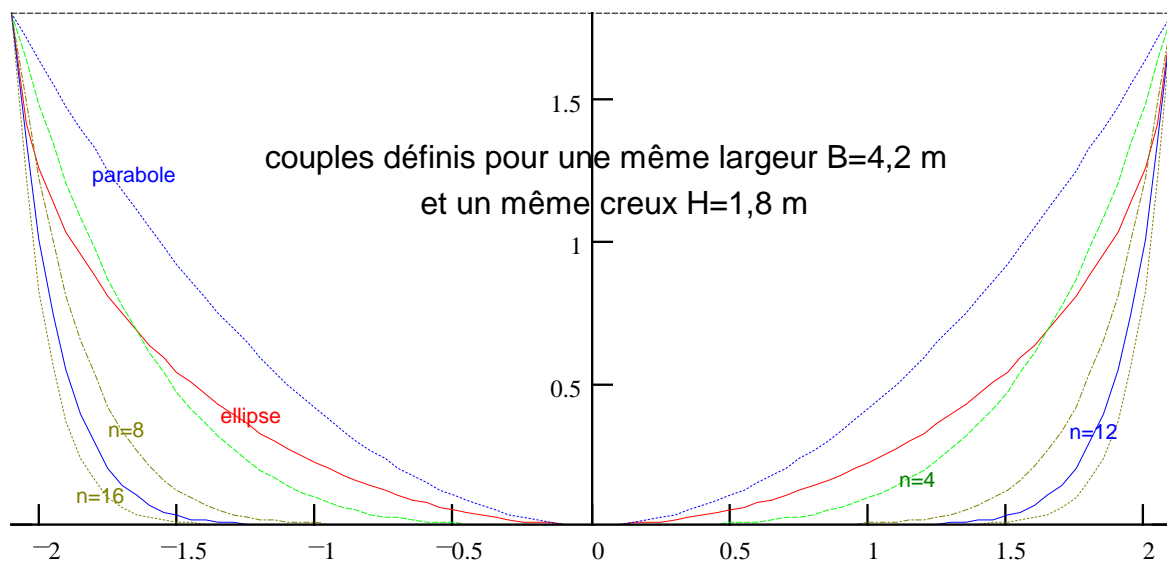


fig. I.5

De la même façon on peut constater que tout ou partie d'une ligne d'eau peut se confondre aisément avec :

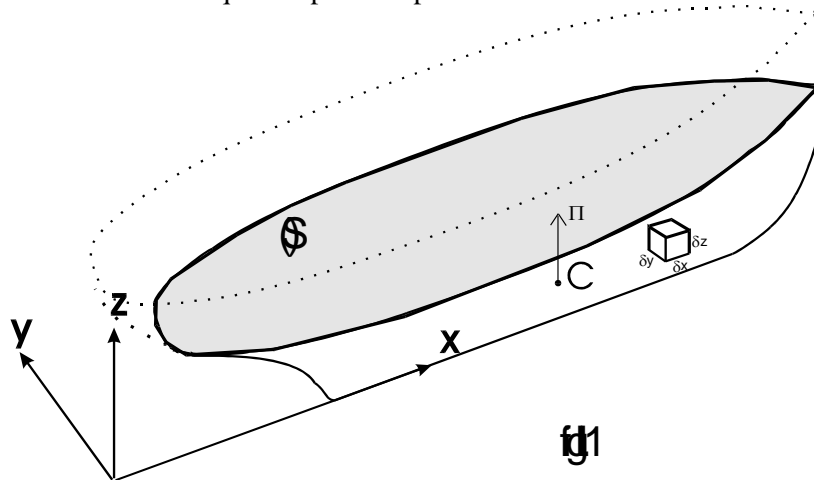
- une demi-ellipse de grand axe l'axe longitudinal (ligne 1 de Dashur)
- un quart d'ellipse de grand axe l'axe longitudinal (fraction 1 de Kinneret)
- une parabole d'axe transversal (ligne 2 de Dashur et fractions 2, 3 et 4 de Kinneret)

L'ensemble de ces approximations est bien sûr inutile si l'on dispose d'un logiciel spécialisé en calculs hydrostatiques mais il prend tout son intérêt pour le calculateur opérant manuellement et donc éventuellement pour l'archéologue naval.

LES CARACTERISTIQUES HYDROSTATIQUES

II.1- LA CARÈNE

Lorsque le navire flotte, la partie de sa coque qui est immergée s'appelle la *carène*. Elle est limitée par le plan représentant la surface de l'eau supposée au repos. L'intersection de la coque avec ce plan s'appelle une *ligne d'eau* et elle délimite la *surface de flottaison* (S). Tout ce qui se situe au dessus d'elle fait partie des *oeuvres mortes* et à contrario au dessous se situent les *œuvres vives*. La carène, comprise donc entre la coque et la flottaison a un volume V et son centre C est appelé *centre de carène*, c'est en ce point que s'applique la poussée d'Archimède Π qui compense le poids P du navire.



Pour définir le volume V et les coordonnées du point C il faut envisager autour de chaque point, de coordonnées x_i , y_i et z_i , un volume élémentaire δv , défini par exemple par le parallélépipède de cotés δx , δy et δz , et effectuer la sommation dans le domaine de l'espace à trois dimensions formé par la carène. Ce qui s'exprime par la formule :

$$V = \sum_{\text{carène}} \delta v = \sum_{\text{carène}} \delta x \cdot \delta y \cdot \delta z$$

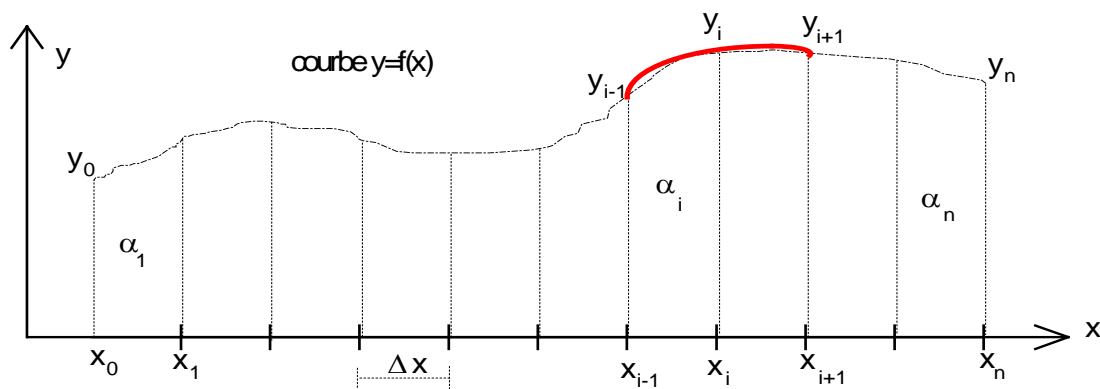
La position X_C , Y_C et Z_C du centre de carène s'obtient ensuite en faisant la moyenne des positions de chacun de ces points, chaque position étant elle-même pondérée par le volume δv de son élément :

$$X_C = \frac{1}{V} \sum_{\text{carène}} x_i \cdot \delta v \quad Y_C = \frac{1}{V} \sum_{\text{carène}} y_i \cdot \delta v \quad Z_C = \frac{1}{V} \sum_{\text{carène}} z_i \cdot \delta v$$

II.2- MÉTHODE D'INTEGRATION DE SIMPSON

Les formules précédentes ne font que donner le sens de la démarche à suivre et il reste le problème concret et technique d'effectuer une sommation sur un nombre infini de points. De nombreuses formules fournissent une valeur approchée d'une telle somme en se limitant à un nombre fini de points. La méthode, due à Simpson, décrite ci-dessous est l'exemple d'un bon compromis entre simplicité de calculs et précision des résultats. Elle reste d'actualité lorsqu'on ne dispose pas de moyens informatiques puissants, même si des logiciels spécialisés comme *Autohydro* emploient eux des algorithmes plus performants.

Le problème mathématique initial est de calculer l'aire limitée par une courbe :



figII.2

car on démontre que le résultat de la sommation infinie $\sum_{\text{courbe}} f(x) \cdot \delta x$ est en fait l'aire comprise entre l'axe des x et la courbe d'équation $y=f(x)$. La méthode de Simpson consiste alors à découper la courbe en un nombre pair n d'intervalles égaux et à calculer, pour chaque zone i, une valeur approchée de l'aire partielle α_i en assimilant localement la courbe à la parabole qui passe par les trois points consécutifs encadrant et suivant cette zone :

$$\alpha_i = \frac{\Delta x}{3} [y_{i-1} + 4y_i + y_{i+1}]$$

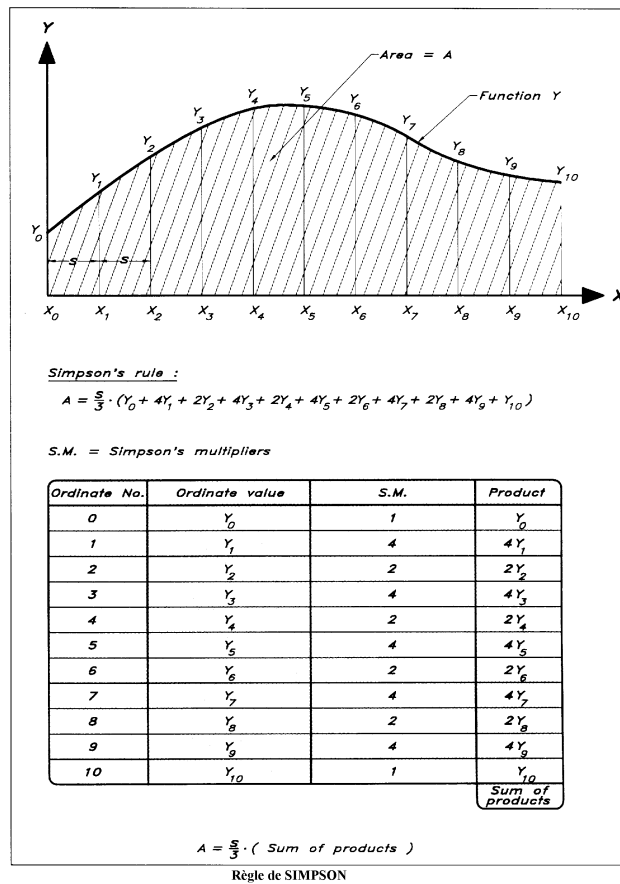
et finalement la valeur approchée de la somme infinie est donnée par une somme finie :

$$\sum_{\text{courbe}} y \cdot \delta x \cong \frac{\Delta x}{3} [y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + \dots + 4y_{n-1} + y_n]$$

cette formule sera utilisée par la suite pour différentes fonctions ou courbes. Les coefficients 1, 4, 2, 4 ... 4, 1 sont appelés les multiplicateurs de Simpson (SM pour les anglo-saxons). Par commodité les calculs sont souvent disposés de façon tabulée, à raison d'une colonne par grandeur : x, y, SM, etc.

Comme l'illustre l'exemple suivant tiré de [Larsson] :

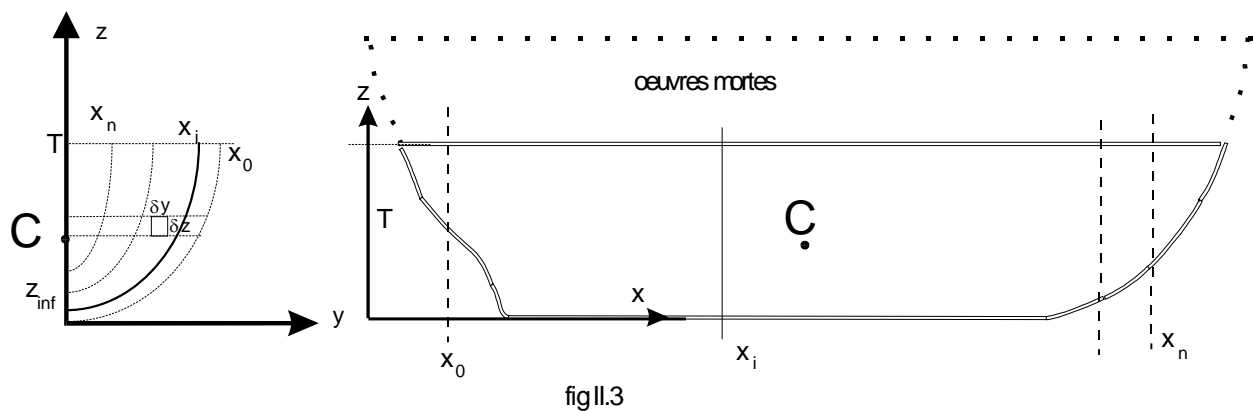
II.3



II.3- CALCULS DES CARÈNES DROITES

Lorsque le plan longitudinal est vertical le navire est dit alors **droit**. La surface de flottaison est repérée par le tirant d'eau T. Par raison de symétrie le centre de carène est dans le plan longitudinal ($Y_c = 0$).

Lorsqu'on coupe la carène par plusieurs plans transversaux on définit autant de couples, repérés par leurs abscisses X_i :



Le couple de rang i , d'abscisse X_i , est une courbe $y(z)$ symétrique par rapport à l'axe des z et dont la partie immergée a une aire fournie par la méthode de Simpson :

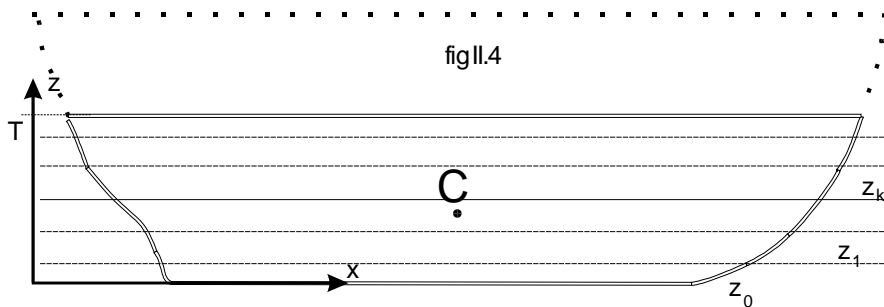
$$A_i = A(x_i) = \sum_{\text{couple } i} \delta y \cdot \delta z \cong 2 \frac{\Delta z}{3} [y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + \dots + 4y_{n-1} + y_n]$$

où $\Delta z = (T - Z_{\text{inf}_i})/n$, Z_{inf_i} étant l'ordonnée minimale du couple i , n le nombre pair de points uniformément espacés en hauteur et les y_j leurs écartements transversaux. En répétant ce calcul pour plusieurs sections le long du navire on construit la fonction $A(x)$ dont le graphe s'appelle la *courbe des aires*. Le volume et l'abscisse du centre de carène C s'obtiennent alors en empilant les tranches délimitées par les différents couples. En notant encore n le nombre (bien qu'il soit sans rapport avec le précédent) de tranches, qui est traditionnellement de 20, cela donne :

$$V = \sum_{\text{longueur}} A(x) \cdot \delta x \cong \frac{\Delta x}{3} [A_0 + 4A_1 + 2A_2 + 4A_3 + \dots + 4A_{n-1} + A_n]$$

$$X_C = \frac{1}{V} \sum_{\text{longueur}} x \cdot A(x) \cdot \delta x \cong \frac{1}{V} \frac{\Delta x}{3} [x_0 \cdot A_0 + 4x_1 \cdot A_1 + 2x_2 \cdot A_2 + 4x_3 \cdot A_3 + \dots + 4x_{n-1} \cdot A_{n-1} + x_n \cdot A_n]$$

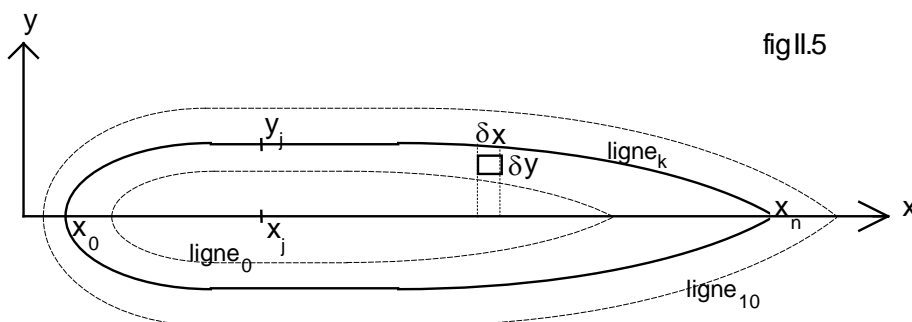
On peut procéder de la même façon en considérant des sections horizontales de la carène comprise entre la quille et la flottaison, repérées par leurs cotes z_k en nombre $n = 11$ en général :



La ligne d'eau de rang k est une courbe $y(x)$ symétrique par rapport à l'axe des x dont l'aire est selon la méthode de Simpson :

$$Aw_k = Aw(z_k) = \sum_{\text{ligne d'eau } k} \delta x \cdot \delta y \cong \frac{\Delta x}{3} [y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + \dots + 4y_{n-1} + y_n]$$

les y_j représentant là encore les distances transversales des n points (n pair) uniformément espacés le long de cette ligne d'eau :



En répétant là encore le même calcul pour les différentes lignes d'eau et en empilant les tranches obtenues on obtient, toujours par moyenne pondérée, la cote du centre de carène C :

$$Z_C = \frac{1}{V} \sum_{\text{tirant d'eau}} z \cdot Aw(z) \cdot \delta z \cong \frac{1}{V} \frac{\Delta z}{3} [z_0 \cdot Aw_0 + 4z_1 \cdot Aw_1 + 2z_2 \cdot Aw_2 + 4z_3 \cdot Aw_3 + \dots + 4z_{n-1} \cdot Aw_{n-1} + z_n \cdot Aw_n]$$

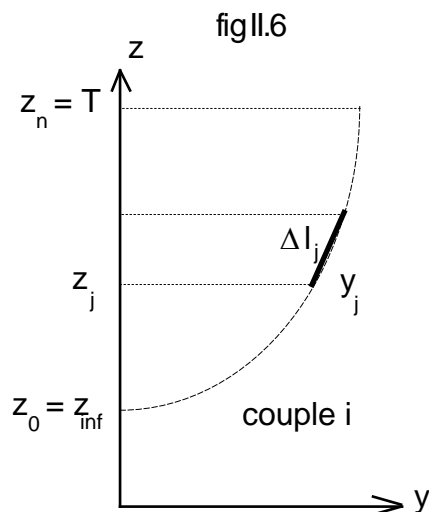
Pour l'estimation de la résistance de frottement nous aurons besoin de l'aire Σ de la *surface mouillée* c'est à dire la surface de la partie de la coque en contact avec l'eau. Cette surface peut se déduire du calcul de la longueur des couples (d'autres méthodes existent aussi) :

Pour chaque couple i et à partir de ses points z_j, y_j
on calcule les cordes : $\Delta l_j = \sqrt{\Delta x^2 + (y_{j+1} - y_j)^2}$
puis la longueur l_i du couple i :

$$l_i = \sum_{j=0}^{n-1} \Delta l_j$$

la surface mouillée Σ est la somme continue de ces longueurs d'arc :

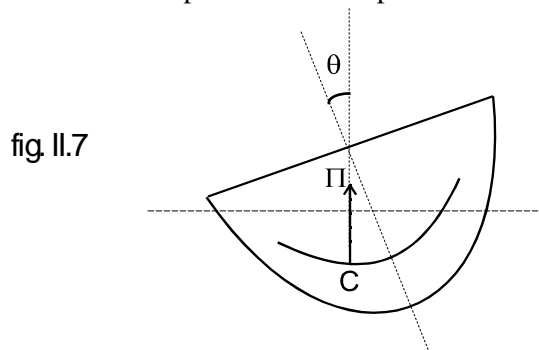
$$\Sigma = \sum_{\text{longueur}} l(x) \cdot \delta x \cong \frac{\Delta x}{3} [l_0 + 4l_1 + 2l_2 + \dots + 4l_{n-1} + l_n]$$



La méthode d'intégration de Simpson n'est pas exclusive et d'autres formules se trouvent dans les ouvrages classiques sur l'architecture navale [Sname, 1967 - Gutelle, 1987 - Larsson, 2000 - Isin, 2010]. On l'aura constaté, les calculs hydrostatiques ne sont pas très complexes mais répétitifs et volumineux. C'est donc là que l'usage d'un logiciel comme *Autohydro* apporte tout son bénéfice et compense la lourde charge de saisie vue au chapitre précédent.

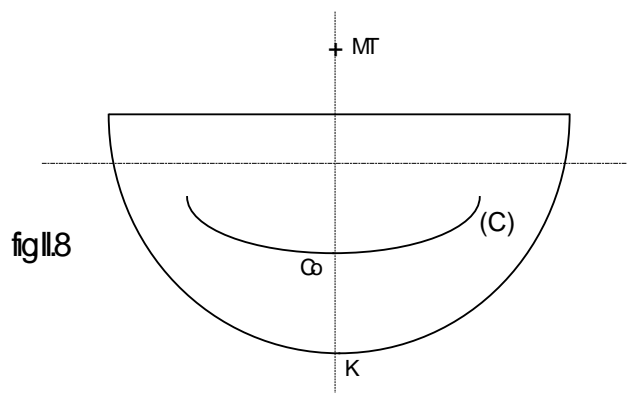
II.4- INCLINAISON TRANSVERSALE

Lorsque le navire s'incline autour de son axe longitudinal la carène se déforme, tout en conservant le même volume V , et le centre de carène C occupe une nouvelle position fonction de l'angle θ d'inclinaison :



La courbe engendrée par le point C est presque plane et sa projection (C) sur le plan transversal jouit

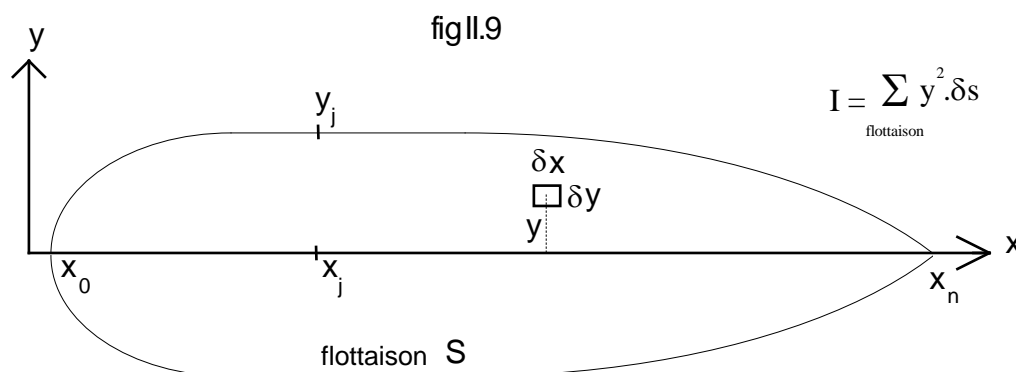
de propriétés utilisées en stabilité. En particulier lorsque le navire est droit le centre de carène occupe la position C_0 (dans le plan longitudinal par raison de symétrie) et en ce point la courbe (C) a une courbure qui est caractérisée par la position de son *centre de courbure* MT :



Ce point MT s'appelle le *métacentre transversal* et la distance C_0MT est le *rayon métacentrique transversal* r . Sa longueur est donnée par une formule très concise due à Bouguer [Hervieu, 1985] :

$$r = \frac{I}{V}$$

dans laquelle I désigne le *moment d'inertie de la surface de flottaison* S par rapport à l'axe longitudinal :



Cette grandeur caractérise l'étalement transversal de la flottaison et peut être calculée concrètement par la méthode de Simpson selon la formule :

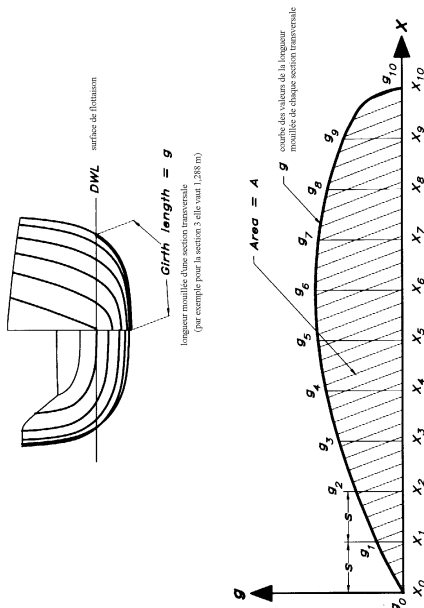
$$I = 2 \cdot \sum_{\text{demi-flottaison}} \frac{y^3}{3} \delta x$$

$$\cong 2 \frac{\Delta x}{3} \left[\frac{y_0^3}{3} + 4 \frac{y_1^3}{3} + 2 \frac{y_2^3}{3} + \dots + 4 \frac{y_{n-1}^3}{3} + \frac{y_n^3}{3} \right]$$

Le métacentre transversal MT peut aussi être repéré par rapport au point K, qui désigne la limite inférieure de la coque, par la distance $Z_{MT} = KMT$.

La page suivante illustre, par des exemples tirés de [Larsson], la mise en œuvre pratique de ces formules :

Calcul de la surface mouillée



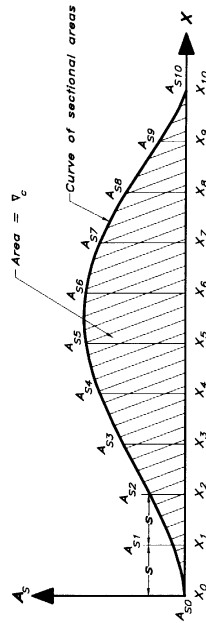
Ordinate No.	Ordinate value	S.M.	Product
0	g_0 [0.000]	1	g_0 [0.000]
1	g_1 [0.530]	4	$4g_1$ [2.120]
2	g_2 [0.945]	2	$2g_2$ [1.890]
3	g_3 [1.288]	4	$4g_3$ [5.152]
4	g_4 [1.545]	2	$2g_4$ [3.090]
5	g_5 [1.702]	4	$4g_5$ [6.808]
6	g_6 [1.752]	2	$2g_6$ [3.504]
7	g_7 [1.690]	4	$4g_7$ [6.760]
8	g_8 [1.510]	2	$2g_8$ [3.020]
9	g_9 [1.186]	4	$4g_9$ [4.744]
10	g_{10} [0.000]	1	g_{10} [0.000]
			Sum of Products [37.088]

$A = \frac{S}{3} \cdot (\text{Sum of products})$

$S_w = 2 \cdot A$

$[S_w = 24,735 \text{ m}^2]$

2 = both sides



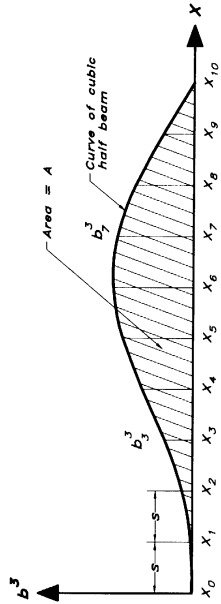
[s = 1.000 m]

A_s : Areas calculated earlier (par exemple la partie immergée de la section transversale 4 a une surface de 1,144 m²)

Calcul du volume de carène

Ordinate No.	Ordinate value	S.M.	Product
0	A_{s0} [0.000]	1	A_{s0} [0.000]
1	A_{s1} [0.180]	4	$4A_{s1}$ [0.640]
2	A_{s2} [0.470]	2	$2A_{s2}$ [0.940]
3	A_{s3} [0.832]	4	$4A_{s3}$ [3.328]
4	A_{s4} [1.144]	2	$2A_{s4}$ [2.288]
5	A_{s5} [1.332]	4	$4A_{s5}$ [5.328]
6	A_{s6} [1.341]	2	$2A_{s6}$ [2.682]
7	A_{s7} [1.156]	4	$4A_{s7}$ [4.624]
8	A_{s8} [0.805]	2	$2A_{s8}$ [1.610]
9	A_{s9} [0.364]	4	$4A_{s9}$ [1.456]
10	A_{s10} [0.000]	1	A_{s10} [0.000]
			Sum of Products [22.896]

$V_c = \frac{S}{3} \cdot (\text{Sum of products})$ [7.632 m³]



[s = 1.000 m]

espacement des sections transversales
 demi-largeur de la ligne d'eau au droit de chaque section transversale
 (exemple au droit de la section 5 la demi-largeur vaut b = 1,318 m et donc b³ = 3,698 m³)

Ordinate No.	Ordinate value	S.M.	Product
0	b^3_0 [0.000]	1	b^3_0 [0.000]
1	b^3_1 [0.080]	4	$4b^3_1$ [0.320]
2	b^3_2 [0.528]	2	$2b^3_2$ [1.056]
3	b^3_3 [1.412]	4	$4b^3_3$ [5.648]
4	b^3_4 [2.527]	2	$2b^3_4$ [5.054]
5	b^3_5 [3.498]	4	$4b^3_5$ [13.992]
6	b^3_6 [3.974]	2	$2b^3_6$ [7.948]
7	b^3_7 [3.767]	4	$4b^3_7$ [15.068]
8	b^3_8 [2.888]	2	$2b^3_8$ [5.776]
9	b^3_9 [1.529]	4	$4b^3_9$ [6.116]
10	b^3_{10} [0.000]	1	b^3_{10} [0.000]
			Sum of Products [60.978]

Calcul du moment d'inertie transversale

c-s-d par rapport à l'axe longitudinal

$A = \frac{S}{3} \cdot (\text{Sum of products})$

$I_T = \frac{S}{3} \cdot A$ [13.6 m⁴]

II.5- COEFFICIENTS CARACTÉRISTIQUES DE LA CARÈNE

Pour caractériser de façon globale les formes de la carène on fait souvent appel à des coefficients sans dimensions qui décrivent le remplissage de certaines parties. Ces coefficients caractéristiques servent par exemple à comparer des carènes entre elles et ils seront utilisés plus loin lors du devis de poids et de l'étude hydrodynamique du navire.

Les coefficients s'expriment à partir des variables suivantes :

- longueur à la flottaison L
- largeur maximale B
- profondeur de carène T
- aire de la surface de flottaison A_W
- aire du maître couple A_M
- volume de carène V
- aire de la surface latérale A_L

II.5.1- coefficient de remplissage parallélépipédique ou bloc-coefficient :

$$C_B = \frac{V}{L \cdot B \cdot T}$$

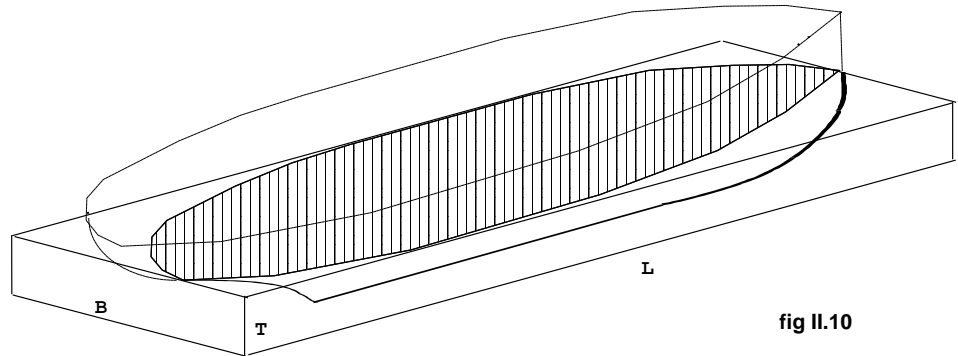


fig II.10

II.5.2- coefficient de remplissage cylindrique ou prismatique :

$$C_P = \frac{V}{L \cdot A_M}$$

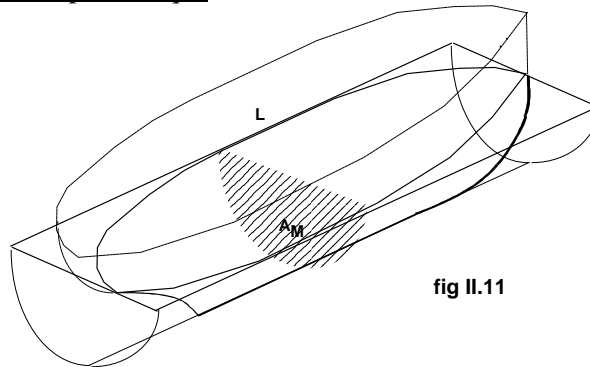


fig II.11

II.5.3- coefficient de remplissage du maître couple :

$$C_{MS} = \frac{A_M}{B \cdot T}$$

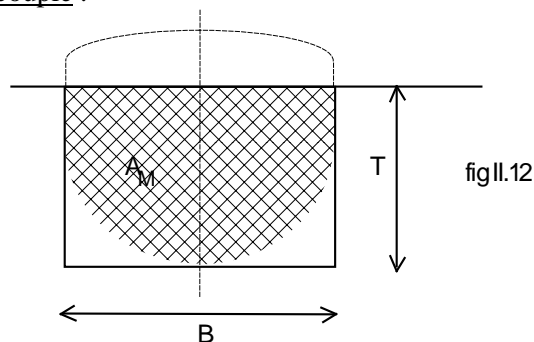
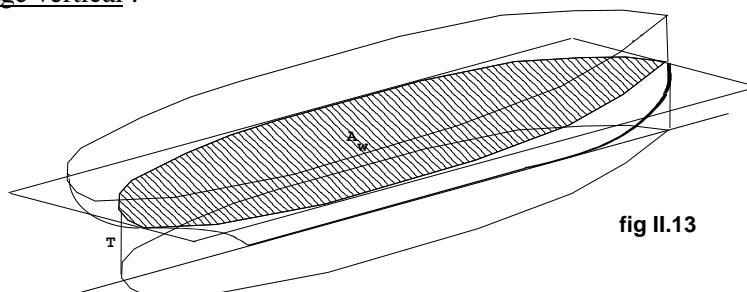


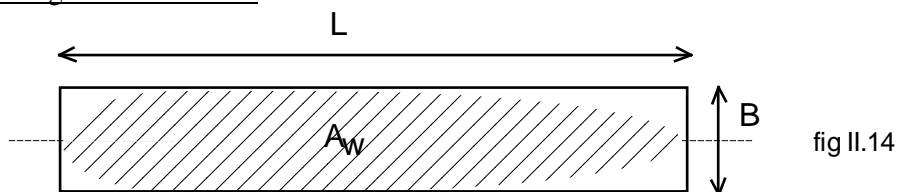
fig II.12

II.5.4- coefficient de remplissage vertical :

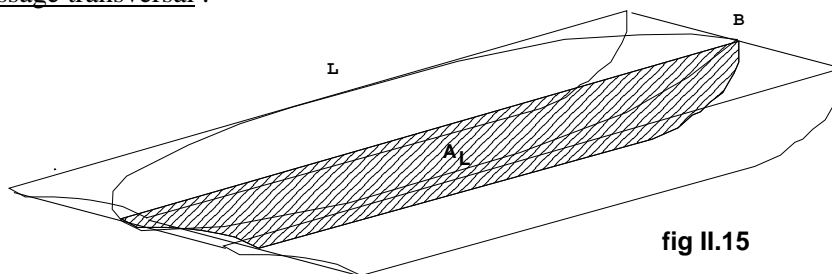
$$C_V = \frac{V}{T \cdot A_W}$$

II.5.5- coefficient de remplissage de la flottaison :

$$C_{WP} = \frac{A_W}{L \cdot B}$$

II.5.6- coefficient de remplissage transversal :

$$C_T = \frac{V}{B \cdot A_L}$$



II.6- LES DOCUMENTS HYDROSTATIQUES

A l'aide du logiciel *Autohydro* conçu pour effectuer les calculs décrits précédemment j'ai déterminé pour l'épave n°9 la table dite hydrostatique (annexe 1), elle donne :

- pour chaque tirant d'eau T en m (*LCF draft*)
- le déplacement P en t (*displacement weight*)
- l'abscisse Xc, en m, du centre de carène (*LCB buoyancy centre*, avec *a* pour en arrière [aft] ou *f* pour en avant [fore] de l'origine du repère utilisé)
- la cote Zc, en m, du centre de carène (*VCB* " ")
- la variation de déplacement δP , en t, produisant un enfoncement de 1 cm (*weight/cm*)
- l'abscisse Xf, en m, du centre de la flottaison (*LCF*)
- le moment, en t.m, produisant un changement d'assiette longitudinale de 1° (*moment/deg trim*)
- la cote Z_{ML}, en m, du métacentre longitudinal (*KML*)
- la cote Z_{MT}, en m, du métacentre transversal (*KMT*)

et pour la même plage de tirant d'eau le logiciel fournit les coefficients caractéristiques de cette coque sous forme tabulée, c'est-à-dire :

- le volume V en m^3 (*volume cu.m*)
- le coefficient prismatique C_p
- le coefficient de remplissage parallélépipédique C_b
- le coefficient de remplissage du maître couple C_{ms}
- le coefficient de remplissage de la flottaison C_{wp}
- la surface mouillée Σ en m^2 (*ws area sq.m*)

Les mêmes grandeurs, concernant la réplique Kyrénia II, ont été calculées et sont rangées dans l'annexe 2.

II.7- FORMULES D'APPROXIMATION DES CARACTÉRISTIQUES HYDROSTATIQUES

Pour commencer ce paragraphe, d'informations pratiques, je signale que si l'on a déjà étudié une carène donnée et que l'on s'intéresse à une carène déduite de celle-ci par affinités sur les trois axes, longitudinal, transversal et vertical, de facteurs respectifs x , y , z alors la forme algébrique des expressions données aux § II.3 et II.5 entraîne que les caractéristiques hydrostatiques de la carène déduite dérivent simplement de celles de la carène initiale¹ [Clauzel, 1899] :

$$\begin{array}{lll} A'_w = x.y.A_w & A'_M = y.z.A_M & V' = x.y.z.V \\ X'_C = x.X_C & Z'_C = z.Z_C & r' = \frac{y^2}{z}r \end{array}$$

Tous les calculs présentés dans les § II.3 à II.6 suppose que l'on dispose du plan des formes du navire or il est une situation où c'est encore impossible : lorsque l'architecte commence à concevoir un nouveau navire. Pour cette phase de projet il dispose heureusement de formules approchées lui permettant d'estimer un certain nombre de caractéristiques hydrostatiques et en s'appuyant en partie sur celles de navires antérieurs. L'archéologue naval se trouve dans la même situation pendant une longue période de son étude d'une épave et il pourra en faire usage avec le même bénéfice. Je les donne avec les même notations qu'au § II.5. Les formules du XIXe siècle sont tirées de [Clauzel, 1899] et j'en propose d'autres élaborées dans l'annexe 5. Pour éclairer l'archéologue sur le degré d'approximation de ces formules je les ai systématiquement appliquées aux épaves étudiées.

Comme le volume d'une carène dépend de ses formes la comparaison des résultats, calculé et estimé, doit se faire sur plusieurs tirants d'eau. De plus, si l'on souhaite juger de l'adéquation de différentes formules vis-à-vis de différentes carènes, il convient d'opérer sur des situations géométriquement équivalentes. J'ai donc adopté pour chaque épave une échelle de valeurs de tirants d'eau correspondant à une même série de fractions de la hauteur minimale du bordé, au-delà il y aurait envahissement du bordé par l'eau. Soit en m :

¹Les coefficients de remplissages restent eux inchangés.

	Jules Verne n°9	Kyrénia 2
hauteur minimale du bordé	0,66	1,93
tirant d'eau à 20%	0,13	0,39
tirant d'eau à 40%	0,26	0,77
tirant d'eau à 60%	0,40	1,16
tirant d'eau à 80%	0,53	1,54
tirant d'eau à 100%	0,66	1,93

puis j'ai utilisé le logiciel pour calculer les caractéristiques hydrostatiques et géométriques correspondant aux différents tirants d'eau. Les résultats, pour chacune des épaves sont rangés respectivement dans les annexes 3 et 4.

II.7.1- aire du maître couple

Je considère par exemple celui de l'épave n°9 et qui a déjà été reconnu comme proche d'une demi-ellipse (cf § I.5). Je lui applique la formule établie dans l'annexe 5 : $A_M = \pi/4.T.B$ (ici a vaut T et b vaut B/2 pour les 2 quarts d'ellipse) et je compare avec l'aire A_M déduite du coefficient C_{MS} calculé :

T	B	Cms	Am réelle	Am approx	Ecart
en m	en m		en m ²	en m ²	
0,66	1,60	0,744	0,78	0,83	6%

II.7.2- aire de la surface de flottaison :

Les lignes d'eau supérieures de Kyrénia sont voisines de paraboles, d'axe transversal, aussi bien sur l'avant que sur l'arrière et j'adopte donc la formule $A_w = 2/3.L.B$ (ici a vaut B et b vaut L) :

T	B	L	Aw réelle	Aw approx	Ecart
en m	en m	en m	en m ²	en m ²	
1,56	4,04	13,58	36,64	36,58	0%

II.7.3- moment d'inertie de la surface de flottaison :

Toujours en conservant cette flottaison il me faut disposer de la valeur calculée de son inertie par rapport à l'axe longitudinal et je la trouve dans la colonne FSM de l'annexe 6 pour une cote très voisine de 1,58 m. J'adopte ensuite la formule $I = 4/105.B^3.L$ relative à la parabole précédente :

T	B	L	I réelle	I approx	Ecart
en m	em	en m	en m ⁴	en m ⁴	
1,56	4,04	13,58	34,86	34,12	-2%

En résumé lorsque la forme du couple ou de la ligne d'eau est simple, ce qui est assez fréquent, on peut calculer ses caractéristiques géométriques très rapidement et avec une grande précision.

II.7.4- volume de la carène :

$$V = 0,87 \frac{A_w \cdot A_M}{B} \quad (\text{Normand, 1870})$$

Pour cette formule du XIXe s. j'ai mené une étude systématique et il en découle le tableau suivant :

Navire	T en m	V réel en m ³	B en m	Aw en m ²	Cms	Am en m ²	V app en m ³	Ecart
Kyrénia	0,39	1,31	1,96	9,63	0,229	0,17	0,75	-43%
Kyrénia	0,78	8,46	3,26	25,30	0,421	1,07	7,23	-15%
Kyrénia	1,17	19,95	3,76	32,83	0,528	2,32	17,64	-12%
Kyrénia	1,56	33,60	4,04	36,64	0,597	3,76	29,69	-12%
Kyrénia	1,93	47,56	4,19	38,66	0,646	5,22	41,93	-12%
JV n°9	0,13	0,46	1,09	5,09	0,491	0,07	0,28	-38%
JV n°9	0,26	1,25	1,34	6,79	0,606	0,21	0,93	-26%
JV n°9	0,40	2,26	1,47	7,63	0,676	0,40	1,80	-21%
JV n°9	0,53	3,29	1,54	8,26	0,716	0,59	2,73	-17%
JV n°9	0,66	4,40	1,60	8,69	0,744	0,78	3,71	-16%

On peut immédiatement faire les observations suivantes :

- la formule devient significative lorsqu'elle s'applique à une fraction importante de la coque;
- le coefficient 0,87, adapté aux navires de l'époque, doit être revu à la hausse pour compenser un déficit moyen de 14% et la valeur de 0,99 serait provisoirement un bon compromis pour les navires antiques;
- la connaissance des aires A_W et A_M est effectivement très utile.

II.7.5- tonnage du navire :

La valeur commerciale d'un navire est proportionnelle à la quantité de marchandises qu'il peut transporter. Pour les marchandises légères, cette quantité dépend du volume des capacités intérieures; pour les marchandises pesantes, elle dépend du poids maximum que peut déplacer la carène tout en gardant une marge de sécurité appelée exposant de charge. D'un voyage à l'autre le poids peut varier mais le volume des capacités intérieures constitue une caractéristique permanente que l'on appelle le **tonnage** du navire. Le **jaugeage** est l'opération par laquelle on le détermine. Cette importance commerciale fait que l'histoire maritime est riche en méthodes de jaugeage et unités, passant par exemple du tonneau de 1,44 m³ (correspondant à 4 barriques bordelaises) consacré par Colbert (1681) au tonneau anglais de 2,83 m³ (correspondant à 100 pieds cubes) pour aboutir de nos jours à une unité conventionnelle sans signification géométrique.

La littérature archéologique [Tchernia, Pomey., 1978; Gassend, 1982; etc] utilise classiquement une formule, officialisée par une ordonnance de 1681 [Hauser, 1886], qui emploie d'une part la longueur L de tête en tête du navire et d'autre part le creux H qui mesure la distance verticale entre la base de la coque et le pont supérieur :

$$J = \frac{L_{\text{pied}} \cdot B_{\text{pied}} \cdot H_{\text{pied}}}{94} \text{ en tonneau de } 1,44 \text{ m}^3 \text{ et pied de } 0,325 \text{ m}$$

$$= 0,446 \cdot L \cdot B \cdot H \text{ en système métrique complet}$$

Exprimée en système métrique sa validité ressort immédiatement : elle convient d'autant mieux que la partie de la coque située au dessous du pont, dit de tonnage, a un coefficient de remplissage parallélépipédique C_B voisin de 0,446. En fait un peu supérieur car le volume de la structure (bordé, quille, membrures, vaigrage) est à déduire pour obtenir le volume disponible. Que je distingue du volume exploitable obtenu en soustrayant l'espace réservé à l'équipage et l'espace perdu compte tenu du type de cargaison. L'influence de la forme générale des navires avait été d'ailleurs perçue et c'est ainsi que pour tenir compte de son évolution, un allongement relatif, une ordonnance du 28 Novembre 1837 définit une nouvelle formule avec la valeur 0,377. A titre de comparaison la coque de Kyrénia présente pour un tirant d'eau de 1,8

m un coefficient C_B d'environ 0,375² (annexe 2) et l'application de la formule originale entraînerait une surestimation du tonnage d'environ 19%. Pour l'épave de la Bourse de Marseille, étudiée par Gassend, le volume de cale calculé (380 m³) serait minoré lui de 27% par l'estimation basée sur les dimensions (23 m x 9m x 3m). Il convient donc d'être critique dans l'usage de cette formule et sa signification constitue à mes yeux un des nombreux arguments pour entreprendre l'étude systématique des épaves pour lesquelles on a reconstitué un plan des forme et constituer ainsi progressivement une base de données de leurs caractéristiques, géométriques et hydrostatiques entre autres³.

Une autre méthode de jaugeage, celle anglaise de Moorsom et adoptée en France vers 1874 [Hauser], peut éventuellement intéresser l'archéologue naval car elle nécessite peu de données. Elle était basée sur une approche plus technique et concrète du compartimentage d'un navire et utilise la longueur au pont de tonnage L, ainsi que le périmètre p du maître couple :

$$J = 0,17.L.\left(\frac{p}{2} + \frac{B}{2}\right)^2 \quad \text{en m}^3$$

Pour la tester sur le navire de Kyrénia, car des deux épaves étudiées c'est la seule dont la taille et les vestiges attestent le rôle de transport marchand, j'ai défini dans sa structure une cale s'étendant verticalement depuis le plancher du vaigrage (Z = 0,35 m) jusqu'au pont (Z = 1,8 m). Son volume, calculé par le logiciel (annexe 6), représente donc une jauge brute. J'ai mesuré sur le plan L = 13,7 m au pont et p = 6,06 m. Cette dernière valeur pouvant, d'ailleurs, être correctement approchée par la formule de l'annexe 5 relative au périmètre de l'ellipse. Cela donne :

B	L	p	J réelle	J approx	Ecart
en m	en m	en m	en m ³	en m ³	
4,20	13,70	6,06	41,4	61,3	48%

Ce résultat peut sembler bien décevant mais il ne faut pas oublier qu'à l'époque de son usage les navires allant en s'allongeant pour un même déplacement à obtenir il suffisait de moins de largeur et le facteur 0,17 convenait. Pour appliquer avec bénéfice cette dernière formule aux navires antiques sans doute faut-il revoir à la baisse ce coefficient. Un compromis provisoire, basé sur les deux épaves citées précédemment, donnerait environ 0,12 en attendant que cette conjecture soit confirmée ou contredite par les études futures.

²Il ne s'agit là bien sûr que d'une coïncidence numérique sans signification historique.

³J.R.Steffy, *Wooden ship building and the interpretation of shipwrecks*, 1994 donne un $C_b = 0,73$ pour le *buertship* du XVIIe s. et $C_b = 0,54$ pour le clipper *Lightning*.

II.7.6- hauteur du centre de carène :

$$Z_C = T - \frac{1}{3} \left(\frac{T}{2} + \frac{V}{A_W} \right) \quad (\text{Normand, 1870})$$

$$Z_C = T(0,8 - 0,24 \cdot C_{MS}) \quad \text{pour } C_{MS} < 0,85 \quad (\text{Albaret, 1884})$$

$$Z_C = T(1,1 - 0,6 \cdot C_{MS}) \quad \text{pour } C_{MS} > 0,85$$

$$Z_C = T \left(\frac{A_W}{A_W + V/T} \right) \quad (\text{Sname, 1967})$$

En procédant comme au § II.7.4 j'obtiens les résultats suivants :

Navire	T	V	Aw	Cms	Zc	Zc	Zc	Zc
	en m	en m3	en m ²		exact	Normand	Albaret	Sname
Kyrénia	0,39	1,31	9,63	0,229	0,25	0,28	0,29	0,29
Kyrénia	0,78	8,46	25,30	0,421	0,56	0,54	0,55	0,55
Kyrénia	1,17	19,95	32,83	0,528	0,80	0,77	0,79	0,77
Kyrénia	1,56	33,60	36,64	0,597	1,04	0,99	1,02	0,98
Kyrénia	1,93	47,56	38,66	0,646	1,25	1,20	1,24	1,18
					erreur relative moyenne :	0%	2%	0%

La conclusion est évidente : quoique de formes très différentes les formules de Normand et de la Sname⁴ conviennent très bien à des carènes antiques, pourtant elles mêmes variées.

II.7.7- rayon métacentrique transversal :

$$r = \left(0,008 + 0,0745 \left(\frac{A_W}{L \cdot B} \right)^3 \right) \frac{L \cdot B^3}{V} \quad (\text{Normand, 1870})$$

$$r = K \frac{B^3}{A_M} \quad \text{avec } K \approx 0,059 \quad (\text{Albaret, 1884})$$

Pour établir toutes les données il faut revenir à la relation $r = ZMT - ZC$ de la figure II.3 et puiser les valeurs de ZMT dans les tables hydrostatiques (annexes 1 et 2) en interpolant linéairement si nécessaire, d'où :

⁴ Society of Naval Architects and Marine Engineers (USA)

Navire	T	V	Aw	L	B	Am	Zc	Zmt	r	r	r
	en m	en m ³	en m ²	en m	en m	en m ²	en m	en m	exact	Normand	Albaret
Kyrénia	0,39	1,31	9,63	11,45	1,96	0,17	0,25	1,57	1,32	0,91	2,61
Kyrénia	0,78	8,46	25,30	13,09	3,26	1,07	0,56	2,35	1,79	1,26	1,91
Kyrénia	1,17	19,95	32,83	13,35	3,76	2,32	0,8	2,15	1,35	1,03	1,35
Kyrénia	1,56	33,60	36,64	13,58	4,04	3,76	1,04	2,07	1,03	0,80	1,03
Kyrénia	1,93	47,56	38,66	13,80	4,19	5,22	1,25	2,08	0,83	0,65	0,83
							erreur relative moyenne :			-23%	0%
JV n°9	0,13	0,46	5,09	6,02	1,09	0,07	0,07	0,88	0,81	0,72	1,09
JV n°9	0,26	1,25	6,79	6,49	1,34	0,21	0,15	0,75	0,60	0,54	0,68
JV n°9	0,40	2,26	7,63	6,85	1,47	0,40	0,24	0,69	0,45	0,39	0,47
JV n°9	0,53	3,29	8,26	7,12	1,54	0,59	0,31	0,68	0,37	0,31	0,37
JV n°9	0,66	4,40	8,69	7,39	1,6	0,78	0,38	0,69	0,31	0,26	0,31
							erreur relative moyenne :			-14%	2%

On constate que les formules ont des comportements nettement différents :

- celle de Normand sous-estime systématiquement, quelque soit la fraction de coque concernée;
- il semble que le déficit soit constant pour une forme de coque donnée;
- celle d'Albaret est aberrante pour un faible enfoncement mais devient très précise lorsqu'il dépasse 40% de la hauteur de la coque.

Aussi ai-je calculé les erreurs moyennes sur seulement les trois plus grands enfoncements. Je dois enfin préciser qu'Albaret proposait sa formule avec la valeur K # 0,076 pour les navires de son époque mais que j'ai adopté empiriquement la valeur 0,059 pour une meilleure adéquation aux carènes antiques étudiées.

II.7.8- surface mouillée :

$$\Sigma = 2.L.\sqrt{A_M} \quad (\text{Dupré, 1882})$$

$$\Sigma = \frac{V}{T} + 2T\left(2\frac{V}{A_M} - L\right) + 4T\sqrt{\left(L - \frac{V}{A_M}\right)^2 + \left(\frac{A_M}{2T}\right)^2} \quad (\text{Kirk, 1881})$$

$$\Sigma = \left(1,97 + 0,171\frac{B}{T}\right) \cdot \sqrt[3]{\frac{0,65}{C_{MS}}} \cdot \sqrt{V.L} \quad (\text{Gerritsma & al, 1993})$$

$$\Sigma = L.(2.T + B)\sqrt{C_{MS}} \cdot S_{CB} \quad (\text{Holtrop, 1988})$$

$$\text{avec } S_{CB} = 0,616.C_{23} + 0,111.C_{MS}^3 + 0,245\frac{C_{23}}{C_{MS}} + 0,00057.C_{\text{stern}}$$

$$\text{et } C_{23} = 0,453 + 0,443.C_B - 0,286.C_{MS} - 0,00347\frac{B}{T} + 0,37.C_{WP}$$

$$C_{\text{stern}} = 50$$

Pour cette dernière grandeur le choix est vaste et il convient justement d'évaluer la qualité de ces différentes formules d'estimation. Les données nécessaires ont pratiquement toutes été déjà utilisées, sauf celles de C_{WP} et C_B qui sont fournies là encore dans les annexes 3 et 4. L'ensemble des résultats est présenté dans le tableau ci-après. Qu'en ressort-il vis-à-vis des carènes de ces épaves ?

- la formule la plus précise et la plus stable est celle de Holtrop, au prix d'une part d'une grande complexité et d'autre part d'un ajustement personnel du coefficient C_{stern} , à la valeur 50, qui a pour rôle de traduire l'influence de la forme de l'arrière du navire dans la méthode proposée par cet auteur ;
- la formule de Kirk donne un résultat un peu moins bon, par excès elle, mais convient mal aux faibles enfoncements ;
- celle de Gerritsma se rachète sur ce point essentiellement ;
- la formule de Dupré malgré sa simplicité donne un résultat presque équivalent à la précédente mais convient, elle encore, moins bien pour les faibles enfoncements.

ESTIMATION DE LA SURFACE MOUILLEE

Navire	T	V	L	B	Am	Cms	Aw	Cwp	Cb	C23	Scb	S	S	S	S	S	
	en m	en m3	en m	en m	en m ²		en m ²					réelle	Dupré	Kirk	Gerritsma	Holtrop	
Kyrénia	0,39	1,31	11,45	1,96	0,2	0,229	9,6	0,430	0,098	0,584	1,014	17,48	9,44	12,30	15,51	15,22	
Kyrénia	0,78	8,46	13,09	3,26	1,1	0,421	25,3	0,594	0,202	0,643	0,807	36,84	27,07	31,40	32,65	33,01	
Kyrénia	1,17	19,95	13,35	3,76	2,3	0,528	32,8	0,655	0,290	0,678	0,778	49,97	40,67	48,77	44,07	46,02	
Kyrénia	1,56	33,60	13,58	4,04	3,8	0,597	36,6	0,668	0,347	0,691	0,762	61,13	52,68	64,88	53,03	57,23	
Kyrénia	1,93	47,56	13,80	4,19	5,2	0,646	38,7	0,669	0,386	0,696	0,751	71,25	63,07	79,40	60,11	67,11	
													erreur relative moyenne :	-15%	5%	-14%	-7%
JV n°9	0,13	0,46	6,02	1,09	0,1	0,491	5,1	0,775	0,351	0,726	0,851	6,26	3,19	5,69	6,21	4,85	
JV n°9	0,26	1,25	6,49	1,34	0,2	0,606	6,8	0,780	0,434	0,743	0,811	8,52	5,95	8,32	8,31	7,62	
JV n°9	0,40	2,26	6,85	1,47	0,4	0,676	7,6	0,759	0,478	0,739	0,786	10,75	8,66	11,30	10,10	10,05	
JV n°9	0,53	3,29	7,12	1,54	0,6	0,716	8,3	0,752	0,500	0,738	0,776	12,67	10,93	13,95	11,55	12,15	
JV n°9	0,66	4,40	7,39	1,60	0,8	0,744	8,7	0,738	0,512	0,732	0,766	14,56	13,05	16,68	13,00	14,25	
													erreur relative moyenne :	-14%	10%	-9%	-4%

L'erreur relative moyenne est calculée sur les 3 dernières valeurs.

La surface calculée par le logiciel intègre celle de l'appendice que constitue la quille, ce que ne peuvent prévoir les formules. D'où les écarts les plus importants quand l'enfoncement de la carène est faible.

LE CHARGEMENT DU NAVIRE

III.1- CENTRE DE GRAVITÉ DU NAVIRE

De même que nous avons pris en compte la forme de la carène pour déterminer le point d'application C de la poussée d'Archimède il nous faut maintenant étudier la répartition des différents poids à bord du navire et déterminer d'une part leur résultante qui définit le **déplacement** P du navire et d'autre part le **centre de gravité** G du navire qui est le point d'application de cette force.

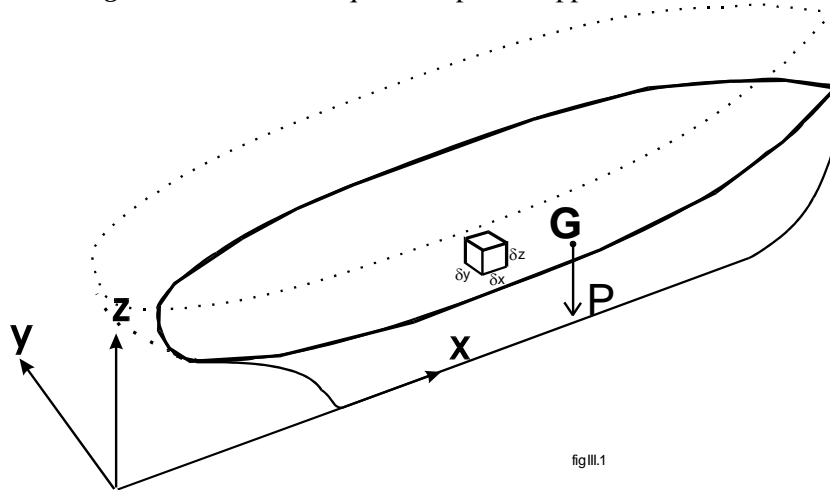


fig III.1

Le problème est abordé de la même façon que pour la carène mais il s'applique ici à l'ensemble du navire. On envisage un volume élémentaire δv rempli d'un matériau de poids spécifique ϖ (exprimé habituellement en t/m^3 et souvent désigné abusivement par le terme de densité), donc de poids $\varpi \cdot \delta v$, et on effectue les sommations pondérées :

$$P = \sum_{\text{navire}} \varpi \cdot \delta v = \sum_{\text{navire}} \varpi \cdot \delta x \cdot \delta y \cdot \delta z \quad X_G = \frac{1}{P} \sum_{\text{navire}} x \cdot \varpi \delta v \quad Y_G = \frac{1}{P} \sum_{\text{navire}} y \cdot \varpi \delta v \quad Z_G = \frac{1}{P} \sum_{\text{navire}} z \cdot \varpi \delta v$$

Dans la description de la structure du navire chaque partie considérée a un poids spécifique donné et est décrite par plusieurs sections transversales de surface variable avec l'abscisse de chaque section. On est donc ramené au calcul des formules du § II.3 et de façon pratique c'est le logiciel *Autohydro* qui calculera les volumes des différentes composantes des parties et les centres de volume correspondants. Il faut être bien conscient que cette approche spatialement détaillée est la seule qui puisse fournir avec précision les coordonnées du centre de chaque composante et finalement celles du centre de gravité du navire.

III.2- CALCUL DU DEVIS DE POIDS DU NAVIRE LÈGE

Lorsque qu'un navire est complètement armé, c'est-à-dire avec tous ses accessoires et son équipement complet, mais vide, autrement dit sans aucun approvisionnement à bord, ni équipage, ni marchandises, alors il est dit lège et son poids est le *déplacement lège*. Je restreindrai dans ce chapitre sa signification dans la mesure où les accessoires et équipement d'une épave antique sont rarement récupérés et connus. Le calcul du déplacement lège se fera donc en tenant seulement compte des éléments structuraux de la charpente du navire.

Tous ces éléments étant en bois nous avons besoin de connaître les densités (ou plus précisément les poids spécifiques) en kg/dm^3 (ou t/m^3) d'un certain nombre d'essences. Le bois est un matériau dont le poids spécifique est éminemment variable avec la quantité d'eau qu'il contient, c'est-à-dire son humidité relative. Ainsi le bois dit vert peut avoir un poids spécifique double de celui qu'il a à l'état sec, qui correspond à environ 15% d'humidité. De même les pièces de bois en contact avec l'eau (bordé et quille) ont une densité qui augmente approximativement de 10% avec le temps. A partir de diverses sources [Guitard, 1987 ; Rival, 1991; Steffy, 1994], présentant d'ailleurs certaines divergences entre elles mais dont l'ouvrage de M.Rival est remarquablement documenté, on peut dresser le tableau suivant de poids spécifique à l'état sec (en t/m^3 ou kg/dm^3) :

Nom scientifique	Nom commun		Poids spécifique
	français	anglais	
Abies alba	sapin	silver fir	0,46
Acer pseudo platanus	érable sycomore	alpine maple	0,66
Alnus glutinosa	aune glutineux		0,52
Alnus incana	aune blanc		0,52
Buxus sempervirens	buis		1,00
Carpinus betulus	charme		0,80
Castanea	chataignier		0,75
Cedrus libani	cèdre du Liban	cedar of Lebanon	0,56
Chamaecyparis lawsoniana		port orford cedar	0,43
Cupressus sp.	cyprès		0,45
Fagus sylvatica	hêtre	red beech	0,74
Fraxinus excelsior	frêne	ash	0,72
Juglans regia	noyer	walnut	0,72
Juniperus	genévrier		0,60
Juniperus virginiana		eastern red cedar	0,53
Larix decidua	mélèze		0,60
Larix occidentalis		western larch	0,44
Picea excelsa	epicéa	spruce	0,47
Pinus brutia		cyprus pine	0,58
Pinus halepensis	pin d'Alep	Aleppo pine	0,65
Pinus palustris		longleaf pine	0,66
Pinus pinaster	pin maritime		0,47
Pinus sylvestris	pin sylvestre		0,52
Pinus taeda		loblolly pine	0,47
Populus sp.	peuplier	quaking aspen	0,45
Pseudotsuga menziessi	pin d'Oregon	Douglas fir	0,55
Quercus alba	chêne blanc	american white oak	0,72
Quercus cerris	chêne de Turquie	Turkey oak	0,87

III.3

Quercus ilex	chêne vert		1,10
Quercus pedunculata	chêne robur		0,80
Quercus robur		european oak	0,72
Quercus sessiliflora	chêne rouvre		0,80
Quercus sp.		red oak	0,58
Quercus virginiana		live oak	0,75
Taxodium distichum	cyprès chauve	baldcypress	0,51
Ulmus campestris	orme champêtre		0,70
Ulmus hollandica		dutch elm	0,55
Ulmus procera		english elm	0,55

Pour illustrer la méthode exacte de calcul du déplacement je prendrai l'exemple de l'épave n°9 constituée par les matériaux suivants pour ses diverses parties :

Partie	Matériau	Poids spéc.
Bordé	pin d'Alep	0,65
Quille	chêne vert	1,10
Membrures	pin d'Alep	0,65

Le logiciel *Autohydro* fournit pour chaque composante : son volume et les coordonnées de son centre de volume. Pour augmenter la précision du calcul j'ai opéré sur une version de l'épave dans laquelle les trois dimensions sont dilatées d'un facteur 10 (annexe 7). A partir de là je détermine le devis de poids et les coordonnées du centre de gravité général du navire :

Composant	Volume (en dm3)	Densité	P en kg	X en m	Y en m	Z en m
Bordé Bd	77,731	0,65	50,53	4,000	0,404	0,302
Bordé Td	77,731	0,65	50,53	4,000	-0,404	0,302
Quille	67,641	1,10	74,41	4,000	0,000	0,162
membre Y AV	1,599	0,65	1,04	7,720	0,000	0,881
membre X AV	4,129	0,65	2,68	7,320	0,000	0,606
membre 1 AV	4,885	0,65	3,18	6,816	0,000	0,391
membre 2 AV	5,417	0,65	3,52	6,168	0,000	0,286
membre 3 AV	8,434	0,65	5,48	5,272	0,000	0,257
membre 4 AV	8,031	0,65	5,22	4,280	0,000	0,211
membre 4 AR	8,084	0,65	5,25	3,720	0,000	0,214
membre 3 AR	8,379	0,65	5,45	2,728	0,000	0,259
membre 2 AR	5,390	0,65	3,50	1,832	0,000	0,299
membre 1 AR	5,022	0,65	3,26	1,184	0,000	0,428
membre X AR	4,121	0,65	2,68	0,680	0,000	0,664
membre Y AR	1,536	0,65	1,00	0,280	0,000	0,955
Navire léger			217,7	4,00	0,00	0,26

à l'aide des formules suivantes, qui consistent toujours à faire simplement la moyenne pondérée :

$$P_i = \varpi_i \cdot V_i \quad P = \sum_{parties} P_i \quad X_G = \frac{1}{P} \sum_{parties} P_i \cdot X_i \quad Y_G = \frac{1}{P} \sum_{parties} P_i \cdot Y_i \quad Z_G = \frac{1}{P} \sum_{parties} P_i \cdot Z_i$$

On observera de petites différences de volume ou de position du centre pour certaines membrures à priori identiques et simplement translattées. Elles sont dues simplement aux écarts introduits lors de la phase de saisie des points définissant les sections transversales. Cette difficulté à décrire avec fidélité des éléments de petite taille ou de faible épaisseur, comme le bordé par exemple,

peut d'ailleurs fausser légèrement les résultats les concernant.

III.3- ESTIMATION DU DEVIS DE POIDS D'UNE COQUE

La méthode précédente est la plus complète et précise mais elle impose de décrire et de calculer pour chaque partie (quille, bordé, varangue, demi-couple, etc.) son volume et son centre ce qui devient rapidement extrêmement lourd lorsque la structure est imposante. La quille étant une poutre, souvent rectiligne ou circulaire par tronçons, peut être facilement traitée mais ce sont le bordé, par sa forme varié, et les membrures, par leurs formes et nombres, qui posent problème. C'est pourquoi je propose ici une méthode simple d'estimation du poids et, surtout, de la position verticale du centre de gravité.

Elle repose sur trois idées : l'assimilation d'une partie (bordé, membrures, vaigrage) à une couche uniforme d'épaisseur constante, la construction des volumes correspondants par extrusion (au sens infographique du terme c'est la translation d'une surface donnée suivant sa normale) et l'emploi des formules approchées vues au § II.6. Elle vise à fournir, à l'archéologue naval, un moyen rapide et malgré tout assez précis d'estimation du devis de poids de la coque. Les éléments géométriquement simples comme ponts, mât, vergue et cloisons sont ensuite combinés selon les formules du paragraphe précédent.

Pour les bordé et vaigrage l'épaisseur est fournie directement, par contre les membrures imposent de calculer d'abord l'épaisseur de la couche adjacente au bordé et fournissant le même volume. Soit à partir de leur espacement d , largeur l et hauteur h :

$$d.e = 2 \times \frac{1}{2} h.l \quad \text{d'où} \quad e = \frac{h.l}{d}$$

fig. III.2

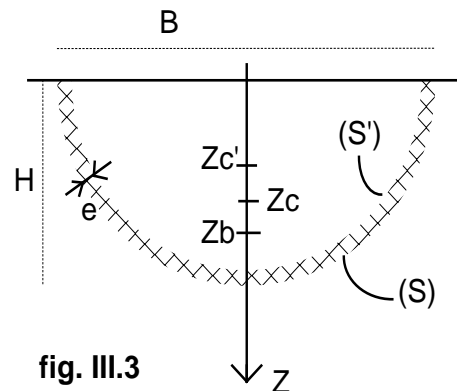
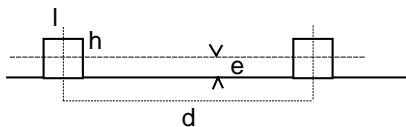


fig. III.3

Pour la suite de l'exposé je prends comme exemple le cas du bordé d'épaisseur e . Connaissant, à l'aide des formules du § II.7.8, la surface mouillée Σ de la coque lorsqu'elle est presque totalement enfoncée de sa hauteur H il est facile de déduire son volume $V = \Sigma.e$. Mais cela ne renseigne pas sur la position de son centre. Pour y parvenir j'envisage la coque rapportée à la base de la lisse de pavois et le bordé obtenu par extrusion au volume limité par la carène (S) de celui déduit de cette même carène en appliquant une affinité (de rapports x , y et z) sur chaque axe (longitudinal, transversal et vertical) entraînant un espace e entre ces deux surfaces. La "carène" incluse (S') est définie par les rapports :

$$x = \frac{L - 2.e}{L} \quad y = \frac{B - 2.e}{B} \quad z = \frac{H - e}{H}$$

à partir des dimensions extérieures L , B , H de la coque. Connaissant les aires A_M et A_W de celle-ci, les

formules de Normand (cf § II.7.4 et § II.7.6) donnent son volume V et la distance Z_C de son centre à la lisse de pavois :

$$V = 0,99 \frac{A_W \cdot A_M}{B} \quad Z_C = \frac{1}{3} \left(\frac{H}{2} + \frac{V}{A_W} \right)$$

La carène homothétique a pour caractéristiques géométriques (cf § II.7) :

$$V' = x \cdot y \cdot z \cdot V \quad Z'_C = z \cdot Z_C$$

et le bordé se déduisant par enlèvement de V' dans V , son volume et la cote de son centre sont :

$$V_{\text{bordé}} = V - V' \quad Z_{\text{bordé}} = \frac{Z_C \cdot V - Z'_C \cdot V'}{V_{\text{bordé}}}$$

Comme on le voit le calcul est finalement simple et rapide. Pour traiter le cas des membrures il suffit de reproduire le même raisonnement avec comme surface extérieure (S'), et procéder ainsi de proche en proche vers l'intérieur du navire. A titre d'illustration j'ai amorcé dans l'annexe 8 le calcul du poids de coque de l'épave de Kyrénia.

III.4- POIDS SPECIFIQUES DES MARCHANDISES

Les formules de sommation pondérée du § III.2 s'appliquent à toutes les parties d'un navire et en particulier à son chargement final. Lorsqu'il s'agit d'un nombre limité de marchandises on peut envisager de décrire chacune d'elles par son poids et les coordonnées de son centre de gravité mais si elles sont en très grand nombre cela devient pénible et irréaliste. C'est typiquement le cas d'un chargement de plusieurs milliers d'amphores identiques comme pour le navire de la Madrague de Giens.

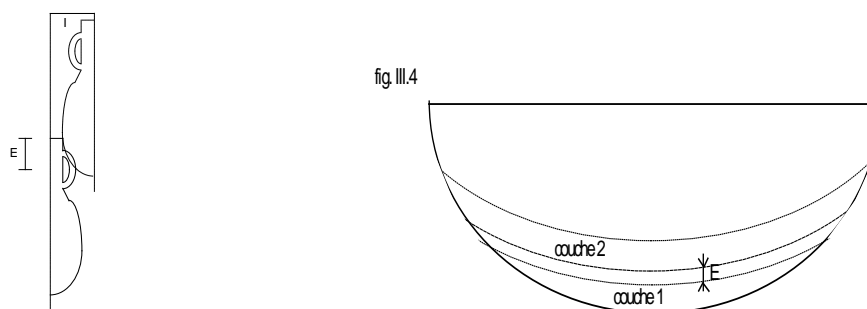
Il est alors plus judicieux d'envisager le volume total occupé par cette marchandise originale et de déterminer, en fonction du rangement de celle-ci, quelle est la densité moyenne obtenue (annexe 9). Si on envisage les deux dispositions classiques en carré et en quinconce [Tchernia, Pomey, Hesnard et al., 1978; Carre, 1988] la densité moyenne d est fonction du poids unitaire P , de la hauteur H et du diamètre D de l'amphore :

$$\text{en carré : } d = \frac{P}{D^2 \cdot H} \quad \text{en quinconce : } d = \frac{2 \cdot P}{\sqrt{3} \cdot D^2 \cdot H}$$

Comme en général il y a plusieurs couches superposées et emboîtées verticalement il faut aussi déterminer le décalage radial I entre les couches :

$$\text{en carré : } I = \frac{D}{\sqrt{2}} \quad \text{en quinconce : } I = \frac{D}{\sqrt{3}}$$

La forme précise de l'amphore permet alors de déterminer l'enfoncement E par emboîtement tangent. Le devis de poids d'un tel chargement se fera alors en définissant dans la structure du navire une composante par couche et en les faisant se pénétrer verticalement sur la hauteur E :



Par la suite tous les chargements en volume, de ce type, seront définis par leur poids spécifique, par exemples :

Amphore	Hauteur en m	Diamètre en m	Poids en kg	Rangement	Poids spéc. en kg/m ³
Dressel 1 B de vin	1,16	0,32	50	carré	421
Dressel 1 B de vin	1,16	0,32	50	quinconce	486
Dressel 2/4 de vin	0,92	0,32	43	carré	456
Dressel 2/4 de vin	0,92	0,32	43	quinconce	527
Dolium de vin	2,00	1,60	2250	quinconce	507
.....

Ces valeurs s'entendent donc pour une couche de hauteur H, celle des amphores. Si le creux du navire permet d'envisager l'empilement de n couches identiques de poids spécifique ϖ avec une interpénétration E entre elles alors la hauteur occupée est n.H-(n-1).E et, en raisonnant sur un cylindre vertical, le poids spécifique réel ϖ' de l'empilement des couches serait :

$$\varpi' = \varpi \frac{n \cdot H}{n \cdot H - (n - 1) \cdot E}$$

Soit dans le cas du navire de la Madrague de Giens rempli de Dressel 1B rangées principalement en quinconce et empilées en 3 couches s'emboîtant de 0,25 m :

$$\varpi' = 486 \frac{3 \times 1,16}{3 \times 1,16 - 2 \times 0,25} = 568 \text{ kg/m}^3$$

Ce résultat est à rapprocher de celui de P.Pomey qui a constaté que 300 amphores occupent un volume de 3,2 m x 2,81 m x 2,98 m, d'où un poids spécifique de 559 kg/m³. Les deux approches coïncident donc à moins de 2 %.

De façon générale, pour effectuer le devis de poids du navire chargé il est souhaitable de décrire chaque cargaison par son poids spécifique. Le transport maritime a développé lui une approche plutôt volumique, et anglo-saxonne, du problème sous l'angle du *coefficient d'encombrement* d'une marchandise (stowage factor) qui est le nombre n de pied-cubes qu'occupe une long-ton (2240 lbs) de cette marchandise. Un ouvrage classique sur ce sujet est celui de [Thomas, 1942] qui fournit de nombreuses valeurs, desquelles on peut déduire le poids spécifique pratique des marchandises :

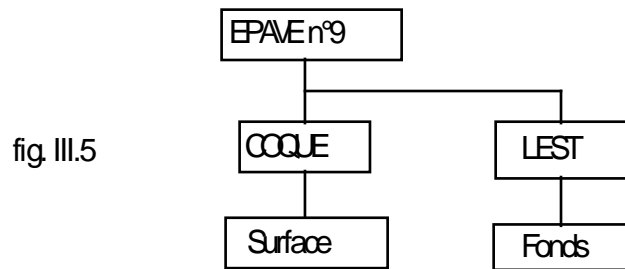
$$\varpi = \frac{1 \text{ long ton}}{n \times \text{ft}^3} = \frac{1015 \text{ kg}}{n \times (0,305 \text{ m})^3} = \frac{35774}{n} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En liaison avec une autre source [Hütte, 1926], cela me permet de dresser un tableau correspondant à des marchandises transportées, ou embarquées à bord des navires, dans l'Antiquité [Casson, 1971] :

Matière	Coef. encombr.	Poids spéc. kg/m3
amandes en sac	73	490
argile, gravier sec		1800
basalte entassé		3200
blé en sac	47	761
blé en vrac	52	688
bois de conifère en bûches		330
bois de hêtre en buches		400
chaux pulvérulante		500
chêne en buche		420
cheval de cavalerie		174
cuivre gris		4800
éléphant		177
granit entassé		2700
ivoire (défenses)	30	1192
laine de mouton		1320
lentilles		778
marbre en bloc		2385
moellons de pierre calcaire	18	1987
mortier (chaux et sable)		1750
ocre		3500
pin en bûches		320
plomb		11300
poivre blanc en sac	75	477
poivre gris en sac	83	431
sable		1400
sel marin (gros)		745
soldat		44
trass (pouzzolane)		950

III.5- EXEMPLE D'APPLICATION

L'épave n°9 de la place Jules Verne est celle d'un bateau trop petit pour être rempli d'amphores et il n'était d'ailleurs pas dévolu à ce transport mais plutôt à la pêche à en juger par les restes de corail trouvés incrustés. Compte tenu de sa taille je le supposerai armé par six hommes, de poids $P_H = 70$ kg et 1,70 m de haut. En les considérant debout et surélevés par les fonds du bateau cela situe leur centre de gravité vers $Z_{Gh} = 1,05$ m. Partant de ces conditions nous verrons plus loin qu'il sera nécessaire de lester ce bateau, comme le navire léger est connu on peut simplifier la structure du navire en supprimant toutes les parties qui définissaient la charpente, en leur substituant un poids égal au déplacement $P_0 = 218$ kg du navire léger et localisé en son centre de gravité G_0 ($Z_{G_0} = 0,26$ m), et en ajoutant une partie jouant le rôle de lest dans les fonds:



Cette composante FONDS est définie, tout naturellement, comme la partie interne et inférieure de la coque sur une hauteur a priori limitée au tiers du creux et remplie de pierre calcaire de densité moyenne $1,99 \text{ t/m}^3$. L'annexe 10 fournit, pour différents niveaux de remplissage de ces fonds, le poids de lest P_L et son centre de gravité Z_{G_L} d'où ensuite le déplacement final P et le centre de gravité général G :

$$P = P_0 + P_L + 6 \cdot P_H \quad Z_G = \frac{P_0 \cdot Z_{G_0} + P_L \cdot Z_{G_L} + 6P_H \cdot Z_{G_H}}{P}$$

soit finalement :

niveau en m	frac. remplie	NAVIRE LEGE		LEST		6 HOMMES		NAVIRE CHARGE	
		Po en t	ZGo en m	PL en t	ZGL en m	6.Ph en t	ZGh en m	P en t	ZG en m
0,00	0%	0,218	0,26	0	0,000	0,42	1,05	0,638	0,780
0,03	5%	0,218	0,26	0,08	0,017	0,42	1,05	0,718	0,695
0,04	10%	0,218	0,26	0,16	0,026	0,42	1,05	0,798	0,629
0,07	20%	0,218	0,26	0,33	0,042	0,42	1,05	0,968	0,528
0,09	30%	0,218	0,26	0,49	0,054	0,42	1,05	1,128	0,465
0,11	40%	0,218	0,26	0,66	0,065	0,42	1,05	1,298	0,416
0,13	50%	0,218	0,26	0,82	0,076	0,42	1,05	1,458	0,384
0,14	60%	0,218	0,26	0,98	0,086	0,42	1,05	1,618	0,360
0,16	70%	0,218	0,26	1,15	0,095	0,42	1,05	1,788	0,339
0,17	80%	0,218	0,26	1,31	0,103	0,42	1,05	1,948	0,325
0,19	90%	0,218	0,26	1,48	0,112	0,42	1,05	2,118	0,313
0,19	95%	0,218	0,26	1,56	0,116	0,42	1,05	2,198	0,309
0,20	98%	0,218	0,26	1,61	0,119	0,42	1,05	2,248	0,307
	100%	0,218	0,26	1,64	0,120	0,42	1,05	2,278	0,305

III.6- ESTIMATION DU PORT EN LOURD

En résumé, le calcul du devis de poids du navire chargé se fera en utilisant les données des différents tableaux de poids spécifiques pour chacun des compartiments qui constituent le navire et en effectuant les sommations pondérées du § III.2. Le poids obtenu constitue le *déplacement en charge* du navire et la différence avec son déplacement lège définit son *port en lourd*. Pour estimer cette quantité il est d'usage de calculer son tonnage par la formule traditionnelle du XVIIe s. (cf § II.7.5) puis de considérer que seuls les 3/4 de ces tonneaux sont effectivement occupés par le poids équivalent des 4 barriques bordelaises d'origine (2000 livres) soit 979 kg.

En définitive cela signifie que l'on adopte un poids spécifique moyen de $3/4 \times 979 / 1,44 \text{ kg/m}^3$, soit 510 kg/m^3 . On voit donc apparaître la deuxième source d'erreur de ce procédé d'estimation :

l'inadéquation de cette valeur conventionnelle au poids spécifique réel de la marchandise transportée. Les seuls exemples d'amphores du tableau vu plus haut, ou du blé, montrent que l'erreur peut dépasser 30%. En conclusion je considère qu'il faut commencer par estimer correctement le déplacement lège (c'est le but de l'exposé des méthodes des § III.3 et III.2 qui offrent différents compromis entre rapidité et précision) puis raisonner systématiquement sur le déplacement en charge qui découle du volume de carène, pour lequel le § II.7.4 fournit une bonne méthode d'approximation. Si on ne dispose pas encore du plan des formes il ne reste plus qu'à adopter une valeur pour le coefficient de remplissage parallélépipédique en choisissant dans les navires précédemment étudiés celui dont la forme se rapproche le plus de celle du navire objet de la recherche.

LA STABILITÉ TRANSVERSALE DU NAVIRE

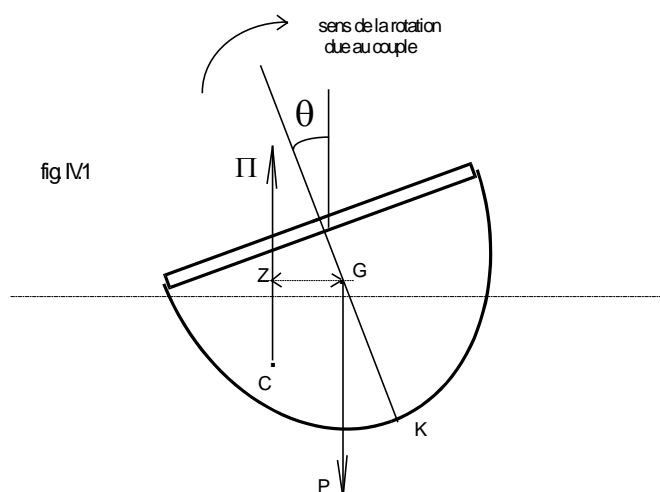
IV.1- LA MISE EN ÉQUILIBRE DU NAVIRE

A l'issue du chargement du navire on connaît donc son poids P et la position de son centre de gravité G . Lorsque qu'il est mis à l'eau il s'enfonce et déplace progressivement un volume V croissant jusqu'à ce que la poussée d'Archimède Π résultante soit égale au déplacement P . C'est la première condition qui définit l'équilibre en flottaison du navire.

Mais la position dans laquelle le navire va flotter n'est pas quelconque. La poussée Π est appliquée au centre du volume d'eau déplacé c'est-à-dire au centre C de la carène définie par la *gîte* θ . Mécaniquement l'ensemble des forces P et Π constitue ce que l'on appelle un *couple* caractérisé par (fig. IV.1) :

- une *résultante* nulle : $R = P - \Pi = 0$
- un *moment résultant* : $M(\theta) = P.GZ(\theta)$

la distance GZ , variable avec l'inclinaison θ , entre les droites supports des deux forces, verticales et opposées, définit le *bras de levier* du couple et quantifie la tendance du navire à pivoter sur lui-même sous l'effet de ce couple de forces :



Le navire est définitivement en équilibre lorsque cette tendance est inexistante c'est à dire lorsque les droites supports de P et Π sont confondues c'est-à-dire lorsque G et C sont sur la même verticale. C'est la deuxième condition d'équilibre du navire et elle définit l'orientation finale, dans l'espace, du navire.

Sur l'exemple de la figure IV.1 où le centre de gravité est dans le plan de symétrie du navire cela impose que C s'y retrouve aussi et donc que le navire flotte droit (fig. IV.3 partie gauche). De façon pratique le logiciel *Autohydro* se charge d'effectuer numériquement la mise en équilibre et détermine finalement :

- le tirant d'eau T (baseline draft);
- la gîte transversale (heel);
- l'assiette longitudinale (trim).

il fournit aussi d'autres informations¹ comme :

- la longueur L à la flottaison (LWL);
- la largeur B à la flottaison (BWL);
- les coefficients caractéristiques de cette carène;
- la position du centre de carène C (buoyancy centroid);
- la position du centre de dérive CD (under water lateral plane centroid)

Appliqué au cas de chargement défini par l'épave Jules Verne n°9 sans lest et armé par six hommes, placés symétriquement à l'avant, au milieu et à l'arrière, cela donne les résultats détaillés de l'annexe 11 qui sont rassemblés partiellement ci-dessous :

$P = 0,64$ t	gîte nulle	assiette nulle	$T = 0,16$ m
$V = 0,624$ m ³	$L = 6,133$ m	$B = 1,182$ m	
$C_{MS} = 0,522$	$C_{WP} = 0,773$	$\Sigma = 6,888$ m ²	$A_w = 5,603$ m ²
$X_C = 4,00$ m	$Z_C = 0,093$ m	$Z_{CD} = 0,051$ m	

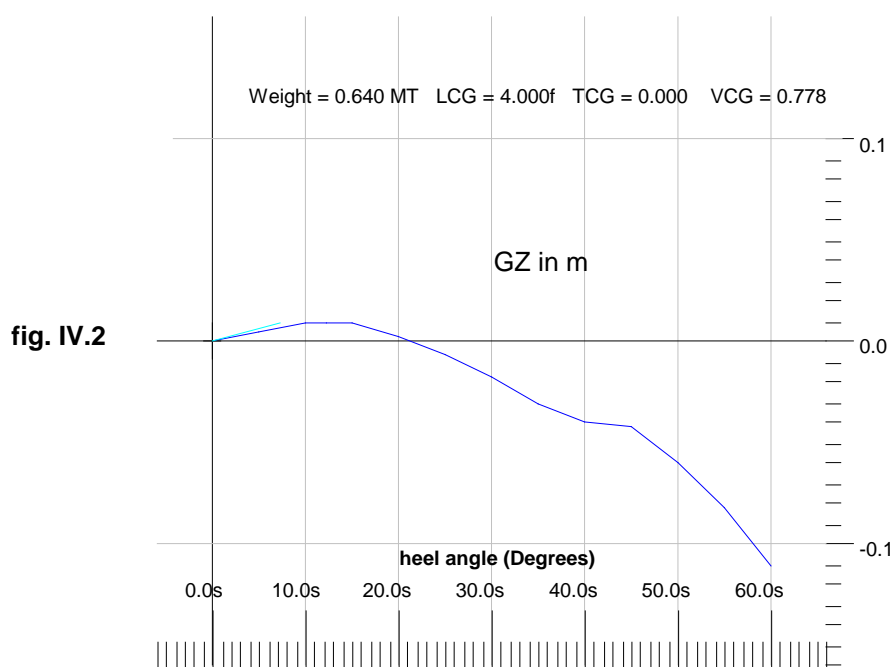
IV.2- COURBE DES BRAS DE LEVIER DE REDRESSEMENT

Tout ce qui a été présenté est valable pour n'importe quel axe d'inclinaison du navire. Dans la pratique ce sont essentiellement les inclinaisons dans le plan transversal qui sont les plus importantes, du fait de la forme allongée du navire, et elles peuvent être dues à des causes variées: dissymétrie latérale du chargement, action du vent sur la voilure, traction sur une aussière, etc.

Nous allons donc approfondir l'étude d'une gîte β (symbole adopté par la suite pour cette direction d'inclinaison). La figure IV.1 correspond d'ailleurs à une vue du navire dans le plan transversal. Lorsque le chargement du navire est achevé et connu le déplacement et la position du centre de gravité G sont fixés. Pour ce déplacement, la carène et son centre C sont déterminés complètement quel que soit l'angle d'inclinaison (cf § II.3). Et on peut donc calculer l'écart transversal GZ entre la verticale passant par G et celle passant par C pour différentes valeurs de l'inclinaison β en gîte, c'est à dire autour de l'axe longitudinal. L'ensemble des résultats obtenus fournit alors la *courbe des bras de levier de redressement relative au déplacement donné (en volume V et centre C) et à la position donnée du centre de gravité G du navire.*

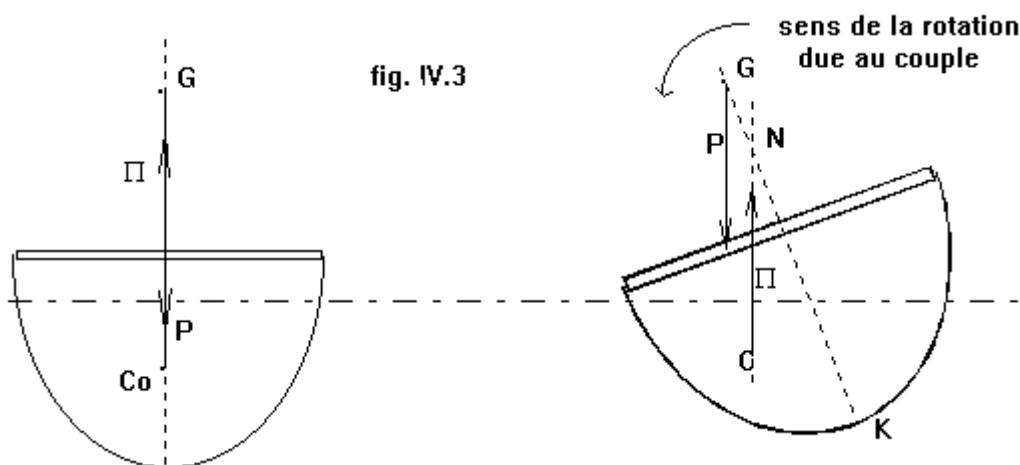
En poursuivant l'exploitation du cas de chargement défini plus haut avec le logiciel *Autohydro* cela donne la courbe $GZ(\beta)$ suivante (valeurs dans l'annexe 6) où la gîte est exprimée en ° (avec l'indice s pour *starboard* i.e tribord) et GZ en m :

¹Déjà rencontrées et utilisées au chapitre II.



IV.3- STABILITÉ DE L'ÉQUILIBRE

Nous avons vu que le navire est en équilibre dans une position lorsque son centre de gravité G est sur la même verticale que le centre de carène C . Mais cette condition ne suffit pas à garantir la stabilité de l'équilibre. Considérons en effet la figure suivante :



Dans celle-ci le navire flotte initialement droit car la condition d'équilibre est satisfaite. Si on l'incline sur un bord la carène se déforme et son centre C se déplace du côté de l'inclinaison. Le système des deux forces, déplacement P et poussée Π , constitue toujours un couple et son moment résultant tend à faire pivoter dans le sens indiqué sur la figure. C'est à dire dans le sens de l'inclinaison ! Cette dernière augmente donc jusqu'à retournement complet du navire. Le couple est un couple de chavirement.

Cette évolution de la situation du navire est due au fait que le centre de gravité G se situe au dessus du point N qui est l'intersection de la direction de la poussée Π (la normale actuelle à la courbe (C)) avec

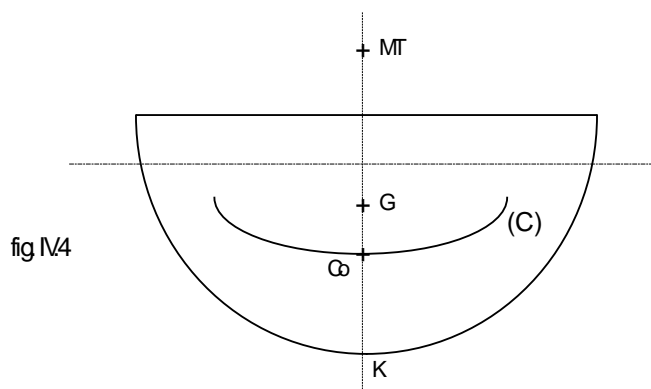
l'axe de symétrie du dessin (la normale à la courbe (C) dans la position droite). Par comparaison la figure IV.1 décrit la situation inverse où G étant assez bas le couple a bien un effet de redressement.

La forme d'un navire étant figée et donc ses caractéristiques hydrostatiques il s'en suit que même si on embarque un chargement dont le poids est compensé par la poussée due au volume d'eau déplacé par la carène la répartition de celui-ci ne peut être quelconque en hauteur. Le problème se pose en particulier pour l'épave étudiée car on constate qu'à partir de 20° de gîte le bras de levier devient négatif c'est-à-dire que le couple est de renversement et non plus de redressement. Il faut donc abaisser le centre de gravité du navire en lestant les fonds et la question qui se pose alors est de savoir où l'amener et donc de combien lester.

Dans la pratique courante on s'intéresse surtout à la *stabilité initiale*² c'est à dire pour de faibles inclinaisons autour de la position initiale qui en général est droite. Dans ce cas le point N converge vers la position limite de l'intersection de deux normales très voisines de la courbe (C) c'est à dire vers la centre de courbure de cette courbe. Ce point est appelé *métacentre transversal* dans le contexte de la théorie du navire (cf § II.4) et noté MT. Celui qui nous intéresse est le métacentre relatif à la position droite et dont la cote Z_{MT} a été déterminée pour plusieurs valeurs du déplacement au § II.6 (annexe 1). La condition de stabilité de l'équilibre est finalement :

$$Z_{MT} > Z_G$$

ou si on note a la distance du centre de gravité au dessus du centre de carène Co en position droite et r le rayon métacentrique transversal : $r - a > 0$



²Il existe une autre partie de la théorie du navire qui traite des inclinaisons transversales qu'un navire peut prendre dans un mouvement sous l'effet de causes physiques brutales (rafale de vent, coup de roulis, etc). Ces problèmes concernent alors la stabilité dynamique qui sort du propos de ce mémoire.

IV.4- LESTAGE DE L'ÉPAVE JULES VERNE n°9

Pour le cas de chargement étudié cette condition est bien vérifiée car on a d'après tous les calculs précédents :

$$P = 0,64 \text{ t} \quad Z_G = 0,78 \text{ m} \quad T = 0,16 \text{ m} \quad Z_{MT} = 0,86 \text{ m} \quad r - a = 0,08 \text{ m}$$

mais la faible valeur de $r-a$ entraîne que cette stabilité disparaît après 20° de gîte et nous allons déterminer le lest à embarquer dans les fonds pour fournir à ce bateau une réserve de stabilité suffisante sur plusieurs dizaines de degrés d'inclinaison. Pour cela rassemblons les valeurs de Z_G d'une part (§ III.5) et celles de Z_{MT} d'autre part (annexe 1)³ pour en déduire celles de la *distance métacentrique initiale* $GMT = Z_{MT} - Z_G$ du tableau ci-après (annexe 11). On constate que cette distance augmente bien avec le poids de lest :

frac.	LEST		NAVIRE CHARGE			DISTANCE	
	PL en t	ZGL en m	P en t	ZG en m	T en m	ZMT en m	GMT en m
0%	0	0,000	0,638	0,780	0,160	0,860	0,08
5%	0,08	0,017	0,718	0,695	0,173	0,847	0,15
10%	0,16	0,026	0,798	0,629	0,187	0,831	0,20
20%	0,33	0,042	0,968	0,528	0,214	0,797	0,27
30%	0,49	0,054	1,128	0,465	0,238	0,770	0,31
40%	0,66	0,065	1,298	0,416	0,263	0,752	0,34
50%	0,82	0,076	1,458	0,384	0,285	0,742	0,36
60%	0,98	0,086	1,618	0,360	0,308	0,732	0,37
70%	1,15	0,095	1,788	0,339	0,330	0,716	0,38
80%	1,31	0,103	1,948	0,325	0,352	0,704	0,38
90%	1,48	0,112	2,118	0,313	0,374	0,694	0,38
95%	1,56	0,116	2,198	0,309	0,385	0,689	0,38
98%	1,61	0,119	2,248	0,307	0,392	0,687	0,38
100%	1,64	0,120	2,278	0,305	0,396	0,680	0,38

Pour aider l'archéologue naval à adopter un niveau de lestage réaliste je signalerai que dans le transport maritime contemporain la réglementation internationale impose plusieurs critères, pour assurer la stabilité d'un navire, dont une valeur minimale pour cette distance métacentrique initiale :

- 0,15 m pour un navire de charge en général ;
- 0,30 m pour un navire transportant du grain en vrac.

L'existence de la deuxième valeur tient au fait qu'un tas de grain est un matériau fluide pouvant basculer sur un bord dans un coup de roulis et perturber fortement la position d'équilibre du navire, voir engager sa sécurité. Cette contrainte avait certainement été perçue par les marins navigant au service de l'annonce même si l'essentiel du transport se faisait en sac⁴. Le capitaine d'un navire ne recherche pas pour autant un lest maximal car d'une part cela réduit le poids de la marchandise embarquée et d'autre part cela entraînera un couple de redressement très important se traduisant par une période de roulis courte et de brutales accélérations en rotation, autour de l'axe longitudinal, qui peuvent provoquer un désarrimage de la cargaison et une fatigue de la structure du navire (et de son équipage !). Dans la pratique des grands voiliers

³en interpolant dans cette table selon le tirant d'eau T.

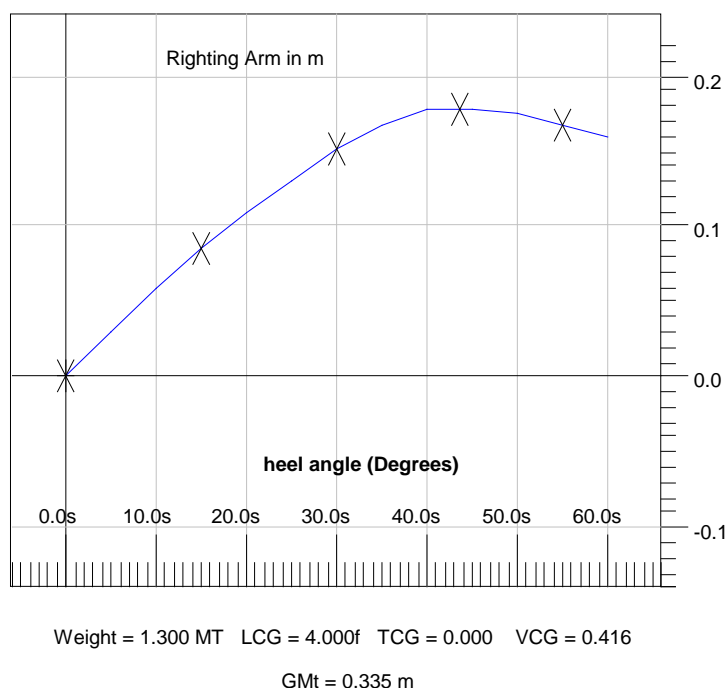
⁴L.Casson, op. cit.

de commerce du XIXe s. la distance métacentrique initiale était couramment de 0,6 m à 1 m, pouvant atteindre 2 m [Bataille, 1911; Bichon, 1950].

En ce qui concerne l'épave n°9, son équipage est appelé à gesticuler pour réaliser sa pêche et en même temps il faut conserver de la place à bord et ne pas trop enfoncer le bateau ce qui le freinerait. J'adopte donc comme compromis, pour la suite de son étude, une valeur de 0,34 m correspondant à 40% des fonds définis et se traduisant par :

- un déplacement de 1,3 t dont la moitié en lest;
- une couche de pierre au fond du bateau de 11 cm d'épaisseur;
- un tirant d'eau de 0,26 m.

cela aboutit à la courbe suivante :



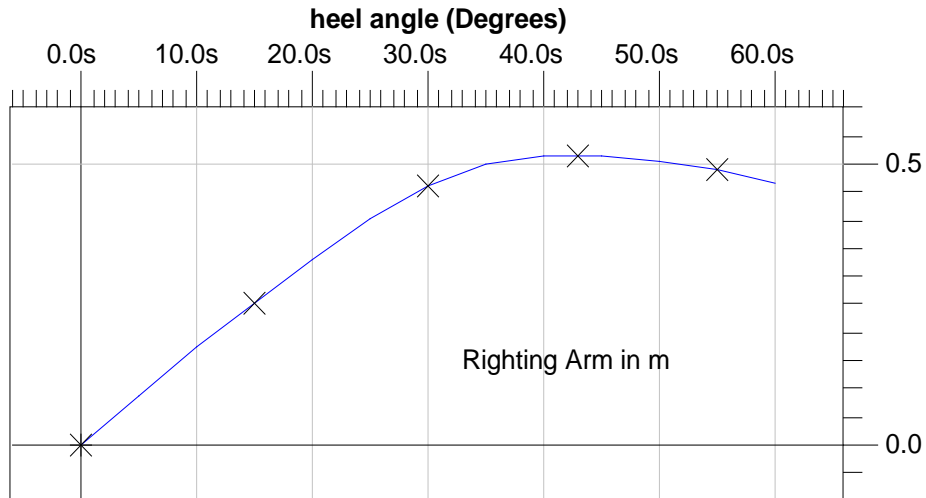
IV.5- LE CAS DE KYRENIA II

Il ne m'a pas été possible de disposer des résultats des calculs hydrostatiques menés à l'HIPNT ou à l'INA et les renseignements dont j'ai eu connaissance sont :

- poids de coque environ 8 t ;
- déplacement en charge voisin de 15 t pendant une partie des voyages et sensiblement supérieur par la suite ;
- excès de stabilité pendant la navigation.

En me reportant à la table hydrostatique (annexe 2) je traduis l'information sur le déplacement par un tirant d'eau voisin de 1,05 m auquel correspond un déplacement de 16,5 t et une hauteur du métacentre transversal voisine de 2,2 m. Pour la distance métacentrique initiale une valeur de 1 m me paraît correspondre aux renseignements et cela entraîne une hauteur du centre de gravité $Z_G = 1,2$ m. A partir de ces données *Autohydro* construit la table et la courbe des bras de levier de redressement (annexe 12) :

IV.7



Weight = 16.500 MT LCG = 0.037a TCG = 0.000 VCG = 1.200

GMt = 1.002 m

Disposant de cette courbe il est alors facile de déterminer la gîte produite par une cause physique qui crée un moment inclinant M_I variable, en général, avec l'angle de gîte. Le navire s'incline sous son effet et dès lors apparaît le couple de redressement M_R antagoniste. L'équilibre s'établit pour une gîte β telle que :

$$M_I(\beta) = M_R(\beta) \quad \text{avec} \quad M_R(\beta) = P \cdot GZ(\beta)$$

la résolution de cette équation se faisant graphiquement ou numériquement (cf § VIII.2).

DEUXIÈME PARTIE

DYNAMIQUE DU NAVIRE

LA RÉSISTANCE HYDRODYNAMIQUE EN EAU CALME

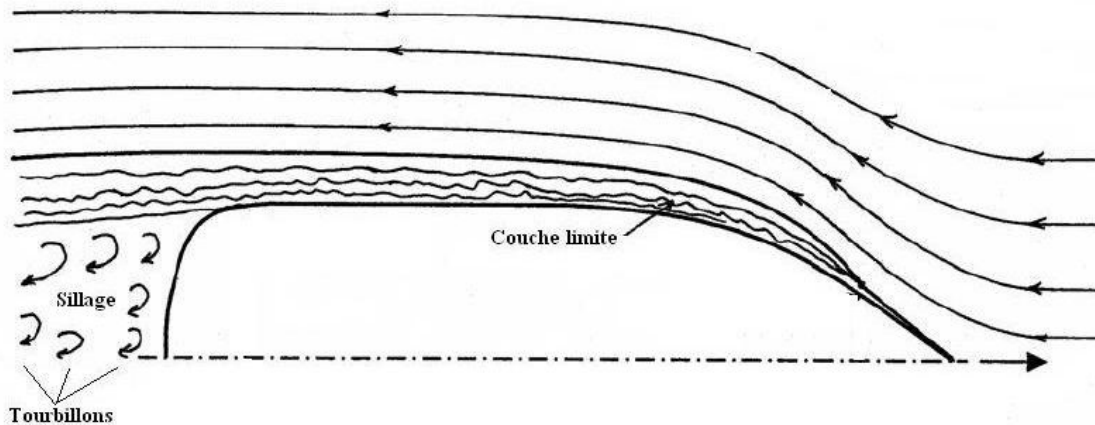
L'objet de ce chapitre est limité à l'étude de la résistance rencontrée lors de la propulsion rectiligne uniforme et normale du navire en eau calme sans mouvement de plate-forme¹.

La propulsion par remorquage permet de définir sans ambiguïté la composante longitudinale des forces hydrodynamiques résultant de la réaction de l'eau sur la carène liée à la vitesse de translation V .

V.1- LA RÉSISTANCE DE REMORQUAGE

L'expérience courante montre que le remorquage à vitesse uniforme V d'un corps flottant en eau calme nécessite l'application sur la remorque d'une force horizontale car l'eau oppose en retour une résistance horizontale R à l'avancement du flotteur.

L'observation du flotteur en cours de remorquage montre en outre l'apparition autour de ce flotteur :



- d'une ***couche limite*** à fort gradient de vitesse entre les parois latérales (auxquelles elle adhère) et l'eau calme environnante qui révèle l'existence de frottements importants dans cette couche limite. La dissipation correspondante d'énergie engendre une résistance de frottement R_f .
- d'un ***sillage tourbillonnaire***, ou remous, à l'arrière, auquel correspond une résistance de remous R_m . Ces remous deviennent d'ailleurs pratiquement inexistantes si le flotteur est bien profilé, comme c'est le cas pour une carène de navire et s'il ne comporte pas d'appendice.
- d'un ***champ de vagues*** d'accompagnement se propageant, sans modification de forme, à la vitesse du flotteur et auquel correspond une résistance de vague R_v (voir la fig. V.2).

En définitive :

$$R = R_f + R_m + R_v$$

¹ L'exposé tente d'introduire avec assez de précision et sans trop de complexité mathématique les phénomènes physiques mis en jeu et les équations qui les modélisent. Pour une approche plus détaillée voir en particulier [Isin].

V.2- L'ORIGINE DE LA RÉSISTANCE HYDRODYNAMIQUE

La résistance est due à trois causes physiques :

1) l'eau, comme toute matière, oppose une inertie à sa mise en mouvement. Elle est caractérisée par sa masse volumique ρ (pour l'eau salée $1,025 \text{ kg/m}^3$).

2) l'eau est visqueuse, c'est à dire que les couches de fluide de vitesses différentes frottent entre elles. Le coefficient de frottement est appelé la *viscosité dynamique* μ et définit à son tour la *viscosité cinématique* $\nu = \mu/\rho$. Bien que celle-ci soit relativement faible ($1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) le frottement est sensible dans les zones à fort gradient de vitesse comme la couche limite.

3) la translation du flotteur perturbe la surface libre de l'eau dont l'équilibre est conditionné par la pesanteur, d'accélération g ($9,81 \text{ m/s}^2$).

On peut donc écrire que pour un navire : $R = f(\rho, \nu, g, V)$

Pour tenter d'explicitier cette fonction f il est nécessaire de recourir à l'hydrodynamique navale, mais cette opération extrêmement complexe n'est pas indispensable. Une méthode traditionnelle, largement utilisée et consistant à effectuer des essais sur petits modèles permet, en effet, de déterminer R avec une bonne approximation sans développements mathématiques importants.

V.3- MESURE ET CALCUL DE LA RÉSISTANCE

La carène du navire est supposée définie par sa longueur à la flottaison L au sein d'un ensemble de carènes similaires caractérisé par les valeurs de coefficients géométriques (rapport largeur/longueur, coefficient prismatique, etc.) traduisant chacun un aspect de la forme de la carène. La résistance de l'une de ces carènes semblables est donc :

$$R = \Phi(\rho, \nu, g, V, L)$$

En physique un système cohérent d'unités définit un ensemble restreint de grandeurs indépendantes, dites fondamentales, par exemple pour le domaine de la mécanique : la masse M , la longueur L et le temps T . Toute autre grandeur s'exprime alors comme une composition de la forme $M^\alpha L^\beta T^\gamma$. Par exemple la force, produit de la masse par l'accélération, a la dimension MLT^{-2} . L'*analyse dimensionnelle* est une méthode purement mathématique (et non physique) de raisonnement sur les dimensions physiques des grandeurs reliées entre elles par une formule et sur la forme possible de cette formule. Appliquée à la formule précédente elle aboutit à la conclusion que :

$$\frac{R}{\rho \cdot g \cdot L^3} = F\left(\frac{V \cdot L}{\nu}, \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}}\right)$$

Sous cette nouvelle forme cela exprime que la résistance R , homogène à une force comme le dénominateur² $\rho \cdot g \cdot L^3$, n'est finalement fonction que de deux grandeurs sans dimension physique :

² Exprimé avec les grandeurs du problème. ρ (homogène à ML^{-3}), g (à LT^{-2}) et L^3 donnent bien MLT^{-2} .

$$\text{Re} = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad \text{liée à la viscosité et nommée nombre de Reynolds}$$

$$\text{Fr} = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \quad \text{liée à la pesanteur et nommée nombre de Froude}$$

D'un point de vue pratique elle implique que sans connaître F il est possible de déterminer la résistance de remorquage R à la vitesse V d'un navire de longueur L en procédant à l'essai d'un petit modèle géométriquement semblable de longueur L' remorqué à la vitesse V' à la condition que dans les deux cas les nombres de Reynolds et de Froude aient conservé la même valeur. On dit alors qu'il y a *similitude mécanique* entre les deux expériences.

Une analyse statistique par régression [Holtrop & Mennen, 1982] faite sur les mesures effectuées en bassin d'essais de carènes et sur des navires réels, concernant des carènes de différentes formes, a élaboré, pour chacune des formes de résistance distinguées plus haut, des expressions numériques quantifiant à la fois les causes physiques des phénomènes et l'influence des formes de la carène. Ce sont les résultats très synthétiques de cette puissante étude que je mets en oeuvre systématiquement dans la suite du chapitre et j'utiliserai aussi ses notations particulières .

V.4- LA RÉSISTANCE DE FROTTEMENT

Le calcul de cette résistance, comme des autres d'ailleurs, va être fait pour une carène donnée du navire correspondant à un chargement particulier dont l'étude hydrostatique a permis de déterminer le tirant d'eau moyen T, le volume W⁴, la longueur à la flottaison L, la largeur à la flottaison B, la surface mouillée Σ et le coefficient de remplissage de la section maîtresse C_{MS}⁵.

Une résistance de frottement R_F, correspondant à celle d'une plaque plane parallèle à l'écoulement, de longueur L et de surface Σ, est d'abord calculée par une formule empirique définie par l'International Towing Tank Conference de 1957 :

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

$$C_F = \frac{0,075}{(\log_{10}(\text{Re}) - 2)^2} \quad \text{est le coefficient de frottement}$$

Σ en m² V en m/s R_F en Newton

Cette résistance de frottement est ensuite corrigée de l'influence de la forme réelle de la carène. Pour cela on introduit un coefficient c₁₂ :

³La suite du chapitre a un aspect inévitablement très mathématique mais l'archéologue naval y trouvera exposées les causes physiques de la résistance hydrodynamique et la démarche à suivre pour estimer rationnellement, plus loin, la vitesse que peut avoir un navire antique.

⁴C'est le symbole que l'on adopte souvent pour éviter les confusions avec la vitesse V.

⁵Il constitue donc une donnée fondamentale à calculer au préalable (cf § II.6 et § II.7).

$$\begin{cases} c_{12} = \left(\frac{T}{L}\right)^{0,2228446} & \text{si } \frac{T}{L} > 0,05 \\ c_{12} = 48,20 \cdot \left(\frac{T}{L} - 0,02\right)^{2,078} + 0,479948 & \text{si } 0,02 < \frac{T}{L} < 0,05 \\ c_{12} = 0,479948 & \text{si } \frac{T}{L} < 0,02 \end{cases}$$

Le centre de carène C est repéré par sa distance lcb par rapport au milieu de la flottaison. Cette distance est comptée positivement vers l'avant et exprimée en pourcentage de L . La **longueur des sorties** L_R définit la distance longitudinale qui va de la section maîtresse à l'extrémité arrière de la flottaison :

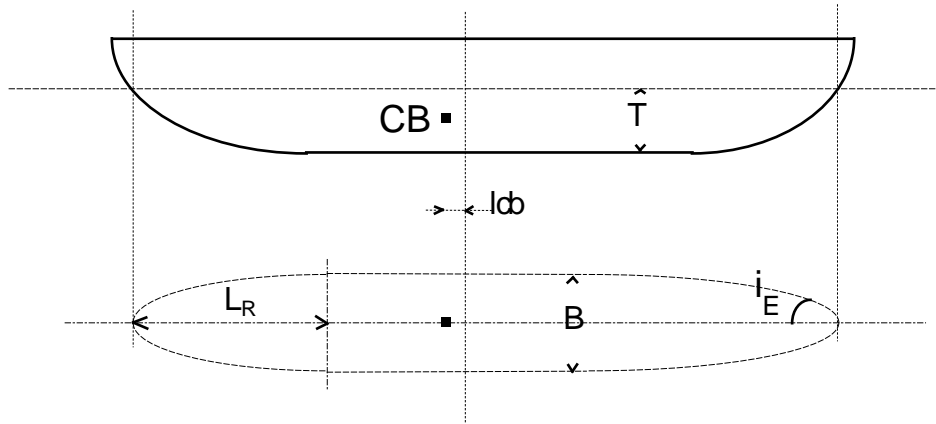


fig. V.1

On calcule ensuite les coefficients :

$$\text{coefficient bloc } C_B = \frac{W}{L \cdot B \cdot T} \quad \text{coefficient prismatique } C_P = \frac{C_B}{C_{MS}}$$

On définit alors un **facteur de forme** de la coque⁶ :

$$1 + k_1 = 0,93 + c_{12} \left(\frac{B}{L_R}\right)^{0,92497} \cdot (0,95 - C_P)^{-0,521448} \cdot (1 - C_P + 0,0225 \cdot lcb)^{0,6906}$$

La résistance de frottement de la coque est finalement :

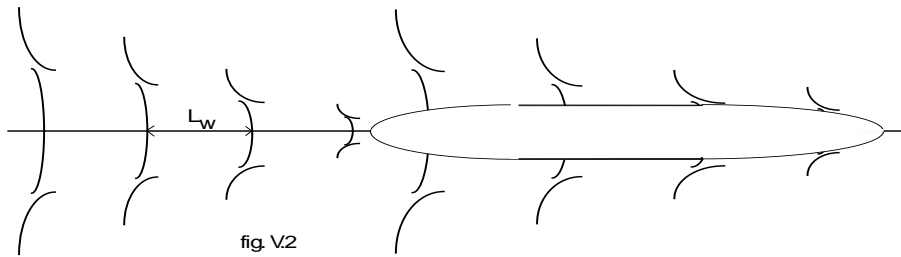
$$R_l = R_F \cdot (1 + k_1)$$

V.5- LA RÉSISTANCE DE VAGUES

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

⁶Traduisant comme son nom l'indique que la coque, par sa forme, a une résistance de frottement qui ne dépend pas seulement de sa surface mouillée Σ .

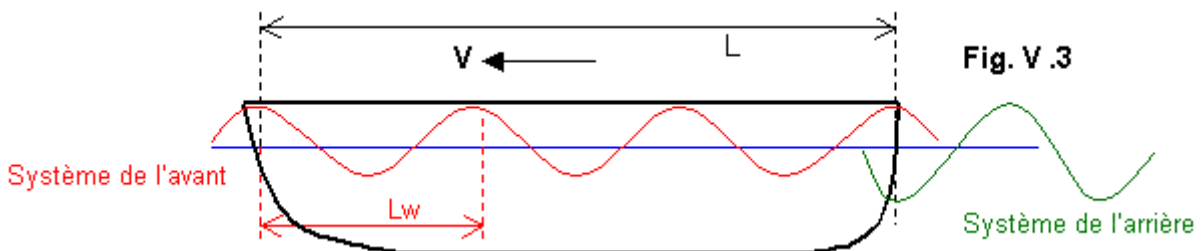
Ce champ de vagues comprend deux ensembles partant l'un de l'avant et l'autre de l'arrière du navire et constitués chacun d'un système de vagues *transversales* par rapport au navire et d'un système de vagues *divergentes* dont les lignes de crêtes démarrent à peu près tangentiellement à la vitesse de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



L'entretien des champs de vagues précédents nécessite une dépense d'énergie à laquelle correspond la *résistance de vagues* de la carène. Les systèmes de vagues transversales ont $L_w = 2\pi/g \cdot V^2$ comme longueur d'onde, qui est donc variable avec la vitesse du navire.

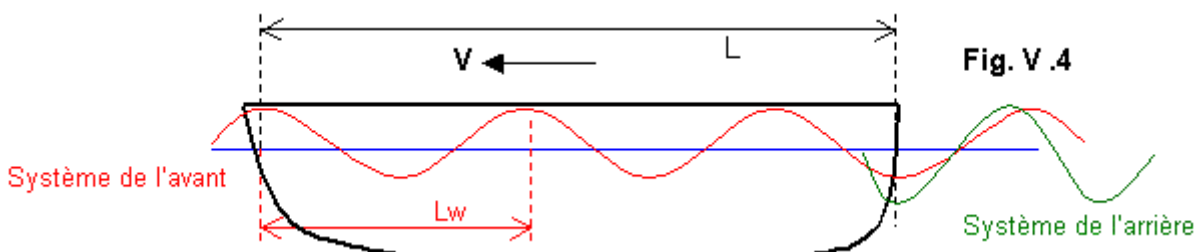
Le système de l'avant commence par une crête et lorsqu'il atteint l'arrière il interfère avec celui qui y naît et qui commence par un creux, et c'est leur combinaison que l'on observe à l'arrière.

L'onde résultante à l'arrière présente une hauteur significative seulement quand une crête du système de l'avant se superpose au creux initial :



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

Quand la vitesse est telle que la longueur de la coque vaut $1/2, 3/2, 5/2, \dots$ la longueur d'onde L_w , le creux de la poupe est accentué par le creux du système de l'avant et le creux résultant aboutit à une dépression qui ne corrige plus la résistance sur l'étrave :



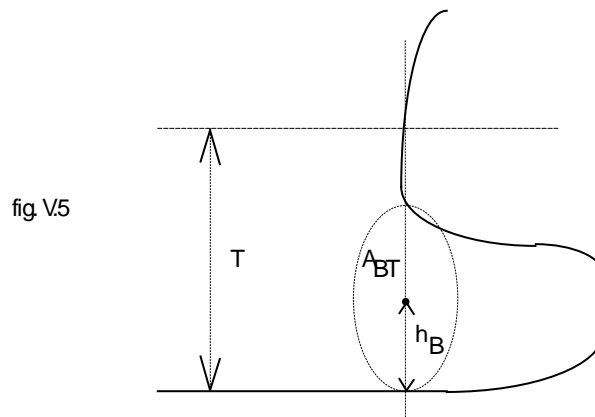
En résumé cette résistance de vagues varie avec la vitesse du navire en passant par une succession de maximum et de minimum.

La méthode d'estimation⁷ procède en calculant plusieurs coefficients intermédiaires avant de déterminer la résistance de vagues. Elle utilise i_E le demi-angle d'entrée, de la coque, au niveau de la flottaison (fig. V.1) :

$$\begin{cases} c_7 = 0,229577 \left(\frac{B}{L}\right)^{0,33333} & \text{si } \frac{B}{L} < 0,11 \\ c_7 = \frac{B}{L} & \text{si } 0,11 < \frac{B}{L} < 0,25 \\ c_7 = 0,5 - 0,0625 \frac{L}{B} & \text{si } \frac{B}{L} > 0,25 \end{cases}$$

$$c_1 = 2223105 \cdot c_7^{3,78613} \left(\frac{T}{B}\right)^{1,07961} \cdot (90 - i_E)^{-1,37565}$$

La méthode, qui est prévue pour traiter finement les carènes modernes, prend naturellement en compte la présence d'un bulbe d'étrave. Lorsque celui-ci est partiellement émergé il fonctionne de façon assez similaire au taille-mer de certains navires antiques⁸ comme l'illustre l'iconographie [Basch, 1987]. Le bulbe est caractérisé par sa section transversale au niveau de l'extrémité avant de la flottaison : son aire est A_{BT} et son centre est à la hauteur h_B au dessus de la quille.



Son influence sur la résistance de vague est déterminée par les coefficients :

$$c_3 = \frac{0,56 \cdot A_{BT}^{1,5}}{B \cdot T (0,31 \sqrt{A_{BT}} + T - h_B)} \quad c_2 = e^{-1,89 \sqrt{c_3}}$$

La suite de la méthode utilise le nombre de Froude Fr basé sur la longueur à la flottaison L et définit des variables intermédiaires :

$$\begin{cases} \lambda = 1,446 \cdot Cp - 0,03 \frac{L}{B} & \text{si } \frac{L}{B} < 12 \\ \lambda = 1,446 \cdot Cp - 0,36 & \text{si } \frac{L}{B} > 12 \end{cases}$$

⁷J.Holtrop et G.G.J.Mennen, op. cit.

⁸Ceux de la Madrague de Giens, du portique des Corporations à Ostie ou l'Isis par exemples.

$$\begin{cases} c_{16} = 8,07981.Cp - 13,8673.Cp^2 + 6,984388.Cp^3 & \text{si } Cp < 0,8 \\ c_{16} = 1,73014 - 0,7067.Cp & \text{si } Cp > 0,8 \end{cases}$$

$$\begin{cases} c_{15} = -1,69385 & \text{si } \frac{L^3}{W} < 512 \\ c_{15} = -1,69385 + \frac{\frac{L}{W} - 8,0}{2,36} & \text{si } 512 < \frac{L^3}{W} < 1727 \\ c_{15} = 0 & \text{si } \frac{L^3}{W} > 1727 \end{cases}$$

$$m_1 = 0,0140407 \frac{L}{T} - 1,75254 \frac{W^{\frac{1}{3}}}{L} - 4,79323 \frac{B}{L} - c_{16}$$

$$m_2 = c_{15} \cdot Cp^2 \cdot e^{-0,1.Fr^{-2}}$$

Finalement la résistance de vague est donnée par :

$$R_v = c_1 \cdot c_2 \cdot W \cdot \rho \cdot g \cdot e^{m_1.Fr^{-0,9} + m_2 \cdot \cos(\lambda.Fr^{-2})}$$

V.6- LA RÉSISTANCE DE PRESSION

C'est elle qui se manifeste à l'arrière dans les sillage ou remous mais elle agit aussi à l'avant. En particulier l'existence d'un bulbe produit une résistance additionnelle due à sa présence près de la surface. Une mesure de son émergence est fournie par le paramètre :

$$P_B = \frac{0,56 \cdot \sqrt{A_{BT}}}{T - 1,5 \cdot h_B}$$

et le nombre de Froude basé sur cette immersion est :

$$Fr_i = \frac{V}{\sqrt{g(T - h_B - 0,25\sqrt{A_{BT}}) + 0,15V^2}}$$

d'où la résistance additionnelle :

$$R_B = \frac{0,11 \cdot e^{-3P_B^{-2}} \cdot Fr_i^3 \cdot A_{BT}^{1,5} \cdot \rho \cdot g}{1 + Fr_i^2}$$

V.7- LA RÉSISTANCE DE CORRÉLATION MODÈLE-NAVIRE

La méthode introduit, comme toutes les méthodes de prédiction basées sur des essais en bassin, un coefficient de corrélation *bassin-mer*. Celui-ci est supposé décrire principalement la rugosité de la carène et la résistance aérodynamique en l'absence de vent.

Elle définit les coefficients :

$$\begin{cases} c_4 = \frac{T}{L} & \text{si } \frac{T}{L} \leq 0,04 \\ c_4 = 0,04 & \text{si } \frac{T}{L} > 0,04 \end{cases}$$

et

$$C_A = 0,006(L + 100)^{-0,16} - 0,00205 + 0,003 \sqrt{\frac{L}{7,5}} \cdot C_b^4 \cdot c_2 (0,04 - c_4)$$

Cette dernière expression a été établie en supposant une *rugosité moyenne* k_s de 150 μm et pour une plus grande valeur il faut l'augmenter de :

$$\delta C_A = \frac{0,105 k_s^{1/3} - 0,005579}{L^{1/3}}$$

La résistance de corrélation est alors donnée par :

$$R_A = \frac{1}{2} C_A \cdot \rho \cdot \Sigma \cdot V^2$$

V.8- APPLICATION À L'ÉPAVE n°9 DE LA PLACE JULES VERNE

Je la considère dans l'état de chargement final défini au § IV.4 (annexe 11) :

$$\begin{aligned} P &= 1,3 \text{ t} & \rho &= 1,025 \text{ kg/m}^3 & W &= 1,268 \text{ m}^3 & T &= 0,263 \text{ m} \\ L &= 6,502 \text{ m} & B &= 1,345 \text{ m} & lcb &= 0\% & \Sigma &= 8,564 \text{ m}^2 \\ C_{MS} &= 0,608 \end{aligned}$$

La lecture du plan des formes donne pour la flottaison définie par ce tirant d'eau T :

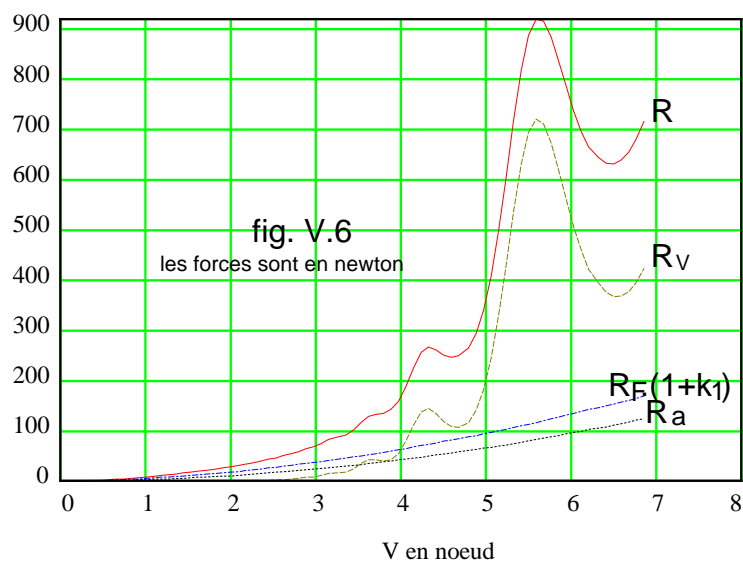
$$i_E = 44^\circ \quad L_R = 3,2 \text{ m}$$

Le bordé étant en bois sa rugosité moyenne est $k_s = 0,5 \text{ mm}$ d'après [Gutelle, 1979], et s'il est recouvert de bernacles on adopterait plutôt $k_s = 5 \text{ mm}$. Ce que je ne ferai pas considérant que ce bateau est assez petit pour être facilement tiré à terre et sa coque correctement entretenue.

En conclusion la résistance hydrodynamique totale que le navire subit en eau calme est :

$$R = R_F(1 + k_1) + R_V + R_B + R_A$$

Elle est calculée pour toute la plage de vitesse correspondant au fonctionnement en déplacement pur de cette carène. Les calculs détaillés sont mis en annexe 13 et les résultats sont les suivants :



On constate que la méthode de prédiction rend bien compte du fait que la résistance de frottement est prépondérante aux basses vitesses puis que c'est la résistance de vagues qui devient majoritaire. De même ses fluctuations caractéristiques avec la vitesse sont mises en évidence.

V.9- APPLICATION À KYRENIA II

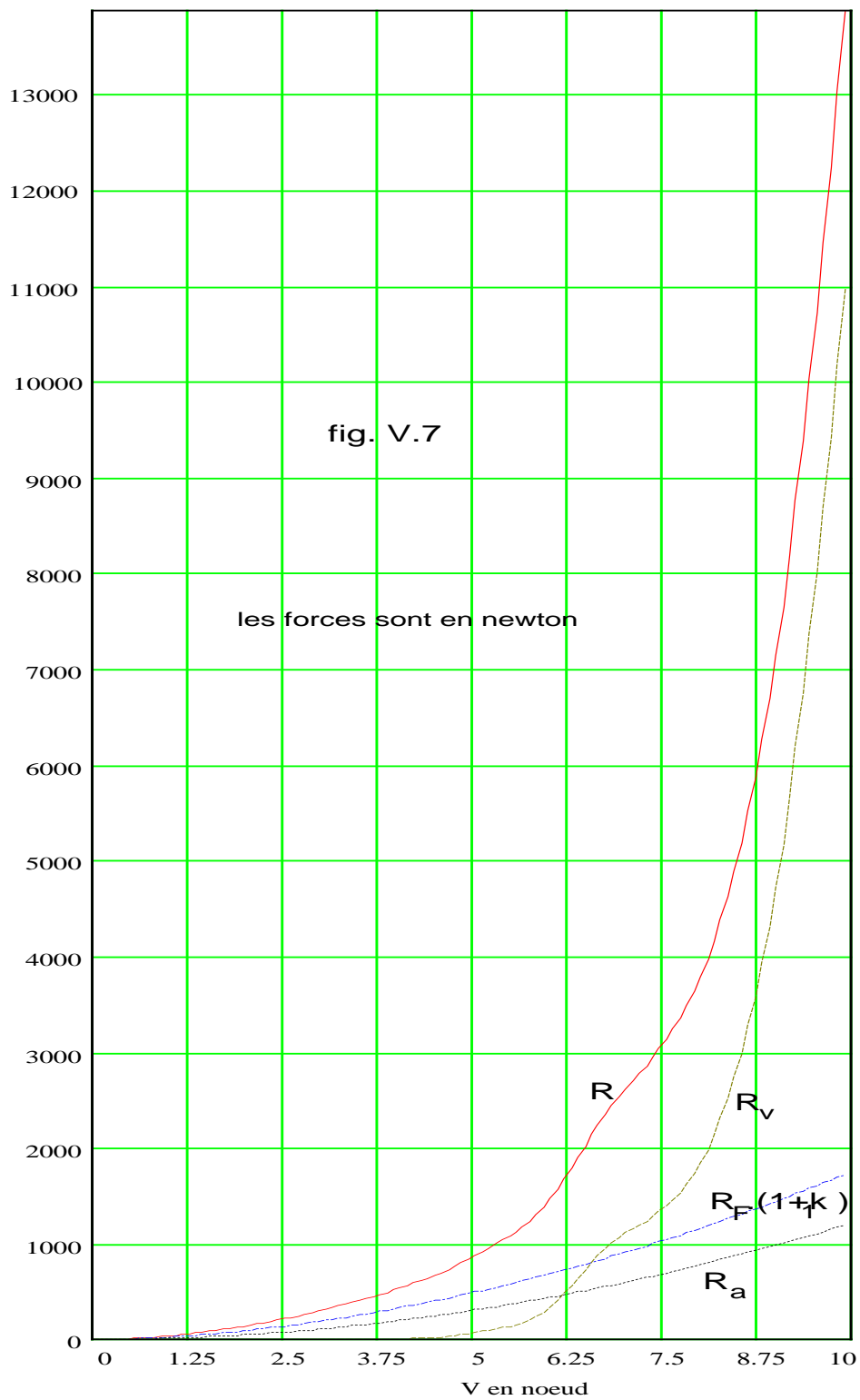
Pour la réplique le chargement admis au § IV.5 se traduit par (annexe 12) :

$$\begin{aligned}
 P &= 16,5 \text{ t} & \rho &= 1,025 \text{ kg/m}^3 & W &= 16,101 \text{ m}^3 & T &= 1,049 \text{ m} \\
 L &= 13,279 \text{ m} & B &= 3,643 \text{ m} & lcb &= 0\% & \Sigma &= 46,275 \text{ m}^2 \\
 C_{MS} &= 0,499
 \end{aligned}$$

et là encore la lecture des lignes d'eau sur le plan des formes donne pour cette flottaison :

$$i_E = 35^\circ \quad L_R = 6,62 \text{ m}$$

Si la réplique avait été, comme l'épave d'origine, recouverte d'un doublage au plomb il faudrait adopter pour sa rugosité $k_s = 0,15 \text{ mm}$. Mais comme il n'en est rien et que la réplique a sans doute été entretenue je conserve la valeur $k_s = 0,5 \text{ mm}$. Les calculs des résistances étant menés conformément à la méthode de Holtrop et Mennen on obtient les courbes suivantes (annexe 14) :



Pour ce plus grand navire, la résistance atteinte en limite de la plage d'estimation entraîne une échelle du graphique qui masque les fluctuations de la résistance de vagues mais les grandeurs relatives des différentes résistances sont toujours aussi évidentes.

LA PROPULSION A L'AVIRON

VI.1- INTRODUCTION

Les vestiges de l'épave n°9 ne contiennent pas de massif d'emplanture et la fraction conservée du bordé est trop basse pour présenter les traces d'un système de nage. Il y a bien une petite marque sur une varangue qui puisse faire envisager l'existence d'un léger gréement mais devant cette incertitude j'ai choisi d'approfondir ici l'éventualité de l'emploi des avirons par l'équipage de cette grande barque de pêche.

VI.2- GÉNÉRALITÉS

Il existe différents modes de propulsion pour un navire. La *propulsion par le vent* à l'aide de voiles grâce auxquelles le navire prend appui sur l'air est décrite en détails dans le chapitre suivant. Lorsque le navire assure sa propulsion de façon autonome au moyen de son équipage ou de son appareil moteur on parle d'*autopropulsion*.

Une solution¹ pour celle-ci est la *propulsion mécanique* qui consiste à imprimer une vitesse supplémentaire u à une partie de l'eau entourant le navire afin d'engendrer une poussée T de sens opposée à u . Il peut alors s'agir de propulsion par avirons, roues à aubes, hélice, etc.

VI.3- FONCTIONNEMENT DE L'AVIRON

La pelle de l'aviron décrit par rapport au navire la trajectoire verticale indiquée sur la figure suivante² :

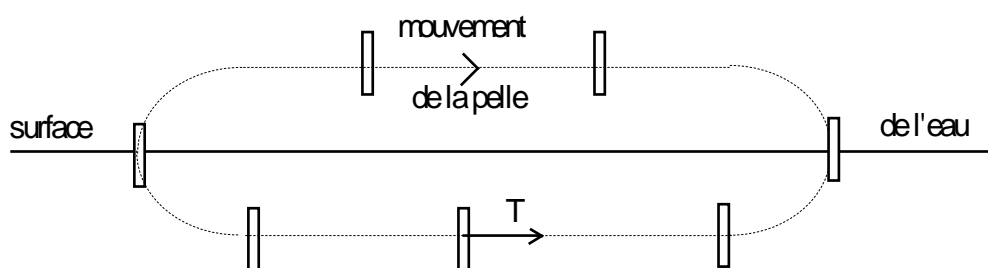


fig. VI.1

Et pendant ce mouvement le liquide exerce une force normale sur sa face avant. L'aviron pivotant autour de son point de fixation, la dame de nage, cette force T peut à chaque instant se décomposer (fig IV.2) en :

- une force longitudinale;
- une force transversale.

¹Les autres pouvant être par exemples l'appui sur une perche ou le touage sur un câble.

²Pour simplifier je n'ai pas représenté ici le petit mouvement de rotation de la pelle qu'imprime le rameur dans la partie aérienne de la trajectoire.

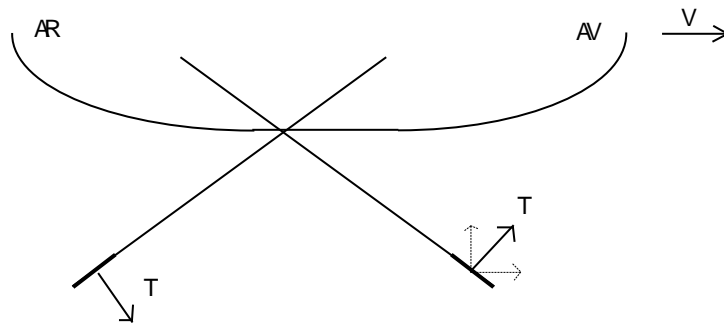


fig V.2

La première force produit la propulsion, la deuxième provient de l'inclinaison de la pelle relativement à l'axe longitudinal du navire et change de sens dans l'intervalle d'un même coup d'aviron et ses effets sont insensibles.

La force propulsive est discontinue car elle n'existe que pendant la moitié de la trajectoire de la pelle et variable en intensité au cours au cours de ce tronçon. Sa valeur moyenne sur un cycle est donc difficile à quantifier et pour déterminer son effet propulsif il vaut mieux adopter une approche énergétique.

Ce système de propulsion convertit la puissance musculaire de l'équipage en puissance mécanique qui vainc toutes les résistances que subit le navire. Comme tout système il est caractérisé par son **rendement** η :

$$\eta = \frac{P_{\text{mécanique}}}{P_{\text{musculaire}}}$$

En principe c'est une analyse mécanique fine et complexe qui permet de calculer le **rendement théorique**. Une telle étude a été faite par Shaw et ses résultats, rappelés dans [Coates, 1994], donnent un rendement variable avec la vitesse entre 0,18 (à 1 noeud) et 0,72 (à 6 noeuds). Dans la pratique on observe un **rendement réel** lié aux facteurs physiques ou sources de déperdition d'énergie négligés dans le raisonnement théorique. Pour fixer les idées, et ne disposant pas actuellement d'autre sources, j'ai utilisé l'expérience acquise sur un système mécaniquement très voisin, celui des roues à aubes, pour lequel [Saunders, 1957] indique un rendement réel :

$$\eta = 0,45$$

VI.4- INFLUENCE DE L'ETAT DE LA COQUE

La résistance hydrodynamique en eau calme, calculée au chapitre précédent, n'est pas la seule que rencontre le navire. L'état de propreté de la carène sur laquelle des salissures (algues et coquillages) se développent rapidement surtout en eau relativement chaude, peut entraîner un accroissement de la résistance de remorquage pouvant atteindre 0,5% par semaine de séjour à flot d'après [Devauchelle, 1986].

L'influence de l'état de la coque³ sur cette résistance est exprimée par un coefficient de **correction pour la salissure** dont la valeur va dépendre entre autre de l'intervalle entre deux carénages. De nos jours et pour une carène revêtue d'un antifouling conventionnel on adopte $C_{\text{salissure}} = 0,13$ lorsqu'elle est à mi-

³Déjà vue sous l'angle de la rugosité au § V.7.

distance de deux carénages [Faury, Castetz et Enault, 1983]. Ayant déjà fait l'hypothèse que la taille de ce bateau permettait un bon entretien je conserve $C_{\text{salissure}} = 0$.

VI.5- INFLUENCE DE L'ÉTAT DE LA MER

Au large l'agitation de la mer dépend uniquement du régime des vents. Dans la zone où souffle le vent, la mer se couvre d'abord de petites rides résultant de l'action des forces de viscosité. ces rides se transforment progressivement en petites vagues de hauteur croissantes qui se propagent dans la direction générale du vent si celui-ci est régulier.

Les particules liquides de surface décrivent, chacune, une trajectoire orbitale située dans un plan vertical parallèle à la direction du vent et déjà décrite à propos de la houle régulière. Au départ le rayon $H/2$ de l'orbite est faible tandis que la vitesse angulaire ω des particules sur leur orbite est élevée.

Progressivement le mouvement d'agitation s'étend en profondeur, le creux H des vagues va croissant et ω diminue. La mer est dite *en formation* et est irrégulière. Au delà d'une durée suffisante d'un vent continu, l'agitation de la mer atteint un certain équilibre limite. On dit alors que *la mer est formée*.

L'agitation, régulière, de la mer au large est finalement fonction, entre autre, de la vitesse du vent qui peut être exprimée en force B selon l'échelle Beaufort (cf § VII.5). Le choc des vagues sur le navire produit des mouvements de plate-forme dont l'amplitude dépend de la taille du navire. Finalement la résistance de remorquage est augmentée dans un facteur C_{mer} fonction du déplacement D (en tonnes)⁴ :

$$C_{\text{mer}} = \frac{k' + k'' \cdot \ln(D)}{100} \quad \text{où}$$

$$k' = -0,0441 \cdot B^3 + 2,716 \cdot B^2 - 0,3719 \cdot B + 4,775$$

$$k'' = 0,00596 \cdot B^3 - 0,2244 \cdot B^2 + 0,01886 \cdot B - 0,3732$$

VI.6- RÉGIME D'ÉQUILIBRE

En résumé, pour chaque vitesse V , la résistance hydrodynamique R_{hydro} subie par le navire dans des conditions réelles de navigation est, si R désigne la résistance de remorquage en eau calme :

$$R_{\text{hydro}}(V) = R(V) \cdot (1 + C_{\text{salissure}} + C_{\text{mer}})$$

Il lui correspond la puissance P_{hydro} absorbée à cette vitesse :

$$P_{\text{hydro}}(V) = V \cdot R_{\text{hydro}}(V)$$

Cette puissance dissipée est compensée par la puissance musculaire fournie par l'équipage et partiellement convertie par le système de propulsion à aviron. La vitesse d'équilibre atteinte est finalement donnée par l'équation :

$$P_{\text{hydro}}(V) = \eta \cdot P_{\text{musculaire}}$$

⁴F.Faury, A.Castetz et J.E.Enault, op. cit.

VI.7- UNE ÉTUDE DE CAS

Considérons un vent de force 3 et l'épave toujours chargée à 1,3 tonne, il s'en suit une correction pour l'état de la mer (annexe 15) :

$$C_{\text{mer}} = 0,263$$

J'envisage que l'équipage, constitué de 6 hommes et dont le poids est inclus dans le déplacement total de 1,3 tonne (cf § IV.4), fournit individuellement :

- une puissance maximale de 230 W;
- une puissance minimale de 80 W.

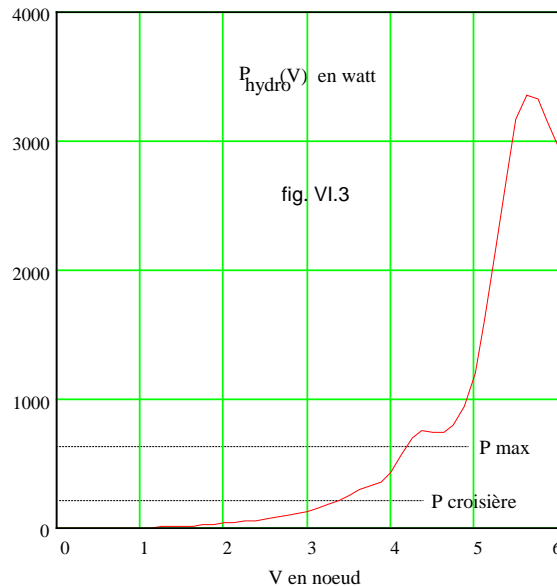
Ces valeurs ont été déterminées par une expérience personnelle sur un rameur ergométrique. La première correspond à la puissance que l'on peut dépenser pendant plusieurs minutes et utilisable par exemple au cours d'un combat naval. La seconde définit la puissance soutenable pendant des heures en allure de croisière. Elles sont toutes deux compatibles avec les résultats des travaux concernant ce sujet⁵.

D'où les deux puissances totales exploitables :

$$P_{\text{max}} = 6 \times 0,45 \times 230 = 621 \text{ W}$$

$$P_{\text{croisière}} = 6 \times 0,45 \times 80 = 216 \text{ W}$$

qui, reportées dans la courbe de puissance hydrodynamique P_{hydro} :



donnent :

$$V_{\text{max}} = 4,2 \text{ nd}$$

$$V_{\text{croisière}} = 3,4 \text{ nd}$$

⁵J.Coates, op. cit.

VI.8- APPLICATION À KYRENIA II

La réplique du navire de Kyrénia a fait l'objet, dans le cadre de l'expérience d'archéologie expérimentale qui a animé sa construction, de deux voyages d'essai dans sa zone de navigation présumée. L'aller en septembre 1986 du Pirée à Paphos (Chypre) et le retour en avril 1987. Le compte rendu de [Katzef, 1987] donne, de façon approximative, les conditions de navigation, les modes de propulsion et les vitesses moyennes réalisées. En particulier Kyrénia II fut par moment propulsée par deux paires d'avirons et on peut résumer les résultats de ces phases par le tableau suivant :

Voyage	Etape	Distance en milles	Force Beaufort	Vitesse en noeud
aller	5	1,5	0	1,8
"	9	1	1	3
"	10	0,5	2	2
"	11	0,5	?	2
retour	1	1	0	1
"	3	1,3	0	0,7

L'annexe 14, établie avec le déplacement de 16,5 tonnes, fournit la courbe $R(V)$ et non $P(V)$. Pour trouver, dans ce cas, la vitesse atteinte en fournissant une puissance efficace $\eta \cdot P_{\text{musculaire}}$ il faut alors rechercher l'intersection de la courbe $R(V)$ avec l'hyperbole $\eta \cdot P_{\text{musculaire}} / V$. Par cette méthode et selon le nombre de rameurs, j'aboutis aux vitesses de croisière ci-dessous :

Force Beaufort	Cmer	Vitesse en noeud
0	0,037	1,6 ⁶
0	0,037	2,0
0	0,037	2,9 ⁷
1	0,055	1,9
2	0,112	1,9

Comme on peut le constater les résultats sont, dans l'ensemble, très compatibles. La forte valeur de l'étape 9 peut s'interpréter comme le fait qu'il s'agissait d'une arrivée cérémonielle à l'île de Ro et que l'équipage y a mis son énergie. Quant à l'étape 3 elle fut réalisée avec seulement 4 hommes à bord et compte tenu de fait qu'un d'eux au moins est pris à chaque fois par la manoeuvre du gouvernail, il n'en restait que 2 pour assurer la propulsion avec éventuellement cette fois-ci peu d'entrain.

⁶Avec deux rameurs seulement.

⁷A la puissance maximale.

LA PROPULSION DU NAVIRE À VOILE CARRÉE

VII.1- INTRODUCTION

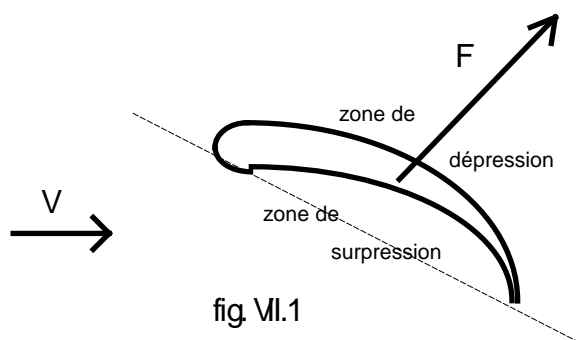
L'étude de l'effet du vent sur une surface est relativement récente. Elle a été motivée par l'apparition de l'aviation au début du siècle et les premiers travaux véritablement scientifiques sont dus à Eiffel en 1910. Ils furent poursuivis par Prandtl dans les années 30 mais portèrent toujours sur des plaques, planes ou courbes. Par la suite les divers instituts aéronautiques développèrent des recherches théoriques et expérimentales approfondies focalisées, elles, sur les profils épais des ailes d'avions. L'engouement contemporain pour la plaisance et la course au large a entraîné de nombreuses études sur les performances de voiles triangulaires induites du gréement marconi ou quasi sphériques comme les spinnakers.

Il ressort de ce rapide panorama qu'il n'existe presque pas de documents scientifiques concernant les gréements carrés portés tant par les navires antiques que par les derniers grands voiliers du début du siècle. Les voiles correspondantes constituent des profils très minces, souples, à double courbure, poreux et rectangulaires aux caractéristiques particulières dont la méconnaissance nuit à la qualité de la modélisation et à l'estimation des effets propulsifs de telles voilures. C'est ce manque d'informations fiables qui fait, actuellement, de cette phase d'étude le maillon faible de la méthodologie mise en place dans ce mémoire.

Certaines publications techniques plus ou moins récentes abordent le sujet de façon théorique [Wagner Smitt, 1984] ou expérimentale [Prandtl, 1932] mais aucune ne fournit directement de polaires d'une voilure carrée. Malgré les réserves énoncées précédemment les résultats finals auxquels je parviens au chapitre VIII donnent une polaire de vitesse de Kyrénia II tout à fait réaliste (cf § VIII.7) et comparable à celles présentées dans ces articles.

VII.2- NOTIONS D'AÉRODYNAMIQUE EXPÉRIMENTALE

Sur un corps animé d'une vitesse relative V par rapport à l'air, l'action de celui-ci se traduit par une force résultante F , généralement assez peu écartée de la normale au corps (fig. VII.1). Cette force que l'on désigne simplement par *résistance de l'air* a pour expression générale :



$$F = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_r \quad \text{avec}$$

F en newton

$\rho = 1,22 \text{ kg.m}^{-3}$ la masse volumique de l'air

S la surface du corps en m^2

V en m.s^{-1}

C_r coefficient sans dimension physique

Pour l'étude des phénomènes aérodynamiques, il est commode d'évaluer les projections de la force résultante F sur un système d'axes lié à la vitesse relative V . On définit ainsi (fig. VII.2) :

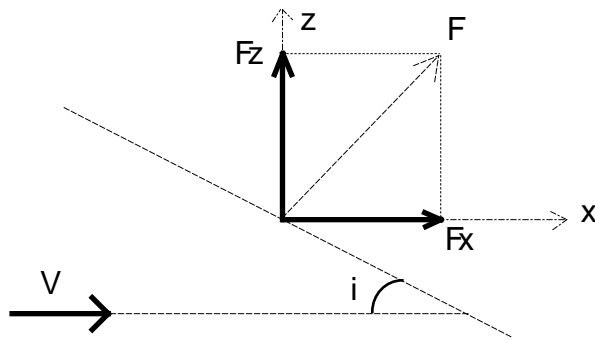


fig VI.2

$$\text{portance: } F_z = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_z$$

$$\text{traînée: } F_x = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_x$$

C_z coefficient de portance

C_x coefficient de traînée

i angle d'incidence

- une composante F_z normale à la vitesse relative, orientée du même côté que F par rapport à l'écoulement et appelée **portance**.

- une composante F_x parallèle à la vitesse relative, orientée dans le sens de cette vitesse et appelée **traînée**.

VII.3- DIAGRAMME POLAIRE

Les forces de portance et traînée, ainsi que les coefficients qui les déterminent, varient avec l'incidence i . On doit à Eiffel la représentation graphique obtenue en portant en abscisses les coefficients de traînée C_x et en ordonnées les coefficients de portance correspondants C_z relatifs à différentes valeurs de l'incidence i :

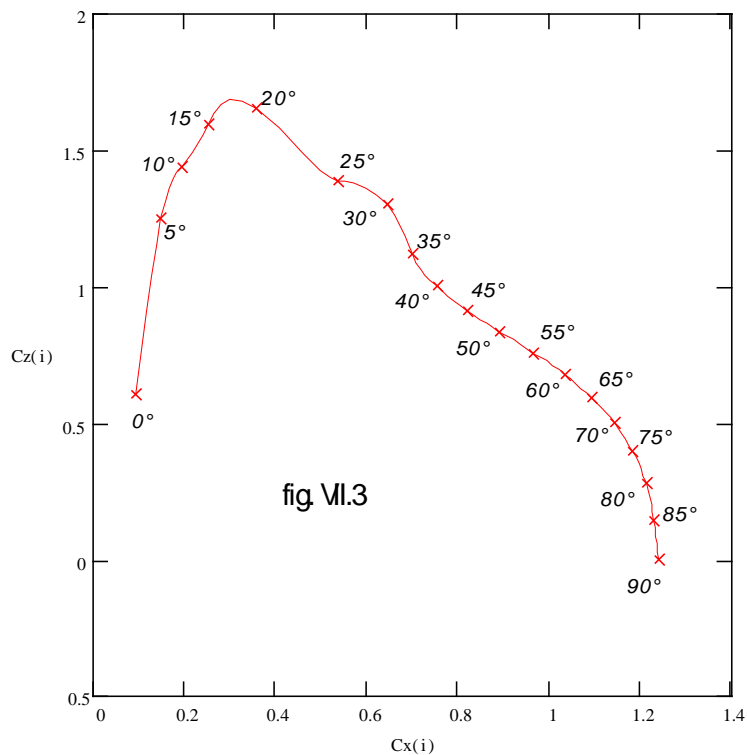


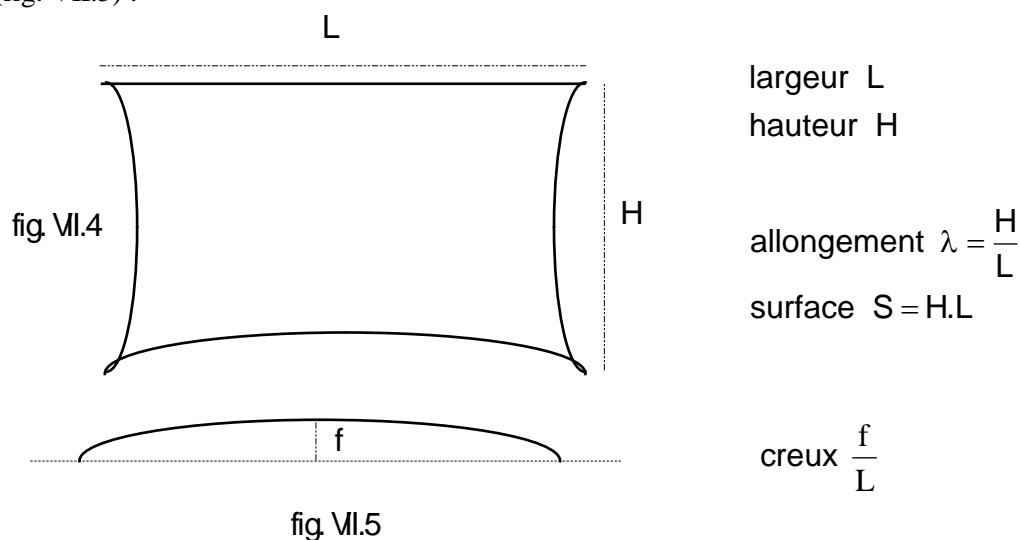
fig VI.3

Les polaires des différents corps (plaques, voiles, profils épais) ont des formes voisines caractérisées par :

- une zone de variation sensiblement linéaire aux faibles incidences ($i < 10^\circ$ environ).
- une incidence de portance maximale.
- une brusque diminution de la portance au delà de cette incidence particulière et due au **décollement des filets fluides** de la face sous le vent.
- une évolution finale de la courbe la rapprochant d'un cercle.

VII.4- CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES D'UNE SURFACE PORTANTE

Ces changements de forme de la polaire en fonction de l'incidence sont fortement influencés par la géométrie de la surface exposée au vent relatif. Pour décrire cette dernière on définit un certain nombre de paramètres caractéristiques. Dans le cas d'une voile "carrée" cela donne en vue de face (fig. VII.4) et en vue de dessus (fig. VII.5) :



La prédiction des valeurs des forces propulsive et de gîte produites par une voile nécessite de connaître sa polaire. Celle-ci est normalement obtenue par des essais en soufflerie sur un modèle, plus petit, qui respecte impérativement ces paramètres d'allongement et creux. L'indisponibilité provisoire de ces données précises m'a imposé d'utiliser les résultats de Prandtl sur des plaques et la suite de l'étude exploite la polaire de la figure VII.3. Celle-ci est relative à une plaque rectangulaire courbe d'allongement 5 et de 15% de creux alors que la voile de Kyrénia est d'allongement 1/2. Cette dernière valeur devrait se traduire en principe par de légères augmentations sur l'incidence et l'ampleur du décollement.

VII.5- INFLUENCE DE LA POROSITÉ DU TISSUS

Ces plaques utilisées dans les expériences anciennes sont évidemment totalement étanches à l'air or un tissu le laisse passer à travers ses fibres et c'est cette propriété que l'on appelle la **porosité**. La résistance aérodynamique présentée dans la figure VII.1 est due à la différence de pression qui règne entre les faces au vent (*intrados*) et sous le vent (*extrados*). Le flux d'air à travers le tissu diminue cette résistance et la porosité l'exprime justement en m/s. Cette porosité dépend de la nature du tissu et de la tension en son sein. La diminution de la résistance aérodynamique varie sans doute légèrement avec l'incidence de la voile mais pour simplifier la suite des calculs je l'assimile à un simple facteur réducteur σ fonction de la porosité.

De nombreux matériaux ont été utilisés dans l'Antiquité pour fabriquer les voiles : papyrus, lin, jute et laine¹ [Black, 1991] mais les études techniques sur la porosité des tissus n'ont porté que sur des matériaux plus modernes (coton, soie, Nylon) et là encore il faut se contenter de données approximatives. Une indication, issue de [Brown, 1950], me servira pour Kyrénia II :

Matériau	Porosité	Réduction
coton	6,6 m/s	0,7

VII.6- LE VENT APPARENT

Dans le cas d'un navire le vent relatif qui frappe une surface résulte du vent réel V_r et du déplacement d'air dû au mouvement du navire à la vitesse V :

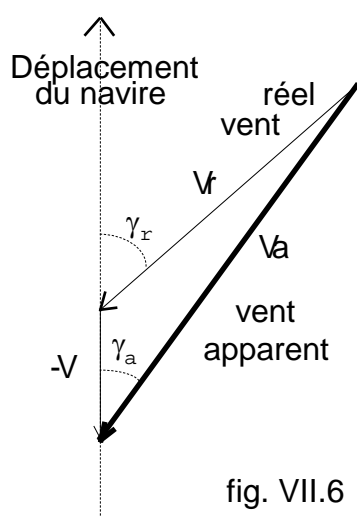


fig. VII.6

$$V_a \cdot \cos \gamma_a = V + V_r \cdot \cos \gamma_r$$

$$V_a \cdot \sin \gamma_a = V_r \cdot \sin \gamma_r$$

d'où

$$V_a = \sqrt{(V + V_r \cdot \cos \gamma_r)^2 + (V_r \cdot \sin \gamma_r)^2}$$

$$\gamma_a = \cos^{-1} \left(\frac{V + V_r \cdot \cos \gamma_r}{V_a} \right)$$

En toute rigueur le déplacement du navire s'effectue sur sa trajectoire par rapport à la terre que l'on appelle la **route fond** et si le vent est donné par rapport à la terre la composition vectorielle est cohérente. Les informations de vent fournies dans les ouvrages nautiques² résultent en général d'observations accumulées sur plusieurs années par les équipages de navires. Ils repèrent alors spontanément le vent apparent par rapport l'axe du navire, c'est à dire en **gisement γ** , et il n'est pas sûr que ces mesures soient corrigées de l'effet du courant auquel cas le résultat serai rendu par rapport à la **route surface**, c'est à dire la trajectoire sur l'eau. Il règne donc souvent une certaine ambiguïté quand à la direction par rapport à laquelle on exprime les vents réel et apparent.

Cette remarque critique est à tempérer dans la mesure où les données climatiques de vent réel sont associées à la direction inter cardinale la plus proche de celle d'où il souffle. La précision de la direction du vent réel n'est donc pas grande et dans la suite de l'exposé j'exploiterai, selon les besoins logiques du moment et dans un but de simplification, indifféremment le vent apparent par rapport à l'axe du navire, la route surface ou la route fond.

¹Le coton s'est répandu surtout à partir du moyen age et la soie est restée un matériau spécifique de l'Asie.

²Instructions Nautiques et Pilot Charts par exemples.

La vitesse du vent réel peut être donnée en m/s ou en noeud. Elle est traditionnellement exprimée aussi en force sur l'échelle Beaufort en fonction de ses effets sur la mer et peut être résumée en une formule ³ :

$$B = 1,112.V_r^{2/3} \text{ ou } V_r = \left(\frac{B}{1,112} \right)^{3/2}$$

avec

B force Beaufort

V_r vitesse en m/s

Force	Désignation	vitesse en noeuds	vitesse en m/s
0	calme	0-1	0-0,2
1	très légère brise	1-3	0,3-1,5
2	légère brise	4-6	1,6-3,3
3	petite brise	7-10	3,4-5,4
4	jolie brise	11-16	5,5-7,9
5	vent frais	17-21	8-10,7
6	grand frais	22-27	10,8-13,8

Je traiterai plus loin un exemple partant des données : B = 4 γ_r = 140° V = 4,5 nd
d'où V_r = 13,3 nd V_a = 10,2 nd γ_a = 124°

VII.7- INTÉRÊT D'UNE VOILE SITUÉE EN HAUTEUR

L'iconographie montre que certains navire étaient équipées d'une voile supplémentaire, de forme triangulaire et superposée à la voile carrée, comme l'illustre la photo suivante ⁴ :



Cette voile, nommée sipharos par les grecs et siparum par les romains, est mentionnée surtout par les auteurs latins (Sénèque, Lettres. 77.1-2; Lucain 5.428-29) comme étant utilisée au large pour capter plus de brise. En effet le frottement de l'air sur la surface agitée de la mer ralentit le vent et l'on constate dans la

³F.Faury, A.Castetz et J.E.Enault, op. cit.

⁴Relief des quinquennales corporis fabrum navalium (Musée Torlonia, IIe s. ap. J.C.).

pratique un véritable gradient vertical du vent. À ce sujet, la vitesse de vent associée aux forces Beaufort décrites plus haut correspond à une hauteur standard de 10 m au dessus de la surface. Je me propose dans ce paragraphe d'étudier quantitativement l'influence réelle d'une telle voile par rapport à la voile carrée principale et si l'intérêt que rapportent ces auteurs est justifié.

Pour cela je m'inspire d'une part des proportions de la photo ci-dessus et d'autre part des caractéristiques de Kyrénia II. Bien qu'étant conscient des erreurs que peut véhiculer l'iconographie et aussi du fait que Kyrénia II n'a pas été gréé avec cette voile, ces hypothèses me permettent de concrétiser numériquement les conclusions de l'analyse physique du phénomène mis en jeu. Les données que j'ai adoptées⁵ sont donc les suivantes (fig. VII.7):

- hauteur au dessus de l'eau du bord inférieur de la voile principale : $d = 3,2$ m
- hauteur de la voile principale : $H = 6$ m
- largeur commune des voiles : $L = 11$ m
- hauteur de la voile triangulaire : $h = 2,2$ m

Le frottement de l'atmosphère avec la surface crée une couche limite, d'environ 30 mètres d'épaisseur, dans laquelle le **gradient vertical de vent** est décrit par une formule empirique, adoptée par l'Organisation Météorologique Mondiale (O.M.M.) donnant pour une force Beaufort B le vent en fonction de l'altitude z (Mayençon, 1982) :

$$W_z = 1,4 \cdot \left(\frac{Z}{18} \right)^{\frac{1}{7}} \cdot B^{\frac{5}{4}} \quad \text{avec } Z \text{ en m et } W_z \text{ en m/s}$$

La force aérodynamique s'exerçant sur une voile étant proportionnelle au carré de la vitesse du vent et celle-ci variant avec l'altitude il convient d'abord de calculer pour chaque voile le vent efficace qui lui correspond. C'est-à-dire le vent constant qui fournit la même force, donc le même carré. Cette valeur s'obtient en faisant la moyenne quadratique des vitesses sur toute la hauteur de la voile c'est-à-dire la moyenne des carrés des vitesses du vent :

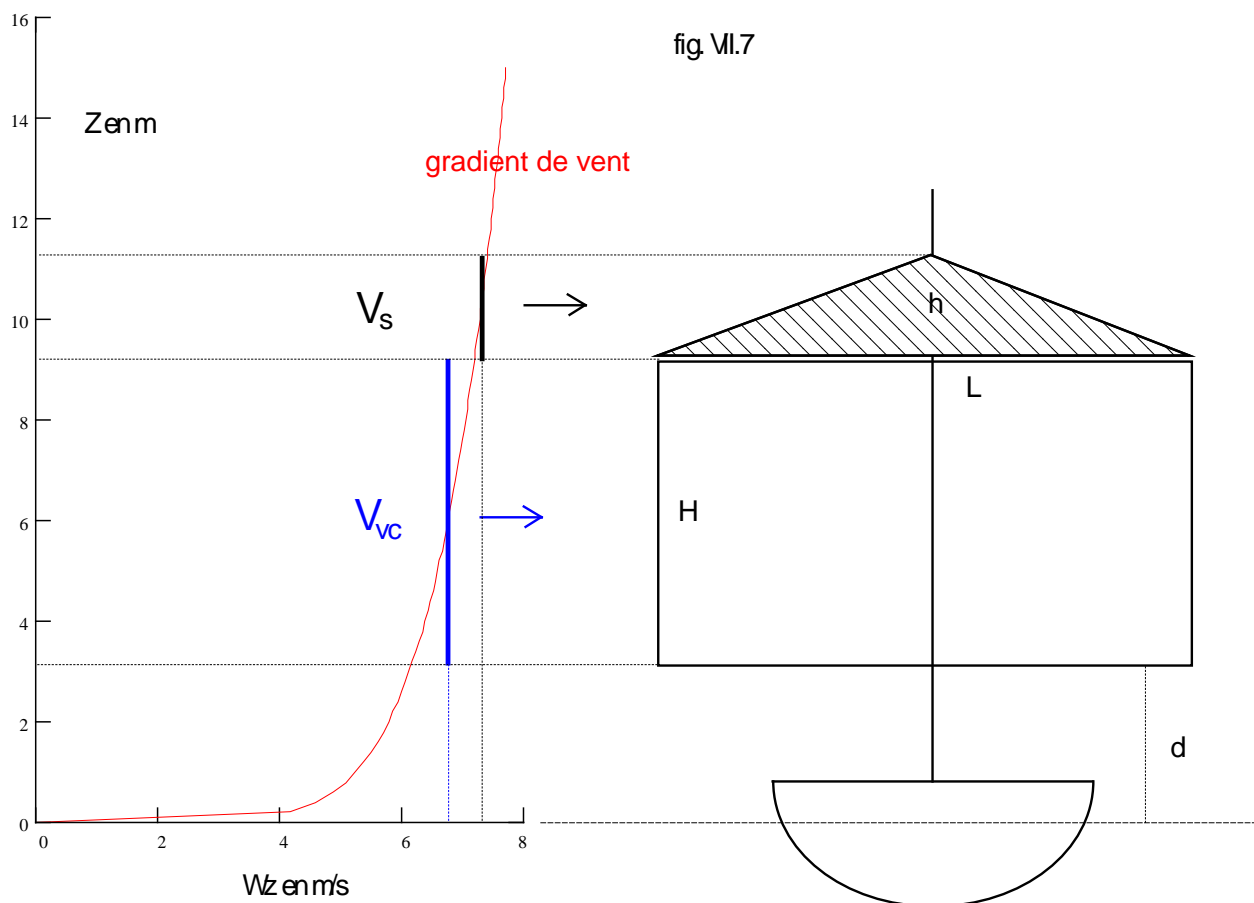
$$V_{\text{voile carrée}}^2 = \frac{1}{H} \sum_{z=d}^{z=d+H} W_z^2 \cdot \delta z \quad \quad V_{\text{siparum}}^2 = \frac{1}{h} \sum_{z=d+H}^{z=d+H+h} W_z^2 \cdot \delta z$$

Pour fixer les idées j'ai effectué le calcul pour une force de 4 Beaufort ce qui donne (annexe 16) :

$$V_{\text{voile carrée}} = 6,8 \text{ m/s} \quad \quad V_{\text{siparum}} = 7,3 \text{ m/s}$$

la situation dans laquelle se trouvent les voiles peut alors être représentée par la figure suivante :

⁵Ne disposant pas des données originales celles-ci sont essentiellement obtenues après examen des photos de Kyrénia II dans les publications sur ses essais.



Pour simplifier le calcul je me suis limité au cas du vent arrière en supposant le navire assez lent pour qu'il ne fausse pas beaucoup le vent réel décrit par la formule de l'O.M.M. ce qui est tout à fait réaliste. Par la suite chaque voile réagit en fonction de sa surface S , de la masse volumique ρ de l'air, de sa porosité $\sigma = 0,7$ (car le tissu est naturellement le même pour chacune et je maintiens le choix du § VII.5) et de son coefficient de traînée C . La force sur chaque voile est de la forme :

$$F = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot C \cdot \sigma$$

Pour ce coefficient ce pose encore le problème, déjà mentionné au § VII.4, de la disponibilité de données expérimentales. Les études classiques⁶ donnent pour une plaque circulaire normale au vent $C = 1,12$ et pour une plaque rectangulaire de rapport $H/L = 1/2$ la valeur $C = 1,15$ mais rien pour une plaque triangulaire. Heureusement l'écart entre les valeurs précédentes est tellement faible et la différence de forme pourtant significative que j'adopte avec peu d'incertitude une valeur commune de $C = 1,15$ pour les deux voiles. Ce qui me fournit finalement (annexe 16):

$$F_{\text{voile carrée}} = 2123 \text{ newtons}$$

$$F_{\text{siparum}} = 454 \text{ newtons}$$

On constate alors que la poussée de la voile supérieure ne représente, sous les hypothèses précédentes, qu'environ 20% de celle de la voile principale. Cette conclusion reste indépendante de la force de vent choisie et de la porosité car elles n'interviennent qu'en facteurs multiplicatifs. Dans le doute sur la confiance à accorder à l'iconographie j'ai repris le calcul en doublant la hauteur du siparum et cela donne

⁶Hütte, op. cit.

cette fois une action de celui-ci représentant 44% de celle de la voile carrée. Le résultat est intéressant mais malgré tout minoritaire et ne justifie pas la déclaration enthousiaste de Sénèque⁷.

VII.8- L'EFFET DU VENT SUR LES VOILES

Le vent apparent étant repéré par son gisement γ , lorsqu'il frappe la surface de la voile il produit une composante de portance Fz et une composante de traînée Fx orientées comme sur la figure suivante. Ces forces entraînent le navire selon leur résultante qui définit ainsi la route surface et l'angle de *dérive* δ quelle fait avec l'axe longitudinal du navire :

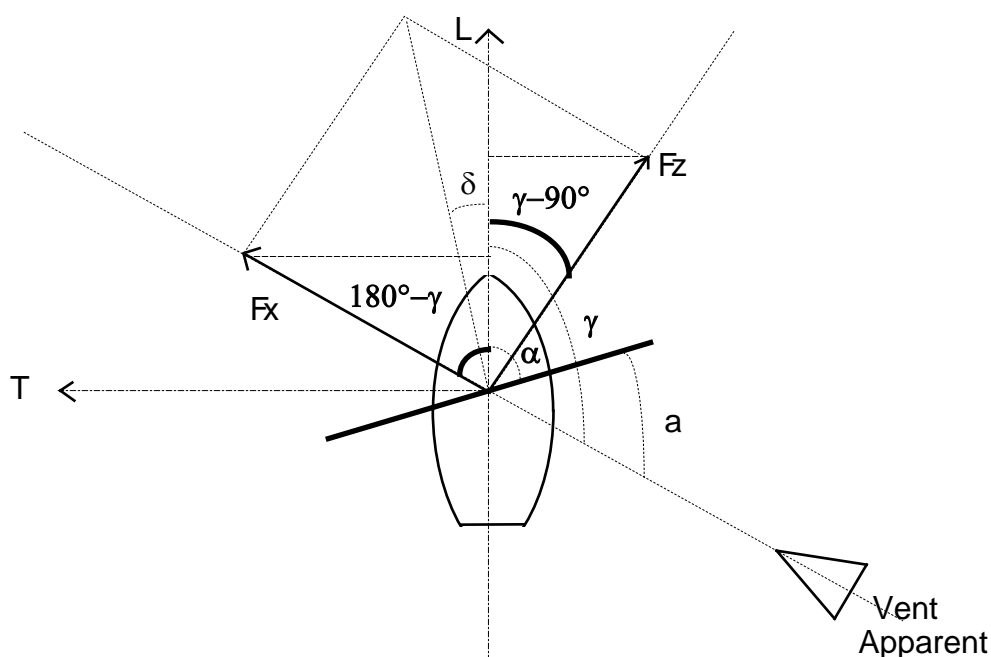


fig. VII.8

L'intensité de ces composantes est fonction de l'incidence de la voile qu'il reste à déterminer avec précaution. En effet, la situation n'est pas exactement la même que pour un profil rigide et dissymétrique habituellement étudié en aérodynamique et pour lequel tous les angles d'incidence i de 0° à 180° , et au delà, ont une action distincte liée à la forme du profil et au sens d'écoulement de l'air sur lui (fig. VII.9) :

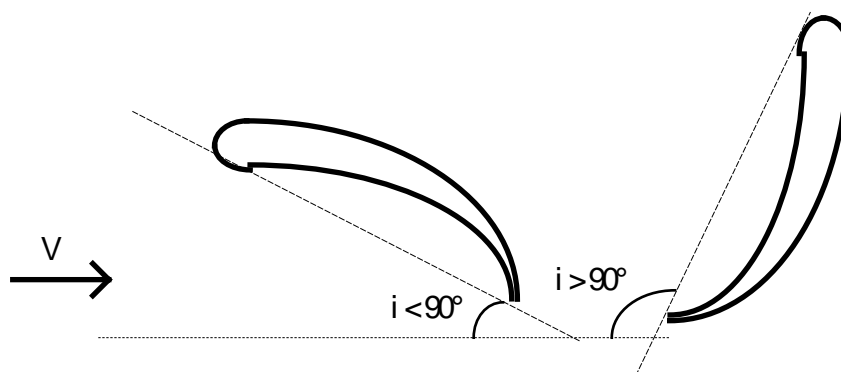


fig. VII.9

⁷Lettres à Lucilius, 77-2 : "Rien ne seconde en effet, la course comme la partie haute de la voilure; elle constitue le moteur principal."

Si on repère l'orientation de la vergue par l'angle α avec l'axe longitudinal du navire ce n'est pas l'angle $a = \gamma - \alpha$ qui est l'incidence i car d'une part la voile souple change de courbure selon la face offerte au vent et d'autre part c'est le bord au vent qui définit l'angle aigu d'incidence (fig. VII.10) :

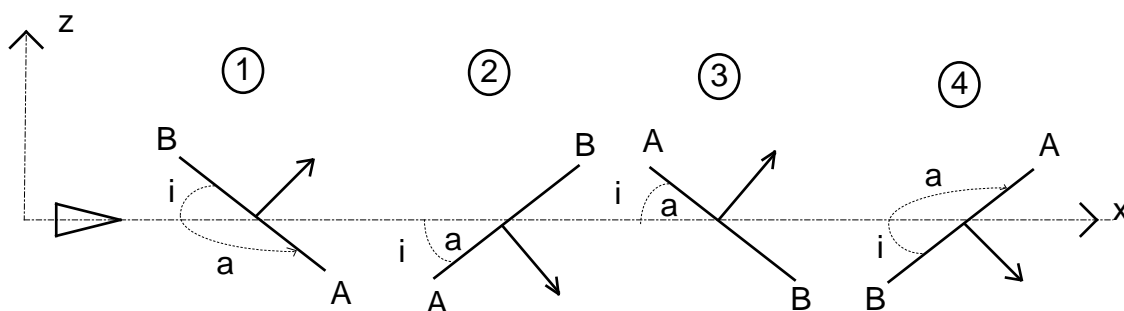


fig. VII.10

Si on convient de noter $C_x(i)$ et $C_z(i)$ les coefficients de traînée et de portance définis par la polaire de la figure VII.3 où une même face reçoit le vent sous une incidence i comprise entre 0° et 90° alors on peut définir les coefficients $C_x(a)$ et $C_z(a)$, correspondants à la voilure vue selon son orientation a par rapport au vent, par le tableau de variations suivant⁸ :

cas n°	1	2	3	4	
a orientation au vent de la voile	180°	90°	0	90°	180°
i incidence réelle de la voile	$180^\circ - \alpha $	90°	$ \alpha $	90°	$180^\circ - a$
$C_x(a)$	$c_x(i)$		$c_x(i)$		$c_x(i)$
$C_z(a)$	$c_z(i)$	$-c_z(i)$	$c_z(i)$		$-c_z(i)$

On peut maintenant envisager le calcul de la force qui propulse le navire. Chacune des forces, de traînée et de portance, fournit une composante selon l'axe longitudinal du navire et c'est leur somme qui constitue cette force dite "vélique". Pour une orientation a donnée la force est proportionnelle au coefficient :

$$CL(a) = C_x(a) \cdot \cos(180^\circ - \gamma_a) + C_z(a) \cdot \cos(\gamma_a - 90^\circ)$$

La résistance aérodynamique sur la voile n'a pas qu'une composante longitudinale mais aussi une composante transversale FT provoquant la dérive et qui se rattache (fig. VII.8) aux coefficients de traînée et de portance par le coefficient CT :

$$CT(a) = C_x(a) \cdot \sin(180^\circ - \gamma_a) - C_z(a) \cdot \sin(\gamma_a - 90^\circ)$$

VII.9- RÉGLAGE OPTIMAL DE LA VERGUE

Tout naturellement l'équipage d'un navire cherche à atteindre la plus grande vitesse en orientant au mieux la vergue à l'aide de ses bras, amures et écoute. Il observe alors l'effet de ses manoeuvres de façons qualitative (sensation du vent relatif, gonflement de la voile, observation de la vague d'étrave, etc) ou quantitative (temps, mesuré en comptant, de défilement d'un objet le long de la coque par exemple). Ses actions sont conditionnées par l'analyse qu'il fait des phénomènes mis en jeu et celle-ci qui dépend de la

⁸ L'angle a étant compté algébriquement, $|\alpha|$ désigne la valeur absolue de a .

culture technique de l'époque et de l'expérience propre à l'équipage est difficile à reconstituer. On peut par contre aborder le sujet de façon mécanique, tester plusieurs hypothèses et voir les conséquences qu'elles ont en matière d'efficacité sur le navire. Il reste alors à étudier quels liens elles peuvent avoir avec les habitudes des marins. J'ai ainsi envisagé trois méthodes de calculs, correspondant à trois attitudes de l'équipage, dans lesquelles il dispose d'une plage de réglage ω (par exemple 70°) de la vergue de part et d'autre de l'axe transversal :

- maximiser la composante propulsive de la force vélique en observant la vitesse ;
- minimiser l'angle de dérive δ en observant le sillage ;
- maintenir la voile à la limite du décrochage.

Je les illustre d'abord sur les conditions définies au § VII.6, c'est-à-dire pour $\gamma_a = 124^\circ$.

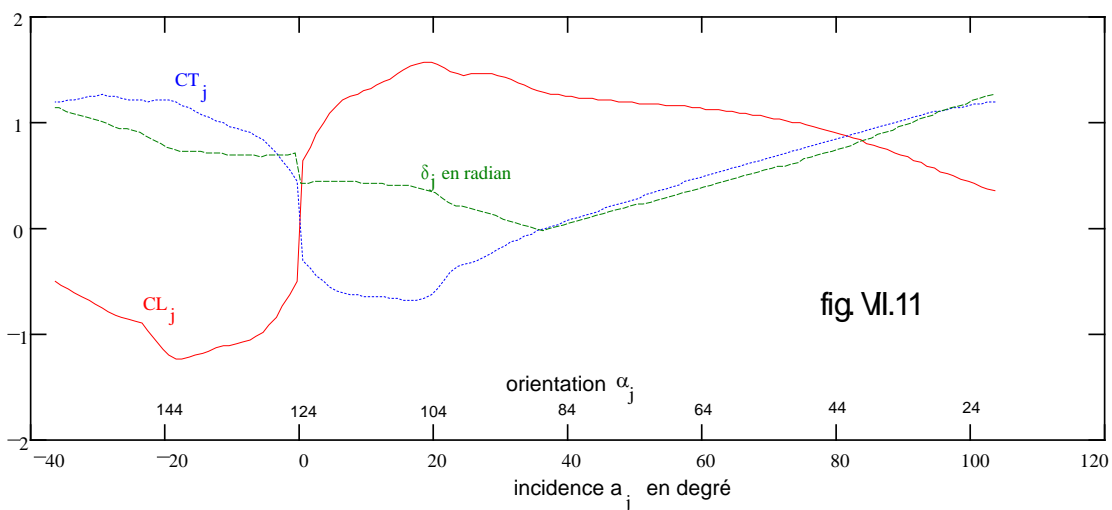
VII.9.1 réglage A : maximisation de la composante propulsive

La possibilité de réglage se traduit au niveau du calcul par une suite de valeurs a_j de l'orientation de la vergue et la suite correspondante de valeurs CL_j du coefficient quantifiant la force vélique :

$$90^\circ - \omega \leq \alpha_j \leq 90^\circ + \omega \quad a_j = \gamma_a - \alpha_j$$

$$CL_j = Cx(a_j) \cdot \cos(180^\circ - \gamma_a) + Cz(a_j) \cdot \cos(\gamma_a - 90^\circ)$$

qui se matérialise par la courbe CL de la figure suivante :



dans laquelle les valeurs négatives de CL correspondent à une orientation a de la vergue telle que la résultante aérodynamique est orientée vers l'arrière du navire et donc non plus propulsive mais résistante. Dans le graphique ci-dessus les graduations de α et a évoluent en sens inverse car on a en permanence (cf fig. VII.8):

$$\alpha_j + a_j = \gamma_a$$

L'optimisation du réglage (ici sur la plage $20^\circ < a < 124^\circ$) est obtenue en maximisant la composante longitudinale CL_j . Cette option risque d'aboutir à une composante transversale CT_j importante provoquant gêne et dérive (cf § VIII.2, § VIII.3).

VII.9.2 réglage B : minimisation de la dérive

Pour éviter cet inconvénient on calcule d'abord la suite des valeurs de la composante transversale CT_j (cf fig. VII.10) :

$$CT_j = Cx(a_j) \cdot \sin(180^\circ - \gamma_a) - Cz(a_j) \cdot \sin(\gamma_a - 90^\circ)$$

puis on minimise l'écart angulaire δ de la résultante aérodynamique (fig. VII.8) :

$$\delta_j = \arctan\left(\frac{CT_j}{CL_j}\right)$$

car ce sera l'angle de dérive (cf fig. VIII.2). Cela donne une action de la voile moins pénalisante transversalement mais aussi moins efficace en propulsion.

VII.9.3 réglage C : maintien de la voile à la limite du décrochage

La résultante aérodynamique étant proche de la normale au profil une façon simple de naviguer au vent arrière consiste à garder la vergue perpendiculaire à l'axe longitudinal du navire. Mais lorsque le vent vient du travers ou de l'avant il faut alors orienter la vergue vers l'avant. L'observation de la polaire de la voile (fig. VII.3) montre un maximum de portance pour une incidence $i_{Cz \max}$ donnée (ici environ 18°). Une façon simple de régler la vergue consiste alors à maintenir en permanence cette incidence par rapport au vent relatif jusqu'à atteindre la butée avant. L'orientation α de la voile suit donc la règle suivante :

$$\alpha = \begin{cases} 90^\circ & \text{si } \gamma_a > 90^\circ + i_{Cz \max} \\ \gamma_a - i_{Cz \max} & \text{si } 90^\circ + i_{Cz \max} > \gamma_a > 90^\circ - \omega + i_{Cz \max} \\ 90^\circ - \omega & \text{si } 90^\circ - \omega + i_{Cz \max} > \gamma_a > 90^\circ - \omega \end{cases}$$

VII.10- APPLICATION À LA VOILE DE KYRENIA II

En reprenant les caractéristiques géométriques adoptées au § VII.9, Les forces propulsive et transversale qui résultent de tout l'exposé précédent sont données par :

$$FL = \frac{1}{2} CL_{\alpha \text{ optimal}} \cdot \rho \cdot S \cdot Va^2 \cdot \sigma \qquad FT = \frac{1}{2} CT_{\alpha \text{ optimal}} \cdot \rho \cdot S \cdot Va^2 \cdot \sigma$$

et en prenant à titre d'exemple les conditions de vent du § VII.6, les résultats numériques des trois méthodes envisagées pour régler la voilure sont :

	orientation	incidence	CL	CT	FL en N	FT en N
réglage A	104°	20°	1,58	0,63	1233	495
réglage B	87°	37°	1,29	0	1007	0
réglage C	90°	34°	1,35	0,07	1056	57

L'annexe 17 illustre en détails les calculs de l'option de réglage C. On constate quelle constitue ici un compromis entre les deux premières méthodes de réglage imaginées pour les marins antiques et que la composante transversale peut effectivement avoir une valeur importante avec le réglage A. Ce seul résultat

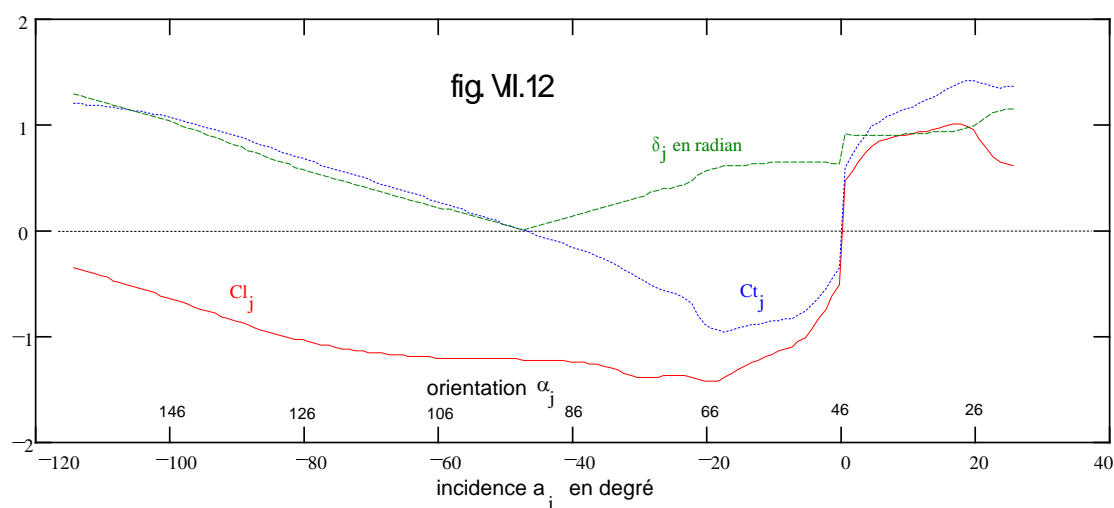
ne suffit pas pour conclure à une supériorité permanente du réglage C et encore moins à son adoption à l'époque car si constater la chute d'efficacité d'une voile après son décrochage est spontané, y associer juste avant la valeur maximale de sa portance aérodynamique n'est naturel que dans notre contexte cognitif moderne.

VII.11- LES LIMITES DE LA VOILE CARRÉE

Retournons aux calculs du § VII.9 pour un autre jeu de valeurs : $\gamma_r = 60^\circ$ $V = 4,5$ nd
cela donne pour le vent apparent : $V_a = 16$ nd $\gamma_a = 46^\circ$
dans ces conditions la plage efficace d'orientation de la vergue est : $20^\circ < a < 46^\circ$
et les options de réglage aboutissent dans ce cas à :

	orientation	incidence	CL	CT	FL en N	FT en N
réglage A	28°	18°	1,00	1,39	1911	2647
réglage B	41°	5°	0,79	0,97	1508	1858
réglage C	28°	18°	1,00	1,39	1911	2647

ces résultats sont liés à l'allure des courbes CL et CT dans ce cas particulier de gisement du vent (annexe 18 pour l'option B):



La grandeur très importante de FT va se traduire par une gîte et une dérive extrêmes. Une réduction de la surface de la voile, par abaissement de la vergue, diminuera bien la gîte par abaissement du centre vélique (cf § VIII.2) mais elle conservera le même rapport entre FT et FL c'est à dire une mauvaise orientation de la résultante aérodynamique et entraînera une faible force propulsive. On voit bien ainsi la faible efficacité de la voile carrée à faire du près et la difficulté pour le navire qui en est équipé à remonter au vent.

La solution, qui avait déjà été reconnue dans le passé⁹, consiste à brasser la vergue vers l'avant et charger latéralement la voile de façon à la triangulariser et faire assumer à la vergue un rôle identique à celui de l'antenne du gréement latin, dans lequel elle rigidifie le bord d'attaque de la voile. Mais alors la forme de la voile n'est plus décrite par une polaire du style de la figure VII.3 et il faudrait reprendre les calculs précédents sur cette nouvelle base. Malheureusement la littérature aérodynamique n'est pas plus riche en

⁹L.Casson, op. cit., fig.188.

polaire de voile latine que de voile carrée. Je terminerai en disant que j'ai souhaité dans cette étude, entre autres objectifs, évaluer rationnellement les capacités ultimes du gréement carré antique et que je me restreins à ce cadre là.

LES PERFORMANCES DE L'ENSEMBLE COQUE-VOILURE

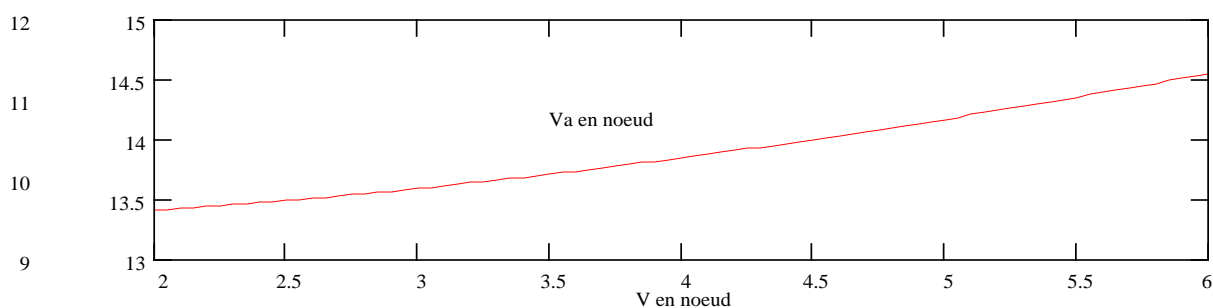
Après les chapitres consacrés à l'étude des phénomènes hydrostatiques, hydrodynamiques et aérodynamiques intervenant sur un navire à voile nous disposons maintenant de tous les éléments pour déterminer quel seront ses performances en mer. A titre d'illustration je traite le cas de Kyrénia II.

VIII.1- ÉTUDE AÉRODYNAMIQUE POUR UN VENT DONNÉ EN FORCE ET DIRECTION

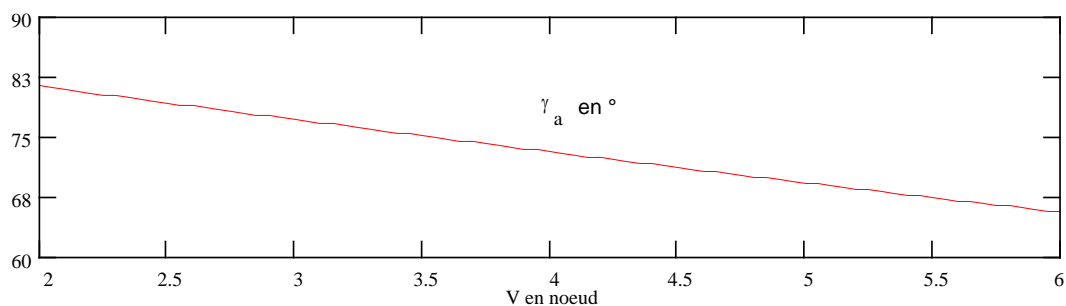
Pour une vitesse donnée du navire et un vent réel donné, en force et gisement, nous savons quantifier la force aérodynamique longitudinale qui produit le mouvement mais nous ne savons pas encore quelle sera la vitesse d'équilibre entre cette force et la traînée hydrodynamique. Il nous faut donc répéter les calculs faits au chapitre précédents sur toute une plage de vitesse du navire.

Pour illustrer les étapes du raisonnement j'ai pris comme données : vent réel de force 4 au gisement 90° . Les calculs des § VII.6 et VII.9 sont répétés sur une plage de vitesse (ici de 2 à 6 noeuds) . En adoptant la méthode de réglage C cela nous donne la variation de :

1) la vitesse apparente :

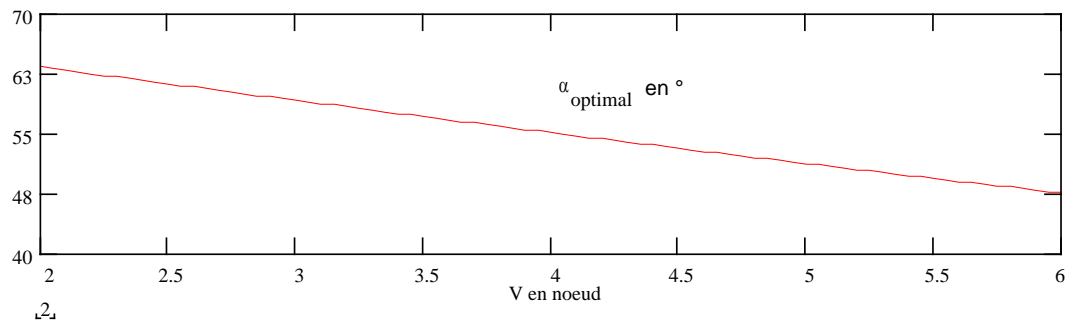


2) le gisement apparent :

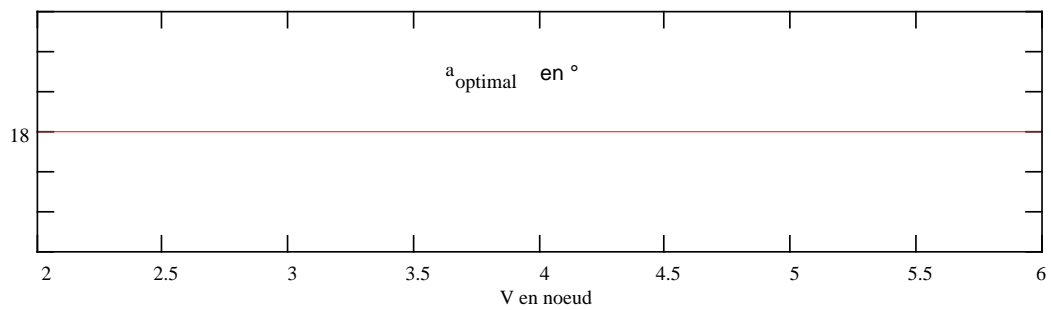


VIII.2

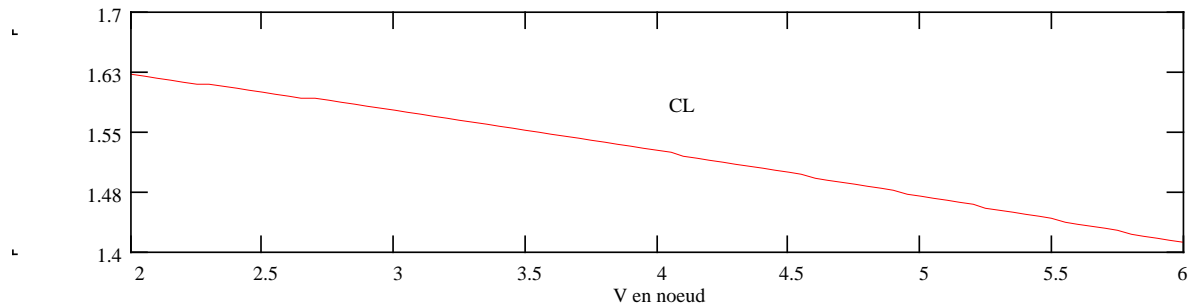
3) l'orientation optimale de la vergue :



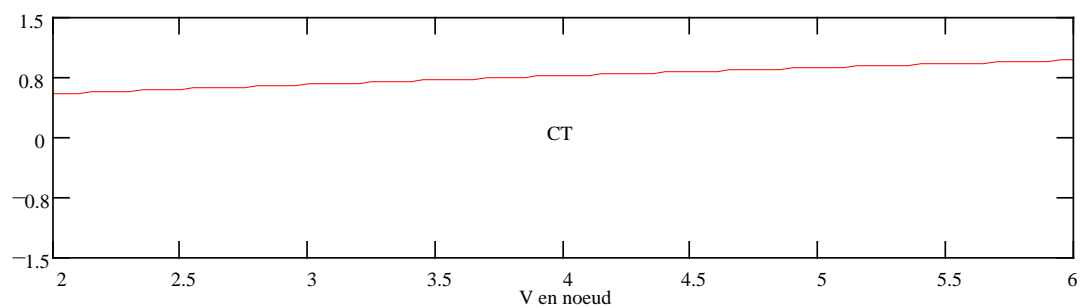
4) l'incidence de la voile au réglage optimal¹ :



5) le coefficient de force longitudinale au réglage optimal :

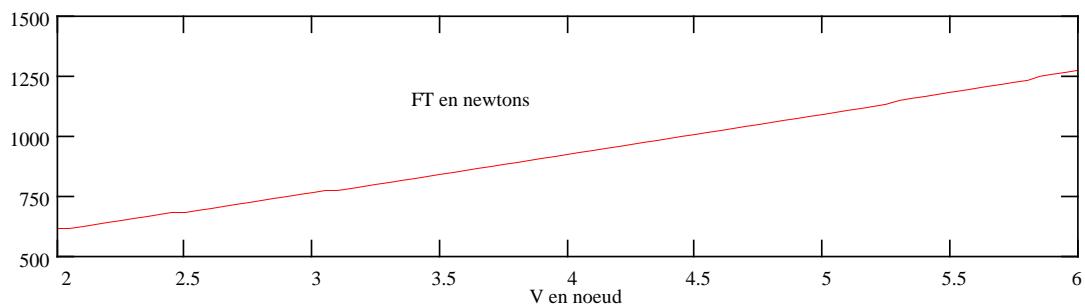


6) le coefficient de force transversale au réglage optimal :



¹ On retrouve naturellement ici la conséquence du mode de réglage C

7) la force transversale correspondante et sans gîte :



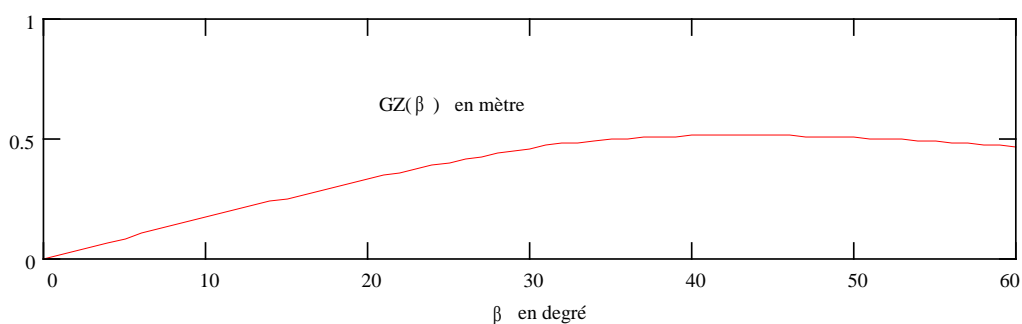
On voit bien le processus se dérouler avec l'augmentation de vitesse : le vent réel plein travers devient de plus en plus fort et se rapproche de l'avant, pour avoir une composante longitudinale propulsive la partie au vent de la vergue est brassée vers l'avant en gardant une incidence constante de $C_z \max$, ce qui réduit de plus en plus la composante propulsive et augmente la force transversale.

VIII.2- GÎTE DUE AU VENT

La force aérodynamique transversale FT est la résultante de toutes les forces de contact sur la voile, son point d'application s'appelle le **centre de voilure** CV. Ce point est classiquement défini comme étant le centre géométrique de la voilure. Dans le cas d'une voile "carrée" c'est tout simplement son centre de symétrie. Il est repéré verticalement par sa cote Z_{CV} dans le repère du navire (cf § I.1, fig. VIII.1).

Dès l'instant où le vent exerce cette force transversale le navire va subir un déplacement transversal, appelé la **dérive** (cf § VIII.3), qui se heurte à l'inertie de l'eau. Celle-ci exerçant en retour une force de traînée sur la face transversale de la carène. Cette force hydrodynamique transversale et **antidérive** s'applique en un point appelé (improprement) **centre de dérive** CD, défini lui aussi comme étant le centre géométrique de la projection transversale de la carène en position droite. Sa position verticale est repérée de même par sa cote Z_{CD} (cf § IV.1 et annexe 12).

La force antidérive va croissante avec la vitesse de dérive jusqu'à égaler la force motrice transversale. Sous l'effet de ce couple de forces le navire s'incline transversalement d'un **angle de gîte** β . Cette inclinaison est contrée, nous l'avons vu au § IV.2, par le couple de redressement formé du déplacement P du navire et de la poussée Π hydrostatique, appliqués respectivement en CG et C. L'intensité de ce couple est décrite par son bras de levier GZ , relatif au déplacement et au ZG adoptés au § IV.5 :



Un équilibre s'établit entre les deux couples inclinant et de redressement, caractérisé par la valeur de β . L'inclinaison atteinte a deux effets : d'une part elle réduit la surface efficace de la voile dans un facteur

$\cos(\beta)$ dû à la projection transversale de celle-ci et d'autre part elle réduit le bras de levier inclinant à la distance H :

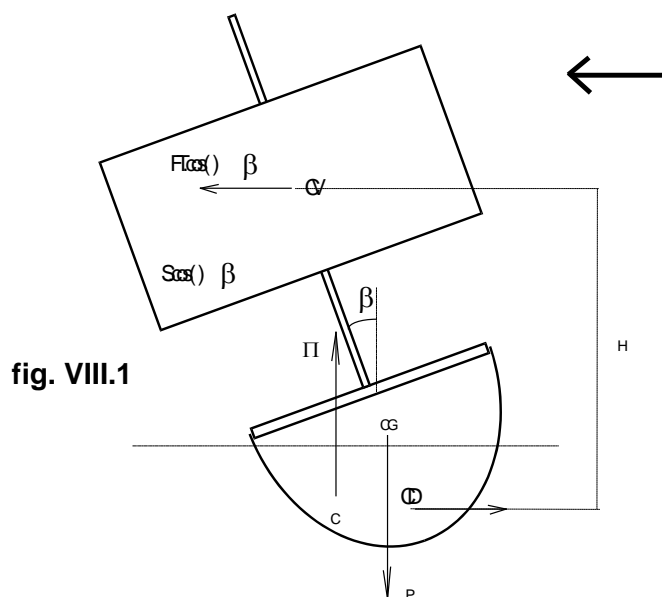


fig. VIII.1

Si FT désigne la force aérodynamique transversale en position droite alors le **moment inclinant** est déterminé par :

la force transversale sans gîte	$FT = \frac{1}{2} \rho_{air} \cdot S \cdot V_a^2 \cdot \sigma$
la force transversale à la gîte	$FT \cdot \cos(\beta)$
le bras de levier inclinant	$H = (Z_{CV} - Z_{CD}) \cdot \cos(\beta)$
le moment inclinant	$Mi(\beta) = FT \cdot \cos(\beta) \cdot H = FT \cdot (Z_{CV} - Z_{CD}) \cdot \cos(\beta)^2$

Le moment de redressement est donné par :

$$Mr(\beta) = GZ(\beta) \cdot P$$

La position d'équilibre en gîte est la racine de l'équation :

$$Mi(\beta) = Mr(\beta)$$

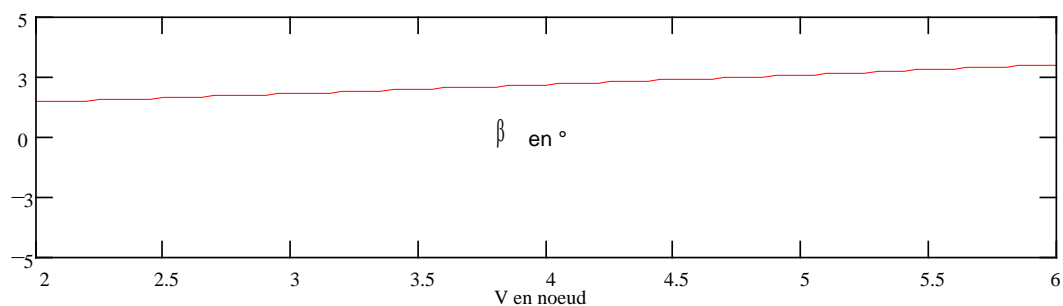
L'étude hydrostatique menée pour Kyrénia donne pour le cas étudié (cf annexe 12/1) :

$$P = 1,3 \text{ t} \quad L = 13,28 \text{ m} \quad T = 1,05 \text{ m} \quad Z_{CD} = T - 0,54 \text{ m}$$

Quand à la voile adoptée au § VII.7 ses cotes impliquent :

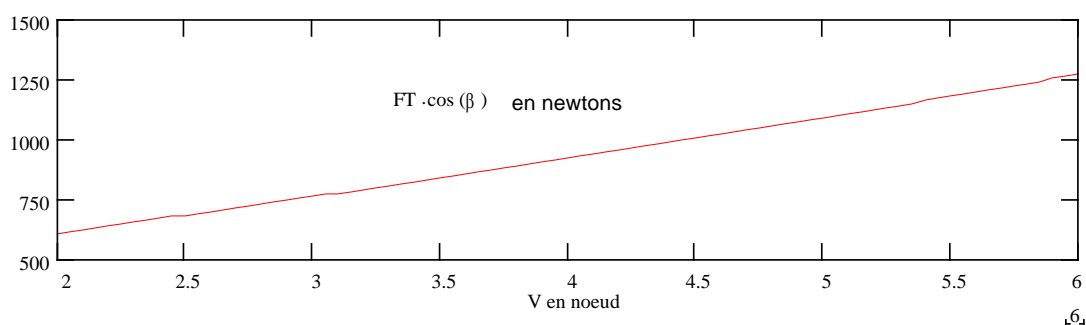
$$Z_{CV} = 7,5 \text{ m}$$

La résolution systématique de l'équation d'équilibre pour ces valeurs et sur toute la plage de vitesse étudiée donne la variation de β avec V :

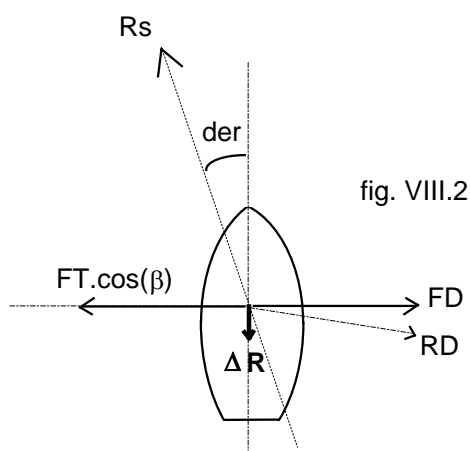


VIII.3- DÉRIVE DUE AU VENT

Maintenant que la gîte est déterminée, il en est de même de la valeur de la force aérodynamique transversale réelle:



Nous pouvons préciser son influence sur le mouvement du navire. Sous l'effet de cette force le navire ne suit pas une trajectoire dirigée selon son axe longitudinal mais décalé d'un **angle de dérive** *der*. La trajectoire réellement suivie par rapport à l'eau s'appelle la **route surface** *Rs* :



Dans cette situation la carène constitue un profil soumis à un écoulement d'eau qui l'attaque sous l'incidence *der*. La nature du fluide n'a pas d'importance et tout ce que nous avons vu au chapitre consacré à l'aérodynamique s'applique ici. Une force hydrodynamique résistante *RD* s'applique donc à la carène. Mais cette fois-ci nous allons, pour la commodité du raisonnement, la décomposer selon les axes du profil et non selon les axes de l'écoulement. Cette force *RD* donne en particulier la composante transversale *FD* qui s'oppose à la force de dérive et l'équilibre.

La formule de Joessel² donne une expression empirique de cette composante FD exprimée en kgf :

$$FD = \frac{K.L.T.V^2 \cdot \sin(\text{der})}{0,2 + 0,3 \cdot \sin(\text{der})} \quad \text{où}$$

K est un coefficient variant entre 25 et 40

L est la longueur à la flottaison

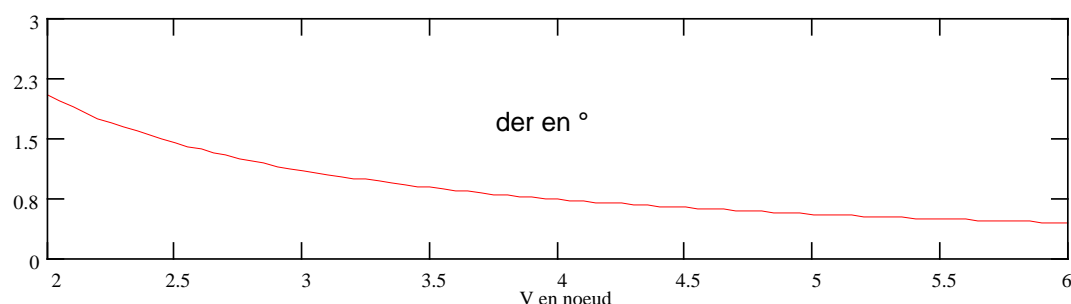
T est le tirant d' eau

la carène du navire étant un profil épais on adopte K = 25.

Tous les éléments du phénomène étant en place je peux maintenant déterminer l'angle de dérive der en remontant le raisonnement précédent :

$$\text{der} = \arcsin \left(\frac{0,2}{\frac{K.L.T.V^2}{FT \cdot \cos(\beta)} - 0,3} \right)$$

soit pour la plage de vitesse étudiée :



VIII.4- TRAINÉE INDUITE PAR LA DÉRIVE

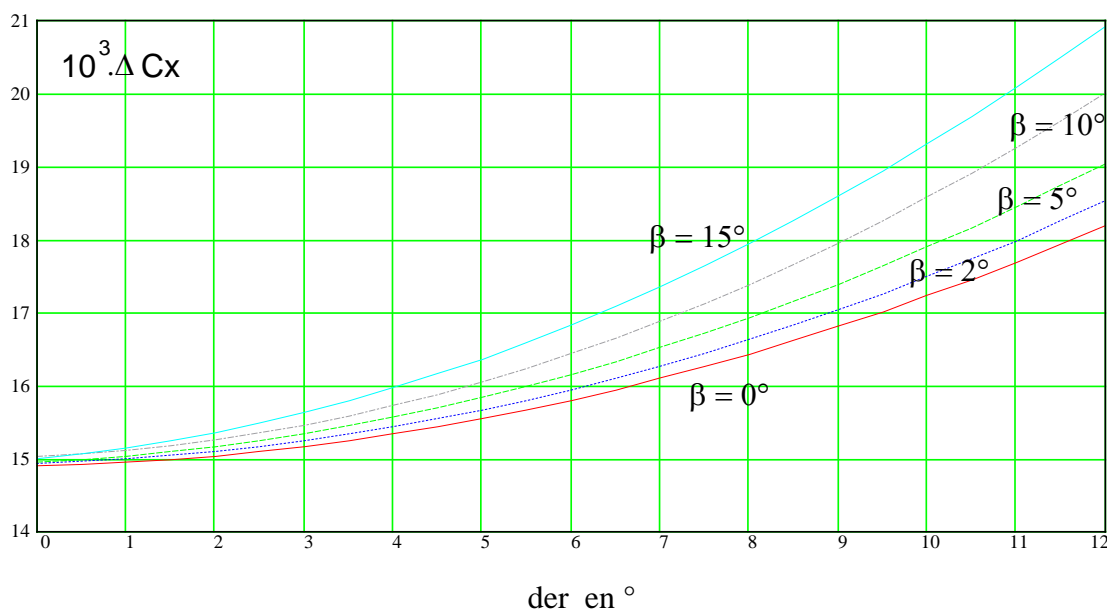
La résistance hydrodynamique de dérive RD a aussi une composante sur l'axe longitudinal du navire. Elle produit un supplément de traînée, appelée *traînée induite* et notée ΔR . Son intensité est décrite, elle aussi, par un coefficient sans dimension ΔCx :

$$\Delta R = \frac{1}{2} \Delta Cx \cdot \rho_{eau} \cdot L \cdot T \cdot V^2$$

Des essais menés au Bassin d'essais de carènes de Paris sur un navire de commerce à propulsion assistée par le vent³ montrent que l'influence, sur ΔCx , de la gîte β est beaucoup plus faible que celle de la dérive der. Les résultats sont présentés ci-dessous :

²Devauchelle, op. cit.

³F.Faury, A.Castetz et J.E.Enault, op. cit.



J'ai converti ces mesures en polynômes, identifiés par la méthode des moindres carrés :

$$\Delta Cx = (a + b.der + c.der^2)10^{-3} \text{ avec}$$

$$a = 14,9211 + 0,0073.\beta$$

$$b = 0,0252 + 0,0053.\beta$$

$$c = 0,0203 + 0,0008.\beta$$

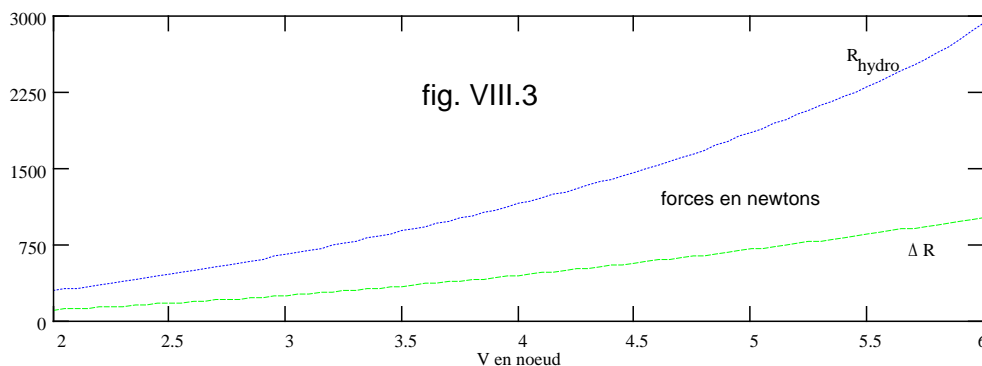
A partir de là on peut calculer la traînée induite sur toute la plage de vitesse. Les valeurs obtenues ont été reportées dans le graphique de la résistance hydrodynamique totale (fig. VIII.3).

VIII.5- RÉSISTANCE HYDRODYNAMIQUE

La résistance opposée par la mer dans des conditions réelles de navigation a été étudiée au chapitre consacré à la propulsion par aviron. Elle est définie fondamentalement par la résistance de remorquage en eau calme R et augmentée des influences de l'état de la mer et des salissures sur la coque. Il faut lui ajouter ici la traînée induite par la dérive. D'où :

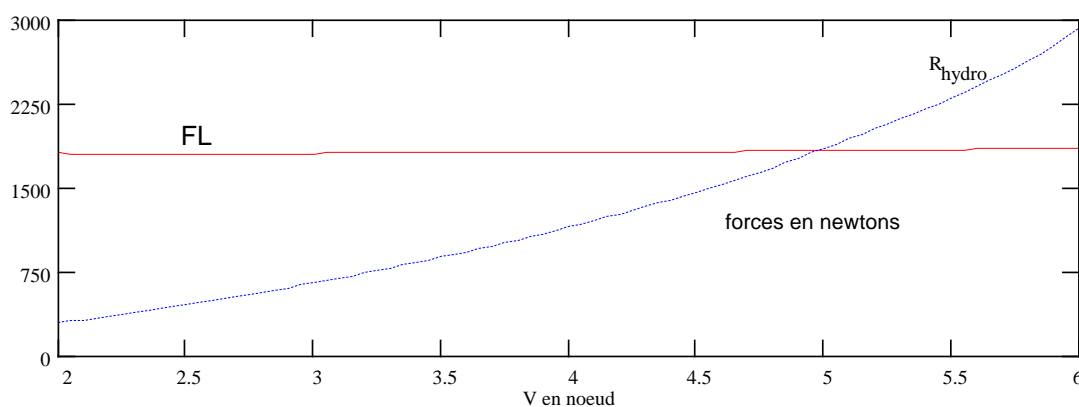
$$R_{hydro}(V) = R(V).(1 + C_{salissure} + C_{mer}) + \Delta R(V)$$

Ses valeurs, calculées là encore avec une coque supposée propre et avec ici $C_{mer} = 0,341$, sont données ci-dessous. On observera la faible part prise par la traînée induite :



VIII.6- VITESSE D'ÉQUILIBRE

Le navire est en propulsion rectiligne uniforme lorsque la résistance hydrodynamique R_{hydro} , croissante avec la vitesse, devient égale à la force aérodynamique propulsive FL, elle même peu variable. L'équilibre est donc assuré et la vitesse correspondante se lit facilement sur le graphique suivant :



Si on revient sur les différentes courbes établies précédemment en y lisant les valeurs correspondantes à cette vitesse d'équilibre on détermine complètement (cf annexe 19) le régime de fonctionnement du navire correspondant aux conditions de chargement du navire, aux conditions météorologiques et à la méthode C de réglage de la voile soit :

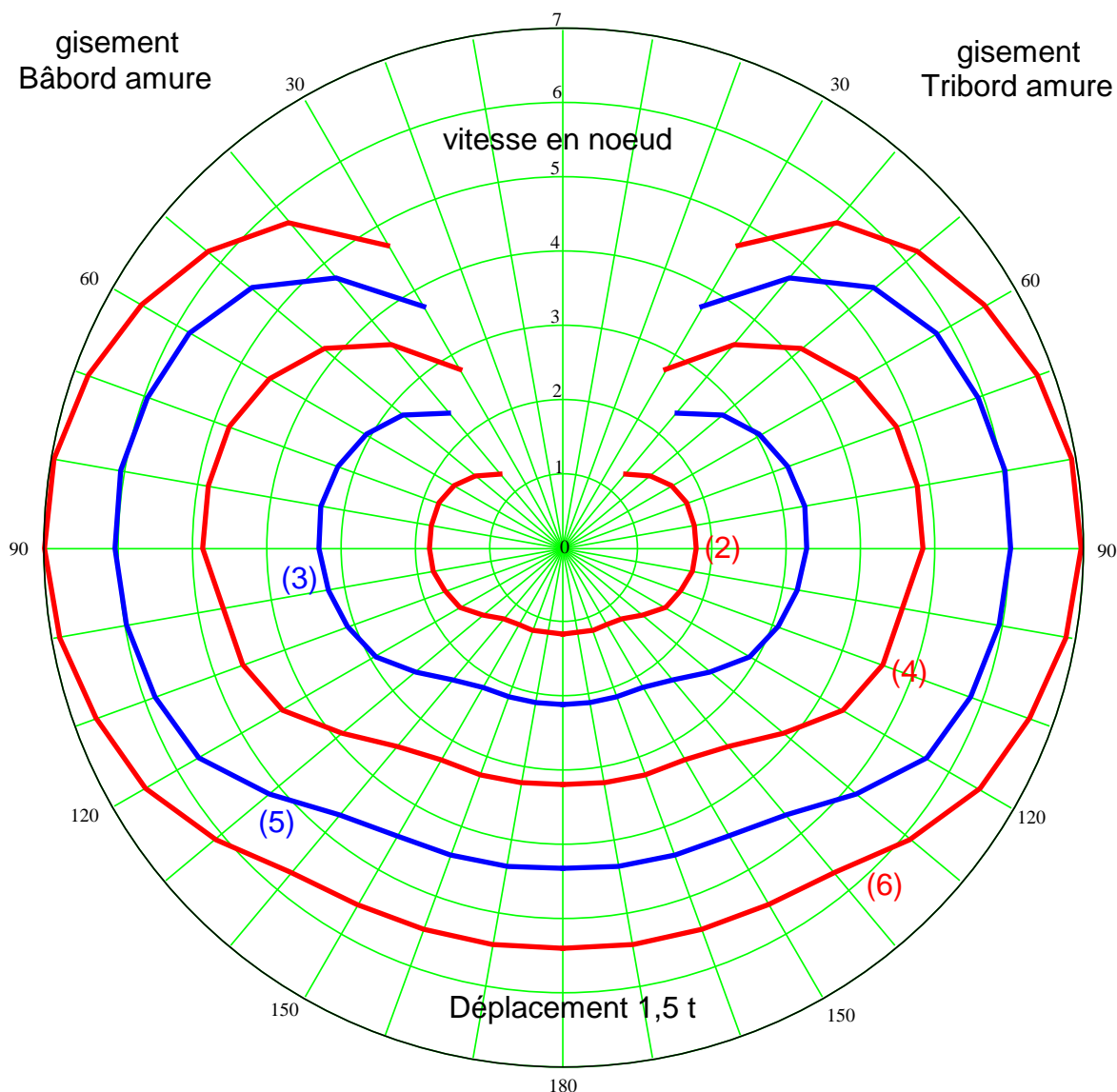
déplacement $P = 1,3 \text{ t}$ force du vent $B = 4$ gisement $\gamma_r = 90^\circ$

d'où

vitesse $V = 5 \text{ nd}$ gîte $\beta = 3^\circ$ dérive $der = 1^\circ$

VIII.7- POLAIRE DE VITESSE DU NAVIRE KYRENIA II

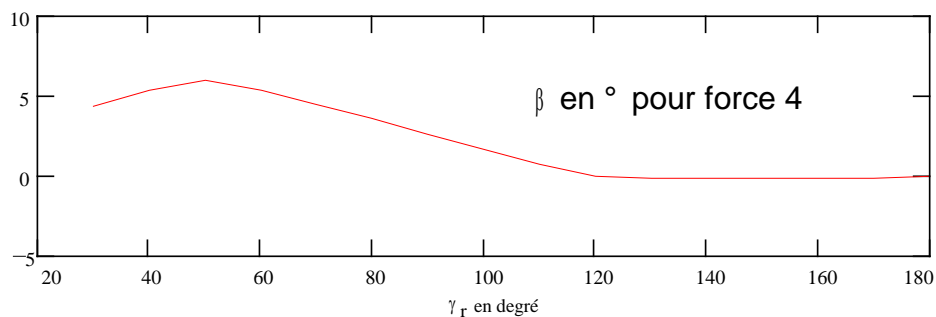
Si on répète la même procédure de calculs pour plusieurs valeurs du gisement du vent réel on obtient alors les régimes de fonctionnement correspondants du navire. En particulier si on porte les valeurs de vitesse du navire, en fonction du gisement γ_r du vent réel, dans un repère polaire la courbe obtenue (ici la courbe 4) s'appelle la *polaire de vitesse du navire*. Elle est bien évidemment symétrique par rapport à l'axe longitudinal et relative à la force de vent réel adoptée initialement et au déplacement du navire.



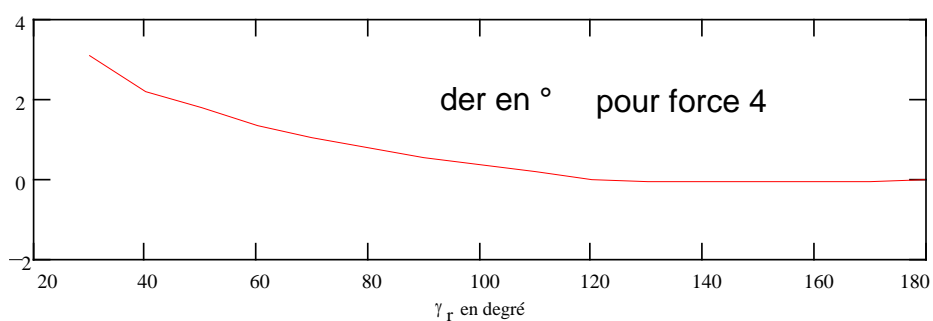
Cette courbe synthétique a été élaborée en appliquant toujours la méthode C de réglage du gréement consistant à garder la vergue transversale le plus longtemps possible puis à la maintenir à l'angle limite de décrochage par rapport au vent apparent. Une première version de cette étude, consacrée à l'épave n°9, avait déjà montré que la polaire issue de la méthode de maximisation de la composante propulsive était quasiment identique à celle-ci. Celle de la méthode B était plus petite car la traînée induite due à la dérive, que l'on a voulu minimiser au prix d'une baisse de puissance propulsive, a finalement peu d'ampleur. Ce résultat se conserve d'une façon générale. En effet si l'exemple numérique du § VII.10 a bien montré des différences entre les forces propulsives FL relatives à ces deux options (environ 180 newtons), compte tenu de l'allure de la courbe de résistance hydrodynamique cela se traduit dans cette plage de valeur de force par un écart négligeable en vitesse.

Cette constatation montre tout l'intérêt de l'option C tant en simplicité du calcul que, surtout, en efficacité et simplicité du réglage du gréement. Elle a donc de forte chance d'être la méthode employée par les équipages de navires équipés d'une voile carrée. On observera de plus que cette polaire permet de conclure que le navire étudié peut, en théorie, remonter au vent de façon non négligeable.

Les autres caractéristiques de fonctionnement du navire peuvent aussi être rassemblées dans des graphiques, par exemple pour la gîte :



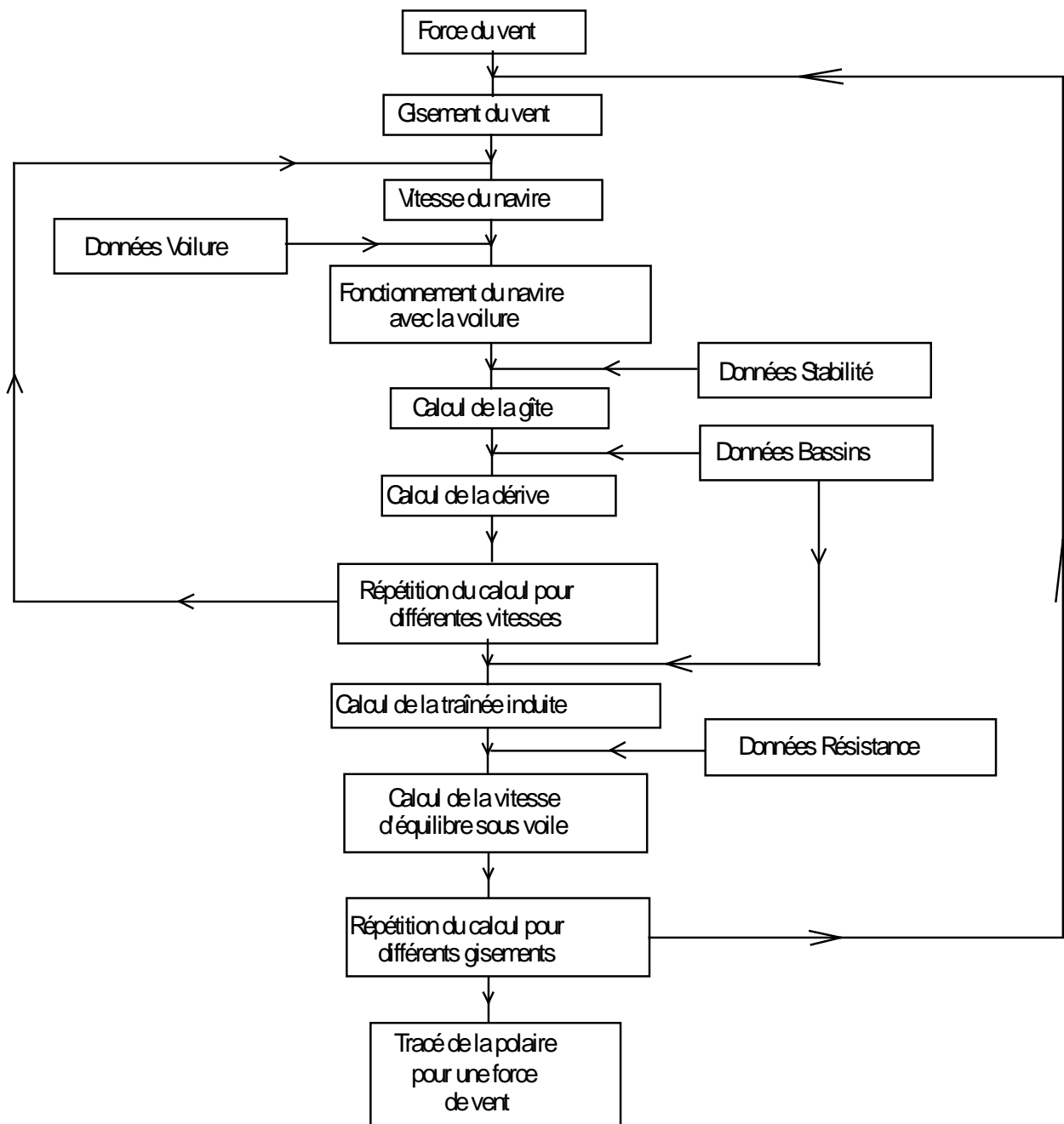
et pour la dérive :



VIII.8- SCHEMA DES CALCULS

En résumé la démarche suivie, logiquement et physiquement, est représentée par le schéma de la page suivante. Il convient alors de répéter toute cette séquence de calculs pour chacune des forces de l'échelle Beaufort et d'élaborer ainsi la collection des polaires de vitesse du navire (courbes (2) à (6), qui décrivent globalement ses performances⁴.

⁴On le voit cela représente beaucoup de calculs et là encore un logiciel scientifique puissant, comme MathCad, est indispensable. Mais ce n'est qu'un outil et non l'ouvrier, tous les défauts et qualités de la méthode reposent sur l'analyse du problème et la formulation d'une solution adaptée.



Méthode de calcul de la polaire de vitesse

VIII.9- COMPARAISON AVEC LES ESSAIS DE KYRENIA II

Revenons aux voyages d'expérimentation menés entre la Grèce et Chypre. Leur compte rendu ⁵ est, je l'ai déjà mentionné, assez vague et l'analyse en est très délicate. J'ai essayé dans le tableau ci-dessous d'isoler des tronçons effectués sous voile dans des conditions explicites de vent et d'allure, en indiquant lorsqu'elles sont connues les distance ou durée de façon à pouvoir juger de la pertinence des données :

Voyage	Etape	Distance ou Durée	Force Beaufort	Allure	Vitesse mesurée	Vitesse prédite
aller	1	?	4-6	grand largue	5	4,5
"	1	?	6	près	4,4	5,8
"	2	26 MM	4-6	travers	4,1 ⁶	6
"	5	?	3	grand largue	3	2,5
"	5	?	3-4	largue	3-4	3,8
"	7	13 MM	2-3	grand largue	3,25	2
retour	1	?	6	surf	12	hors du modèle
"	2	3 h	8	près	10	8,4
"	3	2 h	2	près	2	1,8

Le constat est assez clair : les éléments fiables de comparaison ne sont pas très nombreux mais dans l'ensemble la prédiction est bonne avec une surévaluation au près et un déficit au portant. Ces deux défauts s'interprètent en revenant à la forme de la voile adoptée dans les calculs : faute de polaire relative à une vraie voile carrée j'ai dû adopter celle d'une plaque rigide à simple courbure qui a forcément moins de creux et de résistance aérodynamique aux grandes incidences et une meilleur attaque aux faibles incidences. Une polaire de voile plus adaptée aurait abouti à des polaires de vitesse du navire présentant plus d'amplitude aux allures portantes et un effondrement plus brutal au près ⁷. Cette observation ne remet pas en cause la méthode de prédiction développée ici mais montre tout l'intérêt qu'il y aurait à mener des études expérimentales sur des voiles carrées pour améliorer les résultats.

⁵M.Katzef, An analysis of the experimental voyages of Kurénia II, op. cit.

⁶La voile était arrisée de moitié.

⁷Ce que l'on constate sur les polaires expérimentales de la trirème *Olympias* obtenues par Coates et al.

TROISIÈME PARTIE

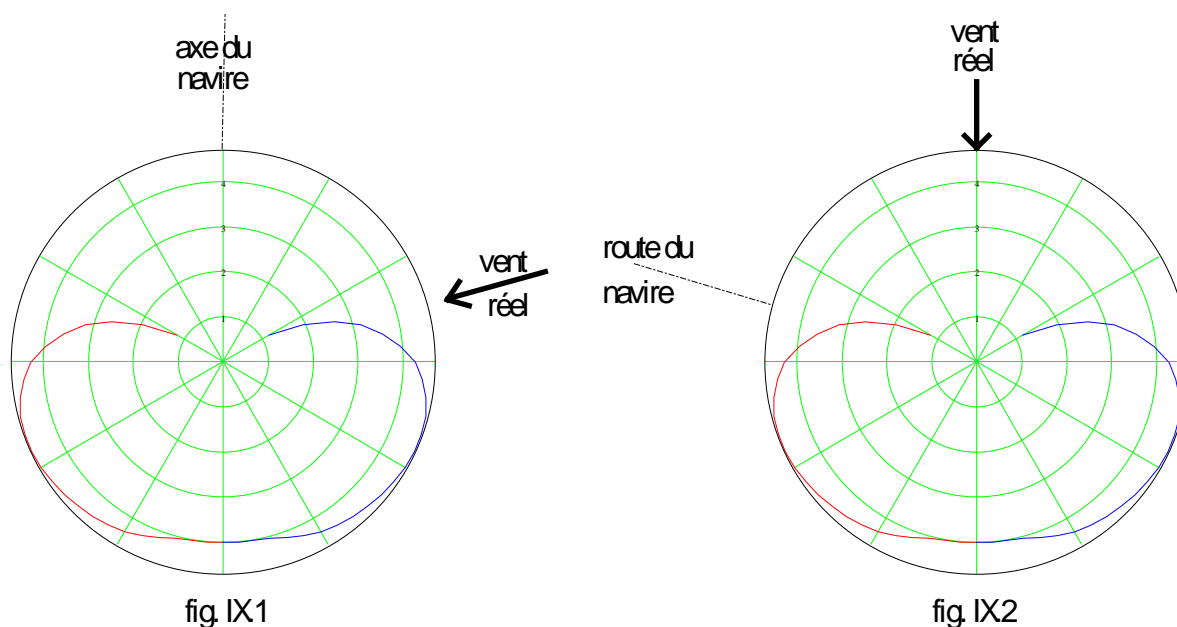
EXPLOITATION DU NAVIRE

LA NAVIGATION DU NAVIRE À VOILE

La source d'énergie du voilier qu'est le vent varie avec le lieu et fluctue dans le temps. Pour assurer son déplacement sur une route voulue le navigateur doit optimiser l'utilisation de son navire. Le domaine correspondant de l'art de naviguer s'appelle la navigation météorologique. Il est maintenant fort développé conceptuellement et sophistiqué dans sa mise en œuvre, mais j'exposerai ici une version simple et suffisante pour cette étude [Bressan, 1970].

IX.1- LA POLAIRE DE VITESSE SURFACE

La courbe établie au chapitre précédent donne en principe, pour une force de vent donnée, la vitesse du navire par rapport à l'eau en fonction de la direction du vent réel par rapport à la route suivie à la surface. Cette direction ne coïncide pas avec l'axe du navire et l'écart constitue justement sa dérive. Mais cet angle est faible comme il a été vu et sera négligé dans la suite de l'exposé. L'interprétation habituelle de cette courbe consiste donc à y lire la vitesse surface en fonction du gisement du vent réel (fig. IX.1).



Mais il est aussi possible de lire cette courbe pour en déduire la vitesse surface en fonction de l'orientation de la route surface par rapport au vent (fig. IX.2). Les deux figures ci-dessus illustrent ces deux interprétations sur le même exemple d'un vent à 75° sur tribord. Par la suite je ferai usage indifféremment de ces deux significations.

Selon une approche plus mathématique on peut dire aussi que cette courbe est l'hodographe du mouvement surface. C'est à dire le lieu des extrémités du vecteur vitesse ou encore le lieu des points atteints en route directe au bout d'une heure.

IX.2- LE LOUVOYAGE

Lorsque le navire suit successivement deux routes, la première à la vitesse et direction OA pendant une fraction λ de l'heure et la seconde à la vitesse et direction OB le reste de l'heure, la position Q atteinte se situe sur le segment AB :

$$o\vec{P} = \lambda.o\vec{A}$$

$$P\vec{Q} = (1 - \lambda).o\vec{B}$$

les triangles OAB et PAQ
sont semblables et Q est entre A et B

le vecteur $o\vec{Q}$ est la vitesse moyenne

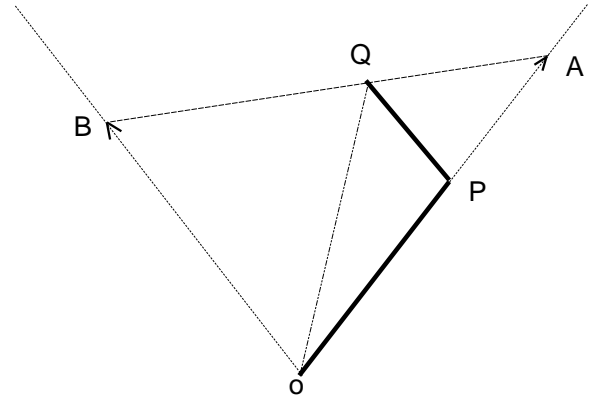


fig. IX.3

Cette situation se trouve naturellement lorsque le navigateur veut suivre une route trop près du vent. Il doit alors naviguer suivant les directions définies par les points extrêmes avant de la polaire surface. C'est ce changement d'amures qui constitue le *louvoyage*.

IX.3- L'ISOCHRONE SURFACE

Si on trace sur la polaire la tangente perpendiculaire à la direction du vent elle définie par ses points de contact les direction OA et OB du meilleurs près. Sur l'exemple de la figure IX.4 elles se situent à 70° du vent et la vitesse surface est alors d'environ 2,5 nd.

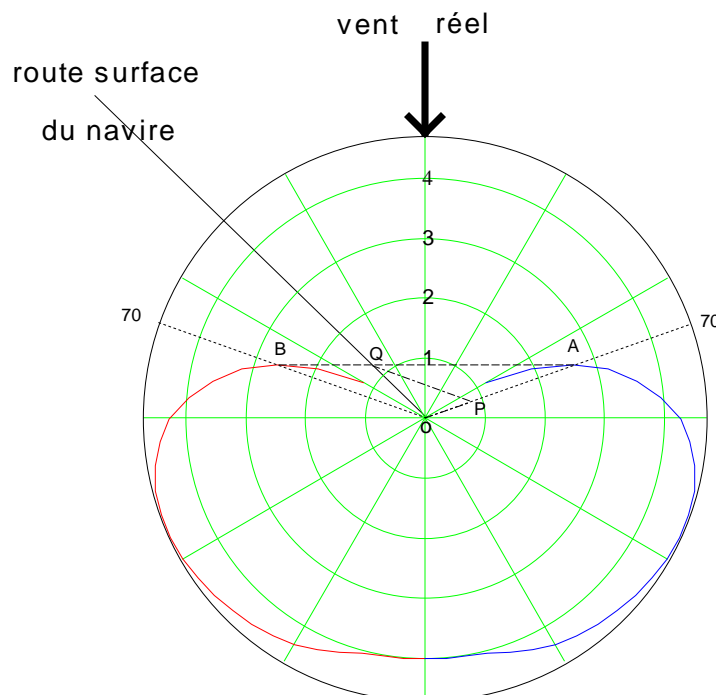


fig. IX.4

Pour suivre une route située dans le cône de louvoyage (ici à environ 60° du vent) le navigateur devra suivre la route bâbord amure OA pendant la fraction OP/OA du temps (soit ici 30%) et la route tribord amure OB pendant la fraction restante PQ/OB (70%). Finalement la vitesse surface moyenne sur cette route est donnée par OQ (ici 1,3 nd).

La courbe formée du segment tangent AB et de la portion de la polaire extérieure au cône de louvoyage constitue l'ensemble des points les plus éloignés de l'origine, dans quelque direction que ce soit par rapport au vent, que l'on puisse atteindre sur l'eau (compte non tenu du courant) dans l'unité de temps et dans des conditions de navigation constantes (force du vent, état et direction de la mer). Elle porte le nom *d'isochrone surface*.

IX.4- LE PROBLEME DE LA TENUE DU CAP

Tout l'exposé précédent repose sur l'hypothèse que le cap et donc la route surface sont maintenus constants pendant la navigation. La trajectoire alors suivie par le navire est une courbe tracée sur la sphère terrestre qui porte le nom de *loxodromie*. Sauf cas exceptionnel ce n'est pas la trajectoire la plus courte reliant deux points. Elle est cependant l'outil de travail quotidien du marin car la plus facile à réaliser en mer et à tracer sur le canevas Mercator. Dans ce système de projection de la sphère réalisé vers 1569 la loxodromie est en effet représentée par une droite.

La tenue du cap est faite traditionnellement à l'aide du compas, magnétique ou gyroscopique, mais la boussole n'est apparue en Europe que vers 1186 [Needham]. Il se pose alors le problème fondamental de savoir si les navigateurs de l'antiquité avaient la capacité de maintenir un cap et selon quel procédé.

On peut envisager spontanément plusieurs hypothèses, toutes spéculatives. Par exemple les vents locaux sont stables, bien distincts et identifiés (zéphyr, borée, notos) et ces navigateurs maintiennent un gisement constant aux risques de toutes les fluctuations météorologiques. L'astronomie étant déjà développée à l'époque, l'usage d'un gnomon ou d'un polos¹ peut donner une direction mais avec une sensibilité aux mouvements de plate-forme du navire. Des auteurs classiques comme Homère (Odyssée) indiquent des références, seulement qualitatives, aux astres. Une approche plus réaliste consiste aussi à faire appel aux travaux d'ethnologie concernant les populations pratiquant une navigation rustique.

Ce problème est du plus haut intérêt et sa nécessaire résolution constitue à elle seule un vaste champ de réflexion et de recherche qui dépasse l'objet de mon étude. Dans la suite je suppose donc acquise cette tenue du cap. Le processus de navigation météorologique étant une optimisation de la vitesse du navire la valeur qui sera déterminée plus loin constitue une valeur maximale de celle-ci et donc fournira ensuite une valeur minimale de la durée du trajet.

IX.5- LA VITESSE DU NAVIRE SUR LE FOND

Il s'agit maintenant de prendre en compte le courant. C'est une nécessité théorique mais de plus son influence est sensible étant donné la faible vitesse surface des navires antiques. La détermination de la *vitesse fond* sur une route fond imposée et avec une vitesse surface donnée constitue un problème des plus

¹Dont la présence à bord de la Syracusia de Hiéron est attestée par Moschion.

classique et traité dans tous les ouvrages de navigation. Il est désigné sous l'appellation de problème inverse de l'estime la vitesse surface étant connue. Je rappelle brièvement ici la méthode géométrique de résolution :

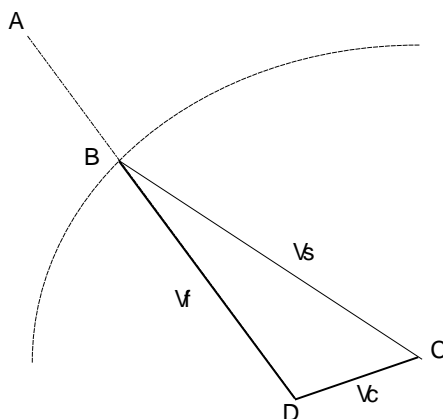


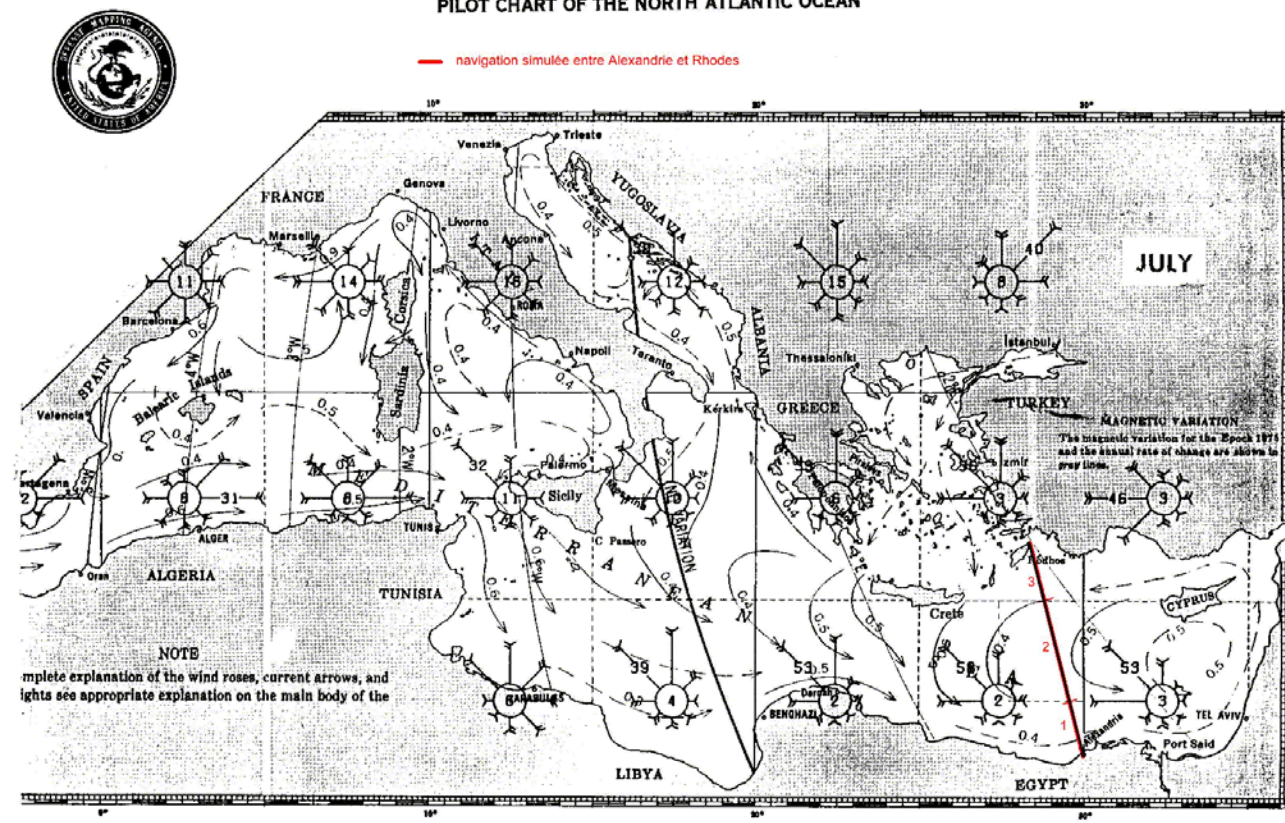
fig. IX.5

Le raisonnement est fait en projection de Mercator et la construction menée sur la base de 1 heure en supposant constant les éléments de l'estime (courant, vitesse et cap). Partant des points de départ D et d'arrivée A on trace la droite représentant ainsi la loxodromie à suivre c'est à dire la route fond. Depuis le point D on porte un vecteur DC représentant à l'échelle de la carte le vecteur courant V_c . Depuis le point C pris comme centre on trace le cercle de rayon égal, à l'échelle de la carte, à la vitesse surface V_s . Le point d'intersection B avec la route fond définit l'extrémité du vecteur vitesse fond V_f qu'il suffit de mesurer, à l'échelle de la carte.

IX.6- LES DONNÉES CLIMATIQUES SUR UNE RÉGION

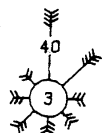
La démarche que j'ai exposée vise à déterminer la vitesse fond et donc la durée d'un voyage effectué par un navire à voile antique. Elle suppose la connaissance des vents et des courants régnants dans les zones de navigation auxquelles on s'intéresse. Ces informations saisonnières sont recueillies et rassemblées par les services hydrographiques ou météorologiques des grandes nations maritimes et des pays bordant la Méditerranée. C'est ainsi qu'on les trouvera auprès du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) dans ses Instructions Nautiques et aussi auprès du Defense Mapping Agency (USA) sous la forme des Pilot Charts. J'ai joint un extrait de ce dernier document couvrant la Méditerranée avec les informations météo-océanographiques relatives au mois de juillet, ainsi que les explications officielles permettant de les exploiter :

PILOT CHART OF THE NORTH ATLANTIC OCEAN

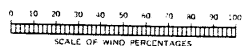


EXPLANATION OF WIND ROSES

PREVAILING WINDS AND CALMS.—The wind rose in blue color is located in the center of each 5° square where there was sufficient data. The rose shows the distribution of the winds that have prevailed in the area over a considerable period. The wind percentages are summarized for the eight points and calm. The arrows fly with the wind indicating the direction from which the wind blew. The length of the shaft, measured from the outside of the circle using the scale below, gives the percent of the total number of observations in which the wind has blown from that direction. The number of feathers shows the average force of the wind on the Beaufort scale. The figure in the center of the circle gives the percentage of calms. When the arrow is too long to fit conveniently in the 5° square, anything over 29 percent, the shaft is broken and the percentage is indicated by numerals.



FOR EXAMPLE.—The sample wind rose should read thus: In the reported observations the wind has averaged as follows: From N. 40 percent, force 7; from N.E. 19 percent, force 7; from E. 6 percent, force 5; from S.E. 5 percent, force 5; from S. 5 percent, force 5; from S.W. 9 percent, force 5; from W. 8 percent, force 5; from N.W. 5 percent, force 4; calms 3 percent.



OCEAN CURRENTS

The arrows on the chart indicate the prevailing direction, and the numerals show the mean current speed in knots. The broken arrows indicate the probable surface current flow where data are sparse, but more importantly they indicate directional variability such as in the Sargasso Sea, in regions of entrainment between currents setting in opposing directions, in nearshore tidal regions, and in the northern seas where currents are generally weak and easily influenced by winds.

En particuliers les données mensuelles de vent sont exprimées, pour des zones carrées de 5°, sous la forme de roses : les flèches indiquent la direction intercardinale la plus proche d'où vient le vent. La longueur de la flèche, mesurée depuis le centre du cercle, donne le pourcentage du nombre total d'observations. Quand la longueur complète ne peut être tracée le pourcentage est indiqué. Les barbules expriment la force moyenne du vent dans l'échelle Beaufort. Le nombre au centre de la rose indique le pourcentage de calmes.

Dans la perspective d'appliquer complètement la méthode sur un cas de calcul j'ai considéré les zones suivantes et converti leurs données en tableaux :

Vent	Force	Fréquence
N	3	15%
NE	3	1%
E	3	1%
SE	3	1%
S	3	1%
SW	3	1%
W	3	20%
NW	4	58%
	calmes	2%

Vent	Force	Fréquence
N	4	20%
NE	4	8%
E	3	3%
SE	3	3%
S	3	2%
SW	3	3%
W	4	22%
NW	4	36%
	calmes	3%

Les données de courant, stables dans le temps, sont elles représentées par une flèche donnant en un lieu la direction vers laquelle il s'écoule et un nombre donnant la vitesse moyenne en noeud. Les variations géographiques sont importantes et il convient de faire un découpage plus fin des cases de 5° de coté, par exemple en 4 quadrants. Les données graphiques peuvent alors elles aussi être traduites en tableau :

Zone	Quadrant	Vitesse	Direction
2	NE	0,5	210
2	NW	0,5	180
2	SW	0,4	70
2	SE	0,4	110

Les courants de la zone 3 sont incertains et faibles (cf explications officielles) et je les négligerai par la suite. J'ajouterai une mise en garde : Il faut être conscient que les données climatiques contemporaines peuvent être sensiblement différentes avec le temps qui régnait il y a plusieurs dizaines de siècles en raison des fluctuations naturelles à long terme ou des influences anthropiques. Une information significative sur ce point pourrait être apportée par les modèles récents mis au point par les climatologues et exploités de façon rétrograde pour de la paléo-climatologie.

IX.7- ÉTUDE D'UN VOYAGE

Afin de montrer d'un bout à l'autre toutes les étapes de la démarche de calcul de la durée d'un trajet je m'intéresse à la traversée d'Alexandrie à Rhodes en juillet et j'exploite les polaires de vitesse établies au § VIII.7. Il faut commencer par tracer la route fond sur une carte. On en déduit par mesures la distance et l'angle de route loxodromiques :

PORT	LATITUDE	LONGITUDE
Alexandrie	31°13' N	29°55' E
Rhodes	36°26' N	28°14' E

TRAJET	DISTANCE	ROUTE
Alexandrie à Rhodes	324 M	345°

Cette route traverse le zone 1, quadrants SE et NE, et la zone 2 quadrant SE. Le tronçon situé dans chaque secteur fait l'objet d'un calcul détaillé dont les étapes sont décrites ci-après :

1) Pour chacune des directions de vent on compare celle-ci avec la route fond pour en déduire le gisement du vent. En toute rigueur c'est par rapport à l'axe du navire qu'il a été défini au § IX.1 mais à ce stade du calcul on ne connaît ni le cap ni la route surface. Néanmoins il ne faut pas oublier que les directions de vent sont approximatives et que les cap, route surface et route fond diffèrent de moins d'une dizaine de degrés.

2) Toujours pour chaque direction de vent on lit sur l'isochrone surface correspondant à sa force de vent, et selon la figure IX.4, la vitesse surface atteinte en route directe si c'est possible ou en cas de louvoyage² la vitesse moyenne à ce vent. D'où le tableau suivant pour le premier tronçon :

Tronçon	Zone traversée	Direction du vent	Force Beaufort	Fréquence	Gisement du vent	Route surface	Vitesse à ce vent	Vitesse surface moyenne
1	1 SE	N	3	15%	15° Td	louvoyage	1,8	
		NE	3	1%	60° Td	directe	3,1	
		E	3	1%	105° Td	directe	3,2	
		SE	3	1%	150° Td	directe	2,2	
		S	3	1%	165° Bd	directe	2,1	
		SW	3	1%	120° Bd	directe	3,0	
		W	3	20%	75° Bd	directe	3,3	
	NW	4	58%	30° Bd	louvoyage	3,1	2,9	

3) Chaque direction de vent se réalise avec une probabilité empirique p_i , exprimée en %, et entraîne une vitesse surface V_i . La vitesse surface moyenne que l'on peut espérer, à la route fond de départ et pendant ce mois, est obtenue en faisant la moyenne des valeurs de vitesses pondérées par leurs probabilités :

$$\bar{V}_1 = \frac{\sum_i p_i \cdot V_i}{100}$$

4) Le deuxième tronçon étant dans la même zone relève du même tableau. Pour le troisième tronçon cela donne cette fois-ci :

Tronçon	Zone traversée	Direction du vent	Force Beaufort	Fréquence	Gisement du vent	Route surface	Vitesse à ce vent	Vitesse surface moyenne
3	2 SE	N	4	20%	15° Td	louvoyage	2,8	
		NE	4	8%	60° Td	directe	4,6	
		E	3	3%	105° Td	directe	3,2	
		SE	3	3%	150° Td	directe	2,2	
		S	3	2%	165° Bd	directe	2,1	
		SW	3	3%	120° Bd	directe	3,0	
		W	4	22%	75° Bd	directe	4,8	
	NW	4	36%	30° Bd	louvoyage	3,4	3,5	

5) Chaque vitesse surface moyenne sur un tronçon est composée avec le courant correspondant et fournit la vitesse fond en noeud sur ce tronçon. A partir de la longueur en milles de celui-ci on en déduit la durée en jour du trajet sur ce tronçon et finalement la durée du voyage :

Tronçon	Longueur en mille	Zone traversée	Vitesse surface	Vitesse courant	Route courant	Vitesse fond	Durée du tronçon	Durée du voyage
1	82	1 SE	2,9	0,4	70	2,9	1,2	
2	153	1 NE	2,9	0,5	180	2,4	2,6	
3	89	2 SE	3,5			3,5	1,1	

Le résultat ainsi obtenu correspond à la durée moyenne optimale, en jour, que l'on peut espérer mettre en juillet pour aller directement d'Alexandrie à Rhodes avec Kyrénia II. Elle est optimisée au niveau de la gestion du louvoyage qui représente sur ce trajet une probabilité d'occurrence de 63% dans la zone sud et 56% dans la zone nord. Un choix moins efficace, en direction ou durée, des bords à tirer se traduirait surtout par une trajectoire oscillant autour de la route directe. L'alternative serait plutôt de choisir une route

²Défini, pour chaque polaire, par une route dans le secteur OAB de la figure IX.4.

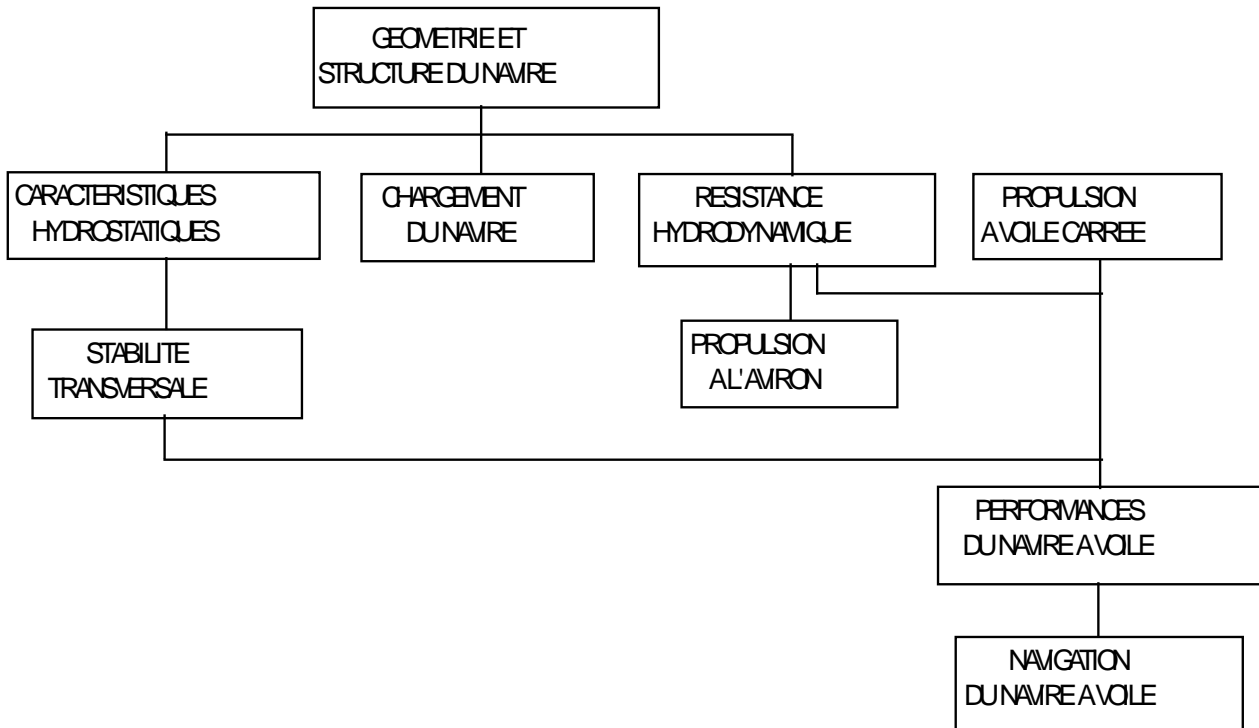
au NNE jusqu'à la côte puis de la longer vers l'Ouest. La distance est bien plus grande mais il suffit d'appliquer la méthode explicitée dans ce chapitre pour calculer la durée de cet autre trajet et voir si cette option était tentante pour les navigateurs anciens.

Enfin, si on ramène le résultat trouvé précédemment (4,9 jours) à une vitesse moyenne sur la trajet Alexandrie-Rhodes on aboutit à 2,75 noeuds qui est très proche des 2,85 noeuds de moyenne générale obtenue au cours des voyages d'essai de Kyrénia II³. Cette vitesse moyenne se situe bien aussi dans la liste, que dresse Casson, des vitesses obtenues dans des traversés menées avec des vents défavorables.

³M.Katzef, op. cit.

CONCLUSION

La reconstitution des caractéristiques nautiques du navire a été menée en abordant les aspects statiques et dynamiques de son comportement à la mer et en suivant plusieurs étapes qui s'organisent comme l'indique le schéma ci-dessous :



Elle permet de répondre aux questions habituelles :

- quel est le tirant d'eau à vide de ce navire ? - Quelle est la charge transportée pour un franc-bord donné ?
- Quelle est la stabilité du navire ? - Quelle vitesse atteindrait-il avec une propulsion humaine ou vélique ?

mais aussi à d'autres questions :

- Comment estimer les caractéristiques hydrostatiques d'une nouvelle épave ? - Quelle est l'influence de l'état de la mer sur les performances du navire ? - Comment faut-il régler les voiles ? - Comment se comporte le navire en navigation ? - Combien de temps dure un voyage ?..

Beaucoup de ces questions ne sont pas nouvelles et ont déjà reçues des réponses dans le passé avec des fondements divers. La plus part des questions pourraient être résolues par la construction de répliques mais ces dernières représentent un investissement lourd et la décision de reconstruction devrait être précédée d'une telle étude technique [Marsden, 1993]. Plus généralement l'estimation quantitative des performances d'un navire devrait devenir systématique et routinière au même titre que l'analyse dendrochronologique par

exemple. Et c'est justement une méthodologie que j'ai cherché à formuler ici et que je propose à l'archéologue naval. Elle n'a rien de révolutionnaire d'un point de vue purement technique et d'ailleurs les anglo-saxons sont déjà engagés dans cette voie. Mais elle est originale dans sa formulation globale et fructueuse dans son application thématique. Car il m'a semblé, à l'origine de cette étude, qu'un vaste corpus de connaissances techniques était disponible de nos jours mais insuffisamment exploité par la communauté française.

Une telle démarche suppose évidemment que l'épave étudiée est suffisamment conservée pour permettre la reconstitution des formes qui constituent la donnée fondamentale de la méthodologie proposée ici. Cependant l'approche quantitative et les résultats fournis peuvent aussi servir de guide dans cette reconstitution et tester plusieurs hypothèses [Coates, 1977].

Les estimations élaborées tout au long de cette étude sont conditionnées par des données sur les caractéristiques géométriques, structurales ou matérielles du navire (rugosité de la coque, dimensions de la voile, porosité du tissu, orientation de la vergue, etc.) et aussi par la modélisation des phénomènes physiques et des forces mises en jeu. C'est pourquoi il conviendrait de traiter le cas de plusieurs répliques et confronter les résultats obtenues avec les mesures effectuées par les équipes qui les ont construites ou plus simplement avec les résultats d'essais de modèles en bassin et soufflerie.

Dans tous les cas la méthode est riche d'un potentiel de plusieurs améliorations portant par exemple sur : la prise en compte des efforts longitudinaux aussi bien en eau calme que sur houle, l'acquisition expérimentale et l'exploitation de polaires de véritables voiles carrées, l'existence de plusieurs voiles, l'étude des performances d'une voile latine, la stabilité longitudinale de route... Cela définit, à mes yeux, un vaste programme d'études utiles et même nécessaires qui doit s'enrichir encore de travaux ethnographiques pour trouver, et éventuellement sauvegarder, dans les cultures maritimes encore contemporaines le savoir ancestral en matière de navigation, manoeuvre ou construction du bateau en suivant ainsi les traces de grands devanciers¹.

¹F.E.Paris, *Souvenirs de Marine et Essai sur la Construction Navale des Peuples Extra-Européens*.
J.Neyret, *Les Pirogues Océaniques*.

COMPLÉMENTS

ABRÉVIATIONS

AJA	American Journal of Archaeology
ATMA	Association Maritime Technique et Aéronautique
BAR	British Archaeological Reports (British Series)
BAR-S	British Archaeological Reports (International Series)
CH	Cahiers d'Histoire
ENM	Ecole Nationale de la Météorologie
HIPNT	Hellenic Institute for the Preservation of Nautical Traditions
IJNA	The International Journal of Nautical Archaeology and Underwater Exploration
INA	Institute of Nautical Archaeology Newsletter
ISP	International Shipbuilding Progress
MM	The Mariner's Mirror
NAV-F	Navigation (Paris)
NAV-GB	Navigation (Londres)
NMM	National Maritime Museum, Greenwich
SNAME	Society of Naval Architects and Marine Engineers
Tropis I	Tropis I : Proceedings of the 1st International Symposium on Ship Construction in Antiquity, édité par Tzalas H (Athènes, 1985).
Tropis II	Tropis II : Proceedings of the 2nd International Symposium on Ship Construction in Antiquity, édité par Tzalas H (Athènes, 1987).
Tropis IV	Tropis IV : Proceedings of the 4th International Symposium on Ship Construction in Antiquity, édité par Tzalas H (Athènes, 1991).

BIBLIOGRAPHIE

- AMOURETTI M-Cl, ed : *Le temps de l'Innovation : colloque international sur les techniques et économie antiques et médiévales*. Préactes, Aix en Provence, 1996.
- BASCH L : *Le musée imaginaire de la marine antique*, HIPNT, 1987.
- BLACK E et SAMUEL D : *What were sails made of ?*, MM (1991) vol 77,220.
- BLACK E : *Were are all the sails gone ?*, dans *Tropis IV*.
- BLACKMAN J.J, ed : *Marine Archaeology : Proceedings of the Twentythird Symposium of the Colston Research Society*. Butterworth, Londres, 1971.
- BRESSAN : *Route à durée minimale dans la course ou la traversée à la voile*. NAV-F (1970).
- BROWN W.D : *Parachutes*. Isaac Pitnam, 1950.
- CARRE M.B : *L'épave D du Grand-Ribaud*. *Archéonautica* n°8 (1988).
- CASSON L : *Ships and Seamanship in the Ancient World*. Princeton, 1971.
- CLAUZEL : *Théorie du navire (1ère partie)*, Ecole d'application du génie maritime, 1899.
- COATES J : *Hypothetical reconstructions and the naval architect*, dans Mc GRAIL, 1977.
- COATES J : *Power and speed of oared ships*, dans WESTERDAHL.
- COATES J.F, PLATIS S.K et SHAW J.T : *The Trireme Trials 1988 : Report on the Anglo-Hellenic sea Trials of Olympias*. Oxbow Books, 1990.
- COLES J.M : *Experimental archaeology, theory and principles*, dans Mc GRAIL, 1977.
- CRUMLIN-PEDERSEN O et VINNER M : *Sailing into the past*. The Viking Ship Museum, 1984.
- DEVAUCHELLE P : *Dynamique du navire*. Masson, 1986.

FAURY F, CASTETZ A et ENAULT J.E : Méthode d'estimation des performances et de la rentabilité d'un avant-projet de navire à propulsion assistée par le vent. *ATMA*, 1983.

FENWICK V : *The Graveney boat*. NMM Archaeological series N°3, 1978.

GASSEND J.M : *Le navire antique du lacydon*, Musée d'Histoire de marseille, 1982.

GERRITSMA J, KEUNING J.A & VERSLUIS A : Sailing yacht performance in calm water and in waves, *11th Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, 1993.

GIFFORD E et GIFFORD J : The sailing characteristics of Saxon ships as derived from half-scale working models with special reference to the Sutton Hoo ship. *IJNA*, 24, May, 1995.

GILLMER TH : Authentic replica ships : theory and practice, dans *Tropis II*, 1990.

GRAHAM J.M : Quantitative methods and boat archaeology, dans Mc GRAIL, 1977.

GREENHILL B et MORRISON J : *The Archeology of Boats and Ships*. Conway Maritime Press, 1995.

GUITARD : *Le matériau bois et ses composites*, Cepadues, 1987.

GUTELLE P : *Architecture du voilier* : tome 1, E.M.O.M., 1979.

GUTELLE P : *Architecture du voilier* : tome 2, E.M.O.M., 1987.

HAUSER A : Cours de construction navale, Bernard, Paris, 1886.

HERVIEU R : *Statique du navire*. Masson, 1985.

HOHEISEL W-D : A full scale replica of the Hanse Cog of 1380, dans WESTERDHAL.

HOLTROP J et MENNEN G.G.J : An approximate power prediction method. *ISP* vol 29 (1982).

HUTCHINSON : *Archaeology by experiment*. 1973.

HÜTTE : *Manuel de l'ingénieur, tome 1*. Béranger, 1926.

ISIN Y.A. : *Théorie du navire*, 2 volumes. 2010. (<http://www.academia.edu>)

KATZEV M : A Replica of the Kyrenia Ship. *INA* 7(1) (1980).

KATZEV M et WOMER KATZEV S : KYRENIA II : Research on an ancient shipwreck comes full circle in a full-scale replication, *INA* 13(1) (1986).

KATZEV M : An analysis of the Experimental Voyages of Kyrenia II, dans *Tropis II*.

KATZEV M et WOMER KATZEV S : Voyage of Kyrenia II. *INA Newsletter* 16.1 (1989).

LANDELS J.G : *Engineering in the ancient world*. , 1980.

LARSSON L et ELIASSON R: *Principles of Yacht Design*, International Marine, 2000.

LEPEIX R et DEN HELD H : Prévisions de performances des navires conventionels. *ATMA*, 1993.

MARSDEN P : A hydrostatic study of a reconstruction of Mainz Roman ship 9. *IJNA*, 22(2), 1993.

MAYENCON : *Météorologie marine*. EMOM, 1982.

Mc GRAIL S : Navigational techniques in Homer's Odissey , dans *Tropis IV*.

Mc GRAIL S : Searching for patterns among the logboats of England and Wales, dans Mc GRAIL., 1977.

Mc GRAIL S : Aspects of expérimental boat archaeology, dans Mc GRAIL, 1977.

Mc GRAIL S : *Sources and techniques in boat archaeology*. NMM Archaeological series N°1, 1977.

McGRAIL S : Replicas, reconstructions and floating hypotheses, *IJNA*, 21 (4), 1992.

MEIJER F : *A history of seafaring in the classical world*. Croom Helm, 1986.

MORRISON J.S et COATES J : An Athenian Trireme Reconstructed : The British Sea Trials of Olympias, 1987. BAR-S486, 1989.

NEEDHAM J : *Science and Civilisation in China*, Cambridge, 1971.

PALMER C : Measuring sailing rig performance, dans Crumlin-Pedersen, 1984.

PARIS F.E. : *Essai sur la Construction Navale des Peuples Extra-Européens*, 1841.

PARIS F.E : *Souvenirs de Marine*, 6 vol., 1886-1910.

POMEY P : Principes et méthodes de construction en architecture navale antique. *CH XXXIII*, n°3-4 (1988).

POMEY P et TCHERNIA A : Le tonnage maximum des navires de commerce romains. *Archaeonautica* 2 (1978).

PRANDTL L et BETZ A : *Ergebnisse der aerodynamischen versuchsanstalt zu Göttingen*. Oldenbourg, 1932.

REBUFFET P : *Aérodynamique expérimentale*. Dunod, 1969.

RIVAL M : *La charpenterie navale romaine*. CNRS, 1991.

ROMAN R : *Reconstitution architecturale d'un navire de commerce antique* (mémoire de maîtrise), Université de provence, 1987.

SAUNDERS H : *Hydrodynamics in ship design*. SNAME, 1957.

SEVERIN T : Preliminary report on the Brendan project, dans McGrail, 1977.

SMITT L.W. : Propulsion by sail, dans Crumlin-Pedersen.

SNAME : *Principle of naval architecture*. SNAME, 1967.
STEFFY R : The Kyrenia Ship : An Interim Report on its Hull Construction. *AJA* 89.1 (1985).
STEFFY R : *Wooden ship building and the interpretation of shipwrecks*. Texas A&M university Press, College Station, 1994.
TCHERNIA A, POMEY P, HESNARD A et al : L'épave romaine de la Madrague de Giens. *Gallia* suppl 34, 1978.
TILLEY A : Sailing to windward in the ancient Mediterranean. *IJNA*, vol 23, 4 (1994).
WESTERDHAL Ch, ed. : *Crossroads in ancient shipbuilding*. Oxbow Monograph 40, 1994.
WHITE K.D : *Greek and roman technology*. Thames & Hudson, 1984.
WYLDE SWINY H et KATZEV M : The Kyrenia shipwreck : A fourth-century B.C. Greek merchant ship, dans BLACKMAN pages 339-355.

LEXIQUE Français-Anglais et INDEX

FRANÇAIS	ANGLAIS	Ref. §
aire de la flottaison	waterplane area	II.3, II.7.2
allongement	aspect ratio	VII.4
analyse dimensionnelle	dimensional analysis	V.3
ancree	anchor	
anguiller	limber hole	
appareil à gouverner	steering gear	
arc (déformation de la quille en)	hogging	
arrière, tableau	stern	
arrimer	to stow	
assiette	rake of keel	
avant	bow	
barre	steering wheel	
barre franche	tiller	
barrot	beam	
barrotin, demi barrot	deck stringer	
batayole	bulwark stanchion	
bauquière	shelf timber	
bloc coefficient, coefficient de finesse	block coefficient	II.5.1
bordé en bois	wood planking	
bordé, bordage	planking	
bouchain	round of bilge, bilge plank	
bouge	round of beam, camber	
bras de levier du couple de redressement	righting arm	IV.1
brion	forefoot, sternfoot, round of stern	
caboteur	coaster	
cadène	chain plate	
cale	hold	
calfatage	caulking	
cambuse	store room, food store	
cap	heading	
carène	underwater hull, canoe body	
carlingue	timber ship keelson	
carré	messroom	
carvelle	clout nail	
centre de carène	centre of buoyancy	II.1, II.7.6
centre de dérive	centre of lateral resistance	IV.1, VIII.2
centre de gravité	centre of gravity	III.1, III.2
centre vélique, centre de voilure	centre of effort	VIII.2
chargement (cargaison)	cargo, goods	III.4
chargement (opération)	loading, shipping, shipment	
chavirer	to capsize, to upset	
cheville	tie bolt	
cloison	bulkhead	
coefficient prismatique ou cylindrique	prismatic coefficient	II.5.2
coefficient d'encombrement	stowage factor	III.4
coefficient de frottement	skin-friction coefficient	V.4
coefficient de portance	lift coefficient	VII.2
coefficient de remplissage du maître couple	maximum section coefficient	II.5.3
coefficient de traînée	drag coefficient	VII.2

coefficients de remplissage	hull form coefficients	II.5
construction à clin	clinker planking	
construction à franc bord	carvel planking	
contre arc (déformation de la quille en)	sagging	
coque	hull	
courette	berth	
couple de redressement	hydrostatic righting moment	IV.1
couple dévoyé	cant frame	
couples de tracé, sections transversales	transverse sections	I.1, fig. I.5
courant	current	IX.5
courbe des aires	sectional area curve	II.3
courbe des bras de levier de redressement	righting curve	IV.2
courbes hydrostatiques	hydrostatics curves, curves of form	II.6
coursive	alleyway	
creux sur quille	moulded depth	
cuisine, galère (!)	galley	
déchargement	unloading, unshipment	
décollement des filets fluides	flow separation	VII.3
déplacement en charge	load displacement	III.2
déplacement léger	light displacement	III.2
dérive (due au vent)	leeway	VII.8
dévers	flare, flam	
devis de poids	weight calculation	III.2, III.3
diagramme polaire (d'une aile), polaire	drag polar(of a foil)	IV.3
différence	trim	
distance métacentrique initiale	transverse metacentre height	IV.4
dunette	poop deck, after deck	
échantillonnage	scantling	
échelle beaufort	beaufort wind scale	VII.6
échoué	aground	
emménagements	accomodations	
entrepont	tweendeck	
épave	wreck	
épontille	hold pillar, stanchion	
équilibrer le navire	to trim the ship	
étambot	stern frame, stern post	
étambrais	gallows foot	
état de la mer	sea state	VI.5
étoupe	oakum	
étrave, nez, stene	stem	
facteur de forme de la coque	hull form factor	V.4
flottabilité	buoyancy	
flottaison (surface)	waterplane	II.1
flottaison en charge	deep waterline	
flottaison légère	light waterline	
fond	bottom planking	
force antidérive	keel side force	VIII.2
formule de simpson	simpson's first rule	II.2
franc bord	free board	
gaillard	forecastle	
galbord	galboard	
gisement	relative bearing	VII.6
gîte	heel, list	II.4, VI.1

gouvernail	rudder	
gradient de vent	wind gradient	VII.7
hanches	quarters	
isochrone surface	isochronous distance curve	IX.3
jaugeage	tonnage measurement	II.7.5
joint à clin	lap joint	
joint à franc bord	butt joint	
largeur hors membrure	moulded breadth	
largeur hors tout	overall width, extreme breadth	
ligne d'eau zéro	base line	I.1, I.4
ligne d'eau, flottaison (ligne)	waterline	II.1
lisse	longitudinal	
lisse de pavois	bulwark line, bulwark rail	
livet de pont	deck line, sheer line	
longueur entre perpendiculaires	length between perpendiculars	
longueur hors tout	length overall	
louvoyage	tacking, beating	IX.2
loxodromie	rhumb line	IX.4
maître bau, maître couple	main beam, midship section	
marchandise en vrac	bulk cargo	
marsouin	forward deadwood	
massif	deadwood	
mèche du gouvernail	rudder stock (or shaft)	
membrure	frame	
métacentre transversal	transverse metacentre	II.4, IV.3
mille marin	nautical mile	
moment d'inertie transversal de la flottaison	transverse moment of inertia of the waterplane	II.4, II.7.3
moment inclinant	heeling moment	VIII.2
nable	plug	
navire de commerce	merchant ship	
navire de guerre	warship	
navire de pêche	fishing boat	
navire sans différence	ship on even keel	
navire sur le cul	ship down (or trimmed) by the stern	
navire sur le nez	ship down (or trimmed) by the head	
nœud	knot	
nombre de Froude	Froude number	V.3
nombre de Reynolds	Reynolds number	V.3
œuvres mortes	dead works	
œuvres vives	quick works	
partie maîtresse	parallel body	
passerelle	bridge	
plan des formes	lines, lines drawing	I.1
plan horizontal	half-breadth plan	
plan longitudinal	profile view, sheer plan	
plan transversal	body plan	
plat bord	side deck, walkway	
platine	chine	
poids spécifique	specific gravity, weight density	III.2, III.5
point d'amure	tack	
point d'écoute	outhaul	
polaire de vitesse (d'un voilier)	polar diagram, polar plot (of performance)	VIII.7, IX.1
pont arrière	after deck	

pont avant	foredeck	
pontée	deck load	
porosité	porosity	VII.5
port en lourd	deadweight capacity	III.6
portance	lift, side force	VII.2
poussée d'archimède	uplift, buoyant force	II.1, IV.1
préceinte	belting	
quête (ou élancement) du mât	mast rake	
quille	keel	
rayon métacentrique transversal	height of transverse metacentre above centre of buoyancy	II.4, II.7.7
relèvement	bearing	
rendement	efficiency	VI.3
résistance à l'avancement	hull resistance	V.1
résistance de frottement	frictional resistance	V.4
résistance de l'air	air resistance	VII.2
résistance de rencontre, résistance de vague	wave making resistance	V.5
résistance due aux vagues	added resistance due to waves	VI.5
route	course	
route fond	over bottom course	VII.6
route surface	through water course	VII.6
rugosité	roughness	V.7
safran	rudder blade, rudder plate	
salissure de coque	fouling	VI.3
serre	stringer	
sillage	wake, track	
similitude mécanique	similitude	V.3
statique du navire	stability	Intro, IV.1
surface antidérive	lateral area of canoe body	VIII.2
surface mouillée	wetted surface	II.3, II.6, II.7.8
surface portante	lifting surface	VII.4
surface vélique, voilure	sail area	VII.4
talon d'étambot	heel of stern post	
timonerie	wheelhouse	
tirant d'eau	draught, draft	
toile à voile	canvas	VII.5
tonnage	tonnage	II.7.5
tonne de port en lourd	deadweight ton (d.w.t)	
tonture	sheer	
traînée	drag	VII.2
traînée induite	induced drag	VIII.4
transbordeur	ferry	
vaigrage, tillac, payol	ceiling	
varangue	floor	
vent apparent	apparent wind	VII.6
vergue	spar, yardam	VII.9
virure	strake	
viscosité	viscosity	V.2
vitesse fond	over bottom (or ground) speed	IX.5
vitesse surface	through water speed	IX.1
voilier	sailing boat	
volume de carène	immersed volume	II.3, II.7.4
voyage aller-retour	run	

