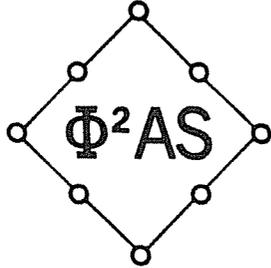


F
O
R
U
M

I
P
S
I



EN ANALYSE DE STRUCTURES

P
O
U
R

L
A
F
O
R
M
A
T
I
O
N

E
T

L'

I
N
F
O
R
M
A
T
I
O
N

L'OPTIMISATION :
DES TECHNIQUES EPROUVEES ?

2002 - Volume XXVI - N° 1

L'OPTIMISATION DES STRUCTURES NAVALES

- minimisation du coût de construction de la coque métallique -

Philippe RIGO

Docteur Ingénieur, Maître de Recherche du Fond National de la Recherche Scientifique (FNRS)

ANAST, Université de Liège, Chemin des Chevreuils 1 (B52-3), 4000 Liège – Belgique

Tél.: +32-(0)4-366 9366; Fax: +32-(0)4-366 91 33; E-mail: ph.rigo@ulg.ac.be

<http://www.ulg.ac.be/anast>

I 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, 99, 2000, 2001a à d].

L'objectif poursuivi est d'adjoindre aux outils traditionnels de conception (CAO de construction métallique, plan de forme, calculs 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. Par analyse rationnelle, il faut comprendre un ensemble cohérent et homogène des méthodes pratiques 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 des coûts 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» ou *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.

II DOMAINE D'APPLICATIONS

Le domaine d'applications de cet outil concerne les structures hydrauliques (portes d'écluses, vannes de barrages mobiles, portes marées tempêtes, pontons, docks flottants,...). Dans ce cas, le module d'optimisation permet généralement de traiter l'entièreté 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 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 s'intègre dans l'élaboration d'une méthodologie de projet destinée à faciliter et améliorer les études d'avant-projet puis de projet des structures navales et des structures hydrauliques mobiles et flottantes. Elle repose sur l'expérience acquise dans deux domaines de «l'engineering»: la construction hydraulique, traditionnellement associée au génie civil, et la construction navale, maritime et offshore [Rigo 1989b et 92b].

L'outil d'optimisation LBR-5 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,...). Les fondements du Logiciel des Bordages Raidis (LBR-4) ont été présentés dans [Rigo 89a, 89d, 90 et 92a]. Ensuite, dans le cadre de nos recherches relatives aux structures navales, on y a adjoint le processus d'optimisation [Rigo 99, 2000, 2001a à d)].

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.

III LBR-5 ET LE CONCEPT D'OPTIMISATION ORIENTEE 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 n'est pas imposé. Au départ, l'ensemble est constitué des 3 modules de base, définis à la figure 1, qui forment l'ossature de l'outil (*COUT*, *RESTRI* et *OPTI*).

Autour des modules *COUT* et *RESTRI* (restrictions) gravitent un grand nombre de *sous modules*. Chaque *sous module* est spécifique à un type de restriction. En principe, il faut au moins un sous module pour chaque type de restriction. 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.

La figure 1 présente la configuration de base du logiciel LBR-5 avec ses 3 modules de base *OPTI*, *RESTRI* et *COUT* ainsi que 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.

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.

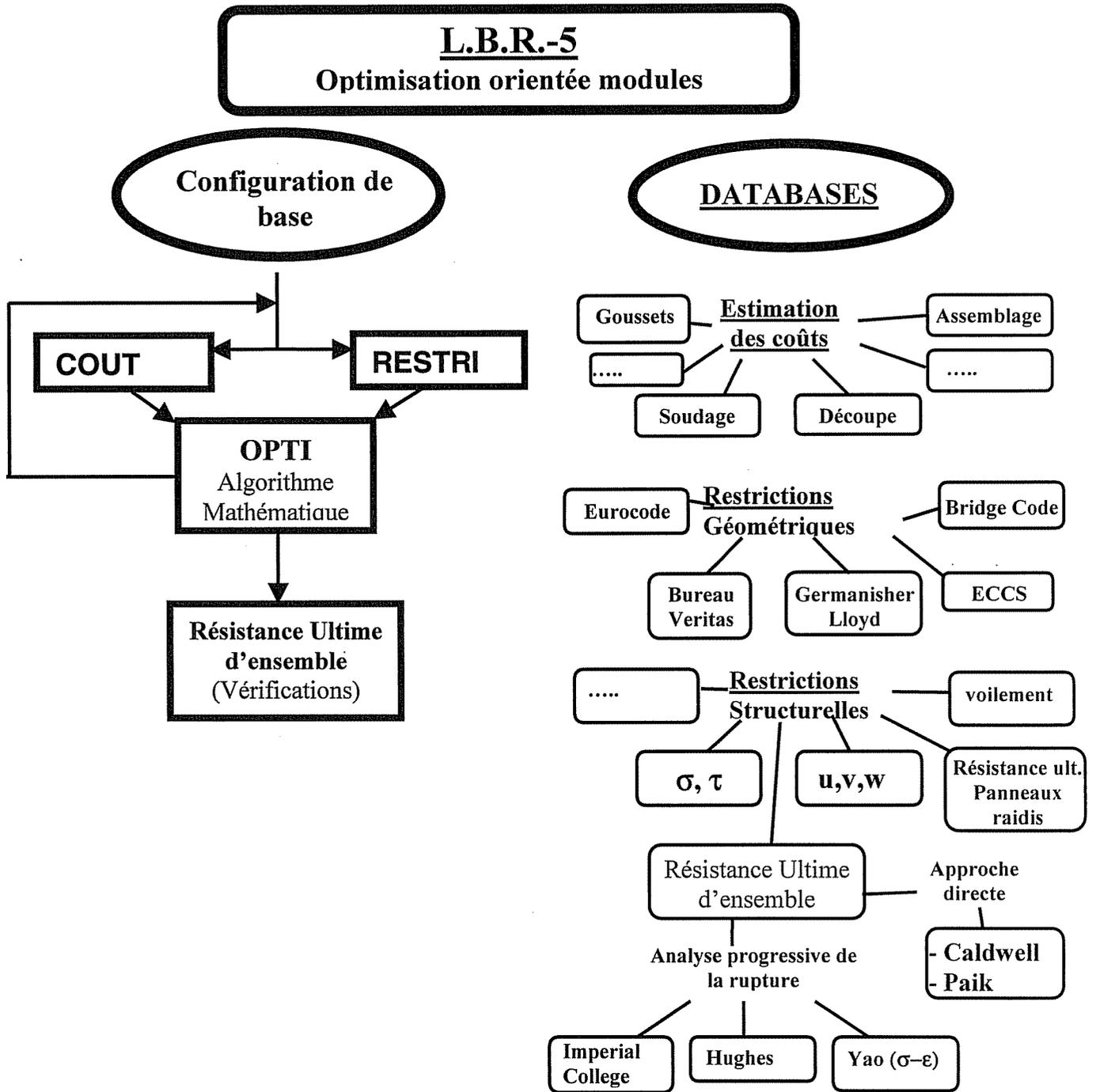


Figure 1 : Configuration de base du modèle LBR-5 et des banques de données.

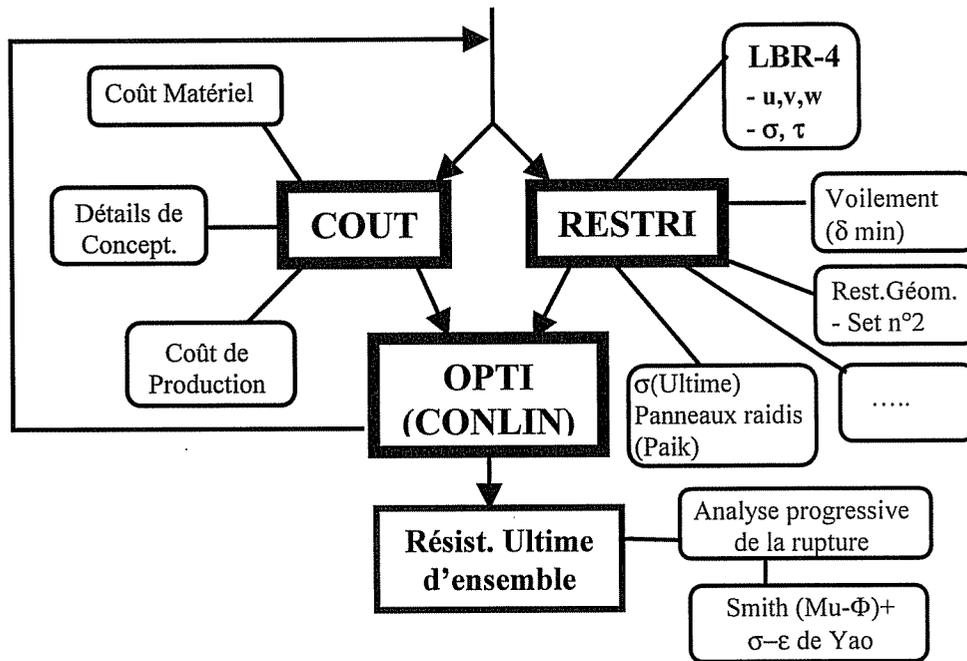


Figure 2 : Modèle LBR-5 après sélection de l'ensemble de sous modules (restrictions)

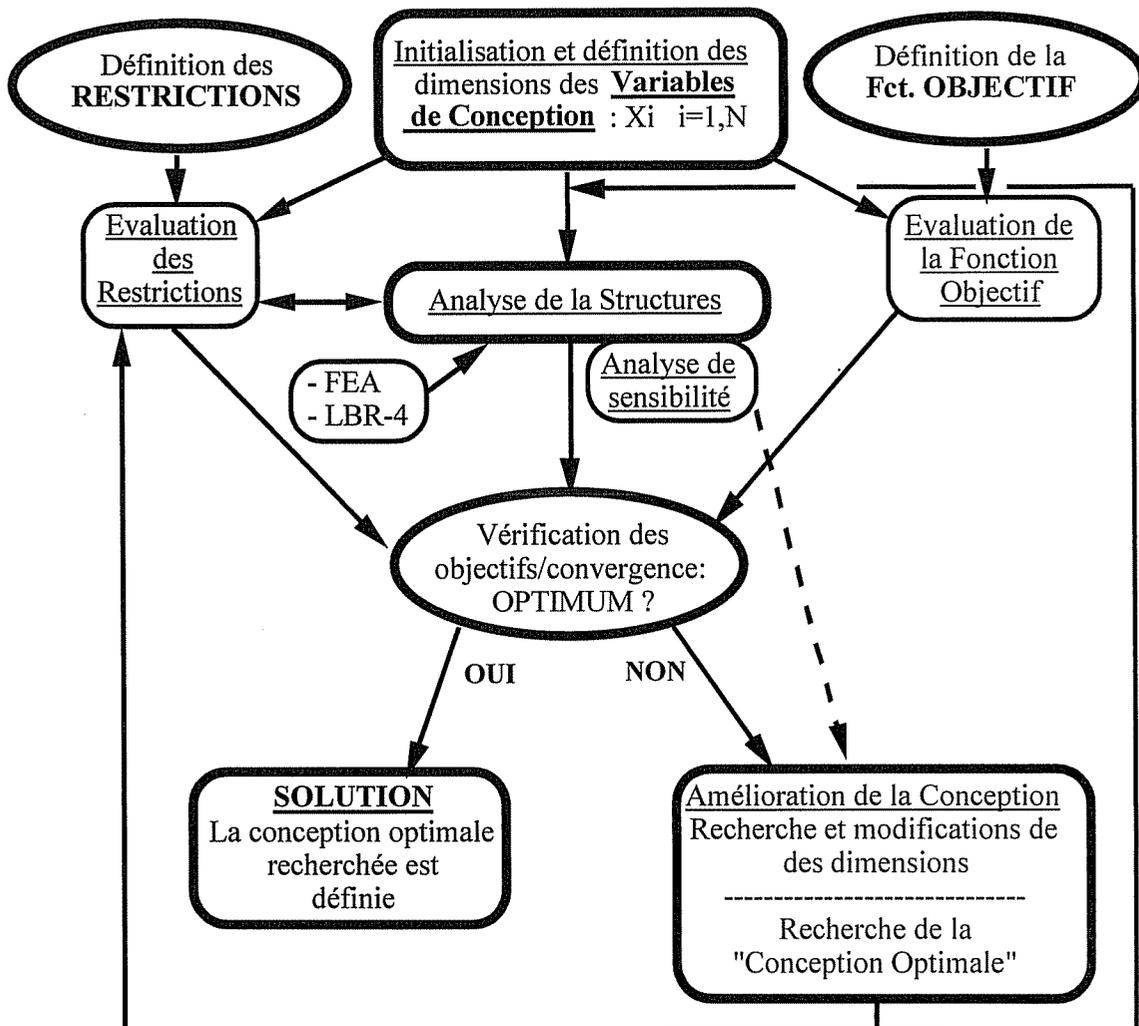


Figure 3 : Organigramme général du modèle mathématique d'optimisation du dimensionnement des structures.

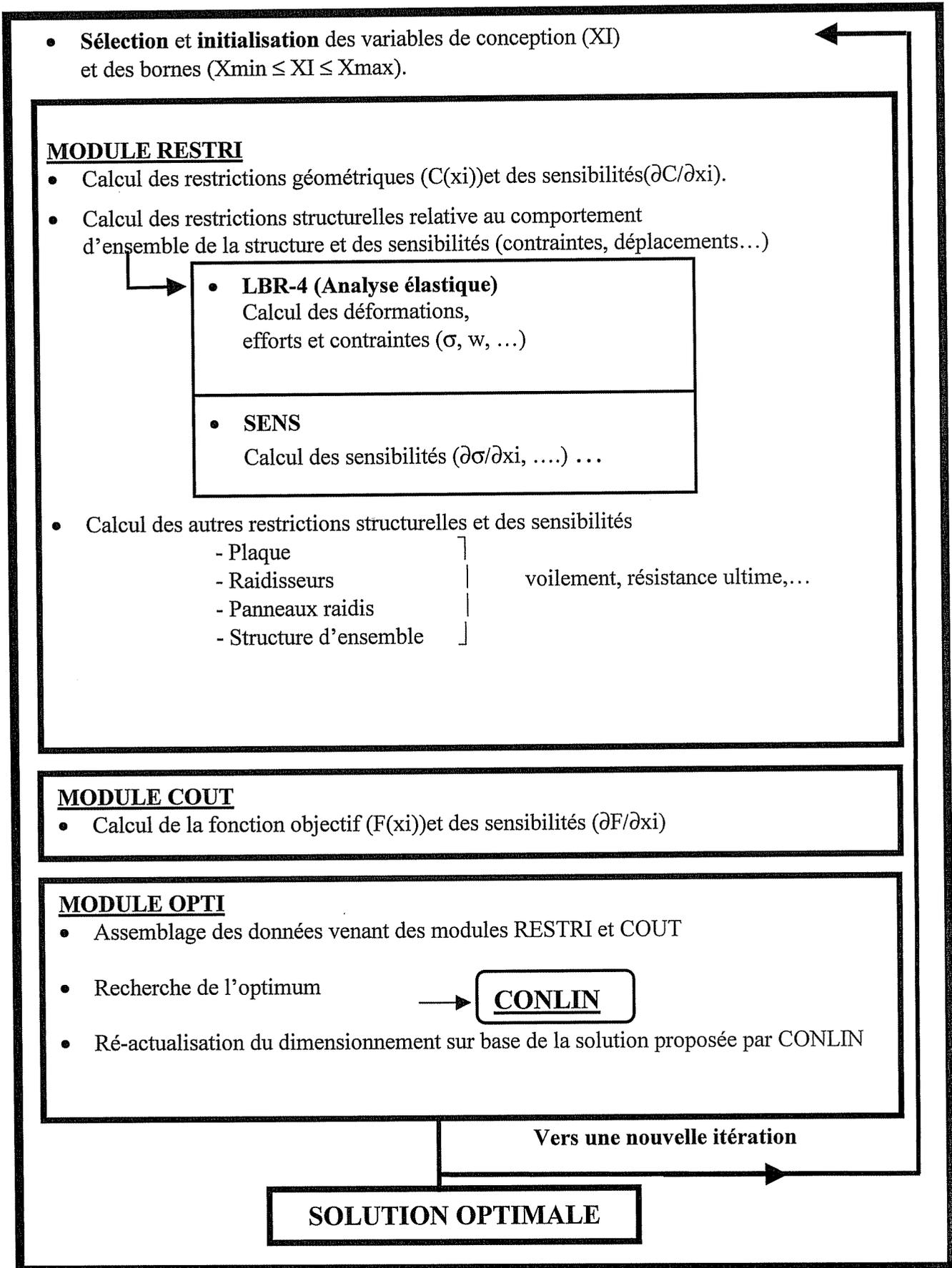


Figure 4: Organigramme du modèle d'optimisation LBR-5.

III.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 neuf variables de conception (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.

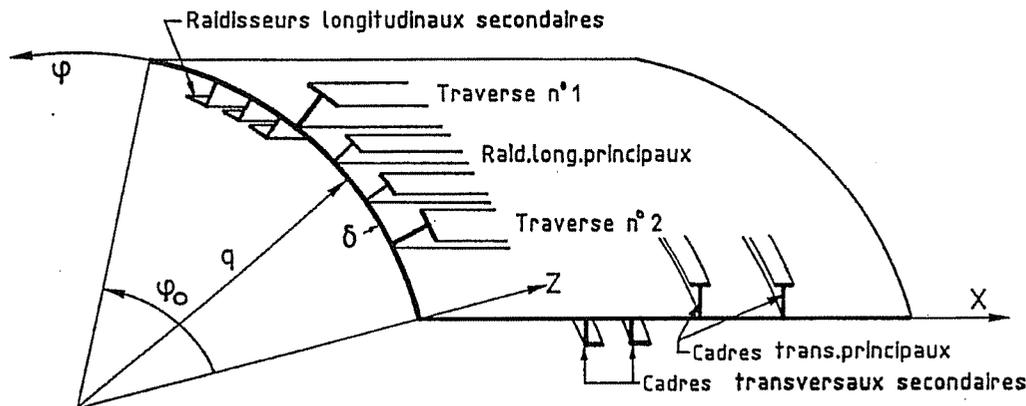


Figure 5 : Le panneau orthotrope de base (ou élément de base) utilisé pour modéliser la structure.

IV. LES 3 MODULES DE BASE : *OPTI*, *RESTRI* et *COUT*.

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 (notées XI).

CONLIN est basé sur une linéarisation convexe des fonctions non linéaires (restrictions et fonction objectif) et se fonde sur l'approche duale de C. Fleury [1986 et 93]. Ce module utilise comme données les résultats des deux autres modules de base, à savoir ; RESTRI pour les restrictions $C(XI)$ et COUT pour la fonction objectif $F(XI)$.

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 (figure 1). C'est à l'utilisateur de sélectionner les restrictions nécessaires. 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,...).

Les restrictions sont des fonctions linéaires ou non linéaires, explicites ou implicites des N variables de conception (XI). Ces restrictions sont la traduction analytique des limitations que l'utilisateur désire imposer aux variables de conception elles-mêmes 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 (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 (contrainte, déplacement,...) 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 un procédé numérique 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 (exemple: développement en série de Taylor).

De ce fait, le processus d'optimisation devient alors un procédé itératif basé sur une succession d'approximations locales des modèles de comportement.

Vu le choix d'un algorithme d'optimisation dual (CONLIN), le traitement des bornes ($X_{i \text{ min}}$ et $X_{i \text{ max}}$) est particulièrement simple à effectuer. Il en découle un intérêt particulier à les dissocier des autres restrictions (C_j ($X_i \leq CM_j$)).

Le module COUT :

En 2002, 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).

Au stade actuel, la fonction objectif du logiciel LBR-5 peut 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 (XI), 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 effet 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.

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

Le module OPTI (Rigo et Fleury, 2001b) 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.

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. A 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 (Figure 6).

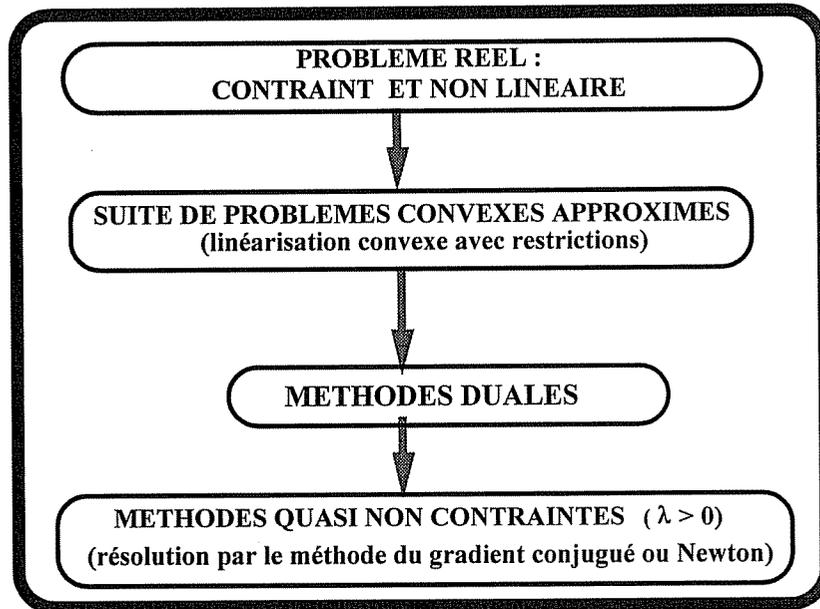


Figure 6 : Approximations convexes et méthodes duales.

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 réciproques $1/X_i$, $i=1,N$:

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

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

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

Il n'est pas adéquat de linéariser, en fonction des X_i (Eq.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 réciproques $1/X_i$ (Eq.2).

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

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 a montré que ce conservatisme atteint son maximum si on sélectionne les variables X_j à associer à une linéarisation réciproque ($1/X_j$) 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 réciproque en $1/X_i$.

L'équation 3 devient donc

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

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 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 réciproque ($1/X$).

Notons toutefois que le conservatisme n'est garanti que vis-à-vis de fonctions linéaires en X_i et en $1/X_j$. A titre d'exemple (Figure 7), étudions le conservatisme des différentes formes de linéarisation sur deux restrictions C1 et C2 (Eqs 5a et 5b).

$$C1(X) = 5 X_2 - X_1^2 - 10 \leq 0 \tag{5a}$$

$$C2(X) = 5/4 X_2^2 + 16 / X_1^2 - 13 \leq 0 \tag{5b}$$

Plaçons nous au point $X(0) = (X_1, X_2) = (2,2)$ où les 2 restrictions de départ (Eqs 5a et b) vérifient toutes deux :

$$C1(2,2) = C2(2,2) = -4$$

$$\partial C1(2,2)/\partial X = \partial C2(2,2)/\partial X = (-4, 5).$$

Il s'ensuit que les linéarisations de C1 et C2 seront également identiques, à savoir :

- linéarisation directe en X (Eq.1): $5 X_2 - 4 X_1 - 6 \leq 0$ [5c]
- linéarisation réciproque en $1/X$ (Eq.2): $-20/X_2 + 16/X_1 - 2 \leq 0$ [5d]
- linéarisation convexe (Eq.3): $5 X_2 + 16/X_1 - 22 \leq 0$ [5e]
 en X_2 car $\partial C/\partial X_2 = 5 > 0$ et
 en $1/X_1$ car $\partial C/\partial X_1 = -4 < 0$
- linéarisation concave, en X_1 et en $1/X_2$: $-20/X_2 - 4 X_1 + 14 \leq 0$ [5f]

La représentation graphique (Figure 7) de ces 4 linéarisations montre que l'approximation convexe est la plus conservatrice des approximations. Elle l'est par rapport à la fonction de départ C1 mais pas vis-à-vis de C2. En effet, la fonction réelle C2 est au départ déjà convexe et comme elle a été approximée (par linéarisation) par une autre formulation de variables mixtes légèrement moins convexe, cette approximation est moins conservatrice.

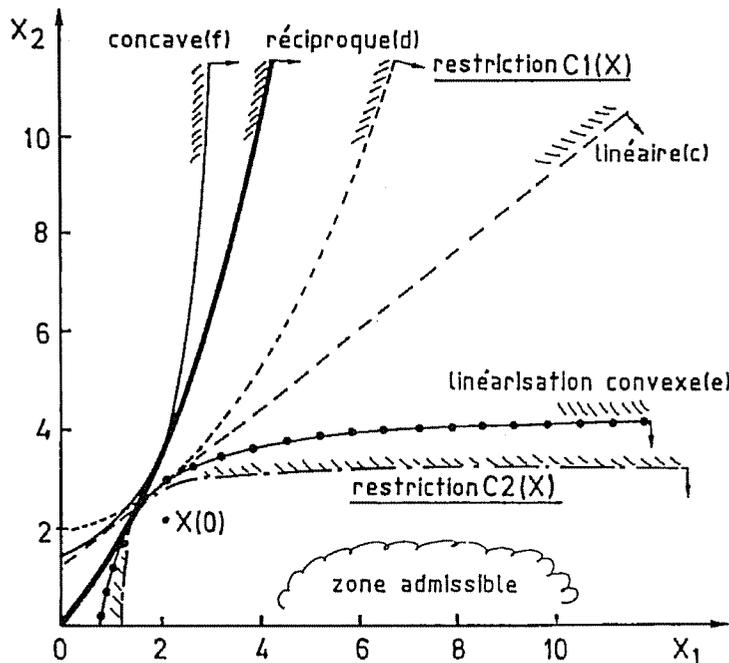


Figure 7: Comparaison des modes de linéarisation.

VI «RESTRI» : LES RESTRICTIONS GEOMETRIQUES ET STRUCTURELLES

La liste des restrictions incluses dans le modèle LBR-5 proposées est intimement liée aux types de structures qui sont visés par cet outil. Rappelons qu'il s'agit principalement de 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. Les panneaux sont reliés les uns aux autres suivant des génératrices communes (arêtes de la structure prismatique). Les panneaux sont raidis longitudinalement et transversalement (Figures 8 et 9).

- Longitudinalement :
 - * par des raidisseurs (lisses),
et/ou
 - * par des traverses, éléments ponctuels de forte rigidité (carlingue, hiloire, serre).
- Transversalement :
 - * par des cloisons transversales (dites cloisons étanches), (Figure 8 (a)).
et/ou
 - * par des cadres transversaux, dits renforcés ou principaux, de fortes dimensions (porque, varangue), (Figure 8 (b)).
et/ou
 - * par un raidissage transversal dit secondaire (raidissage local, aiguille), (Figure 8 (c)).

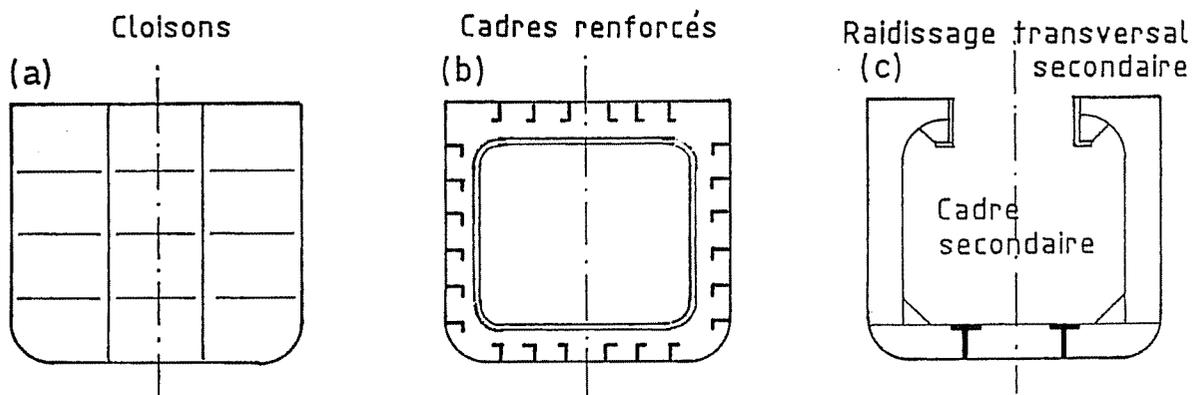


Figure 8 : Types de raidissage transversal.

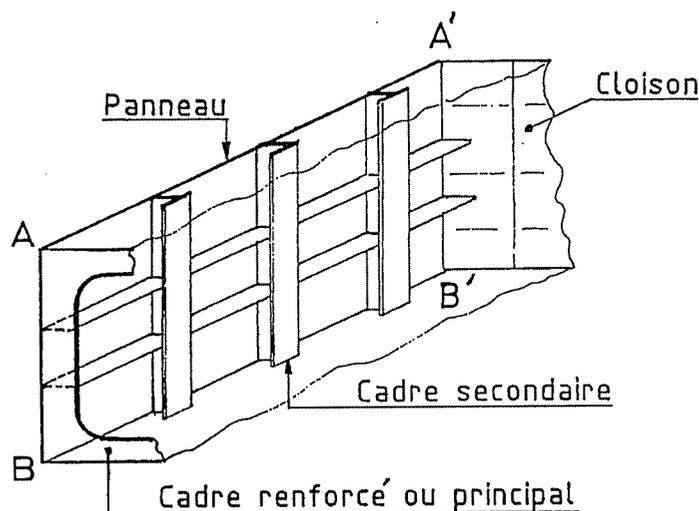


Figure 9 : Un panneau raidi.

En allant du «particulier» au «général» (Figure 9), on différencie trois types de restrictions :

- Les restrictions liées aux panneaux raidis (Figure 9).
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 phénomènes d'instabilité globale des panneaux (incluant les cadres transversaux secondaires) sont aussi à envisager.

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 (Figures 8 et 9)
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 (Figure 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).

Nous détaillerons ci-après (§ VI.2) ces 3 catégories de restrictions :

- Les restrictions relatives aux panneaux.
- Les restrictions relatives aux cadres.
- Les restrictions relatives à la structure d'ensemble.

Mais, avant d'énumérer ces restrictions, il est utile de préciser les états limites ultimes qui sont traités. Ainsi, pour chaque restriction, on peut distinguer:

- 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.

Il est important de différencier les états limites de service des états limites ultimes car les sécurités associées à ces deux états limites sont généralement différentes. Selon la philosophie du dimensionnement de la classification ou des règlements à respecter [DnV 92], on peut être amené à se fonder sur l'un ou l'autre de ces états limites. Dans d'autres cas, les deux états limites peuvent cohabiter [Mansour 92].

VI.1 Etats limites ultimes

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 point C de la courbe moment-courbure ($M-\phi$) de la figure 10. 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).

M_u est donc le Moment Ultime de la structure d'ensemble. Son évaluation dépend étroitement de la résistance ultime des panneaux constitutifs de la structure et plus particulièrement de la résistance ultime en compression de ces panneaux [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 ($\sigma_{\text{Fond}} = \sigma_o = \text{limite élastique}$).

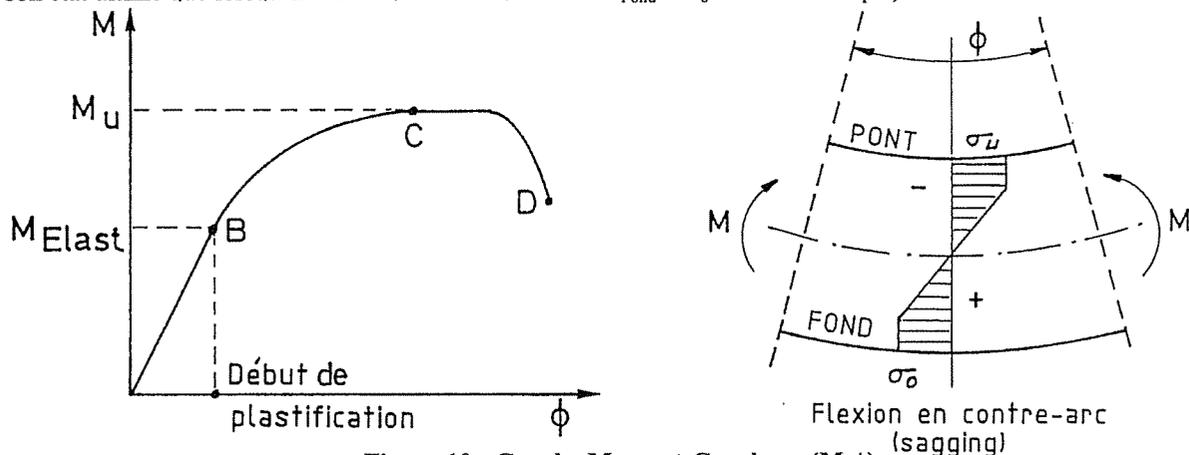
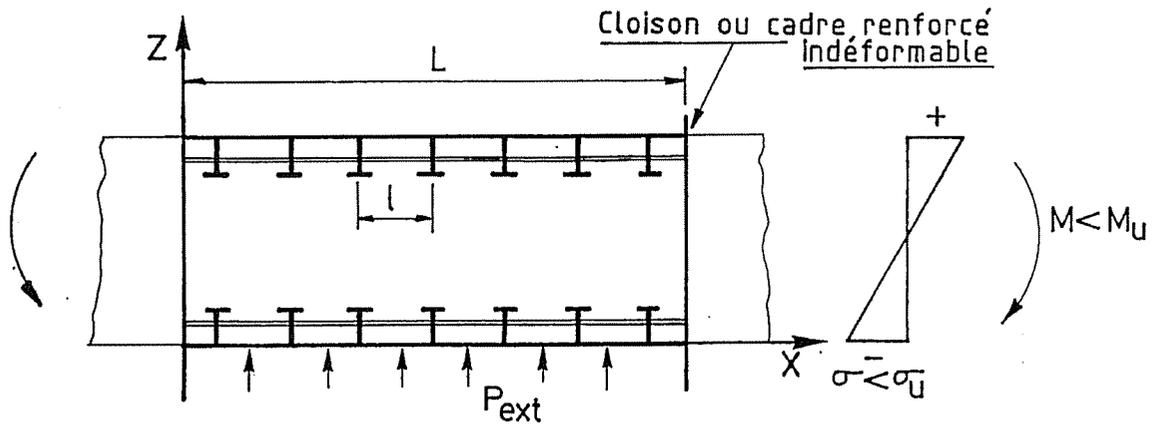


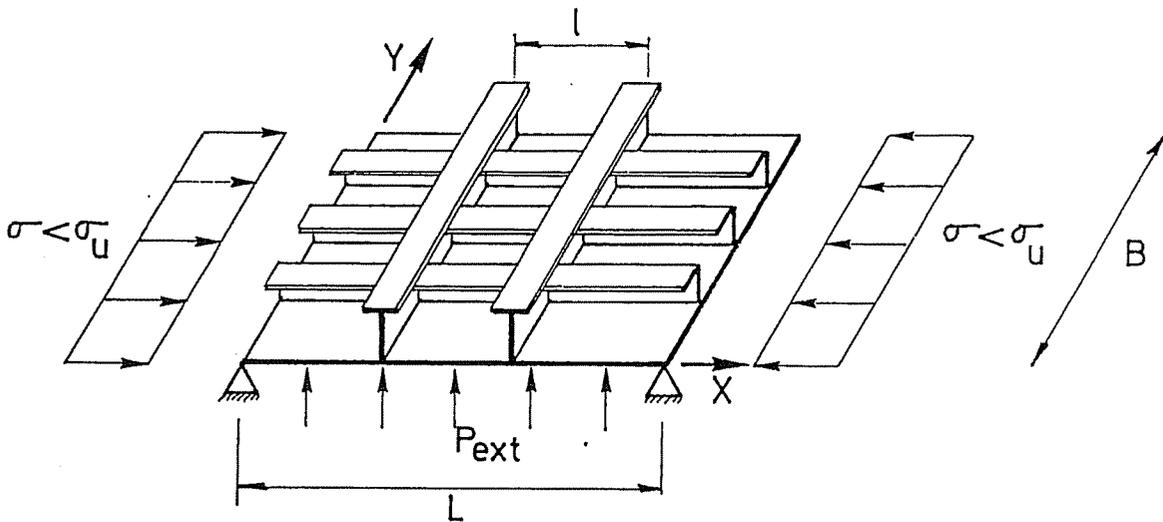
Figure 10 : Courbe Moment-Courbure ($M-\phi$).

En conclusion, pour déterminer M_u , moment ultime d'ensemble, il faut connaître préalablement la résistance ultime en compression (σ_u) de chaque panneau et si possible la relation contrainte moyenne – déformation moyenne ($\sigma-\epsilon$).

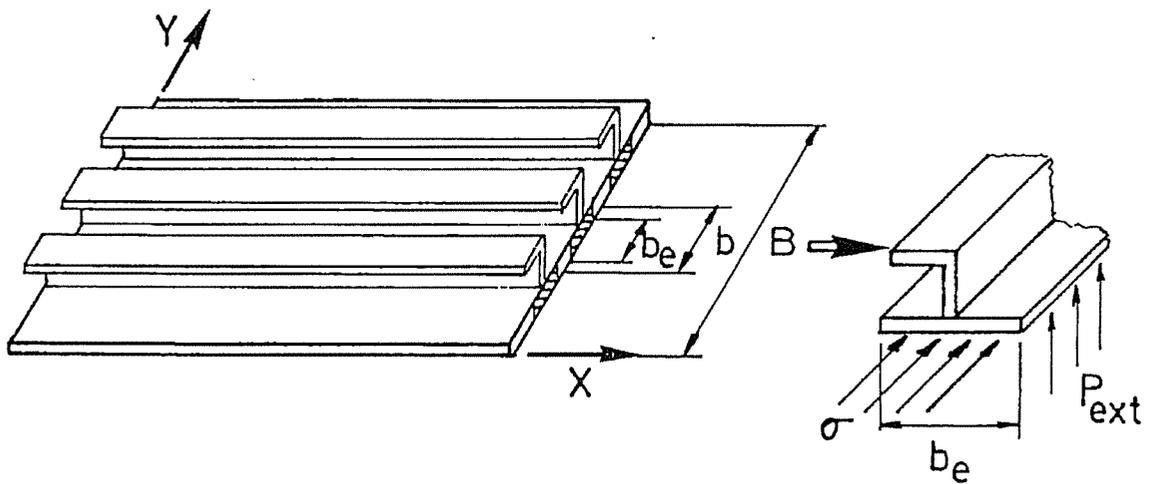
La figure 11 présente les différents niveaux d'une structure : structure globale ou structure d'ensemble (niveau 1), les panneaux orthotropes (niveau 2) et le panneau intercostal et la poutre-colonne (niveau 3 et 3bis) .



Niveau 1 : La structure d'ensemble (tronçon entre 2 cloisons)



Niveau 2 : Le panneau dans son ensemble (panneau orthotrope)



Niveau 3 :
Le panneau intercostal :
sous-panneau entre 2 cadres
ou 2 renforts transversaux

Niveau 3bis :
La poutre-colonne:
simplification du panneau intercostal

Figure 11 : Décomposition de la structure.

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

Niveau 1 :

Moment de flexion ultime de la structure d'ensemble : M_u

↳ Niveau 2 :

Résistance ultime en compression des panneaux orthotropes (σ_u).

$$\sigma_u = \min [\sigma_u (\text{mode } i), i=1,4]$$

↳ 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.

VI.2 Liste des restrictions

Les restrictions 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, entredistance).
- 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 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).

États limites ultimes

- 2.4. Instabilités transversales des cadres.

- Ame;
- Semelle;
- Instabilité du profilé.

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.

NB : 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.

A titre comparatif, il est intéressant de mentionner la liste des états limites retenue par le «Ship Structure Committee (SSC n° 375 de 1994) [Hughes 94]» qui est reprise au Tableau 1. Pour chaque mode de ruine retenu, la troisième colonne du tableau fait référence à une approche rationnelle de calcul proposée par Hughes pour imposer des restrictions relatives à cet état limite (ultime ou de service). En correspondance des propositions faites dans le SSD (Ship Structural Design, [Hughes 88]), sont indiqués les types de restrictions qui correspondent à notre classification.

Failure Modes of Principal Members	Failure Category	Computational Algorithm Source (SSD denotes Ship Structural Design) [Hughes 88]	LBR-5 Constraints Classification (see previous page)
HULL GIRDER: Ult. Strength	Collapse	SSD Sec. 17-1	3.3
PANEL Collapse Stiffener Flexure Combined Buckling Membrane Yield Stiffener Buckling Stiffener Unserviceability (Initial Yield) Tension, Flange Tension, Plate Compression, Flange Compression, Plate Plate Unserviceability Yield, plate bending Local buckling Allowable Permanent Set	(with longitudinal members) Collapse Collapse Collapse Collapse Yield Yield Yield Yield Yield Yield Yield Yield	SSD Sec. 14.2 SSD Sec. 13.2 - 13.4 SSD Sec. 12.5 SSD Sec. 13.1 & 15.5 Beam Theory & SSD Sec. 8.6 " " " SSD Sec. 9.1 & 9.2 SSD Sec. 12.6 SSD Sec. 9.3 - 9.5	1.7 1.7 1.2 + 3.1 1.5 + 1.8 1.2 " " " 1.2 + 3.1 1.4 1.3 (a) + 3.2
BEAM Collapse Tripping Flexural-Torsional Buckling Plastic Hinge Unserviceability (Initial Yield) Bending Web shear	(Transverse members & frames) Collapse Collapse Collapse Yield Yield	SSD Sec. 13.1 SSD Sec. 15.4 & 15.5 SSD Sec. 16.1 & 16.2 Beam Theory " "	2.4 2.4 2.3 (b) 2.3 2.3
GRILLAGE Collapse Overall Buckling Plastic Hinge	Collapse Collapse	SSD Sec. 10.2 & 13.5,6 SSD Sec. 16.1 - 16.4	1.6 + 2.2 3.1 (b)

(a) Une restriction relative à la déformée élastique est proposée.

(b) L'état limite proposé est relatif à la naissance de la plastification et pas à la ruine.

Tableau 1 : Identification des modes de rupture des principaux composants de la structure [Hughes 94]

Bien que différentes à plusieurs niveaux (principes et méthodes), les deux classifications se recourent parfaitement et excluent toute rupture associée à un état limite non envisagé.

VII «COUT» : EVALUATION DES COUTS 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. Notons qu'à posteriori, la précision est souvent jugée assez bonne.
- Toutes imprécisions au niveau du devis demandé aux fournisseurs entraînent de leur part une surestimation des coûts dont il résulte un accroissement de la marge d'erreur sur l'estimation globale. Cela est surtout marquant pour les équipements et le système de propulsion.
- 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 (zone avant, salle des machines,...) et selon les détails de conception retenus (renforts à bord tombé, profils T laminés ou reconstitués sur chantier,...).

b) Coût de la main-d'œuvre

La solution alternative aux formulations empiriques est l'évaluation analytique de la charge de travail. 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 semble a priori chose évidente. L'expérience montre toutefois que c'est à ce niveau que les incertitudes sont les plus importantes.

Ainsi, on assiste parfois à une double évaluation, d'abord au niveau de l'estimateur afin d'effectuer l'offre de prix et ensuite, quelques mois plus tard, au niveau de la planification. Il n'y a parfois aucun lien entre les deux estimations. Si une recherche de l'optimum structurel doit avoir lieu, il est impératif que les estimations effectuées au stade du projet (ou avant-projet) reflètent la réalité du terrain.

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 variables et les frais fixes.

- Par frais variables, on comprend les frais qui varient avec la production, comme par exemple, les assurances, les fluides (eau, électricité, gaz, chauffage),...
- 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.

VII.1 Evaluation analytique du coût de fabrication

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

$$\text{Prix total} = \text{Prix matériaux} + \text{coût main-d'œuvre} + \text{frais généraux}$$

$$(PT) \qquad \qquad (Mat) \qquad \qquad (MdO) \qquad \qquad (FG)$$

$$\text{c'est-à-dire} \quad PT = Mat + MdO + FG$$

[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 :

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

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

j = un matériau donné (1 tonne de tôle, 1 m de cornière 60x60x5,...),

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 et la multitude 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 (Eq. 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 [Eq.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 :

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

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 $NT1$ tâches standards de niveau 1. C'est par exemple la division en blocs de la structure (Fig. 12). Plusieurs blocs peuvent être identiques ($M_{i1} = 1,2,3,\dots$);
- de subdiviser chacune de ces $NT1$ tâches standards en $NT2$ 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 NTn).

VII.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 :

$$\text{Prix total} = \left(\frac{\text{Prix unitaire mat.}}{\text{(Euro)}} \right) \left(\frac{\text{Poids mat.}}{\text{(t)}} \right) + \left(\frac{\text{Prix unitaire MdO}}{\text{(Euro/heures-hommes)}} \right) \left(\frac{\text{Volume MdO}}{\text{(heures-hommes)}} \right)$$

$$PT = Q \cdot P + S \cdot T \cdot M$$

$$EQP = \frac{PT}{Q} = P + \frac{k}{\left(\frac{t}{h-h} \right)} \cdot \frac{T \cdot M}{(h-h)} \quad (\text{tonne}) \quad [10]$$

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

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.

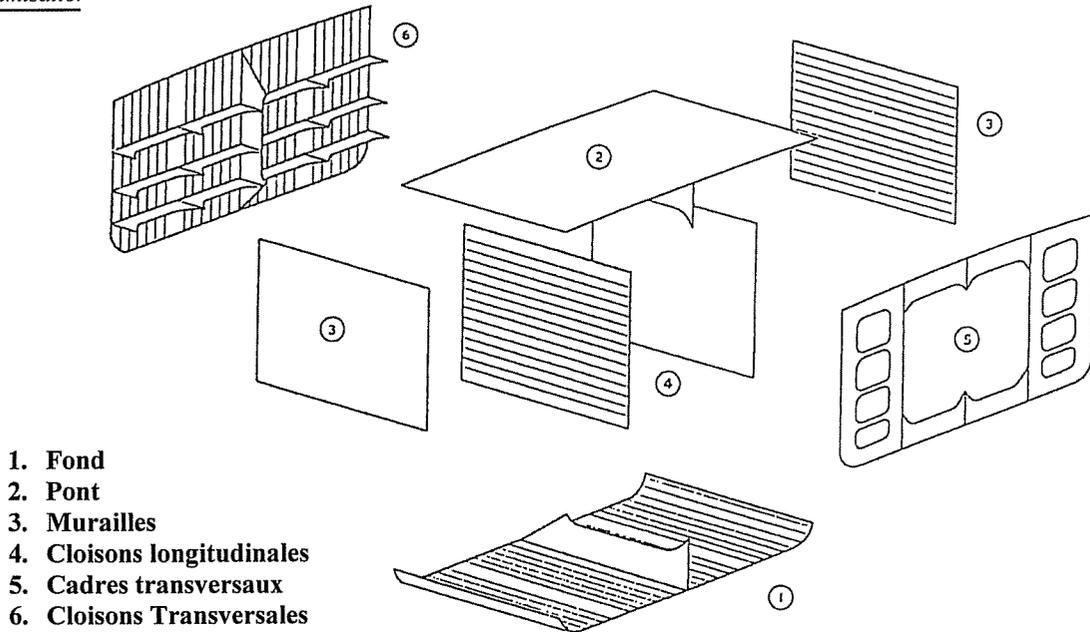


Figure 12 : Décomposition d'un bloc en éléments [Buxton 1966]

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 le suggère [Winkle et Baird, 1986], 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 $\text{EQP} = \text{Poids Mat.} + \eta \cdot k \cdot \text{Volume MdO}$ (tonnes)
 η = un paramètre d'efficacité du site de production
 ($\eta = 1$ pour le site de référence)

VII.3 Modélisation des fonctions objectives utilisées par le modèle LBR-5

Présentons ici les deux fonctions objectives de base retenues pour le modèle LBR-5 :

- une fonction objectif poids,
- une 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 :

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

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 (Eq. 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'oeuvre 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 (Eq. 13). Il suffit de multiplier chaque terme par le coût unitaire du matériau (tôle, profilé,...). Ainsi, à partir de l'équation 13, on obtient :

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

- 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.

Afin de prendre en compte une éventuelle variation du prix au kg des tôles en fonction de leur épaisseur, nous définissons le paramètre C_1 comme suit :

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

- 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 :

$$C_2 = C_1^0 \left[1 + \alpha_X \cdot \Delta C_2 \right] \quad (\text{Euro/kg}) \quad \text{pour les lisses, carlingues et raidisseurs} \quad [17]$$

$$C_3 = C_1^0 \left[1 + \alpha_Y \cdot \Delta C_3 \right] \quad (\text{Euro/kg}) \quad \text{pour les cadres, transversaux et aiguilles}$$

- avec α_X, α_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 : P₄ et P₅);

- α_X, α_Y = 1, s'il s'agit de profilés commerciaux standards;

- $\Delta C_2, \Delta C_3$ = 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'oeuvre non comprise, est évalué par la formule suivante:

$$C_8 = C_8^0 \left[1 + \Delta C_8 (\delta - E_0) 10^3 \right] \quad \left(\frac{\text{Euro}}{\text{m}} \right) \quad [18]$$

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 :

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

Les coefficients C_8^0 et ΔC_8 ont été définis avec le programme WELDCOST de calcul du prix de revient de la soudure (E.S.A.B. S.A.) du «Centre d'Etudes Wallon d'Assemblage et de Contrôle des matériaux» (CEWAC). 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 (Figure 13) vis-à-vis du coût de la main-d'oeuvre (productivité en min/m) (Figure 14).

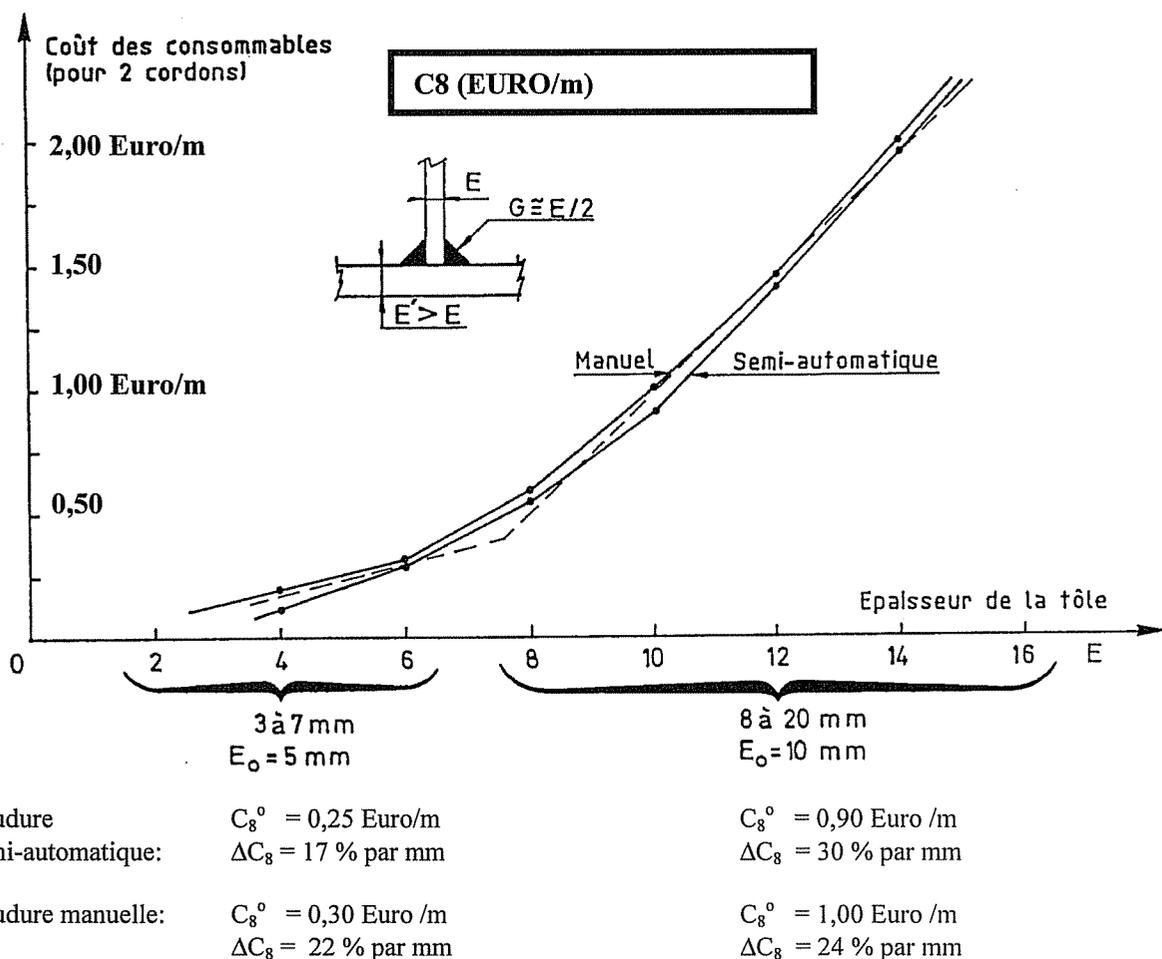
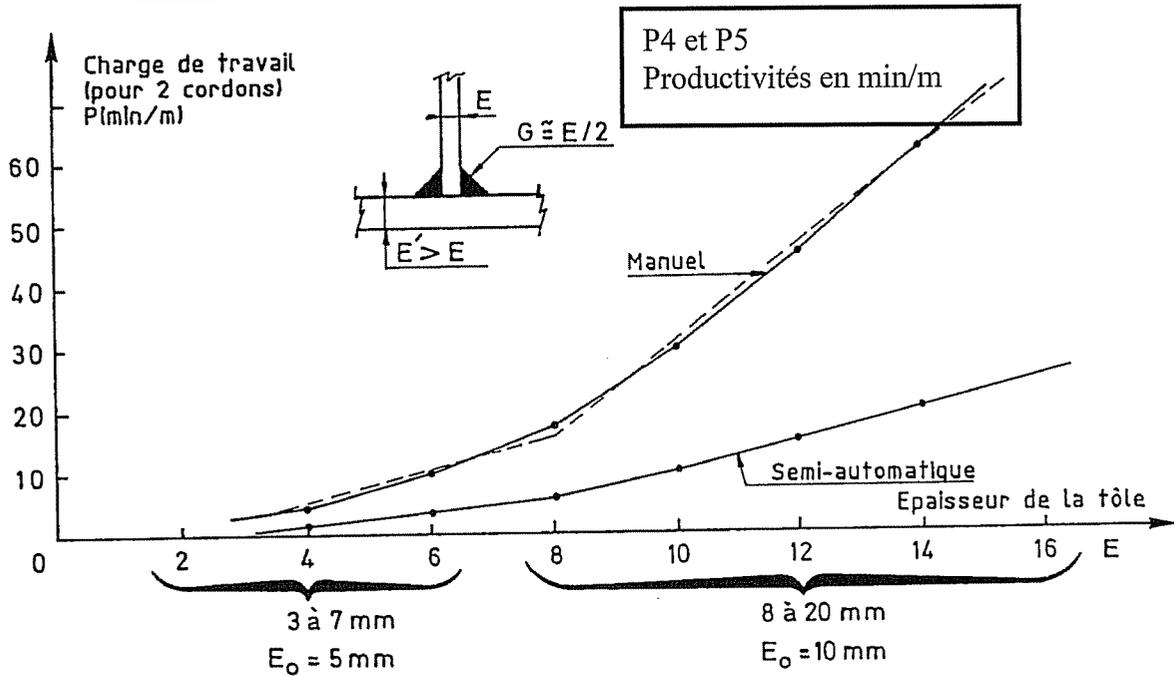


Figure 13 : Coût des consommables pour le soudage d'un mètre de renforts (deux cordons).



Soudure semi-automatique :	P = 2 min/m	P = 10 min/m
	ΔP = 32 % par mm	ΔP = 25 % par mm
Soudure manuelle :	P = 8 min/m	P = 31 min/m
	ΔP = 29 % par mm	ΔP = 20 % par mm

Figure 14 : Variation de la main-d'œuvre (P4 et P5) en fonction des tôles à assembler (deux cordons).

b3) Coût de la main d'œuvre : F_{Mdo}

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

$$F_{Mdo} = \eta \cdot k \cdot C_1^o \cdot Mdo \tag{20}$$

avec Mdo = la charge de travail (heures-hommes) (Eq. 21).

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

- 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 proportion 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: Pour des profils standards P_9 ne doit pas être défini (α_X et $\alpha_Y = 1$; Eq. 17).

P_{10} = la charge de travail par m^2 pour constituer le bordé ($h-h/m^2$). 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 ($h-h/m^2$).

Ces charges de travail se définissent comme suit :

$$\begin{aligned} P_4 &= P_4^o \left[1 + (d_X - E_o) \cdot 10^3 \cdot \Delta P_4 \right] \\ P_5 &= P_5^o \left[1 + (d_Y - E_o) \cdot 10^3 \cdot \Delta P_5 \right] \\ P_9(X) &= P_9^o \left[1 + (d_X - E_o) \cdot 10^3 \cdot \Delta P_9 \right] \\ P_9(Y) &= P_9^o \left[1 + (d_Y - E_o) \cdot 10^3 \cdot \Delta P_9 \right] \end{aligned} \quad [V.22]$$

avec d_X, d_Y = l'épaisseur des âmes, selon X et Y;
 P_4^o, P_5^o et P_9^o = la charge de travail P_4, P_5, P_9 correspondant à l'épaisseur de référence (E_o) ($h-h/m$) = 0,6 à 1,2 $h-h/m$;
 $\Delta P_4, \Delta P_5, \Delta P_9$ = la variation en %, par mm de d , de la charge de travail P_4^o, P_5^o et P_9^o .

$$P_{10} = P_{10}^o \left[1 + (\delta - E_o) \cdot 10^3 \cdot \Delta P_{10} \right] \quad [V.23]$$

avec δ = l'épaisseur du bordé;
 P_{10}^o = la charge de travail par m^2 , ($h-h/m^2$) pour assembler un bordé dont l'épaisseur est $\delta = E_o$
 ΔP_{10} = la variation en % (par mm de δ) de la charge de travail de P_{10}^o .

Les définitions précédentes des charges de travail ($P_4^o, P_5^o, P_6^o, P_7^o, P_9^o$ et P_{10}^o) 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 WELDCOST, il a été possible de quantifier l'ordre de grandeur de ces paramètres en évaluant avec précision la charge de travail relative au soudage (Figure 14).

VIII EXEMPLES D'OPTIMISATION DE STRUCTURES

Deux exemples d'application du modèle d'optimisation LBR-5 sont présentés. Le premier traite de l'optimisation d'une porte flottante pour la nouvelle écluse du port d'Ostende et le second concerne l'optimisation d'une barge FSO de 336 m, d'une capacité de 370 000 t ($\pm 3,7 \cdot 10^6$ 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*).

VIII.1 Optimisation d'une porte flottante d'écluse maritime

En Belgique, le département de la côte du ministère des voies maritimes et fluviales (Waterwegen Kust, Oostende) a comme projet la construction, dans le port d'Ostende, d'une nouvelle écluse de 250 x 36 m dont la profondeur minimale serait de 10 m (Figures 15.a et b). Cette écluse est destinée à recevoir des bateaux de 10 000 tonnes de port en lourd ($\pm 100\,000$ kN). Il est envisagé de la concevoir avec des portes flottantes.

Les avantages des portes maritimes flottantes sont bien connus et ont été mis en exergue à l'université de Liège depuis maintenant 20 ans [Dehousse et Rodriguez, 1985; Rigo 1989b et 89c; Rigo et al. 1996]. Les études précédentes portaient sur des écluses de 50 m (Zeebrugge) et de 70 m de large (Anvers). Cette fois, la largeur n'est que de 36 m et une étude spécifique à cette largeur a été nécessaire [Da Ronch 1998].

Nous n'aborderons pas ici l'ensemble des études nécessaires à la conception et au dimensionnement des portes flottantes, à savoir : la stabilité, le ballastage, la manoeuvrabilité, la propulsion, l'effet de la houle et des courants,.... Nous concentrerons notre analyse sur l'optimisation de la structure de la porte lorsque ses grandes dimensions ont été définies (hauteur, largeur, longueur, tailles et positions des caissons et des zones de ballastage).

Pour une porte de 36 m de portée, Da Ronch a montré que, si l'on néglige les problèmes liés à la stabilité en flottaison, l'optimum poids correspond à une porte dont la largeur est 3,25 m (Figure 16). Cette largeur est donc indiquée pour la construction d'une porte roulante, non flottante, dite «brouette» ou à déplacement latéral.

Pour une porte flottante, une largeur de 3,25 m ne permet pas d'assurer une stabilité suffisante en présence du vent et de la houle; il faut donc l'élargir. Dans le cas de la porte d'Ostende, la hauteur de la porte sous eau ($\pm 9,7$ m) étant quasiment égale à la partie hors de l'eau ($\pm 9,1$ m), les problèmes de stabilité sont critiques. En conséquence, après un calcul des conditions de flottabilité, notre choix s'est porté vers une porte de 5,40 m munie, à la partie basse, d'un lest de ± 1000 kN (Figure 17). Des recherches doivent se poursuivre à ce sujet afin de confirmer le bien-fondé de cette largeur et de la quantité de lest.

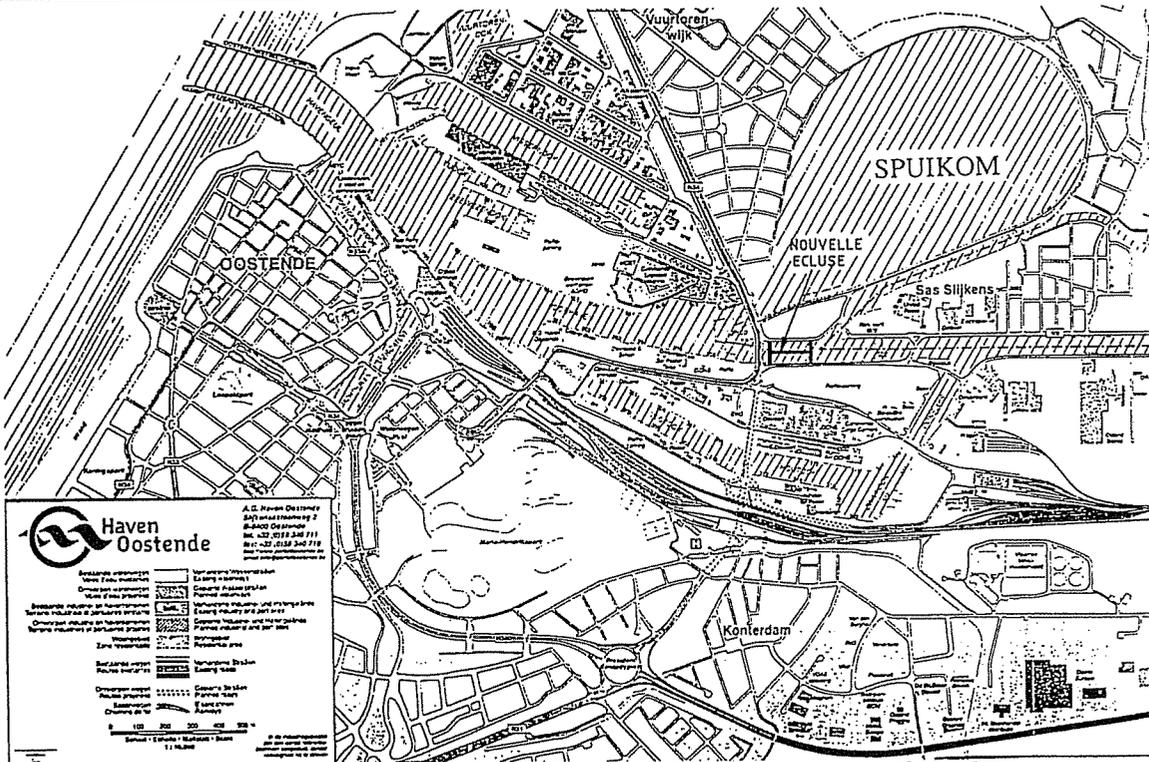


Figure 15.a : Implantation de la nouvelle écluse du port d'Ostende

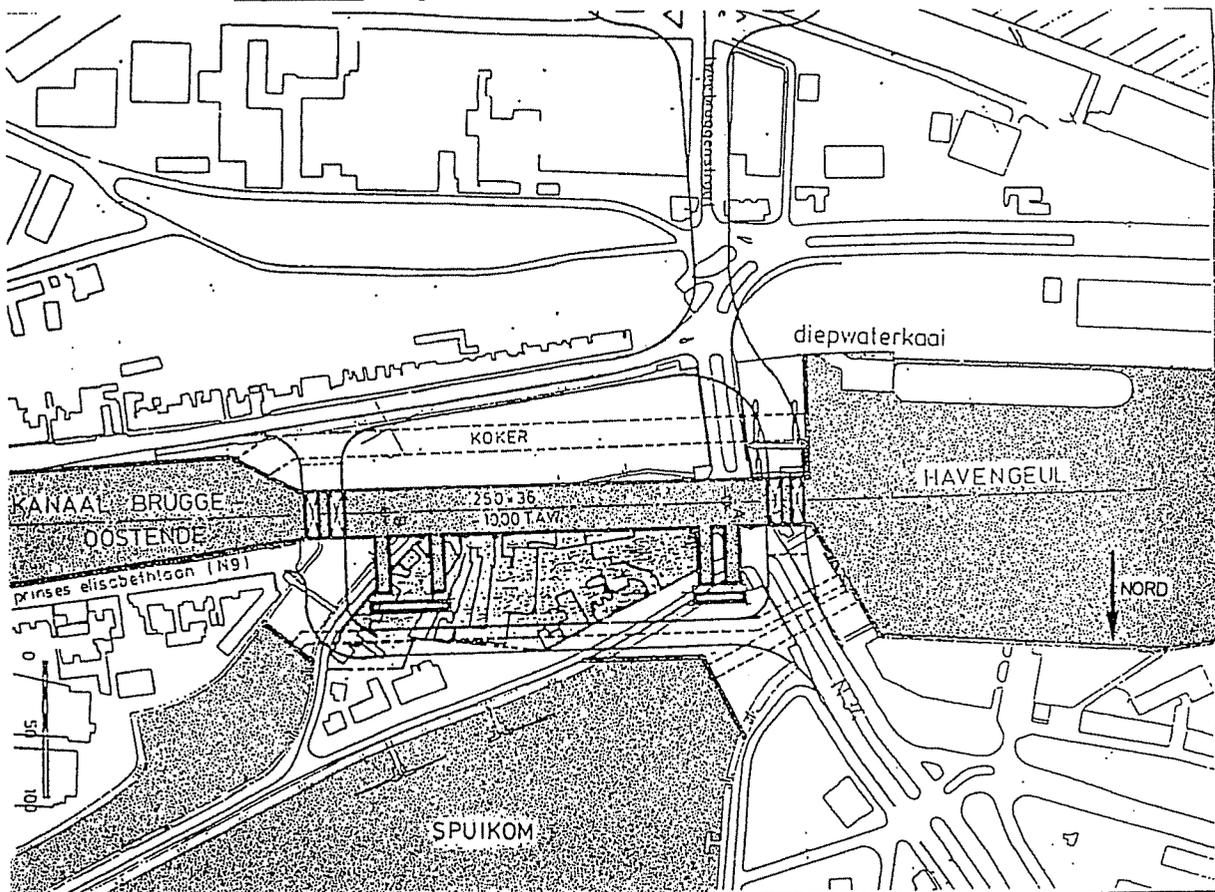


Figure 15.b : Plan d'implantation de l'écluse de 250 x 36 m

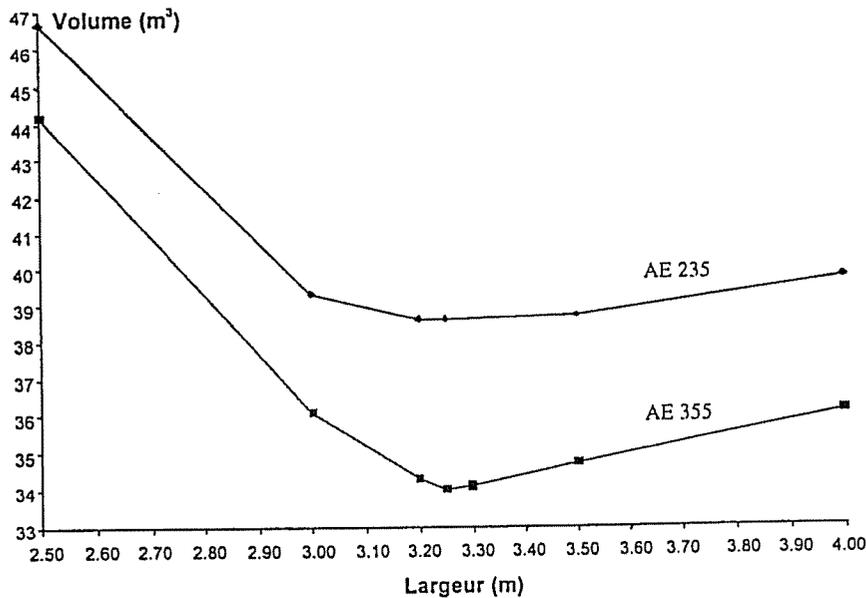


Figure 16: Recherche de la largeur optimale pour une écluse maritime de 36 m (optimum poids).

Les analyses présentées ici, concernant les portes d'écluses maritimes, se rapportent à l'optimisation (poids et coût) d'une porte de 3,25 m de largeur et d'une porte flottante de 5,40 m de largeur. L'opportunité d'utiliser de l'acier haute résistance est aussi envisagée (AE355).

La modélisation utilisée comprend :

- o 18 panneaux raidis avec 9 variables de conception chacun (Figure 17);
- o 1 panneau additionnel pour simuler l'appui inférieur (busc) éventuel au bas de la porte (configuration n° 2);
- o 162 variables de conception (18 x 9);
- o 73 conditions d'égalité entre les variables de conception (structure symétrique, uniformité de l'espacement des cadres Δ_c , ...);
- o 270 restrictions géométriques (15 restrictions par panneau);
- o 246 restrictions structurelles, à savoir :
 - * déformée $\leq 3,60$ cm;
 - * σ_c (bordé), σ_c (cadre : JAS - JAB et SEM), σ_c (raid. : JAS - JAB et SEM) avec chaque fois $\sigma_c \leq s \cdot \sigma_0$;
 - * instabilité locale du bordé : $\delta_{\min} \leq \delta$
 - * résistance ultime des panneaux raidis : $\sigma/\sigma_{ult} \leq s$
- o 2 configurations correspondant à :
 - * la porte libre en son pied,
 - * la porte appuyée sur le radier (busc).

La résistance ultime de la structure d'ensemble n'a pas été retenue comme restriction. Une vérification post-optimisation a confirmé que la structure peut résister à une différence de niveau exceptionnelle de 6,50 m. Le coefficient de sécurité "s" a été pris égal à 0,65 pour toutes les restrictions mentionnées ci-avant.

Les conditions d'appuis:

A ses deux extrémités, la porte est considérée comme appuyée, verticalement, sur les bajoyers; il s'agit d'appuis simples. Notons qu'en principe une telle porte est conçue pour être, soit appuyée en son pied, soit libre. Dans ce dernier cas, seule l'étanchéité est requise. Un appui sur le mur de busc (au pied de la porte) permet de réduire le niveau global des contraintes et de la déformation d'ensemble. Afin de prendre en compte les incertitudes relatives à la reprise des efforts sur le busc, le dimensionnement optimal proposé répond simultanément aux exigences des deux situations.

Recherche de la largeur optimale

Indépendamment des impératifs liés à la stabilité en flottaison et à l'action de la houle et du vent, il a été procédé à la recherche de la largeur optimale de la porte pour une fonction objectif poids. La figure 16 montre que cette largeur est d'environ 3,25 m, soit $\pm 1/9$ de la portée (37,25 m entre appuis).

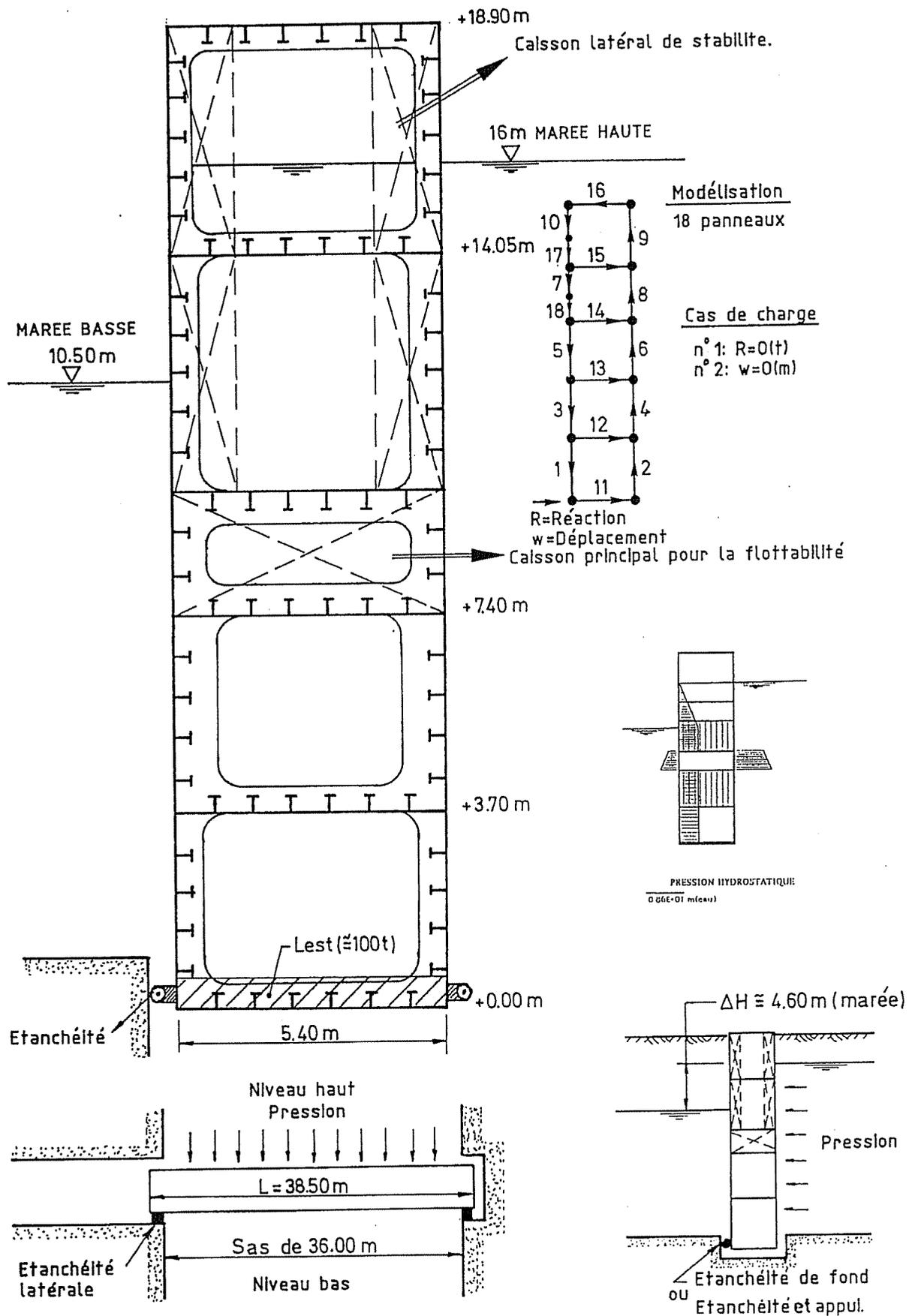


Figure 17 : La porte flottante de 5,40 m

Sur base d'une largeur optimale de 3,25 m, les 4 dimensionnements 'optimums' suivants sont comparés :

- Optimum poids et acier AE235 ($\sigma_0 = 235 \text{ N/mm}^2$),
- Optimum poids et acier AE355 ($\sigma_0 = 355 \text{ N/mm}^2$),
- Optimum coût et acier AE235 ($\sigma_0 = 235 \text{ N/mm}^2$),
- Optimum coût et acier AE355 ($\sigma_0 = 355 \text{ N/mm}^2$).

Les optimums coûts ont été calculés sur les bases suivantes :

- Epaisseur de référence : 10 mm
- Rapport MdO (Euro/h-h)/Mat. (Euro/t): $k = 0,08$
- Prix de l'acier : $C_1 = 0,57 \text{ Euro/kg}$ et $\Delta C_1 = -0,6 \%$ (AE235)
 $C_1 = 0,65 \text{ Euro/kg}$ et $\Delta C_1 = -0,6 \%$ (AE355)
- Prix du soudage : $C_8 = 1,00 \text{ Euro/m}$ et $\Delta C_8 = 15 \%$
- Main d'oeuvre :
 - * bordé : $P_{10} = 0,5 \text{ h-h/m}^2$ et $\Delta P_{10} = 7 \%$
 - * membrures (assemblage avec bordé): $P_4 = P_5 = 1 \text{ h-h/m}$ et $\Delta P_4 = \Delta P_5 = 10 \%$
 - * membrures (fabrication) : $P_9 = 0,5 \text{ h-h/m}$ et $\Delta P_9 = 1 \%$

Largeur de la porte et type d'acier	Optimum poids	Optimum coût
Largeur = 3,25m et AE235	Poids = 100 % (2966 kN) Coût = 103 % $\delta = 10$ à 13 mm $\Delta_{\text{cadre}} = 2,5 \text{ m}$ (valeur max.) $\Delta_{\text{raid}} = 0,5$ à 0,8 m	Poids = 106 % (3152 kN) Coût = 100 % $\delta = 10$ à 16,5 mm $\Delta_{\text{cadre}} = 2,5 \text{ m}$ (valeur max.) $\Delta_{\text{raid}} = 0,8 \text{ m}$ (valeur max.)
Largeur = 3,25m et AE355	Poids = 88 % (2616 kN) Coût = 89 % $\delta = 10 \text{ mm}$ (épaisseur min.) $\Delta_{\text{cadre}} = 2,5 \text{ m}$ (valeur max.) $\Delta_{\text{raid}} = 0,67$ à 0,8 m	Poids = 90 % (2657 kN) Coût = 88 % $\delta = 10$ à 12 mm $\Delta_{\text{cadre}} = 2,5 \text{ m}$ (valeur max.) $\Delta_{\text{raid}} = 0,8 \text{ m}$ (valeur max.)

Tableau 2 : Comparaison optimum poids et coût d'une porte de 3,25 m

Un exemple de la convergence du processus d'optimisation est présenté au tableau 3. La convergence est rapide au niveau de la fonction objectif et des épaisseurs de bordé (δ) mais elle est un peu plus lente pour les autres variables de conception comme la hauteur de l'âme des cadres.

Itération	Fonction objectif coût (%)	Epaisseur du bordé panneau n° 1 (mm)	Hauteur de l'âme des aiguilles panneau n° 3 (mm)
Départ	173,5	15,00	500,0
1	108,1	11,84	447,2
2	101,3	10,92	616,2
3	100,4	10,86	618,2
4	100,2	10,86	625,3
5	100,1	10,85	626,9
6	100,0	10,85	627,6
7	100,0	10,85	628,3
8	100,0	10,86	628,7
9	100,0	10,85	630,4
10	100,0	10,85	629,4

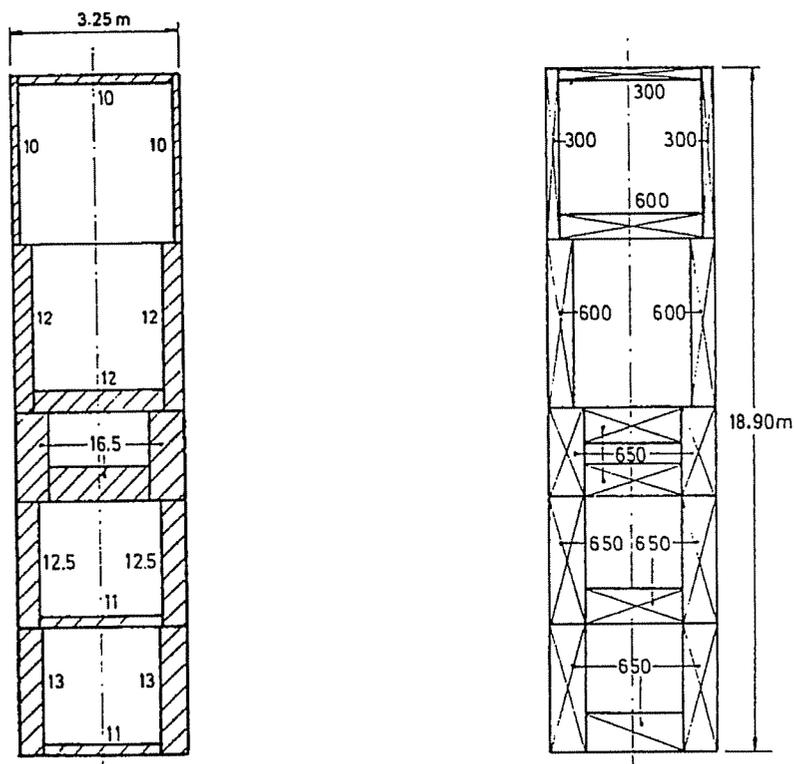
Optimum coût et $\sigma_0 = 355 \text{ N/mm}^2$

Tableau 3 : Exemple de la convergence du processus d'optimisation de la porte d'écluse de 36,00 m

Le tableau 2 permet de comparer les poids et les coûts correspondant aux 4 variantes. On constate que :

- L'utilisation de l'acier haute résistance (AE355) permet environ 13 % de réduction du poids et du coût.
- Pour l'acier AE355, l'optimum poids et l'optimum coût sont presque identiques.
- Par contre, pour l'acier AE235, l'écart varie entre 3 et 6 % entre, respectivement, les poids et les coûts des optimums.
- Au niveau de l'échantillonnage, il y a très peu de différence entre les optimums poids et coût. Pour l'optimum coût, l'augmentation des épaisseurs du bordé (δ) est compensée par un accroissement des entredistances entre les raidisseurs.
- Par contre, il y a des différences significatives en fonction du type d'acier (AE235 ou AE355). Ce sont essentiellement les épaisseurs des tôles du bordé qui peuvent être réduites par l'utilisation de l'acier AE355.

La figure 18 montre la répartition transversale des épaisseurs du bordé (δ) et de la rigidité des cadres ($h_{\text{âme cadre}}$) dans le cas d'une porte de 3,25 m, d'un acier normal (AE235) et d'une optimisation coût.



δ : Epaisseur du bordé des panneaux (mm)

h : Hauteur de l'âme des cadres (mm)

Figure 18 : Distribution de la rigidité transversale dans une porte d'une écluse maritime de 36,00 m (largeur = 3,25 m, $\sigma_0 = 235 \text{ N/mm}^2$, optimum coût)

Etude de la porte flottante de 5,40 m

Afin d'assurer la stabilité de la porte durant sa manœuvre, il a été montré qu'une largeur de porte de 5,40 m est requise. La figure 17 présente cette porte. Cette largeur plus importante est partiellement due à la grande hauteur de la porte vis-à-vis de son enfoncement minimum (18,90 m vis-à-vis de 10,50 m).

Le tableau 4 compare les optimums poids et coût de la porte flottante de 5,40 m vis-à-vis d'une porte classique roulante de 3,25 m. Les coûts des mécanismes et systèmes de manœuvre ne sont pas pris en compte dans cette comparaison.

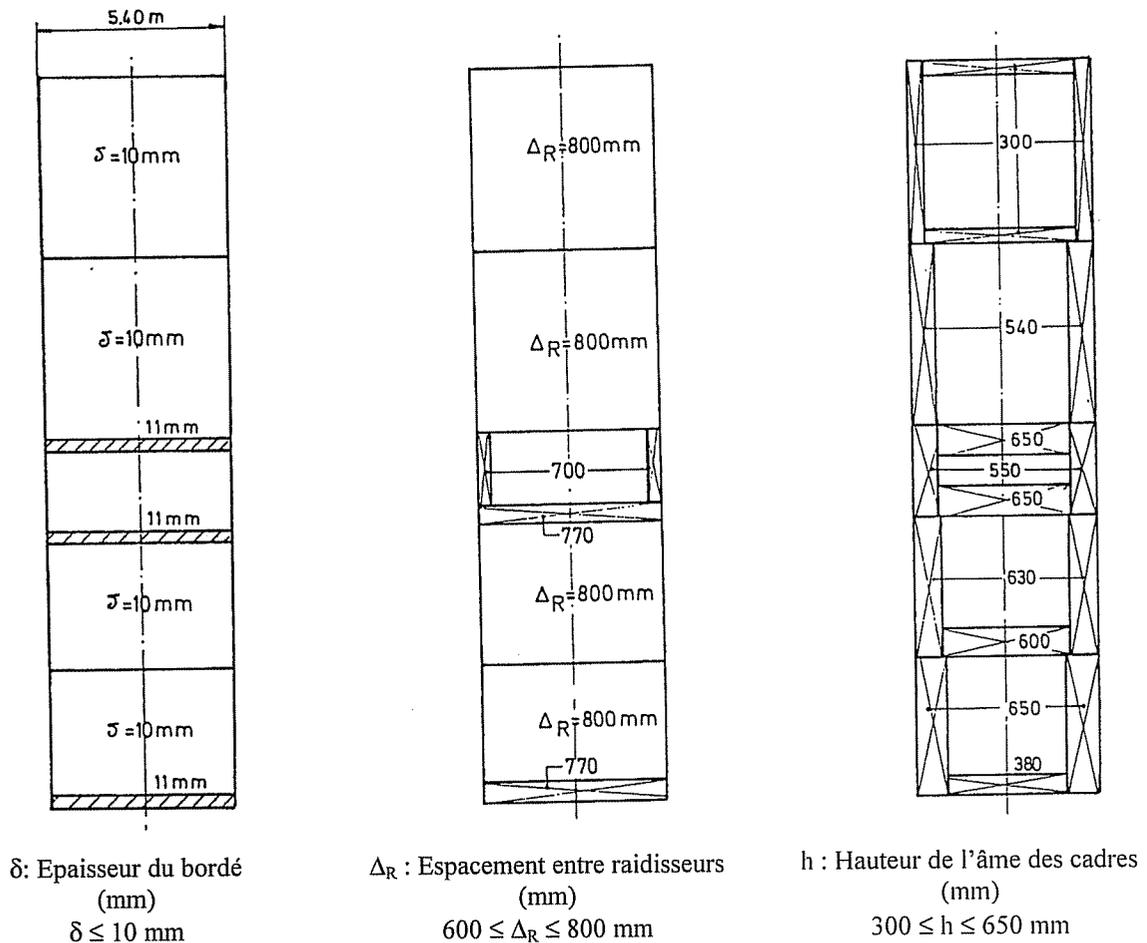
L'accroissement du coût de 20 à 25 % de la porte flottante (5,40 m - AE355) vis-à-vis d'une porte classique (3,25 m - AE355), semble peu de chose vis-à-vis des avantages que cette technique apporte [ANAST 1995] :

- économie des chariots supérieur et inférieur,
- pas de mécanismes sous eau (rails, galets),
- économie d'une porte pour l'écluse (3 au lieu de 4),
- économie d'une, voire deux, chambre(s) de portes,
- facilité d'entretien et réparation aisée,
- ...

Largeur de la porte et type d'acier	OPTIMUM POIDS		OPTIMUM COUT		Variation moyenne du coût (%)
	Poids	Coût	Poids	Coût	
B = 3,25 m AE235	100% (2966 kN) (référence poids)	103%	106% (3152 kN)	100% (référence coût)	Référence
B = 3,25 m AE355	88% (2616 kN)	89%	90% (2657 kN)	88%	-13%
B = 5,40 m AE355	108,50% (3221 kN)	112%	109% (3255 kN)	110%	+ 10 %

Tableau 4 : Comparaison des optimums pour la porte d'écluse de 36,00 m

La figure 19 présente d'une manière synthétique la solution optimale obtenue. Du fait de l'élargissement de la porte, on constate que beaucoup de variables de conception ont atteint leur valeur minimale ou maximale (bornes des variables de conception). Cela limite les économies potentielles que peut apporter le processus d'optimisation.



Espacement des cadres : 2,50 m
 Epaisseur âme des cadres : 5 à 9 mm
 Section des semelles des cadres : 1200 à 2800 mm
 Raidisseur minimum : 200 x 5,5 + 130 x 11 mm

Figure 19 : Caractéristiques de l'optimum coût de la porte flottante de 5,40 m

La figure 20 présente la déformée transversale de la porte dans les configurations avec et sans appui inférieur. La figure 21 montre la distribution des contraintes de comparaison σ_c dans la semelle et des contraintes τ à la jonction âme-semelle des cadres transversaux, pour les deux configurations (avec et sans appui sur le busc). On y note une similitude de la distribution à la partie supérieure de la porte mais aussi de larges variations dans la zone proche de l'appui inférieur.

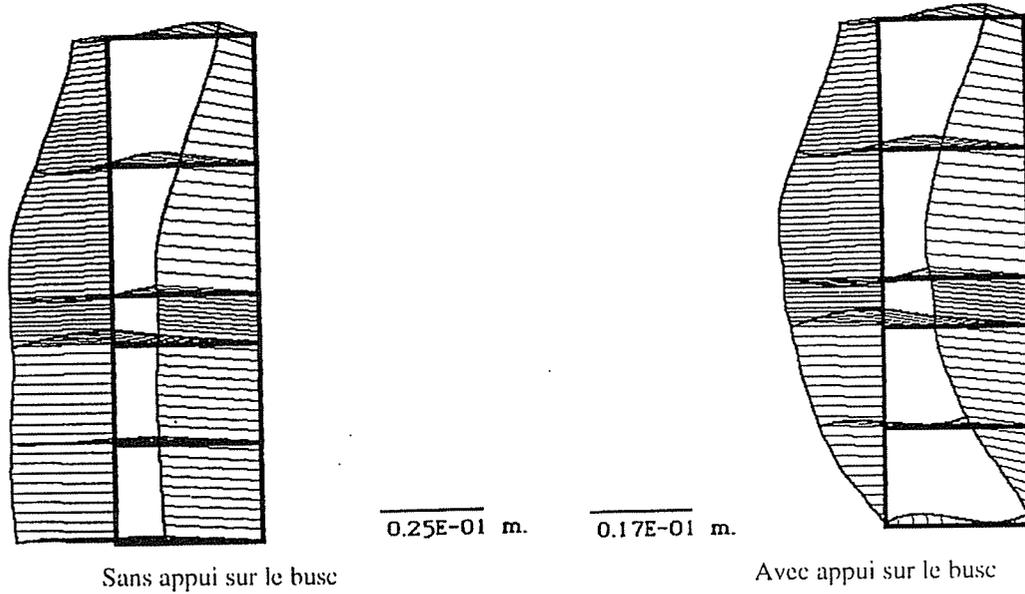


Figure 20 : Déformée transversale (avec et sans appui sur le busc)

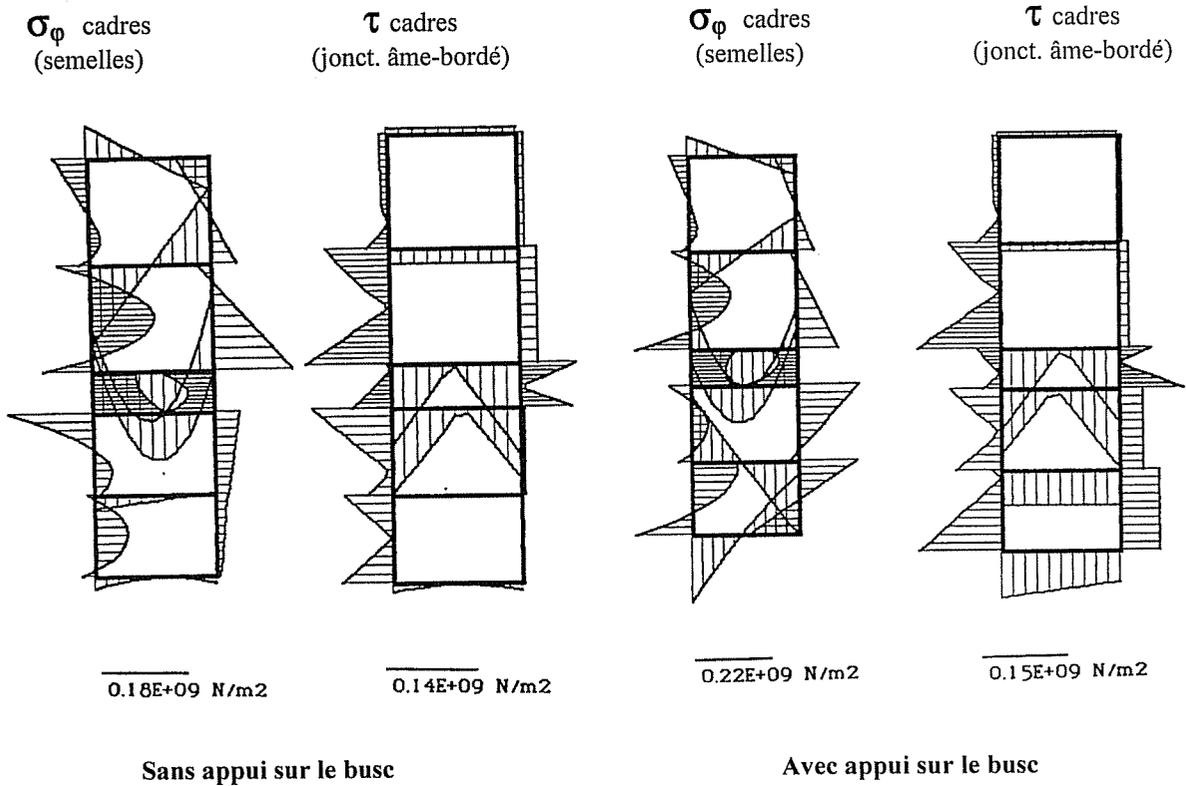
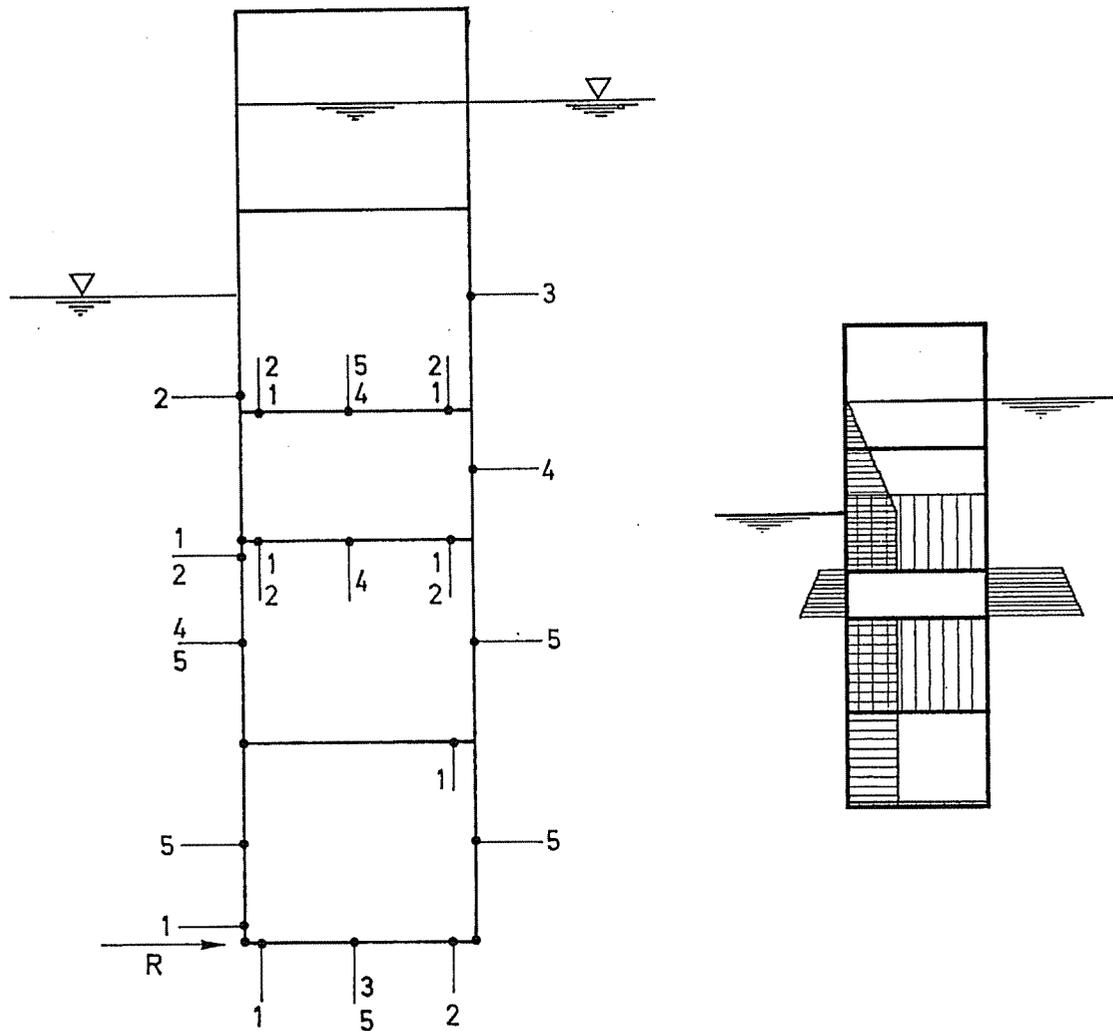


Figure 21 : Etat des contraintes dans les cadres.

- Comparaison entre les configurations avec et sans appui sur le busc -

A l'optimum, il y a environ 40 restrictions géométriques actives sur les 270 émises et 25 restrictions structurelles sur les 246 imposées. Les restrictions actives sont reprises à la figure 22.



- 1 σ_c (JAS) cadre
 2 σ_c (JAB) cadre
 3 Voilement du bordé

- 4 Plastification du bordé
 5 Elancement maximum de l'âme des cadres
 ($h \leq 120 d$) - restriction géométrique

Les restrictions géométriques actives sont relatives à l'élancement des âmes des cadres ($h \leq 120 d$) et des raidisseurs ($h \leq 36 d$) ainsi qu'au ratio entre l'épaisseur du bordé et l'épaisseur des âmes ($\delta \leq 2 d$). Ces deux dernières restrictions sont actives dans tous les panneaux.

Parmi les restrictions structurelles non actives, il y a :

- $(\sigma/\sigma_{\text{lim}})_{\text{MAX}}$ des panneaux comprimés = $0,41 \leq 0,65$
- $W_{\text{MAX}} = 2,5 \text{ cm} \leq 3,6 \text{ cm}$

Figure 22: Positions des restrictions actives

VIII.2 Optimisation d'une barge FSO de 336 m

L'étude d'avant-projet réalisée concerne l'optimisation structurelle d'une barge FSO qui sert de réservoir tampon entre un site d'exploitation et les grands pétroliers (VLCC). 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. Les données caractéristiques principales de la barge sont fournies au tableau 5.

L _{pp} (longueur entre perpendiculaires)	336 m (10 + 6 x 46 + 50 m)
B (largeur)	60 m (6 + 24 + 24 + 6 m)
H (creux)	30 m
T (tirant)	20,5 m
C _b (coefficient de bloc)	0,95
Tare (acier + machineries)	32 740 t (±320 000 kN)
Nombre de réservoir de pétrole brut	12 x 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)	1000 m ³ et 2000 m ³
Pompes	4 x 1800m ³ /h et 977 kW
Puissance totale installée	8880 kW
Propulseurs transversaux (arrière)	2 x 2500 kW et 300 kN/pièce
Aménagement intérieur	50 personnes

Tableau 5 : Caractéristiques de la barge FSO

Les figures 23 et 24 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 x 30 m x 46 m et des deux zones latérales de ballastage de 6 m de largeur.

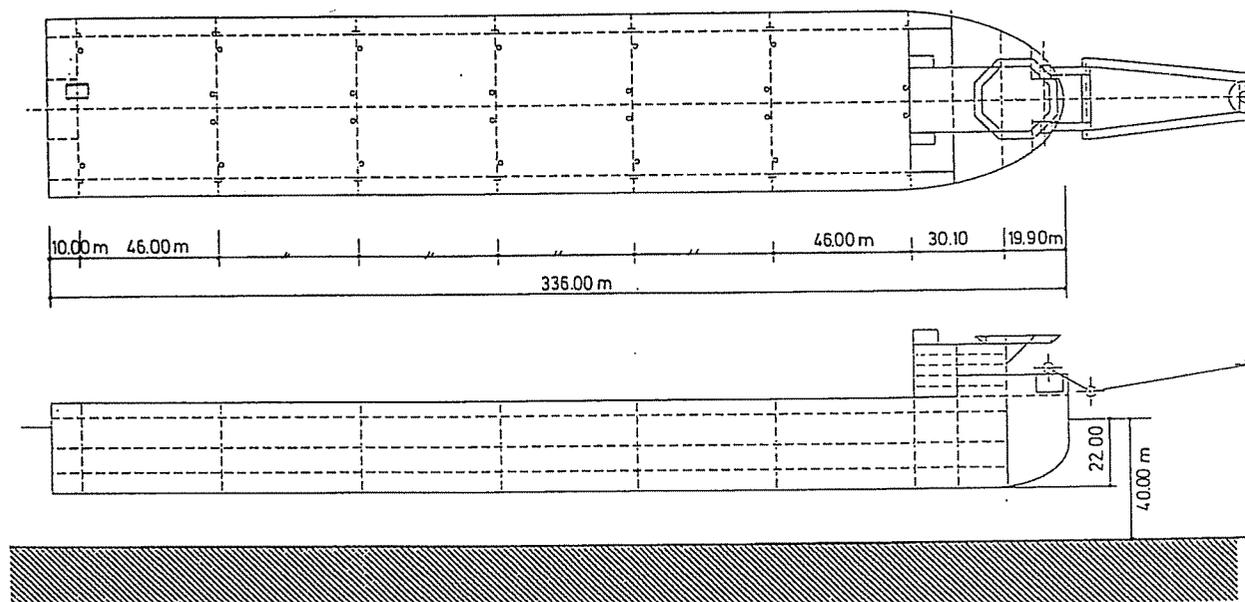


Figure 23 : Vue générale de la barge FSO

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 25 000 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 sera établi pour un moment maximum de 10 Mio kN.m en arc et en contre arc.
 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 25 et la modélisation effectuée à la figure 26.

Afin de tenir compte de la présence de goussets de forte rigidité aux extrémités des varangues, 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. De même la cloison longitudinale centrale et le pont (barrots) ont été modélisés en trois éléments chacun. La cloison étant sur l'axe de symétrie, seule la moitié de sa rigidité est prise en compte dans le modèle.

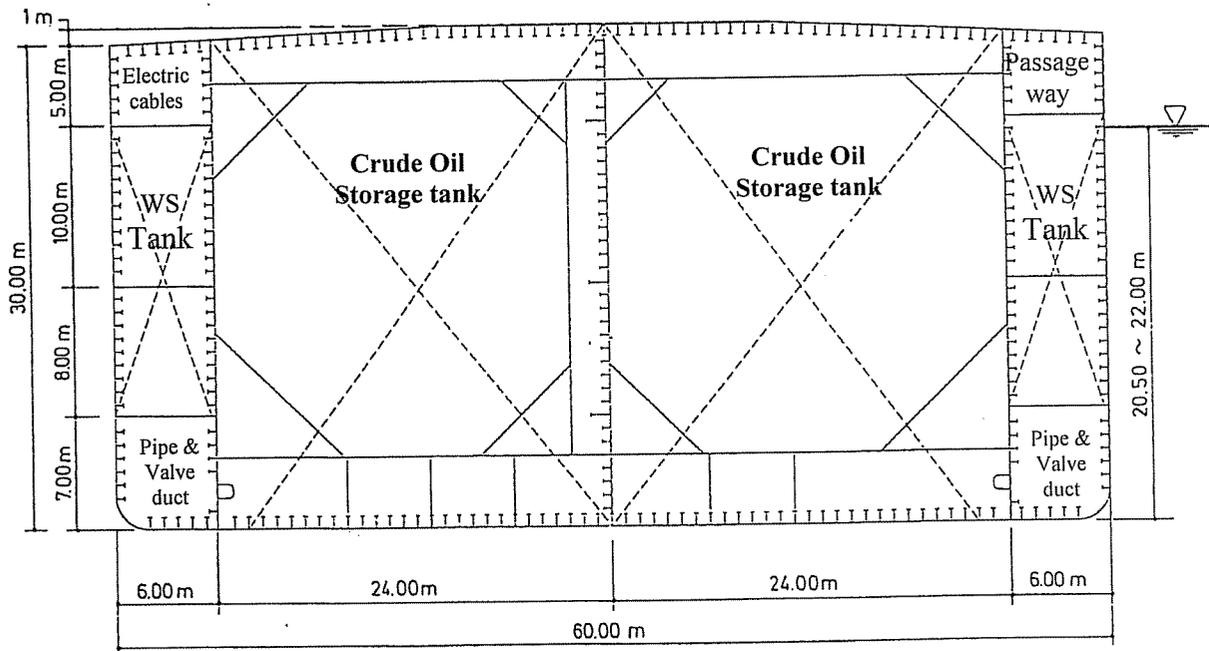


Figure 24 : Maître couple de la barge FSO

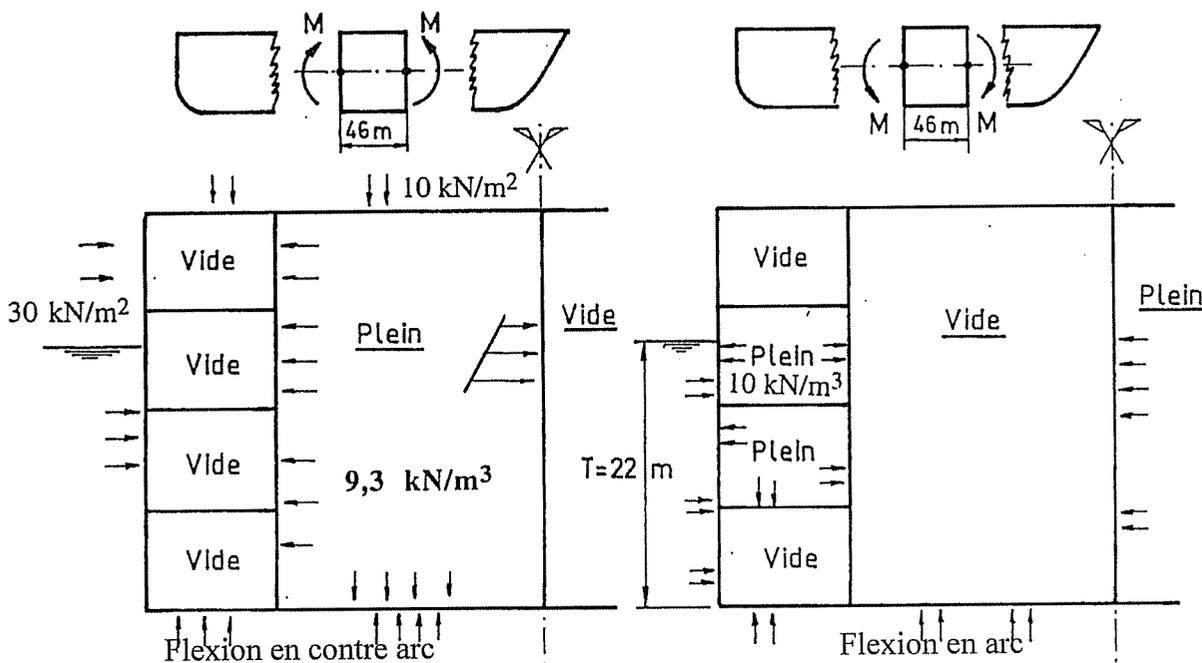


Figure 25 : Cas de chargements considérés

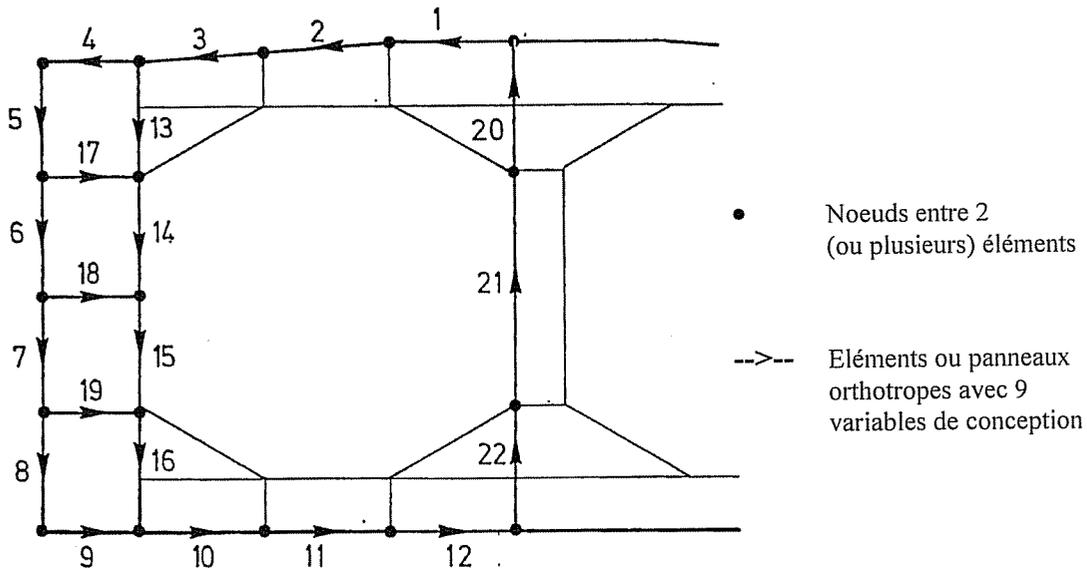


Figure 26 : Principe de la modélisation avec LBR-5 de la structure d'un compartiment.

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 x 9);
- ◆ 48 conditions d'égalité entre les variables 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 (22x9). Vu la hauteur des âmes des profils longitudinaux et transversaux, on n'a pas imposé de restrictions géométriques sur l'éclatement 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 : $M/M_{ult} < s$ ($s = 0,55$).

Définitions de l'échantillonnage optimal

Afin de rechercher les échantillonnages optimaux (coût et poids), des bornes ont été imposées aux variables de conception ($X_{i\text{MAX}}$, $X_{i\text{MIN}}$). 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	Δ_{cadres}	\leq	7,66 m
0,5 m	\leq	Δ_{lisses}	\leq	1,00 m
1,20 m	\leq	$h_{\text{âme}} \text{ cadres (cales)}$	\leq	6,00 m
0,50 m	\leq	$h_{\text{âme}} \text{ cadres (caissons)}$	\leq	2,50 m (sauf dans les panneaux 13,16,18)
8,0 mm	\leq	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 ($\alpha \leq 3$).

Le tableau 6 compare les optimums pour six configurations différentes (C1 à C6) :

- les optimums pour δ (tôle) ≤ 40 mm :
 - optimum coût :

<u>C1</u> :	$\Delta_{\text{cadre}}(\text{caissons latéraux}) = \Delta_{\text{cadre}}(\text{cales})$
<u>C2</u> :	$\Delta_{\text{cadre}}(\text{caissons latéraux}) = 1/2 \Delta_{\text{cadre}}(\text{cales})$
 - optimum poids :

<u>C3</u> :	$\Delta_{\text{cadre}}(\text{caissons latéraux}) = \Delta_{\text{cadre}}(\text{cales})$
<u>C4</u> :	$\Delta_{\text{cadre}}(\text{caissons latéraux}) = 1/2 \Delta_{\text{cadre}}(\text{cales})$
- les optimums pour δ (tôle) ≤ 30 mm :
 - optimum coût :

<u>C5</u> :	$\Delta_{\text{cadre}}(\text{caissons latéraux}) = \Delta_{\text{cadre}}(\text{cales})$
-------------	---
 - optimum poids :

<u>C6</u> :	$\Delta_{\text{cadre}}(\text{caissons latéraux}) = \Delta_{\text{cadre}}(\text{cales})$
-------------	---

Notons que les coûts et les poids 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 27.a et b, 28.a et b, et 29.a et b pour, respectivement, $\delta = 40$ mm (optimum coût), $\delta = 40$ mm (optimum poids) et $\delta = 30$ mm (optimum coût). 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.

L'analyse du tableau comparatif (tableau 6) et des échantillonnages montre que :

- L'épaisseur maximale du bordé ($\delta \leq 30$ mm ou $\delta \leq 40$ mm) est 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 en imposant $\delta \leq 30$ 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 :
 - * pour l'optimum coût (C = 100 %, P = 109 %, configuration C₁) :
 - ◇ $\delta \leq 40$ mm avec 7 cadres ($\Delta = 5,75$ m)
 - ◇ coût au kilo : 2,17 Euro
 - * pour l'optimum poids (C = 106 %, P = 101 %, configuration C₃) :
 - ◇ $\delta \leq 40$ mm avec 8 cadres ($\Delta = 5,11$ m)
 - ◇ coût au kilo : 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).

Configurations	Poids (kN et %)	Coût (Mio et %)	Coût au kg (Euro/kg)	Δ_{cale} (m) et N(*)	$\Delta_{caissons}$ (m) et N(*)
$\delta \leq 40$ mm					
Optimum coût					
C1 : $\Delta_{caisson} = \Delta_{cale}$	29280 (109 %)	255,83 (100 %)	2,17 Euro/kg	5,75 m N = 7	5,75 m N = 7
C2 : $\Delta_{caisson} = \Delta_{cale}/2$	29740 (111 %)	267,54 (105 %)	2,23 Euro/kg	6,57 m N = 6	3,285 m N = 13
Optimum poids					
C3 : $\Delta_{caisson} = \Delta_{cale}$	27150 (101 %)	270,45 (106 %)	2,42 Euro/kg	5,11 m N = 8	5,11 m N = 8
C4 : $\Delta_{caisson} = \Delta_{cale}/2$	26850 (100 %)	287,82 (113 %)	2,61 Euro/kg	5,75 m N = 7	2,875 m N = 15
$\delta \leq 30$ mm					
Optimum coût					
C5 : $\Delta_{caisson} = \Delta_{cale}$	38870 (145 %)	343,84 (134 %)	2,19 Euro/kg	3,07 m N = 14	3,07 m N = 14
Optimum poids					
C6 : $\Delta_{caisson} = \Delta_{cale}$	38500 (143 %)	388,64 (152 %)	2,50 Euro/kg	3,07 m N = 14	3,07 m N = 14
Echantillonnage de départ					
(départ du processus d'optimisation)	39370 (147 %)	392,76 (154 %)	2,47 Euro/kg	7,66 m N = 5	7,66 m N = 5

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

Echantillonnages recommandés

Tableau 6 : Comparaison des optimums (10 itérations)

Le tableau 7 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.

Itération n°	Poids 10^6 N	Espacement des cadres cale (m)	δ panneau n° 1 (mm)	δ panneau n°12 (mm)	Δ_{raid} panneau n° 1 (m)	Δ_{raid} panneau n° 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 10^6 Euro pour un demi compartiment de 46 m
(sans les cloisons transversales).

Coût au kg : 2,42 Euro/kg

Tableau 7 : Convergence du processus d'optimisation de la barge FSO (optimum coût, $\delta \leq 40$ mm)

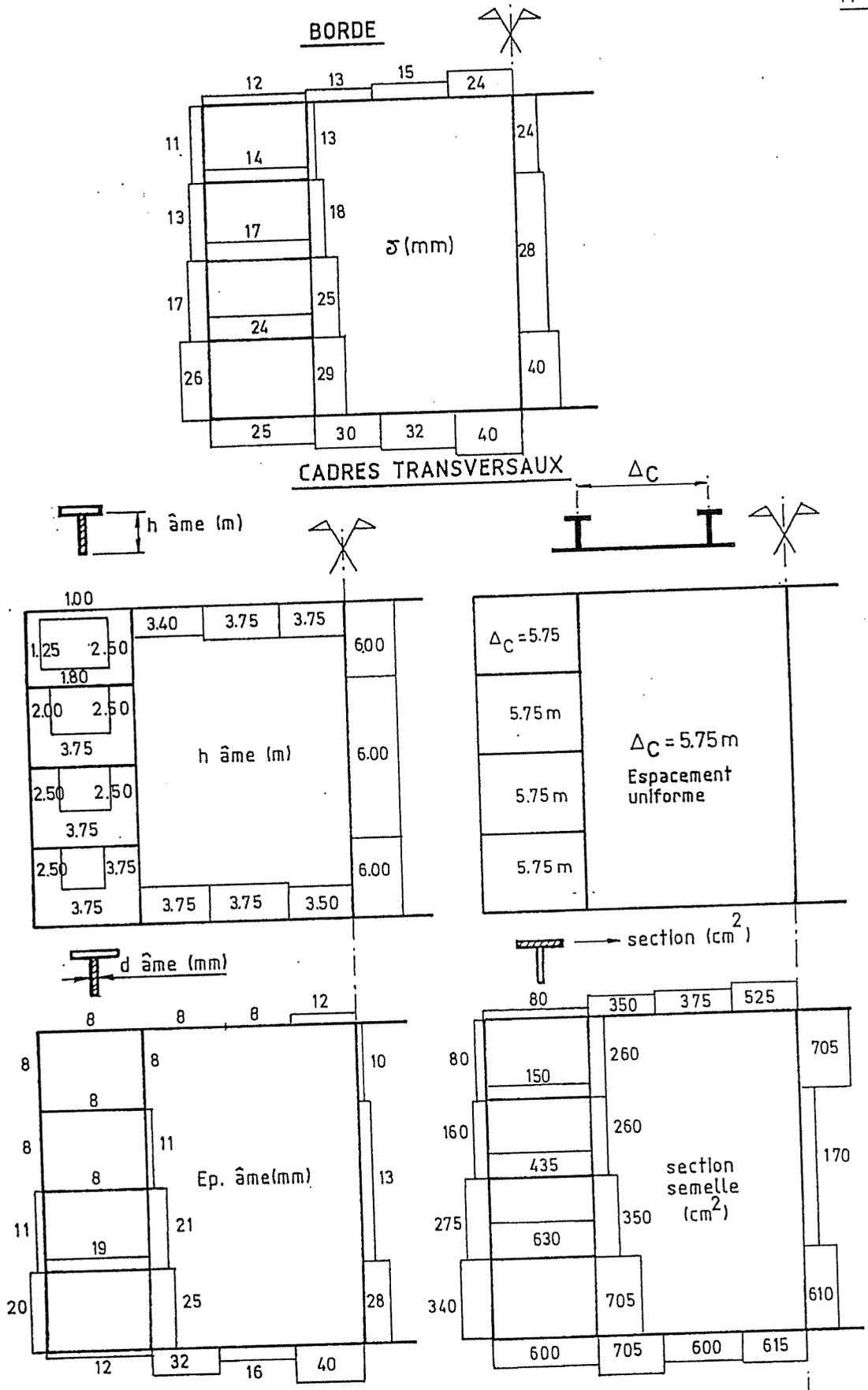


Figure 27.a : Echantillonnage optimal de la barge FSO (optimum coût - $\delta \leq 40$ mm, $\Delta = 5,75$ m), configuration C₁

RAIDISSEURS LONGITUDINAUX

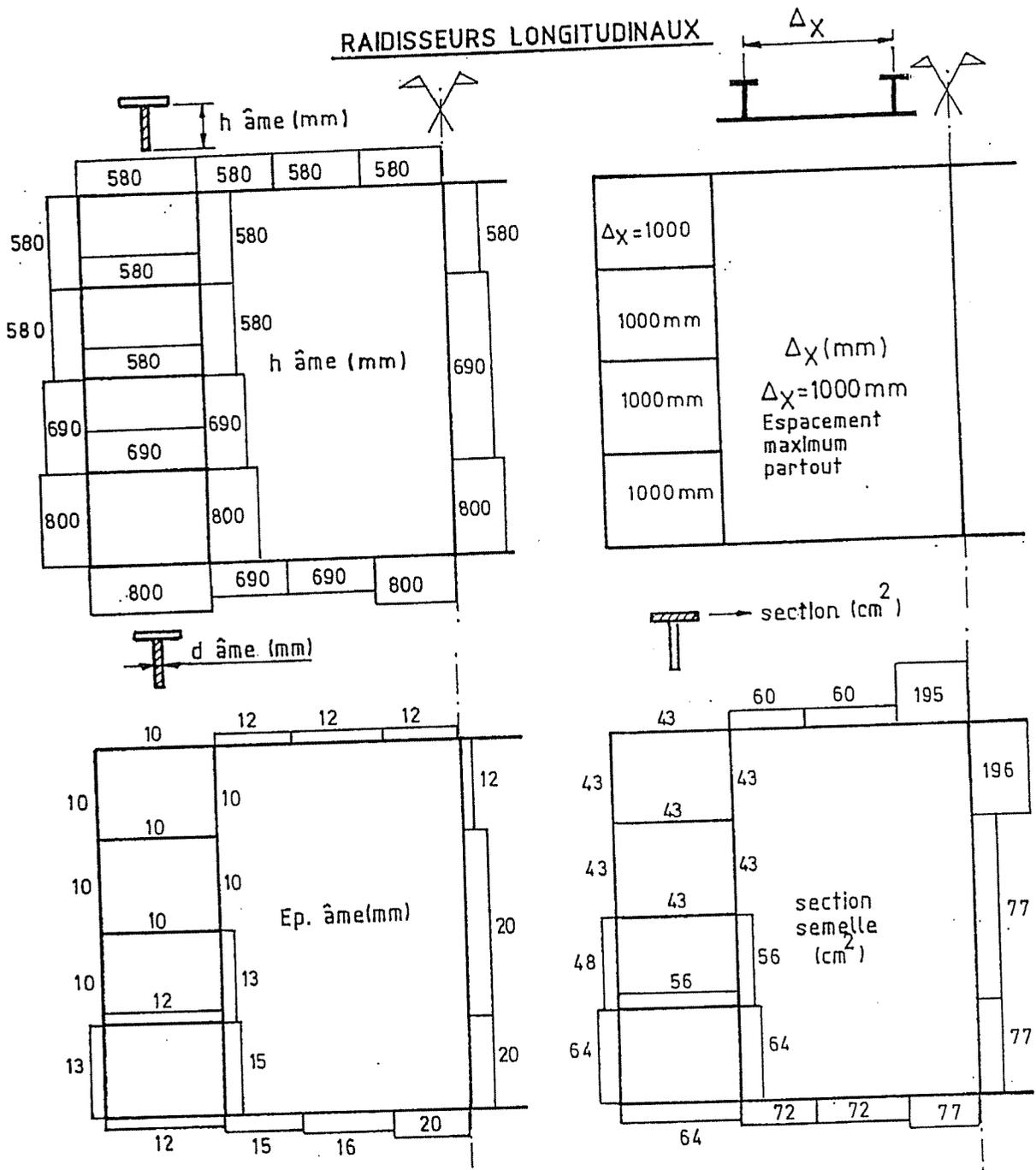


Figure 27.b : Echantillonnage optimal de la barge FSO (optimum coût - $\delta \leq 40$ mm, $\Delta = 5,75$ m), configuration C_1

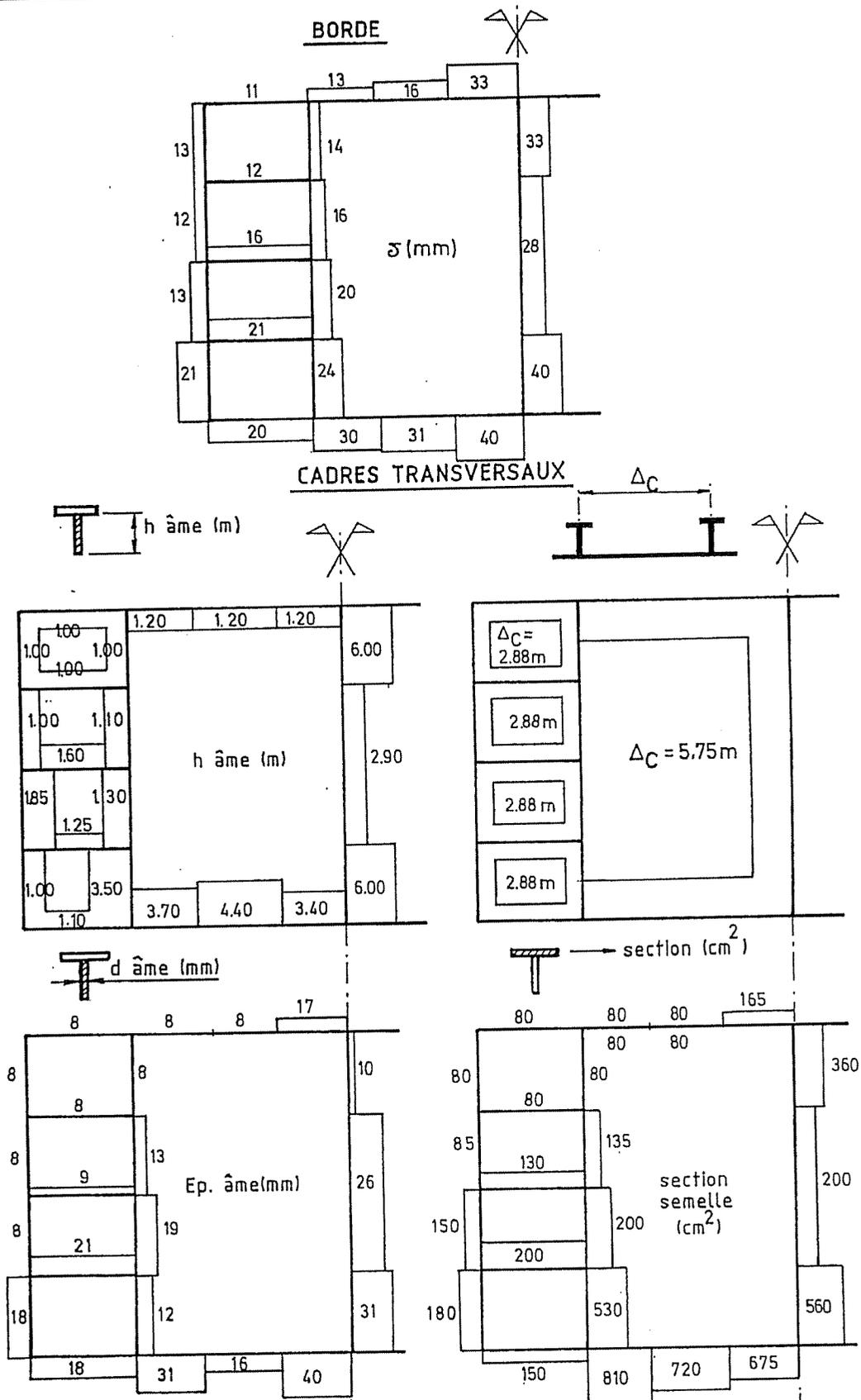


Figure 28.a : Echantillonnage optimal de la barge FSO (optimum poids - $\delta \leq 40$ mm, $\Delta = 5,75$ m et 2,875 m), configuration C₄

RAIDISSEURS LONGITUDINAUX

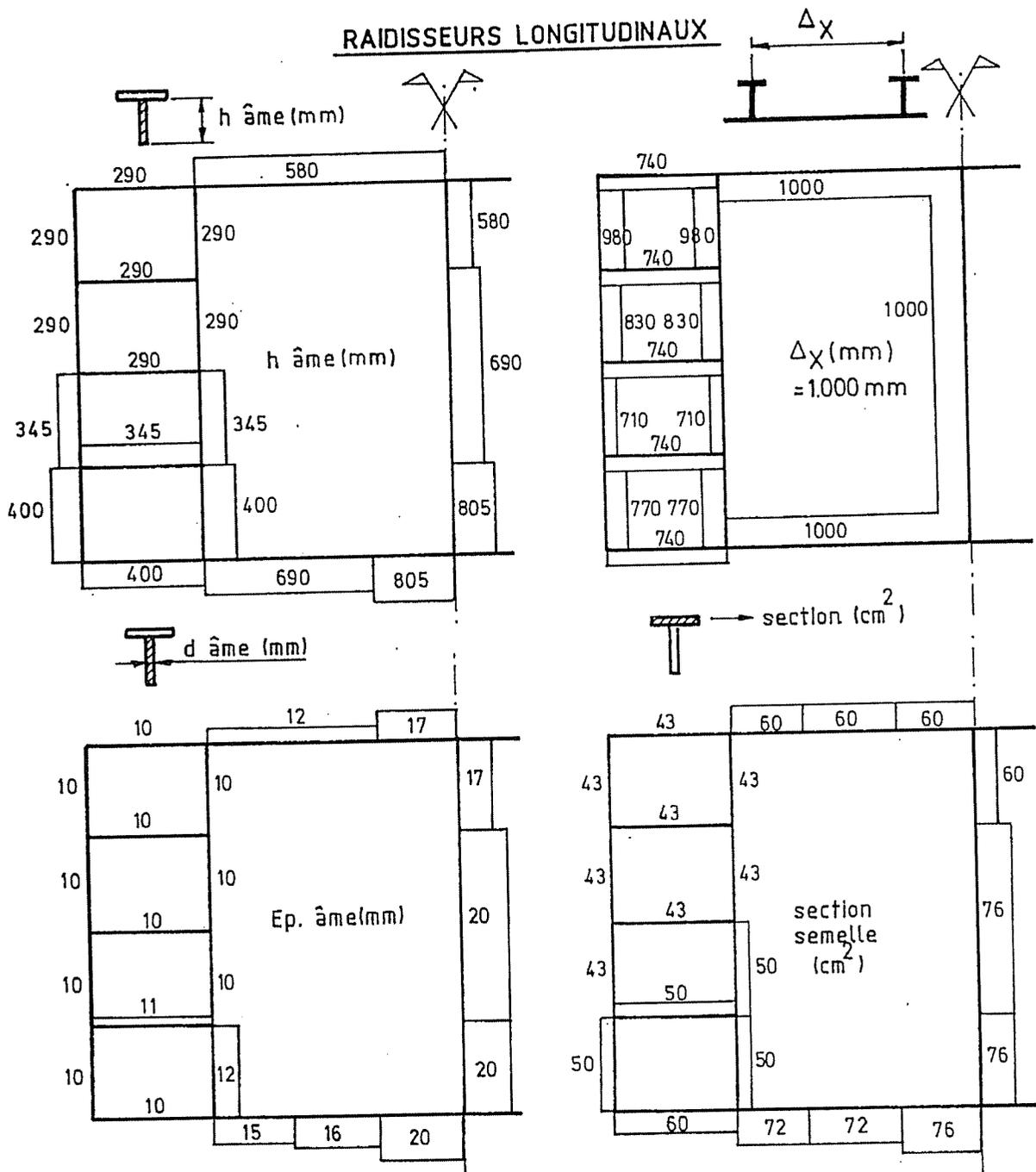


Figure 28.b : Echantillonnage optimal de la barge FSO (optimum poids - $\delta \leq 40$ mm, $\Delta = 5,75$ m et $2,875$ m), configuration C_4

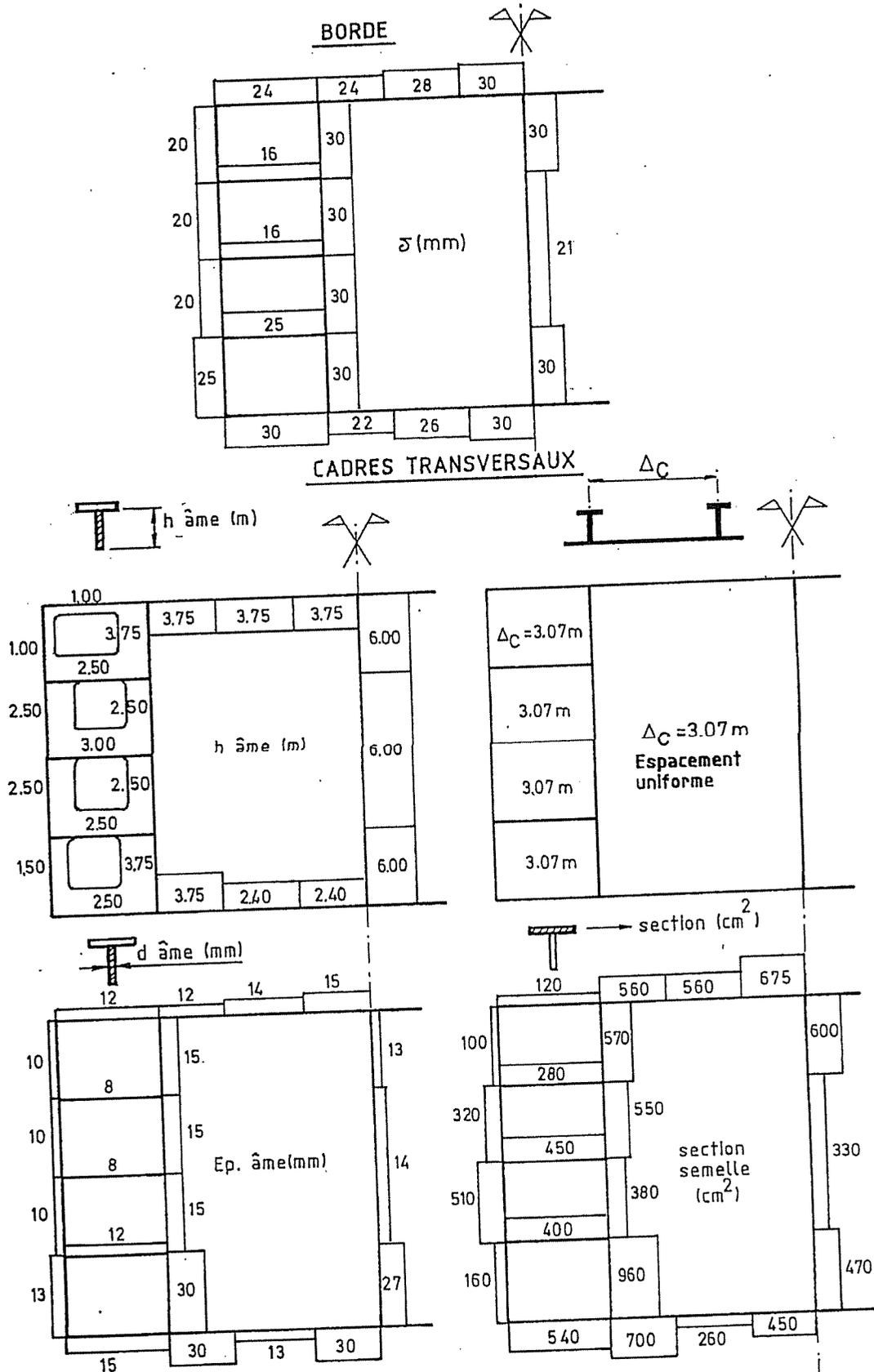


Figure 29.a : Echantillonnage optimal de la barge FSO (optimum coût - $\delta \leq 30$ mm, $\Delta = 3,07$ m), configuration C₅

RAIDISSEURS LONGITUDINAUX

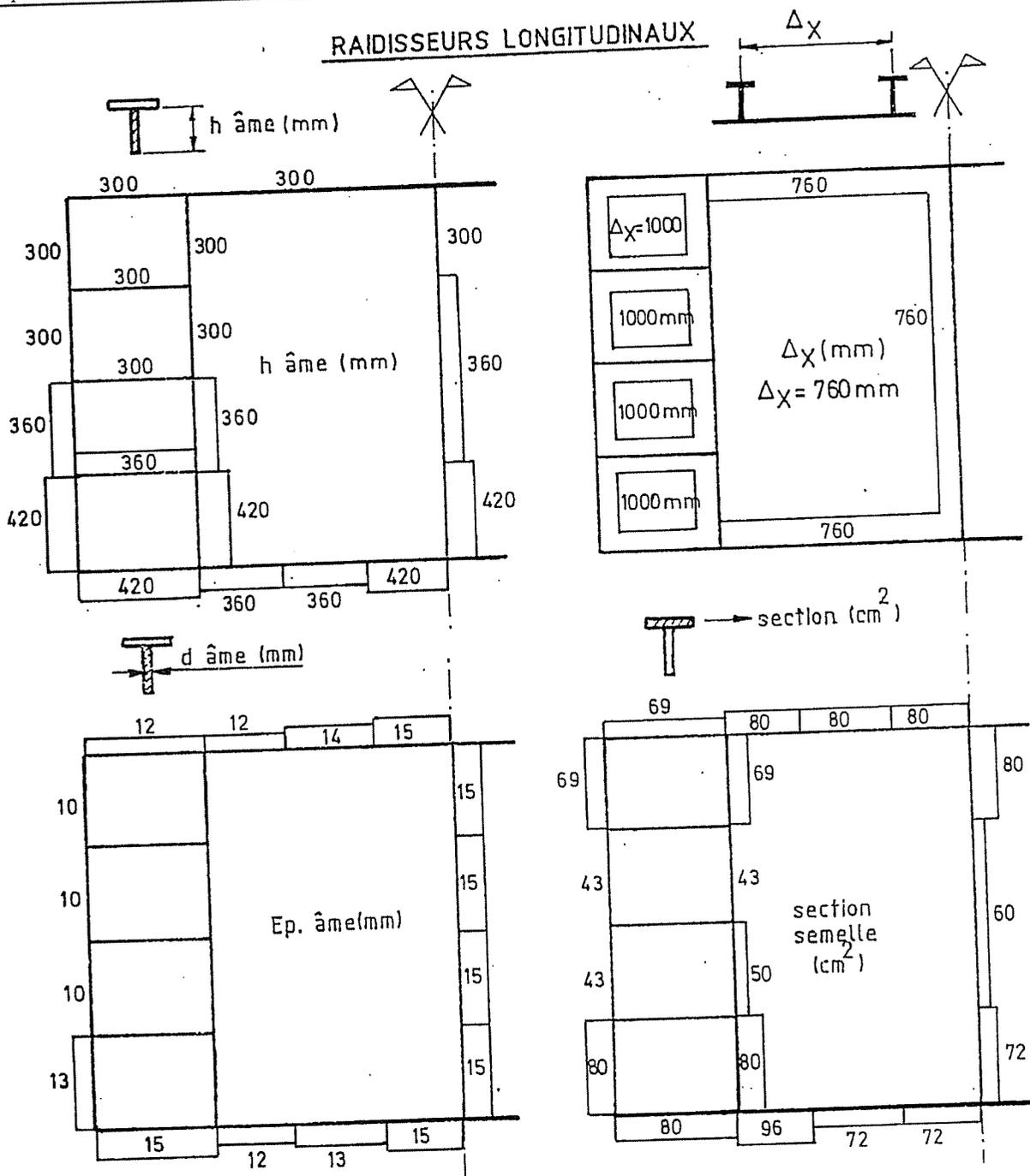
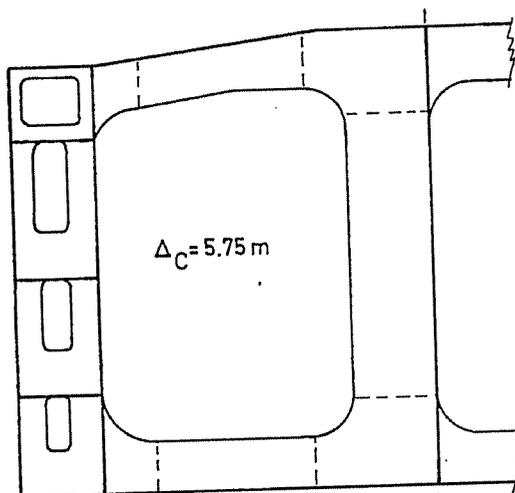
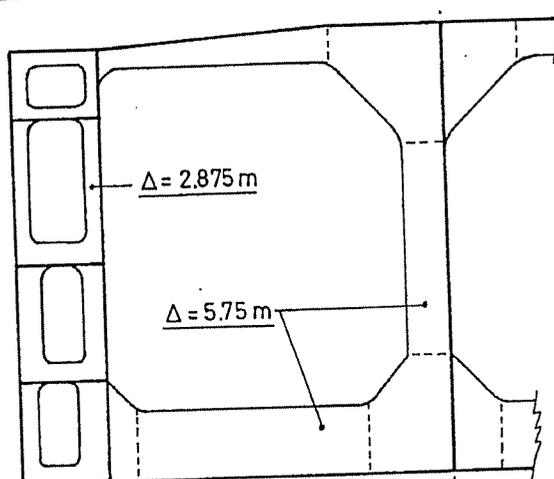


Figure 29.b : Echantillonnage optimal de la barge FSO (optimum coût - $\delta \leq 30$ mm, $\Delta = 3,07$ m), configuration C_5

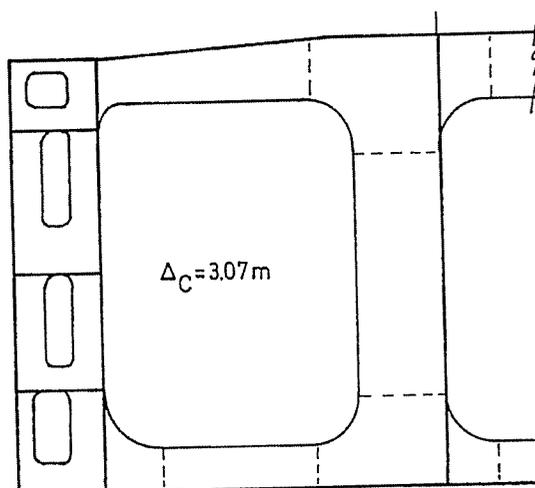
La figure 30 présente 3 conceptions différentes du maître couple résultant des optimisations et de l'uniformisation et la standardisation des renforts ainsi que l'introduction de goussets.



Optimum coût - $\delta \leq 40 \text{ mm}$, $\Delta = 5,75 \text{ m}$, configuration C₁



Optimum poids - $\delta \leq 40 \text{ mm}$, $\Delta_{\text{calles}} = 5,75 \text{ m}$ et $\Delta_{\text{caissons}} = 2,875 \text{ m}$, configuration C₄



Optimum coût - $\delta \leq 30 \text{ mm}$, $\Delta = 3,07 \text{ m}$, configuration C₅

Figure 30: Propositions pour le maître-couple de la barge FSO.

IX 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 en 10 à 15 itérations et cela, quel que soit le nombre de variables de conception (XI) et de restrictions ($C(XI) \leq C_{max}$).

XI REMERCIEMENTS

Le texte présenté à cette conférence est la compilation de 2 articles publiés respectivement par le CTICM (Rigo 2000) et par l'AIPCN (Rigo 1999). A ce titre nous remercions chaleureusement la revue Construction Métallique et l'association Internationale Permanente des Congrès de Navigation.

XI REFERENCES

- o ANAST (1995), Les portes flottantes automotrices - parts 1 et 2, Rapport interne 95-1, Université de Liège, Belgique
- o Buxton I.L (1966), The Design of Tanker Hull Structure by Computer with Particular Reference to one Midship Cargo Tank. Trans. RINA, vol.108, pp.405-419.
- o CONLIN (1989), User's and Installation Manuel (Version 2), LTAS, Université de Liège, Liège, Belgique.
- o Da Ronch C. (1998), 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.
- o Dehousse N.M., Rodriguez S. (1985), 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.
- o Det Norske Veritas (1992), Hull Structural Design Ships with Length 100 meters and Above, Rules for Classification of Ships, Oslo, Norway.
- o Fleury C., Braibant V. (1986), Structural Optimization : A New Dual Method using Mixed Variables, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol.23, pp409-428.
- o Fleury C. (1989), CONLIN, An Efficient Dual Optimizer Based on Convex Approximation Concepts, Structural Optimization, vol 1, pp81-89.
- o Fleury C. (1993), Mathematical Programming Methods for Constrained Optimization: Dual Methods, Chap7 : Structural Optimization: Status and Promise, (M.P. Kamat ed.), serie: Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, vol 150, pp 123-150.
- o Hughes O.F. (1988), Ship Structural Design: A Rationally-Based, Computer-Aided Optimization Approach, Edited by the SNAME, New Jersey, 566p.
- o Hughes O., Nikolaidis E., Ayyub B., White G., Hess P. (1994), Uncertainty in Strength Models for Marine Structures. Ship Structure Committee n°375, U.S. Coast Guard, Washington, USA, 130p.
- o Mansour A.E. (1992), Behaviour of Plates under Combined Loads, ISOPE'92, San Francisco, vol.IV, pp.468-474.
- o Moe J., Lund S. (1968), Cost and Weight Minimization of Structures with Special Emphasis on Longitudinal Strength Members of Tankers, Trans. RINA, vol 110, pp.43-70.
- o Rahman M.K., Caldwell J.B. (1992), Rule-Based Optimization of Midship Structures, International Journal of Marine Structures, vol.5, n° 6, pp467-490.
- o Rigo Ph. (1989a), Utilisation des développements harmoniques aux calculs des ouvrages hydrauliques métalliques, Thèse de Doctorat, Université de Liège, Eds: Collection des Publications de la Faculté des Sciences Appliquées, n°120, 379 p.
- o Rigo Ph. (1989b), Le calcul des structures cylindriques flottantes, Association Technique Maritime et Aéronautique (ATMA), 89ème Session, Paris, pp.323-336.
- o Rigo Ph. (1989c), Le logiciel de calcul et de conception des structures hydrauliques fortement raidies (écluses, barrages mobiles, ...), A.I.P.C.N., Bulletin n°65, 16p.
- o Rigo Ph. (1989d), La méthode des bordages raidis. Calcul des coques cylindriques soumises à une pression hydraulique. Construction métallique du CTICM, n°3, Paris, pp.25-33.
- o Rigo Ph. (1990), Les structures prismatiques orthotropes, Association Internationales des Ponts et Charpentes, Periodica AIPC 1/1990, P-142/90, Zürich, pp13-28.
- o Rigo Ph. (1992a), Stiffened Sheathings of Orthotropic Cylindrical Shells, Journal of Structural Engineering, ASCE, vol 118, n°4, pp926-943.
- o Rigo Ph. (1992b), The Computation of Prismatic Structures, Applied to Naval Architecture, Marine Structures, Elsevier, vol 5, n° 3, pp313-332.
- o Rigo Ph., Marchal et Rodriguez (1996), The Use of Floating Gates for Storm Surge Barrier, Barrages: Engineering Design & Environmental Impacts, Edt. N. Burt & J. Watts, John Wiley & Sons (Publ.), pp421-430.

-
- Rigo Ph. (1998), Développement d'un modèle intégré d'optimisation des structures navales et hydrauliques, Thèse d'Agrégation de l'Enseignement Supérieur, Université de Liège, 378 p.
 - Rigo Ph. (1999), Least Cost Optimum Design of Stiffened Hydraulic and Floating Structures, A.I.P.C.N. Bulletin, n°101, pp33-45
 - Rigo Ph. (2000), Un outil d'optimisation des structures orthotropes intégré à l'avant-projet, Revue Construction Métallique (CTICM), n°2-2000, Paris, pp17-39.
 - Rigo Ph. (2001a), A Module-Oriented Tool for Optimum Design of Stiffened Structures, Marine Structures, Elsevier Science Ltd., vol 14/6, pp611-629
 - Rigo Ph., Fleury C. (2001b), "Scantling Optimization Based on Convex Linearizations and a Dual Approach", Marine Structures, Elsevier Science Ltd. ., vol 14/6, pp631-649
 - Rigo Ph. (2001c), Optimisation of Stiffened Structures, Dept. of Naval Architecture and Marine Engineering, Univ. of Michigan, Ann Arbor, USA, Report n°347, 85p.
 - Rigo Ph. (2001d), Least-Cost Structural Optimization Oriented Preliminary Design, Journal of Ship Production, USA, vol.17/4, pp.202-215
 - Winkle I.E, Baird D. (1986), Towards More Effective Structural Design Through Synthesis and Optimisation of relative Fabrication Costs, Trans. RINA, vol.128, pp.313-336.
 - Yao T, Rigo Ph. et al. (2000), Ultimate Hull Girder Strength (Report of ISSC Committee VI.2), Proc. of 14th ISSC, Ohtsubo & Sumi (ed.), Nagasaki, Japon.

L'OPTIMISATION DES STRUCTURES NAVALES

- minimisation du coût de construction de la coque métallique -

RESUME

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.

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 en 10 à 15 itérations et cela, quel que soit le nombre de variables de conception (XI) et de restrictions ($C(XI) \leq C_{max}$).

Le dimensionnement optimum obtenu correspond au minimum du coût de construction qui est défini comme étant la fonction objectif $F(XI)$.

Les variables de conception (XI), au nombre de 9 pour chaque élément (panneaux raidis), correspondent à l'épaisseur de la tôle du bordage, l'entredistance et les dimensions des renforts longitudinaux (4 variables) ainsi que l'entredistance et les dimensions des cadres transversaux (4 variables). Les éléments sont les panneaux raidis orthotropes qui composent la structure. Il peut s'agir de panneaux de très grande taille.

LBR-5 permet donc :

- la recherche d'un ensemble de N variables de conception : $XI(i)$, $i=1$ à N,
- qui minimise la fonction objectif coût : $\text{MIN } [F(XI)]$,
- qui respecte un groupe de M restrictions : $C_j(XI) \leq C_j(\text{max})$, $j=1, M$.

LBR-5 est conçu selon le concept de l'Optimisation Orientée Modules. Ainsi le modèle LBR-5 est basé sur les 3 modules de base suivants : OPTI – module contenant l'algorithme mathématique d'optimisation; RESTRI – module des restrictions et COUT – module de la fonction objectif coût de construction.

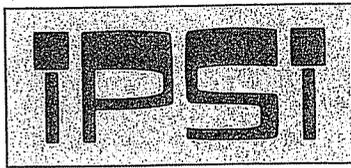
L'algorithme mathématique d'optimisation retenu repose sur une méthode duale couplée avec une linéarisation convexe à savoir CONLIN® (module OPTI). La linéarisation convexe permet de remplacer le problème initial formé d'équations non linéaires implicites par une série de problèmes composés d'équations linéaires et explicites (approche itérative). La linéarisation convexe étant la plus conservatrice elle garantit une convergence dans le domaine admissible. A chaque itération, le problème linéaire explicite et contraint est remplacé par un problème quasi non contraint grâce à l'approche duale (multiplicateurs de Lagrange).

L'analyse élastique de l'ensemble de la structure s'effectue à l'aide du logiciel des bordages raidis (LBR-4). LBR-4 repose sur la résolution analytique des équations différentielles des coques cylindriques orthotropes et les développements en série de Fourier. Son utilisation permet un calcul analytique des sensibilités (dérivées premières des restrictions et de la fonction objectif par rapport aux variables de conception).

Les restrictions (module RESTRI) se décomposent entre les restrictions technologiques, géométriques et structurelles. Une attention particulière est apportée à la résistance ultime des panneaux raidis comprimés et de la résistance ultime de la structure d'ensemble. Pour le choix des restrictions, une banque de restrictions est à la disposition de l'utilisateur. À chaque restriction est associé un code (de 1 à 300). L'utilisateur choisit ainsi facilement les restrictions qu'il souhaite imposer à la structure (contraintes maximales, déformations, résistance ultime, élanement, ...) en associant à chaque élément une série de codes.

Une fonction objectif est nécessaire au processus d'optimisation. Le module COUT, qui permet le calcul direct du coût de construction en fonction des variables de conception, a été retenu et permet d'effectuer une optimisation structurelle sur base des coûts de construction.

Les exemples présentés sont consacrés à l'optimisation d'une porte flottante d'une écluse maritime ainsi qu'à l'étude d'une barge FSO utilisée comme réservoir flottant en vue du transfert du fuel brut vers les pétroliers.



INSTITUT POUR LA PROMOTION DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

TABLE DES MATIERES

Φ²AS / 2002 / Volume XXVI - N° 1

Actes des conférences du jeudi 28 mars 2002

L'OPTIMISATION : DES TECHNIQUES EPROUVEES ?

En guise d'introduction : HISTOIRE(S) DE ... *James Clerk MAXWELL*

- "Optimisation géométrique et topologique en mécanique des structures"
Claude FLEURY, UNIVERSITÉ DE LIEGE et SAMTECH
- "Calcul variationnel associé à des méthodes d'optimisation"
Stéphane PERRIN, CADOE SA & Victor BAO, RENAULT, Département NVH
- "Optimisation multiobjectifs de systèmes dynamiques : application à la conception de suspensions de groupes motopropulseurs de véhicules automobiles en phase d'avant-projet"
Hervé MORVAN, Pascal LEVEL, LAMIH /UNIVERSITE DE VALENCIENNES
Adrien KREIS, Jézaël COLAS, Centre de Recherche PSA, La Garenne Colombes
- "L'optimisation des structures navales : minimisation du coût de construction de la coque métallique"
Philippe RIGO, UNIVERSITE DE LIEGE, ANAST
- "L'optimisation topologique avec Altair OptiStruct. Les contraintes de fabrication. Exemple applicatif sur un support moteur Volkswagen"
Christopher MORTON, ALTAIR Consulting France
- "Optimisation des performances moteur en remplissage / *Optimization of an engine's performance*"
Joost Van de PEER, LMS International
- "Optimisation structurale à Airbus France : des applications industrielles en "flutter + stress" aux recherches en optimisation globale et robuste"
Franck SEIGNEURÉ, AIRBUS France
- Bibliographie conseillée

... / ...