

APPLICATIONS DE L'OPTIMISATION DANS LE DOMAINE MARITIME: L'AVANT-PROJET ET LA STRUCTURE DU NAVIRE

Ir. Thierry VAN FRACHEN

CHAPITRE I: INTRODUCTION

Le sujet de l'optimisation a déjà été abordé ici, il y a 6 ans. A l'époque, ce sujet était relativement peu connu dans le domaine maritime. Depuis lors, l'optimisation éveille un intérêt croissant et cela pour trois raisons principales:

1. Les applications se sont fortement développées dans tous les domaines industriels et économiques.
2. Des programmes de plus en plus accessibles sont apparus sur le marché et peuvent fonctionner avec des moyens de calculs légers.
3. C'est dans les contextes économiques difficiles que l'optimisation rend les plus grands services.

J'ai choisi aujourd'hui d'aborder les possibilités offertes par l'optimisation dans deux étapes de la vie du navire:

- son avant-projet;
- la conception de sa structure.

Je me suis appuyé sur deux articles parus récemment [1] [2] et une thèse présentée à l'Université Catholique de Louvain [3]. Ce choix n'a rien de limitatif et notons dès à présent que l'optimisation peut aussi s'appliquer à d'autres étapes de la vie d'un navire, comme par exemple, son exploitation commerciale.

CHAPITRE II: OPTIMISATION: DESCRIPTION DU CONCEPT

Le Petit Robert, 1983: «Optimisation: recherche des valeurs des paramètres qui maximisent une fonction».

Plus intuitivement, notons que le désir d'obtenir le meilleur résultat à partir des moyens disponibles, en respectant les contraintes imposées par le milieu, date du moment où l'Homme a commencé à domestiquer la nature à son profit.

Les trois éléments de base composant un problème de l'optimisation ont toujours été présents, ce sont:

1. L'objet à optimiser

Cet objet peut être aussi bien une installation industrielle complexe (p.ex. un navire), qu'une des composantes de ce complexe (p.ex. la structure de ce navire, ou encore son système de propulsion...).

L'objet que l'on désire optimiser doit être bien connu. Ses paramètres et variables, doivent être identifiés, ainsi que les relations qui les lient entre eux et les contraintes qu'ils doivent respecter.

Prenons l'exemple d'un panneau d'acier raidi où:

- les paramètres extérieurs sont la pression hydrostatique et une force de compression;
- les variables sont les dimensions de ce panneau (épaisseurs, écartements des raidisseurs, etc...);
- les exigences que doivent respecter les variables seront par exemple des épaisseurs minimales ou bien sûr la bonne résistance de la structure.

Les relations qui lieront les variables et paramètres entre eux seront ici, les lois de la résistance des matériaux.

2. Le critère de l'optimisation

Le choix du critère de l'optimisation permet de se fixer l'objectif à atteindre. Que veut-on obtenir: la structure la plus légère ou la moins coûteuse (à exploiter ou à construire), ou encore, la «meilleure» combinaison des deux? Ce critère d'optimisation (dans l'exemple choisi plus haut, ce sera donc le poids, le coût ou une combinaison des deux) s'exprime en fonction des variables (dimensions...) et aussi, très souvent, de données économiques (coûts de la main-d'oeuvre, rendements...).

3. Le programme d'optimisation

Ce programme est l'outil qui permet de «travailler» le modèle mathématique, c'est-à-dire les relations liant les variables et paramètres entre eux, pour obtenir la meilleure valeur possible du critère d'optimisation.

Mathématiquement, un problème d'optimisation se présente ainsi:

soit un modèle composé de:

- n variables x_i et les valeurs minimales et maximales que l'on impose à ces variables:

$$L_i \leq x_i \leq U_i \text{ avec } i = 1, \dots, n$$

- m contraintes ou fonctions qui lient les variables entre elles:

$$h_j(x) \leq 0 \text{ avec } j = 1, \dots, m$$

Notons que les paramètres peuvent être considérés comme des variables pour lesquelles on a: $L_i = x_i = U_i$.

soit une fonction objectif $f(x)$ telle que:

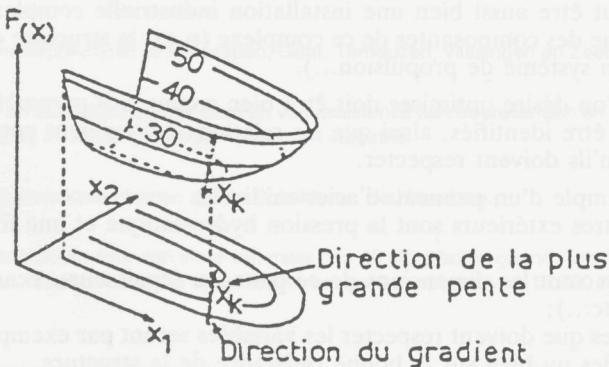
$$f(x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$$

qui exprime le critère que l'on s'est fixé.

Rechercher le minimum de $f(x)$.

Graphiquement, un problème d'optimisation à deux variables est représenté à la figure 1. Dans cette figure, la surface à trois dimensions représente la fonction objectif, ou critère, dont il s'agit de trouver le minimum.

Figure 1. Optimisation à deux dimensions



CHAPITRE III: L'OPTIMISATION DANS L'ETABLISSEMENT DE L'AVANT-PROJET

3.1. Intérêt de l'optimisation

Traditionnellement, l'établissement de l'avant-projet du navire suit une procédure itérative se basant sur l'extrapolation de données existantes. L'objectif est donc de respecter certains critères comme le port en lourd, la vitesse et l'autonomie. Une telle procédure demande un nombre élevé d'heures de travail et empêche donc toute recherche d'optimisation. Elle reste cependant acceptable en période de haute conjoncture, puisque :

1. de nombreux avant-projets aboutissent à une construction, ce qui rend rentable une recherche itérative plus poussée
2. de nombreux navires sont construits en série, ce qui :
 - permet une certaine optimisation par l'addition de petites améliorations apportées aux navires construits successivement ;
 - fournit un grand nombre de données de navires similaires.

Cette méthode itérative n'est plus acceptable en période de basse conjoncture. En effet, les arguments cités ci-dessus deviennent caducs du fait de ce que peu d'avant-projets aboutissent, et de la quasi-absence de navires construits en série. De plus, une conception donnée ne reste concurrentielle que très peu de temps face à un marché très compétitif et soumis à des changements constants. Quelles que soient les méthodes de travail utilisées, on aperçoit ici les possibilités offertes par l'utilisation de l'ordinateur :

- possibilité d'étudier de nombreuses solutions alternatives au problème en question, et/ou
- économies substantielles en heures de travail, et/ou
- réaction très rapide à une modification de l'environnement.

3.2. Les résultats d'un avant-projet optimisé

Comme de son homologue traditionnel, on attend de l'avant-projet optimisé qu'il fournisse :

1. une mesure de la qualité de l'avant-projet :
 - potentiel des revenus financiers, port en lourd, capacité de chargement (grues...), type de cargo, etc...
 - évaluation des coûts d'exploitation et de construction ;
 - respect des critères de sécurité, de mouvements du navire en mer, etc...

Il va de soi que certains de ces critères ne peuvent être calculés avec précision que si une conception détaillée du navire a été établie et/ou que lorsque certaines données propres à l'armateur ou au chantier sont disponibles.

2. les caractéristiques du navire peuvent être obtenues très tôt; ce sont notamment :
 - les dimensions principales ;
 - les formes préliminaires ;
 - les courbes hydrostatiques et de stabilité ;
 - le franc bord
 - le projet de structure ;
 - l'estimation des poids et de la puissance installée ;
 - une évaluation de la tenue à la mer.

Figure 2: Modélisation du projet

Equations and functional relations

Block coefficient

Watson and Gilfillan [1] plotted block coefficient against speed-length ratio for a large number of ships and established a mean line. The program presented in this paper constrains the block coefficient to remain within a band of ± 0.025 from the mean C_b line.

Classification freeboard

Calculated according to ABS Rules as outlined in Taggart [22], Chapter IV, Section 3.

Cargo deadweight

$$DWT_c = \Delta - W_s - W_m - W_e - W_f - DESMAR \quad (57)$$

where

$$DESMAR = 0.02(W_s + W_m + W_e) \quad (58)$$

Transverse metacentric height

$$GM = KB + BM - KG \quad (59)$$

where

$$KB = T - \frac{T}{3} \cdot 0.5 + \frac{C_b}{C_w} \quad \text{for } C_m < 0.90 \quad (60)$$

$$KB = T - \frac{C_w}{C_b + C_w} \quad \text{for } C_m \geq 0.90 \quad (61)$$

and

$$BM = \frac{I}{\nabla} \quad (62)$$

where

$$\nabla = C_w LBT \quad (63)$$

I is the moment of inertia of the waterplane, and

$$KG = \frac{\sum \text{Vertical mass moments}}{\sum \text{Masses}} \quad (64)$$

Weights and centers of gravity

For steel weight calculation, the method of Watson and Gilfillan [1] has been used.

Center of gravity of steel, from Kupras [19]:

$$KC_s = 0.01D[46.6 + 0.135(0.81 - C_w)(L/D)^2 + 0.008D(L/B - 6.5)] \quad (65)$$

for

$$L \leq 150; \quad \text{Eq. (65) + } 0.001D[1 - (L - 60)/60] \quad (66)$$

Weight of machinery, from Watson and Gilfillan [1]. Steam turbine machinery:

$$W_m = 8.8T^{0.3} \quad (67)$$

Center of gravity of machinery:

$$KG = h_{DB} + 0.35(D - h_{DB}) \quad (68)$$

where h_{DB} is the height of the double bottom.

Weight of outfit, from Watson and Gilfillan [1]:

$$W_o = 0.45L^2 \quad (69)$$

Center of gravity of outfit, from Kupras [19]:

$$KC_o = D + 1.25; \quad \text{for } L \leq 125 \text{ m} \quad (70)$$

$$KC_o = D + 1.25 + 0.01(L - 125); \quad \text{for } 125 \leq L < 250 \quad (71)$$

$$KC_o = D + 2.50; \quad \text{for } L \geq 250 \text{ m} \quad (72)$$

Weight of fuel

$$W_f = \frac{1.016KP_s F_s}{1000V_s} \quad (73)$$

where

$$F_s = \text{fuel rate} = \frac{0.225SP_s}{(P_s - 855)} \quad (74)$$

R is the range in nautical miles and P_s is the shaft horsepower. Center of gravity of fuel:

$$KG_f = 0.67h_{DB} \quad (75)$$

Seakeeping

The following equations are taken from DeKat [20]. Period of encounter relevant to roll:

$$T_E = \frac{L_w}{V_w + V_s \cos \alpha} \quad (76)$$

where

L_w = wavelength
 V_w = wave speed
 V_s = ship speed
 α = heading of ship with respect to waves

Natural period of roll:

$$T_R = \frac{0.448}{\sqrt{0.3048GM}} \quad (77)$$

Period of encounter relevant to heave and pitch:

$$T_E = \frac{L_w \cos \alpha}{V_w / \cos \alpha + V_s} \quad (78)$$

Natural period of heave:

$$T_H = 1.108[TC_H(B/DT + 1.2)(0.3048C_w)]^{0.2} \quad (79)$$

Natural period of pitch:

$$T_P = \frac{0.98}{C_w} \frac{TC_P}{0.3048} (0.6 + 0.36BT)^{0.2} \quad (80)$$

Powering and resistance

Three different methods of calculating shaft horsepower are used in the program and are detailed below in order of decreasing accuracy. The program automatically selects the most accurate, valid method from the three available.

(a) *Regression analysis of Series 60 results*—Resistance and propulsion data are generated by model testing in which a large number of models are tested and the main dimensional ratios, block coefficient and longitudinal center of buoyancy are varied systematically. When regression analysis is applied to the resistance data of a methodical series, an equation relating the coefficient of resistance to the independently varied hull parameters at various speed-length ratios can be found. This equation, with its coefficients calculated for various speed-length ratios, can now be used to estimate the resistance, and thus the required shaft horsepower, of any intermediate form within the range of hull parameters tested. The method and data were developed by Shaker Sabit [23] and are used in RAPID for coasters, general cargo ships and bulk carriers with the following particulars:

The subroutine POW60 is based on this method and is valid for: Coasters, general cargo ships and bulk carriers:

$$\Delta \leq 35,000 \text{ tons} \quad (81)$$

$$5.5 \leq L/B \leq 8.5 \quad (82)$$

$$2.5 \leq B/T \leq 3.5 \quad (83)$$

$$0.6 \leq C_b \leq 0.8 \quad (84)$$

$$-0.0248 \leq LCB \leq 0.0351 \quad (85)$$

LCB as a proportion of L

(b) *An empirical formula based on the Series 60 results*—Kupras [19] presents an empirical formula based on the Series 60 results which is used in RAPID for coasters, general cargo ships and bulk carriers with the following particulars:

L'intérêt de l'avant-projet modélisé et optimisé peut se résumer aux points ci-dessous :

1. Le résultat obtenu est le meilleur possible dans le cadre défini et par rapport aux critères que l'on s'est choisis.
2. On peut étudier immédiatement de nombreuses variantes.
3. Enfin, on peut évaluer l'incidence sur l'avant-projet des hypothèses économiques formulées. Ce dernier point, peut-être le plus important, permet donc de prendre en compte l'incertitude des conditions économiques futures et, plus tard, de s'y adapter très rapidement.

Conceptuellement, on constate donc qu'en plus de l'aspect d'optimisation, un tel avant-projet peut aussi s'utiliser simplement comme outil d'aide à la décision.

3.3. Le travail de construction du modèle

Nous l'avons vu au début de l'exposé, un modèle de l'«objet» à optimiser doit être construit et convenablement structuré. Cela suppose que cet «objet» soit bien connu, ses composants et les relations qui les lient bien identifiés. La figure 2 décrit un modèle [1] classique d'avant-projet.

Notons que le modèle de la figure utilise un programme d'optimisation dont une version travaille sur micro-ordinateur du type PC.

Dans le cas présent, les relations liant les différents variables et paramètres sont celles bien connues fournies par Watson [4].

3.4. Les résultats numériques

L'analyse des résultats numériques d'une optimisation débute toujours par une validation : les valeurs obtenues sont-elles réalistes ?

Pour le cas déjà signalé [1], l'analyse est faite sur base de la figure 3 où les résultats optimisés sont présentés sous la colonne RAPID, parallèlement aux résultats obtenus par Murphy lors d'une optimisation manuelle. On y constate

Figure 3: Comparaison des résultats d'une optimisation automatique (RAPID) avec ceux obtenus manuellement.

Table 3 Summary of design data for Example 3

	Murphy et al.	RAPID
LBP	155.34 m	139.10 m
Beam	24.48 m	20.35 m
Draft	8.93 m	10.10 m
Depth	14.85 m	12.63 m
C _b	0.590	0.5639
C _w	unknown	0.7002
C _p	0.597	0.5951
C _m	0.973	0.9475
Δ	20 209 t	16 524 t
SHP	16 775	11 653
KB	unknown	5.60 m
BM	5.19 m	3.11 m
KG	unknown	7.49 m
GM	1.22 m	1.22 m
W ₀	4743.7 t	3172.2 t
W ₁	900.0 t	949.1 t
W ₂	2249.4 t	1273.6 t
W ₃	2245.7 t	1878.1 t
Light ship	7885.1 t	5794.9 t
LCB	unknown	-0.72 m
Classification	unknown	2.09 m
Freeboard	9145.5 t	9143.2 t
Range	13 000 nm	13 000 nm
Speed	20 knots	20 knots
Machinery type:	steam turbine, single propeller	

Table 4 Summary of design data for Example 4

	Gillfillan	RAPID
LBP	243.84 m	240.01 m
Beam	31.70 m	32.00 m
Draft	12.19 m	12.20 m
Depth	18.13 m	18.77 m
C _b	0.820	0.8242
C _w	0.891	0.8722
C _p	0.828	0.8286
C _m	0.920	0.9950
Δ	79 217.5 t	79 158.3 t
SHP	16 946	13 389
KB	6.42 m	6.27 m
BM	6.54 m	6.58 m
KG	10.34 m	9.31 m
GM	2.62 m	3.54 m
W ₀	12 594.3 t	13 090.6 t
W ₁	1339.1 t	804.9 t
W ₂	1543.3 t	1417.3 t
W ₃	1894.3 t	4827.2 t
Light ship	16 249.9 t	15 619.1 t
LCB	-0.61 m	-0.60 m
Classification	unknown	4.33 m
Freeboard	58 708.5 t	58 712.1 t
DWT	22 000	22 000 nm
Range	nm	nm
Speed	15 knots	15 knots
Machinery type:	slow-speed diesel, single propeller	

que les ordres de grandeur des résultats sont conformes à ce qu'on pouvait en attendre.

L'analyse du gain offert par l'optimisation fait apparaître ici des dimensions d'ensemble, une puissance installée et un poids lège plus réduits.

De la même manière, une fois le modèle construit, on peut très facilement mener une étude paramétrique: qu'elle est l'implication d'un choix différent des données de base (une autre vitesse, ou une meilleure stabilité, par exemple) sur les caractéristiques, et donc le coût du navire?

3.5. Conclusions

Nous retiendrons de ceci qu'une fois le modèle construit et les données de base fixées, l'établissement de l'avant-projet:

- est très rapide et ne demande plus d'itération manuelle;
- donne des résultats beaucoup plus complets;
- donne un navire optimum;
- permet de connaître l'incidence d'une variation de données sur base de cet optimum.

Le même modèle peut d'ailleurs être utilisé pour différents types de navires, pourvu qu'il travaille sur les banques de données correspondant à ce type.

CHAPITRE IV: OPTIMISATION DE LA STRUCTURE DE LA COQUE DU NAVIRE

Les conclusions d'une étude d'optimisation devront nous permettre:

1. de choisir entre différents dessins de structure;
2. de déterminer les valeurs optimales d'échantillonnage.

4.1. Pourquoi optimiser la structure?

Le navire est un ensemble de «systèmes» interconnectés de façon complexe: coque, propulsion, aménagements, équipement... Une optimisation d'ensemble du navire est d'emblée impossible, du fait de l'impossibilité de modéliser le navire, d'une part et de la taille qu'atteindrait un tel modèle d'autre part. Enfin l'optimisation séparée des différents systèmes ne conduira pas nécessairement à l'optimum global du navire.

Cependant, la structure de la coque constitue un système relativement indépendant des autres et dont les liens avec les autres systèmes sont bien identifiés, ce sont: le poids propre de la structure, le taux de fret, les forces s'appliquant à la structure, ses coûts de construction et d'exploitation.

Cela a donc un sens d'optimiser la structure indépendamment des autres systèmes composant le navire.

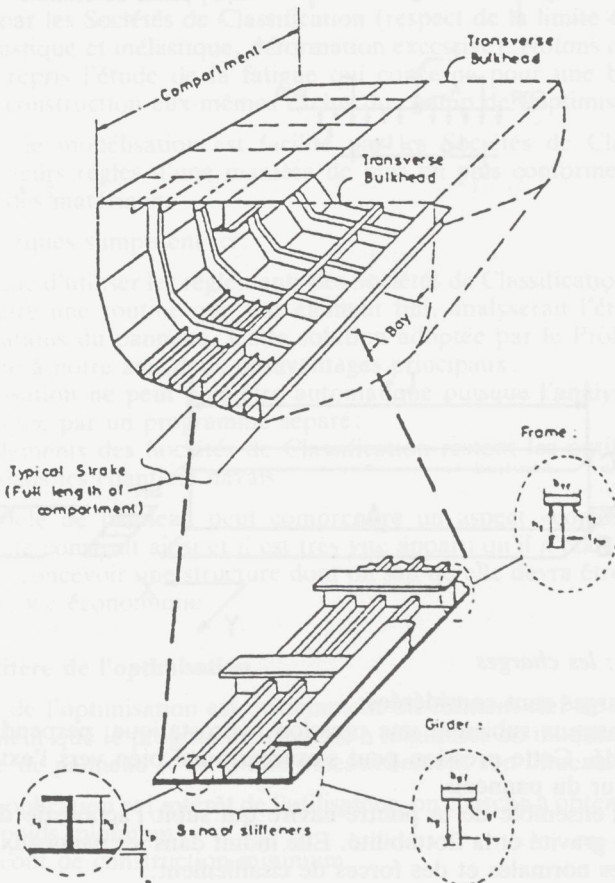
Cette optimisation sera rentable. En effet, les coûts très élevés liés à la structure garantissent, même si le gain de l'optimisation est faible en valeur relative, des montants absolus de gains très élevés.

4.2. L'objet de l'optimisation

Identification

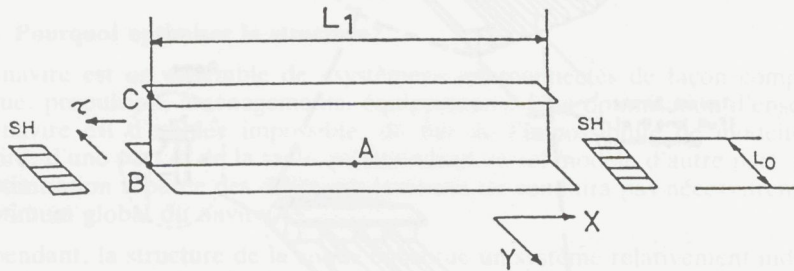
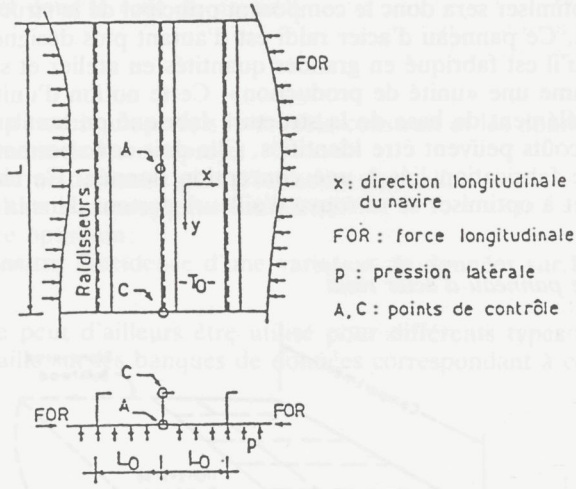
La taille de l'objet à optimiser, ou plutôt celle du modèle mathématique qui le décrit, est limitée par le programme d'optimisation. Il n'est donc pas question d'optimiser, d'un seul tenant l'ensemble de la structure ou même du maître couple. De même, on ne cherchera pas à optimiser les détails de construction, vu la complexité de leur fabrication et des charges auxquelles ils sont soumis. L'objet à optimiser sera donc le composant principal de la structure : le panneau d'acier raidi. Ce panneau d'acier raidi est d'autant plus désigné comme objet à optimiser qu'il est fabriqué en grandes quantités en atelier et surtout qu'il peut être vu comme une «unité de production». Cette notion d'unité de production désigne un élément de base de la structure fabriqué en tant que tel en atelier, et dont les coûts peuvent être identifiés. Elle doit donc permettre de connaître les coûts de fabrication liés à une conception donnée. Ce choix du panneau comme objet à optimiser se retrouve d'ailleurs partout dans la littérature (figure 4).

Figure 4. Le panneau d'acier raidi



Le panneau d'acier raidi compte un ou deux systèmes de raidissage. Les panneaux à trois systèmes de raidissage sont nettement moins fréquents. Lorsqu'il y a un système de raidissage, ce système sera transversal (perpendiculaire à l'axe du navire) ou longitudinal (parallèle à l'axe du navire) (fig. 5). Lorsqu'il y a deux systèmes de raidissage, on parlera du panneau à raidissage mixte. Ces panneaux correspondent à des cas de structures différents.

Figure 5. Systèmes de raidissage transversal et longitudinal.



Comportement: les charges

Différentes charges sont considérées:

- Tous les panneaux subissent une pression hydrostatique, perpendiculaire au plan du bordé. Cette pression peut s'exercer aussi bien vers l'extérieur que vers l'intérieur du panneau.
- La flexion d'ensemble de la poutre-navire qui subit l'action de deux forces opposées: la gravité et la flottabilité. Elle induit dans les panneaux des forces longitudinales normales et des forces de cisaillement.

Nous avons considéré une famille de 4 panneaux se distinguant entre eux par les charges qui y sont appliquées et le type de raidissage.

Il s'agit donc de construire les modèles de ces panneaux, c'est-à-dire d'en identifier les variables et les relations qui lient celles-ci entre elles.

Les variables

Les variables d'un panneau sont ici ses dimensions (épaisseurs, écartements...) et les tensions combinées calculées aux points de contrôle. Il est obligatoire de fixer des valeurs minimales et maximales aux variables. On peut aussi rendre une variable fixe en lui définissant une valeur maximale égale à sa valeur minimale.

Les points de contrôle

Les points de contrôle sont choisis aux endroits de la structure où les plus grandes tensions sont attendues.

Les contraintes du modèle

Les tensions calculées aux points de contrôle doivent respecter les conditions imposées par les Sociétés de Classification (respect de la limite élastique, flambement élastique et inélastique, déformation excessive). Notons que les modèles n'ont pas repris l'étude de la fatigue qui concerne pour une bonne part, les détails de construction eux-mêmes exclus du champ de l'optimisation.

Le travail de modélisation est facilité par les Sociétés de Classification qui expriment leurs règles d'une manière de plus en plus conforme aux lois de la résistance des matériaux.

Deux remarques s'imposent ici :

1. Plutôt que d'utiliser les règlements des Sociétés de Classification, nous aurions pu construire une routine qui, par élément fini, analyserait l'état des tensions et déformations du panneau. Cette solution adoptée par le Professeur Hughes [5] présente à notre avis deux désavantages principaux :

- a) l'optimisation ne peut plus être automatique puisque l'analyse des tensions est réalisée par un programme séparé;
- b) les règlements des Sociétés de Classification restent les outils classiques de calcul dans les chantiers navals.

2. Le modèle de panneau peut comprendre un aspect «corrosion». Un seul modèle a été construit ainsi et il est très vite apparu qu'il n'était presque *jamais rentable* de concevoir une structure dont on sait qu'elle devra être réparée avant la fin de sa vie économique.

4.3. Le critère de l'optimisation

Le critère de l'optimisation est évidemment un élément-clé de celle-ci puisque c'est sa valeur que le programme cherche à minimiser en modifiant les variables du modèle de panneau (c'est-à-dire essentiellement son dimensionnement).

Suivant l'application et l'intérêt de l'utilisateur, on cherche à obtenir la structure

- soit de poids minimum
- soit de coût de construction minimum

– soit de coût global minimum, c'est-à-dire de fabrication + exploitation minimum.

L'utilisateur doit donc choisir et construire son critère d'optimisation. Mais, s'il y a peu de difficultés à calculer un poids, il n'en est pas de même d'un coût, et surtout pas d'un coût de construction.

On peut décomposer ce coût en :

- coût de la matière première, essentiellement l'acier;
- coût de la main-d'oeuvre;
- coût des frais généraux.

4.3.1. Coût de la matière première

Le calcul de ce coût se fera ici simplement en calculant le poids d'acier présent dans le panneau et en le multipliant par le coût unitaire de la tôle ou du profilé.

4.3.2. Coût des frais généraux

4.3.3. Coût de la main-d'oeuvre

Il est calculé traditionnellement à l'aide d'un rapport nombre d'heures de travail/poids acier, ou encore en fonction des dimensions principales du navire. Ces fonctions ou rapports sont obtenus sur base de données historiques.

Cette façon de faire est tout à fait à *proscrire* dans les travaux d'optimisation et même dans un simple calcul de coût. Cette méthode n'est acceptable que pour une approximation préliminaire.

Ses désavantages sont nombreux :

- 1) Les données historiques ne sont valables que pour les types et dimensions de navire déjà construits.
- 2) Les données historiques reprennent évidemment les erreurs de construction passées. Le coût obtenu sera donc très conservatif et peut compromettre ainsi les chances d'obtenir une commande.
- 3) Ce type de rapport ou de relation ne permet absolument pas au concepteur de la structure de voir quelles sont les conséquences positives ou négatives, d'un changement qu'il apporte à l'échantillonnage.
- 4) Il n'est pas possible de mesurer le rendement de la production ou la quantité de travail *effectif* réellement presté.

La méthode alternative vers laquelle il faut s'orienter est une analyse détaillée des différents travaux élémentaires. Le problème important est alors de disposer des données suffisantes qui permettent de connaître les temps liés à ces travaux élémentaires. C'est ce qui a été fait à l'Université de Glasgow sur base de données établies en chantier. (Voir le tableau 1).

L'équipe de l'Université de Glasgow a cherché à optimiser en fonction des coûts de fabrication, c'est-à-dire la main-d'oeuvre et la matière première. Ce sont les coûts variables directement liés à la production. Les autres coûts sont inclus dans les frais généraux.

Tableau 1. Temps liés aux travaux élémentaires.

TABLE IIa. Construction Task Algorithm
JOB DESCRIPTION: Flat Panel Sub-Assembly

SEQUENCE	ACTIVITY	OBJECT	MANHOURS	APPLIED PER	RECORD
1	Clear	Shop Floor	1-000	Job	191
2	Transport by Pallet	Plates	0-292	Job	171
3	Layout	Plates	0-180	Plate	176
4	Align	Flat Plates	0-120	Plate	177
5	Attach	Fairing Wire	0-022	Plate Seam Length	178
6a	Fair-downhand, Option 1	Flat Plates <12-0mm	FPLATE = 0-126	Plate Seam Length	84
6b	Fair-downhand, Option 2	Flat Plates <25-4mm	FPLATE = 0-198	Plate Seam Length	85
7	Attach and Remove	Mini-deck Welder	0-070	Job	215
8	Position	Mini-deck Welder	0-019	Seam	218
9	Butt Weld, J Prep (dh)	Plate Seams (unrestricted)	f ₁ (PT)	Plate Seam Length	111011
10	Turn	Panel	0-500	Job	224
11	Butt Weld, J Prep (dh)	Plate Seams (unrestricted)	f ₂ (PT)	Plate Seam Length	111012
12	Chip Fairing Scars	Shell Seam Fairing	0-053	Plate Seam Length	230
13	Draw Down	Shell Perimeter	3-000	Job	190
14	Mark Off	Shell Panel	15-600	Job	192
15	Erect	Section Supports	0-075	Section	156
16	Position	Section >2-5m	0-279	Section	157
17a	Fair-downhand, Option 1	Section <0-3m	FSECT = 0-192	Section Length	74
17b	Fair-downhand, Option 2	Section >0-3m	FSECT = 0-285	Section Length	75
18	Set Up	2 Gravimax Welders	0-293	Job	222
19	Fillet Weld	2 Gravimax Welders	0-069	Section Length	223
20	Chip Fairing Scars	Longl. to Shell Fairing	0-048	Section Length	231

DERIVATION OF MANHOUR COEFFICIENTS:

per JOB	= 1-000 + 0-292 + 0-070 + 0-500 + 3-000 + 15-600 + 0-293	= 20-755
per PLATE	= 0-180 + 0-120	= 0-300
per SEAM	= 0-019 x 2 (for each side)	= 0-038
per metre PLATE SEAM	= 0-022 + 0-053 + FPLATE + f ₁ (PT) + f ₂ (PT)	= 0-075 + FPLATE + Σf _i (PT)
per SECTION	= 0-075 + 0-279	= 0-354
per metre SECTION	= FSECT + 0-069 x 2 (for double fillet) + 0-048	= FSECT + 0-186

$$\text{TOTAL MANHOURS FOR JOB} = 20-755 + 0-300[\text{NP}] + 0-038[\text{NS}] + [0-075 + \text{FPLATE} + f_1(\text{PT}) + f_2(\text{PT})].\text{INS.SL} + 0-354[\text{NF}] + [\text{FSECT} + 0-186].\text{INF.FL} \quad (4)$$

Le critère d'optimisation est donc le suivant:

Coût variable = poids matière première x coût + main d'oeuvre x coût horaire

Ce qui peut s'écrire:

$$\text{CERW} = \frac{\text{coût variable}}{\text{coût matière}} = \text{poids matière} + k \times m\text{-o}$$

$$\text{où } k = \frac{\text{coût } m\text{-o}}{\text{coût matière}} \times \frac{1}{n} \quad \text{où } n = \text{rendement du chantier}$$

Ce k est très important puisqu'en plus de son rôle dans le critère d'optimisation, il permet de comparer les capacités de 2 chantiers entre eux.

Différents grillages présentés comme équivalents du point de vue structure ont été comparés (figure 6).

A l'aide des tableaux précédents, on a calculé leur poids, la quantité de main-d'oeuvre qu'ils représentent et leur coût CERW ou poids équivalent.

Les conclusions suivantes ont été tirées:

- 1) grande importance de k;
- 2) le panneau le plus léger est le plus coûteux;
- 3) ni le coût ni la quantité de main d'oeuvre ne sont proportionnels au poids;

Figure 6. Panneaux équivalents et coûts de fabrication

The construction sequence assumed is as follows:

- (i) sub-assemble flat panel and primary frames,
- (ii) sub-assemble transverses and/or girders with any stiffeners,
- (iii) fit and weld continuous girders or transverses to panel,
- (iv) fit and weld intercostal members, if required,
- (v) add hugs at intersections.

PLATING 11mm 14mm AT STEEL
 BRIDGE'S PLANK 750 x 70
 STEEL 750 x 11
 STEEL PLANK 400 x 70
 BRIDGE'S STEEL 400 x 11
 FRAMES 100P1 150 x 11

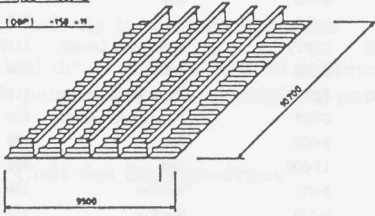


Fig. 1. Grillage 1

PLATING 11mm
 TRANSVERSE PLANK 750 x 70
 STEEL 750 x 11
 STEEL PLANK 400 x 70
 BRIDGE'S 400 x 11

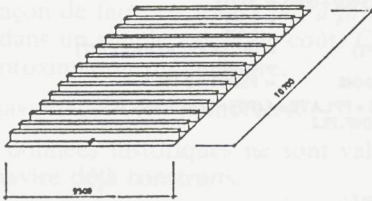


Fig. 4. Grillage 4

PLATING 11mm
 BRIDGE'S PLANK 750 x 70
 STEEL 750 x 11
 STEEL PLANK 400 x 70
 BRIDGE'S STEEL 400 x 11
 FRAMES 100P1 150 x 11

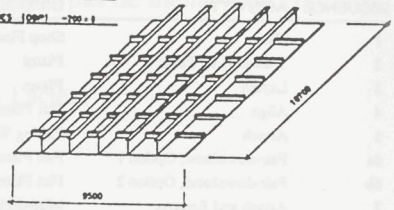


Fig. 2. Grillage 2

PLATING 11mm AT STEEL
 BRIDGE'S PLANK 750 x 70
 STEEL 750 x 11
 TRANSVERSE PLANK 150 x 11
 STEEL 150 x 11
 FRAME 1TEE1 47 x 11

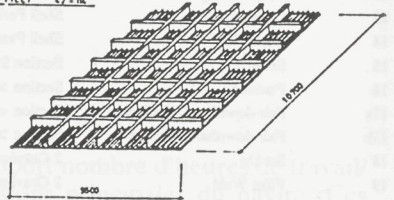


Fig. 3. Grillage 3

TABLE III. Objective Comparison of Five Grillages

DESIGN	WEIGHT tonnes	RELATIVE WORK CONTENT manhours	CERW (tonnes)	
			k = 0.05	k = 0.10
1	19.61	211.6	30.19	40.77
2	24.41	165.2	32.67	40.93
3	12.98	526.2	39.29	65.60
4	20.43	271.1	33.98	47.53
5	19.62	243.4	31.78	43.95
4a	26.03	166.7	34.37	42.70
5a	21.93	159.7	29.91	37.90

TABLE IV. Work Content Rating as a Function of Joint Length. Distribution by Structural Component—manhour/metre

DESIGN	PLATING	FRAMES	TRANSVERSES	GIRDERS	TOTAL
1	0.971	0.415	—	1.073	0.748
2	1.774	0.415	—	0.969	0.891
3	0.927	0.411	1.747	0.890	0.897
4	1.470	0.411	0.834	—	0.909
5	0.971	—	—	0.858	0.875

TABLE V. Work Content Rating as a Function of Weight. Distribution by Structural Component—manhour/tonne

DESIGN	PLATING	FRAMES	TRANSVERSES	GIRDERS	TOTAL
1	4.662	37.61	—	12.47	10.80
2	2.266	22.16	—	15.81	6.78
3	6.518	55.25	12.48	40.22	41.30
4	3.584	13.70	2.09	—	13.30
5	4.662	—	—	18.62	12.32

- 4) la longueur totale des soudures permet d'estimer beaucoup plus précisément la quantité de travail présente dans une structure;
- 5) confirmation de ce que le coût par tonne n'est PAS un bon estimateur.

Dans la thèse de l'U.C.L., l'optimisation a été faite par rapport au coût global de la structure.

Les éléments de ce coût seront donc :

- le coût de construction;
- la perte de revenu liée au poids propre de la structure, puisqu'une structure lourde permettra de transporter moins de cargo;
- le coût des réparations éventuelles (dues à la corrosion).

Ces différents coûts doivent être définis par l'utilisateur. Ils peuvent d'ailleurs être pondérés de différentes manières. Ainsi, on peut parfaitement décider de conduire l'optimisation du panneau par rapport à son seul poids propre et non par rapport à son coût de construction. La présentation du modèle et de sa fonction objectif permet une grande souplesse à l'utilisateur.

Les données économiques de base pour la construction des fonctions objectifs sont les suivantes :

A_1 coût d'1 Kg d'une tôle d'acier de 10 mm d'épaisseur;

A_2 coût d'1 heure de main d'oeuvre y compris les parties non productives (inspection, administration...),

K facteur d'évolution de la productivité;

NEN durée de vie économique du panneau;

F taux de fret et pénalité sur le poids propre;

R rapport entre le coût de la réparation d'un composant corrodé de panneau et le coût de sa construction;

CRF Capital Recovery Factor ou rapport entre la somme annuelle à prévoir pour reconstituer un capital investi et le montant de ce capital.

Les coûts de construction sont alors établis à l'aide des courbes suivantes (fig. 7) qui expriment le nombre d'heures de main-d'oeuvre pour le montage et la soudure.

Les coûts de réparation sont calculés lorsque la corrosion a été considérée. Le rapport entre le coût de réparation et le coût de construction est une donnée économique (fixée à 5). Il reste à ramener les coûts de réparation en coût initial équivalent en le divisant par $(1+I)^N$ où I est le taux d'intérêt pour pouvoir être additionné à la perte de revenus due au poids.

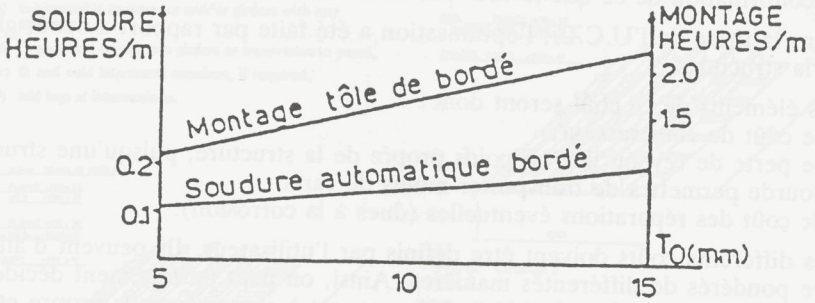
CHAPITRE V : LES APPLICATIONS NUMERIQUES DE L'OPTIMISATION DE LA STRUCTURE

5.1. Le travail de l'Université de Glasgow

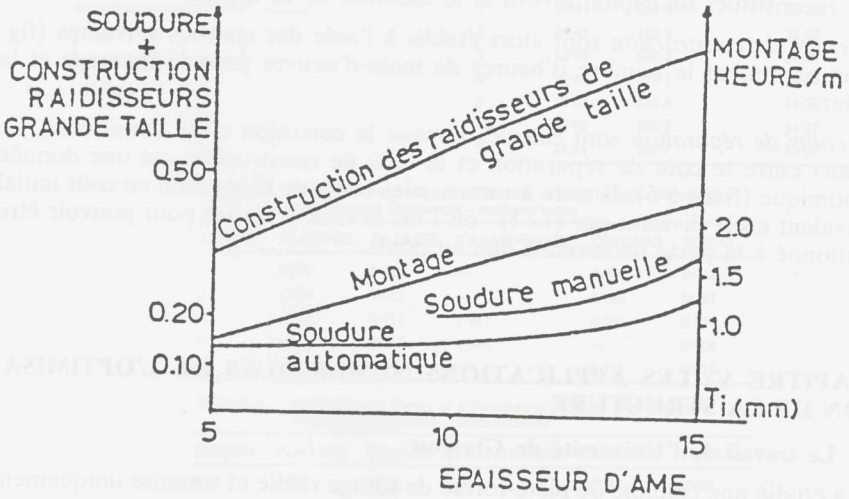
On a étudié une colonne de plate-forme de forage raidie et soumise uniquement à compression. (Figure 8).

Trois optimisations ont été faites successivement par rapport au poids, à la quantité de travail et au coût (poids équivalent). Pour chacun de ces critères,

Figure 7. Coût de construction (main d'oeuvre)

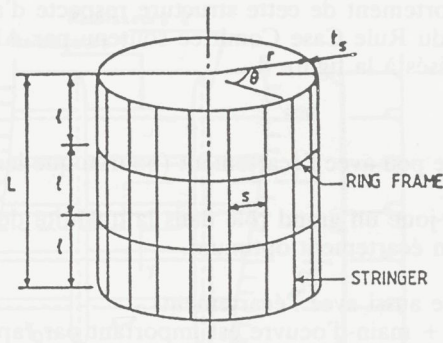


Nombre d'heures, par mètre de liaison, exigées par le montage et la soudure de la tôle de bordé

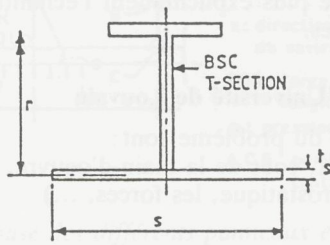


Nombre d'heures, par mètre de liaison, exigées par le montage et la soudure des raidisseurs et la construction des raidisseurs de grande hauteur d'âme

Figure 8. Colonne de plate-forme de forage étudiée à l'Université de Glasgow.



(a) OVERALL GEOMETRY



(b) STRINGER GEOMETRY

Fig. 6. Geometrical Details for Ring and Stringer Stiffened Cylinders

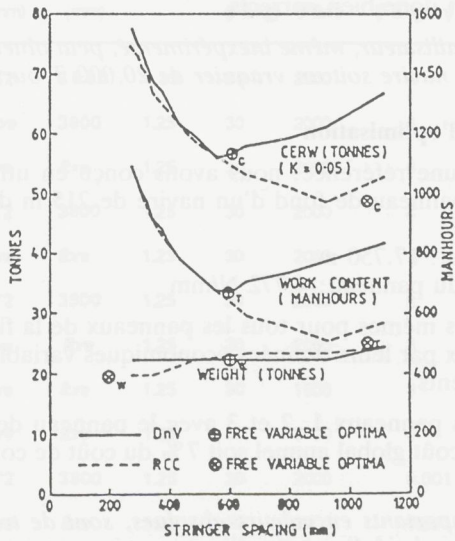


Fig. 7. Optimum Stringer Stiffened Cylinder—Comparison between DnV and RCC Rules for Discrete Stringer Spacing (Free Variable Optima Superimposed)

l'optimisation a été faite en fixant successivement différents écarterments de raidisseurs. Le comportement de cette structure respecte d'abord les règles du DNV, ensuite celles du Rule Case Committee soutenu par ABS et Conoco. Les résultats sont synthétisés à la figure 8.

Conclusions

1) DNV

1.1. Le poids varie peu avec l'écartement (pourvu que les autres dimensions soient optimisées).

1.2. L'écartement joue un grand rôle dans la quantité de travail et le coût.

1.3. On obtient un écartement optimum.

2) RCC

2.1. Le poids varie aussi avec l'écartement.

2.2. Le gain coût + main-d'oeuvre est important par rapport à DNV.

On voit qu'il y a des règlements qui s'adaptent mieux à l'optimisation. Ce sont ceux dont les règles lient le plus explicitement l'échantillonnage à la résistance des matériaux et aux charges.

5.2. La thèse présentée à l'Université de Louvain

Rappelons que les données du problème sont :

- économiques (taux de fret, coût de la main-d'oeuvre, amortissements, ...);
- les charges (pression hydrostatique, les forces, ...)
- la portée du panneau.

5.2.1. La validité du modèle

Comme le montreront les résultats présentés plus loin, les dimensionnements obtenus sont du même ordre de ce qui est observé dans les navires actuels. Les modèles utilisés sont donc bien corrects.

Cela signifie qu'un utilisateur, même inexpérimenté, peut obtenir un dimensionnement correct, que le navire soit un vraquier de 20.000 T ou un yacht.

5.2.2. Les gains de l'optimisation

Afin de disposer d'une référence, nous avons conçu en utilisant les méthodes traditionnelles, un panneau de fond d'un navire de 215 m de long (Figure 9).

Portée: 16.550 m

Pression hydrostatique: 17.750 m

Force dans le plan du panneau: 4.772 N/mm

Ces données sont les mêmes pour tous les panneaux de la figure 10. Ceux-ci se distinguent entre eux par leurs données économiques variables et le fait de fixer ou non les écarterments.

La comparaison des panneaux 1, 2 et 3 avec le panneau de référence, montre les gains de 5% du coût global annuel soit 7% du coût de construction (Tableau 2).

Ces chiffres, très importants en valeurs absolues, sont de très loin supérieurs à l'investissement nécessaire à l'optimisation.

De plus, on constate que la majeure partie du gain est déjà réalisée lorsque les écarterments entre raidisseurs ne sont pas encore libérés. On conclut donc que

Figure 9. Modèle du panneau de fond étudié.

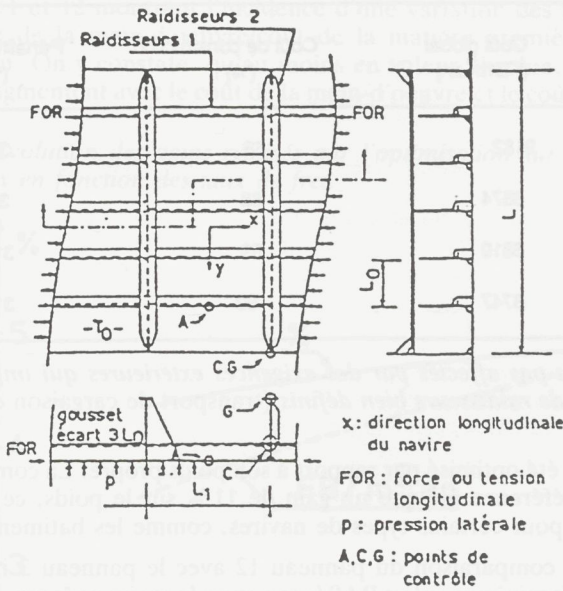


Figure 10. Données de base des différents panneaux étudiés.

Données des panneaux 01 à 12.

Panneau	L_0 (mm)	L_1 (mm)	K	A_1 (FB/kg)	A_2 (FB/h)	F (FB.kg.an)	CRF
01	872	3800	1.25	30	2000	6	0.1315
02	ibre	3800	1.25	30	2000	6	0.1315
03	ibre	ibre	1.25	30	2000	6	0.1315
04	872	3800	1.25	30	2000	4	0.1315
05	ibre	ibre	1.25	30	2000	4	0.1315
06	872	3800	1.25	30	2000	8	0.1315
07	ibre	ibre	1.25	30	2000	8	0.1315
08	ibre	ibre	1.25	30	1500	6	0.1315
09	ibre	ibre	1.25	30	3000	6	0.1315
10	872	3800	1.25	30	2000	0.001	0.1315
11	ibre	ibre	1.25	30	2000	0.001	0.1315
12	ibre (>500)	ibre	1.25	30	2000	6000.	0.1315

Tableau 2. Coûts des panneaux 01, 02, 03 et de référence.

Panneau	Coût global (FB/m ² .an)	Coût de construction (%)	Pénalité sur le poids (%)
référence	9182	68	32
01	8874	68	32
02	8810	69	31
03	8747	69	31

les gains ne sont pas affectés par des exigences extérieures qui imposent parfois des écartements de raidisseurs bien définis (transport de cargaison de dimensions standardisées).

Le panneau 12 a été optimisé par rapport à son poids propre. La comparaison avec le panneau de référence indique un gain de 11% sur le poids, ce qui peut être très avantageux pour certains types de navires, comme les bâtiments de guerre.

D'autre part, la comparaison du panneau 12 avec le panneau 3 indique que la structure de poids minimum n'est PAS la structure la moins coûteuse (tableau 3).

Tableau 3: Poids et coûts des panneaux 12, 03 et de référence (coûts calculés avec un taux de fret de 6 FB/kg an).

Panneau	Poids (kg/m ²)	Coût de construction (FB/m ² .an)	Coût global (FB/m ² .an)
12	442.7	6390.	8995.
03	458.2	6050.	8747.
Référence	498.6	6247.	9183.

Le tableau 4 indique qu'il n'est pas avantageux d'optimiser le panneau vers la seule minimisation des coûts de construction (comparaison des panneaux 1 et 3 avec les panneaux 10 et 11).

Tableau 4: Coûts de construction des panneaux 01, 03, 08, 09 et de référence (FB/m² an).

Panneau :	Référence	01	03	010	011
Coût de construction	6247	6014	6050	6013	6008
Coût global	9182	8874	8747	8863	8834

5.2.3. Incidence d'une variation des données économiques

Les figures 11 et 12 montrent l'incidence d'une variation des taux de fret et du rapport coût de la main-d'oeuvre/coût de la matière première sur le gain de l'optimisation. On y constate, qu'au moins en valeur absolue, les gains de l'optimisation augmentent avec le coût de la main-d'oeuvre et le coût des taux de fret.

Figure 11: Evolution des gains réalisés par l'optimisation sur les coûts globaux des panneaux en fonction des taux de fret.

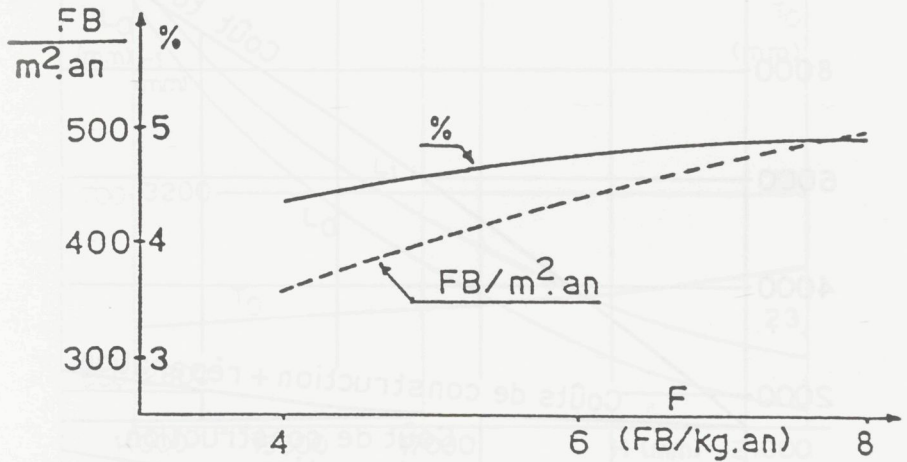
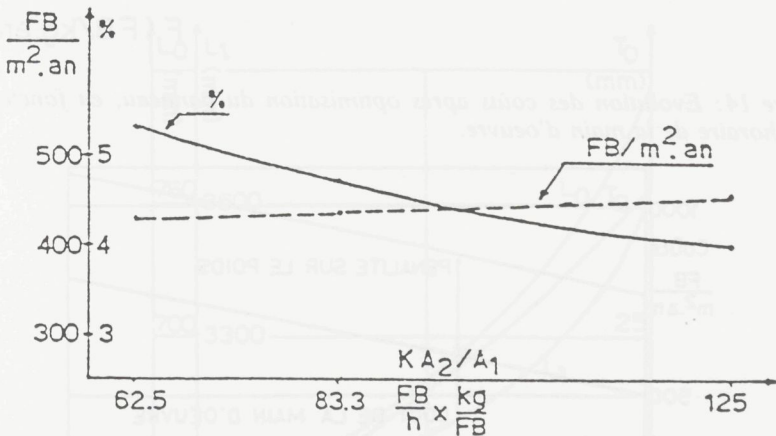


Figure 12: Evolution des gains réalisés par l'optimisation sur les coûts globaux des panneaux en fonction du rapport $K.A_2/A_1$



La figure 13 montre la part prépondérante prise par la perte de revenus due au poids propre lors d'une croissance des taux de fret. On y constate qu'il n'est justifié de concevoir une structure qui devrait subir des réparations avant la fin de sa vie économique que lorsque les taux de fret deviennent très importants.

La figure 14 montre qu'une variation d'1% du coût de la main-d'oeuvre entraîne une variation correspondante de 0,5% du coût global.

Figure 13: Evolution des coûts après optimisation du panneau, en fonction des taux de fret.

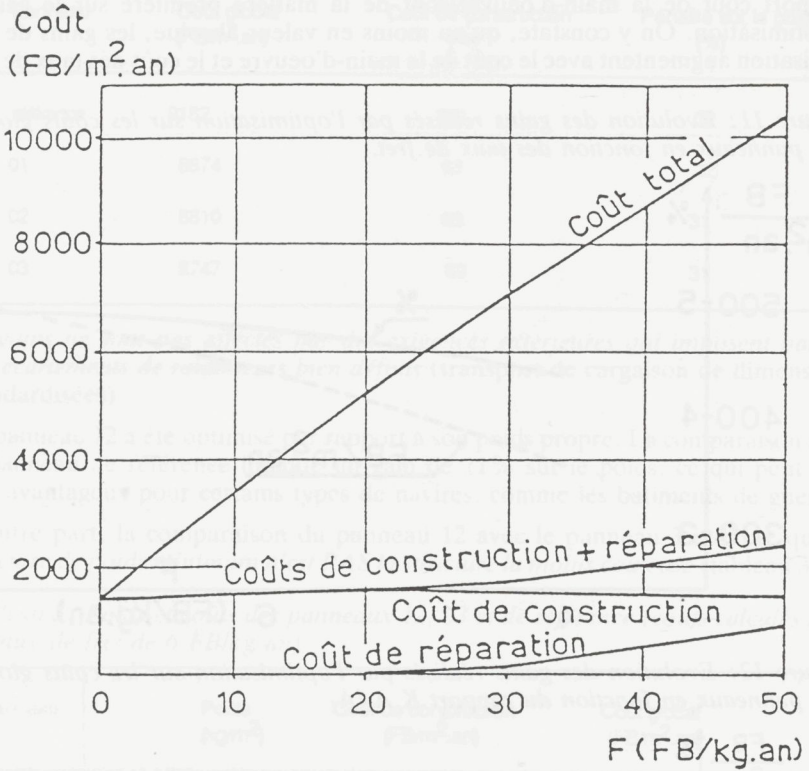
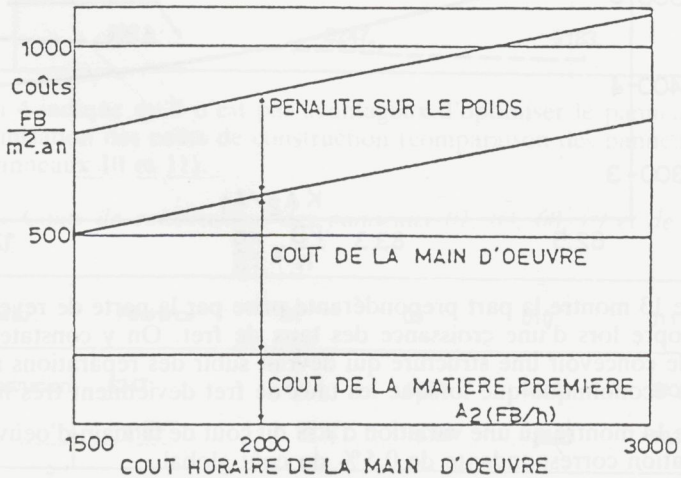


Figure 14: Evolution des coûts après optimisation du panneau, en fonction du coût horaire de la main d'oeuvre.



5.2.4. Dimensionnements et standardisation

Les figures 15 et 16 permettent de voir l'évolution des dimensionnements en fonction d'une variation des forces extérieures.

Figure 15. Evolution du dimensionnement après optimisation, en fonction de la charge hydrostatique.

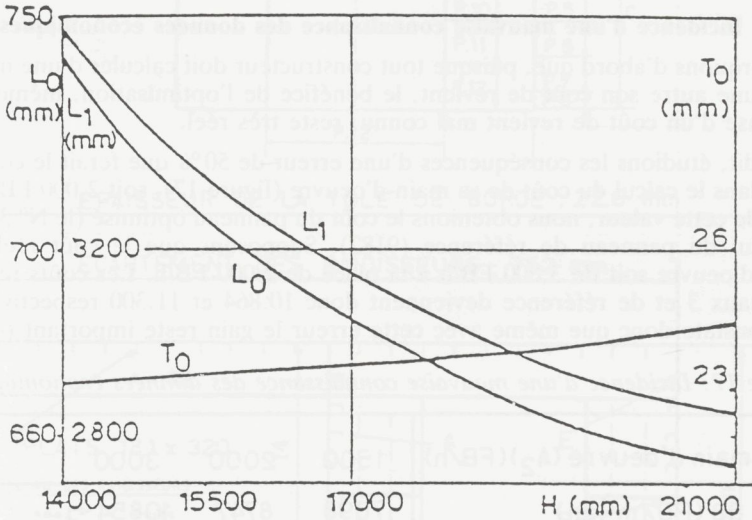
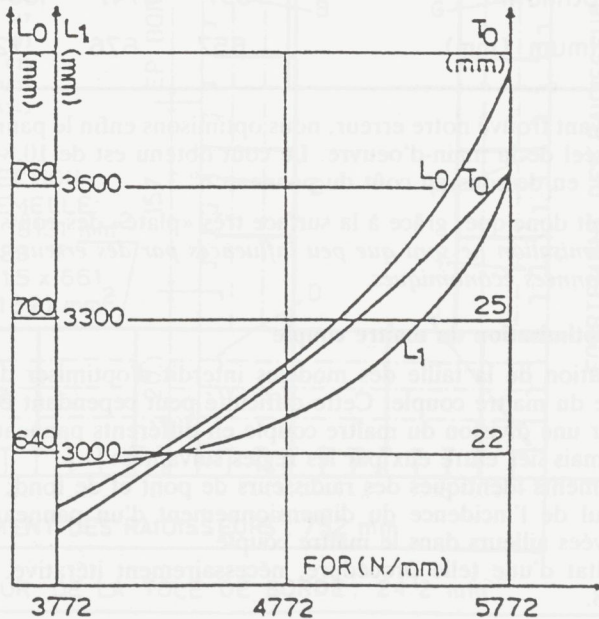


Figure 16. Evolution du dimensionnement après optimisation, en fonction de la force appliquée dans le plan du panneau.



L'obligatoire standardisation des profilés et des épaisseurs semble a priori contradictoire avec les résultats (au 1/10 de mm!) fournis par l'optimisation.

En réalité, cette standardisation s'impose quelle que soit la méthode de calcul utilisée. De plus, les programmes d'optimisation permettent, en fixant des valeurs de dimensionnement, d'en tenir compte et d'obtenir ainsi le meilleur résultat final, compte tenu de la standardisation.

5.2.5. Incidence d'une mauvaise connaissance des données économiques

Remarquons d'abord que, puisque tout constructeur doit calculer d'une manière ou d'une autre son coût de revient, le bénéfice de l'optimisation, même établi sur base d'un coût de revient mal connu, reste très réel.

Cela dit, étudions les conséquences d'une erreur de 50% que ferait le constructeur dans le calcul du coût de sa main-d'oeuvre (figure 17), soit 2.000 FB/h. Sur base de cette valeur, nous obtenions le coût du panneau optimisé (le N° 3, 8747) et celui du panneau de référence (9182). Supposons que le coût réel de la main-d'oeuvre soit de 3.000 FB/h à la place de 2.000 FB/h. Les coûts réels des panneaux 3 et de référence deviennent donc 10.864 et 11.300 respectivement. On constate donc que même avec cette erreur le gain reste important (4%)

Figure 17: Incidence d'une mauvaise connaissance des données économiques.

Coût main d'oeuvre (A_2)(FB/h)	1500	2000	3000	
Coût O3 (FB/m ² .an)	7698	8747	10854	← GAIN
Coût panneau référence	8124	9182	11300	
Coût optimum	7697	8747	10844	← GAIN ← MAXI- MUM
L_0 optimum (mm)	657	676	726	

Enfin, ayant trouvé notre erreur, nous optimisons enfin le panneau en respectant le coût réel de la main-d'oeuvre. Le coût obtenu est de 10.844, soit seulement 10 FB/m² en dessous du coût du panneau n° 3.

Il apparaît donc que, grâce à la surface très «plate» des coûts, les gains obtenus par l'optimisation ne sont que peu influencés par des erreurs même importantes sur les données économiques.

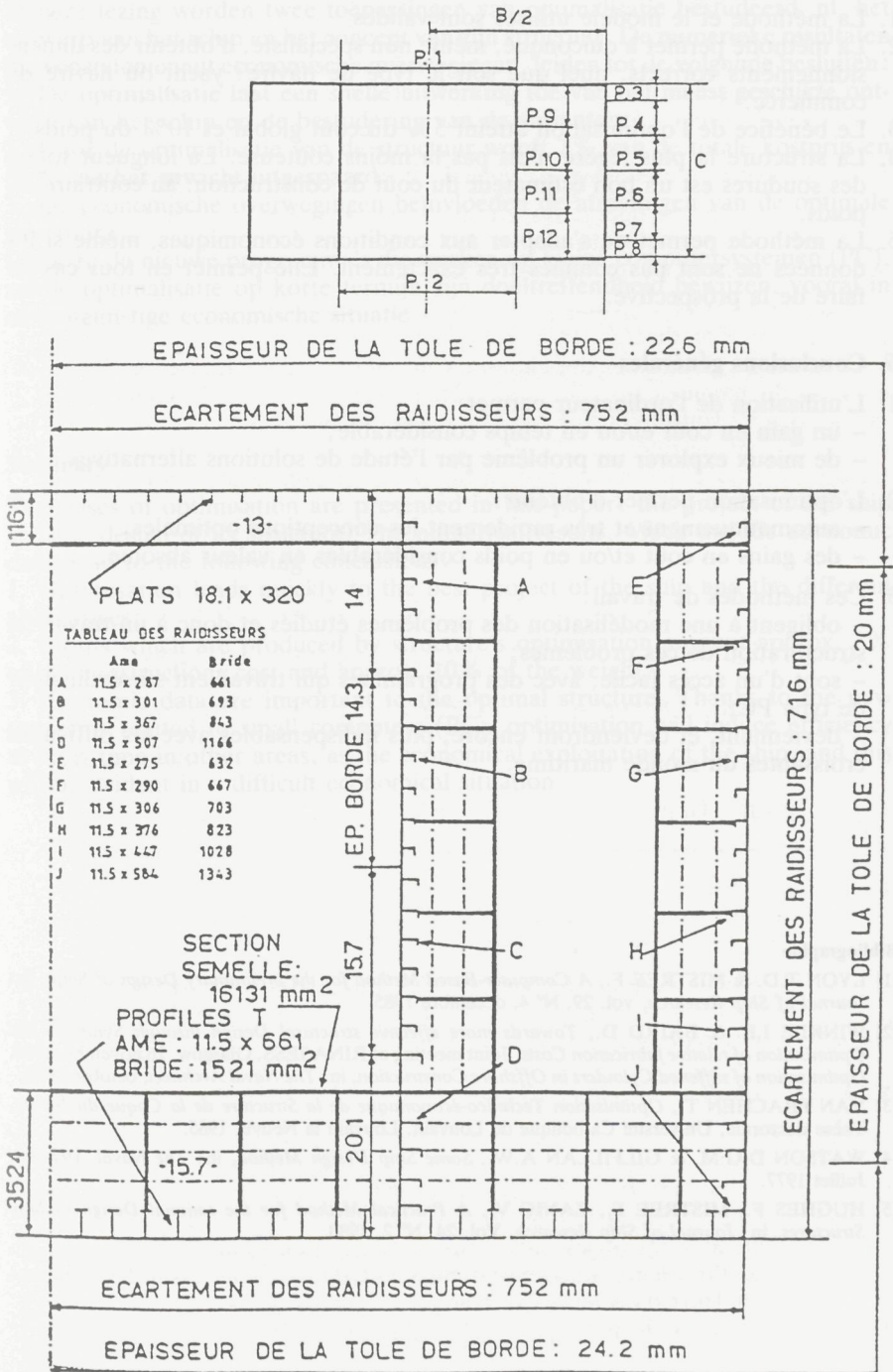
5.2.6. Optimisation du maître couple

La limitation de la taille des modèles interdit d'optimiser d'un seul tenant la structure du maître couple. Cette difficulté peut cependant être tournée facilement par une division du maître couple en différents panneaux optimisés séparément mais liés entre eux par les règles suivantes:

- écartements identiques des raidisseurs de pont et de fond;
- recalcul de l'incidence du dimensionnement d'un panneau sur les tensions observées ailleurs dans le maître couple.

Le résultat d'une telle procédure, nécessairement itérative, est présenté à la figure 18.

Figure 18: Optimisation du maître-couple.



5.2.7. Résumé des conclusions de l'étude d'optimisation des panneaux

1. La méthode et le modèle utilisés sont valides.
2. La méthode permet à quiconque, même non spécialiste, d'obtenir des dimensionnements corrects, quel que soit le type de navire: yacht ou navire de commerce.
3. Le bénéfice de l'optimisation atteint 5% du coût global et 10% du poids.
4. La structure la plus légère n'est pas la moins coûteuse. La longueur totale des soudures est un bon estimateur du coût de construction, au contraire du poids.
5. La méthode permet de s'adapter aux conditions économiques, même si les données ne sont pas connues très exactement. Elle permet en tous cas de faire de la prospective.

6. Conclusions générales

1. L'utilisation de l'ordinateur permet:
 - un gain en coût et/ou en temps considérable;
 - de mieux explorer un problème par l'étude de solutions alternatives.
2. L'optimisation permet d'obtenir:
 - automatiquement et très rapidement les conceptions optimales;
 - des gains en coût et/ou en poids considérables en valeur absolue.
3. Ces méthodes de travail:
 - obligent à une modélisation des problèmes étudiés et donc à un travail de structuration de ces problèmes;
 - sont d'un accès facile, avec des programmes qui travaillent sur ordinateur de type PC;
 - deviennent, et deviendront encore, plus indispensables avec les difficultés croissantes du monde maritime.

Bibliographie

- [1] LYON T.D. & MISTREE F., *A Computer-Based Method for the preliminary Design of Ships*, in: *Journal of Ship Research*, vol. 29, N° 4, décembre 1985.
- [2] WINKLE I.E. & BAIRD D., *Towards more effective structural Design through Synthesis and Optimisation of relative fabrication Costs*, Joint meeting of RINA/IESS, Glasgow, 26 novembre 1985. *Optimisation of stiffened Cylinders in Offshore Construction*, in: *The Naval Architect*, octobre 1987.
- [3] VAN FRACHEN T., *Optimisation Technico-économique de la Structure de la Coque du Navire*, Thèse doctorale, Université Catholique de Louvain, Louvain la Neuve, 1985.
- [4] WATSON D.G.M. & GILFILLAN A.W., *Some Ship Design Method*, in: *The Naval Architect*, Juillet 1977.
- [5] HUGHES F., MISTREE F., ZANIC V., *A Practical Method for the rational Design of Ship Structures*, in: *Journal of Ship Research*, Vol. 24, N° 2, 1980.

Samenvatting

In deze lezing worden twee toepassingen van optimalisatie bestudeerd, nl. het ontwerp van het schip en het concept van zijn structuur. De numerieke resultaten die voortvloeien uit economische overwegingen, leiden tot de volgende besluiten:

1. De optimalisatie laat een snelle uitwerking toe van het meest geschikte ontwerp van het schip en de bestudering van de varianten;
2. Door de optimalisatie van de structuur wordt 7% van de totale kostprijs en 10% van het gewicht uitgespaard;
3. De economische overwegingen beïnvloeden de afmetingen van de optimale structuur.

Dank zij de nieuwe programma's die werken op kleine computersystemen (PC), zal de optimalisatie op korte termijn zijn doeltreffendheid bewijzen, vooral in een ongunstige economische situatie.

Summary

Two cases of optimisation are presented in this paper: the project of the ship and the design of its structure. The numerical results, which include economic data, lead to the following conclusions:

1. Optimisation leads quickly to the best project of the ship and the different alternatives;
2. Profits which are produced by structure's optimisation amount approx. 7% of the constructions cost and approx. 10% of the weight;
3. Economic data are important to the optimal structure. Thanks to the new programs related to small computers (PC), optimisation will induce efficiency at short time in other areas, as the economical exploitation of the ship, and this will be evident in a difficult economical situation.

C.V. BRABO

Havenloodsen en Bootlieden

36-42, ST.-ALDEGONDISKAAL – 2000 ANTWERPEN

Tel. Adr.: DOCKPILOTS-ANTWERP

Onze firma gelast zich met beloodsen,
meren en ontmeren van alle schepen in de haven.
De uitvoering is toevertrouwd aan bekwame vaklui.

Werkleider:

Tel. (03) 541 09 20 – 568 68 09

Telex 33064 ANT

Telefax (03) 568 79 81

Motorboten voor het overbrengen van orders naar
schepen op de rede en in de dokken zijn altijd
beschikbaar.