

UN OUTIL D'OPTIMISATION DES STRUCTURES ORTHOTROPES INTÉGRÉ À L'AVANT-PROJET

Avec minimisation du coût de construction

par Ph. Rigo

RÉSUMÉ

LBR-5 est un outil d'optimisation de structures constituées de plats raidis et de coques cylindriques raidies. Le modèle d'optimisation BLR-5 est essentiellement composé de 3 modules de base (OPTI, CONSTRAINT et COST). L'utilisateur choisit les contraintes d'optimisation (géométriques et structurales) dans des banques de données externes. Un ensemble de contraintes d'optimisation standards sont proposées aux utilisateurs. L'optimisation étant fondée sur un critère de moindre coût de construction, les coûts unitaires des matériaux, mais également de soudure, de découpage,... et les coûts de main d'œuvre doivent être spécifiés par l'utilisateur de manière à définir explicitement la fonction objectif. La solution optimale découle d'une technique d'optimisation faisant appel à la linéarisation convexe et une approche duale. L'analyse optimale d'une unité FSO (Floating Storage Offloading) est présentée à titre d'exemple.

SUMMARY

LBR-5 is a structural optimization tool for structures composed of stiffened plates and stiffened cylindrical shells. The LBR-5 optimization model is mainly composed of 3 basic modules (OPTI, CONSTRAINT and COST). The user selects the constraints (geometrical and structural constraints) in external databases. Standard constraint sets are proposed to users. Since the present optimization deals with minimum construction costs, unitary material costs, welding, cutting,... and labor costs must be specified by the user to define an explicit objective function. The optimum solution is found with an optimization technique using convex linearization and a dual approach. The optimum analysis of a FSO unit (Floating Storage Offloading) is presented as example.

1. - INTRODUCTION

La conception et le dimensionnement des structures hydrauliques, flottantes et navales ont toujours posé de nombreux problèmes aux ingénieurs. Il s'agit, en effet, de structures complexes, généralement composées de bordés fortement raidis, d'un pont, d'un fond, parfois de ponts intermédiaires, d'un système de cloisonnement, etc. Le système de raidissage est, lui aussi, particulièrement sophistiqué. On y rencontre plusieurs niveaux de renforts et cela dans deux, voire trois directions. Chaque renfort a son rôle propre et des caractéristiques géométriques différentes.

Les lignes directrices et lignes guides d'un dimensionnement sont toujours définies lors de la première phase d'un projet, à savoir : l'étude préliminaire qui correspond dans bien des cas à la phase de remise d'offre. Il n'est dès lors pas difficile de comprendre l'intérêt que représente un outil d'optimisation spécialement conçu pour la phase d'avant-projet. C'est dans cet esprit que le logiciel d'optimisation des structures orthotropes hydrauliques et navales (LBR-5) a été pensé et développé [Rigo 1998].

L'objectif poursuivi est d'adjoindre aux outils traditionnels de conception (CAO de construction métallique, plan de forme, calcul des hydrostatiques, stabilité en flottaison, devis de poids,...) un module de dimensionnement rationnel qui, dès le stade de l'avant-projet (ou de l'étude préliminaire), permet :

- une analyse du comportement d'ensemble de la structure ou au moins du maître couple ;
- une prise en compte explicite de tous les états limites afférents à la structure (états limites de service et états limites ultimes) grâce à une analyse rationnelle de la structure et des modes de ruine. Par analyse rationnelle, il faut comprendre un ensemble cohérent et homogène de méthodes de calcul, dites rationnelles, qui reposent sur la physique, la mécanique des milieux continus, la résistance des matériaux, ... et qui se différencient des formulations empiriques ou paramétriques ;
- dès le stade de l'avant-projet, une optimisation de l'échantillonnage (dimensions) des éléments constitutifs de la structure ;
- l'intégration du coût de construction et de fabrication dans le processus d'optimisation via une fonction objectif coût.

C'est principalement au niveau de l'avant-projet que ce module d'optimisation montre ses potentialités. C'est en effet durant les premières étapes du projet que la souplesse et la rapidité de modélisation de la méthode apportent une aide précieuse. A ce moment, peu de paramètres sont définitivement fixés et une modélisation même « grossière » (*coarse mesh*) par éléments finis est généralement impraticable pour des raisons de budget, de durée de modélisation, de données disponibles,... et cela, surtout pour les bureaux d'études et les chantiers de taille modeste (PME).

De plus, le module d'optimisation LBR-5 peut s'utiliser en phase finale du projet pour effectuer une vérification d'ensemble ou pour affiner l'échantillonnage. Néanmoins, à ce stade du dimensionnement, ce module doit impérativement s'utiliser en complément d'analyses spécifiques concernant les problèmes de fatigue, de vibration, de concentration de contraintes,... Des informations complémentaires concernant l'utilisation et l'accès du logiciel par des tiers peuvent être obtenues auprès de l'auteur de cette publication.

2. - DOMAINE D'APPLICATIONS

Le domaine d'applications de cet outil concerne les structures hydrauliques et flottantes. Dans ce cas, le module d'optimisation permet généralement de traiter l'entière de la structure. Ainsi en est-il des « grandes structures hydrauliques mobiles », telles que les barrages mobiles (barrières marées tempêtes de 50, 100 ou 300 m de portée et vannes de régulation de rivières de 10, 25 ou 50 m de portée), les portes d'écluses (écluses maritimes de 40, 50 ou 70 m de large et écluses d'intérieur soumises à des pressions hydrostatiques de 10, 25 ou 80 m) ainsi que les pontons et docks flottants.

Pour les structures navales, le domaine d'applications est clairement celui de la partie centrale des navires c'est-à-dire la zone cylindrique ou prismatique des bateaux de charge. Cette zone est la longueur la plus importante pour les grandes unités flottantes. Pour les unités plus petites, la zone cylindrique est réduite, voire même inexistante. Dans ce cas, le modèle LBR-5 est utilisé pour l'optimisation du maître couple (section transversale ou coupe au maître).

Le développement du module LBR-5 trouve son origine dans une nouvelle méthodologie de projet destinée à faciliter et améliorer les études d'avant-projet et de projet des structures navales et des structures hydrauliques mobiles et flottantes. Il est fondé sur un savoir-faire important acquis dans le domaine des structures hydrauliques qui s'est concrétisé en 1988 par le développement d'un programme de calcul des structures orthotropes (portes d'écluse, barrages mobiles, ...) [Rigo 1989, 90 et 92]. Les fondements du « Logiciel des Bordages Raidis (LBR-4) » ont aussi été présentés dans la revue *Construction Métallique* [Rigo 3-1989]. Ensuite, dans le cadre de nos recherches relatives aux structures navales [Rigo 1989b et 92b], on y a adjoint le processus d'optimisation.

Il en est résulté la mise au point d'un outil d'analyse et d'optimisation qui s'applique aussi bien aux structures navales qu'aux ouvrages hydrauliques. L'esprit dans lequel cet article est écrit est donc celui de la mixité de deux domaines d'application mais d'un seul et unique outil. Cela n'a été possible qu'en unifiant les approches de calcul et en recourant à des approches rationnelles d'évaluation des états limites des structures.

3. - LBR-5 ET LE CONCEPT D'OPTIMISATION

ORIENTÉE MODULES

L'idée est de créer un modèle polyvalent d'optimisation, ouvert vers l'extérieur et compatible avec des « modules » de calcul des structures basés sur des codes et des règlements spécifiques. Ce modèle doit contenir des méthodes d'analyse et d'évaluation pouvant toujours être enrichies et complétées par l'utilisateur.

En effet, l'utilisateur doit pouvoir y modifier les restrictions et y ajouter des limitations/impositions complémentaires en fonction du type de structures étudiées (structures hydrauliques, navales, offshore, ...), du code ou du règlement en vigueur et de son expérience et aptitude en matière de dimensionnement. L'objectif est de créer une technique d'optimisation à la carte, en permanente évolution, c'est-à-dire en évolution avec l'utilisateur et ses besoins propres. C'est ce que nous définissons par le terme « programmation orientée modules ».

Le modèle d'optimisation LBR-5 est fondé sur ce concept et est constitué de plusieurs modules. Leur nombre et leur type ne sont pas imposés. Au départ, l'ensemble est constitué des 3 modules de base, définis à la figure 1, qui forment l'ossature

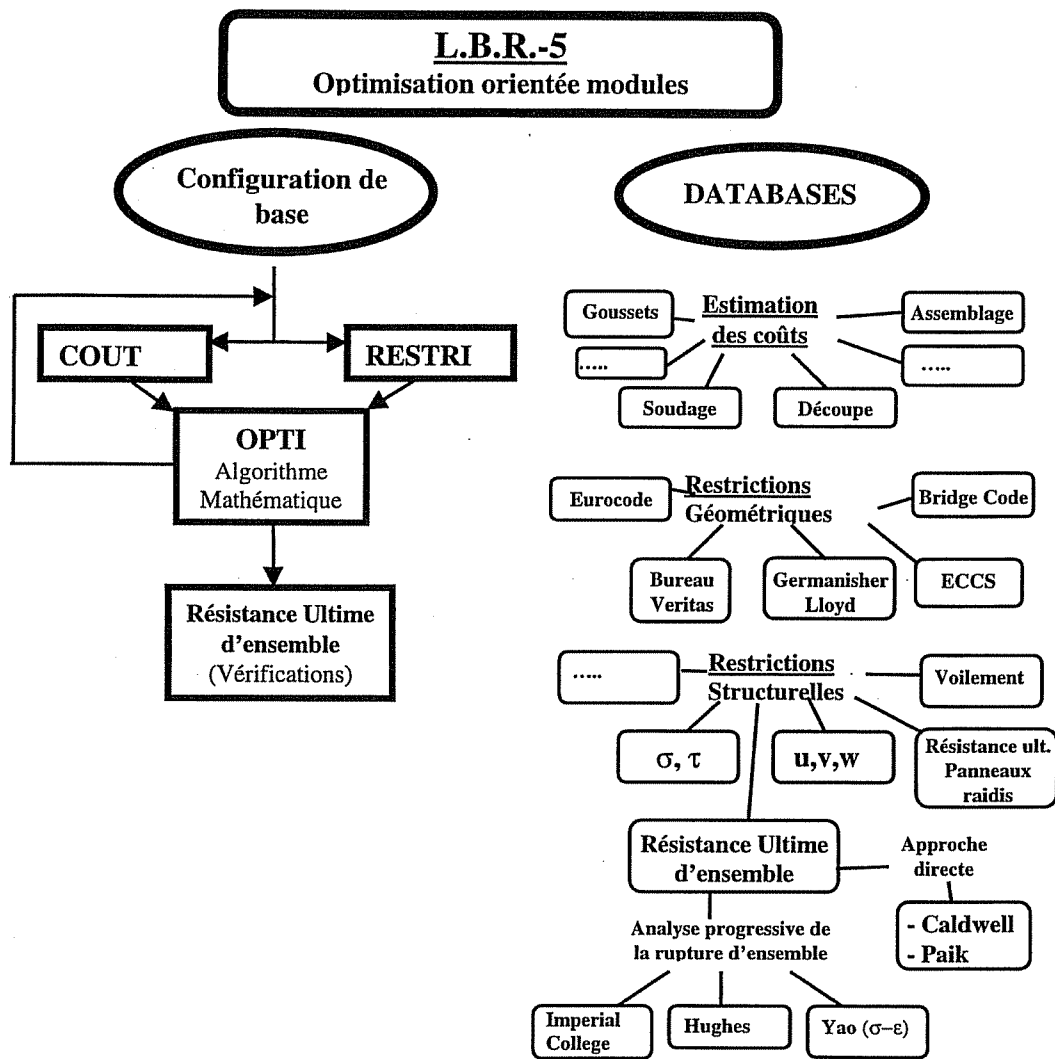


Fig. 1 - Configuration de base du modèle LBR-5 et des banques de données

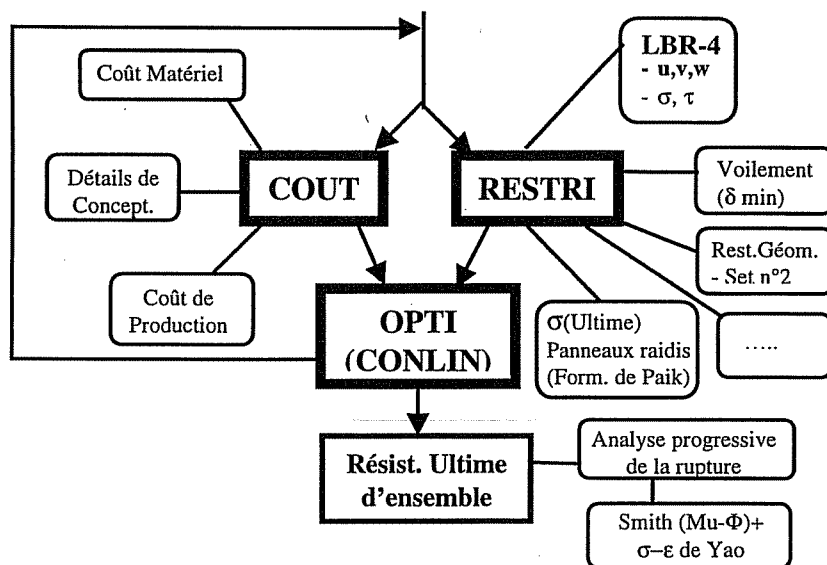


Fig. 2 - Exemple de configuration du modèle LBR-5 après sélection d'un ensemble de sous modules (restrictions)

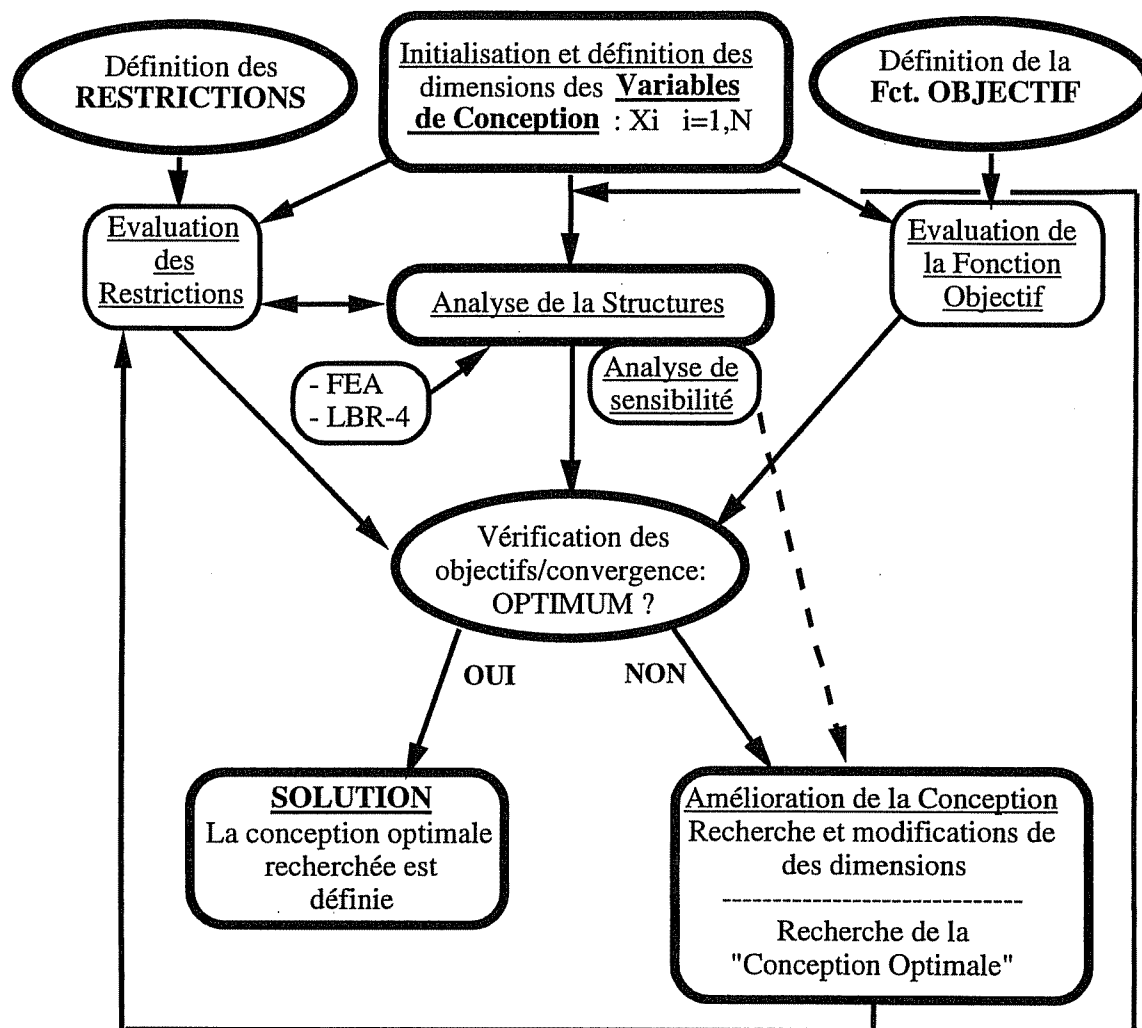


Fig. 3 – Organigramme général du modèle mathématique d'optimisation du dimensionnement des structures

de l'outil (*COUT*, *RESTRI* et *OPTI*). On y présente également les «banques de données» dans lesquelles l'utilisateur peut effectuer son «shopping» c'est-à-dire choisir les restrictions adéquates et les données de coût. Après sélection des restrictions géométriques et structurelles et des outils de calcul des coûts dans les «banques de données», la figure 2 donne un exemple du modèle prêt à l'emploi. En complément, la figure 3 décrit succinctement l'organigramme général d'un processus d'optimisation des structures et la figure 4 celui du logiciel LBR-5.

Autour des modules *COUT* et *RESTRI* (restrictions) gravitent un grand nombre de *sous modules*. Au stade actuel des développements, seul un nombre limité de modules a été développé (en général, 1 ou 2 par type de restrictions). C'est à l'utilisateur de compléter, adapter, ajouter de nouveaux modules en fonction de ses spécificités (type de structures, codes et règlements à suivre, niveau technique et scientifique, hardware disponible ...). L'objectif est de permettre à l'utilisateur de se construire lui-même l'outil dont il a besoin.

En ce qui concerne les restrictions structurelles, l'utilisateur doit d'abord choisir les types de restrictions (plastification, voilement, déformation, ...) puis, pour chaque type de restrictions, la méthode, le code ou la réglementation à utiliser et enfin les points/zones/panneaux où ces restrictions seront vérifiées.

3.1. – La modélisation de la structure

La structure est modélisée en panneaux orthotropes (plaque et coque cylindrique; figure 5) et à chaque panneau, on peut y associer un maximum de neuf variables de conception (notées XI ou Xi). Ces 9 variables de conception sont respectivement :

- L'épaisseur de la tôle du bordé.
- Pour les renforts longitudinaux (raidisseurs, traverses, lisses, carlingues) :
 - la hauteur et l'épaisseur de l'âme,
 - la largeur de la semelle,
 - l'entredistance entre renforts.
- Pour les renforts transversaux (aiguilles, cadres, varangues et membrures) :
 - la hauteur et l'épaisseur de l'âme,
 - la largeur de la semelle,
 - l'entredistance entre renforts.

Sélection et initialisation des variables de conception (XI)
et des bornes ($X_{min} \leq XI \leq X_{max}$).

MODULE RESTRI

- Calcul des restrictions géométriques ($C(x_i)$) et des sensibilités ($\partial C/\partial x_i$)
- Calcul des restrictions structurelles relatives au comportement d'ensemble de la structure et des sensibilités (contraintes, déplacements...)

• **LBR-4 (Analyse élastique)**
Calcul des déformations,
efforts et contraintes (σ, w, \dots)

• **SENS**
Calcul des sensibilités ($\partial \sigma/\partial x_i, \dots$)

- Calcul des autres restrictions structurelles et des sensibilités

- Plaque	voilement, résistance ultime,...
- Raidisseurs	
- Panneaux raidis	
- Structure d'ensemble	

MODULE COUT

- Calcul de la fonction objectif ($F(x_i)$) et des sensibilités ($\partial F/\partial x_i$)

MODULE OPTI

- Assemblage des données venant des modules RESTRI et COUT
- Recherche de l'optimum → **CONLIN**
- Ré-actualisation du dimensionnement sur base de la solution proposée par CONLIN

Vers une nouvelle itération

SOLUTION OPTIMALE

Fig. 4 – Organigramme du modèle d'optimisation LBR-5

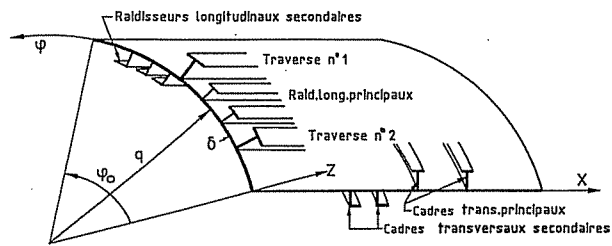


Fig. 5 - Le panneau orthotrope de base (ou élément de base) utilisé pour modéliser la structure

3.2. - Les 3 modules de base

Le module **OPTI** contient l'algorithme mathématique d'optimisation (CONLIN) qui permet la résolution de problèmes d'optimisation contraints et non linéaires. Il est particulièrement performant car il ne requiert qu'un nombre réduit d'itérations. En général, moins de 15 itérations sont nécessaires même en présence de plusieurs centaines de variables de conception (X_i). Ce module utilise comme données les résultats des deux autres modules de base, à savoir; **RESTRI** pour les restrictions $C(X_i)$ et **COUT** pour la fonction objectif $F(X_i)$.

Le module **RESTRI** permet à l'utilisateur de prendre facilement en compte une série de restrictions qui sont à sa disposition dans une banque de données (fig. 1). C'est à l'utilisateur de sélectionner les restrictions nécessaires (contrainte, déplacement, voilement,...). Toutefois, afin de faciliter l'utilisation, des ensembles cohérents de restrictions sont proposés à l'utilisateur. Ces ensembles sont basés sur des règlements/codes nationaux et internationaux (Eurocodes, Recommandation du ECCS, Sociétés de classification, ...).

Le module COUT : En 2000, même au stade de l'avant-projet, un processus d'optimisation sur base du seul poids minimum ne peut plus se justifier et doit être remplacé par la recherche du coût minimum de construction ou encore mieux du coût global (intégrant aussi les coûts de fonctionnement). La fonction objectif du logiciel LBR-5 permet de prendre en considération le coût de construction (module **COUT**) et/ou le poids (exemple : 60 % du coût et 40 % du poids). Afin de lier la fonction objectif (Euro) aux variables de conception (X_i), les coûts unitaires des matières premières (Euro/Kg), les niveaux de productivité pour le soudage, la découpe, le montage (heures-hommes/unité de travail = h-h/unité) et les coûts de la main d'œuvre (Euro/h-h) doivent être spécifiés par l'utilisateur.

Ces coûts varient en fonction du type et de la taille de la structure, de la technologie de fabrication (soudage manuel, robot, ...), de l'expérience et des installations du site de fabrication, du pays, etc. Il est donc clair que le résultat du processus d'optimisation (dimensionnement optimum) ne sera valable que pour les données économiques et de production considérées.

4. - «OPTI» : LE MODULE MATHÉMATIQUE D'OPTIMISATION

Le problème à résoudre peut d'une façon synthétique se résumer comme suit :

- X_i $i = 1, N$ les N variables de conception,
- $F(X_i)$ la fonction objectif à minimiser,
- $C_j(X_i) \leq CM_j$ $j = 1, M$ les M restrictions structurelles et géométriques,

$$\bullet X_{i \min} \leq X \leq X_{i \max}$$

les bornes min et max des variables de conception X_i : $X_{i \min} \leq X_i \leq X_{i \max}$ (bornes technologiques)

Le module **OPTI** est basé sur le programme **CONLIN** (1989) développé par **C. Fleury** (1986, 89 et 93). Afin de résoudre de larges problèmes d'optimisation comportant plusieurs centaines de variables de conception soumis à des restrictions implicites et non linéaires, **Fleury** propose de combiner les approximations convexes et une approche duale (figure 6).

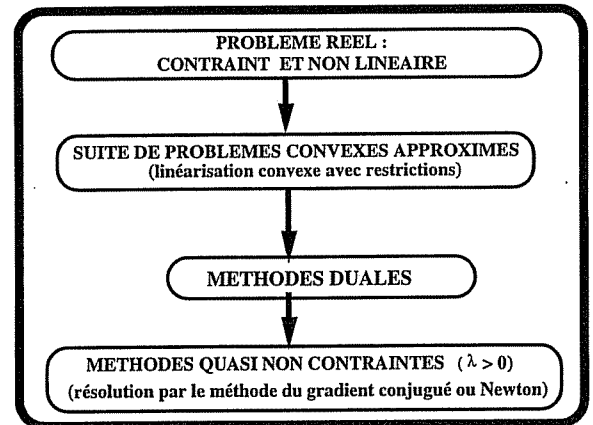


Fig. 6 - Approximations convexes et méthodes duales.

La difficulté principale de la résolution d'un problème dual réside dans la non linéarité des fonctions (souvent implicites). Afin d'éviter un grand nombre d'évaluations de ces fonctions non linéaires et implicites, il est fait appel aux approximations convexes. À chaque itération, chaque fonction (fonction objectif et restrictions) est remplacée par une approximation dite convexe et explicite. Le problème d'optimisation initial est donc décomposé en une séquence de sous problèmes d'optimisation convexe (obtenus par linéarisation convexe et explicite) qui peuvent aisément être résolus avec la méthode duale et les multiplicateurs de **Lagrange** (fig. 6).

Pour remplacer ces expressions complexes non linéaires par des approximations linéaires, on utilise le développement en série de **Taylor** limité au 1er ordre et trois types d'approximation linéaire d'une fonction $C(X_i)$ sont possibles.

- Linéarisation en fonction des variables X_i , $i = 1, N$:

$$C(X_i) = \tilde{C}(X_i) = C(X_i(0)) + \sum [X_i - X_i(0)] \cdot \partial C(X_i(0)) / \partial X_i \quad [1]$$

- Linéarisation en fonction des variables inverses $1/X_i$, $i = 1, N$:

$$C(X_i) = \tilde{C}(X_i) = C(X_i(0)) + \sum [1/X_i - 1/X_i(0)] \cdot \partial C(X_i(0)) / \partial (1/X_i) \quad [2]$$

- Linéarisation en fonction de variables mixtes X_i , $l = 1, L$; $1/X_j$ et $j = L + 1, N$

$$C(X_i) = \tilde{C}(X_i) = C(X_i(0)) + \sum_{i=1}^L [X_i - X_i(0)] \cdot \partial C(X_i(0)) / \partial X_i + \sum_{j=L+1}^N [1/X_j - 1/X_j(0)] \cdot \partial C(X_i(0)) / \partial (1/X_j) \quad [3]$$

Il n'est pas adéquat de linéariser, en fonction des X_i (Éq.1), des restrictions liées aux déplacements ou aux contraintes car ceux-ci varient généralement inversement proportionnellement au X_i . De même, rien ne justifie de linéariser une restriction technologique qui varie proportionnellement avec les X_i en fonction des variables inverses $1/X_i$ (Éq.2).

Le bon sens conduit donc à proposer une linéarisation en fonction de variables mixtes (X_i et $1/X_i$, Éq. 3). La question est alors de déterminer, pour chaque variable, quelle linéarisation est la plus adéquate (variable directe ou variable inverse) ?

La réponse a été fournie par Fleury qui propose d'effectuer la sélection de manière à remplacer l'espace de conception (zone admissible pour les variables de conception) par un domaine plus petit, inclus dans le premier et convexe. On peut résumer ceci en disant que le domaine de substitution est conservatif c'est-à-dire qu'il conduit à une solution toujours admissible mais pouvant être « légèrement » différente de l'optimum réel. Ce conservatisme se réduit au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'optimum réel.

Cette convexité et ce conservatisme permettent donc une convergence sécurisante et rapide. La convergence est sécurisante car la solution proposée à chaque itération reste toujours dans le domaine admissible. De plus, Fleury et Braibant (1986) ont montré que ce conservatisme atteint son maximum si on sélectionne les variables X_j à associer à une linéarisation inverse ($1/X_j$) en fonction du signe de la dérivée première de la fonction à linéariser par rapport à ces variables X_j .

Ainsi, soit une variable X_i ,

si $\partial C(X_i(0))/\partial X_i > 0$, on effectue une linéarisation classique en X_i ;

si $\partial C(X_i(0))/\partial X_i < 0$, on effectue une linéarisation inverse en $1/X_i$.

L'équation 3 devient donc

$$C(X_i) = \tilde{C}(X_i) = C(X_i(0)) + \sum_{+} [X_i - X_i(0)] \cdot \partial C(X_i(0))/\partial X_i - \sum_{-} [1/X_j - 1/X_j(0)] \cdot (X_j(0))^2 \partial C(X_j(0))/\partial X_j \quad [4]$$

avec $\partial C(X_i(0))/\partial X_i > 0$ ($1 \leq i \leq N$)

et $\partial C(X_j(0))/\partial X_j < 0$ ($1 \leq j \leq N$) pour $i = 1, N$

La technique de l'approximation linéaire convexe (Éq. 3) est très commode puisque les seules données requises par l'algorithme sont : $C(X_i(0))$ et $\partial C(X_i(0))/\partial X_i$ pour $i = 1, N$. L'algorithme effectue lui-même à chaque itération, sur base du signe de $\partial C/\partial X$, une linéarisation directe (X) ou inverse ($1/X$).

Notons toutefois que le conservatisme n'est garanti que vis-à-vis de fonctions linéaires en X_i et en $1/X_j$. À titre d'exemple, étudions le conservatisme des différentes formes de linéarisation sur les deux restrictions C_1 et C_2 (Éqs 5 et 6).

$$C_1(X) = 5X_2 - X_1^2 - 10 \leq 0 \quad [5]$$

$$C_2(X) = 5/4 X_2^2 + 16/X_1^2 - 13 \leq 0 \quad [6]$$

La représentation graphique de ces restrictions (fig. 7) montre que l'approximation convexe est la plus conservatrice des approximations. Elle l'est par rapport à la fonction de départ C_1 mais pas vis-à-vis de C_2 . En effet, la fonction réelle C_2 est au départ déjà convexe (et quadratique en $1/X$).

5. - « RESTRI » : LES RESTRICTIONS

GÉOMÉTRIQUES ET STRUCTURELLES

Les restrictions sont des fonctions linéaires ou non linéaires, explicites ou implicites des N variables de conception (XI). Elles sont la traduction analytique des limitations que l'utilisateur désire imposer aux variables de conception elles-mêmes

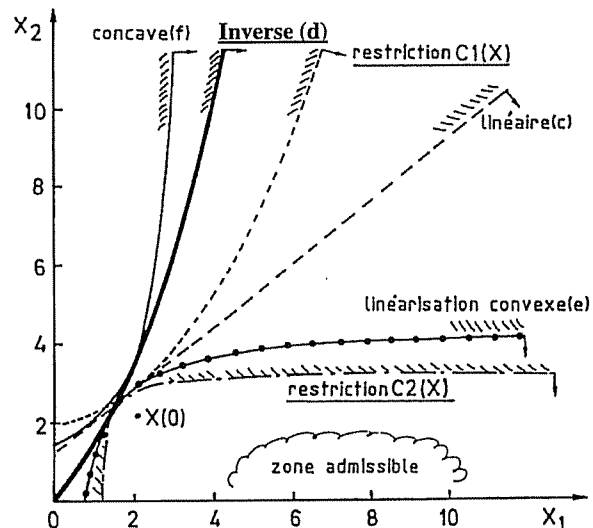


Fig. 7 - Comparaison des modes de linéarisation

ou à des paramètres liés à ces variables (exemples : déplacements et contraintes).

Ainsi on peut distinguer :

- **Les restrictions technologiques** qui constituent les bornes supérieures et inférieures des variables de conception.

Par exemple : $X_{i \min} = 4 \text{ mm} \leq X_i \leq X_{i \max} = 40 \text{ mm}$,

avec : $X_{i \min}$ une épaisseur limite due, par exemple, à la corrosion,

$X_{i \max}$ une limite technologique de fabrication ou d'assemblage.

- **Les restrictions géométriques** qui lient les variables de conception entre elles de façon à garantir une structure fonctionnelle, réalisable et fiable. Elles reposent généralement sur des règles de bonnes pratiques destinées à éviter des problèmes de résistance locale (instabilité de l'âme, déversement des membrures, ...) ou à garantir un soudage aisé et de qualité. Exemple : $0,5 \leq X_2 / X_1 \leq 2$ avec X_1 l'épaisseur de l'âme d'un raidisseur et X_2 l'épaisseur de la semelle.

- **Les restrictions structurelles** qui prennent en compte, explicitement ou implicitement, des phénomènes physiques afin d'en limiter l'apparition (plastification, flambement, fissuration) ou l'importance (déformation, contrainte).

Ainsi, ces restrictions peuvent limiter :

- le niveau de déformation (absolu ou relatif) en un point de la structure,
- le niveau de contraintes dans un élément (σ_x , σ_y , τ et $\sigma_c = \sigma_{\text{von Mises}}$),
- le niveau de sécurité vis-à-vis du voilement, de la résistance ultime, du déversement, ... (exemple : $\sigma/\sigma_{\text{ult}} \leq 0,5$).

Pour chaque restriction structurelle (ou phénomène physique), le modèle de comportement choisi est particulièrement important car c'est lui qui conditionne la qualité de la représentativité de la restriction. Ces modèles de comportement peuvent être si complexes qu'il n'est pas possible d'exprimer explicitement la relation entre la fonction étudiée et les variables de conception (XI). Ainsi en est-il lorsque l'on a recours à des modèles mathématiques (FEM, LBR-4, ...). Dans ce cas, on a recours à une approximation (linéarisation convexe) qui consiste à remplacer la fonction implicite par une fonction

explicite «ajustée» à la fonction de départ dans le voisinage des valeurs initiales des variables de conception.

La liste proposée des restrictions structurelles du modèle LBR-5 est intimement liée aux types de structures visés par cet outil. A savoir, les structures métalliques, prismatiques (en caissons), raidies (orthotropes) liées à la construction hydraulique et à la construction navale. Ces structures sont composées de panneaux, cylindriques ou plans (fig. 5). Ces panneaux sont reliés les uns aux autres suivant des génératrices communes (arêtes de la structure prismatique). Les panneaux sont raidis longitudinalement et transversalement (fig. 8).

• Longitudinalement :

- * par des raidisseurs (lisses),
- * par des traverses, éléments ponctuels de forte rigidité (carlingue, hiloire, serre).

• Transversalement :

- * par des cloisons transversales (dites cloisons étanches),
- * par des cadres transversaux, dits renforcés ou principaux, de fortes dimensions (porque, varangue),
- * par un raidissage transversal dit secondaire (raidissage local, aiguille).

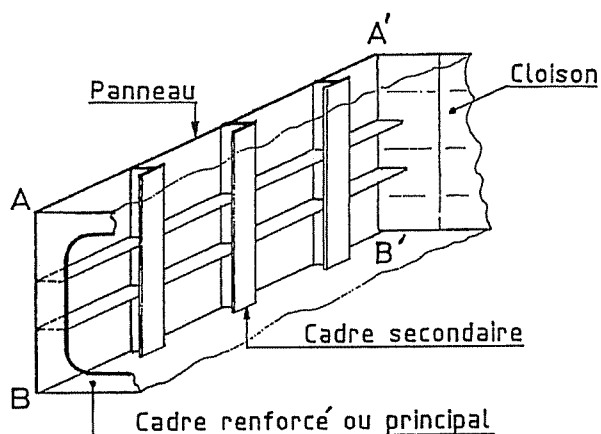


Fig. 8 - Un panneau raidi

En allant du «particulier» au «général» (fig. 8), on différencie trois types de restrictions :

• Les restrictions liées aux panneaux raidis

Les panneaux sont limités par leurs arêtes latérales (jonctions avec d'autres panneaux, AA' et BB') et par des cloisons étanches ou par des cadres transversaux. Ces panneaux ainsi définis sont des plaques ou des coques orthotropes appuyées sur leurs quatre bords, chargés latéralement (flexion) et soumis, à leurs extrémités, à des efforts de compression/traction et de cisaillement (efforts membranaires). Les appuis des panneaux et, en particulier ceux correspondant aux cadres renforcés, sont supposés indéformables. Cela signifie que ceux-ci ne peuvent se déformer significativement qu'après la ruine du panneau raidi.

• Les restrictions liées aux cadres transversaux

Ces cadres reprennent les charges latérales (pression, poids propre ...) et sont donc dans un état combinant une flexion et une compression importantes. La rigidité de ces cadres doit être assurée afin de respecter les hypothèses relatives aux appuis des panneaux (conditions d'indéformabilité).

• Les restrictions d'ensemble (fig. 10)

La résistance ultime de la structure d'ensemble ou d'un tronçon compris entre deux cadres rigides (ou cloisons) doit aussi être envisagée au même titre que la flexion d'ensemble de la poutre navire (plastification).

Afin d'établir ces restrictions, il est nécessaire de différencier les états limites, à savoir :

- un état limite de service qui correspond à une situation où la structure ne peut plus assurer le service pour laquelle elle a été conçue (exemple : déformation excessive),
- un état limite ultime qui correspond à un état de ruine.

La figure 9 présente les différents niveaux d'une structure : structure globale ou structure d'ensemble (niveau 1), les panneaux orthotropes (niveau 2) et le panneau intercostal et la poutre-colonne (niveau 3 et 3bis).

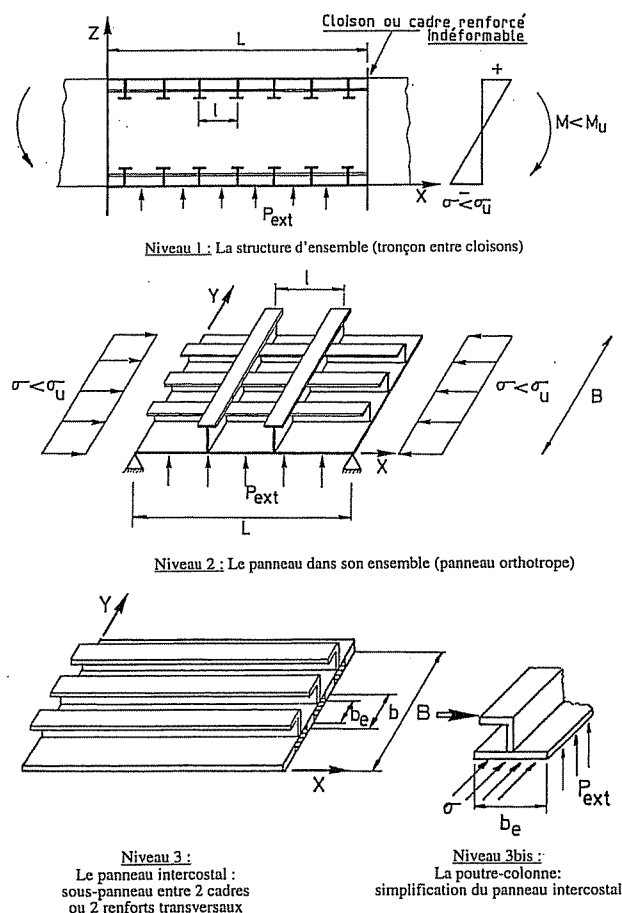


Fig. 9 - Décomposition de la structure

L'organigramme suivant reprend les relations entre les différents états limites considérés.

➔ Niveau 1 : Le moment de flexion ultime de la structure d'ensemble : M_u (fig. 10).

Lorsqu'on parle d'une structure soumise à une flexion d'ensemble, l'état de ruine ou l'état limite ultime est symbolisé par le sommet (point C) de la courbe moment-courbure ($M-\phi$). L'état ultime de ruine (M_u) est atteint lorsque la structure ne peut plus supporter un accroissement complémentaire du moment sans «s'écrouler» totalement (point D).

L'évaluation du moment ultime (M_u) de la structure d'ensemble dépend étroitement de la résistance ultime des pan-

neaux constitutifs de la structure et plus particulièrement de la résistance ultime en compression de ces panneaux mais aussi la relation contrainte moyenne - déformation moyenne (σ - ϵ) [Yao, Rigo et al. 2000]. La figure 10 montre qu'en «sagging» (flexion en contre-arc), le pont est comprimé (σ_u) et atteint l'état ultime lorsque $\sigma_{\text{Pont}} = \sigma_u$ (compression). Par contre, le fond tendu n'atteint son état ultime que lorsqu'il est complètement plastifié ($\sigma_{\text{Fond}} = \sigma_o$ = limite élastique).

➔ Niveau 2 :

Résistance ultime en compression des panneaux orthotropes (σ_u).

$$\sigma_u = \min [\sigma_u (\text{mode } i), i = a, b, c, d]$$

➔ Niveau 3 :

Mode a : Voilement d'ensemble.

Mode b : P_{ultime} panneaux intercostaux : Modèle de la poutre-colonne.

Rupture induite par : - compression du bordé (voilement),
- compression du raidisseur (plastification).

Mode c : Instabilité des raidisseurs.

Mode d : Plastification.

Il est toutefois courant d'imposer aux cadres une rigidité minimale pour que la ruine des panneaux intercostaux (Mode b) apparaisse toujours avant le voilement d'ensemble (Mode a). Il s'agit d'une restriction aisée à modéliser qui évite le calcul complexe du voilement d'ensemble (Mode a).

Notons aussi que dans le Mode b intervient la ruine par voilement du bordé non raidi (maille élémentaire). Cet état limite n'est pas un état ultime mais plutôt un état limite de service.

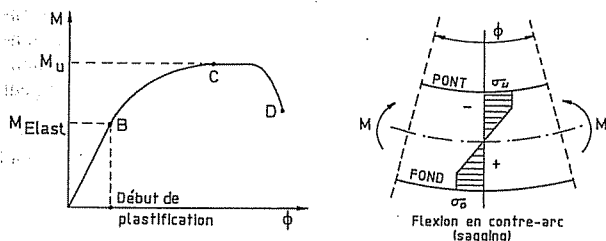


Fig. 10 - Courbe moment-courbure (M - ϕ)

Les restrictions retenues pour le modèle LBR-5 sont classées de la façon suivante :

1. Restrictions relatives aux panneaux raidis

États limites de service

- 1.1. Bornes dimensionnelles : épaisseur du bordé, dimensions des longitudinaux et des transversaux (âme, semelle, entre-distance).
- 1.2. Contraintes maximales admissibles pour se protéger de la plastification.
- 1.3. Déformation du panneau (flèche locale).
- 1.4. Voilement des plaques (non raidies) situées entre deux raidisseurs longitudinaux et deux transversaux (cadres/cloisons).
- 1.5. Instabilité de la semelle et de l'âme des longitudinaux (raidisseurs et traverses).

États limites ultimes

- 1.6. Instabilité d'ensemble des panneaux (grillages orthotropes).
- 1.7. Résistance ultime des panneaux intercostaux raidis longitudinalement.
- 1.8. Flambement par flexion et torsion des raidisseurs (tripping).

2. Restrictions sur les cadres

États limites de service

- 2.1. Bornes dimensionnelles.
- 2.2. Rigidité minimale pour garantir des appuis rigides aux panneaux intercostaux (entre deux cadres).
- 2.3. État de contraintes sous les charges combinées (M, N, T).
 - Analyse élastique,
 - Analyse élasto-plastique.

États limites ultimes

- 2.4. Instabilités transversales des cadres.
 - Ame,
 - Semelle,
 - Instabilité du profilé (déversement).

N.B. : Ces états limites sont assimilés à des états limites ultimes car si l'un d'eux apparaît, les conditions relatives aux appuis des panneaux ne sont plus vérifiées et la ruine de ces panneaux peut être entraînée.

3. Restrictions d'ensemble

États limites de service

- 3.1. Contraintes admissibles (voir aussi la restriction n° 1.2. relative aux panneaux).
- 3.2. Déformations d'ensemble de la structure et déformations relatives entre deux points de la structure (voir aussi restriction n° 1.3 relative aux panneaux).

États limites ultimes

- 3.3. Résistance ultime d'ensemble (de la poutre navire) entre deux cloisons ou cadres renforcés.

N.B. : La ruine des cadres est supposée n'apparaître qu'après la ruine des panneaux compris entre ces cadres. Il suffit donc de vérifier la résistance ultime d'ensemble entre deux cadres pour se prémunir contre une ruine d'ensemble plus générale incluant un, deux ou plusieurs cadres.

À titre comparatif, il est intéressant de mentionner la liste des états limites retenue par le «Ship Structure Committee (SSC n° 375 de 1994) [Hughes 1988 et 94]».

6. - «COÛT» : ÉVALUATION DES COÛTS DE CONSTRUCTION

Le coût global de construction peut se subdiviser en trois catégories :

- Coût des matières premières (matériaux),
- Main-d'œuvre,
- Frais généraux.

a) Coût des matériaux

L'estimation du coût des matériaux consiste à quantifier les volumes requis pour la construction et à obtenir les prix des fournisseurs ou des sous-traitants. Cette tâche, a priori simple, est cependant liée à de nombreuses incertitudes et imprécisions :

- La précision des quantités est fonction du niveau d'avancement du projet.
- Les imprécisions au niveau du devis demandé aux fournisseurs.
- Les rebuts (parties de tôles non utilisées) constituent une inconnue importante, spécialement au début d'un projet. Une estimation classique est de 5 à 10 % mais les écarts peuvent être plus importants selon la zone étudiée.

b) Coût de la main-d'œuvre

La solution alternative aux formulations empiriques du coût [Moe et al. 1968] est l'évaluation analytique de la charge de travail [Winckle et Baird, 1986]. Une telle approche nécessite la connaissance de la durée de travail requise pour la tâche standard associée à chaque poste de travail ainsi que la subdivision en postes de l'ensemble du procédé de construction (toutes opérations comprises).

Les clefs d'une évaluation correcte du coût de la main-d'œuvre sont les suivantes :

- Décomposer la construction en étapes de fabrication et quantifier le travail à effectuer pour chacune d'entre elles (longueur des découpes à classer éventuellement en fonction des épaisseurs, longueur des cordons de soudure à classer en fonction du mode de soudage utilisé : manuel, semi-automatique, automatique,...). Il faut pour cela que l'estimateur connaisse parfaitement les habitudes et potentialités de l'unité de production. Il doit si possible en avoir discuté avec les responsables de la planification et les chefs d'atelier.
- Disposer pour chaque poste de travail d'une méthode d'évaluation de la charge de travail à effectuer. Cette charge sera quantifiée en «heures-hommes». Comme une évaluation précise de la charge de travail par poste est aussi requise pour la planification de la production, son estimation est a priori chose évidente. L'expérience montre toutefois que c'est à ce niveau que les incertitudes sont les plus importantes.

c) Les frais généraux

Les frais généraux sont les frais qui ne peuvent pas être attachés à des postes du processus de construction mais qui sont cependant liés à cette construction. Il faut distinguer les frais fixes et les frais variables. Ces derniers varient avec la production, comme par exemple, les assurances, les fluides (eau, électricité, gaz, chauffage), ... Par contre, les frais fixes sont les charges qui incombent au chantier mais qui sont indépendantes du niveau de production. Ils comprennent l'entretien du site de production, les loyers, le personnel de direction (comptabilité, secrétariat, ...), etc.

6.1. - Évaluation analytique du coût de fabrication

Le coût réel de construction d'une structure peut s'écrire :

$$\begin{array}{cccc} \text{Prix total} & = & \text{Prix matériaux} & + & \text{coût main-d'œuvre} & + & \text{frais généraux} \\ (PT) & & (Mat) & & (MdO) & & (FG) \\ \text{c'est-à-dire} & & PT = Mat + MdO + FG & & & & \end{array} \quad [7]$$

L'objectif de cette étude étant essentiellement de permettre une comparaison objective, sur base du coût, des conceptions successives résultant du processus d'optimisation, seuls les deux premiers termes sont significatifs. Les frais généraux (FG), bien que non négligeables, peuvent ne pas être considérés par le modèle d'évaluation analytique du coût. Il en résulte que le coût considéré dans cette étude sera :

$$\begin{aligned} PT &= Mat + MdO \\ &= \sum_{j=1}^K Q_j \cdot P_j + \sum_{i=1}^{NT} T_i \cdot M_i \cdot S_i \quad [8] \end{aligned}$$

(Nombre (Euro/unité) d'unités) (Heures (Nbre de x (Euro/h-h) hommes la tâche) par tâche)

j : un matériau donné (1 tonne de tôle, 1 m de cornière 60 x 60 x 5, ...),

K : le nombre de matériaux différents, $j = 1, K$

Q_j : la quantité requise du matériau j ,

P_j : le prix unitaire du matériau j (Euro/unité),

NT : le nombre de tâches standards différentes,

i : l'indice de la tâche, $i = 1, NT$

T_i : la charge de travail nécessaire pour effectuer la tâche standard i (heures-hommes),

M_i : le nombre de fois que cette tâche T_i devra être effectuée,

S_i : le coût horaire de la main-d'œuvre (Euro/heures-hommes) d'une personne effectuant la tâche standard i .

Bien que cette équation représente fidèlement le coût total de fabrication, elle masque la diversité des matériaux mais surtout la multitude des tâches standards élémentaires qui sont incluses dans le processus de fabrication. La difficulté ne réside donc pas dans le calcul des équations (Éq. 8) mais dans le travail de subdivision des tâches standards en sous-tâches standards et enfin en tâches standards élémentaires. Une tâche standard élémentaire est définie comme étant une tâche qui ne peut plus se décomposer.

L'équation [Éq.8] est donc la forme condensée d'une équation plus générale dans laquelle le détail des tâches, des sous-tâches et des tâches élémentaires apparaît, c'est-à-dire :

$$\begin{aligned} MdO &= \left(\sum_{i1=1}^{NT1} M_{i1} \cdot \left[\sum_{i2=1}^{NT2} M_{i2} \left[\dots \left[\sum_{ik=1}^{NTk} M_{ik} \left[\dots \left(\sum_{in=1}^{NTn} M_{in} \cdot T_{in} \cdot S_{in} \right) \right] \right] \right] \right] \right) \quad [9] \end{aligned}$$

avec : k : le niveau hiérarchique de la tâche

$k : 1$ le niveau supérieur (bloc)

$k : 2, 3, \dots$ les niveaux intermédiaires (panneaux,...)

$k : n$ le niveau élémentaire

Les étapes de l'estimation du coût nécessitent donc :

- de diviser l'ensemble du processus de construction en NT_1 tâches standards de niveau 1. C'est par exemple la division en blocs de la structure (fig. 11). Plusieurs blocs peuvent être identiques ($M_{i1} = 1, 2, 3 \dots$);
- de subdiviser chacune de ces NT_1 tâches standards en NT_2 sous tâches standards;

- de répéter ce processus jusqu'à parvenir à un ensemble de tâches standards élémentaires (qui ne peuvent plus se subdiviser ou que l'on ne souhaite plus scinder);
- de définir le coût unitaire (S_i) de chaque tâche élémentaire i , ($i = 1$ à NT_n).

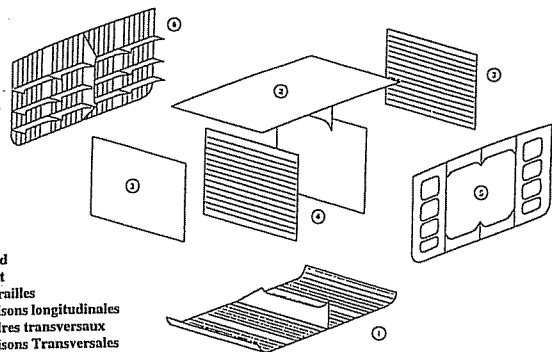


Fig. 11 - Décomposition d'un bloc en éléments [Buxton 1966]

6.2. - Normalisation du coût

Moe et Lund (1968) ont introduit le CERW (« Cost Equivalent Relative Weight ») que nous appelons « Equivalent Poids (EQP) » et qui se base sur les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 \text{Prix total} &= \text{Prix unitaire mat.} \cdot \text{Poids mat.} \\
 (\text{Euro}) & \quad (\text{Euro/t}) & \quad (t) \\
 PT &= Q \cdot P \\
 &+ \text{Prix unitaire MdO} \cdot \text{Volume MdO} \\
 & \quad (\text{Euro/heures-hommes}) \quad (\text{heures-hommes}) \\
 &+ S \cdot T \cdot M \\
 EQP &= \frac{PT}{Q} = P + \frac{k}{t} \cdot \frac{T \cdot M}{(h-h)} \quad (\text{tonne}) \quad [10]
 \end{aligned}$$

avec

$$k = \frac{S}{Q} = \frac{\text{Prix unitaire MdO (Euro/h-h)}}{\text{Prix unitaire Mat (Euro/t)}} \quad (\text{tonne/heures-hommes}) \quad [11]$$

Cet équivalent poids permet une évaluation aisée du coût total pour une gamme de prix unitaires des matériaux (Q) et de la main-d'œuvre (S). Il permet ainsi une comparaison entre des pays différents pour lesquels le coefficient k varie. Pour nos pays occidentaux, le coefficient k varie entre 0,03 et 0,10 t/heures-hommes. Malgré les unités du coefficient k qui pourraient le faire croire ($t/h-h$), le coefficient k n'est absolument pas lié à la productivité mais uniquement au coût de la vie. Pour cette raison, ainsi que Mac Callum [Winkle et Baird, 1986] le suggère, il est judicieux d'introduire un coefficient η qui permet de prendre en compte la productivité du site de production. L'expression de l'équivalent poids devient :

$$\text{Prix total} = [\text{Prix unitaire Mat.}] \times [\text{EQP}] \quad (\text{Euro}) \quad [12]$$

avec EQP : Poids Mat. + $\eta \cdot k \cdot \text{Volume MdO}$ (tonnes)

η : un paramètre d'efficacité du site de production ($\eta = 1$ pour le site de référence)

6.3. - Les fonctions objectives utilisées par le modèle LBR-5

Les deux fonctions objectives de base retenues pour le modèle LBR-5 sont :

- la fonction objectif poids,
- la fonction objectif coût.

a. Fonction objectif Poids

La fonction objectif poids se définit aisément en fonction des variables de conception : épaisseur du bordé (δ), entredistances (Δ) et sections des renforts longitudinaux et transversaux (h, d, w, t). Ainsi, F_p , la fonction objectif poids peut s'écrire, pour un panneau orthotrope, sous la forme :

$$F_p = \gamma \cdot L \cdot B \cdot \left[\delta + \frac{(h \cdot d + w \cdot t)_X}{\Delta_X} + \frac{(h \cdot d + w \cdot t)_Y}{\Delta_Y} \right] \quad [13]$$

- avec L : la longueur du panneau selon X (m),
- B : la largeur du panneau selon Y (m),
- δ : l'épaisseur du bordé (m),
- γ : le poids spécifique (N/m^3),
- $(h, d, w, t)_X$: les dimensions des âmes et des semelles des renforts selon X,
- $(h, d, w, t)_Y$: les dimensions des âmes et des semelles des renforts selon Y,
- Δ_X : l'entredistance entre deux renforts selon X,
- Δ_Y : l'entredistance entre deux renforts selon Y,

L'utilisation de la fonction objectif poids est particulièrement simple et aisée car elle ne nécessite pas la définition de paramètres complémentaires. Elle est donc particulièrement adaptée aux analyses comparatives. Pour des applications industrielles, il est par contre souhaitable de la remplacer par une fonction objectif coût.

b. Fonction objectif Coût - « MODULE COÛT »

Théoriquement, il convient d'établir le modèle coût associé à un site de production. Il ne semble toutefois pas possible de définir un modèle général, valable dans toutes les situations. C'est pourquoi, nous avons développé un modèle plus global, non spécifique à une unité de production, qui permet néanmoins de définir les tendances générales de l'optimum coût.

Le modèle de coût (MODULE COÛT), utilisé actuellement au sein du modèle LBR-5, comprend trois composants (Éq. 14) :

$$F_C = F_{MAT} + F_{CONS} + F_{MDO} = \text{fonction coût (en Euro)} \quad [14]$$

- F_{MAT} : le coût des matériaux (tôles et profilés);
- F_{CONS} : le coût des consommables nécessaires à l'assemblage (énergie, matériel de soudage,...);
- F_{MDO} : le coût de la main-d'œuvre utilisée pour la construction de la structure.

b1) Coût des matériaux : F_{MAT}

Le coût des matériaux s'obtient directement à partir de la fonction poids (Éq. 13). Il suffit de multiplier chaque terme par

le coût unitaire du matériau (tôle, profilé, ...). Ainsi, à partir de l'équation 13, on obtient :

$$F_{MAT} = \gamma \cdot L \cdot B \cdot \left[\begin{array}{l} C_1 \cdot \delta \\ + C_2 \cdot \frac{(h \cdot d + w \cdot t)_X}{\Delta_X} \\ + C_3 \cdot \frac{(h \cdot d + w \cdot t)_Y}{\Delta_Y} \end{array} \right] \text{ (Euro)} \quad [15]$$

avec C_1 : coût au kg d'une tôle de δ (mm),
 C_2 : coût au kg des renforts longitudinaux,
 C_3 : coût au kg des renforts transversaux.

Le paramètre C_1 [Éq.16] permet de prendre en compte une variation du prix au kg des tôles en fonction de leur épaisseur.

$$C_1 = C_1^0 [1 + \Delta C_1 (\delta - E_0) 10^3] \text{ (Euro/kg)} \quad [16]$$

avec C_1^0 : coût au kg d'une tôle dont l'épaisseur est $\delta = E_0$,

E_0 : l'épaisseur de référence à définir par l'utilisateur (en m),

ΔC_1 : variation en % du coût au kg (C_1^0) entre une tôle d'épaisseur E_0 et $E_0 + 1$ mm.

Afin de prendre en compte la différence entre le prix des tôles et le prix des profilés standards [IPE, HEA,...], nous définissons les coefficients C_2 et C_3 de la manière suivante :

$$C_2 = C_1^0 [1 + \alpha_X \cdot \Delta C_2] \quad [17]$$

(Euro/kg) pour les lisses, carlingues et raidisseurs

$$C_3 = C_1^0 [1 + \alpha_Y \cdot \Delta C_3]$$

(Euro/kg) pour les cadres, transversaux et aiguilles

avec $\alpha_X, \alpha_Y = 0$, s'il s'agit de profilés reconstitués sur chantier. Dans ce cas, le coût du soudage pour fabriquer les renforts est considéré séparément (voir ci-après : P_4 et P_5);

$\alpha_X, \alpha_Y = 1$, s'il s'agit de profilés commerciaux standards (IPE, HEA,...);

$\Delta C_2, \Delta C_3$: variation en % du coût au kg des renforts longitudinaux et transversaux par rapport au coût au kg de la tôle de référence (C_1^0), ($\Delta C_2, \Delta C_3 > 0$ ou > 0).

b2) Coût des consommables : F_{CONS}

Le coût au mètre du soudage (énergie, gaz, électrodes, amortissement de l'équipement, ...); main-d'œuvre non comprise, est évalué par la formule suivante:

$$C_8 = C_8^0 (1 + \Delta C_8) \text{ (Euro/m)} \quad [18]$$

avec : C_8^0 : le coût au mètre des consommables pour le soudage d'une tôle d'épaisseur E_0 (= épaisseur de référence) sur une tôle plus épaisse (exemple : soudage de l'âme et de la semelle d'un renfort). On suppose une soudure continue, des deux côtés du renfort (double cordon). En première approximation, l'épaisseur du cordon (gorge) est fixée à 50 % de l'épaisseur de la tôle la plus mince.

ΔC_8 : la variation en % du coût C_8^0 entre une tôle E_0 (mm) et $E_0 + 1$ mm

On aura donc :

$$F_{CONS} = L \cdot B \cdot \left(\frac{2 - \alpha_X}{\Delta_X} + \frac{2 - \alpha_Y}{\Delta_Y} \right) \cdot C_8 \text{ (Euro)} \quad [19]$$

Les coefficients C_8^0 et ΔC_8 ont été définis avec un programme commercial de calcul du prix de revient de la soudure (WELDCOST ©). Nous avons fait des simulations pour un soudage semi-automatique (GMAW) et pour un soudage manuel dit « à la baguette » (électrode enrobée). Dans l'absolu, le coût des consommables pour la fabrication des renforts est faible (fig. 12) vis-à-vis du coût de la main-d'œuvre (productivité en min/m) (fig. 13).

b3) Coût de la main d'œuvre : F_{MDO}

Avec un paramètre d'efficacité ($0 < \eta < 1$) du site de production, on peut écrire :

$$F_{MDO} = \eta \cdot k \cdot C_1^0 \cdot Mdo \quad [20]$$

avec Mdo : la charge de travail (heures-hommes) (Éq. 21).

$$Mdo = L \cdot B \cdot \left[\begin{array}{l} \frac{1}{\Delta_X} \cdot P_4 + \frac{1}{\Delta_Y} \cdot P_5 \\ + \frac{1}{\Delta_X \cdot \Delta_Y} (P_6 + \beta_X \cdot \beta_Y \cdot P_7) \\ + \frac{1 - \alpha_X}{\Delta_X} \cdot P_9(X) + \frac{1 - \alpha_Y}{\Delta_Y} \cdot P_9(Y) \\ + P_{10} \end{array} \right] \quad [21]$$

avec

P_4 : la charge de travail par mètre de renforts longitudinaux soudés sur le bordé (h-h/m)
: 0,6 à 1,2 h-h/m;

P_5 : la charge de travail par mètre de renforts transversaux soudés sur le bordé (h-h/m)
: 0,6 à 1,2 h-h/m;

P_6 : la charge de travail pour effectuer les découpes et les travaux de liaison dus au croisement de deux renforts (h-h/intersection).
: 0,2 à 0,6 h-h/pièce;

P_7 : la charge de travail pour le placement d'un gousset au croisement de deux renforts (h-h/intersection).
: 0,3 à 1,2 h-h/pièce;

β_X, β_Y : la portion en % de renforts longitudinaux (β_X) et transversaux (β_Y) qui nécessitent la pose d'un gousset (exemple: 1 gousset, une lisse sur trois et sur chaque cadre : $\beta_X = 0,33$; $\beta_Y = 1,0$);

P_9 : la charge de travail par mètre de renforts reconstitués, fabriqués dans le site de production (h-h/m). N.B : Si α_X et $\alpha_Y = 1$ (Éq. 17), P_9 ne doit pas être défini;

P_{10} : la charge de travail par m² pour constituer le bordé (h-h/m²). Il est classique de calculer cette charge de travail en fonction de l'épaisseur du bordé et du rapport du demi périmètre d'une tôle constitutive du bordé ($a \times b$) sur sa surface [(a + b)/(a . b)].
: 0,3 à 1,5 (h-h/m²).

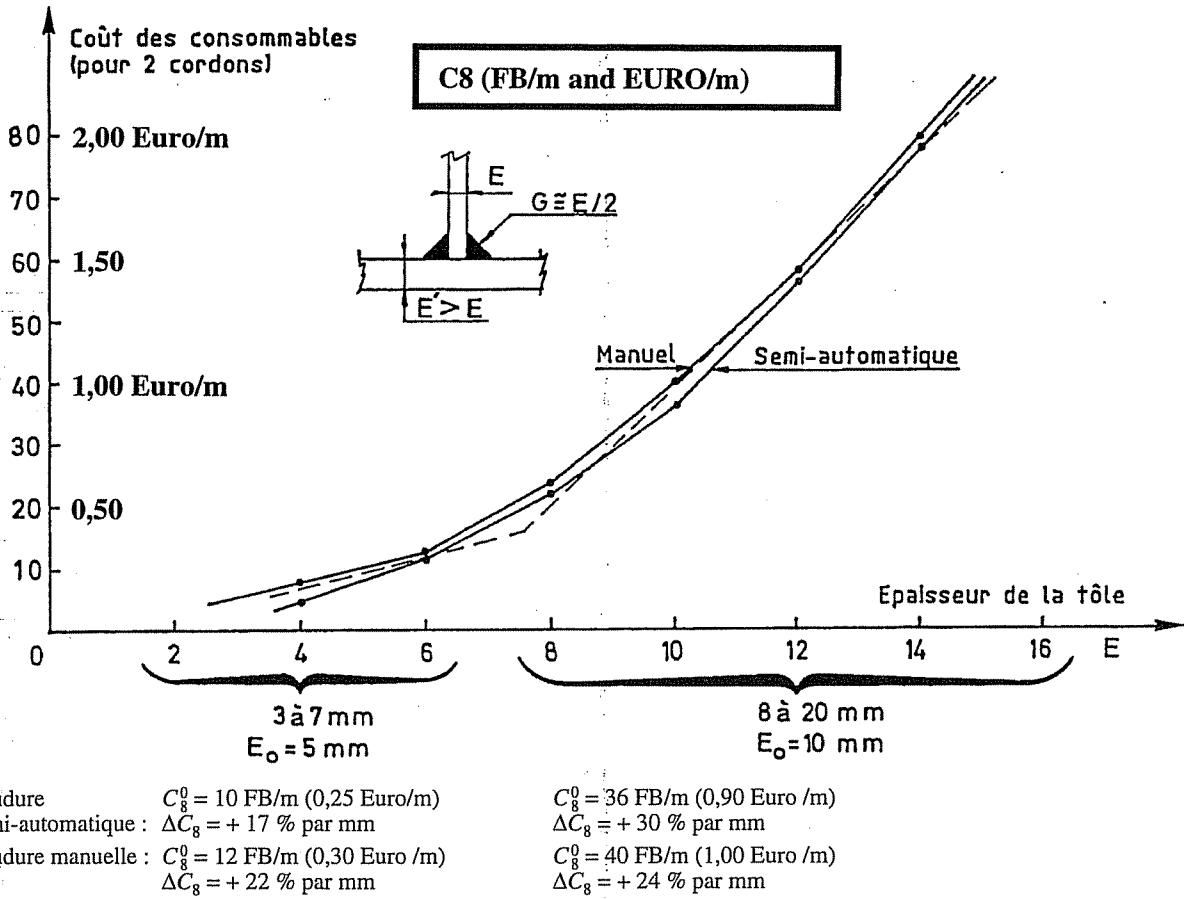


Fig. 12 - Coût des consommables pour le soudage d'un mètre de renforts (deux cordons).

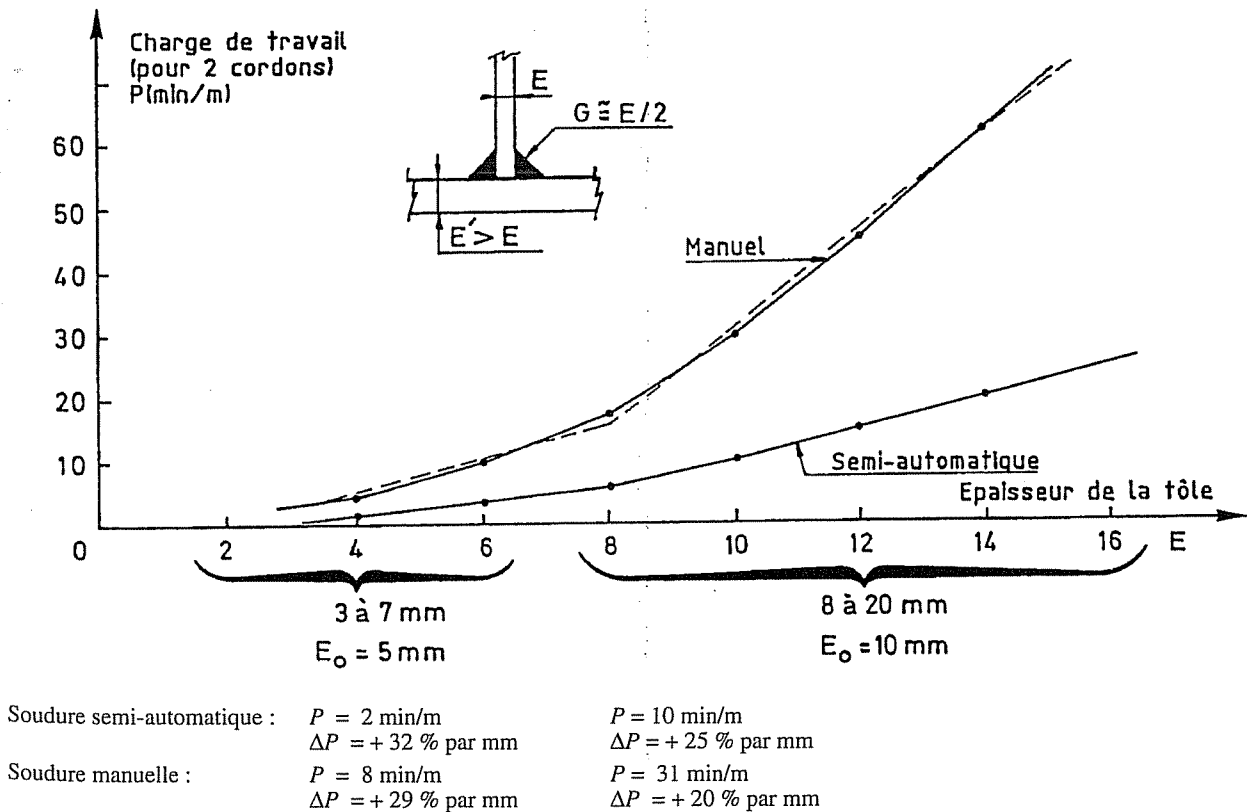


Fig. 13 - Variation de la main-d'œuvre en fonction des tôles à assembler (deux cordons).

Ces charges de travail se définissent comme suit :

$$P_4 = P_4^0 [1 + (d_x - E_0) \cdot 10^3 \cdot \Delta P_4] \quad [22]$$

$$P_5 = P_5^0 [1 + (d_y - E_0) \cdot 10^3 \cdot \Delta P_5]$$

$$P_9(X) = P_9^0 [1 + (d_x - E_0) \cdot 10^3 \cdot \Delta P_9]$$

$$P_9(Y) = P_9^0 [1 + (d_y - E_0) \cdot 10^3 \cdot \Delta P_9]$$

avec

d_x, d_y : l'épaisseur des âmes, selon X et Y ;

P_4^0, P_5^0 et P_9^0 : la charge de travail P_4, P_5, P_9 correspondant à l'épaisseur de référence (E_0) ($h-h/m$) = 0,6 à 1,2 $h-h/m$;

$\Delta P_4, \Delta P_5, \Delta P_9$: la variation en %, par mm de δ , de la charge de travail P_4, P_5 et P_9 .

$$P_{10} = P_{10}^0 [1 + (\delta - E_0) \cdot 10^3 \cdot \Delta P_{10}] \quad [23]$$

avec

δ : l'épaisseur du bordé;

P_{10}^0 : la charge de travail par m^2 pour assembler un bordé dont l'épaisseur est $\delta = E_0$ ($h-h/m^2$);

ΔP_{10} : la variation en % (par mm de δ) de la charge de travail de P_{10}^0 .

Les définitions précédentes des charges de travail ($P_4^0, P_5^0, P_6^0, P_7^0, P_9^0$ et P_{10}^0) sont accompagnées de valeurs moyennes mentionnées dans la littérature [Winkle et Baird, 1986; Rahman et Caldwell, 1992]. Par contre, la détermination de leur variation (sensibilité) en fonction de l'épaisseur des tôles ($\Delta P_4, \Delta P_5, \Delta P_9$ et ΔP_{10}) est beaucoup plus difficile à établir avec fiabilité. Néanmoins, avec le programme de coût du soudage, il a

été possible de quantifier l'ordre de grandeur de ces paramètres en évaluant avec précision la charge de travail relative au soudage (fig. 13).

7. - OPTIMISATION D'UNE BARGE FSO DE 336 m

Comme application du modèle d'optimisation LBR-5 nous présentons l'optimisation d'une barge FSO de 336 m, d'une capacité de 370 000 t ($\pm 3,7$ 106 kN), destinée à servir de réservoir flottant (zone tampon) en vue de recevoir le fuel brut avant son transfert à bord des pétroliers (FSO = *Floating Storage Offloading*). Il s'agit d'une barge ancrée, sans système de propulsion propre, d'une capacité de 2.500.000 barils. Le système d'ancrage, indépendant de la barge, permet à celle-ci un mouvement relativement libre. Ainsi, la barge FSO s'oriente toujours face au courant. Le remplissage de la barge se fait par l'intermédiaire d'un pipe-line relié à la côte. Le faible débit du pipe-line induit un chargement uniforme et lent. Par contre, le déchargement de l'unité FSO qui correspond au remplissage d'un VLCC de 2.000.000 de barils, est très rapide et non uniforme (VLCC = Very Large Crude Carrier). Les données caractéristiques principales de la barge sont fournies au tableau 1.

Les figures 14 et 15 présentent les vues générales de la barge étudiée. Il a été procédé à l'optimisation d'un compartiment de 46 m de longueur composé de deux cales de 24 m \times 30 m \times 46 m et des deux zones latérales de ballastage de 6 m de largeur.

Le moment maximal de la poutre navire en eau calme a été évalué à 670 000 t.m (6,7 Mio kN.m) et l'effort tranchant à 25000 t (250 000 kN). Ce moment de flexion est particulièrement élevé en comparaison au moment de flexion d'un VLCC (± 3 Mio kN.m). De plus, pour tenir compte du moment sur houle, l'échantillonnage optimum est établi pour un moment maximum de 10 Mio kN.m en arc et en contre arc.

TABLEAU 1

Caractéristiques de la barge FSO

Lpp (longueur entre perpendiculaires)	336 m (10 + 6 \times 46 + 50 m)
B (largeur)	60 m (6 + 24 + 24 + 6 m)
H (creux)	30 m
T (tirant)	20,5 m
Cb (coefficient de bloc)	0,95
Tare (acier + machineries)	32 740 t (± 320 000 kN)
Nombre de réservoir de pétrole brut	12 \times 33 782 m ³
Longueur d'un réservoir de pétrole brut	46 m
Largeur d'un réservoir de pétrole brut	24 m
Volume total des réservoirs de pétrole brut	405 389 m ³
Nombre de barils correspondant	2.549.819 bbl (1 bbl = 0,1589873 m ³)
Densité du pétrole brut	0,93 t/m ³ (9,3 kn/m ³)
Ballast dans la double coque des murailles	59 600 m ³
Ballast des réservoirs de la poupe	9 500 m ³
Ballast des réservoirs de l'étrave	20 000 m ³
Réservoirs (eau potable et gas-oil)	1 000 m ³ et 2 000 m ³
Pompes	4 \times 1 800 m ³ /h et 977 kW
Puissance totale installée	8 880 kW
Propulseurs transversaux (arrière)	2 \times 2 500 kW et 300 kN/pièce
Aménagement intérieur	50 personnes

En vue de l'optimisation à réaliser avec LBR-5 et vu la symétrie de la structure, seule la moitié du compartiment est modélisée. Les deux cas de charge considérés sont présentés à la figure 16 et la modélisation effectuée à la figure 17. Afin de tenir compte de la présence de goussets de forte rigidité aux extrémités des varangues (fig. 15), le panneau de fond de la cale (largeur 24 m) a été modélisé avec trois panneaux orthotropes de 8 m de façon à permettre une variation de rigidité de ces varangues (fig. 17). De même, la cloison longitudinale centrale et le pont (barrots) ont chacun été modélisés en trois éléments. La cloison étant sur l'axe de symétrie, seule la moitié de sa rigidité est prise en compte dans le modèle.

En résumé, la modélisation utilisée comprend :

- ◆ 22 panneaux raidis avec 9 variables de conception chacun ;
- ◆ 2 panneaux additionnels pour pouvoir simuler la symétrie ;
- ◆ 198 variables de conception (22 × 9) ;
- ◆ 48 conditions d'égalité entre des variables de conception afin d'imposer une uniformité des entredistances au niveau, d'une part de la cale (pont, fond et cloison) et d'autre part de la zone de ballastage.
- ◆ 198 restrictions géométriques (22 × 9). Vu la hauteur des âmes des profilés longitudinaux et transversaux, on n'a pas imposé de restrictions géométriques sur l'élanement des âmes. Leur stabilité au voilement et éventuellement leur renforcement devront être vérifiés par la suite (post-optimisation) ;
- ◆ 396 restrictions structurelles (198 par cas de charge) :
 - * σ_c cadre (JAS - JAB et SEM), σ_c raid. (JAS - JAB et SEM) et σ_c bordé avec chaque fois : $\sigma_c \leq s \cdot \sigma_0$ ($s = 0,65$ et $\sigma_0 = 355 \text{ N/mm}^2$) ;
 - * instabilité locale du bordé : $\delta_{min} \leq \delta$;
 - * résistance ultime des panneaux raidis : $\sigma/\sigma_{ult} \leq s$ ($s = 0,55$) ;
- ◆ 2 restrictions sur la résistance ultime de la poutre navire : $M/M_{ult} \leq s$ ($s = 0,55$).

Définitions de l'échantillonnage optimal

Afin de rechercher les échantillonnages optimaux (coût et poids), des bornes ont été imposées aux variables de conception ($X_{i \max}$, $X_{i \min}$). Ainsi, la borne supérieure pour l'épaisseur des bordés (δ) a été fixée à 40 mm. Comme autres bornes, on a aussi imposé :

- 2,87 m $\leq \Delta_{cadres} \leq 7,66$ m
- 0,5 m $\leq \Delta_{lisses} \leq 1,00$ m
- 1,20 m $\leq h_{dme} \text{ cadres (cales)} \leq 6,00$ m
- 0,50 m $\leq h_{dme} \text{ cadres (caissons)} \leq 2,50$ m (sauf dans les panneaux 13,16,18)
- 8,0 mm $\leq \text{épaisseur âme} \leq 30$ (ou 40) mm

Les premiers résultats obtenus ayant montré l'importance de la borne $\delta \leq 40$ mm, il a été procédé, à titre de comparaison, à une seconde analyse en imposant cette fois $\delta \leq 30$ mm. De plus, on a différencié l'écartement des cadres situés dans les cales centrales - Δ_c (cales), de l'écartement des cadres dans les caissons latéraux (zone de ballastage) - Δ_c (caissons latéraux). Toutefois, il a été imposé que : Δ_c (caissons latéraux) = Δ_c (cales) / α , avec α , un nombre entier inférieur à 3 ($\alpha \leq 3$).

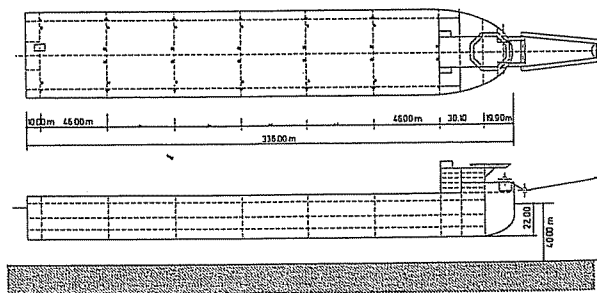


Fig. 14 - Vue générale de la barge FSO

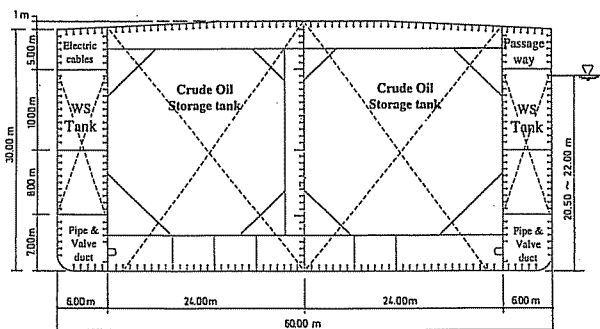


Fig. 15 - Maître couple de la barge FSO

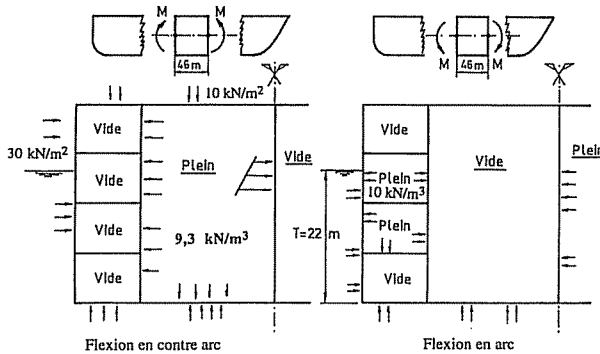


Fig. 16 - Cas de chargements considérés

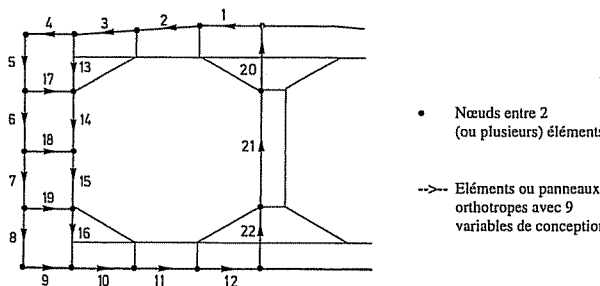


Fig. 17 - Principe de la modélisation avec LBR-5 de la structure d'un compartiment.

TABLEAU 2

Comparaison des optimums (10 itérations)

Configurations	Poids (kN et %)	Coût (Mio et %)	Coût au kg (FB/kg et Euro/kg)	Δ_{cale} (m) et $N^{(*)}$	$\Delta_{caissons}$ (m) et $N^{(*)}$
$\delta \leq 40$ mm					
Optimum coût $C_1 : \Delta_{caisson} = \Delta_{cale}$	29280 (109 %)	255,83 (100 %)	87,4 FB/kg (2,17 Euro/kg)	5,75 m $N = 7$	5,75 m $N = 7$
$C_2 : \Delta_{caisson} = \Delta_{cale}/2$	29740 (111 %)	267,54 (105 %)	90,0 FB/kg (2,23 Euro/kg)	6,57 m $N = 6$	3,285 m $N = 13$
Optimum poids $C_3 : \Delta_{caisson} = \Delta_{cale}$	27150 (101 %)	270,45 (106 %)	97,7 FB/kg (2,42 Euro/kg)	5,11 m $N = 8$	5,11 m $N = 8$
$C_4 : \Delta_{caisson} = \Delta_{cale}/2$	26850 (100 %)	287,82 (113 %)	105,2 FB/kg (2,61 Euro/kg)	5,75 m $N = 7$	2,875 m $N = 15$
$\delta \leq 30$ mm					
Optimum coût $C_5 : \Delta_{caisson} = \Delta_{cale}$	38870 (145 %)	343,84 (134 %)	88,5 FB/kg (2,19 Euro/kg)	3,07 m $N = 14$	3,07 m $N = 14$
Optimum poids $C_6 : \Delta_{caisson} = \Delta_{cale}$	38500 (143 %)	388,64 (114 %)	100,9 FB/kg (2,50 Euro/kg)	3,07 m $N = 14$	3,07 m $N = 14$
Échantillonnage de départ (départ du processus d'optimisation)	39370 (147 %)	392,76 (154 %)	99,8 FB/kg (2,47 Euro/kg)	7,66 m $N = 5$	7,66 m $N = 5$

(*) N = nombre de cadres pour un compartiment de 46 m de longueur, $N = (46/\Delta) - 1$

Échantillonnages recommandés

Le tableau 2 compare les optimums obtenus pour six configurations différentes (C_1 à C_6) :

- les optimums pour δ (tôle du bordé) ≤ 40 mm :

– Optimum coût :

$$C_1 : \Delta_{cadre} \text{ (caissons latéraux)} = \Delta_{cadre} \text{ (cales)}$$

$$C_2 : \Delta_{cadre} \text{ (caissons latéraux)} = 1/2 \Delta_{cadre} \text{ (cales)}$$

– Optimum poids :

$$C_3 : \Delta_{cadre} \text{ (caissons latéraux)} = \Delta_{cadre} \text{ (cales)}$$

$$C_4 : \Delta_{cadre} \text{ (caissons latéraux)} = 1/2 \Delta_{cadre} \text{ (cales)}$$

- les optimums pour δ (tôle du bordé) ≤ 30 mm :

– Optimum coût :

$$C_5 : \Delta_{cadre} \text{ (caissons latéraux)} = \Delta_{cadre} \text{ (cales)}$$

– Optimum poids :

$$C_6 : \Delta_{cadre} \text{ (caissons latéraux)} = \Delta_{cadre} \text{ (cales)}$$

Notons que les coûts et les poids mentionnés ci après se réfèrent à un demi-compartiment (30 m de largeur) et que les renforts (goussets, raidisseurs d'âmes, ...) ne sont pas inclus dans le poids.

Le détail des échantillonnages optimaux est présenté aux figures 18a, 18b, 19 et 20 pour, respectivement, $\delta = 40$ mm (optimum coût, C_1), $\delta = 40$ mm (optimum poids, C_4) et $\delta = 30$ mm (optimum coût, C_5). Les échantillonnages optimaux présentés dans ces figures ne sont toutefois pas directement utilisables par le praticien. Ils nécessitent des aménagements : présence de goussets, variation lente de la hauteur des âmes, etc. Ainsi, afin d'établir les plans d'exécution et pour des raisons pratiques et constructives, une plus grande standardisation et uniformisation est, en général, requise (exemples : des épaisseurs uniformes pour les tôles de fond et de pont, hauteur d'âme constante pour les cadres, ...).

Il eut été possible d'imposer de telles conditions au processus d'optimisation. C'est volontairement que cela n'a pas été effectué afin de mieux faire ressortir les potentialités du processus d'optimisation et de mieux différencier les optimums poids et coût. Toutefois, après (post) uniformisation et standardisation des dimensions des renforts ainsi que l'introduction de goussets, la figure 21 présente les trois conceptions optimales du maître couple (configurations C_1 , C_4 et C_5).

L'analyse du tableau comparatif (tableau 2) et des échantillonnages (figures 18 à 20) montre que :

- L'épaisseur maximale du bordé ($\delta \leq 30$ mm ou $\delta \leq 40$ mm) est toujours une restriction active qui conditionne fortement l'optimum (restriction dimensionnante). Ainsi, il y a une augmentation de plus de 30 % du poids et du coût lorsque l'on impose $\delta \leq 30$ mm au lieu de $\delta \leq 40$ mm.

- Si l'on accepte un bordé de 40 mm, l'échantillonnage optimum varie considérablement selon que l'on recherche l'optimum poids ou l'optimum coût. Par contre, avec une épaisseur maximale de 30 mm pour le bordé, l'espace de conception (c'est-à-dire l'espace de variation des variables de conception) est tellement réduit que les optimums coût et poids sont presque identiques.
- L'optimisation de l'échantillonnage des cadres dans les cales (barrots, varangues et membrures verticales de la cloison centrale) conduit généralement à de grandes hauteurs d'âme à mi-portée (flexion) et à de fortes épaisseurs aux appuis (effort tranchant).
- Le doublement du nombre de cadres au niveau des caissons latéraux ($\Delta_{\text{caisson}} = \Delta_{\text{cale}}/2$) peut, dans certains cas, permettre de réduire le poids. Mais, il est toujours synonyme d'accroissement du coût. Il ne semble donc pas qu'il s'agisse d'une solution à retenir.
- Les optimums poids obtenus sont en général des solutions peu économiques. Ainsi, l'écart de coût entre l'optimum poids et l'optimum coût est de 5 % pour $\delta \leq 40$ mm et de 18 % pour $\delta \leq 30$ mm. Par contre, au niveau du poids, les optimums coûts conduisent à des structures acceptables : leur poids ne sont que 1 ou 2 % supérieur à celui de l'optimum poids. Cela démontre l'intérêt d'une optimisation sur base du coût par rapport à la recherche du poids minimal.
- Les configurations recommandées sont finalement :
 - * pour l'optimum coût ($C = 100$ %, $P = 109$ %, conf. C_1) :
 - $\delta \leq 40$ mm avec 7 cadres ($\Delta = 5,75$ m)
 - coût au kilo : 87,4 FB (2,17 Euro)
 - * pour l'optimum poids ($C = 106$ %, $P = 101$ %, conf. C_3) :
 - $\delta \leq 40$ mm avec 8 cadres ($\Delta = 5,11$ m)
 - coût au kilo : 97,7 FB (2,42 Euro)

- Au niveau des coûts au kilo (Euro/kg), on constate que l'optimisation du coût conduit à des coûts unitaires 10 à 15 % plus faibles qu'une optimisation du poids (2,17 Euro/kg au lieu de 2,42 Euro/kg).

Le tableau 3 donne un aperçu du processus de convergence observé lors de l'optimisation de cette barge FSO. Il est relatif à l'optimum poids pour $\delta \leq 40$ mm.

8. - CONCLUSIONS

Le modèle LBR-5 est un outil intégré d'analyse et d'optimisation des structures orthotropes hydrauliques et navales. Cet outil a la particularité de permettre dès le stade de l'avant-projet l'optimisation du dimensionnement, c'est-à-dire lors de la phase initiale de la conception. Il a été pensé suivant le concept de l'*optimisation orientée modules*.

Le dimensionnement optimum obtenu correspond au minimum du coût de construction qui est défini comme étant la fonction objectif $F(XI)$. Il est conditionné par le respect d'un ensemble de restrictions structurelles et géométriques $C(XI)$ fixées par l'utilisateur.

Aucun prédimensionnement initial n'est requis. L'ingénieur peut débiter directement par la recherche automatique du dimensionnement optimum. Il n'est pas nécessaire que les dimensions initiales correspondent à une solution admissible. Le rôle du modèle LBR-5 est, d'abord de rechercher une solution admissible (qui respecte l'ensemble des restrictions imposées) et ensuite de proposer à chaque itération une solution meilleure qui continue à respecter ces restrictions. Finalement, la solution optimale est obtenue endéans 10 à 15 itérations et cela, quel que soit le nombre de variables de conception (XI) et de restrictions ($C(XI) \leq C_{\text{max}}$).

TABLEAU 3

Convergence du processus d'optimisation C_1 (Optimum coût, $\delta \leq 40$ mm)

Itération n°	Poids (10 ⁶ N)	Espacement des cadres cale (m)	δ panneau 1 (mm)	δ panneau 12 (mm)	Δ_{raid} panneau 1 (m)	Δ_{raid} panneau 4 (m)
Départ	39,37 (145 %)	7,660	15,00	15,00	0,900	0,900
1	28,04	7,660	15,21	22,90	1,000	0,954
2	29,95	5,794	29,18	37,36	Borne max.	1,000
3	28,47	5,874	31,06	40,00	-	1,000
4	27,82	5,589	30,46	Borne max.	-	0,950
5	27,50	5,346	29,97	-	-	0,913
6	27,32	5,279	30,04	-	-	0,884
7	27,24	5,230	39,92	-	-	0,860
8	27,20	5,190	29,90	-	-	0,843
9	27,17	5,166	29,83	-	-	0,832
10	27,15 (100 %)	5,138	29,95	-	-	0,825

Coût final : 6,70 10⁶ Euro pour un demi compartiment de 46 m (sans les cloisons transversales).

Coût au kg : 97,7 FB/kg ou 2,42 Euro/kg

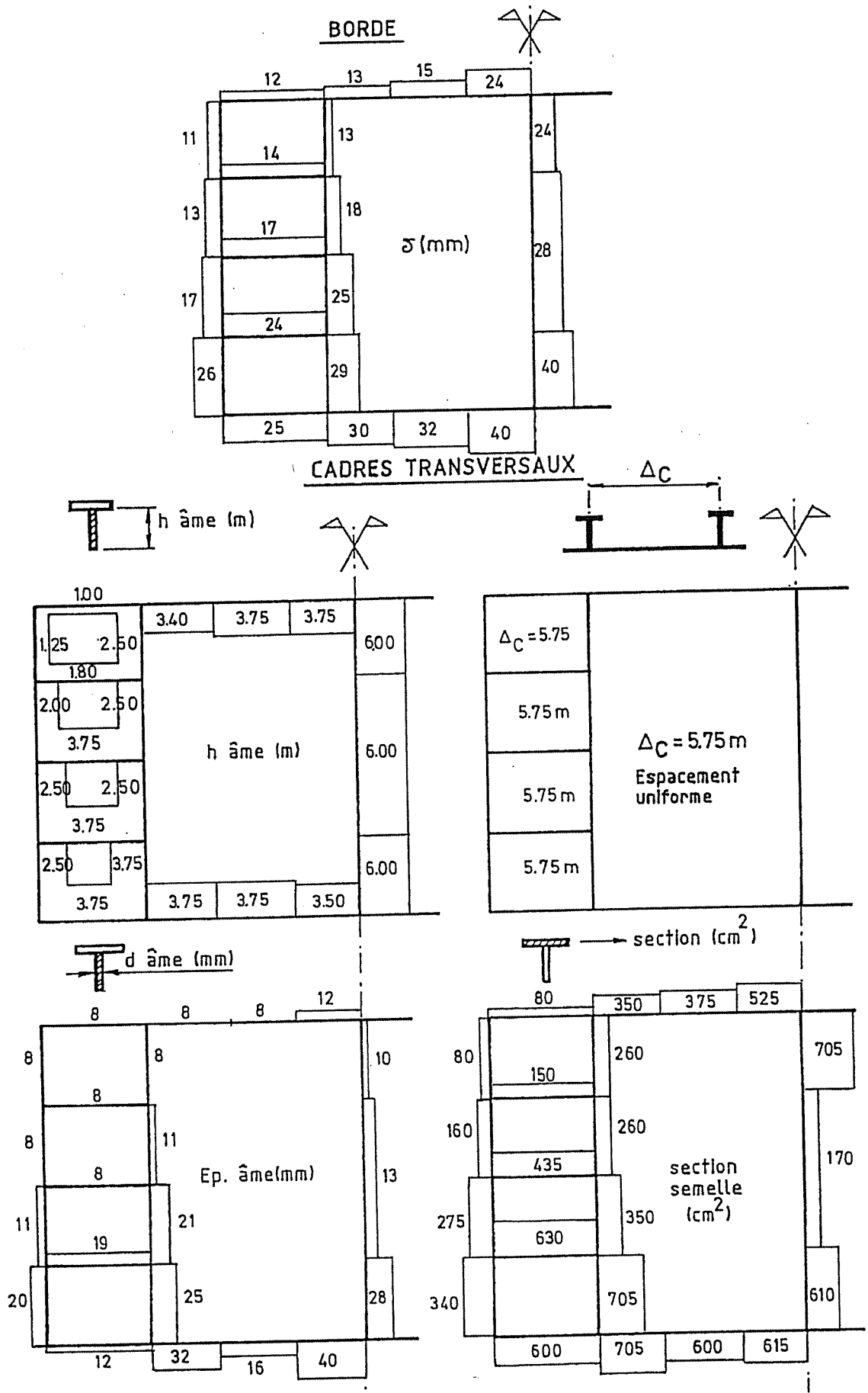


Fig. 18.a - Échantillonnage optimal de la barge FSO (optimum coût - $\delta \leq 40$ mm, $\Delta = 5,75$ m) - Configuration C₁

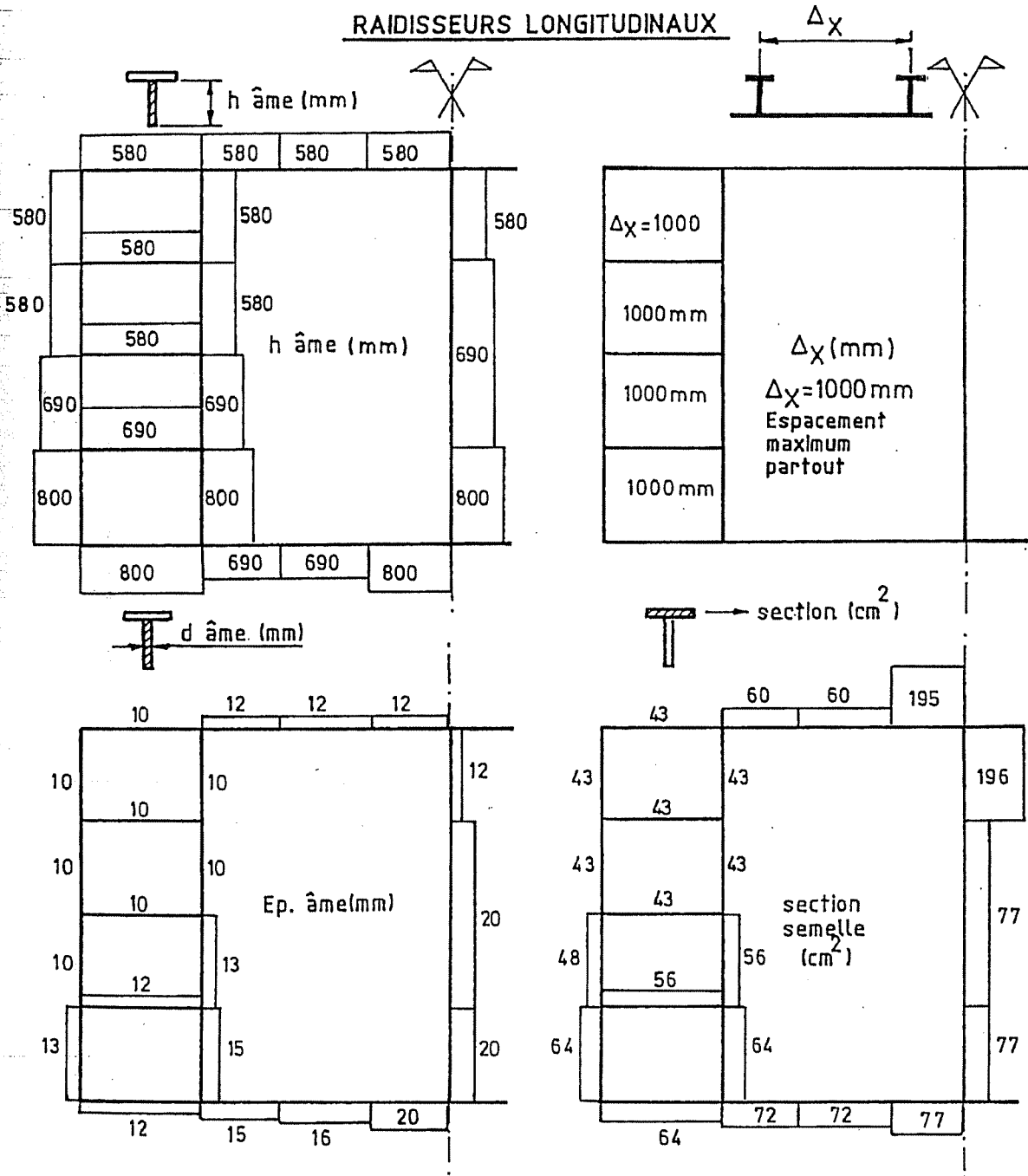


Fig. 18.b - Échantillonnage optimal de la barge FSO (optimum coût - $\delta \leq 40$ mm, $\Delta = 5,75$ m) - Configuration C₁

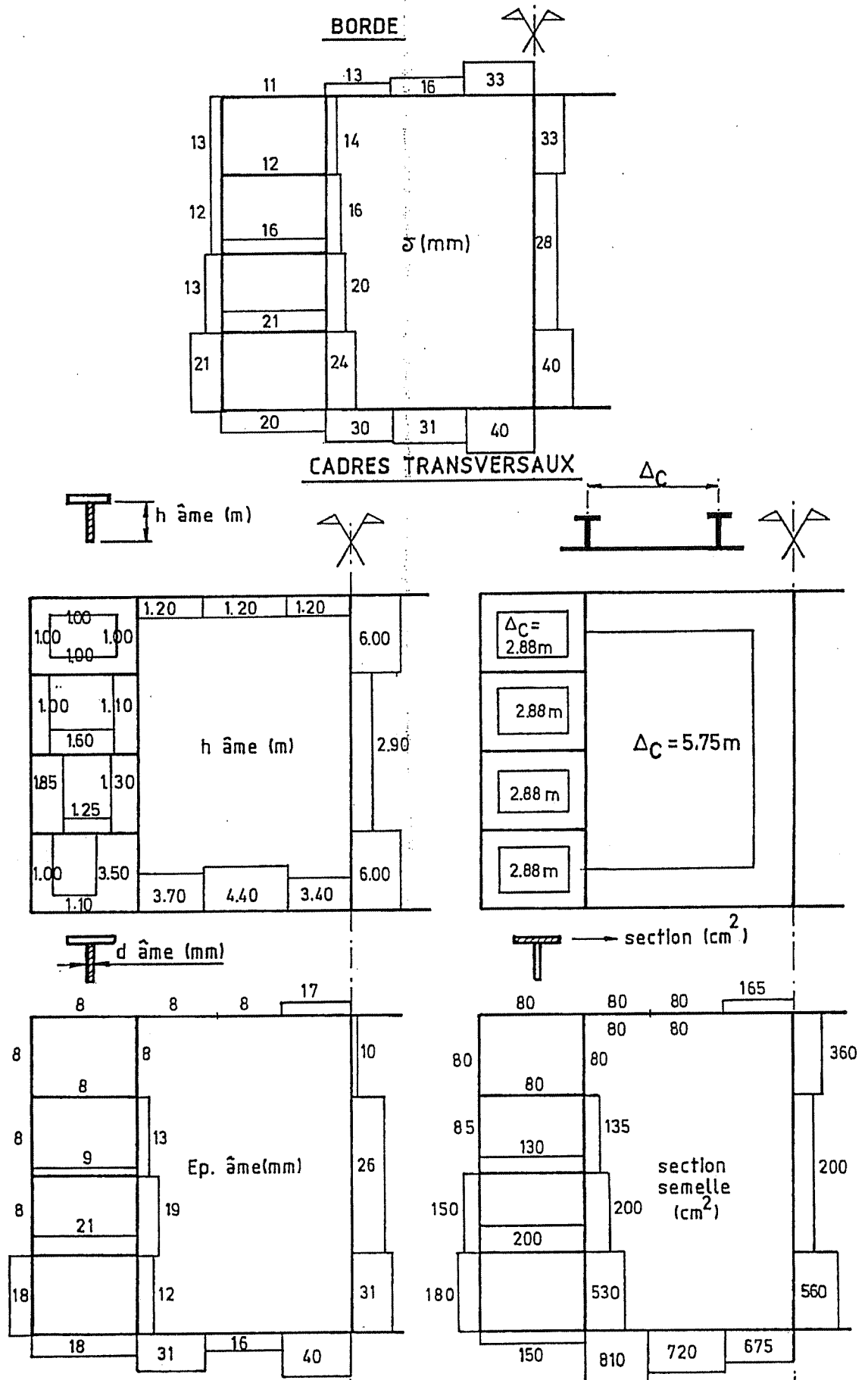


Fig. 19 – Échantillonnage optimal de la barge FSO (optimum poids - $\delta \leq 40$ mm, $\Delta = 5,75$ m et 2,875 m) – Configuration C₄

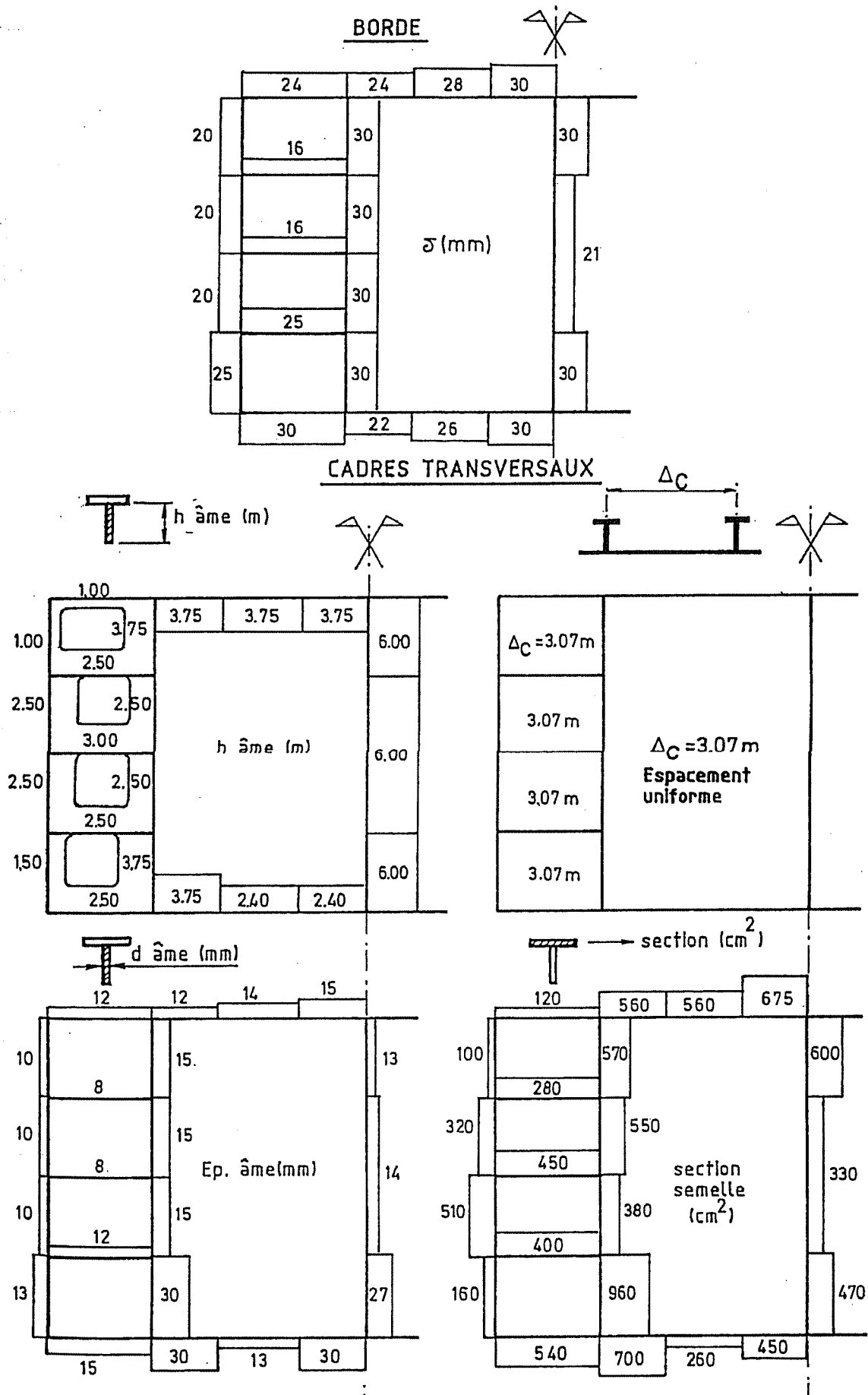


Fig. 20 - Échantillonnage optimal de la barge FSO (optimum coût - $\delta \leq 30$ mm, $\Delta = 3,07$ m) - Configuration C₅

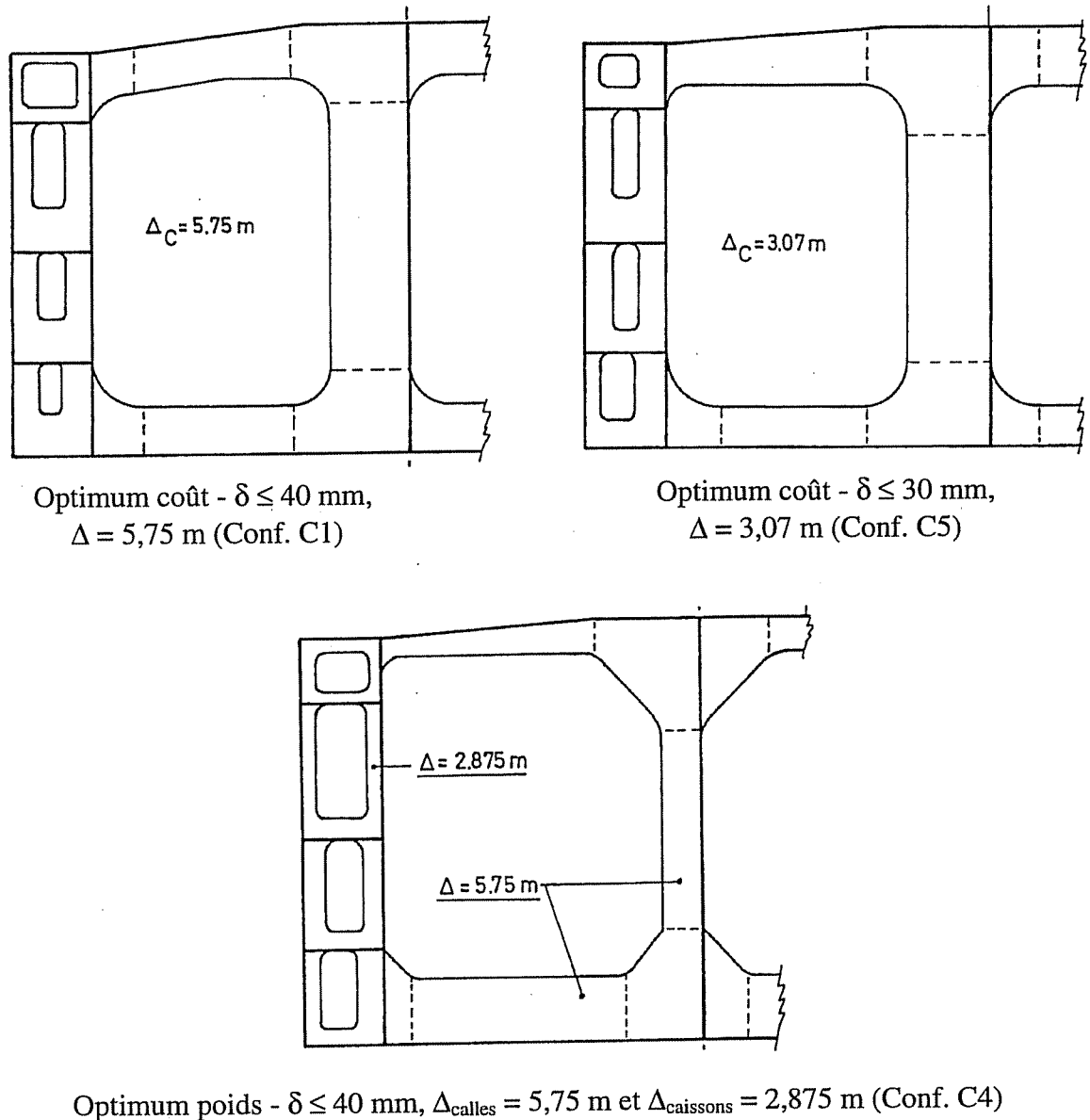


Fig. 21 – Propositions finales pour le maître couple de la barge FSO

9. – RÉFÉRENCES

- ANAST** – *Les portes flottantes automotrices* - parts 1 et 2, Rapport interne 95-1, Université de Liège, Belgique, pp 1-9 et pp 1-21. (1995).
- BUXTON I.L.** – *The Design of Tanker Hull Structure by Computer with Particular Reference to one Midship Cargo Tank*, Trans. RINA, vol. 108, pp. 405-419. (1966).
- CONLIN** – *User's and Installation Manual* (Version 2), LTAS, Université de Liège, Liège, Belgique. (1989).
- Da Ronch C.** – *Avant-projet d'une porte flottante pour écluse maritime de taille moyenne*, Travail de fin d'études, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, Belgique. (1998).
- Dehousse N.M. et Rodriguez S.** – *Construction des grandes écluses maritimes. Quelques suggestions en vue d'en simplifier la réalisation par l'emploi de portes-robots*, A.I.P.C.N., n° 49. (1985).
- Fleury C. et Braibant V.** – *Structural Optimization: A New Dual Method using Mixed Variables*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 23, pp 409-428. (1986)
- Fleury C.** – *CONLIN, An Efficient Dual Optimizer Based on Convex Approximation Concepts*, Structural Optimization, vol 1, pp81-89. (1989).
- Fleury C.** – *Mathematical Programming Methods for Constrained Optimization: Dual Methods*, Chap 7 : Structural Optimization: Status and Promise, (M.P. Kamat ed.), serie: Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, vol 150, pp 123-150. (1993).
- Hughes O.F.** – *Ship Structural Design: A Rationally-Based, Computer-Aided Optimization Approach*, Edited by the SNAME, New Jersey, 566 p. (1988).
- Hughes O., Nikolaidis E., Ayyub B., White G. et Hess P.** – *Uncertainty in Strength Models for Marine Structures*, Ship Structure Committee n° 375, U.S. Coast Guard, Washington, USA, 130 p. (1994).

Moe J. et Lund S. – *Cost and Weight Minimization of Structures with Special Emphasis on Longitudinal Strength Members of Tankers*, Trans. RINA, vol 110, pp. 43-70. (1968).

Rahman M.K. et Caldwell J.B. – *Rule-Based Optimization of Midship Structures*, International Journal of Marine Structures, vol.5, n° 6, pp 467-490. (1992).

Rigo Ph. – *Utilisation des développements harmoniques aux calculs des ouvrages hydrauliques métalliques*, Thèse de Doctorat, Université de Liège, Edt: Collection des Publications de la Faculté des Sciences Appliquées, n°120, Liège, 379 p. (1989a).

Rigo Ph. – *Le calcul des structures cylindriques flottantes*, Association Technique Maritime et Aéronautique (ATMA), 89^e Session, Paris, pp. 323-336. (1989b).

Rigo Ph. – *Le logiciel de calcul et de conception des structures hydrauliques fortement raidies (écluses, barrages mobiles,...)*, A.I.P.C.N., Bulletin n° 65, 16 p. (1989c).

Rigo Ph. – *La méthode des bordages raidis. Calcul des coques cylindriques soumises à une pression hydraulique*, Construction métallique, n° 3, Paris, pp. 25-33. (1989d).

Rigo Ph. – *Les structures prismatiques orthotropes*, Association Internationales des Ponts et Charpentes, Periodica AIPC 1/1990, P-142/90, Zürich, pp 13-28. (1990).

Rigo Ph. – *Stiffened Sheathings of Orthotropic Cylindrical Shells*, Journal of Structural Engineering, ASCE, vol 118, n° 4, pp 926-943. (1992a).

Rigo Ph. – *The Computation of Prismatic Structures*, Applied to Naval Architecture., Marine Structures, Elsevier, vol. 5, n° 3, pp 313-332. (1992b).

Rigo Ph., Marchal et Rodriguez – *The Use of Floating Gates for Storm Surge Barrier*, Barrages: Engineering Design & Environmental Impacts, Edt. N. Burt & J. Watts, John Wiley & Sons (Publ.), pp 421-430. (1996).

Rigo Ph. – *Développement d'un modèle intégré d'optimisation des structures navales et hydrauliques*, Thèse d'Agrégation de l'Enseignement Supérieur, Université de Liège, 378 p. (1998).

Winkle I.E et Baird D. – *Towards More Effective Structural Design Through Synthesis and Optimisation of relative Fabrication Costs*, Trans. RINA, vol. 128, pp. 313-336. (1986).

Yao T, Rigo Ph. et al. – *Ultimate Hull Girder Strength* (Report of ISSC Committee VI.2), Proc. of 14th ISSC, Ohtsubo Sumi (ed.), Nagasaki, Japon (à paraître). (2000).

View
for
128.

l on
vol

for
ural
erie:
150,

used,
the

P. –
Ship
gton,