

LA MÉTHODE DES BORDAGES RAIDIS.

CALCUL DES COQUES CYLINDRIQUES SOUMISES À UNE PRESSON HYDRAULIQUE

par Ph. RIGO

1. — LA MÉTHODE DES BORDAGES RAIDIS

Les ouvrages hydrauliques, tels que portes d'écluses, vannes de barrages mobiles, sont des structures simples dans leur principe mais dont le calcul s'est toujours avéré particulièrement délicat. Afin de rendre la tâche plus aisée aux concepteurs et de leur permettre d'optimiser leurs projets, nous avons élaboré une méthode appelée méthode des bordages raidis.

Le domaine d'application de cette méthode est celui des constructions hydrauliques métalliques et des constructions navales. Ainsi en est-il des portes d'écluses (fig. 1), des vannes de barrages mobiles, des barrières marée-tempête, des navires et bateaux (fig. 2), ... Cependant, bien d'autres structures, telles que les tabliers de ponts, rayonnages, toitures en sheds, panneaux métalliques de coffrage, ..., sont également susceptibles d'être étudiées.

Toutes ces structures ont une caractéristique commune; elles possèdent une rigidité d'ensemble fort importante. Il s'agit de structures devant résister à de fortes charges hydrostatiques et d'importantes pressions hydrodynamiques. Ces ouvrages doivent reprendre ces sollicitations sans subir de déformations importantes. En effet, les mécanismes et les étanchéités afférents à ces ouvrages n'autorisent pas de fortes déformations.

Les sollicitations sont relativement uniformes. Par exemple, à un moment donné, dans un même plan horizontal, l'action de l'eau, d'un courant ou de la houle, ... sont identiques.

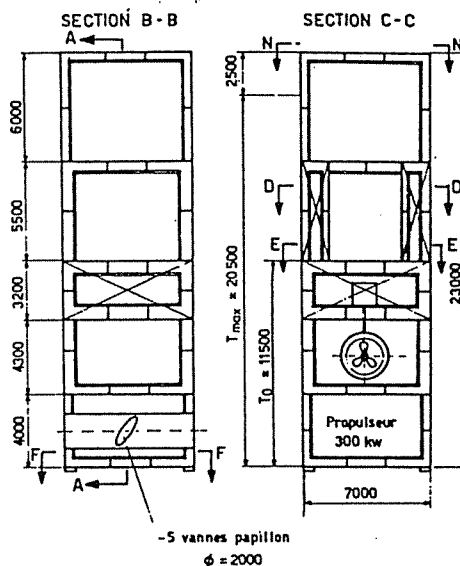


Fig. 1 — Porte d'écluse à déplacement latéral munie de caissons de flottaison

La nécessité d'une forte rigidité d'ensemble et l'uniformité des sollicitations ont conduit les ingénieurs à raidir systématiquement et d'une manière régulière les bordages métalliques constituant les coques de navires, les portes d'écluses, les barrages mobiles, ...

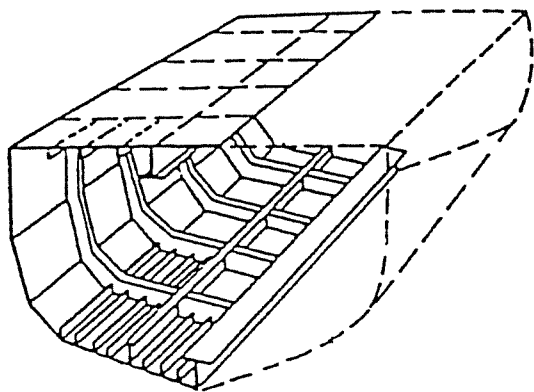


Fig. 2 — Vue transversale d'une coque de navire

Ce raidissage peut être simple, double et même triple. Il n'est pas rare de rencontrer de grosses poutres reliant les appuis de part et d'autre de la structure. Ces poutres appelées *traverses*, représentent l'ossature principale de la structure. Afin de transmettre les charges aux traverses et d'assurer un raidissage transversal, on place couramment des *aiguilles*. Dans bien des cas, on prévoit également des *raidisseurs* soulageant le bordage et transmettant les charges aux dites *aiguilles*. Les figures 3 et 4 sont des exemples de panneaux courbes et plans, raidis respectivement par 2 ou 3 types de nervures. Nombre de structures modernes, constituées de *panneaux orthotropes* sont donc susceptibles d'être étudiées à l'aide de la méthode des bordages raidis.

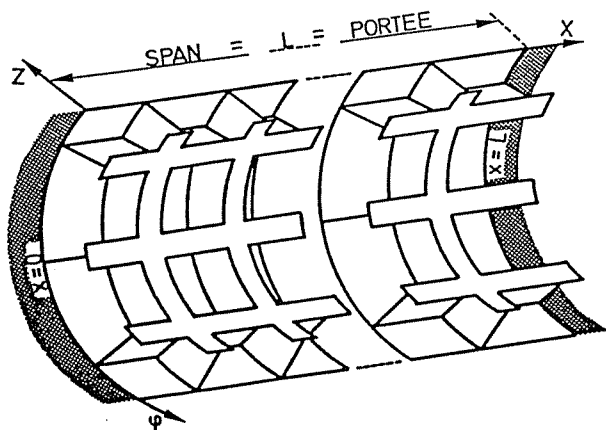


Fig. 3 — Coque orthotrope cylindrique raidie par 2 niveaux de nervures

Depuis toujours l'ingénieur rencontre des difficultés à dimensionner les structures fortement raidies. Par faute d'outil de calcul suffisamment puissant et adapté à ce type d'ouvrage, il s'est trop souvent contenté de méthodes approchées, empiriques ou expérimentales. La conséquence de tels choix, est que bon nombre de structures hydrauliques, de navires et de tabliers de pont sont surdimensionnés afin d'assurer une sécurité suffisante. En fait, cette sécurité est obtenue au détriment du coût et de l'esthétique de l'ouvrage.

On comprend donc qu'une technique de calcul spécifique aux constructions hydrauliques soit attendue depuis longtemps par les ingénieurs. Cette méthode, nous la proposons sous la forme du logiciel des bordages raidis, L.B.R.-3.

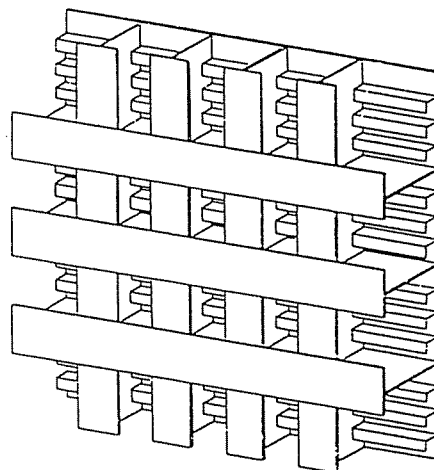


Fig. 4 — Plaque orthotrope raidie par des traverses, des aiguilles et des raidisseurs

2. — FONDEMENTS THÉORIQUES DE LA MÉTHODE DES BORDAGES RAIDIS

Cette méthode de calcul des plaques et des coques cylindriques orthotropes (fig. 3 et 4) allie à la simplicité et la rapidité une grande précision de résultats. La précision étant garantie par une résolution analytique des équations différentielles de base des coques cylindriques d'épaisseur constante. Les équations différentielles de base (réf. 1) sont issues de la méthode de Donnell, von Karman et Jenkins (D.K.J.).

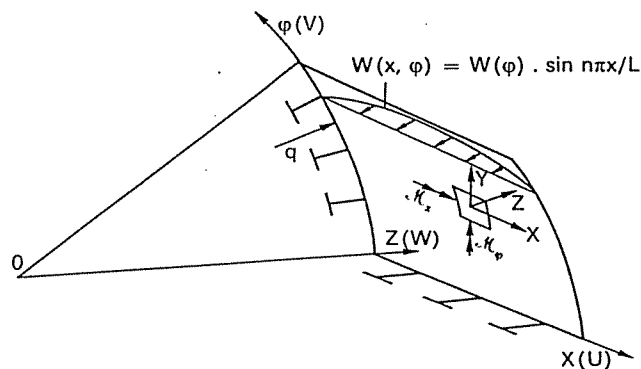


Fig. 5 — Coque cylindrique raidie

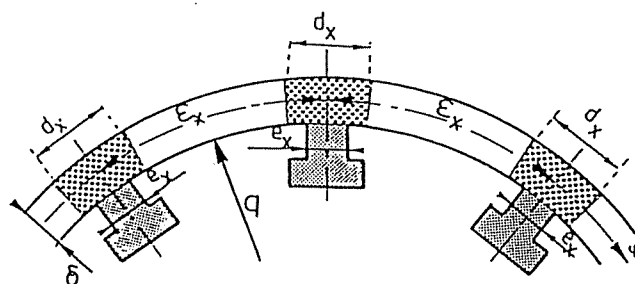


Fig. 6 — Éléments de raidissage longitudinaux

L'élément de base est la coque cylindrique et le système de coordonnées dont on fait usage est représenté figure 5. L'axe des X est orienté selon les génératrices du cylindre et l'axe des φ selon la circonférence. A chaque axe est associé un déplacement, u selon OX , v selon l'axe des φ et w selon OZ . L'épaisseur de la coque est δ , L sa longueur et q son rayon; ce dernier tendant vers l'infini dans le cas d'une plaque. C'est la surface moyenne de l'élément qui reçoit la charge extérieure (fig. 5) et celle-ci peut être subdivisée comme ceci : X , Y , Z les pressions spécifiques en N/m^2 et u_x, u_φ, u_z les moments spécifiques en $N \cdot m/m^2$.

Cet élément de référence est compris entre les surfaces d'intrados et d'extrados de la coque; il est raidi par des nervures longitudinales et transversales, respectivement espacées de ϵ_x et ϵ_φ (fig. 6). A cet élément on associe les efforts unitaires et les moments unitaires calculés par rapport à la surface moyenne (fig. 7). On les nomme $N_x, N_\varphi, N_{x\varphi}, N_{\varphi x}, Q_x, Q_\varphi, M_x, M_\varphi, M_{x\varphi}$ et $M_{\varphi x}$; à titre d'exemple voici les expressions de $N_x(1)$ et $N_x(2)$ (cf. § 2,2).

$$N_x = (D/q) \cdot (u'q + v\omega + w) + f(\varphi)(E/d_x) \cdot (u'\omega_x - w''h_x) \quad (1)$$

$$M_x = (K/q^2) \cdot (q^2 w'' + v\omega\omega) - f(\varphi)(E/d_x) \cdot (u'h_x - w''I_x) \quad (2)$$

avec : $w^\omega = dw/d\varphi$, $w' = dw/dx$, $w^\omega = d^2 w/dx \cdot d\varphi$, ...

$$D = E\delta/(1 - \nu^2) \text{ et } K = E\delta^3/(1 - \nu^2) \cdot 12$$

ω_x la surface de la section des raidisseurs sous la coque

h_x le moment statique de ω_x calculé par rapport à la surface médiane

I_x le moment d'inertie des ω_x par rapport à la surface médiane

d_x la largeur maximale des nervures (fig. 6)

$f(\varphi)$ une fonction dite de Heaviside valant 1 au droit des raidisseurs, sinon 0 (fig. 8) (cf. § 2,1).

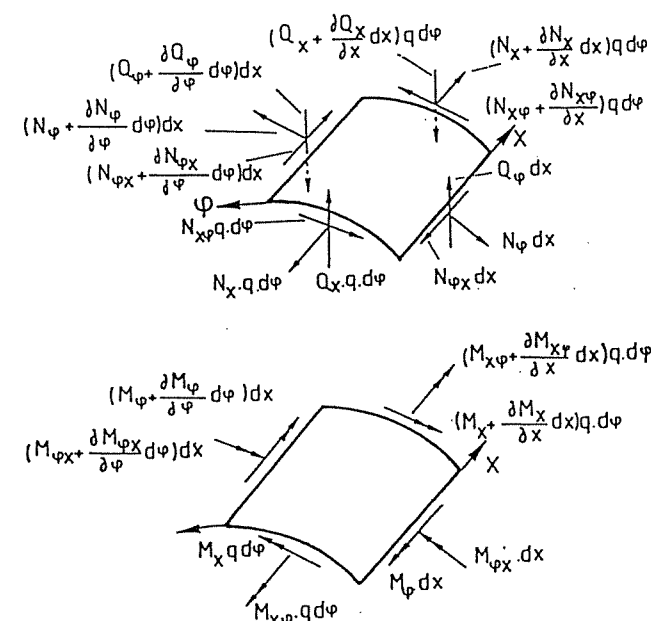


Fig. 7 — Forces et moments unitaires

2.1. — Détermination des fonctions $f(x)$ et $f(\varphi)$

Les fonctions $f(\varphi)$ et $f(x)$ sont des fonctions composées de fonctions de Heaviside (réf. 2) et elles permettent d'obtenir des fonctions (fig. 8) parfaitement compatibles avec la géométrie du système (fig. 6). Ces fonctions sont égales à l'unité mais s'annulent en dehors des zones d_x et d_φ où les nervures agissent (fig. 6 et 8). La fonction de Heaviside de référence est :

$$H(x) = 1 \text{ si } x > 0 \text{ et } H(x) = 0 \text{ si } x < 0 \quad (3)$$

En faisant usage de cette fonction, on définit les fonctions $f(x)$ et $f(\varphi)$ représentées à la figure 8 :

$$f(x) = \sum_{k=0}^m \{ H[x - (b + k\epsilon_\varphi - 0,5d_\varphi)] - H[x - (b + k\epsilon_\varphi + 0,5d_\varphi)] \} \quad (4)$$

$$f(\varphi) = \sum_{k=0}^n \{ H[q\varphi - (b' + k\epsilon_x - 0,5d_x)] - H[q\varphi - (b' + k\epsilon_x + 0,5d_x)] \} \quad (5)$$

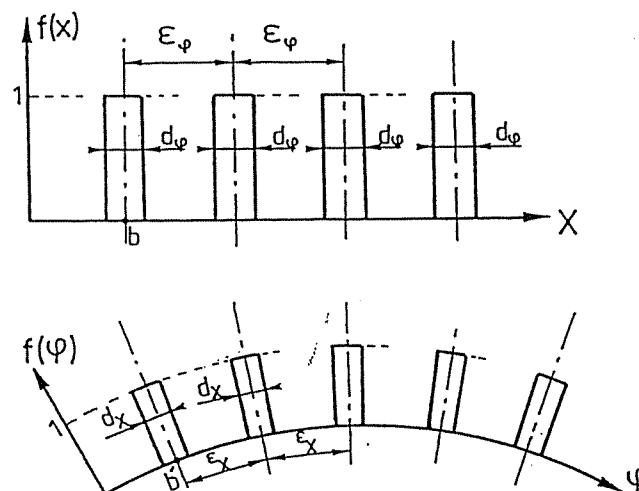


Fig. 8 — Allures des fonctions $f(x)$ et $f(\varphi)$ permettant de tenir compte exactement de la position des diverses nervures

2.2. — Calcul des forces et moments unitaires

Pour écrire les expressions des efforts et moments unitaires (fig. 7) en fonction des seuls déplacements u , v et w , avec D et K les constantes des équations (1) et (2), on procède de la manière suivante.

Dans l'hypothèse de raidisseurs longitudinaux (selon ox), l'équilibre de l'élément de coque compris entre les surfaces intrados et extrados à la coque nous conduit à des relations telles que :

$$N_x = \int_{-\frac{\delta}{2}}^{+\frac{\delta}{2}} \sigma_x \left(1 + \frac{z}{q} \right) dz + f(\varphi) \int_{\omega_x} \sigma_x \frac{e_x}{d_x} dz \quad (6)$$

et :

$$M_x = - \left[\int_{-\frac{\delta}{2}}^{+\frac{\delta}{2}} \sigma_x \left(1 + \frac{z}{q} \right) z dz + f(\varphi) \int_{\omega_x} \sigma_x z \frac{e_x}{d_x} dz \right] \quad (7)$$

avec : e_x la largeur d'un raidisseur (âme)

d_x la largeur maximale d'un raidisseur (semelle)

ω_x la surface du raidisseur

$f(\varphi)$ une fonction dite de Heaviside (5).

Après intégration des relations (6) et (7) et compte tenu des relations classiques contraintes (σ_x , σ_φ , $\tau_{x\varphi}$)-déformations (u , v , w), on obtient les relations (1) et (2) mentionnées ci-dessus.

Il est aisé de recommencer ce raisonnement pour les autres forces et moments unitaires ainsi que pour le cas de nervures circonférentielles (selon $o\varphi$).

2.3. — Principe de résolution

Les hypothèses émises sont les suivantes :

- le domaine de validité des développements est le régime élastique linéaire,
- on doit admettre les simplifications conduisant à la méthode D.K.J.

A savoir :

- une coque mince (épaisseur $\ll \ll$ rayon)
- de faibles déformations
- et les hypothèses dites de Love-Kirchhoff.

Les problèmes de stabilité ne sont pas abordés et doivent être vus séparément.

L'analyse du problème débute par l'écriture des 6 équations d'équilibre (forces et moments) relatives à un élément de coque cylindrique (fig. 7). Dans ces équations interviennent les forces et moments unitaires (fig. 7) ainsi que les charges extérieures (fig. 5).

Après remplacement dans ces équations d'équilibre des expressions des forces et moments unitaires, par exemple (1) et (2), on obtient un système de 3 équations différentielles en u , v et w qui peut s'écrire comme ceci (réf. 3) :

$$a_1 u + b_1 v + c_1 w + X = 0 \quad (9)$$

$$a_2 u + b_2 v + c_2 w + Y = 0 \quad (10)$$

$$a_3 u + b_3 v + c_3 w + \mathcal{M}_{x/q} - \mathcal{M}_\varphi = Z \quad (11)$$

où les $a_1 \dots c_3$ sont des opérateurs et X , Y , Z , ... les charges extérieures.

En vue de résoudre ce système, on obtient après élimination des u et v , une équation différentielle (12) en w du 8^e ordre à 2 variables, x et φ :

$$A.w'''' + B.w'''' + C.w'''' + D.w'''' + E.w'''' + F.w'''' + G.w'''' + I.w'''' + J.w'''' + K.w'''' = 0 \quad (12)$$

Les coefficients A , B , C , ..., J et K sont des constantes connues dépendant uniquement des caractéristiques géométriques de la coque (q , δ , ...) et des nervures ainsi que des propriétés mécaniques du matériau (E et ν).

Mais afin d'obtenir une équation à variables séparées, on est astreint à poser :

$$w(x, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} w(q) \sin(n\pi x/L)$$

avec L la longueur de la coque selon OX (13)

Ce qui se traduit pour le terme n du développement en série par (14) à (16) :

$$w = w(x, \varphi) = w(\varphi) \sin(n\pi x/L) \quad (14)$$

$$v = v(x, \varphi) = v(\varphi) \sin(n\pi x/L) \quad (15)$$

$$u = u(x, \varphi) = u(\varphi) \cos(n\pi x/L) \quad (16)$$

La conséquence principale du choix des relations (14) à (16) est qu'il faut décomposer toutes les charges en série de Fourier. De plus, en vertu du principe de superposition, on peut admettre que les charges extérieures réparties (X , Y , ...) peuvent se décomposer en un ensemble de lignes de forces et de moments concentrés agissant le long de lignes d'équation $\varphi = \text{constante}$. La déformée de la coque due aux charges réparties s'obtient en intégrant la déformée due aux lignes de charges concentrées.

Cela a pour conséquence que les charges extérieures interviennent dans la résolution de l'équation différentielle (12) uniquement lors de la détermination des 8 constantes d'intégration. Ces 8 constantes sont en effet déterminées en fonction des conditions d'extrémités et des lignes de charges concentrées.

2.4. — Les types de développements en série de Fourier

Le développement le plus simple est celui d'une charge uniforme selon OX comme l'est la pression hydrostatique Z . La figure 9 montre l'allure des 3 premiers termes de la série, pris séparément mais aussi lorsqu'ils s'additionnent. On y observe qu'un développement en série de Fourier avec les 3 premiers termes est déjà satisfaisant.

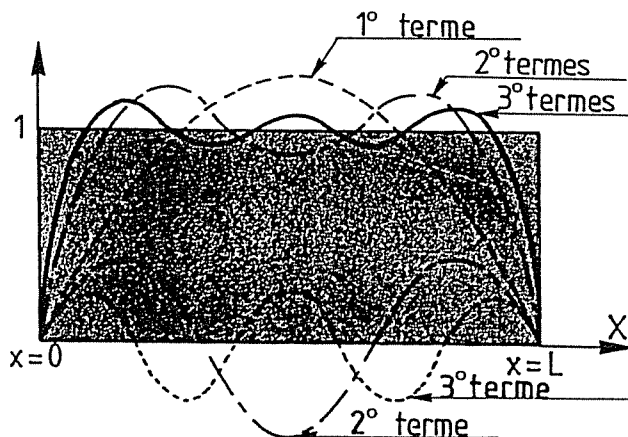


Fig. 9 — Développement en série de Fourier d'une charge uniforme unitaire

Des charges extérieures (fig. 10) couramment utilisées sont les forces de bord N_b et des moments de bord M_b . Ces charges agissent le long des bords d'extrémités $x = 0$ et $x = L$ de chaque élément de coques ou de plaques. Ces forces N_b et moments M_b sont appelés « effets de bords ». Ils permettent d'étudier des structures bi-appuyées, bi-encastées ou encore sur appuis élastiques (réf. 4). Ainsi, ils vont permettre de simuler par exemple, les forces et moments que transmettent les bras aux extrémités d'une vanne segment de barrage mobile (fig. 11).

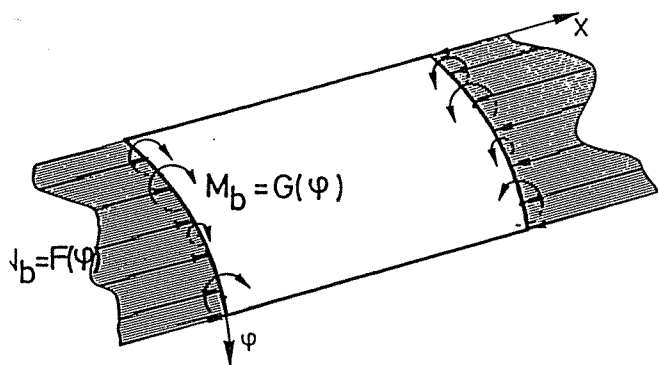


Fig. 10 — Forces de bord N_b et moments de bord M_b

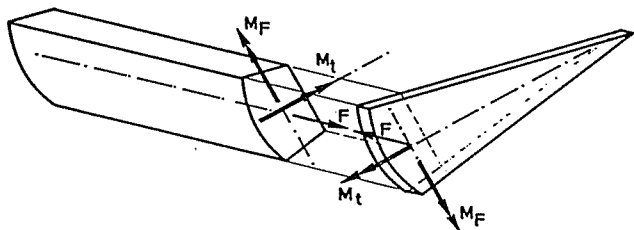


Fig. 11 — Forces et moments de liaisons entre la vanne et les bras

3. — L.B.R.-3, LE LOGICIEL DE CALCUL BASE SUR LA MÉTHODE DES BORDAGES RAIDIS

Ce logiciel allie de nombreux avantages, simplicité, rapidité, résultats précis et variés (contraintes, efforts, moments et déplacements) et une accessibilité à tous.

Néanmoins, à l'instar de toutes les méthodes spécifiques, L.B.R.-3 n'est applicable que dans son domaine. A savoir le régime élastique des coques minces pour de faibles déformations; les problèmes d'instabilité devant être abordés séparément.

Le champ d'application de L.B.R.-3 peut être décrit comme suit : toute structure possédant un axe selon lequel elle est développée. A titre d'exemple, un cylindre correspond au développement d'un cercle le long d'une génératrice. Ainsi, les portes d'écluses, les tabliers de ponts, les coques de navires, ... sont également des structures possédant un axe privilégié selon lequel elles sont développées.

Détaillons les caractéristiques du logiciel L.B.R.-3.

L'exactitude de la solution obtenue est garantie par le principe de la méthode. A chaque élément de plaque ou de

coque orthotrope correspond un système de 3 équations différentielles qui est résolu analytiquement. Il n'y a donc aucune hypothèse ou simplification, la solution obtenue est donc toujours parfaitement exacte dans le cadre du champ de validité de la méthode. Le principe de la résolution de ces équations différentielles est basé sur le développement en série de Fourier des charges et des déplacements.

La simplicité et la rapidité du logiciel L.B.R.-3 trouvent leur origine dans le principe même de la méthode utilisée. Ainsi, prenons l'exemple de la coque orthotrope de la figure 3. Via les éléments finis, 250 éléments seront nécessaires. Par contre, avec L.B.R.-3, cette coque est traitée comme un seul élément pour lequel on tient compte également de la position et de la géométrie de toutes les nervures.

Il est également possible de discrétiser chaque raidisseur en sous-éléments. Ainsi, à l'image de la méthode des bandes finies, on peut assimiler la semelle et l'âme d'une cornière à 2 éléments plaques ayant un bord commun.

L'accessibilité à tous est une question fondamentale pour qu'un logiciel puisse être exploité par un non-spécialiste. Pour un familier d'un logiciel, le domaine d'utilisation, les avantages, les restrictions, la discrétisation optimale, ... sont des données de base avec lesquelles il est habitué à travailler.

Afin que cette méthode soit accessible à un utilisateur néophyte, il suffit d'une formation très réduite pour tirer le meilleur parti de cette méthode. Nous définirons ce problème comme étant celui de « l'accessibilité » à la méthode.

On peut sans aucun doute classer la Méthode des Bordages Raidis dans la catégorie des méthodes ayant la meilleure accessibilité (réf. 4). En effet, les données nécessaires sont peu nombreuses, simples à déterminer et, de plus, fort systématiques.

Les données à fournir sont :

Données générales :

- NEL = le nombre d'éléments de coques ou de plaques
- JLPH = le nombre de termes de la série de Fourier
- IMPR = paramètre relatif à des impressions intermédiaires
- DESSIN = paramètre relatif à la sortie graphique des résultats
- DIS(5) = paramètres relatifs aux résultats souhaités
- E,ETA = module de Young et coefficient de Poisson
- WIDTH = longueur de la structure

Données par élément :

- TYPE = « coque » ou « plaque » selon qu'il s'agit d'une coque ou d'une plaque
- HIGHT = la hauteur de la plaque (si TYPE = « plaque »)
- Q,PHIL = le rayon et l'angle d'ouverture de la coque (si TYPE = « coque »)
- DELTA = l'épaisseur du bordage
- EPSA = entredistance entre aiguilles
- EPSR = entredistance entre raidisseurs
- MT = nombre de traverses
- HYR, TYR, WYR, DYR = hauteur et épaisseur de l'âme et largeur et épaisseur des semelles des aiguilles
- HXR, TXR, WXR, DXR = hauteur et épaisseur de l'âme et largeur et épaisseur des semelles des raidisseurs

- IVARIA, XI, XF = paramètres relatifs à la sollicitation
- NOH(10) = paramètres fixant les liaisons entre cet élément et les autres.

Données par traverse :

- ABTR, HXTR, TXTR, WXTR, DXTR = position de la traverse, hauteur et épaisseur de l'âme et largeur et épaisseur des semelles

Données pour les éléments ayant des conditions d'appuis particulières :

- COND(2) = le numéro de l'élément et le code correspondant au type d'appui (ex : 1 si appui simple).

N.B. : Chaque tiret (—) correspond à une nouvelle ligne de données.

En ce qui concerne la discrétisation, qui constitue souvent le point nécessitant le plus de formation de la part de l'utilisateur, elle est pour la Méthode des Bordages Raidis fort simple et de plus évidente car elle se fait naturellement en fonction de l'unique géométrie de la structure. Dans la méthode des éléments finis se pose le choix de l'élément à utiliser, et ensuite de la discrétisation (réf. 5); un maillage plus fin n'étant pas forcément synonyme de résultats meilleurs.

Par contre, dans R.B.R.-3, la solution étant obtenue analytiquement, subdiviser un élément en deux n'est d'aucune utilité. En effet, la solution restera la même et seul le temps de calcul sera inutilement accru. Pratiquement, il suffit donc de discrétiser la structure comme un ensemble de plaques et de coques cylindriques dont les dimensions relatives n'ont pas d'importance. Seul le paramètre fixant le nombre de termes de la série de Fourier nécessite un peu d'expérience de manière à pouvoir fixer le niveau de précision souhaité pour les résultats. Plus ce nombre croît, plus la précision augmente mais aussi le coût; de plus, un accroissement exagéré du nombre de termes n'apporte pratiquement plus aucune amélioration et risque au contraire de poser des problèmes numériques. Un choix similaire existe au niveau des éléments finis lorsque l'utilisateur doit fixer le degré des champs relatifs à l'élément choisi. Ce choix nécessite aussi une expérience si l'on veut opter pour une solution économique. Il est toujours possible, pour les deux méthodes précitées, de choisir un degré de champ ou un nombre de termes très élevé, cela conduit à la solution mais à un prix injustifiable.

Les résultats sont fournis pour chaque élément de coques ou de plaques en 155 points de coordonnées (x, φ) avec $x = x_i$ ($i = 1, 5$) et $\varphi = \varphi_j$ ($j = 1, 31$). En chacun de ces points, L.B.R.-3 donne les déplacements (u, v, w) et les contraintes agissant dans le bordage mais aussi dans les nervures aux jonctions âme-semelle et âme-bordage ainsi que dans la semelle.

En pratique. Ce qu'il faut connaître en pratique pour utiliser la Méthode des Bordages Raidis est résumé dans ce paragraphe.

L.B.R.-3 a été développé en FORTRAN 77 et peut être implanté aussi bien sur un *mainframe* que sur un micro ordinateur. Le programme contient environ 6000 instructions, nécessite pour des structures courantes 1 à 2 Mégaoctets de mémoire centrale et une capacité équivalente sur des unités périphériques pour le stockage des résultats intermédiaires.

Pour les charges uniformes comme la pression hydrostatique, un seul terme constitue une bonne approximation au point de vue des déplacements; pour les contraintes, 7 termes sont un idéal mais 3 termes peuvent être considérés comme un optimum.

Lorsque des efforts de bords interviennent, suite par exemple à l'encastrement des extrémités, 3 termes sont un

minimum et il est préférable de choisir 7 comme optimum. Pour que la précision soit significativement meilleure, il faut dépasser 25 termes, ce qui n'est pas économiquement souhaitable.

En conclusion, si ce n'est le choix du nombre de termes de la série, les données sont simples et il ne se pose aucun problème pour discrétiser la structure. Les résultats sont clairs, directement utilisables et exacts compte tenu bien sûr, du développement en série utilisé.

4. — ÉTUDE D'UN PONT CANAL

Nous avons choisi de présenter l'étude d'un pont-canal au travers de laquelle, nous allons montrer la puissance et la facilité d'utilisation du logiciel des bordages raidis, L.B.R.-3.

Il s'agit d'un pont canal pour bateau de 1350 t dont les caractéristiques principales sont : 360 m de long (travée de 20 m), 50,85 m de large et de 4,5 m de tirant d'eau.

A partir des dimensions établies par L. G. Cajot (réf. 6), nous présentons la vérification du calcul de la travée bi-appuyée. Nous étudierons également la travée bi-encastree ainsi que l'influence du nombre de termes de la série de Fourier sur la précision des résultats.

4.1. — Étude de la travée bi-appuyée

La portée, compte tenu du joint et de l'épaisseur des chevêtres est de 18,5 m et la section transversale est représentée figure 12. La charge principale est celle due à la poussée de l'eau, $h = 4,5$ m.

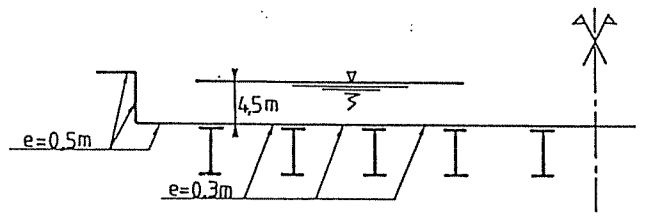


Fig. 12 — Coupe transversale dans une travée du pont canal

Vu la symétrie du pont canal ainsi que de la charge, nous n'avons étudié que la moitié de la structure. Sans entrer dans trop de détails, nous signalons que les armatures ont été prises en compte dans le logiciel par l'intermédiaire de surfaces équivalentes. Le poids propre a également été inséré dans le cas de charge.

La discrétisation effectuée en vue du calcul de cette demi-structure est la suivante : 2 panneaux de type *plaque lisse* pour représenter le bajeoy, 1 panneau de même type pour représenter la partie du tablier d'épaisseur 50 cm et 1 panneau du type *plaque raidie* par 5 traverses pour représenter le reste du tablier. La discrétisation est donc extrêmement simple et aisée à réaliser, 4 panneaux dont un seul raidi; la résolution de ce problème à l'aide du logiciel est de ce fait très rapide, 43 lignes de données et seulement 7,3 secondes CPU un IBM 4381.

Ces données extrêmement réduites et ces faibles temps de calcul renforcent l'intérêt qu'il y a d'utiliser le logiciel L.B.R.-3

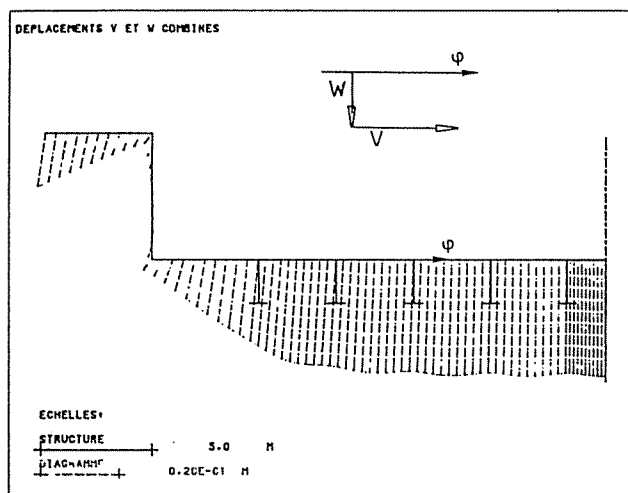


Fig. 13 — Travée sur appuis simples, déplacements w et v combinés dans la section transversale à mi-portée

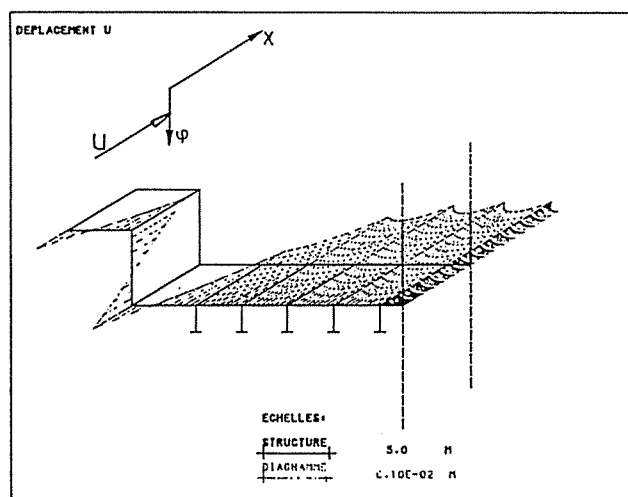


Fig. 14 — Travée sur appuis simples, déplacements longitudinaux u dans la section d'extrémité $x = 0$

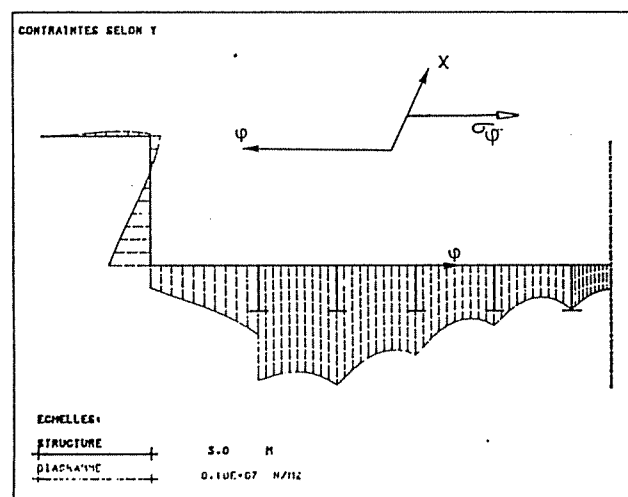


Fig. 15 — Travée sur appuis simples, contraintes transversales σ_ϕ à mi-portée

pour le calcul de telles structures, d'autant que le logiciel fournit des résultats nombreux, diversifiés et fiables. Ainsi, la discrétisation, l'entrée des données, la résolution par ordinateur et l'analyse des résultats peuvent être réalisés pour l'exemple cité, en 8 heures. Cette méthode raccourcit donc considérablement le temps nécessaire à de telles études et voit s'ouvrir à elle la voie de la conception assistée par ordinateur.

Les figures 13 à 16 donnent les déplacements et contraintes dans la section transversale de bord ($x = 0$) ainsi que celle à mi-portée ($x = L/2$). On y décèle parfaitement l'effet dû à chaque traverse. La précision et la densité des résultats fournis permettent au concepteur de juger rapidement des modifications à apporter en vue d'améliorer le comportement de la structure.

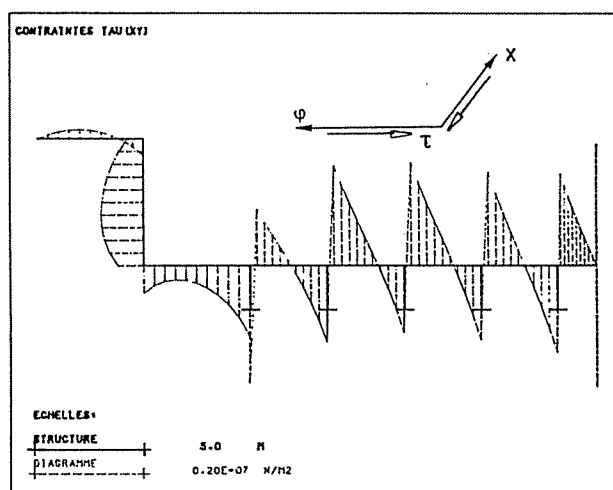


Fig. 16 — Travée sur appuis simples, contraintes $\tau_{x\phi}$ dans la section d'extrémité $x = 0$

4.2. — Influence du nombre de termes de la série de Fourier

Afin de comparer la solution de la travée bi-appuyée avec celle bi-encastée, nous avons reporté pour la section à mi-portée, les variations transversales des contraintes longitudinales (fig. 17). Nous avons, de plus, reporté ces valeurs pour différents nombres de termes.

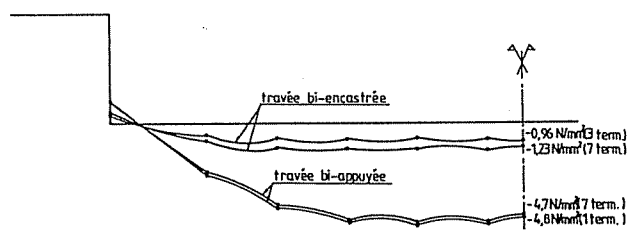


Fig. 17 — Contrainte longitudinale σ_x dans la section transversale à mi-portée

Pour la travée sur appuis simples, les résultats obtenus à l'aide d'un seul terme sont excellents; les variations observées après 7 termes n'étant que de 2 % au maximum.

Pour la variante encastée, les variations sont plus sensibles et les écarts atteignent 20 à 30 %, ce qui confirme l'intérêt d'utiliser 7 termes pour obtenir un niveau de précision acceptable.

On a également reporté (fig. 18) les variations longitudinales du déplacement vertical w dans la section médiane du pont.

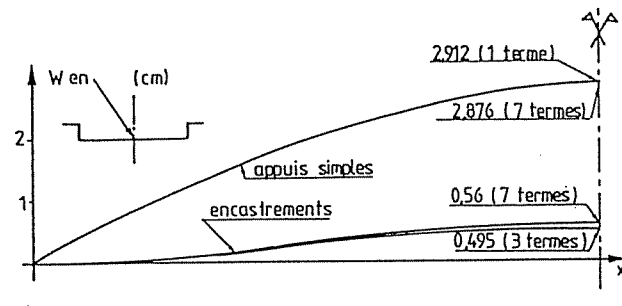


Fig. 18 — Déplacement vertical w au niveau de l'axe central d'une travée

5. — AUTRES EXEMPLES D'APPLICATIONS

Au travers d'une présentation succincte des résultats relatifs à une vanne de barrage mobile (réf. 7) et à une porte marée-tempête (réf. 8), nous allons donner une idée des performances du logiciel L.B.R.-3.

5.1. — Étude d'une vanne-caisson

La figure 19 représente la coupe transversale du caisson d'une vanne segment d'un barrage mobile. On y observe les raidisseurs longitudinaux et sur cette coupe est reporté le diagramme des contraintes transversales σ_φ agissant dans le bordage. Ces contraintes sont dues principalement à la flexion locale des divers panneaux sous l'effet de la pression.

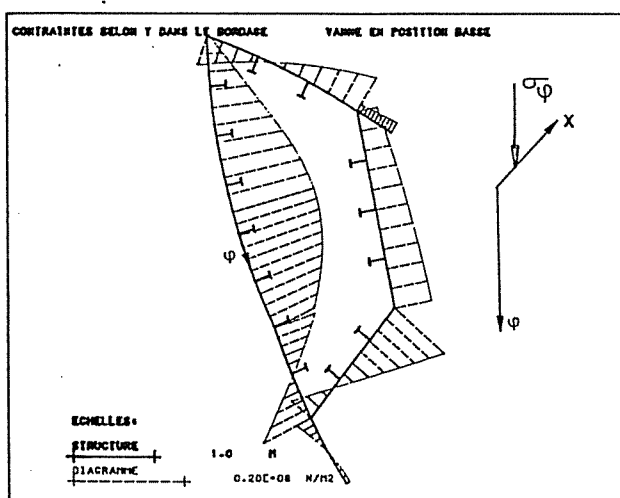


Fig. 19 — Contraintes transversales σ_φ dans le bordage à mi-portée, $x = L/2$

La discrétisation choisie en vue du calcul de corps de la vanne comporte 8 panneaux, 5 coques et 3 plaques. Tous ces panneaux sont raidis par un double lit de nervures, les aiguilles formant des cadres rigides régulièrement espacés.

Les premiers calculs effectués à l'aide du logiciel ont permis de contrôler le prédimensionnement. Ces passages effectués avec 1 terme (vanne considérée comme simplement appuyée sur ses bras) ne nécessitent que 72 lignes de données et 20 secondes CPU sur un IBM 4381. Les derniers passages effectués avec 7 termes et les effets de bord ne nécessitent que 3 lignes de données supplémentaires et demandent 411 secondes CPU.

5.2. — Étude d'une porte marée-tempête

Il s'agit d'une porte flottante de 390 m de portée, de 22 m de haut, de 54 m de large et pesant 55 000 tonnes. La figure 20 présente une vue en perspective de la structure ainsi que des déplacements longitudinaux d'extrémités. On y dénombre 30 panneaux dont 24 raidis et 6 panneaux représentant les épontilles.

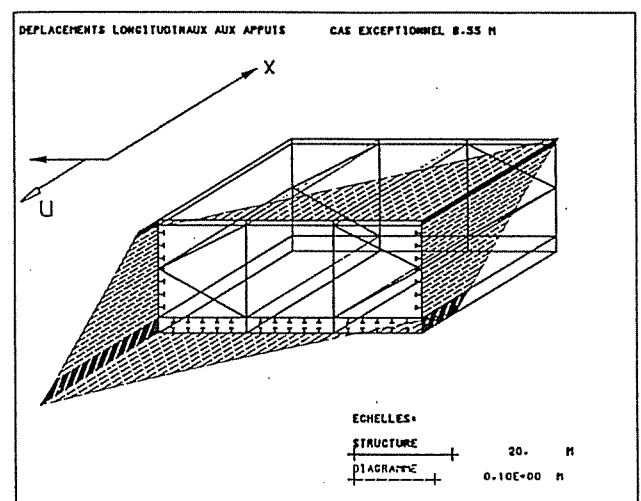


Fig. 20 — Déplacements longitudinaux u aux extrémités

L'intérêt de cette application réside, non pas dans des difficultés de principe ou dans des conditions particulières d'appuis mais simplement dans l'extrême facilité d'utilisation du logiciel des bordages raidis. Ainsi, prenons l'exemple du panneau vertical inférieur gauche, ses caractéristiques sont : une dimension totale de 9,5 m $\times$ 390 m, soit près de 4 000 m², la présence de 3 types de nervures (3 traverses de 390 m, 79 aiguilles de 9,5 m et un total de 5 850 m de raidisseurs). Tous ces éléments ne nécessitent que 11 lignes de données en vue de l'utilisation de notre programme. On comprend donc aisément l'intérêt que représente son utilisation.

En effet, les facilités de discrétisation, la rapidité d'exécution et la clarté des résultats ont permis d'effectuer un calcul complet en 12 heures (1 heure pour la discrétisation, 1 heure pour l'entrée des données et de leur vérification, 15 à 20 minutes de temps CPU sur l'IBM 4381 et enfin 2 heures pour l'impression et le dépouillement des résultats).

6. — CONCLUSION

Avec la mise au point du logiciel des bordages raidis (L.B.R.-3), le calcul des structures composées de coques cylindriques orthotropes est devenu une tâche bien plus aisée.

En effet, le logiciel des bardages raidis est particulièrement performant lorsque le raidissage est important car, tout en tenant compte des effets locaux des nervures, il intègre les nervures au sein du système d'équations différentielles sans alourdir sa résolution.

Le logiciel est très aisé d'accès, les données nécessaires sont fort réduites et très simples à exprimer. Les résultats sont eux, par contre, très détaillés et d'une haute précision, aussi bien sur les contraintes que sur les efforts et les déplacements. En effet, le principe de la méthode, reposant sur une résolution analytique des équations, garantit l'obtention d'une solution pouvant être qualifiée d'exacte.

Le logiciel permet, au stade actuel de son développement, outre la prise en compte des charges extérieures classiques, l'introduction de toutes sortes de conditions d'appuis (appui simple, encastrement, appui élastique). Cela permet d'envisager l'étude complète de nombreuses structures, métalliques et en béton dont notamment les constructions telles que : pont-canal, porte d'écluse, vanne de barrage mobile, rayonnages, toitures en sheds, tabliers de ponts, ... Ainsi, l'étude complète d'une telle structure peut, grâce à ce logiciel, être réalisée en 12 heures.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Dehousse N. M. (1961). — *Les bardages raidis en construction hydraulique*. Mémoires du Centre d'Études, de Recherche et d'Essais Scientifiques du Génie Civil (Nouvelle série), Vol. n° 1, Liège.
- [2] Friedman B. (1956). — *Principles and Techniques of Applied Mathematics*, New York.
- [3] Jakobsen A. (1958). — *Die Berechnung der Zylinderschalen*, Springer-Berlin.
- [4] Rigo Ph. (1989). — *Applications des développements harmoniques aux calculs des ouvrages hydrauliques métalliques*, Collection des Publications de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège, n° 120.
- [5] Aristaghes P., Lebreton P. et Vansteenkiste F. (1986). — *Calcul des portes d'écluses maritimes*, AIPCN, bulletin n° 52.
- [6] Cajot L. G. (1986). — *Avant-projet d'un pont-canal en béton précontraint*, Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, TFE.
- [7] Dehousse N. M. et Rigo Ph. (1987). — *Le réglage des niveaux par barrages mobiles pour des ouvrages à faibles retenues*, Bulletin n° 57 de l'AIPCN.
- [8] L.H.C.N. (1987). — *Stormvloedkering, Nieuwe Waterweg*, Rapport interne du LHCN de l'Université de Liège.