

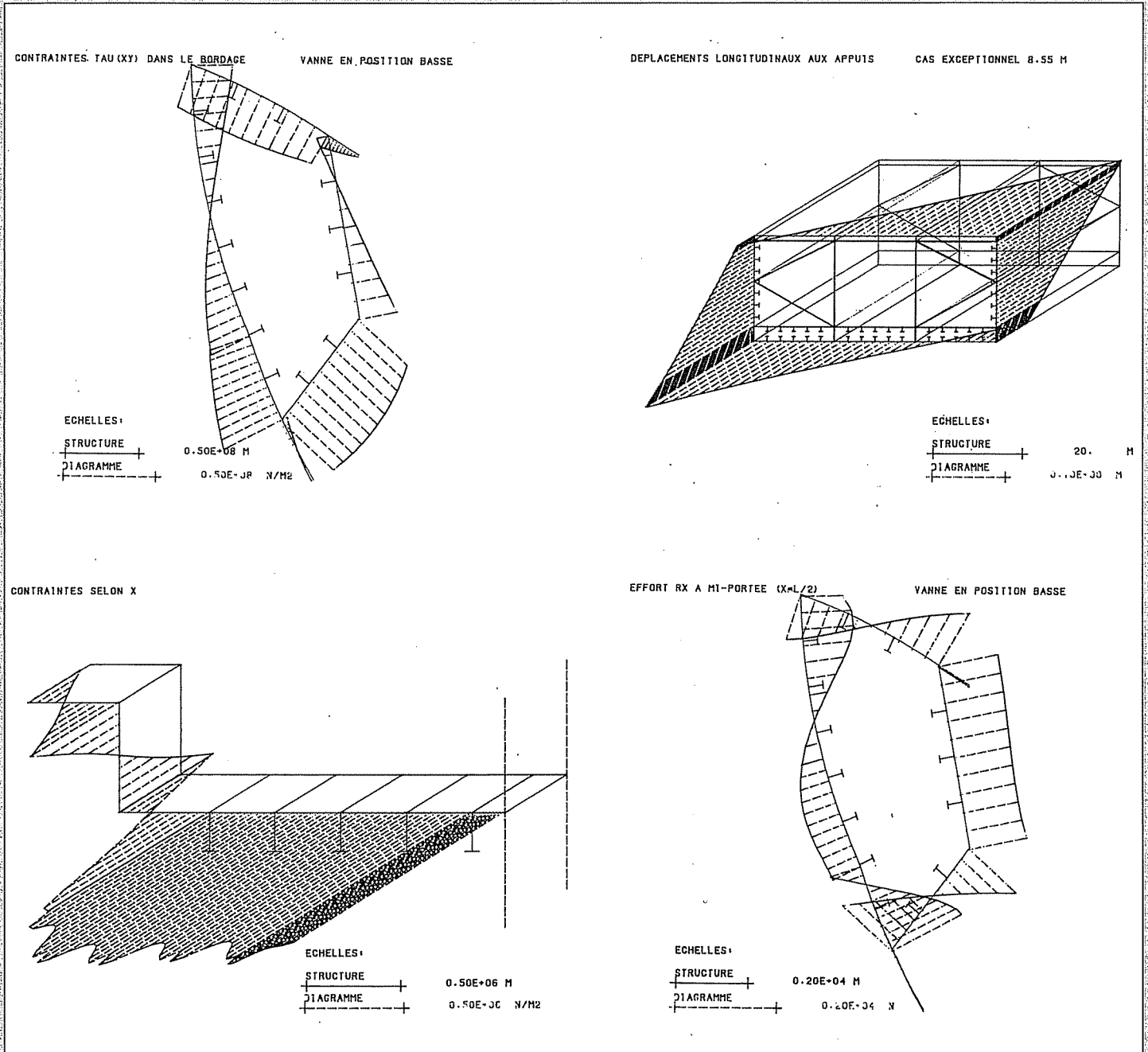
ingénieur et industrie

ISSN 0775-2962

Revue bimestrielle

Bureau de dépôt: Bruxelles X

Octobre 1988: 5



APPS editions

Extrait du sommaire:
 Les risques technologiques
 Conception des structures hydrauliques
 L'outplacement

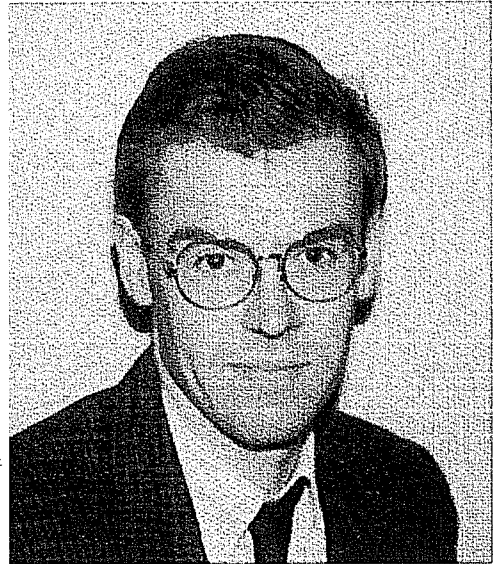
Ingenieur en Industrie
 Engineer and Industry
 Ingenieur und Industrie
 Ingeniero e Industria

C ONCEPTION

DES OUVRAGES HYDRAULIQUES

Philippe RIGO

*Ingénieur civil des constructions
Docteur en sciences appliquées
Assistant à l'Université de Liège (LHCH)*



La conception des ouvrages hydrauliques.- Portes d'écluses, vannes de barrages mobiles, coques de navire, tabliers de ponts, rayonnages, toitures en sheds,... sont des structures susceptibles d'être étudiées avec le logiciel des bordages raidis, LBR-3. Ce logiciel spécialement conçu pour les structures orthotropes métalliques hydrauliques permet un calcul économique de ces structures. A la portée de tous, LBR-3 allie de nombreux avantages (simplicité, rapidité, précision...). Sa commercialisation est maintenant envisagée.

Hydraulische structuren bevruchting.- Sluisdeuren, kleppen van moderne beweegbare stuwen, casco's, stapelrekken, shedvormige daken,... zijn structuren die zich lenen tot een studie door de LBR-3 software. Deze speciaal ontworpen software voor metalische orthotrope hydraulische structuren laat toe een economische berekening van deze bepaalde structuren te maken. Toegankelijk voor allen, de LBR-3 software verenigt veel voordelen (eenvoud, snelheid, nauwkeurigheid...). De commercialisatie ervan wordt nu voorzien.

Design of hydraulic structures.- Lock gates, navigation-dam gates, ship structures, deck bridges, shelvings, shed roofs,... are structures which can be studied by the LBR-3 stiffened sheathings software. This software especially carried out for hydraulic orthotropic steel structures, enables us to have an economic computation of these structures. Opened to every one, LBR-3 have many advantages (simplicity, quickness, accuracy...). Its marketing had already started.

Die Berechnung von Strukturen im Wasserbau.- Schleusentore, Schütze beweglicher Wehre, Schiffsrümpfe, Brückenfahrbahnen, Regale, Sheddächer,... sind Strukturen welche mittels des Programms für versteifte Planken, LBR-3 berechnet werden können. Dieses Programm, welches speziell für orthotrope metall Strukturen im Wasserbau entwickelt wurde, ermöglicht eine wirtschaftliche Berechnung all dieser Strukturen. LBR-3 ist leicht anzuwenden und beinhaltet zahlreiche Vorteile (Einfachheit, Schnelligkeit, Genauigkeit...). Seine Vermarktung wird nun ins Auge gefasst.

Diseño de estructuras hidráulicas.- Puertas de esclusas, compuertas de presas móviles, casco's de buques tableros de puentes, radiadores, hojas de techos,... son entre las otras estructuras que pueden ser estudiadas con el programa de los bordes rígidos (logiciel des bordages raidis LBR-3). Este programa está cocevido especialmente para estructuras ortotrópicas metálicas hidráulicas, y permite inclusive hacer un cálculo económico de las mismas. Al alcance de todos LBR-3 ofrece numerosas ventajas (simplicidad, rapidez, precisión...). Su comercialización ahora se ha iniciado.

LHCH,
Laboratoires d'hydrodynamique, d'hydraulique appliquée et de constructions hydrauliques
de l'Université de Liège,
quai Banning, 6
B-4000 Liège,
tél. (041) 52 01 80.

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 le *logiciel des bordages raidis*, LBR-3.

1.- Domaine d'application du logiciel LBR-3

Le domaine d'application du logiciel des bordages raidis LBR-3 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 (fig. 2), des barrières marée-tempête, des navires et bateaux... Cependant, bien d'autres structures, telles que tabliers de pont, rayonnages, toitures en sheds, ..., sont également susceptibles d'être étudiées avec LBR-3.

Toutes ces structures ont une caractéristique commune, elles possèdent une rigidité d'ensemble fort importante (1). En effet, 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. De plus, l'eau de nos fleuves et rivières, et plus encore celle du milieu marin, est particulièrement agressive vis-à-vis de ces structures hydrauliques. Ainsi, les attaques locales dues à la corrosion ne doivent jamais mettre en cause la stabilité d'ensemble de toute la structure.

A un moment donné, dans un même plan horizontal, l'action de l'eau, d'un courant ou de la houle sont identiques. En effet, les forces de pression n'augmentent qu'avec la profondeur.

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 panneaux métalliques (bordages) constituant les coques de navires, les portes d'écluses, les barrages mobiles...

Ce raidissage peut être simple, double et même triple. En effet, il n'est pas rare de rencontrer de grosses poutres allant 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 auxdites *aiguilles*. Les figures 3 et 4 sont des exemples de panneaux courbes et plans, raidis respectivement par 2 et 3 types de nervures. Nombre de structures modernes, constituées de panneaux raidis que nous appellerons *panneaux orthotropes*, sont donc susceptibles d'être étudiées à l'aide du logiciel LBR-3.

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 (5), 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. En effet, comment veiller à l'esthétique d'une structure dont on connaît si mal le comportement, sans mettre en péril sa stabilité.

Depuis une dizaine d'années, bon nombre de constructeurs ont cru que la méthode des éléments finis (FEM) allait résoudre définitivement tous leurs problèmes (6). Mais c'était mal connaître cette méthode. En effet, pour l'utiliser lors du calcul de structures composées de panneaux orthotropes, il faut découper ou plutôt discrétiser chaque élément constitutif (bordages, raidisseurs, aiguilles, traverses, goussets...) en petits éléments plans, souvent quadrangulaires, entre lesquels la méthode assure la continuité, soit des déplacements, soit des contraintes. Cette discrétisation est lourde à réaliser et demande une expérience non négligeable (9). Vu le nombre élevé de ces petits éléments, le temps de calcul (CPU) est tel que seuls des ordinateurs très puissants permettent de les effectuer. En parallèle avec le temps de calcul, la taille des matrices de rigidité utilisées est telle que la mémoire centrale de l'ordinateur doit être considérable. Enfin, le dépouillement

des résultats et surtout leur interprétation sont particulièrement délicats. En effet, il est exclu de posséder, avec la même précision, les contraintes et les déplacements.

Il ne faut pas en dire plus pour comprendre qu'une méthode spécifique aux constructions hydrauliques est attendue depuis longtemps par les ingénieurs. Cette méthode, nous la proposons sous forme du logiciel des bordages raidis, LBR-3. Il allie de nombreux avantages, simplicité, rapidité, résultats précis et variés (contraintes, efforts, moments et déplacements) et une accessibilité à tous.

A l'instar de toutes les méthodes spécifiques, LBR-3 n'est applicable que dans son domaine. Celui-ci pouvant 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 pont, les coques de navires, ... sont également des structures possédant un axe privilégié selon lequel elles sont développées. Les extrémités de ces structures peuvent être quelconques (2), appui simple, encastrement, appui élastique...

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 (3). Il n'y a donc aucune hypothèse ou simplification, la solution obtenue est donc toujours parfaitement exacte. Le principe de la résolution de ces équations différentielles est basé sur le développement en série de Fourier des charges et des déplacements.

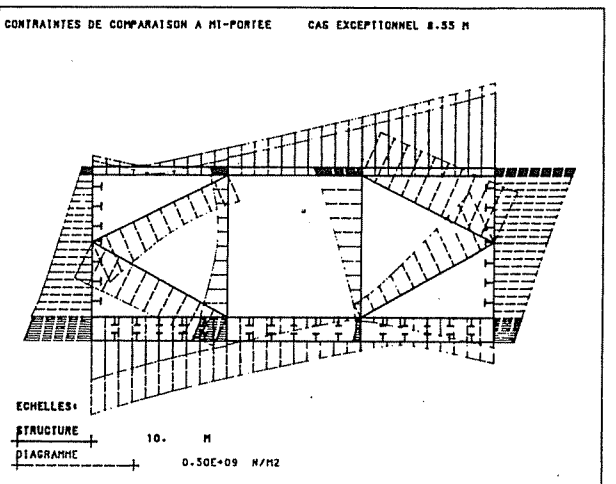
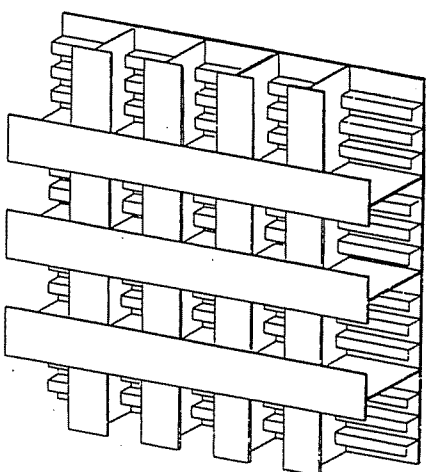
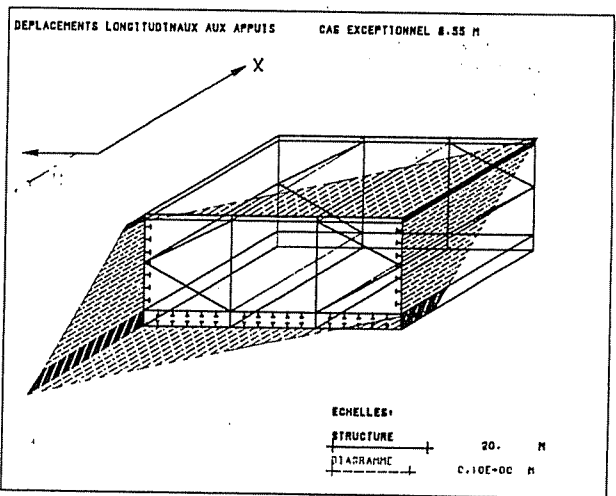
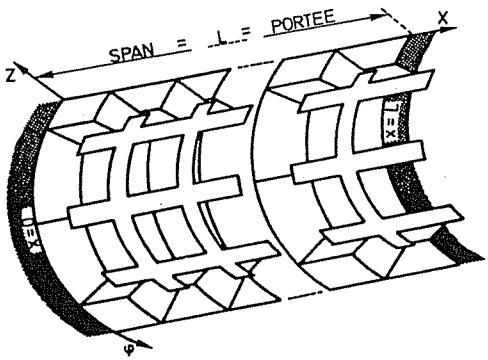
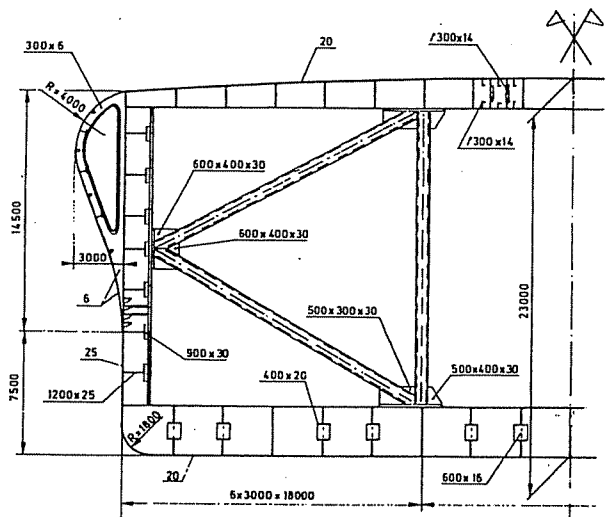
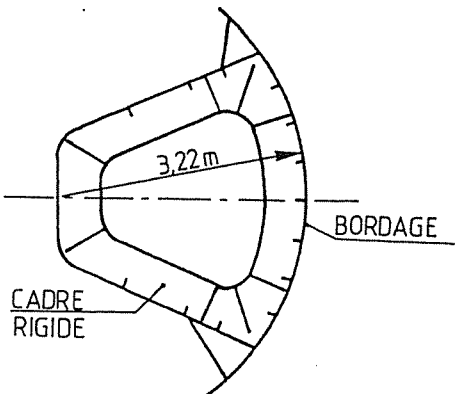
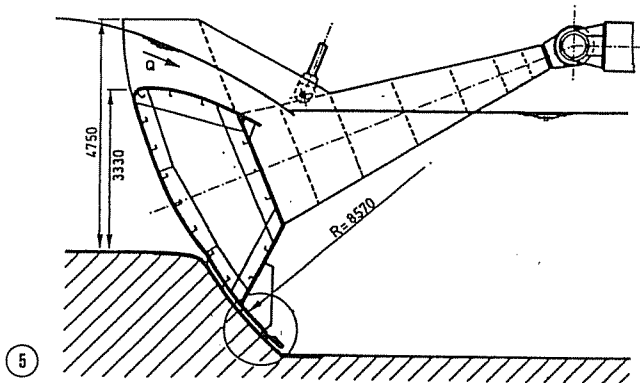
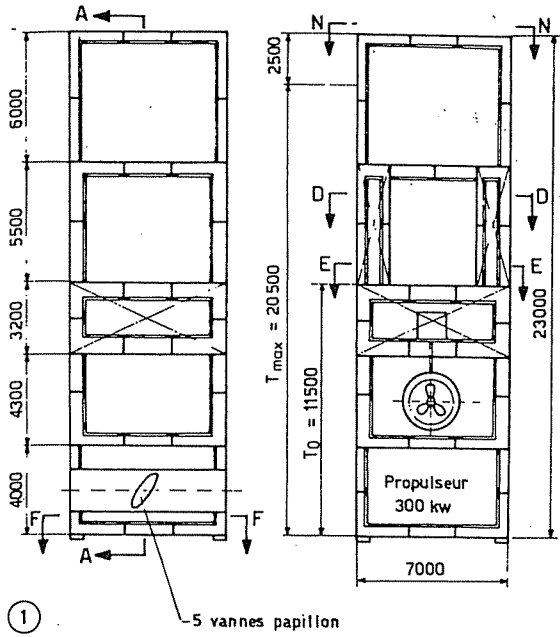
La **simplicité et la rapidité** du logiciel LBR-3 trouvent leur origine dans le principe même de la méthode utilisée. Ainsi, prenons l'exemple de la coque orthotrope de la figure 3. Via les éléments finis, 250 éléments seront nécessaires. Par contre, avec LBR-3, cette coque est traitée comme un seul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

L'**accessibilité à tous** est une question fondamentale pour qu'un logiciel puisse être exploité par un non-spécialiste.

Accessibilité à la méthode des bordages raidis

Pour le familier d'un logiciel, le domaine d'utilisation, les avantages, les restrictions, la discrétisation optimum ... sont des données de base avec lesquelles il est habitué de travailler. Afin que cette méthode soit accessible à un utilisateur néophyte, il faut qu'une formation très réduite lui suffise 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. En effet, les données nécessaires sont peu nombreuses, simples à déterminer et, de plus, fort systématiques.

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 par contre le choix de l'élément à utiliser, et ensuite celui de la discrétisation; un maillage plus fin n'étant pas forcément synonyme de résultats meilleurs. Par contre, avec notre logiciel, 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



méthodes précitées, de choisir un degré de champ ou un nombre de termes très élevé, cela conduit à la solution mais à un coût souvent injustifiable.

matique

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

que des efforts de bord interviennent, suite par exemple à un castrement 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.

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, facilement utilisables et exacts compte tenu, bien sûr, du développement en série utilisé.

3.- LBR-3 et son support informatique

Dans sa version 3, le logiciel des bordages raidis est le fruit de 20 années-ingénieur de recherches théoriques, de développements informatiques et d'expérimentations numériques. Les développements de LBR-3 ont été réalisés sur un IBM 4381 en FORTRAN 77.

Actuellement, LBR-3 connaît une phase d'habillage qui comprend notamment l'établissement d'un programme d'entrée des données dit "conversationnel". Celui-ci augmentera fortement les facilités d'utilisation de LBR-3 et prendra en charge l'utilisateur de façon à aboutir à la création d'un fichier de données totalement compatible avec le logiciel principal LBR-3. A l'instar du logiciel d'entrée, une version BASIC de LBR-3 est actuellement à l'étude.

Au niveau des résultats, de leur analyse graphique, une procédure semi-automatique existe. Après impression, les résultats sont stockés, totalement ou partiellement selon le désir de l'opérateur, sur des unités périphériques. Ensuite, via un programme de traitement des données, on reconditionne les résultats de manière à les présenter de façon adéquate au logiciel graphique. Les logiciels graphiques que nous avons utilisés sont le SAS (7) et le DI-3000 (8) et l'on étudie la possibilité d'utiliser le DISSPLA (10). Ces logiciels graphiques sont, pour notre part, utilisés via des terminaux Tektronix CX4111 et 4105A.

Les premiers développements réalisés sur micro-ordinateur ont été sur Macintosh et sont extrêmement prometteurs. En effet, LBR-3 en version FORTRAN peut être implanté sur Macintosh-Plus, avec uniquement 1 Méga de mémoire centrale. Les résultats sont par contre bien plus éloquents sur Macintosh II grâce au co-processeur du compilateur FORTRAN.

Le module source de LBR-3 contient environ 6000 instructions. Son utilisation nécessite pour les structures courantes 1 à 2 Méga de mémoire centrale et une capacité équivalente sur des unités périphériques pour le stockage de résultats intermédiaires.

Un de nos grands projets actuellement en développement dans le cadre d'un projet BRITE de la communauté européenne, est d'intégrer LBR-3 dans un logiciel plus complet de CAO destiné à la construction navale. A partir de critères économiques (prix des matériaux et de la main-d'oeuvre, temps de réalisation de chaque phase de construction...), on optimise les structures de manière à réduire leur coût de construction.

Dans un cadre plus général, l'importance des coûts de développement et de maintenance nous incite à rechercher un partenaire industriel en vue du parachèvement et de la commercialisation du logiciel LBR-3.

3.- Applications aux structures hydrauliques

Avec le calcul d'une vanne de barrage mobile (2), d'une porte marée-tempête (4), nous allons montrer la puissance et la facilité d'utilisation du logiciel des bordages raidis.

La vanne segment d'un barrage mobile.- Le corps principal de la plupart des vannes de barrage mobile est généralement un caisson ouvert ou fermé composé de coques et plaques orthotropes (1). Ainsi en est-il des vannes levantes, des vannes sectorielles, des vannes clapet, des vannes segment... Tous ces corps de vannes sont donc susceptibles d'être étudiés à l'aide du logiciel LBR-3. Dans le cadre de cet exposé, nous avons choisi de présenter le cas de la vanne segment (fig.5).

Les premiers calculs effectués à l'aide du logiciel ont permis de contrôler le prédimensionnement. Ces passages n'ont nécessité que 72 lignes de données et 20 secondes CPU sur IBM 4381. En couverture, deux figures donnent respectivement les contraintes tangentielles et les efforts tranchants dans le bordage à mi-portée.

Calcul d'une porte marée-tempête.- L'application suivante concerne l'avant-projet 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 (fig.6).

L'importance du raidissage de cette structure met en évidence les facilités d'utilisation de notre logiciel notamment vis-à-vis d'une discrétisation équivalente par la méthode des éléments finis. Prenons l'exemple du panneau 3, ses caractéristiques sont : une dimension totale de 9,5 m x 390 m, soit près de 4.000 m; 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. Ainsi, l'étude complète d'une structure complexe comme une porte marée-tempête peut, grâce à ce logiciel, être réalisée en quelques heures (entrée et vérification des données, calcul ordinales 12 heures (entrée et vérification des données, calcul ordinales 12 heures (entrée et vérification des données). Les figures 7 et 8 représentent respectivement les déplacements longitudinaux aux extrémités et les contraintes de comparaison dans la section transversale à mi-portée.

4.- Conclusion

LBR-3 est une méthode originale, adaptée aux exigences des constructions hydrauliques métalliques, économique à l'usage, d'utilisation aisée et rapide. De plus, elle donne de nombreux résultats, clairs, précis et détaillés, aussi bien au niveau des déplacements que des contraintes. Les potentialités de la méthode sont telles que nous mettons tout en oeuvre en vue d'accélérer sa commercialisation.

Références

- (1) N.M. Dehousse & Ph. Rigo, 1987.- Le réglage des niveaux par barrages mobiles pour des ouvrages à faibles retenues. *Bulletin de l'AIPCH*, 57.
- (2) Ph. Rigo, 1988.- *Applications des développements harmoniques aux calculs des ouvrages hydrauliques métalliques*, thèse de doctorat, Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège.
- (3) N.M. Dehousse, 1961.- *Les bordages raidis en construction hydraulique*, Mémoires du Centre d'Etudes, de Recherche et d'Essais Scientifiques du Génie Civil (Nouvelle série), vol. 1, Liège.
- (4) LHCH, 1987.- *Stormvloedkering, Nieuwe Waterweg*, Rapport interne du LHCN de l'Université de Liège.
- (5) R. Bares & Ch. Massonnet, 1966.- *Le calcul des grillages de poutres et dalles orthotropes*. Ed. Dunod, Paris.
- (6) W.C. Schnobrich, 1987.- Different methods of numerical analysis of shells. *IASS, bulletin*, 94.
- (7) *Statistical Analysis System*, 1986.- *SAS/Graph User's Guide*. SAS Institute Inc., North Carolina, USA (version 5.8).
- (8) DI-3000, 1984.- *DI-3000, User's Guide*. Precision Visuals Inc., Colorado, USA.
- (9) P. Aristaghes, P. Lebreton & F. Vansteenkiste, 1986.- Calcul des portes d'écluses maritimes. *Bulletin de l'AIPCH*, 52.
- (10) DISSPLA, 1987.- *DISSPLA, User's Manual*. Computer Associates, San Diego, USA (version 10.0).