

LE LOGICIEL DE CALCUL ET DE CONCEPTION DES STRUCTURES HYDRAULIQUES FOTEMENT RAIDIES (écluses, barrages mobiles, ...) CALCUL ET CONCEPTION DES STRUCTURES HYDRAULIQUES (*)

par

Philippe RIGO, Ing. Civ. des Constructions, Dr. Sc. Appl.,
Assistant à l'Université de Liège (L.H.C.N.**).
(Belgique)

ABSTRACT

An easy, cheap, fast and open to everyone computer method is now available; its name is L.B.R.-3 (Logiciel des Bordages Raidis, version 3). It is a software for stiffened sheathings. After some short theoretical explanations on the method, it is through the design of a navigation-dam sluice, a tidal surge barrier and a canal-bridge that we show the power and the easiness of the L.B.R.-3 software. Moreover, the L.B.R.-3 software assures the high accuracy and the good quality of results.

KEY WORDS :

Hydraulic construction, Computer calculation, Orthotropic sheathing, Lock gate, Navigation-dam sluice, Canal-bridge, Tidal surge barrier.

SOMMAIRE

Une méthode de calcul simple, accessible à tous, peu coûteuse et rapide pour le calcul des structures hydrauliques fortement raidies existe enfin; elle se nomme L.B.R.-3 (Logiciel des Bordages Raidis, version 3). Après un court rappel théorique de la méthode, c'est à travers le calcul d'un barrage mobile, d'une porte marée-tempête et d'un pont-canal que nous montrons la puissance et la facilité d'utilisation du logiciel L.B.R.-3 ainsi que l'extraordinaire qualité et diversité des résultats qu'il fournit.

MOTS CLES :

Construction hydraulique, Calcul par ordinateur, Bordage orthotrope, Porte d'écluse, Vanne de barrage mobile, Pont-canal, Porte marée-tempête.

INTRODUCTION

N'est-ce pas le rêve de tout chercheur d'arriver à proposer une méthode simple et rapide pour l'analyse générale du problème dont il s'est occupé ?

La prise en compte de manière simple et exacte des divers éléments constitutifs d'une structure composée de coques cylindriques raidies est à la base des développements théoriques proposés, à savoir : *la Méthode des Bordages Raidis*.

Cette méthode se prêtant particulièrement bien à la programmation, nous avons élaboré un logiciel de calcul nommé L.B.R.-3 (Logiciel des Bordages Raidis, version 3). Ce programme, quoique fort élaboré, permet une implantation sur des ordinateurs de toutes tailles et peut être utilisé pour

l'étude systématique des structures raidies composées de coques cylindriques ou de plaques (vanne de barrage mobile, porte d'écluse, tablier de pont, porte marée-tempête, plaques raidies de rayonnage, pont-canal,...).

L'utilisation de ce nouvel outil ne demandant pas une connaissance élaborée, ni de la méthode, ni du programme, entraînera pour son utilisateur une économie de temps et d'argent.

L PRINCIPE DU LOGICIEL DES BORDAGES RAIDIS : L.B.R.-3

La méthode est d'abord présentée succinctement dans ce premier chapitre, mais le lecteur disposant de peu de temps peut à la lecture du second chapitre se rendre compte d'emblée des possibilités d'emploi de L.B.R.-3.

(*) This article has been awarded the Gustave Willems Prize for 1989.

(*) Cet article a remporté le Prix Gustave Willems pour 1989.

(**) L.H.C.N. = Laboratoires d'Hydrodynamique, d'Hydraulique Appliquée, de Constructions Hydrauliques et Navales de l'Université de Liège, 6, Quai Banning, 4000 Liège, Belgique. Téléphone : 041/52.01.80.

Cette méthode de calcul des plaques et des coques cylindriques (figure 1) 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 (Dehousse 1961) sont issues de la méthode de Donnell, von Karman et Jenkins.

avec $w'' = dw/d\varphi$, $w' = dw/dx$, $w'' = d^2w/dx.d\varphi, \dots$

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

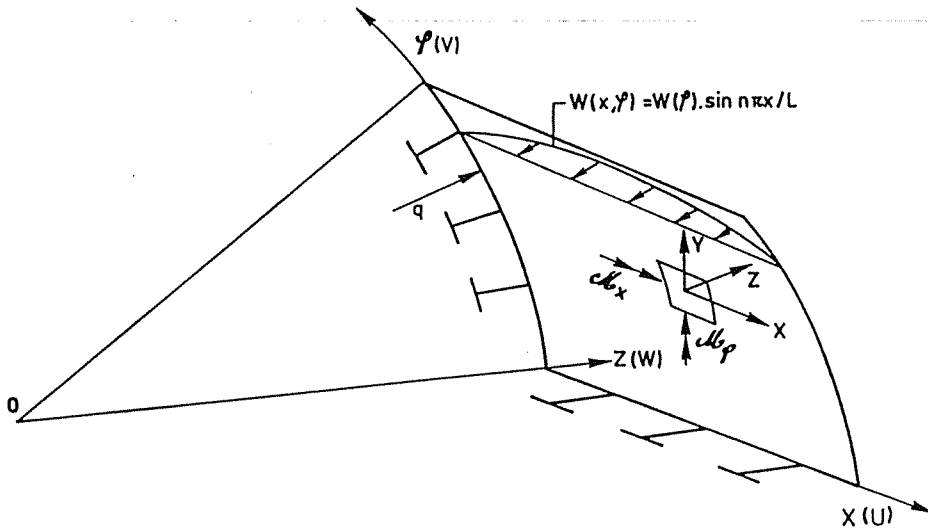


FIG. 1 : Coque cylindrique raidie - Orthotropic cylindrical shell.

L'élément de base est la coque cylindrique et le système de coordonnées dont on fait usage est représenté figure 1. L'axe des X selon les génératrices du cylindre et l'axe des φ orienté selon la circonférence. A chaque axe est associé un déplacement, u selon OX, v selon l'axe des φ et w selon OZ.

La surface moyenne reçoit la charge extérieure et celle-ci peut être subdivisée comme ceci (figure 1) : X, Y, Z les pressions spécifiques en N/m^2 et M_x, M_φ, M_z les moments spécifiques en $N.m/m^2$.

Les hypothèses émises sont les suivantes :

- le domaine de validité des développements est le régime élastique,
- on doit admettre les simplifications conduisant à la méthode D.K.J., à savoir :
 - une coque mince (épaisseur \ll rayon)
 - de faibles déformations
 - et les hypothèses dites de Love-Kirchhoff.

On obtient après mise en équation du problème (Jakobsen 1958), une équation différentielle (1) en w du 8ème ordre à 2 variables, x et φ .

$$A.w'''''' + B.w'''' + C.w'''' + D.w'''' + E.w'''' + F.w'''' + G.w'''' + I.w'''' + J.w'''' + K.w'''' = 0 \quad (1)$$

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

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

L la longueur de la coque selon OX (2)

Ce qui se traduit pour le premier terme du développement en série par (3) à (5)

$$w = w(x, \varphi) = w(\varphi) \sin(n\pi x/L) \quad (3)$$

$$v = v(x, \varphi) = v(\varphi) \sin(n\pi x/L) \quad (4)$$

$$u = u(x, \varphi) = u(\varphi) \cos(n\pi x/L) \quad (5)$$

Les charges extérieures (fig. 2) couramment utilisées sont :

- les charges hydrostatiques Z ou encore des charges variant linéairement selon O φ et restant constantes selon OX (ex : poids propre).
- les forces de bord X et des moments de bord M_φ agissant le long des bords d'extrémités $x=0$ et $x=L$ de chaque élément de coques ou de plaques. Ces forces X et moments M_φ , appelés "effets de bords", permettent d'étudier des structures bi-appuyées, bi-encastrées ou encore sur appuis élastiques.
- les forces de pression spécifique Y qui, comme on le verra, permettront d'introduire un effet de torsion généralisé au sein des structures.

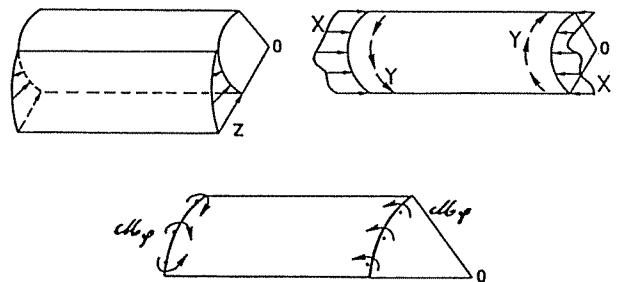


FIG. 2 : Schéma des sollicitations envisagées. Diagram of the external loads.

La conséquence principale du choix des relations (3) à (5) est qu'il faut décomposer toutes ces charges en série de Fourier. Le développement le plus simple est celui d'une

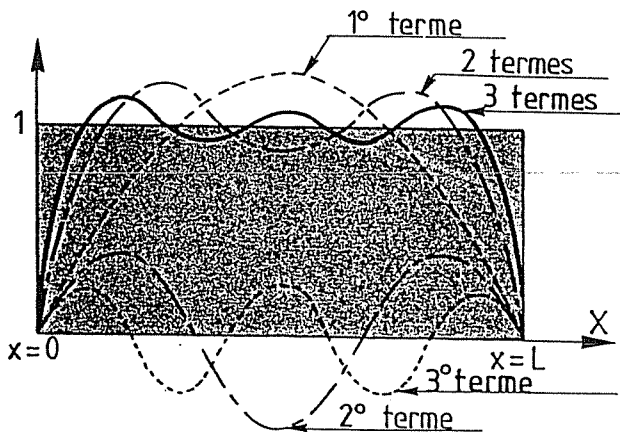


FIG. 3 - Développement en série de Fourier d'une charge uniforme unitaire.
Fourier series development of a unitary and uniform load.

charge uniforme selon OX comme l'est la pression hydrostatique Z sur la figure 2. La figure 3 montre l'allure des 3 premiers termes 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.

Les figures 4 et 5 montrent que pour des charges très localisées, le nombre de termes doit être bien plus important. Il est à noter qu'en pratique, des charges concentrées n'existent pas et qu'elles sont toujours réparties plus ou moins localement. Ainsi, les forces de bord (X et Y) et les

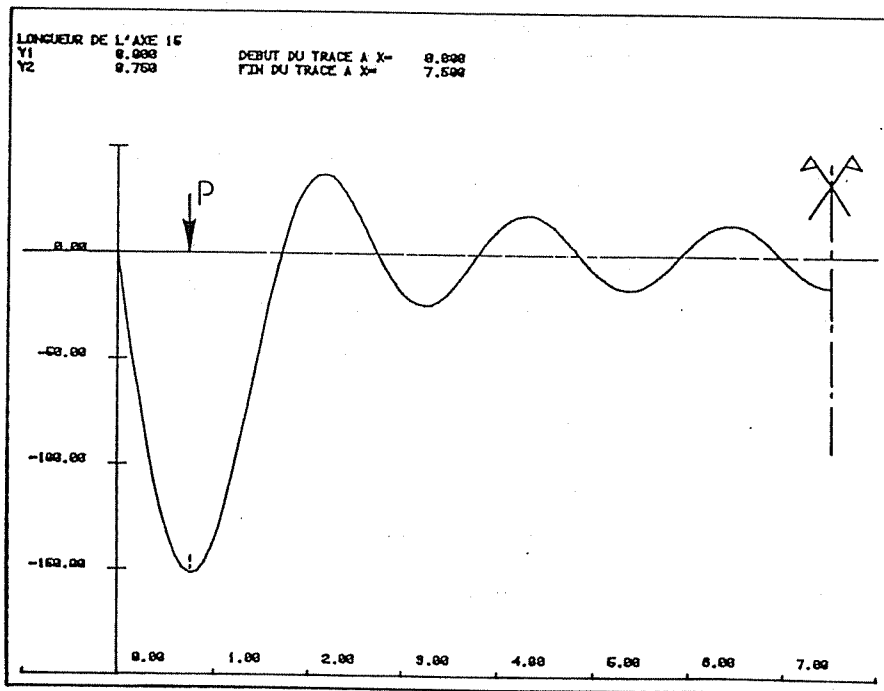


FIG. 4 : Représentation d'une charge concentrée avec 7 termes de la série de Fourier.
Diagram of a concentrate load with a 7 term-Fourier series.

moments de bord M_0 sont-ils appliqués sur de petits intervalles placés aux extrémités. Pour ces effets de bord, on obtient des résultats très satisfaisants en utilisant uniquement 7 termes de la série de Fourier (figure 6).

I.1. EXTENSION DE LA METHODE A LA TORSION

Les cas de sollicitations envisagés jusqu'à présent ont toujours été parfaitement symétriques; qu'advient-il de la méthode lorsque la sollicitation prend des allures plus complexes? (Rigo 1988).

Prenons l'exemple de la vanne segment manoeuvrée d'un seul côté (figure 7). La sollicitation résultante est non-symétrique, mais peut être décomposée en une sollicitation symétrique et une sollicitation antisymétrique.

Dans le cas de la sollicitation antisymétrique agissant perpendiculairement au plan de structure "vanne-bras" (figure 8), la déformation de la structure est due à un équilibre entre la torsion de la vanne et la flexion des bras.

Du point de vue analytique, le calcul de la vanne soumise à une torsion nécessite une nouvelle approche de la résolution du système d'équations différentielles. En effet, les conditions aux limites sont cette fois : w et v nuls en $x=L/2$ et u nul en $x=0$ (ou $x=L$). Tous les développements faits précédemment avec w une fonction de sinus, restent totalement valables et il ne faut y apporter aucune modification. Il suffit de remplacer les termes en $\sin(\lambda x)$ par $\cos(\lambda x)$ et inversement.

I.2. PRESENTATION DE L'ALGORITHME DU LOGICIEL DES BORDAGES RAIDIS.

La figure 10 présente l'organigramme du logiciel de base, à savoir : le programme de calcul d'un assemblage de plaques et de coques raidies, chaque élément pouvant être raidi par 3 types de nervures, des aiguilles, des raidisseurs et des traverses (figure 9).

L'organigramme débute par le bloc d'entrée qui vient très récemment d'être remplacé par un système d'entrée conversationnel "question-réponse" qui permet encore plus facilement à la personne non initiée d'utiliser le programme.

C'est à travers le bloc de dessin que, via le logiciel graphique DI 3000 implanté au Centre de Calcul de l'Université de Liège, nous traçons les diagrammes des déplacements, contraintes, efforts et moments dans les diverses sections de la structure (DI 3000 1984)

II. UTILISATION DU LOGICIEL L.B.R.-3 AU CALCUL ET A LA CONCEPTION DES STRUCTURES HYDRAULIQUES.

Au travers du calcul d'une vanne de barrage mobile, d'une porte marée-tempête et d'un pont-canal, nous allons montrer la puissance et la facilité d'utilisation du logiciel L.B.R.-3 ainsi que l'extraordinaire qualité et diversité des résultats qu'il fournit.

II.1. CALCUL DU CORPS D'UNE VANNE DE BARRAGE MOBILE.

Notre but premier n'est pas ici de nous attarder sur les différentes phases du calcul d'un type bien particulier de vanne de barrage mobile. En effet, le corps principal de la plupart des vannes de barrage mobile est généralement un caisson ouvert ou fermé composé de coques et plaques orthotropes (Wickert 1971, Gelissen-Lohest-Peters, Rothilde-Schiepers 1985, Brouwer 1988). Ainsi en est-il des vannes levantes (fig. 11), des vannes clapet (fig. 12), des vannes secteur (fig. 13),

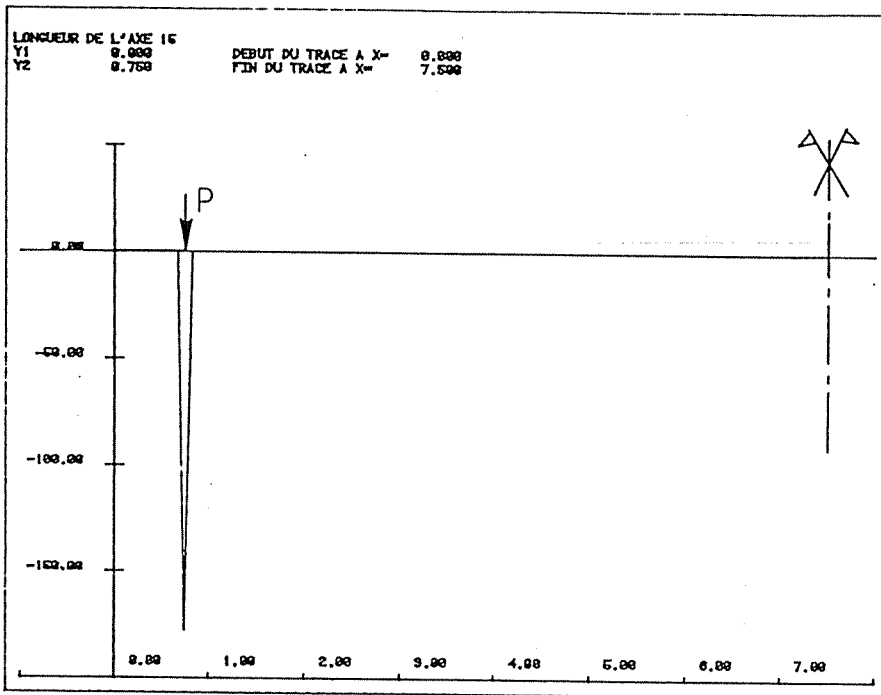


FIG. 5 : Représentation d'une charge concentrée avec 100 termes de la série de Fourier.
Diagram of a concentrate load whith a 100 term-Fourier series.

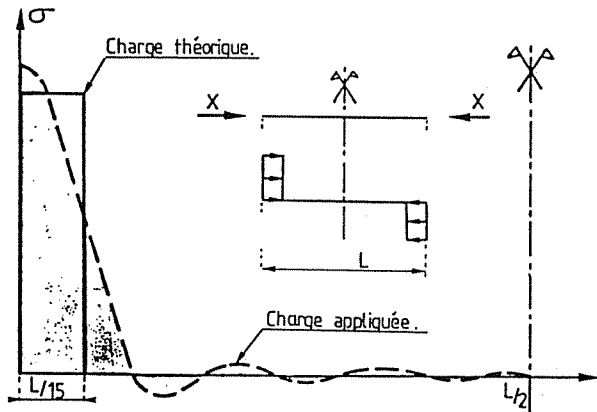


FIG. 6 : Développement en série de Fourier d'une force de bord X sur un intervalle $d^*=L/15$.
Fourier series development of an edge force on a space $d^*=L/15$.

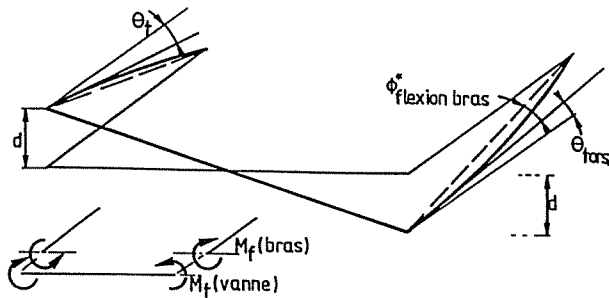


FIG. 8 : Mode d'équilibre de la vanne soumise à la sollicitation antisymétrique.
Equilibrium mode of a gate submitted to an antisymmetrical load.

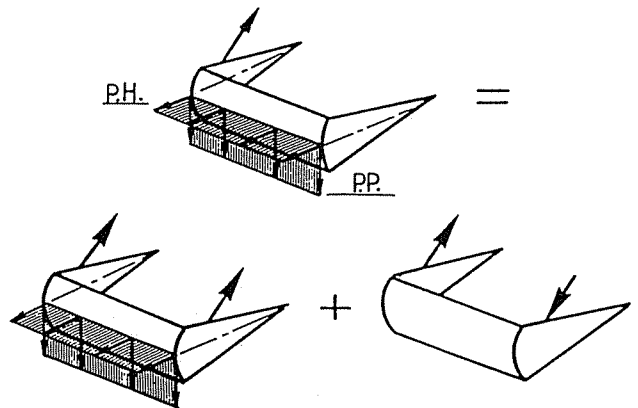


FIG. 7 : Décomposition de la sollicitation non-symétrique d'une vanne manoeuvrée d'un seul côté en une sollicitation symétrique et une sollicitation antisymétrique.
Splitting up the non-symmetrical load on a gate operated from a single side into a symmetrical load and an antisymmetrical load.

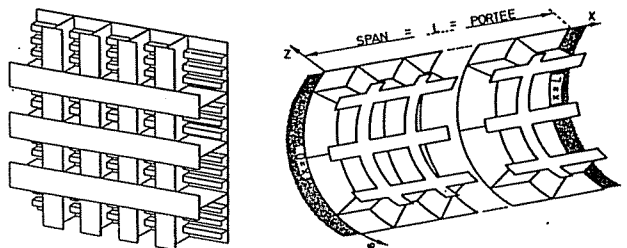


FIG. 9 : Eléments de plaque et de coque raidies.
Stiffened plate and shell elements.

LE LOGICIEL DE BASE.

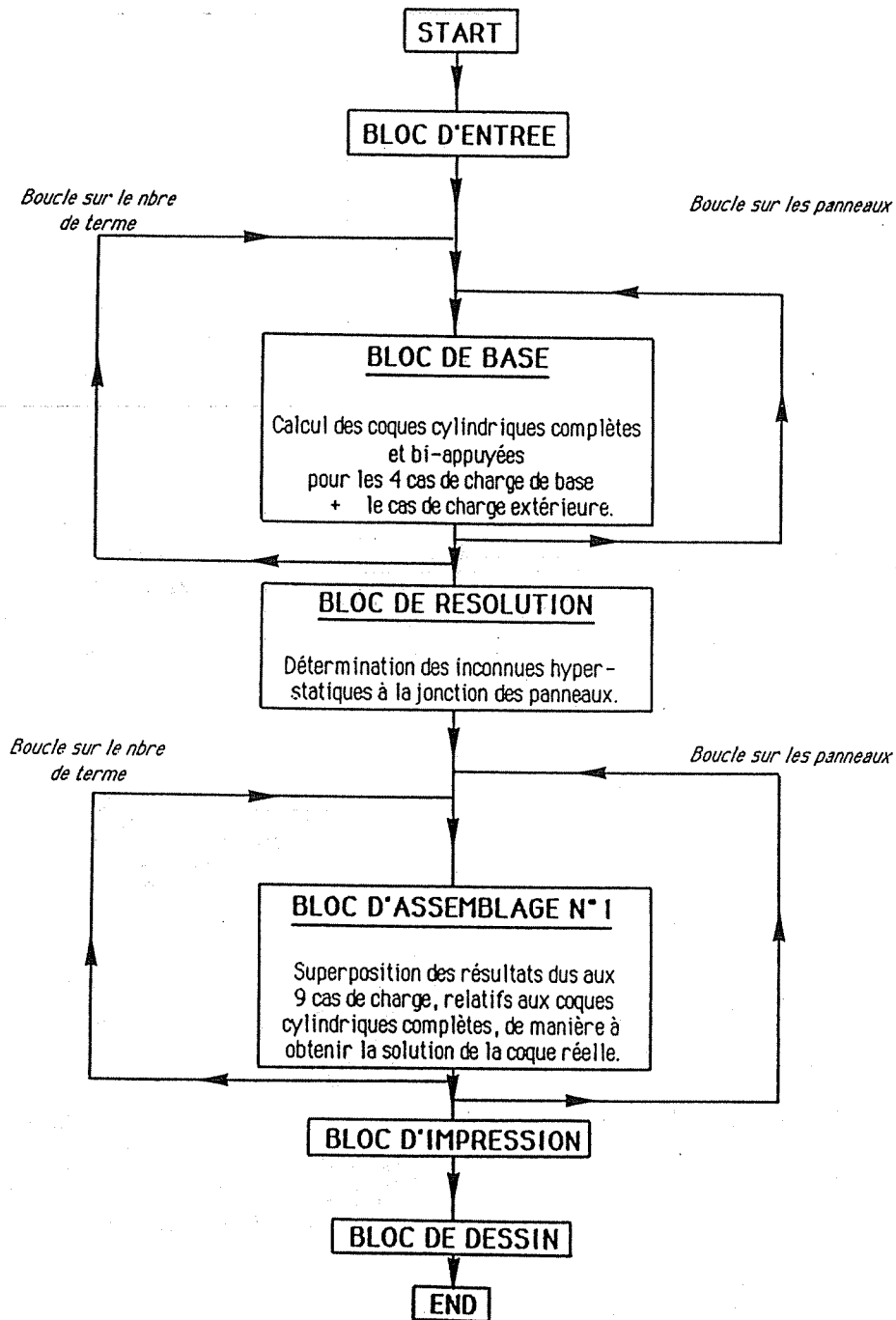


FIG. 10 : Schéma de l'algorithme de base du Logiciel des Bordages Raidis, L.B.R.-3.
Basic algorithm diagram of the L.B.R.-3 Software.

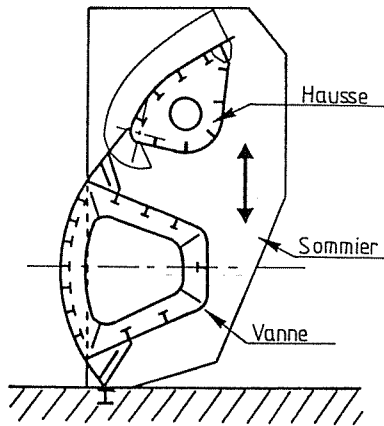


FIG. 11 : Vanne levante.
Lifting gate.

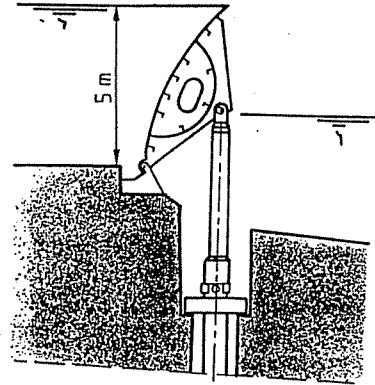


FIG. 12 : Vanne clapet.
Flap gate.

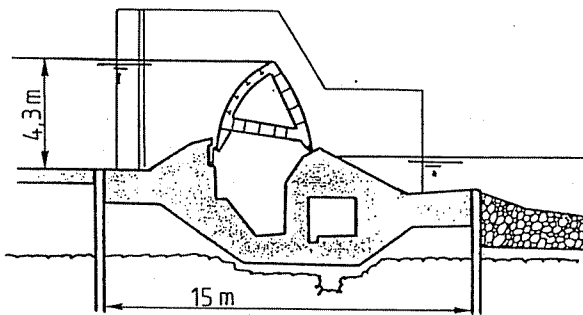


FIG. 13 : Vanne secteur.
Sector gate.

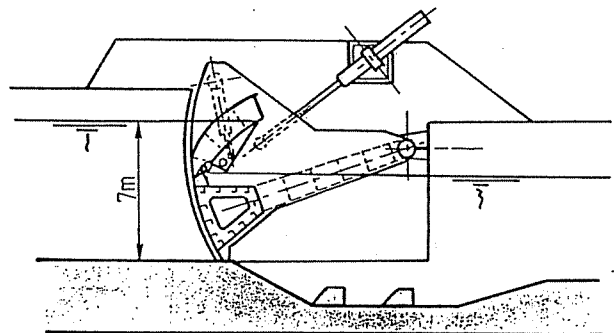


FIG. 14 : Vanne segment.
Radial gate.

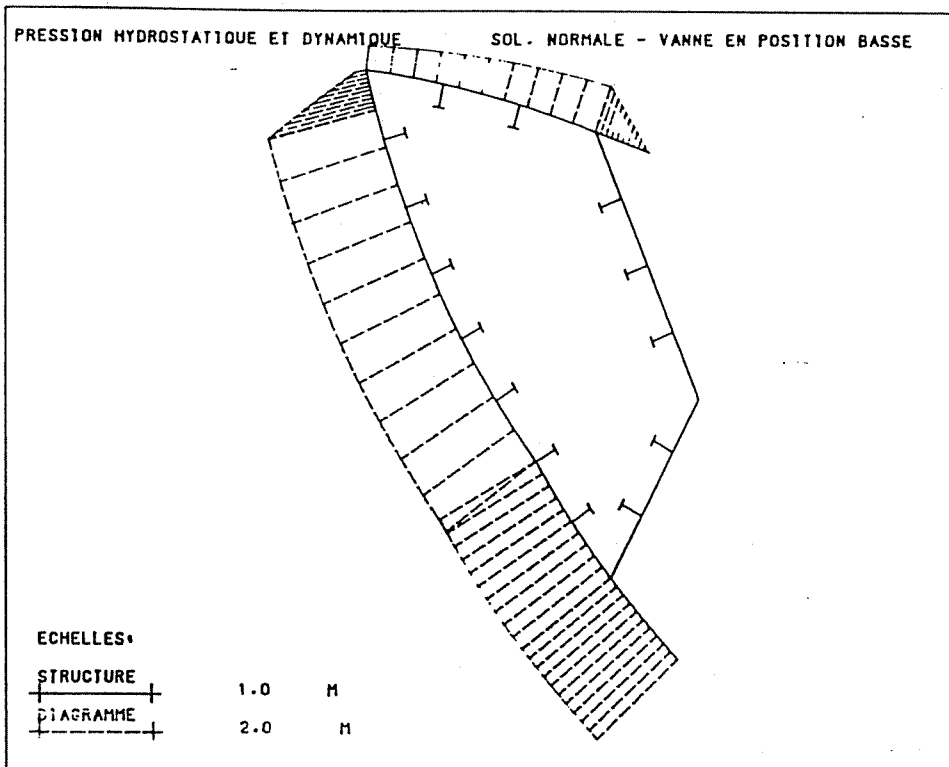


FIG. 15 : Vue en coupe de la vanne et de la sollicitation.
Cross section of the gate and diagram of the load.

des vannes segment (fig. 14),... Tous ces corps de vannes sont donc susceptibles d'être étudiés à l'aide du logiciel L.B.R.-3 d'une manière similaire à celle que nous présentons ici.

Dans le cadre de cet exposé, nous avons choisi de présenter le cas de la vanne segment (figure 15) dont l'étude est particulièrement délicate (Dehousse, Rigo 1987) et dont les caractéristiques géométriques sont reprises ci-dessous (figure 16).

- Panneau amont : aiguilles : 300x150x10 (tous les 1.8m)
 raidisseurs : 130x65x8 (tous les 0.6m)
- Panneaux supérieurs et inférieurs :
 aiguilles : 300x150x10 (tous les 1.8m)
 raidisseurs : 95x65x6 (tous les 0.6m)
- Panneau aval : aiguilles : 300x150x10 (tous les 1.8m)
 raidisseurs : 95x65x6 (tous les 0.6m)

- Portée = 29.0 m
- $I_{1-1} = 0.12 \text{ m}^4$
- $I_{2-2} = 0.40 \text{ m}^4$
- Chute = 2.00 m

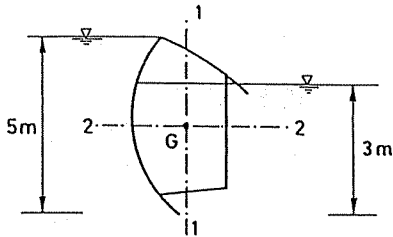


FIG. 16 : Schéma de la section transversale de la vanne.
 Diagram of the gate cross section.

Soit les bras, figure 17, symbolisés comme suit :

- $I_{b1} = 30.6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$
- $I_{b2} = 7.84 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$

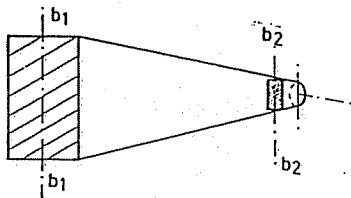


FIG. 17 : Vue des bras.
 Diagram of the supporting arms.

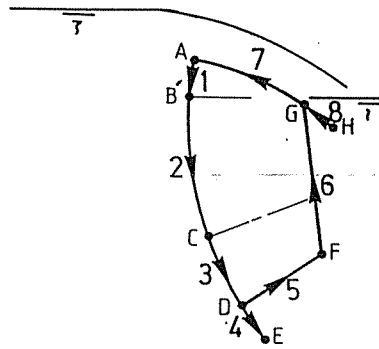


FIG. 18 : Principe de la discrétisation de la structure en vue de son calcul.
 Principle of the structure discretization to enable its computation.

La discrétisation choisie en vue du calcul de corps de la vanne est schématisée à la figure 18. Elle comporte 8 panneaux, 5 coques (panneaux 1,2,3,4 et 7) et 3 plaques (panneaux 5,6 et 8). Tous ces panneaux sont raidis par un double lit de nervures, les aiguilles formant des cadres rigides régulièrement espacés (1,8 m) et les raidisseurs (fig. 15) placés dans le sens longitudinal sont eux aussi régulièrement espacés (0.6 m).

Le tronçon de coque AC a dû être scindé en deux de manière à tenir compte de la cassure dans la variation de la pression hydrostatique en B' (fig. 15 et 18).

Les premiers calculs effectués à l'aide du logiciel ont permis de contrôler le prédimensionnement. Ces passages effectués avec 1 terme et sans les effets de bord (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 (X et λ_p) ne nécessitent que 3 lignes de données supplémentaires et demandent 411 secondes CPU.

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

Compte tenu des caractéristiques des bras décrites à la figure 17, les figures 19 à 22

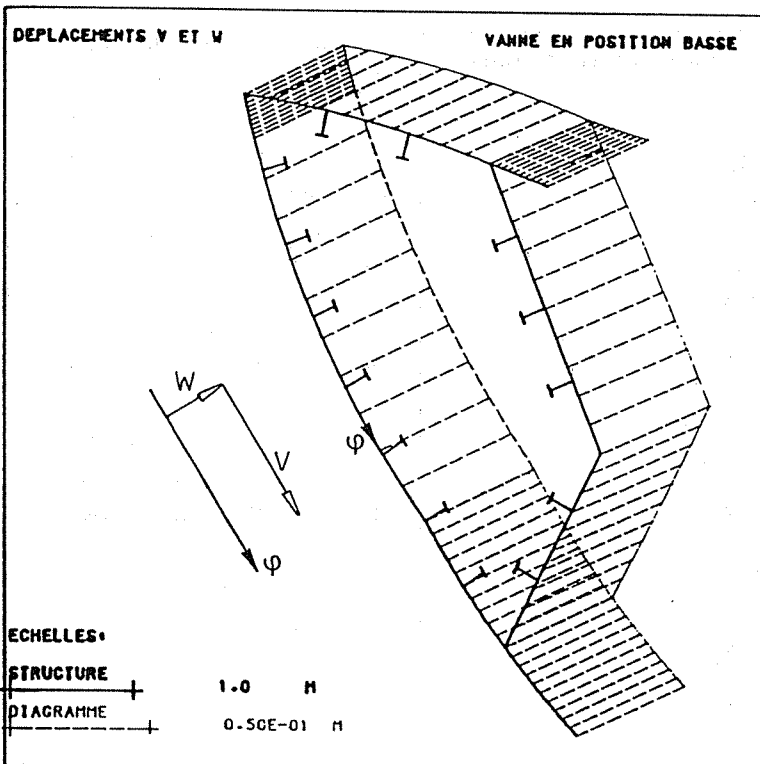


FIG. 19 : Déplacements transversaux (w et v) à mi-portée, $x=L/2$.
 Transversal displacements (w and v) at the mid-span, $x=L/2$.

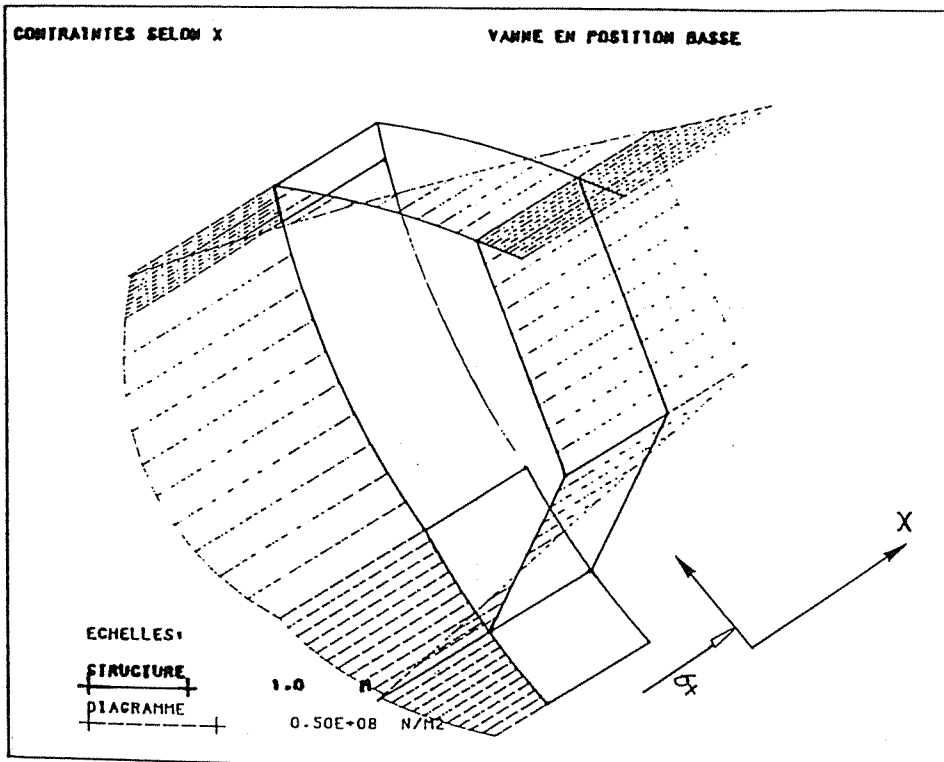


FIG. 20 : Contraintes longitudinales σ_x à mi-portée, $x=L/2$.
Longitudinal stresses σ_x at the mid-span, $x=L/2$.

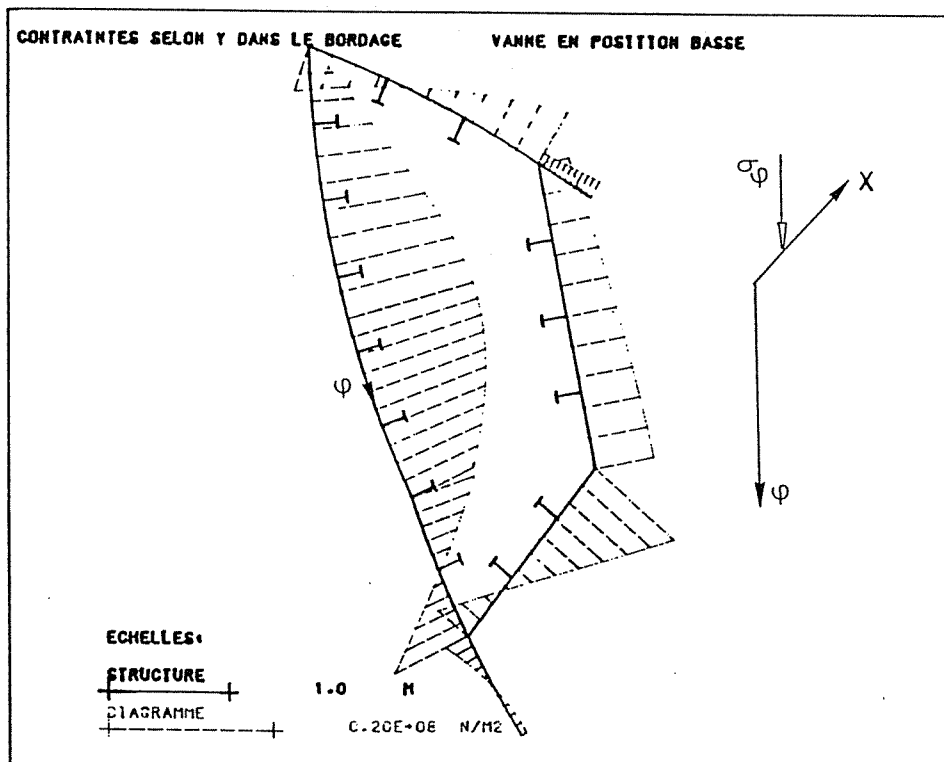


FIG. 21 : Contraintes transversales σ_ϕ dans le bordage à mi-portée, $x=L/2$.
Transversal stresses σ_ϕ in the sheathing at the mid-span, $x=L/2$.

donnent l'allure des déplacements, contraintes et efforts agissant au sein de la vanne pour le cas de sollicitation donné (fig. 15)

II.1.1. Influence de la rigidité des bras sur l'état de contrainte dans la vanne.

Afin de juger de l'importance de l'effet favorable que jouent les bras lors du calcul d'ensemble de la vanne segment, nous avons étudié l'influence de l'inertie flexionnelle et torsionnelle des bras sur les contraintes et déplacements au sein de la vanne.

Ainsi, nous avons envisagé différents types de bras, des bras à inertie négligeable, à inertie I , $2I$, $4I$, et $10I$. La figure 23 donne pour ces différents bras le déplacement horizontal et la contrainte longitudinale σ_x maximale à mi-portée de la vanne. On y note une asymptote horizontale correspondant au cas d'une vanne bi-encastrée. L'allure de la courbe $w=fct(\text{inertie})$, montre que l'incidence positive des bras est d'autant plus importante que les bras sont rigides. Mais, engendrer une réduction des contraintes au niveau de la vanne en augmentant l'inertie des bras est d'autant moins rentable que la rigidité des bras est déjà importante. Il existe donc une rigidité optimum à donner aux bras de manière à allier à une réduction importante des contraintes et des déplacements au niveau de la vanne, des bras n'augmentant pas excessivement le coût de l'ouvrage.

On observe de plus, que l'effet positif des bras est principalement conditionné par son inertie I_{xx} dans la zone de liaison vanne-bras. Il est dès lors conseillé d'augmenter cette inertie dans cette zone plutôt que de manière uniforme dans tout le bras. Ainsi, les bras de la figure 17 dont l'inertie varie linéairement de $30.6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$ à $7.84 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$ engendrent un effet réducteur au sein de la vanne équivalent à des bras à inertie constante de $25.1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$. On voit

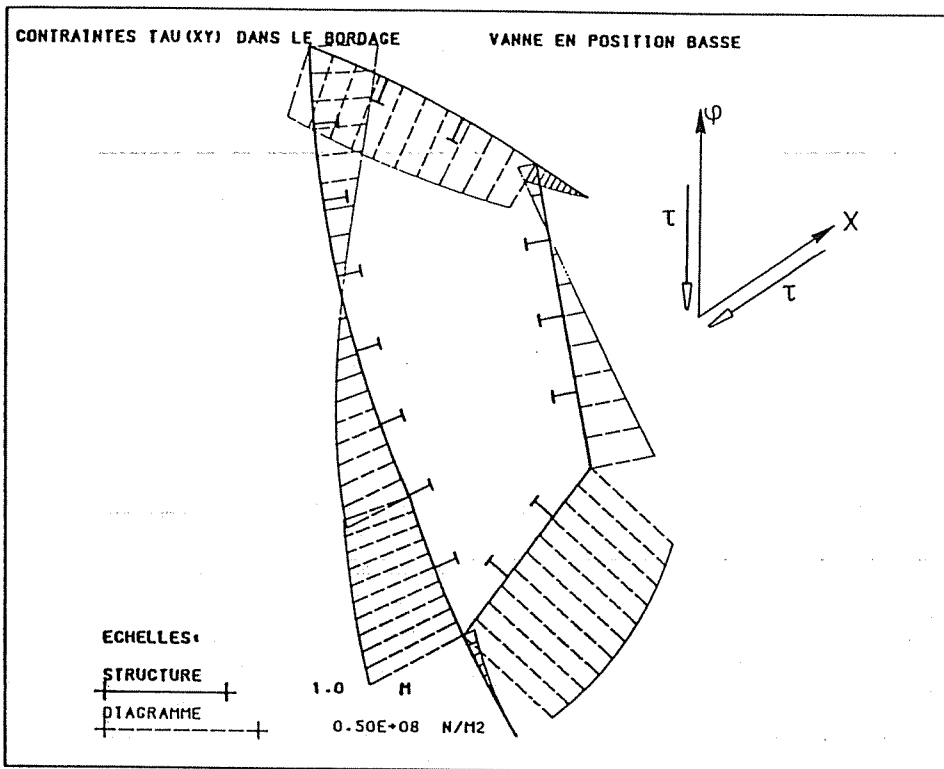


FIG. 22 : Contraintes tangentielle τ_{xy} dans le bordage aux extrémités de la vanné ($x=0$ et $x=L$).
 Shearing stresses τ_{xy} in the sheathing at the ends of the gate ($x=0$ and $x=L$).

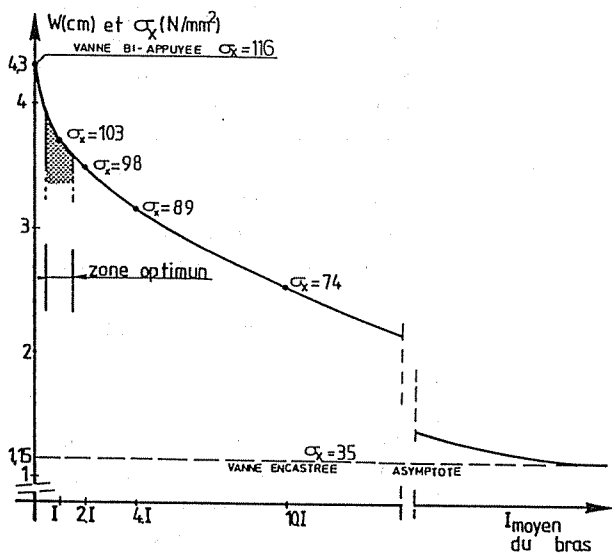


FIG. 23 : Relation entre la rigidité des bras et la déformation de la vanné.
 Relationship between the arm rigidity and the gate deformation.

donc l'économie potentielle que l'on peut réaliser en augmentant l'inertie des bras à leur jonction avec la vanné. Un moyen aisé est donc de concevoir un bras dont la largeur serait également variable (figure 24).

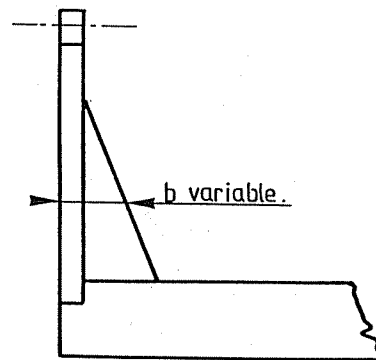


FIG. 24 : Vue d'une vanné dont les bras ont une largeur b variable.
 Diagram of a gate whereof the arms have a variable width b.

II.2. CALCUL D'UNE PORTE MARÉE-TEMPÊTE.

L'application suivante concerne l'avant-projet d'une porte marée-tempête. 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.

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 (figures 25 et 26). Le mécanisme de manoeuvre de cette porte est schématisé figure 27 et la discrétisation en vue du calcul est représentée figure 28. On y dénombre 30 panneaux dont 24 raidis et 6 panneaux représentant les épontilles (L.H.C.H. 1987).

L'utilisation de notre logiciel au calcul de cette porte fut un choix très judicieux. En effet, les facilités de discrétisation, la rapidité d'exécution et la clarté des résultats ont permis d'effectuer un

calcul complet endéans les 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 dépeuillement des résultats).

L'importance du raidissage met encore plus en évidence les facilités d'utilisation de notre logiciel; et notamment vis-à-vis d'une discrétisation équivalente par la méthode des éléments finis. Prenons l'exemple du panneau 3 (figures 26

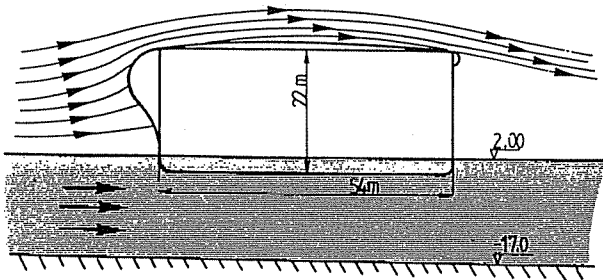


FIG. 25 : Coupe transversale de la porte marée-tempête soumise au courant marin et à l'effet du vent.
Cross section in a surge tidal barrier which is submitted to a water stream and to the wind effect.

et 28), ses caractéristiques sont : une dimension totale de 9,5 m x 390 m, soit près de 4000 m²; la présence de 3 types de nervures (3 traverses de 390 m, 79 aiguilles de 9,5 m et un total de 5850 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.

Les figures 29 et 30 montrent en détails les déplacements et les contraintes engendrés au sein de la structure.

II.3 CONCEPTION D'UN PONT-CANAL SUR APPUIS MULTIPLES.

Nous en arrivons à la conception d'un pont-canal sur appuis multiples (fig. 31). La distance entre appuis est de 20 m, sa largeur est de 50,85 m et le tirant d'eau de 4,5 m.

II.3.1. Travée sur appuis simples.

Dans un premier temps, il a été procédé à la vérification d'une travée bi-appuyée reposant sur des poutres chevêtres. La résolution de ce problème n'a nécessité que 43 lignes de données et seulement 7,3 s CPU sur IBM 4381. On a ainsi obtenu en moins de 8 secondes l'ensemble des déplacements, contraintes et efforts dans toute la structure.

Les figures 32 à 35 donnent un aperçu de la variété des résultats disponibles ainsi que de leur précision. Les figures 32 et 33 donnent un aperçu du champ des déplacements (la flèche maximale dans la section transversale médiane d'une travée est de l'ordre de 3 cm), la figure 34 atteste du bon ou du mauvais positionnement transversal des traverses. Et à la figure 35, on y observe clairement que l'effet de chaque traverse est pris en compte séparément et que les nervures sont à l'origine de brutales variations de contraintes dans le tablier. Cela s'explique aisément si l'on sait qu'au droit de chaque traverse agissent 5 lignes de charges concentrées (Rigo 1988).

II.3.2. Travée bi-encastées.

Venons-en maintenant au calcul de cette même structure mais qui serait cette fois la travée centrale d'un pont-canal sur appuis multiples. Pour cette travée centrale, tout se passe comme si elle était encastree à ses 2 extrémités.

La figure 36 donne l'allure des forces de bord que nous appliquons aux extrémités de la travée et qui s'ajoutent aux moments de bord (figure 37) pour simuler des encastremets parfaits.

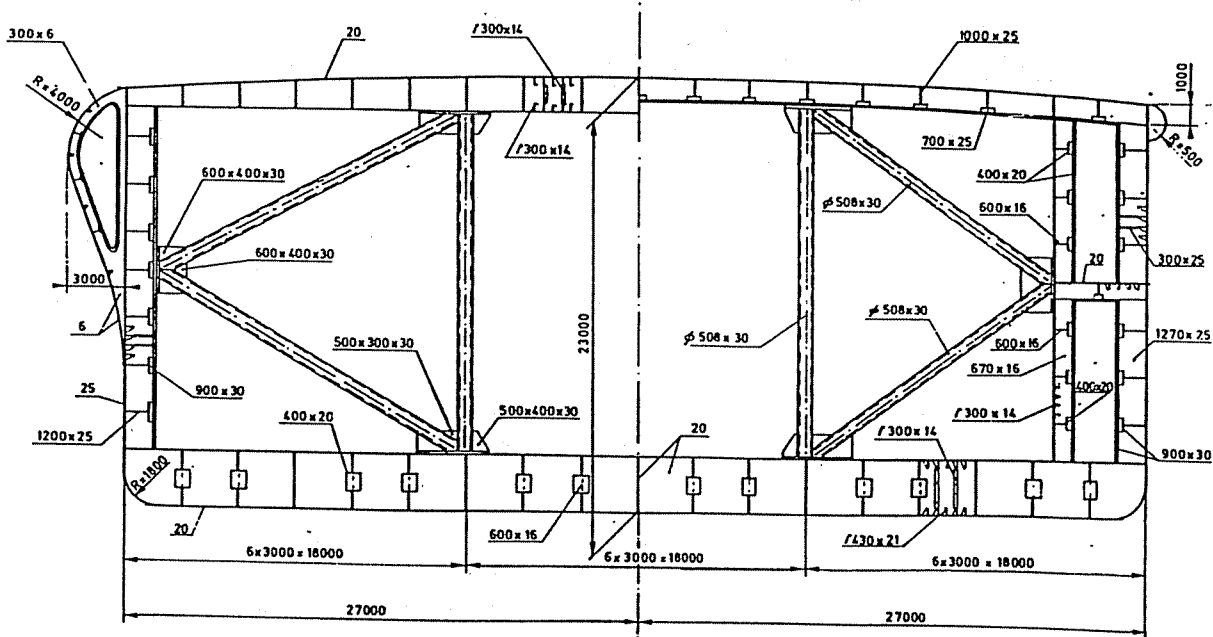
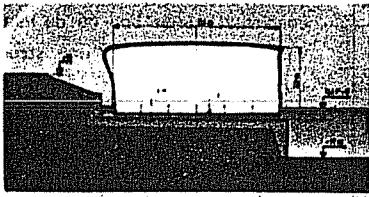
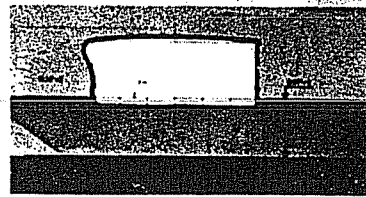


FIG. 26 : Coupe transversale de la porte marée-tempête.
Cross section in the tidal surge barrier.

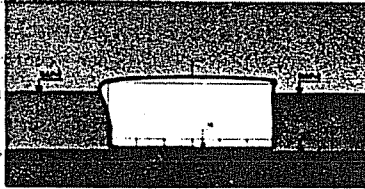
POSITION OUVERTE



EN PHASE DE ROTATION flottaison supportée NAP+2



POSITION FERMÉE



La comparaison entre la figure 33 relative à une travée bi-appuyée et la figure 38 montre que la solution obtenue correspond bien à un encastrement parfait. Les déplacements étant figure 33 de l'ordre de 3 mm et figure 38 moyennement nuls mais avec des résidus de l'ordre du dixième de mm.

Enfin, voyons figures 39 et 40 l'évolution des résultats entre les 2 variantes. On y constate une réduction de la flèche dans un rapport classique de 1 à 5. De plus, le moment global créé par les forces et les moments de bord correspond bien à $P l^2/12$ aux appuis et $P l^2/24$ à mi-portée.

Sur ces graphiques, nous avons reporté les résultats de nos investigations pour différents nombres de termes de la série de Fourier. Un seul terme dans le cas de structures sur appuis simples ou 3 termes pour des structures bi-encastées permettent d'obtenir au moindre coût des résultats satisfaisants. Le nombre de termes optimum est 7; ce choix repose sur expérimentation numérique qui a montré qu'il s'agit là de l'optimum "précision - coût".

III. CONCLUSION.

Le logiciel L.B.R.-3 mis au point permet l'étude complète de nombreuses structures, métalliques et en béton dont notamment les constructions hydrauliques telles que : pont-canal, porte d'écluse, vanne de barrage mobile,...

Les conditions essentielles pour qu'une structure puisse être calculée par ce logiciel sont :

- d'avoir une direction privilégiée selon laquelle elle est développée,
- de se limiter au domaine élastique,
- de se prêter à une discrétisation en tronçons de coques cylindriques (ou plaques)

pouvant être chacune raidies par 3 types de nervures différentes (figure 10).

Les avantages offerts par ce logiciel L.B.R.-3 sont multiples : Il se prête aussi bien au prédimensionnement qu'aux calculs de vérification d'une structure existante. Il 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. Ainsi, l'étude complète d'une structure complexe comme une porte marée-tempête (fig. 26) ou une vanne segment (fig. 14) peut, grâce à ce logiciel, être réalisée endéans les 12 heures. Ce laps

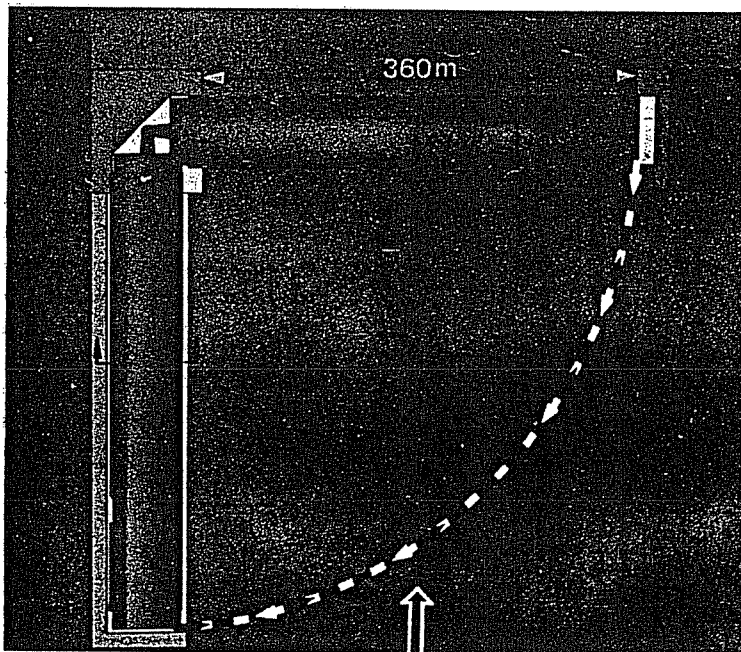


FIG. 27 : Schéma de principe du mécanisme de manoeuvre.
Principle diagram of the operating system.

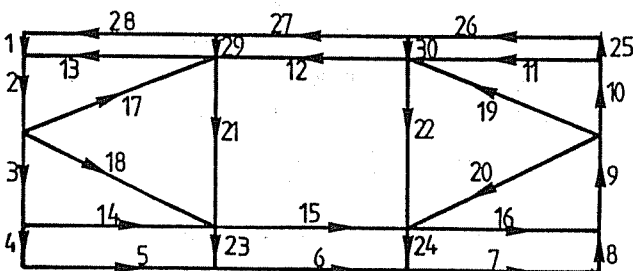


FIG. 28 : Schéma de discrétisation de la structure.
Diagram of the structure discretization.

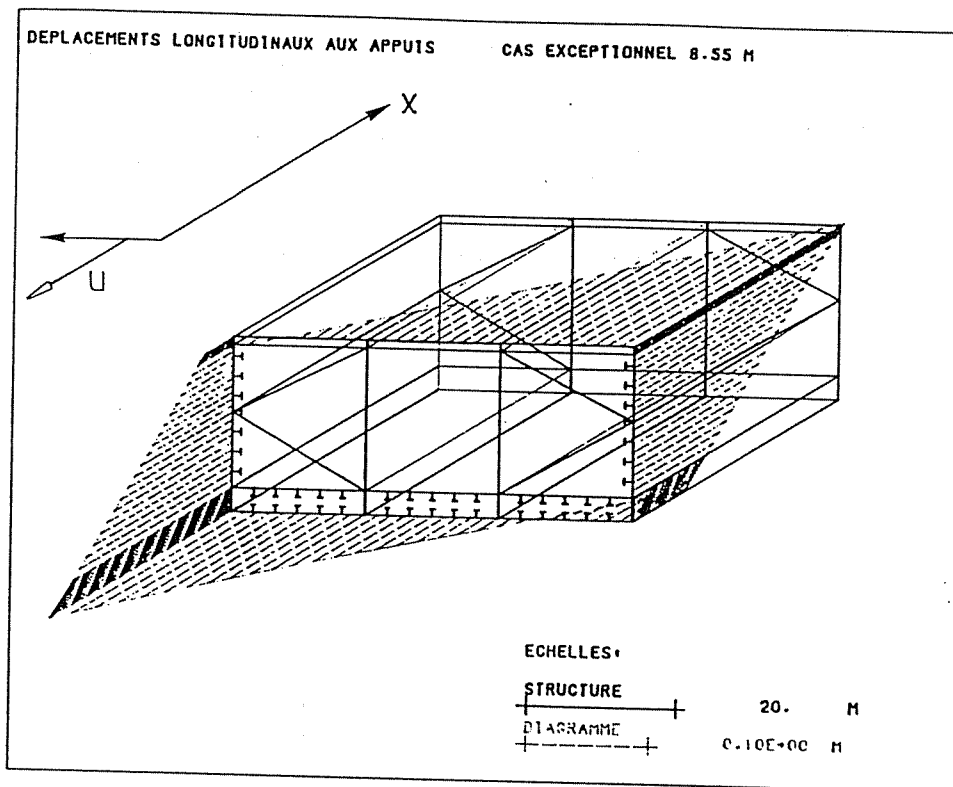


FIG. 29 : Déplacements longitudinaux u aux extrémités.
Longitudinal displacements u at the ends.

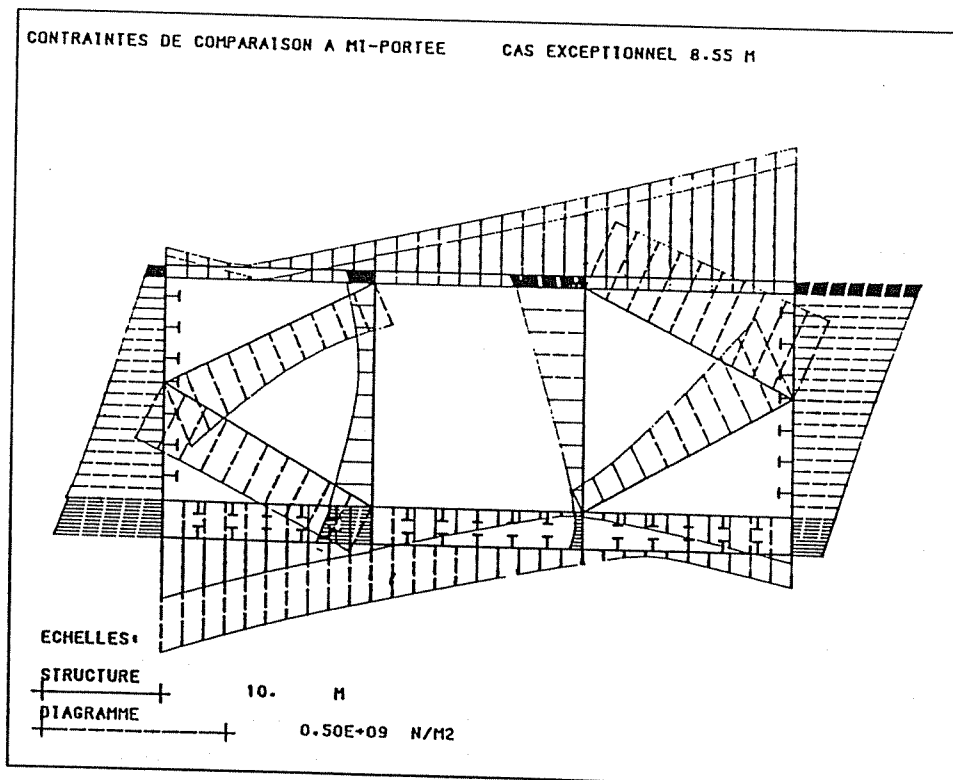


FIG. 30 : Contraintes de comparaison de von-Mises à mi-portée.
von-Mises comparison stresses at the mid-span.

de temps est particulièrement important pour le concepteur qui peut ainsi obtenir rapidement une confirmation du bon ou du mauvais comportement d'une structure qu'il projette.

Le logiciel est, de plus, très aisé d'accès car il n'exige pas une formation importante de la part du nouvel utilisateur. 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).

Les vannes des barrages mobiles étant des structures fort complexes, nous les avons étudiées en détail; notamment afin de mieux y cerner l'influence qu'exercent les bras sur le comportement général de l'ensemble "vanne-bras".

Le calcul d'une porte marée-tempête a montré que le logiciel est d'autant plus efficace et concurrentiel que la structure est importante et fortement raidie.

L'étude d'un pont-canal sur appuis multiples justifie pleinement l'utilisation du logiciel dans les phases de conception et d'avant-projet car il permet dans ce cas précis une optimisation dans le positionnement et dans le dimensionnement des traverses.

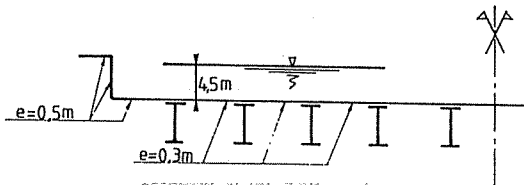


FIG. 31 : Coupe transversale dans le pont-canal.
Cross section in the canal-bridge.

7. E. GELISSEN, P. LOHEST, J.J. PETERS, C. ROTHILDE, N. SCHIEPERS, (1985), "Innovations dans la conception des barrages de la Meuse", 26ème congrès AIPCN.
8. H. BROUWER, (June 1988), "Replacing Wooden Flashboards with Hydraulically Operated Steel Flap Gates", Hydro-Review, vol VII, n°III.
9. DI 3000, (1984), "DI-3000, User's Guide", Precision Visuals Inc., Colorado USA.

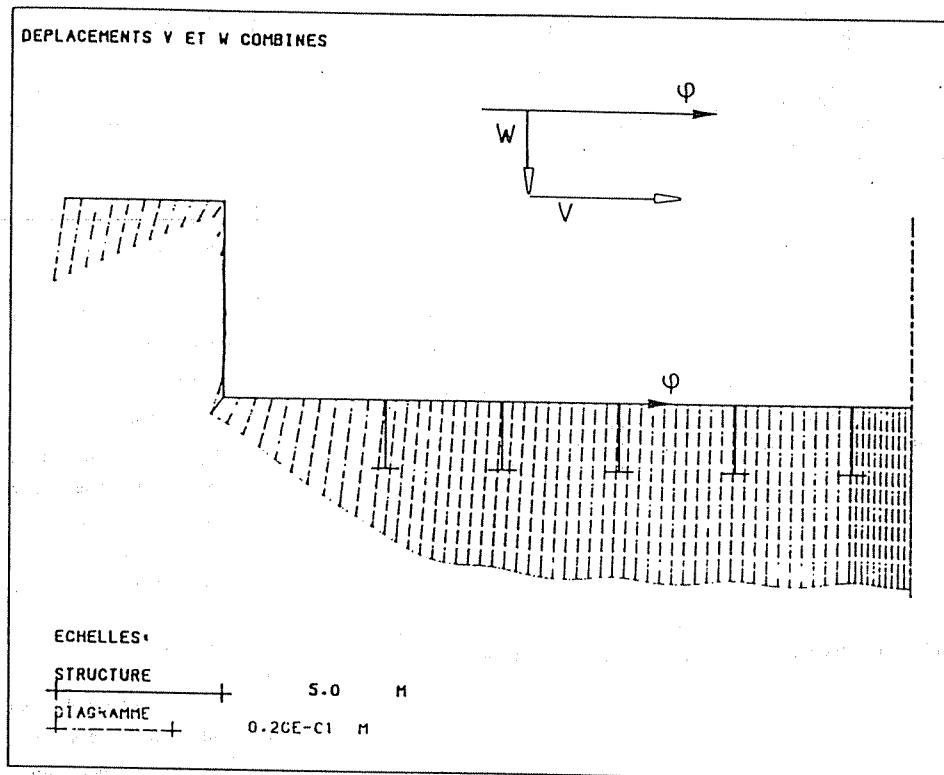


FIG. 32 : Travée sur appuis simples, diagramme du déplacement transversal (w et v) à mi-portée.
Span simple supported, diagram of transversal displacement (w and v) at the mid-span.

REFERENCES

1. N.M. DEHOUSSE, Ph. RIGO, (1987), "Le réglage des niveaux par barrages mobiles pour des ouvrages à faibles retenues", Bulletin n°57 de l'AIPCN.
2. G. WICKERT, G. SCHUMAUER, (1971), "Stahlwasserbau", Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New-York.
3. Ph. RIGO, (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.
4. 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. n°1, Liège.
5. A. JAKOBSEN, (1958), "Die Berechnung der Zylinderschalen", Springer-Berlin.
6. L.H.C.H., (1987), "Stormvloedkering, Nieuwe Waterweg", Rapport interne du LECN de l'Université de Liège.

SUMMARY

L.B.R.-3
THE COMPUTATION AND DESIGN SOFTWARE FOR
THE STIFFENED HYDRAULIC STRUCTURES
(locks, navigation-dam sluices,...).

COMPUTATION AND DESIGN OF THE HYDRAULIC STRUCTURES.

The L.B.R.3 software for stiffened sheathings has especially been designed for the study of the stiffened hydraulic structures. The basic elements (fig.1 and 9) are plates and shells stiffened by ribs (longitudinal and transverse stiffeners and cross-bars). The L.B.R.-3 software principle is founded on an analytic resolution of the differential equations governing orthotropic cylindrical shells in accordance with the D.K.J. method. For the 8th degree differen-

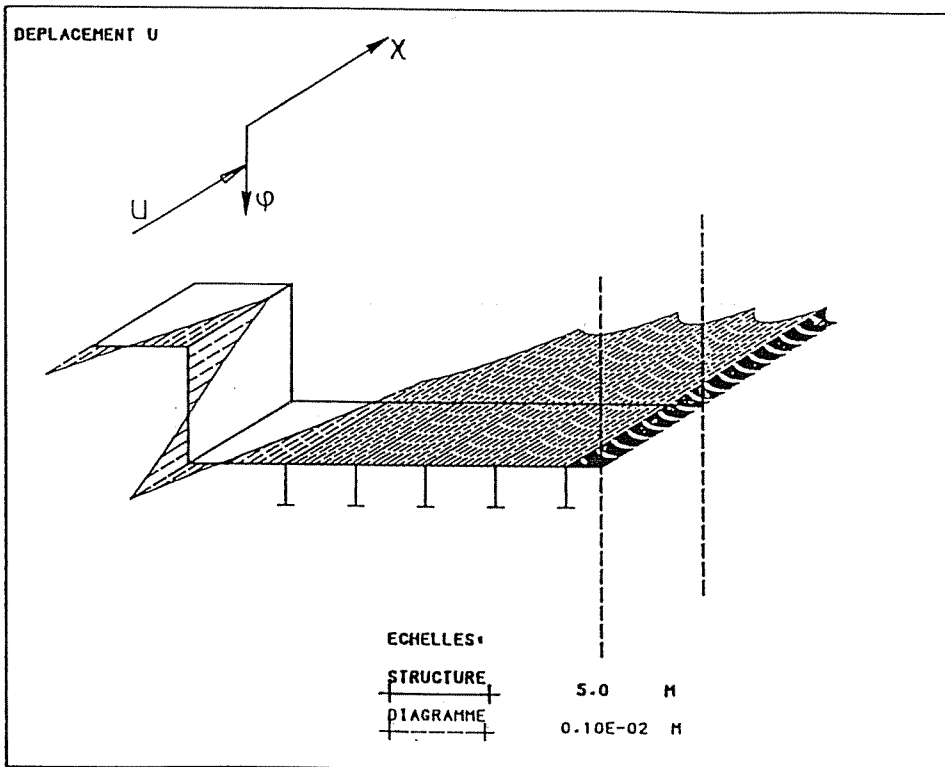


FIG. 33 : Travée sur appuis simples, diagramme des déplacements longitudinaux u aux extrémités.
Span simple supported, diagram of the longitudinal displacement u at the ends.

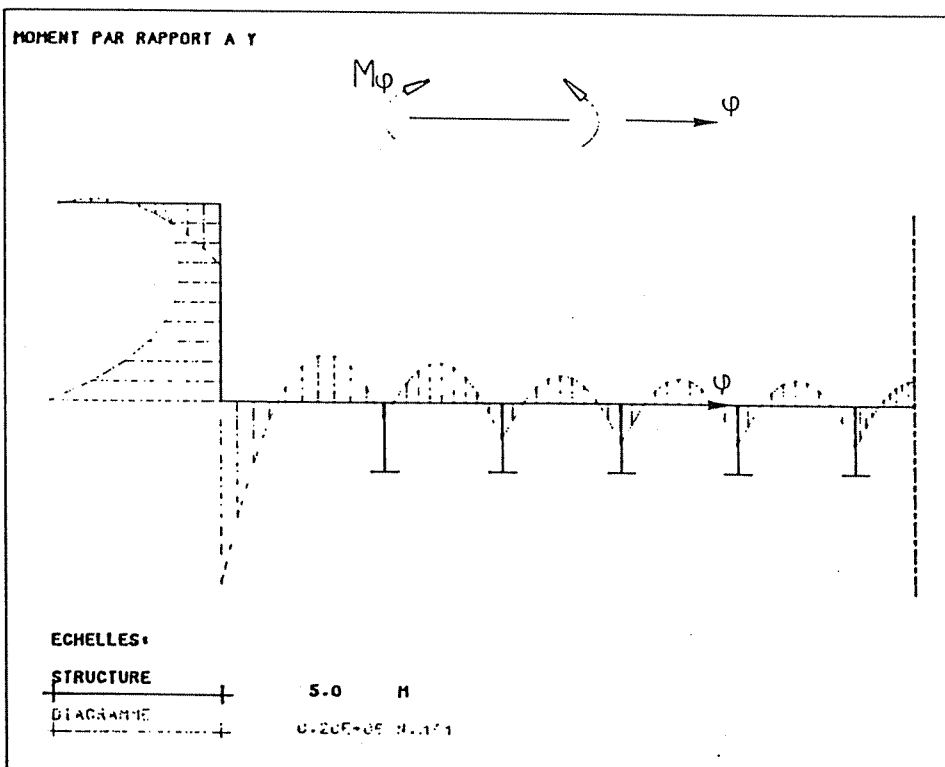


FIG. 34 : Travée sur appuis simples, diagramme des moments transversaux M_ϕ mi-portée.
Span simple supported, diagram of transversal bending M_ϕ at the mid-span.

tial equation resolution we use the Fourier series developments of which the figures 3, 4, 5 and 6 are some examples.

The loads (fig. 2) can be pressure forces (X, Y, Z) or bending moments (M_x and M_ϕ). With L.B.R.-3 of which the figure 10 shows the algorithm, it is possible to apply torsion forces (fig. 7 and 8).

The qualities and the advantages of the L.B.R.-3 software are quickness, simplicity, reliability, performance and its opening to every one. These features are shown through three applications (navigation-dam sluice, tidal surge barrier and canal-bridge).

About the design of a modern navigation-dam (fig. 11, 12, 13 and 14), our study is concentrated on the main gate body of a radial gate (fig. 15, 16, 19, 20, 21 and 22) and on the interaction between the rigidity of the supporting arms (fig. 17) and the gate body (fig. 23 and 24).

The pilot study of a tidal surge barrier (fig. 25, 26 and 27) shows more specifically that the L.B.R.-3 software is very efficient when the stiffening becomes particularly important (fig. 29 and 30). The structure discretization of small shell and plate elements (fig. 18 for the radial gate and fig. 28 for the surge tidal barrier), the number of required data and the L.B.R.-3 software performances show that the computing time for these structures (with the data entry and the result interpretation) can be reduced to, respectively 8 and 12 hours.

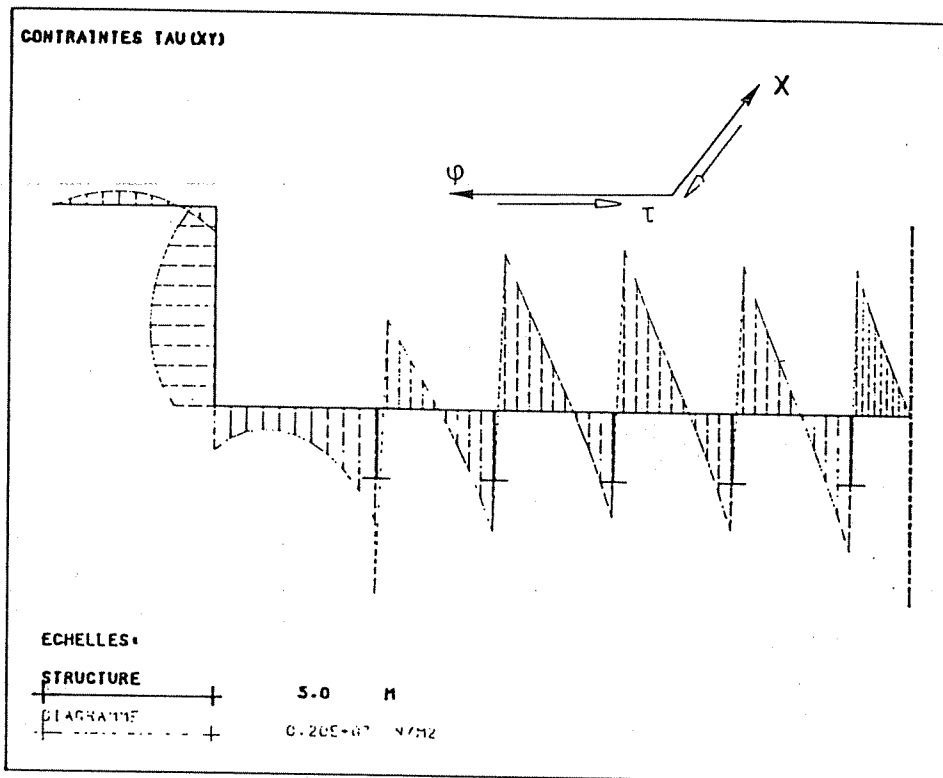


FIG. 35 : Travée sur appuis simples, diagramme des contraintes tangentielles $\tau_{x,\varphi}$ aux extrémités dans le tablier.
Span simple supported, diagram of the shearing stresses $\tau_{x,\varphi}$ at the ends in the deck.

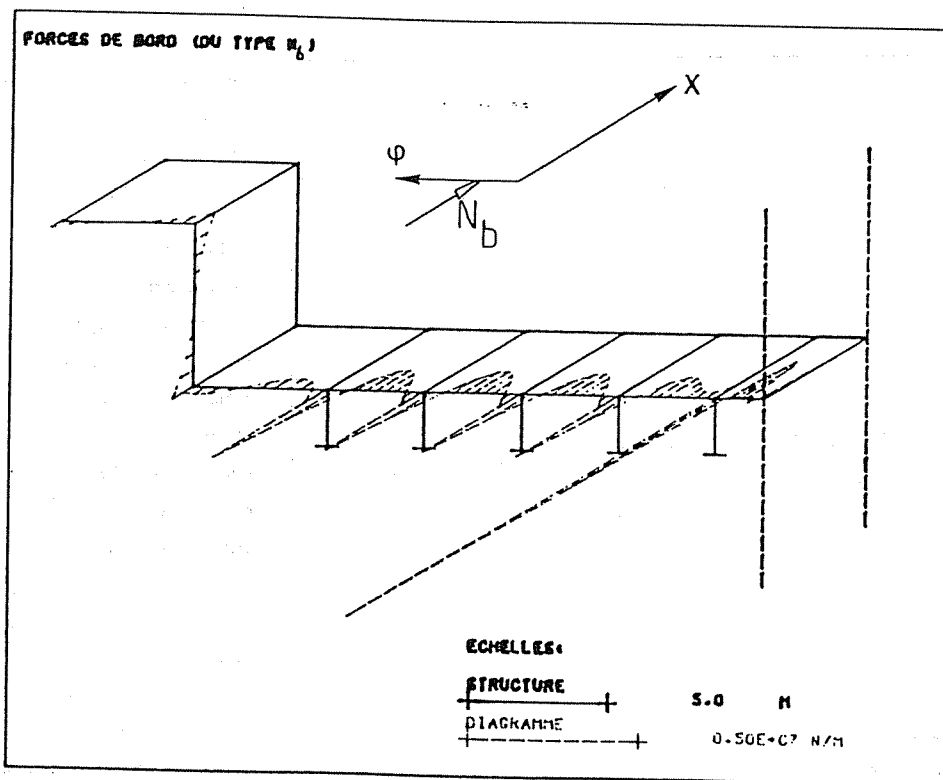


FIG. 36 : Travée bi-encastée, forces de bord N_b nécessaires pour annuler les déplacements u et rotations dw/dx aux extrémités.
Clamped span, edge forces N_b necessary to cancel the displacements u and the rotations dw/dx at the ends.

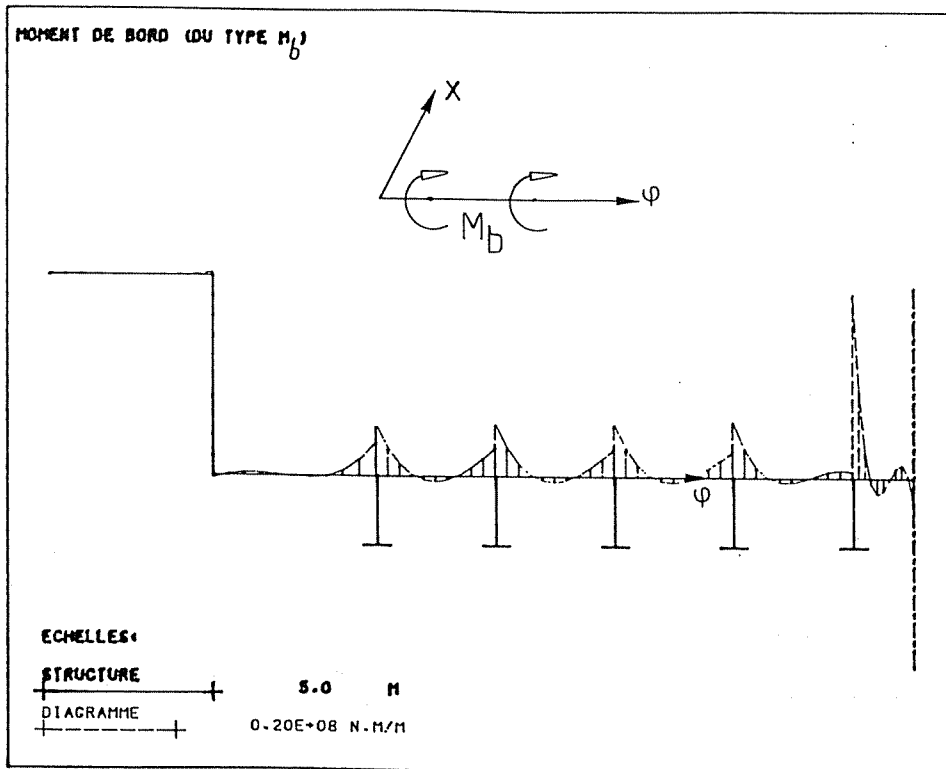


FIG. 37 : Travée bi-encastée, moments de bord M_b nécessaires pour annuler les déplacements u et rotations dw/dx aux extrémités.
 Clamped span, edge bendings M_b necessary to cancel the displacements u and the rotations dw/dx at the ends.

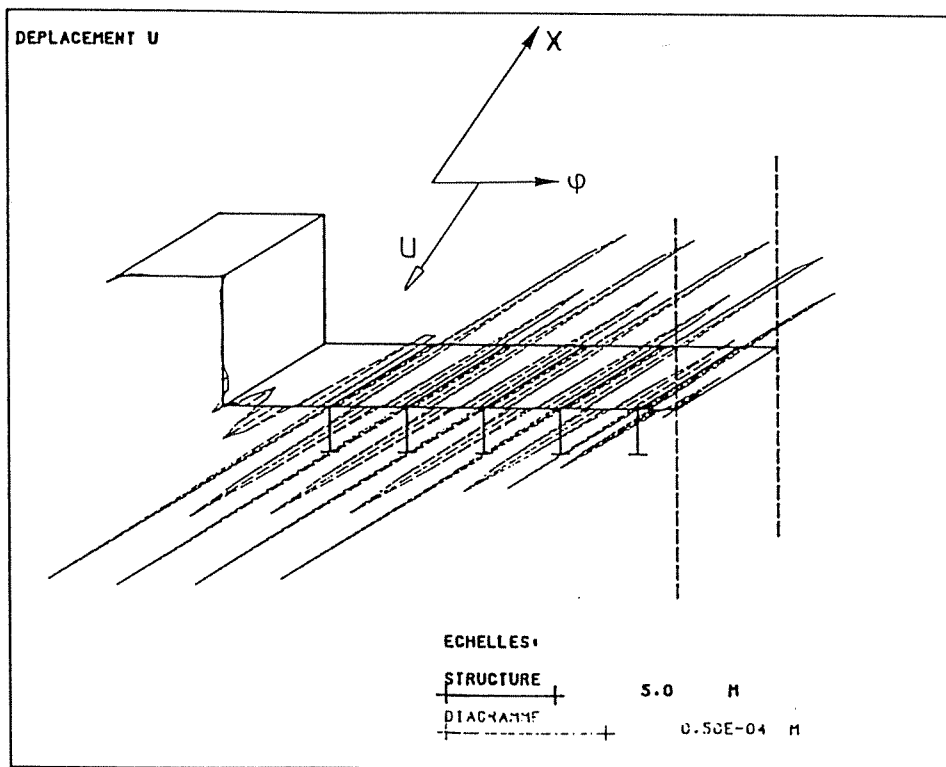


FIG. 38 : Travée bi-encastée, déplacements longitudinaux résiduels u dans les sections d'extrémités.
 Clamped span, resulting longitudinal displacements u in the end sections.

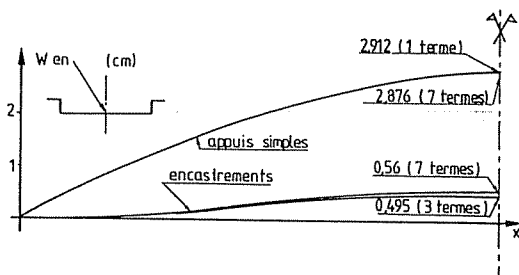


FIG. 39 : Travée bi-encastree, déplacement vertical w au niveau de l'axe central d'une travée.
Clamped span, vertical displacement w along the central line of the span.

In the last application to a canal-bridge (fig. 31) we show that a large range of end conditions can be simulated with the edge forces (fig. 36) and the edge bendings (fig. 37); for example : simply supported, clamped, elastically supported,... Therefore, we have studied a simply supported span (fig. 32, 33, 34 and 35) which is compared with a clamped span (fig. 38, 39 and 40).

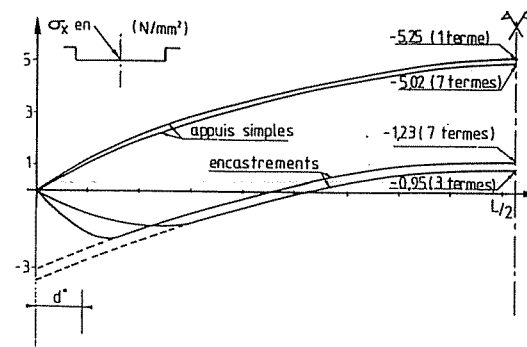


FIG. 40 : Travée bi-encastree, contrainte longitudinale σ_x au niveau de l'axe central d'une travée.
Clamped span, longitudinal stresses σ_x along the central line of the span.

We conclude by recalling of the essential conditions to utilize the L.B.R.-3 software as well as its advantages. The method assures that the solution is always exact because the resolution principle is based on an analytic one. Moreover, L.B.R.-3 does not require any special training and is suitable for most cylindrical hydraulic structures (lock gate, sluice, slab, shelving, bridge deck,...).