

**MEMORIAS**  
**del**

**V**

**CONGRESO ECUATORIANO  
DE HIDRAULICA**

**23 al 26 noviembre 1988**

**Quito - Ecuador**

**AEHid  
CICP**

**V CONGRESO NACIONAL DE HIDRAULICA  
NOVIEMBRE 1988, QUITO-ECUADOR**

NOMBRE: Philippe RIGO, Docteur en Sciences Appliquées

CARGO : Assistant, chercheur à l'Université de Liège.

TITULO DEL TRABAJO :

**CALCUL ET CONCEPTION DES OUVRAGES METALLIQUES  
HYDRAULIQUES.  
APPLICATIONS AUX VANNES DES BARRAGES  
MOBILES.**

TEMA : Investigacion de Gabinete

Institucion : Université de l'état de Liège, Faculté des Sciences appliquées, Laboratoires d'Hydrodynamique, d'Hydraulique Appliquée, des Constructions Hydrauliques et Navales (L.H.C.N), Institut du Génie Civil, 6 quai Banning, B4000 Liège, Belgique.

**RESUME**

Une proposition de vanne segment en une pièce est développée pour l'aménagement des cours d'eau de faible profondeur afin de permettre la navigation intérieure, l'installation de centrales hydro-électriques ou l'irrigation. Pour le calcul de ces vannes, le logiciel des bordages raidis est un outil performant permettant notamment de mettre en évidence l'effet favorable des bras au niveau des contraintes et déplacements dans la vanne.

**RESUMEN**

Una proposicion de una COMPUERTA SEGMENTO fué desarrollada para la utilizacion en la elevacion del nivel del agua en cursos de poca profundidad, permitiendo asi realizar actividades como : La navegacion de interior, instalacion de centrales hidroeléctricas, irrigacion, etc. Para el calculo de estas compuertas, el PROGRAMA DE LOS BORDES RIGIDOS es una herramienta eficaz que permite particularmente poner en evidencia el efecto favorable de los brazos, a las tensiones y desplazamientos de la misma.

**ABSTRACT**

For low heads (3 to 5 m), we suggest to build single element barrages, which can be listed and lowered, and which is applied as a radial gate. This system is very efficient to provide for navigation, the building of hydro-electric power stations, or to ensure irrigation. We use a code computing for the study of this radial gate and this code is very performant for the computations of the hydraulic orthotropic steel structures. It allows us to optimize the shape of the gate taking into account the positive effect of the supporting arms.

**I. INTRODUCTION.**

L'existence des barrages mobiles est une condition fondamentale pour le développement de la navigation fluviale et pour l'installation de centrales hydro-électriques. Ces barrages permettent en effet de conserver un tirant d'eau suffisant pour autoriser la navigation des unités de transport dans les meilleures conditions et ce, le plus grand nombre de jours possible par an.

Dans le principe, leur rôle est de maintenir les niveaux d'eau entre deux niveaux de référence : le niveau inférieur devant garantir une aisance suffisante aux bateaux et le niveau supérieur devant, quant à lui, limiter les débordements en amont du barrage mobile.

## II. RAPPEL DES BARRAGES MOBILES EXISTANTS.

### II.1. Les anciens barrages à commande manuelle.

Les plus connus en Europe sont sans aucun doute les barrages à aiguilles, à fermettes, à poutrelles, à hausses. La figure 1 donne à titre d'exemple la vue en coupe transversale d'un barrage à fermettes et aiguilles. Dans ces barrages, la bouchure est réalisée par des aiguilles, c'est-à-dire des pièces de section carrée disposées verticalement ( ou sous une faible pente vers l'aval ).

Elles prennent appui au bas sur un seuil en saillie et sont retenues à la partie supérieure par un dispositif qui peut être un câble tendu, une poutre, ... . Placées jointivement, les aiguilles travaillent indépendamment et forment une paroi plus ou moins étanche. Le paramètre fondamental en ce qui concerne la résistance des aiguilles est la hauteur de la retenue. En effet, c'est celle-ci qui conditionne totalement la charge à supporter ; la largeur de la passe n'ayant ici aucune influence. Les contraintes liées à la manutention conduisent à des dimensions très réduites de ces aiguilles ; par exemple 15cm x 15cm de section.

Le nombre d'éléments composant la bouchure étant très important, la précision du réglage du débit évacuable est très bonne. Mais par contre, l'étanchéité devient fort aléatoire vu le grand nombre d'éléments constitutifs entre lesquels aucun dispositif d'étanchéité spécifique n'est prévu et la vitesse d'exécution des opérations de manœuvre est fortement réduite avec l'accroissement du nombre d'éléments à déplacer. De plus, le danger pour les barragistes qui effectuent ce travail n'est pas négligeable, et nombre de mesures de sécurité ont dû être prises au cours du temps pour le réduire.

Ces considérations s'appliquent dans leur principe à tous les anciens barrages composés d'un grand nombre de petits éléments ; poutrelles, fermettes et hausses.

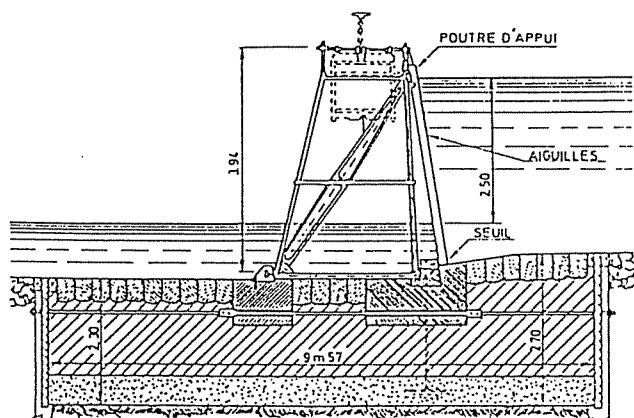


Figure 1. Barrage mobile à aiguilles.

## II.2. Les barrages mobiles à commande électro-mécanique.

L'évolution des techniques, à savoir le développement de la connaissance des matériaux, l'élaboration de nouvelles techniques de calcul plus performantes, la tendance à l'automatisation, ont conduit au remplacement des barrages les plus anciens par des systèmes à segment, à secteur, à clapet,...., à vanne levante, ... , dont la figure 2 montre un exemple désormais classique. Ces barrages sont tous caractérisés par un nombre réduit d'éléments constitutifs.

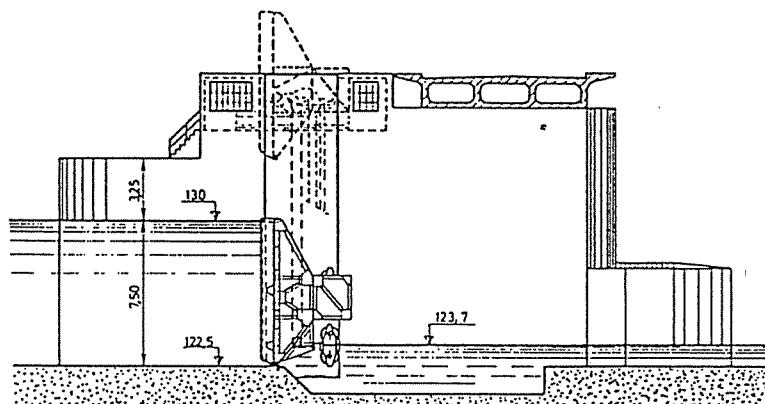
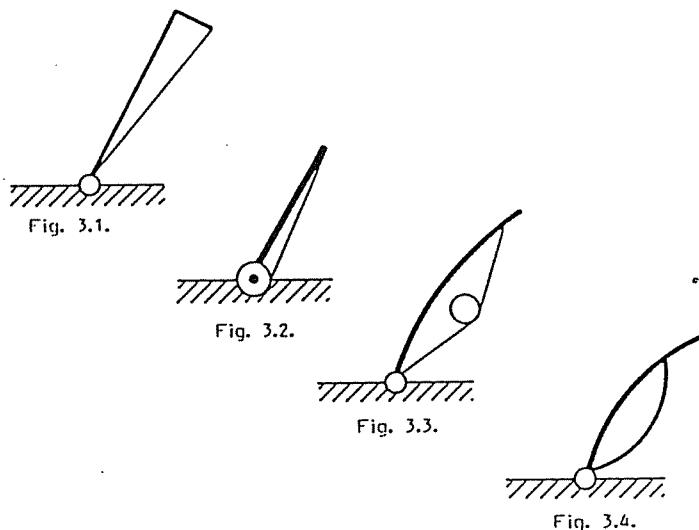


Figure 2. Coupe transversale dans une vanne levante en une pièce.

L'élément principal couvre à lui seul la totalité du pertuis et la manoeuvre se fait à l'aide de câbles, chaînes ou vérins. Dans ces conditions, l'étanchéité est très bonne vu ce nombre réduit d'éléments constituant la bouchure. Il en résulte une grande sécurité pour le personnel de contrôle et une grande vitesse d'exécution des manoeuvres. N'ayant souvent qu'un seul élément pour régler le débit, la précision des manoeuvres à effectuer doit cependant être d'un très haut niveau, pas toujours aisée à atteindre en pratique. La recherche de la finesse de réglage que permettaient les anciens barrages mobiles du fait de la multiplicité des éléments constitutifs, a été réalisée par l'utilisation de vannes en deux parties : vanne et vannette. La partie supérieure (vannette) étant manoeuvrée pour l'évacuation des faibles débits, le corps principal (vanne) restant fixe. Ce n'est qu'en période de crue que l'ensemble est manoeuvré. En effet, le réglage du débit est plus aisé à obtenir lors d'un écoulement de surface que lors d'un écoulement par lame de fond. Connaissant cette règle, le concepteur actuel place couramment une vannette sur ou au-dessus du corps principal de la vanne. Celui-ci reposant sur le radier, peut rester en place la plus grande partie de l'année, seule la vannette se déplaçant à la partie supérieure du corps principal assure la régulation. Une attention particulière doit donc être portée sur la courbe des débits classés de la rivière afin de déterminer la fréquence de chaque type d'écoulement.

En outre, il y a intérêt à réduire le nombre de piles en rivière c'est-à-dire à augmenter la longueur des pertuis, l'objectif à atteindre étant : une longueur utile d'écoulement la plus grande possible sans élargir la voie d'eau au droit du barrage. L'accroissement des portées est permise par l'utilisation de plus en plus fréquente de vannes en caisson : structures fermées résistant bien à la torsion mais aussi à la flexion quel qu'en soit le sens.

La figure 3 retrace brièvement l'évolution de forme des corps de vanne à clapet. Les formes données à leur section transversale tenant compte des efforts sollicitants et des progrès réalisés en construction métallique ont évolué comme suit :



- Fig. 3.1 - bordé en forme d'équerre raidi appuyé sur le radier sur de très nombreux appuis, par suite du peu de rigidité à la torsion.
- Fig. 3.2 - bordé plan raidi fixé sur une poutre tubulaire prenant appui sur le radier par des paliers en nombre limité, la poutre tubulaire résistant bien à la torsion.
- Fig. 3.3 - abandon du bordé plan et profilage de façon à lui donner une forme hydro-dynamique plus favorable l'écoulement des eaux : la poutre de ne doit pas nécessairement se trouver à l'axe de torsion.
- Fig. 3.4 - le clapet est constitué par une poutre tubulaire en forme de lentille dont le bordage fait partie; selon les dimensions de la section transversale, il y a ou non un tube anti-torsion.

L'accroissement de la rigidité torsionnelle permet en outre de songer à ne manoeuvrer la pièce que d'un seul côté.

Ayant considéré ces divers paramètres, on aboutit à la conclusion qu'il n'est pas possible de définir un type de barrage mobile s'adaptant à toute la gamme des retenues existantes. En effet, pour des retenues de grandes hauteurs (10 à 20 m), le système de vanne et vannette semble particulièrement bien indiqué pour atteindre des portées élevées (30 m), tout en assurant une bonne régulation du débit (fig. 4). Il en est autrement des retenues plus faibles (3 à 5m), pour lesquelles la conjugaison d'emploi du système à vanne et vannette, avec des portées élevées conduit à un manque évident de rigidité de chacune des 2 parties de la vanne (figure 5).

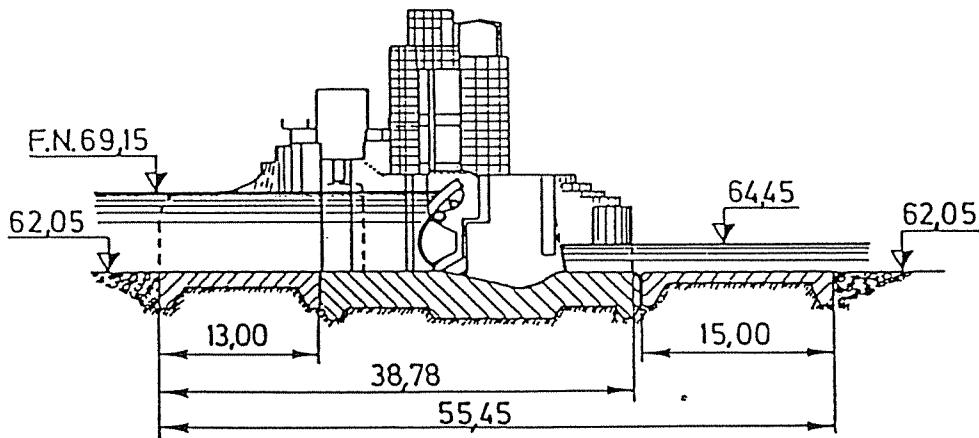


Figure 4. Barrage à vanne levante composée d'un corps de vanne principal en caisson et d'un clapet à la partie supérieure.  
-Hauteur de la retenue = 7 m-

Il ne semble donc pas raisonnable d'implanter dans des biefs de faible retenue des ouvrages calqués sur des barrages existants correspondant à des retenues beaucoup plus grandes (10 à 20m) où le problème de la rigidité ne se pose pas (figure 6).

### III. PROPOSITION D'UN BARRAGE MOBILE NE COMPORTANT QU'UNE VANNE PAR PERTUIS (figure 6).

Pour pallier le manque de rigidité et pour simplifier la commande du barrage, il est suggéré d'employer un système de barrage mobile en une seule pièce, couvrant en hauteur toute la retenue (réf. 1). Comme décrit plus haut, il permettra l'évacuation des petits débits et des glaces par un écoulement de surface ; les débits de crues et les débits solides éventuels étant évacués par un écoulement de fond. On observe sur la figure 6 que ce système de vanne unique a été adapté à la vanne segment (réf. 2) mais il pourrait l'être également à la vanne levante qui serait de ce fait aussi baissante. La comparaison des figures 5 et 6 montre nettement la moindre rigidité de la version vanne et vannette (fig.5) par rapport à la solution à pièce unique (fig.6) pour un même écoulement total.

La manœuvre se fait à l'aide de vérins hydrauliques placés entre les deux bras et les piles. Le choix d'une vanne unique a de plus l'avantage d'économiser les systèmes mécaniques (vérins, pompes) ainsi que les systèmes de régulation et de commande nécessaires à la manœuvre de la vannette.

L'étanchéité au pied de la vanne est particulièrement importante vu que celle-ci ne repose jamais sur le radier, les vérins étant en permanence en charge. L'évolution des techniques au niveau des vérins hydrauliques permet la conception de tels vérins. On notera l'importance du choix du positionnement des vérins, de manière à conserver ceux-ci en permanence hors de l'eau. Les points d'attache des vérins, d'une part sur le bras de la vanne segment et d'autre part

sur la pile, conditionnent totalement le diagramme des efforts dans les vérins pour une position donnée de la vanne.

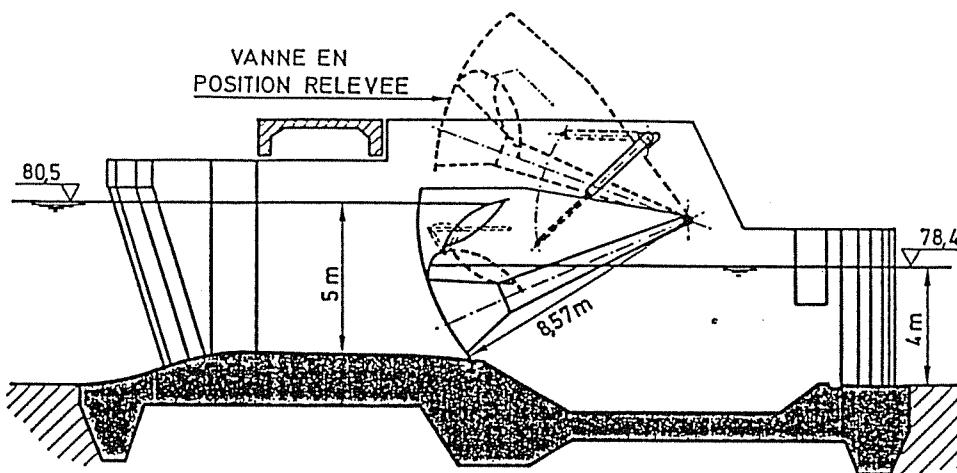


Figure 5. Vue de la vanne segment traditionnelle.  
- Vanne et vannette -

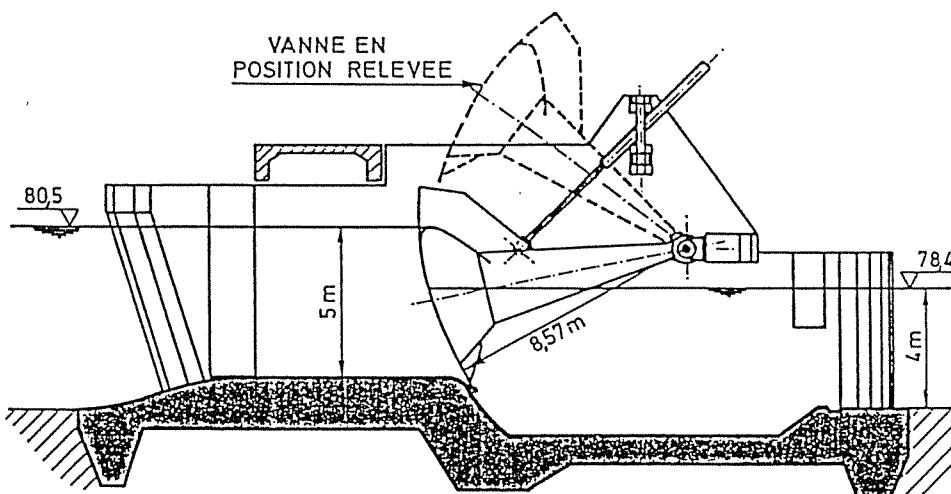


Figure 6. Vue de la vanne segment à corps unique, levante et baissante.

#### IV. CALCUL DE LA VANNE SEGMENT A L'AIDE DU LOGICIEL DES BORDAGES RAIDIS.

Le calcul des vannes segments s'effectue traditionnellement sans tenir compte de la collaboration des bras à la flexion et à la torsion de la vanne. Afin de préciser les champs de déplacement et de contrainte réels au sein de la vanne, nous avons voulu dans notre étude tenir compte de la présence des bras. Pour ce faire, un calcul de l'ensemble de la structure (vanne et bras) a été réalisé à l'aide du logiciel des bordages raidis. Avant de préciser les résultats obtenus, nous présentons d'abord ce logiciel (réf. 3).

#### IV.1. Principe du logiciel des bordages raidis.

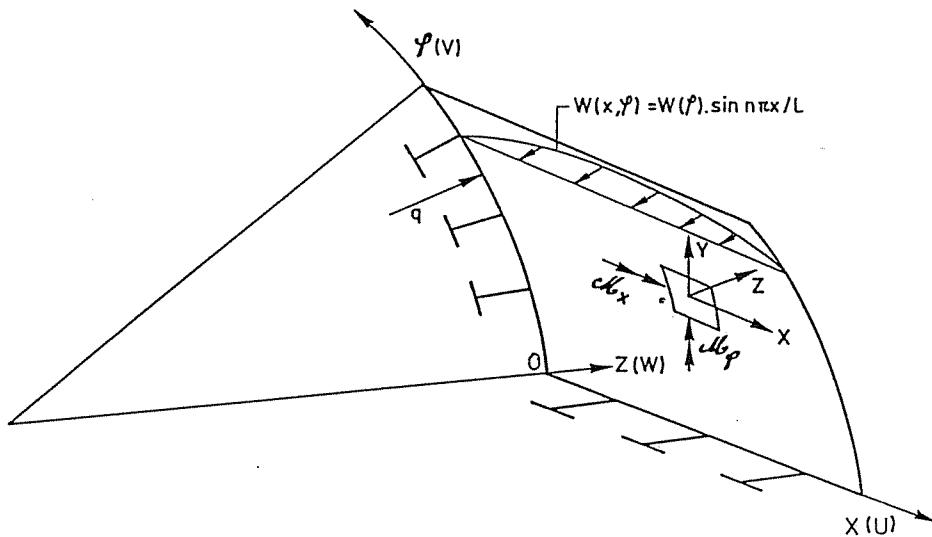


Figure 7. Coque cylindrique raidie.

Cette méthode de calcul des plaques et des coques cylindriques (figure 7) 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 sont issues de la méthode de Donnell, von Karman et Jenkins (réf. 4).

L'élément de base est la coque cylindrique et le système de coordonnées dont on fait usage est représenté figure 7. 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 schématisée est celle du feuillet moyen et c'est à partir d'elle que sont comptées les coordonnées Z positivement vers le haut. Nous étudions donc un élément de coque compris entre les surfaces d'intrados et d'extrados de la coque. A cet élément associons-y les efforts unitaires et les moments unitaires calculés par rapport à la surface moyenne. On les nommera  $N_x$ ,  $N_\phi$ ,  $N_{x\phi}$ ,  $N_{\phi x}$ ,  $Q_x$ ,  $Q_\phi$ ,  $M_x$ ,  $M_\phi$ ,  $M_{x\phi}$  et  $M_{\phi x}$ ; à titre d'exemple voici les expressions de  $N_x$  (1) et  $M_x$  (2).

$$N_x = (E \delta / (1 - \nu^2) q) \cdot (u' q + \nu v^\circ + \nu w) + f(\phi) (E/d_x) \cdot (u' \omega_x - w'' h_x) \quad (1.)$$

$$M_x = (E \delta^3 / (1 - \nu^2) q^2) \cdot (q^2 w'' + \nu w^{\circ\circ}) - f(\phi) (E/d_x) \cdot (u' h_x - w'' I_x) \quad (2.)$$

La surface moyenne reçoit la charge extérieure et celle-ci peut être subdivisée comme ceci (figure 7).

- $X, Y, Z$  les pressions spécifiques en  $N/m^2$
- $\mathcal{M}_x, \mathcal{M}_\varphi, \mathcal{M}_z$  les moments spécifiques en  $N.m/m^2$

Cela étant, nous pouvons écrire les 6 équations d'équilibre (3 à 8) contenant les 10 grandeurs inconnues nommées ci-avant.

$$N'_x + N^\circ_{\varphi x} / q + X + g_x \delta = 0 \quad (3.)$$

$$N^\circ_\varphi / q + N'_x \varphi - Q_\varphi / q + Y + g_\varphi \delta = 0 \quad (4.)$$

$$N_\varphi / q + Q^\circ_\varphi / q + Q'_x = Z + g_z \delta \quad (5.)$$

$$M^\circ_\varphi / q + M'_x \varphi - Q_\varphi + \mathcal{M}_x = 0 \quad (6.)$$

$$M'_x + M^\circ_{\varphi x} / q - Q_x - \mathcal{M}_\varphi = 0 \quad (7.)$$

$$N_{x\varphi} - N_{\varphi x} + M_{\varphi x} / q + \mathcal{M}_z = 0 \quad (8.)$$

A ce point aucune hypothèse n'a été émise, néanmoins si l'on veut résoudre le problème, il faut introduire les simplifications 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 << rayon)
  - de faibles déformations
  - et les hypothèses dites de Love-Kirchhoff

Ces dernières conditions correspondent en fait à imposer une variation linéaire des contraintes selon l'épaisseur de la coque.

Cela permet d'écrire les expressions des efforts et moments unitaires en fonction des seuls déplacements  $u, v$  et  $w$ , avec  $D$  et  $K$  des constantes dépendant uniquement du matériau (à savoir du module de Young et du coefficient de poisson) et de l'épaisseur  $\delta$  de la coque. En remplaçant les efforts et moments unitaires (1 et 2) par leurs expressions analytiques dans les 6 équations (3 à 8), on obtient après calcul 3 équations différentielles à coefficients constants (9 à 11).

Ces 3 équations (9),(10) et (11) relative à une coque cylindrique raidie sont fonction des déplacements  $u, v, w$  et de leurs dérivées et s'écrivent:

$$\begin{aligned} \frac{D}{q} (u'' q + v v'' + w') + \frac{D}{q^2} \cdot \frac{1-v}{2} (u'''' + q v'') + f(x) \left[ \frac{S_\varphi}{q} (v'') + \frac{u''''}{q} \right] \\ + f''(\varphi) \frac{1}{q} \left[ S_x (v') + \frac{u''}{q} \right] + f(\varphi) \left[ \Omega_x u''' - H_x w'''' + \frac{S_x}{q} (v'') + \frac{u''''}{q} \right] + X = 0 \end{aligned} \quad (9.)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{D}{q^2} (v^{00} + w^{00} + v q u^{00}) + \frac{D}{q} \cdot \frac{1-v}{2} (u^{00} + q v^{00}) + f(x) \left[ \frac{\Omega}{q^2} (v^{00} + w^{00}) \right. \\
& \left. - \frac{H_\varphi}{q^3} w^{000} + S_\varphi (v^{00} + \frac{u^{00}}{q}) \right] + f'(x) \left[ S_\varphi (v^{00} + \frac{u^{00}}{q}) \right] + f(\varphi) \left[ S_x (v^{00} + \frac{u^{00}}{q}) \right] \\
& + Y = 0
\end{aligned} \tag{10.}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{D}{q^2} (v^{00} + w^{00} + v q u^{00}) + \frac{K}{q^4} w^{0000} + \frac{2K}{q^2} w^{0000} + \frac{K}{q^2} w^{0000} q^2 \\
& + f(x) \left[ \frac{\Omega}{q^2} (v^{00} + w^{00}) - \frac{2H_\varphi}{q^3} w^{00} - \frac{H_\varphi}{q^3} v^{000} + \frac{R_\varphi}{q^4} w^{0000} + T_\varphi \frac{w^{0000}}{q^2} \right. \\
& \left. + L_\varphi \frac{1}{q} (v^{000} + \frac{u^{000}}{q}) \right] \\
& + f(\varphi) \left[ T_x \frac{w^{0000}}{q^2} + L_x \frac{1}{q} (v^{000} + \frac{u^{000}}{q}) - H_x u^{000} + R_x w^{0000} \right] \\
& + f''(\varphi) \frac{1}{q} \left[ T_x \frac{w^{0000}}{q^2} + L_x (v^{000} + \frac{u^{000}}{q}) \right] \\
& + f'(x) \left[ \frac{T_\varphi}{q^2} w^{000} + \frac{L_\varphi}{q} (v^{000} + \frac{u^{000}}{q}) \right] = - \frac{M_x}{q} + M_\varphi + Z
\end{aligned} \tag{11.}$$

Remarque : Les fonctions  $f''(\varphi) = df(\varphi)/d\varphi$  et  $f'(x) = df(x)/dx$  dérivées de fonctions de Heaviside, sont des fonctions de Dirac et sont nulles partout sauf au droit des nervures où elles valent 1. (réf 6)

Le processus de résolution de ce système (9 à 11) est celui utilisé jadis par Jakobsen et Eggwertz (ref 5). Il consiste à ramener le problème à un système classique de 3 équations à 3 inconnues dont les coefficients sont des opérateurs de dérivation et les inconnues les déplacements  $u$ ,  $v$  et  $w$ .

Après élimination des  $u$ ,  $v$  et  $w$ , on obtient une équation différentielle en  $w$  du 8ème ordre à 2 variables,  $x$  et  $\varphi$ . Mais afin d'obtenir une équation à variable séparée, on est astreint à poser

$$w(x, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} w(\varphi) \sin(n\pi x/L) \tag{12}$$

Ce qui se traduit pour le premier terme du développement en série par

$$w = w(x, \varphi) = w(\varphi) \sin(n\pi x/L) \tag{13}$$

$$v = v(x, \varphi) = v(\varphi) \sin(n\pi x/L) \tag{14}$$

$$u = u(x, \varphi) = u(\varphi) \cos(n\pi x/L) \tag{15}$$

La conséquence de ce choix (13 à 15) est qu'il nous faudra décomposer également toutes les charges extérieures en série de Fourier. De plus, ce choix impose les conditions d'appuis aux extrémités en  $x=0$  et  $x=L$ . En effet, vu l'expression de  $w(x, \varphi)$ , on aura toujours  $w$  et  $M_x$  nuls en  $x=0$ . Cette sévère limitation à la méthode peut être supprimée par l'adjonction des effets de bord, forces longitudinales  $Y$  et moments de bord  $M_\varphi$  (figure 9)

Dans les 3 équations (9),(10) et (11) il existe 3 types de termes

- ceux relatifs aux charges extérieures  $X, Y, Z$ ,  $\mathcal{M}_x, \mathcal{M}_\phi$
- ceux relatifs aux nervures, affectés des fonctions  $f(x)$ ,  $f'(x)$ ,  $f(\phi)$  et  $f''(\phi)$  dont les sigles  $S_x, S_\phi, L_x, L_\phi, \dots, T_x, T_\phi$  sont des coefficients dépendant uniquement de la géométrie des nervures (réf. 4)
- ceux relatifs à la coque lisse.

La signification de cette observation est évidente : la charge appliquée est reprise partiellement par la coque et partiellement par les nervures. Le rôle des nervures se caractérise donc par 5 types de forces (figure 8).

- les  $X_0, Y_0$  et  $Z_0$  sont des pressions agissant sur la surface médiane de la coque et le long de bandes dont la largeur est celle de la nervure correspondante.
- les  $U_{ox}$  et  $U_{oz}$  sont des lignes de moment agissant le long de ces mêmes nervures.

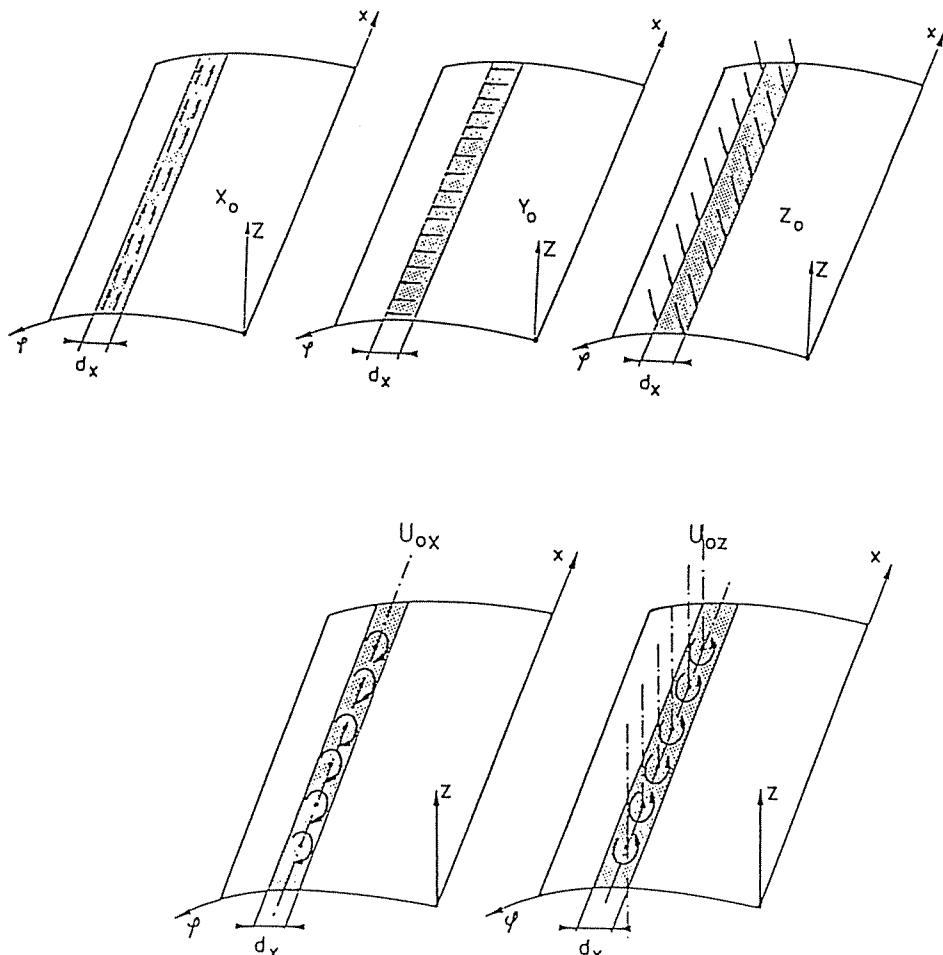


Figure 8. Représentation des 5 types de forces et de moments que transmet une traverse à la coque ( $d_x$  étant la largeur de la traverse).

Les lignes de moments  $U_{ox}$  et  $U_{oz}$  résultent de l'apparition de termes contenant des dérivées de fonction de Heaviside dans les équations différentielles (9 à 11). Comme la dérivée d'une fonction de Heaviside est une fonction de Dirac, on obtient bien des lignes de moment.

Résoudre le problème de la coque raidie revient donc à considérer une coque non raidie sur laquelle agit la charge extérieure ainsi que 5 lignes de forces et de moments agissant au droit de chaque traverse. La détermination de ces lignes de charge repose sur la résolution d'un système de  $5M$  équations intégrales ( $M$  étant le nombre de traverse) dite de "VOLTERRA-FREDHOLM" de la 2ème espèce mais dégénérées en sommes (réf 7).

$$\alpha(x) f(x) = F(x) + \lambda \int_a^b K(x, \varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon \quad (16.)$$

$$\begin{aligned} \Psi(K_i) = (X_0 d_x)_{0, \varphi=K_i} &+ \sum_{j=1}^n \frac{\Psi(K_j)}{10000} \quad ( (X_0 d_x)_{A, \varphi=K_i, \Lambda=K_j} ) \\ &+ \dots \end{aligned} \quad (17.)$$

Comparons l'expression théorique des équations de Volterra-Fredholm (16) avec la première équation de notre système (17), on remarque que :

- $\psi(K_i)$  est la fonction inconnue notée  $f(x)$  dans l'équation de référence.
- le coefficient  $\alpha(x)$  de l'équation de référence (16) vaut dans notre cas 1 (17), on a donc bien des équations intégrales de Volterra-Fredholm de la 2ème espèce
- la fonction  $(X_0 d_x)_0$  est une fonction connue puisque relative à la coque lisse soumise à la charge extérieur, elle correspond à la fonction  $F(x)$ .
- les  $(X_0 d_x)_A$  (ou indice B,C,D et E) sont les noyaux des équations intégrales à l'image de la fonction  $K(x, \zeta)$ . Elles s'obtiennent en introduisant les solutions des fonctions de Green dans les expressions des  $(X_0 d_x)$ ,  $(Y_0 d_x)$ ,  $(Z_0 d_x)$ ,  $(U_{ox} d_x)$  et  $(U_{oz} d_x)$ .
- le signe intégrale est lui par contre remplacé par un signe de sommation

Les développements analytiques ne pouvant être repris ici, nous dirons simplement qu'à l'aide des séries de Fourier (réf 3), nous pouvons résoudre le système des 3 équations différentielles (9),(10) et (11) relatives aux coques cylindriques raidies soumises à des forces de pression  $Z$ , à des forces longitudinales  $Y$  concentrées aux extrémités et à des moments de surface  $\oint \varphi$  (figure 9).

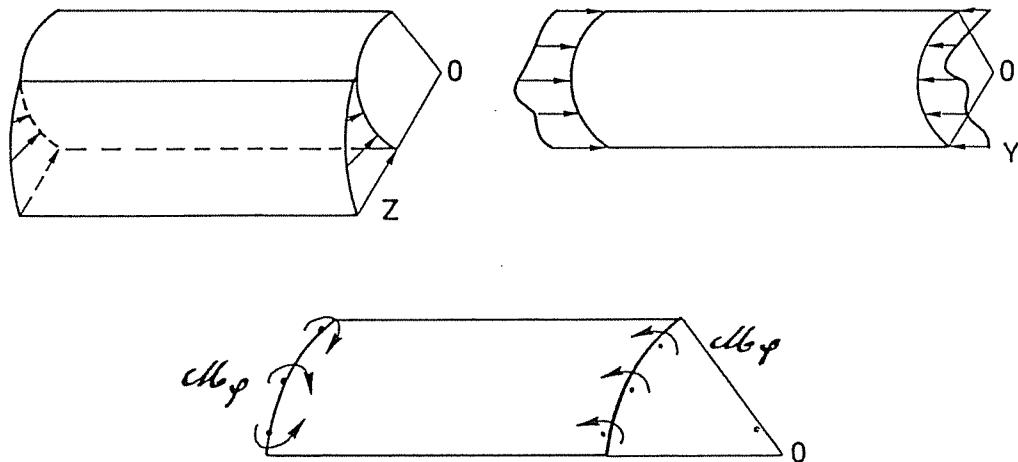


Figure 9. Schéma des sollicitations envisagées.

Ces efforts  $Y$  et  $M_\varphi$ , vont nous permettre de simuler les forces et moments que transmettent les bras aux extrémités de la vanne (figure 10).

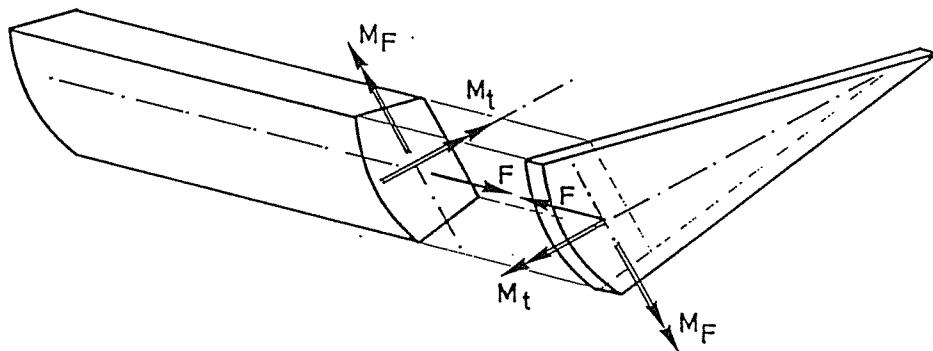


Figure 10. Forces et moments de liaisons entre la vanne et les bras

#### IV.2 Extension de la méthode à la torsion

Prenons l'exemple de la vanne segment manoeuvré d'un seul côté (figure 11). La sollicitation résultante est dissymétrique, 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 12), 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 inversément.

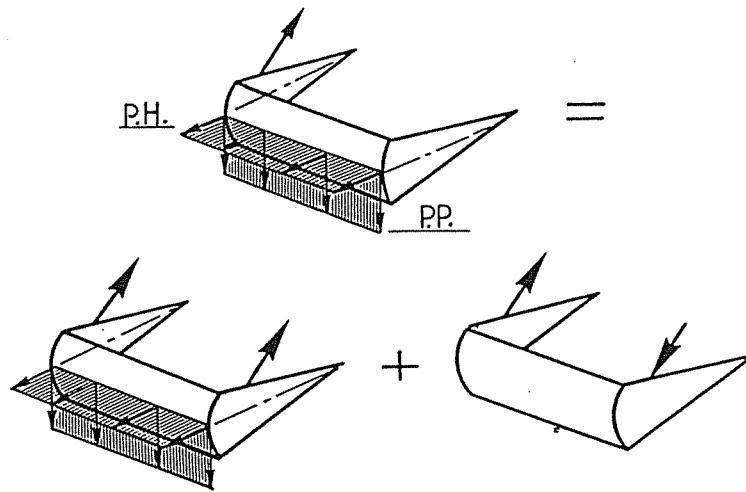


Figure 11. Décomposition de la sollicitation non symétrique d'une vanne manoeuvrée d'un seul coté en une sollicitation symétrique et une antisymétrique.

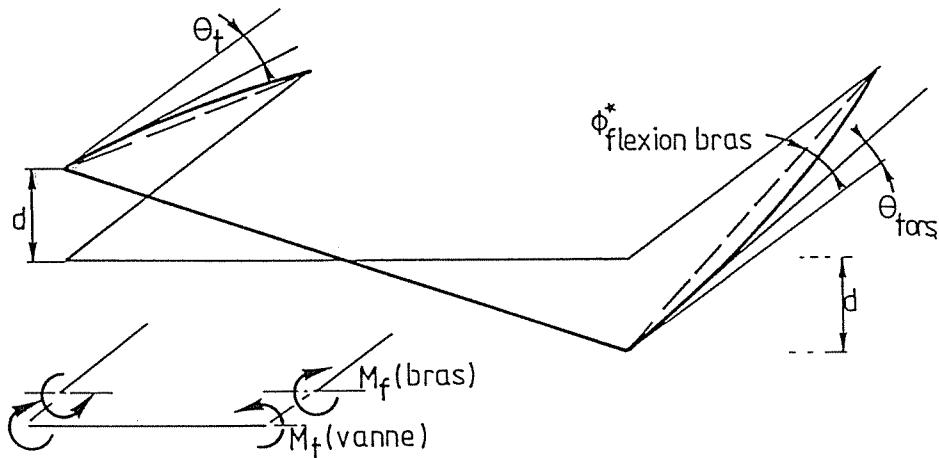


Figure 12. Mode d'équilibre de la vanne soumise à la sollicitation antisymétrique.

#### IV.3 Présentation de l'algorithme du logiciel des bordages raidis.

La figure 13 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 raidis par 3 types de nervures, des aiguilles, des raidisseurs et des traverses (figure 14).

L'organigramme débute par le BLOC D'ENTREE 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 (réf 8) implanté au Centre de Calcul de l'Université de Liège que nous traçons les diagrammes des déplacements, contraintes, efforts et moments dans les diverses sections de la structure (figure 15).

# LE LOGICIEL DE BASE

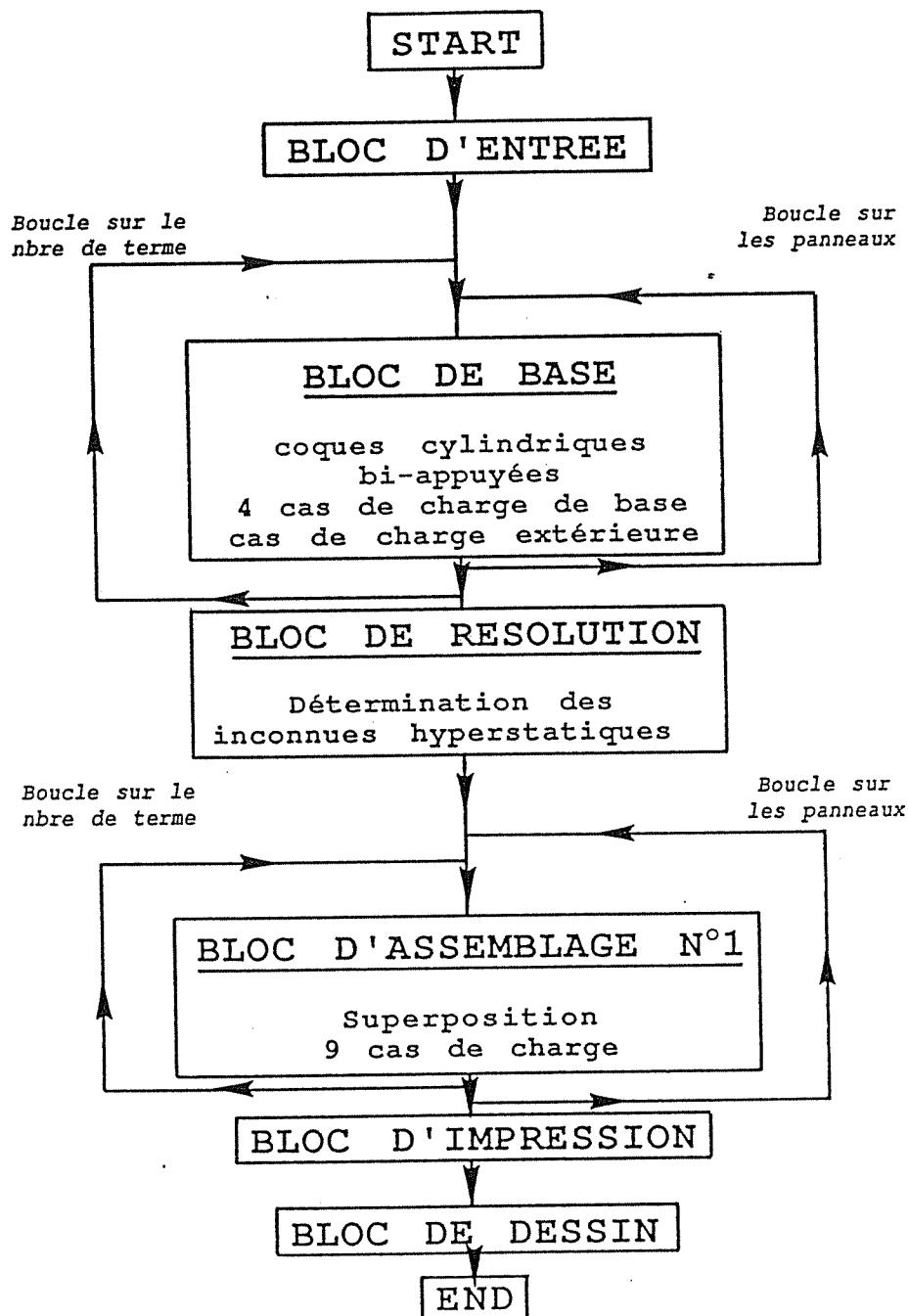


Figure 13.  
Schéma de l'algorithme de base du LOGICIEL DES BORDAGES RAIDIS.

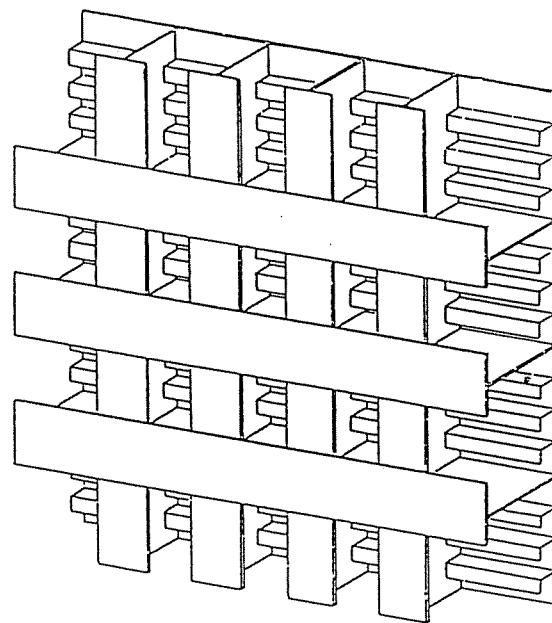


Figure 14. Schéma de la coque raidie et des 3 types de nervures, raidisseurs, aiguilles et traverses

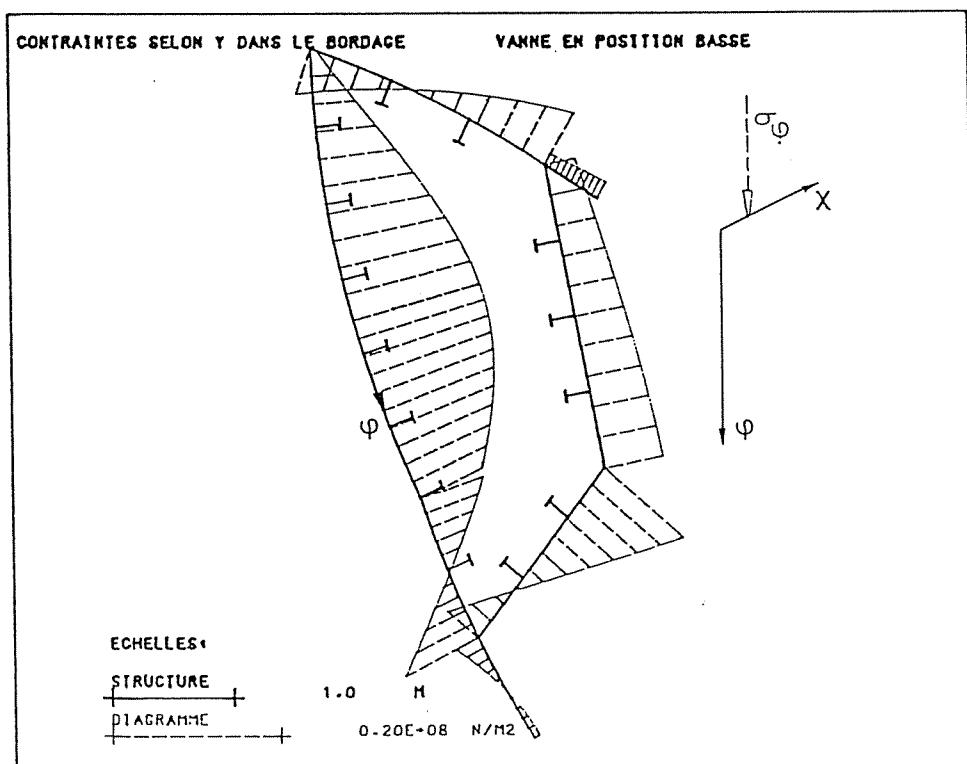


Figure 15. Diagramme des contraintes transversales dans la section médiane de la vanne segment (réf 3).

#### IV.4. Les résultats.

Notre but n'étant pas ici de préciser les différentes phases du calcul de la vanne (figure 16), nous montrerons simplement l'influence de l'inertie des bras sur les contraintes et déplacements au sein de la vanne.

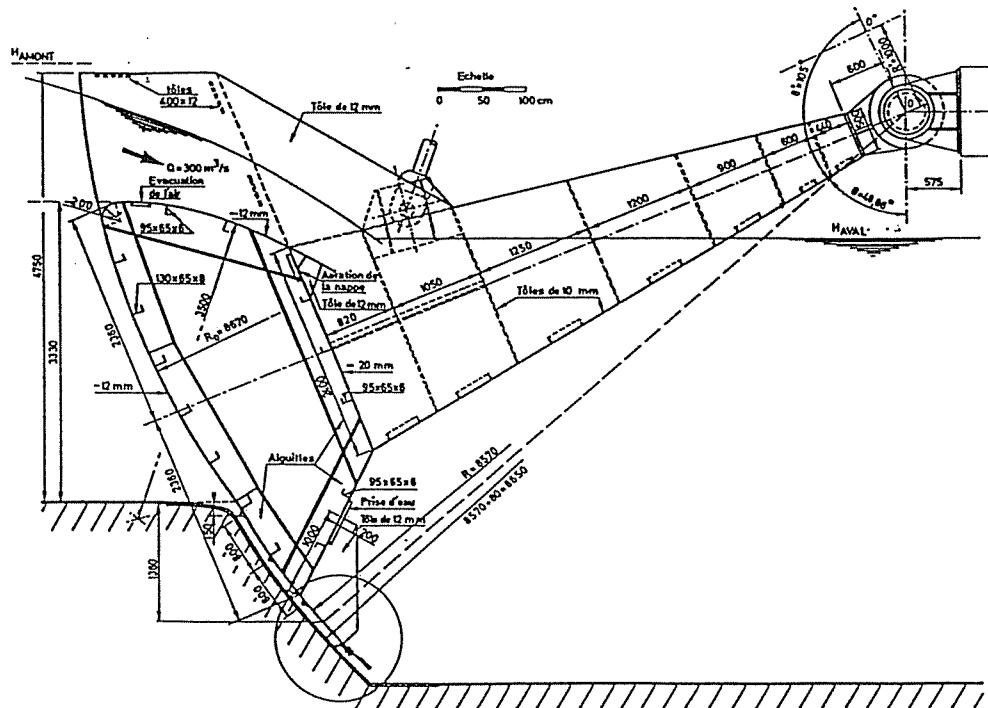


Figure 16. Vue en coupe transversale de la vanne segment en une pièce.

Prenons l'exemple de la vanne décrite à la figure 16 et dont les caractéristiques sont reprises figure 17.

- Portée = 29 0 m
- $I_{1-1}$  = 0.12  $m^4$
- $I_{2-2}$  = 0.40  $m^4$
- Chute = 2 00 m

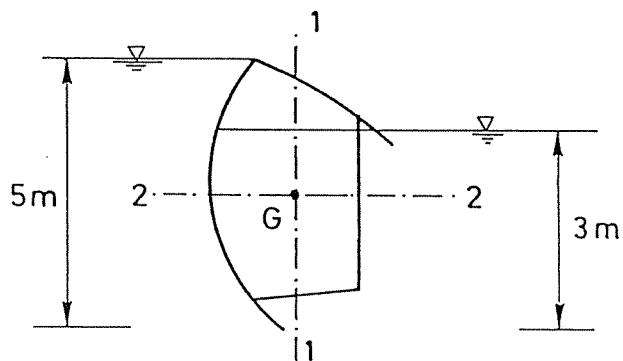


Figure 17. Schéma de la section transversale de la vanne

Soit les bras, figure 18, symbolisés comme suit

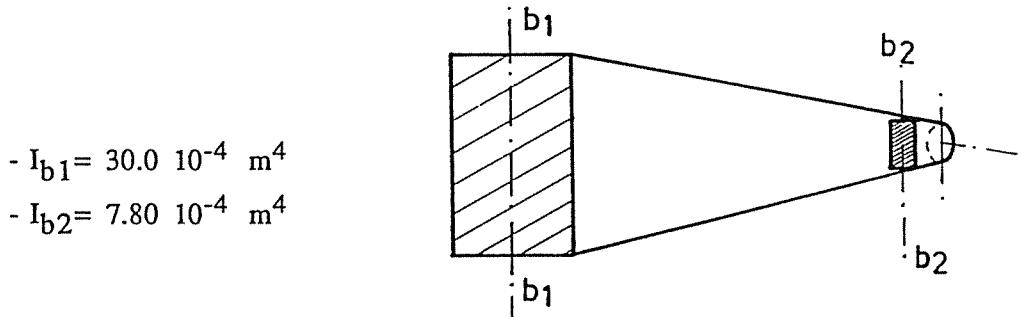


Figure 18. Vue des bras

En fonction de l'inertie des bras, on obtient à mi-portée de la vanne, les déplacements horizontaux suivants (cfr. tableau 1) :

Inertie des bras ( $\text{m}^4$ )	Déplacement horizontal de la vanne à mi-portée (cm)
$I_{b1} = I_{b2} = 0$ (appuis simples)	4.30
$I_{b1} = 30 \cdot 10^{-4}$ , $I_{b2} = 7.8 \cdot 10^{-4}$	3.73
$I_{b1} = 60 \cdot 10^{-4}$ , $I_{b2} = 15.6 \cdot 10^{-4}$	3.50
$I_{b1} = 300 \cdot 10^{-4}$ , $I_{b2} = 78 \cdot 10^{-4}$	2.55
$I_{b1} = I_{b2} = \infty$ (encastrements)	1.15

Tableau 1. Evolution des contraintes et déplacements au sein de la vanne en fonction de la rigidité des bras.

L'analyse de ce tableau montre l'importance d'étudier la structure "vanne segment - bras" comme un tout indissociable ainsi que l'intérêt d'utiliser le logiciel des bordages raidis à cette fin. L'utilisation de ce logiciel à des structures telles que vanne segment, porte d'écluse, vantail raidie, tablier de pont..., est d'ailleurs particulièrement intéressante vu la rapidité d'utilisation de ce logiciel. Ainsi, la discrétilisation, 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.

## V CALCUL D'UNE PORTE MAREE TEMPETE.

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.

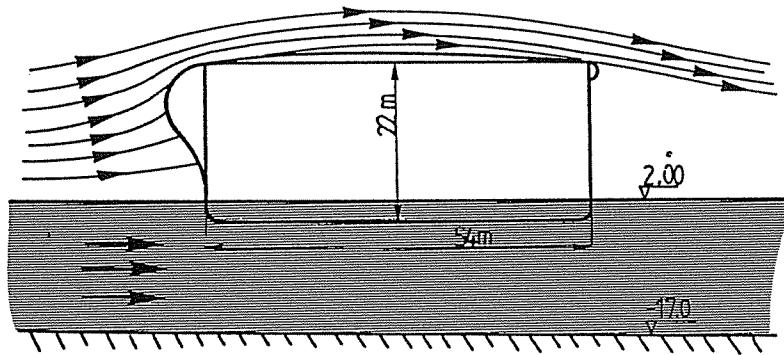


Figure 19. Coupe transversale de la porte marée tempête soumise au courant marin et à l'effet du vent.

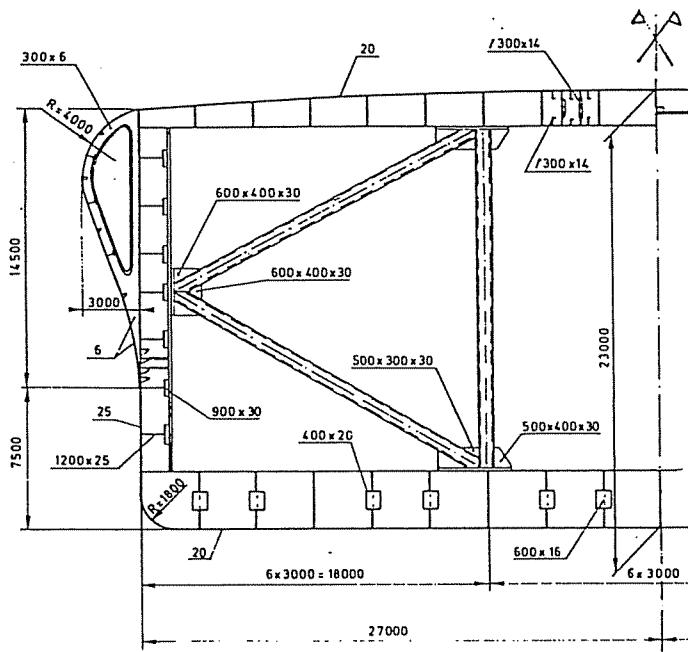


Figure 20. Coupe transversale de la porte marée tempête.

Il s'agit d'une porte flottante de 390m de portée, de 22m de haut, de 54m de large et pesant 55000 tonnes (figures 19 et 20). Le mécanisme de manœuvre de cette porte est schématisé figure 21 et la discréétisation en vue du calcul est représentée figure 22. On y dénombre 30 panneaux dont 24 raidis et 6 panneaux représentants les épontilles.

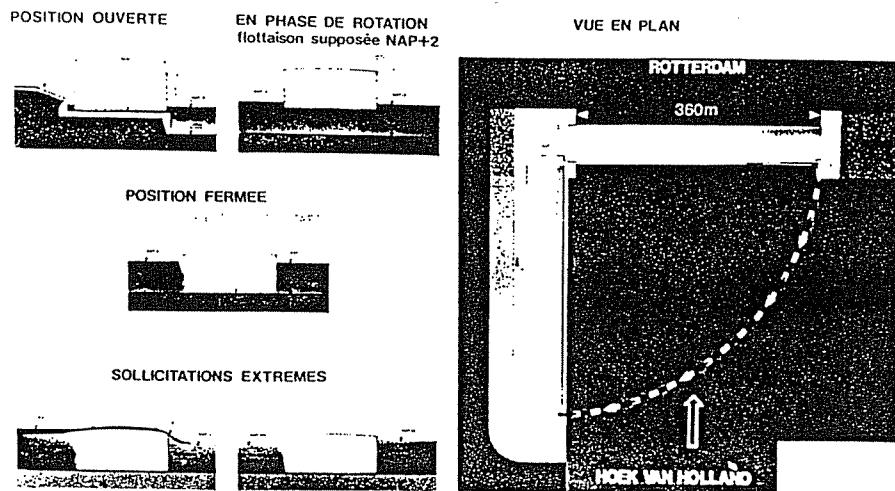


Figure 21. Schéma de principe du mécanisme de manœuvre.

L'utilisation de notre logiciel au calcul de cette porte fut un choix très judicieux. En effet, les facilités de discréétisation, la rapidité d'exécution et la clarté des résultats ont permis d'effectuer un calcul complet endéans les 8 heures ( 1 heure pour la discréétisation, 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 ).

L'importance du raidissage met encore plus en évidence les facilités d'utilisation de notre logiciel; et notamment vis à vis d'une discréétisation équivalente par la méthode des éléments finis.

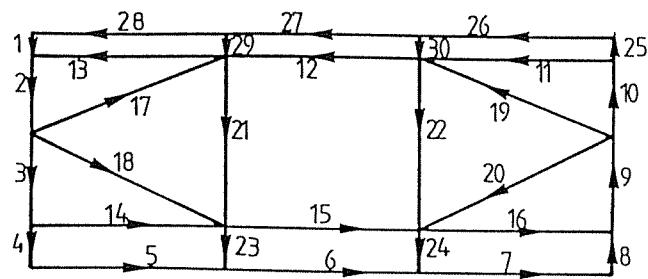


Figure 22. Schéma de discréétisation de la structure

Prenons l'exemple du panneau 3 (figures 20 et 22), ses caractéristiques sont : une dimension totale de 9,5 m x 390m, soit près de 4000 m<sup>2</sup>; 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 23 et 24 montrent en détails les déplacements et les contraintes engendrés au sein de la structure.

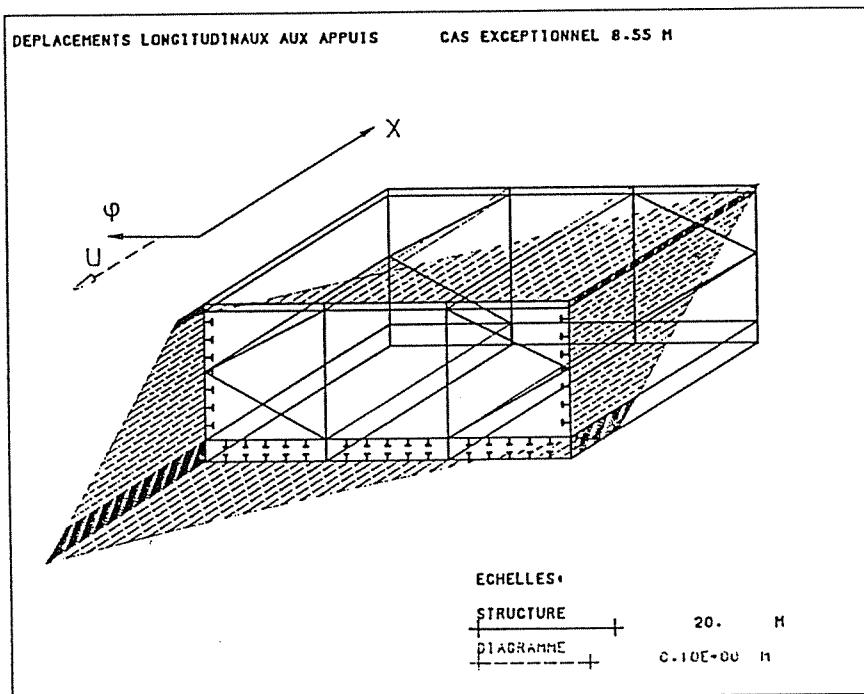


Figure 23. Déplacement longitudinaux  $u$  aux appuis.

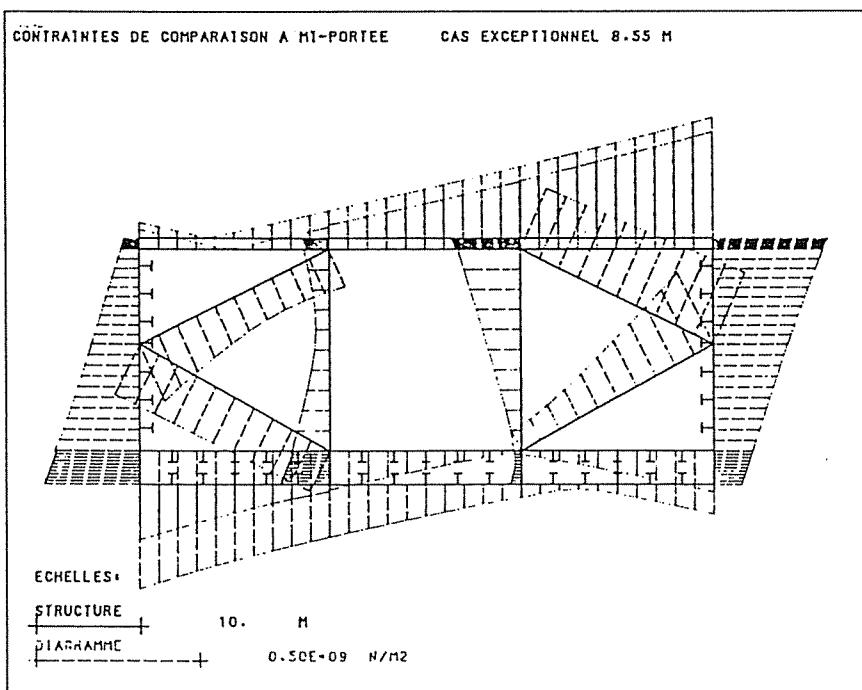


Figure 24. Contraintes de comparaison de von-mises à mi-portée

## V. CONCLUSION.

Cet article s'étant articulé autour de deux pôles principaux, LE LOGICIEL DES BORDAGES RAIDIS et LA VANNE SEGMENT EN UNE PIÈCE, nous avons également scinder nos conclusions.

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

Nous nous sommes particulièrement occupé du calcul de la vanne-segment à vanne unique couvrant toute la hauteur de la retenue. Pour les faibles retenues, ce système de barrage mobile en une pièce allie à une simplicité évidente, une forte rigidité d'ensemble et une économie financière certaine.

La seconde partie de ma conclusion est relative au Logiciel des Bordages Raidis

Ce logiciel 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 lequel elle est développée, de se limiter au domaine élastique et de se prêter à une discréétisation en tronçons de coques cylindriques raidies pouvant être raidies par 3 types de nervures différentes (figure 14).

Les avantages offerts par ce logiciel sont multiples : Il se prête aussi bien au prédimensionnement qu'aux calculs de vérification d'une structure existante. Il est particulièrement performant lorsque le raidisage est important car, tout en tenant compte des effets locaux des nervures, il intègre les nervures au sein du système d'équations différentielles sans allourdir sa résolution. Ainsi, l'étude complète d'une structure complexe comme une porte marée tempête (fig. 20) ou une vanne segment (fig. 16) peut, grâce à ce logiciel, être réalisée endéans les 12 heures. Ce laps 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, cela 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

d'effets de bord , moment de flexion et effort normal. Cela permet de simuler toutes sortes de conditions d'appuis( appui simple, encastrement , appui élastique).

## 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'A.I.P.C.N.
2. Ph. Rigo, ( 1981-82), "Avant-projet d'un barrage muni de vannes à segment", Travail de fin d'études en Sciences Appliquées de l'Université de Liège, Belgique.
3. Ph. Rigo, (1988), "Utilisation des développements harmoniques aux calculs des ouvrages hydrauliques métalliques", Doctorat en Sciences Appliquées, Université de Liège, Belgique.
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, Belgique.
5. A. Jakobsen, (1958),"Die Berechnung der Zylinderschalen",Springer-Berlin.
6. B. Friedman, J. Wiley,(1956),"Principles and Techniques of Applied Mathematics",New-York.
7. F.B. Hildebrand, (1952)," Methods of Applied Mathématiques", New-York, Prentice-Hall, Inc.
8. DI 3000, (1984), "DI-3000, User's Guide", Precesion Visuals Inc., Colorado USA.