**Zeitschrift:** IABSE reports = Rapports AIPC = IVBH Berichte
**Band:** 42 (1983)

**Artikel:** Choc de bateau sur obstacle déformable
**Autor:** Fauchart, Jacques
**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-32427

**Nutzungsbedingungen**
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**Conditions d'utilisation**
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**Terms of use**
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 05.07.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

# Choc de bateau sur obstacle déformable

## Zusammenstoß eines Schiffes mit einem verformbaren Hindernis

## Impact of a Ship on a Ductile Obstacle

**Jacques FAUCHART**
Consulting Engineer
de. Setec/
Paris, France

Born in 1936
Engineer EP, ENCP
Lecturer at the
Ecole Nationale des Ponts et
Chaussées in Paris
(Road and bridge building)

**RÉSUMÉ**
On étudie, dans l'hypothèse élastique, le comportement d'une structure »offshore« frappée par un bateau, avec référence aux rares résultats d'essais connus.

**ZUSAMMENFASSUNG**
Gegenstand der Untersuchung ist das elastische Verhalten einer Offshore-Konstruktion beim Aufprall eines Schiffes unter Verwendung der wenigen bekannten Versuchsergebnisse.

**SUMMARY**
The subject of this study is the elastic behaviour of offshore construction after a ship collision, with reference to the rare test results known.

## 0. PRESENTATION

0.1 On prévoit de franchir l'estuaire de la Gironde, à 75 Km en aval de Bordeaux (fig 1) par un pont long de 10 Km comprenant :
- 2 viaduc d'accès, à 2%, par travées de 100 m
- et au centre un pont à haubans à 3 travées de 400 m de portée centrale, libérant un chenal de 300 m de large, 55 m de haut et 12 m d'eau (fig 2) [I]

0.2 Un des problèmes majeurs de l'étude, est celui des conséquences du choc d'une de ses 2 piles principales (sous pylônes), par un bateau, dont le plus agressif a pour caractéristiques :
- déplacement (masse totale en charge) $m_1$ = 80 000 t
- vitesse absolue $V_1$ = 15 noeuds (12 propre + 3 de courant) soit 7,72 m/s
- et donc énergie cinétique : $E = \frac{1}{2}\, 80\, (7{,}72)^2 = 2\,400$ mMN

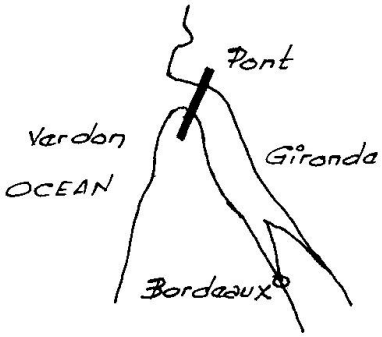



Fig. 1

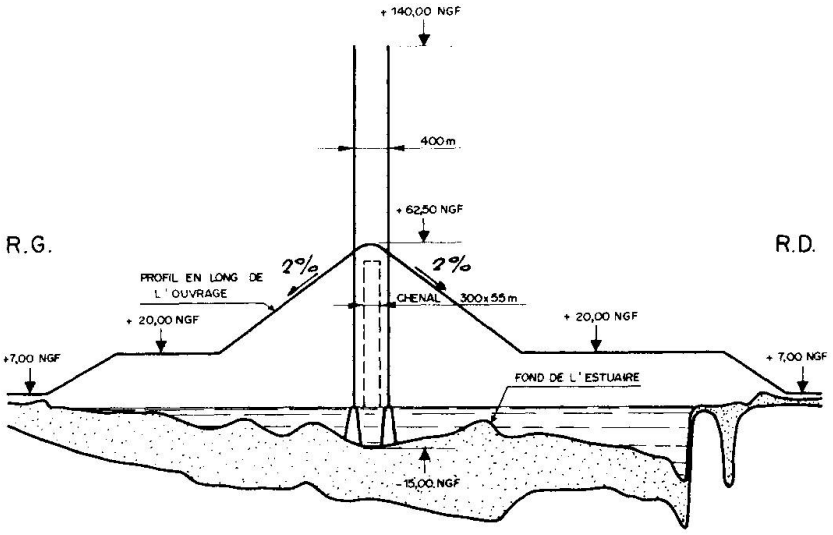



Fig. 2

Cette énergie est énorme : Pour en juger, rappelons que les "ducs d'Albe" les plus perfectionnés n'absorbent que le mMN [II et III] . La proximité du port du Verdon ne permet guère d'envisager des protections souples, par chaines flottantes, à ancrages fixes ou trainables (tels les filets d'arrêt sur porte-avions); leur efficacité exige de grands déplacements. Les employer ici reviendrait presque à barrer la Gironde dès l'entrée de son estuaire.

## I. LE BATEAU-TYPE ADOPTE

En utilisant :
- d'une part la relation empirique de Minorsky, proportionnant l'effort $F_1(x)$ subi par le bateau écrasé sur la longueur $x$, et la variation $\frac{dA}{dx}$ à ce niveau du volume $A(x)$ d'acier résistant du navire
- d'autre part la loi $A(x)$ définie par les Chantiers de l'Atlantique pour un bateau de la taille à envisager (le "Cetra-Columba"), nous avons obtenu pour un choc frontal la loi $F_1(x)$ de la figure (3), schématisable par la relation plastique-pseudo élastique : $F_1(x) = F_0 + r_1 x$ où :
- l'effort : $F_0$ = 39 MN correspond à l'écrasement de l'étrave
- et la pseudo-rigidité : $r_1$ = 1,62 MN/m à la force nécessaire pour amener l'écrasement supplémentaire d'une tranche courante de longueur-unité.

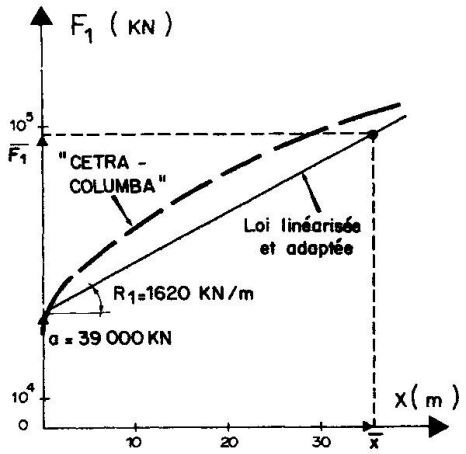
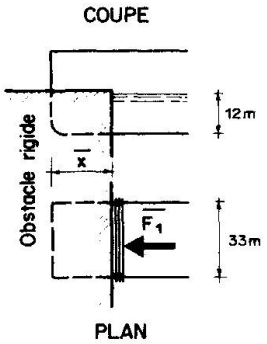



Fig. 3



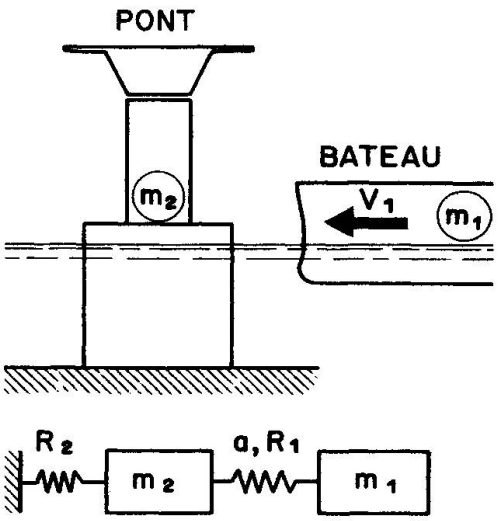




Fig. 4

II. CHOC DIRECT DU BATEAU-TYPE (1) SUR UNE PILE DE PONT (2)

II.1 Le problème est simplifié comme à 2 degrés de liberté seulement (fig 4) :
- le déplacement $D_1(t)$ du centre de gravité du bateau
- et celui, $D_2(t)$, du point d'impact sur la pile (de masse $m_2$ et rigidité $r_2$) que nous mesurons à partir du début du choc (t=o).

Le bateau s'écrase donc sur la longueur : $x = D_1 - D_2$

Nous négligeons (c'est défavorable) les phénomènes d'amortissement. Seules les forces d'inertie (de la forme : $-m_i D_i''$) (1) peuvent donc compenser le déficit entre les forces extérieures appliquées aux2 corps. D'où l'équilibre :

- du bateau : $F_1(t) + m_1 D_1'' = 0$ ①
- de la pile : $F_2(t) - F_1(t) + m_2 D_2'' = 0$ ②

II.2 Si la pile est indéformable ($r_2$ infini ; $D_2 = 0$ ; $D_1 = x$) et si la loi du bateau $F_1(D_1)$ est monotone, l'effort commun subi par la pile et le navire est maximum ($\bar{F}_1$) avec $D_1$, c'est-à-dire quand sa vitesse $D'_1$, s'annule. Alors son énergie cinétique s'est dissipée en travail de déformation, soit pour le "bateau type" considéré :

$$\frac{1}{2} m_1 V_1^2 = \int F_1(x)\,dx = \frac{1}{2 r_1}\left(\bar{F}_1^2 - F_0^2\right)$$

$$\bar{F}_1 = \sqrt{F_0^2 + r_1 m_1 V_1^2} = 96,2 \text{ MN} \quad ④$$

le bateau s'écrase sur la longueur : $\bar{x} = \frac{1}{r_1}(\bar{F}_1 - F_0) = 35,3$ m ⑤

Ces valeurs montrent bien qu'on ne peut considérer le bateau comme rigide ; on peut en revanche négliger la part élastique de sa déformation.

II.3 Pour une pile élastique ($F_2(t) = r_2 D_2(t)$), il faut distinguer 2 phases successives dans la percussion par le "bateau-type" :

II.3.1 Au début ($0 < t \leqslant t_0$ tel que $F_1(t) \leqslant F_1(t_0) = F_0$) : le bateau entraîne la pile ($D_1 = D_2 = D$) qui reste élastique. L'équilibre s'écrit :

$$(m_1 + m_2)\, D'' + r_2 D = 0$$

(1) L'accent désigne la dérivée par rapport au temps t.

Par ailleurs, comme le bateau se comporte comme un solide rigide ($x(t) = D_1(t) - D_2(t) = 0$), il y a conservation de la quantité de mouvement globale au moment du choc. Les conditions aux limites ($t = +0$) sont donc :

$$D_1(0) = D_2(0) \qquad \text{et} \qquad D_1'(0) = D_2'(0) = \frac{m_1}{m_1+m_2} V_1$$

D'où, avec : $\Omega^2 = \frac{r_2}{m_1+m_2}$ : $D_1(t) = D_2(t) = \frac{m_1 V_1}{m_1+m_2} \frac{\sin \Omega t}{\Omega}$

$$F_2(t) = r_2 D_2(t) = m_1 V_1 \Omega \sin \Omega t \quad ; \quad F_1(t) = \frac{m_1}{m_1+m_2} F_2(t)$$

Malheureusement, en pratique, aucune pile n'est assez souple et lourde pour qu'on en reste là. Cette première phase s'achève donc à l'instant $t_0$ où le bateau commence à s'écraser. Alors :

$$D_1(t_0) = D_2(t_0) = \underline{D_0} = \frac{F_0}{r_2} \frac{m_1+m_2}{m_1} \quad ; \quad D'(t_0) = \underline{D_0'} = \frac{m_1 V_1}{m_1+m_2} \sqrt{1 - \frac{F_0^2}{r_2 m_1 V_1^2} \left(\frac{m_1+m_2}{m_1}\right)^3}$$

II.3.2 Ensuite ($t_0 < t$) le bateau s'écrase : $F_1(t) = F_0 + r_1 [D_1(t) - D_2(t)]$

(2) et (3) s'écrivent : $\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} D_1''(t) \\ D_2''(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} r_1 & -r_1 \\ -r_1 & r_1+r_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} D_1(t) - D_0 \\ D_2(t) - D_0 \end{Bmatrix} = F_0 \begin{Bmatrix} -1 \\ +1 \end{Bmatrix}$

D'où par l'analyse modale :

- les pulsations propres $\omega_K$ par :

$$\omega^4 - \omega^2 \left(\frac{r_1}{m_1} + \frac{r_1+r_2}{m_2}\right)^K + \frac{r_1 r_2}{m_1 m_2} = 0 \qquad (\omega_1 < \omega_2)$$

- les vecteurs propres, normés par rapport au masses :

$$d_1^K = \left[m_1 + m_2 \left(1 - \frac{m_1 \omega_K^2}{r_1}\right)^2\right]^{-1/2} \quad ; \quad d_2^K = d_1^K \left(1 - \frac{m_1}{r_1} \omega_K^2\right)$$

D'où, compte tenu des conditions aux limites ($t = t_0$) et en posant :

$$A_K = F_0 \frac{m_1}{r_1} (d_1^K)^2 \; ; \quad B_1 = D_0' \frac{\omega_2^2}{\omega_1(\omega_2^2 - \omega_1^2)} \quad ; \quad B_2 = -B_1 \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^3$$

$$\begin{Bmatrix} D_1(t) - D_0 \\ D_2(t) - D_0 \\ F_1(t) - F_0 \\ F_2(t) - r D_0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 - \frac{m_1}{r_1}\omega_1^2 & 1 - \frac{m_1}{r_1}\omega_2^2 \\ m_1 \omega_1^2 & m_1 \omega_2^2 \\ r_2\left(1 - \frac{m_1}{r_1}\omega_1^2\right) & r_2\left(1 - \frac{m_1}{r_1}\omega_2^2\right) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -A_1(1 - \cos\omega_1(t-t_0)) + B_1 \sin\omega_1(t-t_0) \\ -A_2(1 - \cos\omega_2(t-t_0)) + B_2 \sin\omega_2(t-t_0) \end{Bmatrix}$$

II.3.3 Exploitation numérique:

En pratique, la première phase a une durée $t_0$ très courte. Dans la deuxième, les termes en $\omega_K$ atteignent leurs valeurs maximales à des temps $t_K$ voisins de :

- $t_1$ tel que $\operatorname{tg} \omega_1 (t_1 - t_0) = \frac{D_0'}{F_0} \sqrt{r_1 m_1}$ pour $K = 1$
- $t_2 \simeq t_0 + \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m_2}{r_2}}$ $K = 2$

C'est donc très vite (à peu près à $t_2$) que la pile va recevoir une gifle magistrale, en subissant son effort maximal :

$$F_{2M} \simeq \overline{F_2} = F_0 \frac{m_1+m_2}{m_1} + D_0' \sqrt{r_2 m_2}$$

Le bateau est alors presque intact. Ce n'est que bien plus tard (vers $t_1$, et alors que la vibration de la pile s'est pratiquement amortie) que le bateau finirait de s'écraser sous un effort :

$$F_{1M} \simeq \overline{F_1} = \sqrt{F_0^2 + r_1 m_1 V_1^2}$$

et sur une longueur de : $x_M \simeq \overline{D_1} = D_0 + \overline{x}$

Par exemple, pour une pile (courante) : $r_2 = 10^6 kN/m$, et $m_2$ = 2 000 t, on obtient, avec $V_1$ = 7,72 m/s :

a - $t_0$ = 0,005 sec, temps où $D_0$ = 0,04 m et $D_0'$ = 7,5 m/s

b - la pile subit son effort maximal: $F_{2M}$ = 377 MN, à $t_2$ = 0,075 sec, en étant déplacée de $D_2$ = 0,38 m seulement

c - ce n'est qu'à $t_1 \approx 8$ sec que le bateau finirait de s'écraser, sous $F_{1M}$ = 94 MN, et sur $x_M \approx 34$ m

Mais en réalité, compte-tenu de l'énormité de l'effort $F_{2M}$ qui lui a été appliqué, la pile se sera rompue (ou aura basculé) avant $t_2$, c'est-à-dire très peu après le début du choc, et alors que le bateau est encore très peu abimé comme on le constate le plus souvent dans les accidents réels.

II.3.4 Conclusions :

Le balayage des plages ($m_2$ et $r_2$) des piles envisageables en pratique montre qu'aucune n'est capable de résister isolément au choc du bateau type à considérer.

Augmenter sa résistance fait croître parallèlement sa raideur et sa masse, et donc l'effort $F_{2M}$ à supporter, sans espoir de convergence (action - résistance) dans le cadre technico-économique actuel.

Nous en avons conclu que, compte tenu de la profondeur limitée du fleuve, la seule solution sûre et réaliste pour protéger chacune des 2 piles principales du pont est de l'abriter au sein d'une ile artificielle destinée à diffuser l'impact, jusqu'à ne plus agresser la fondation que de façon tolérable.

## III. CHOC DE BATEAU SUR UN TALUS (berge naturelle ou ile artificielle)

### III.1 Essai d'analyse :

Lors du choc, le bateau pénètre dans le talus, dont il refoule le sol par butée. Pour être assuré de la stabilité de la pile qui y est enterrée, il est prudent de respecter les 2 conditions géométriques suivantes (fig 5) :

- le sommet, non écrasé, de son étrave, ne doit pas heurter la pile
- la fondation de celle-ci doit rester hors zones de sol en butée

La masse $m_2$ de sol mise en mouvement reste assez faible par rapport à celle, $m_1$ du bateau, pour sembler permettre, en première approximation, de négliger aussi bien la force d'inertie ($-m_2 D_2''$) du sol que la redistribution des vitesses au début du choc.

Dès lors (2) et (3) fusionnent en : $F_1(t) = F_2(t) = -m_1 D_1''(t)$

L'effort maximal $F_{2M}$ subi par le talus restera donc inférieur à la valeur maximale $\overline{F_1}$ (4).

D'autre part, les maximaux des 2 déplacements $D_K$ et forces $F_K$ subis par le bateau (K=1) et le talus (K=2) sont obtenus simultanément, quant s'annulent les vitesses $D_K'$. L'énergie cinétique initiale du bateau s'est alors transformée en travail de déformation $W_K$, soit (fig 6) :

$$\frac{1}{2} m_1 V_1^2 = W_1 + W_2 = \frac{\overline{F}_M^2 - F_0^2}{2 r_1} + \int_0^{D_2} F_2 \cdot dD_2$$

$$W_2 = \int_0^{D_2} F_2(D_2)\, dD_2 = \frac{1}{2 r_1} (\overline{F}_1^2 - F_0^2)$$

D'où le maximum $F_M$ de l'effort commun bateau - talus, à l'arrêt dans le sol (puis $D_2$ et $D_1$).

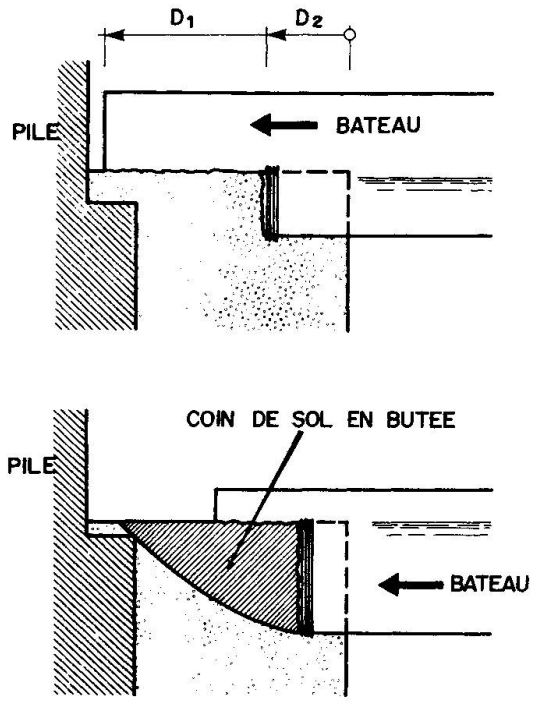



Fig. 5

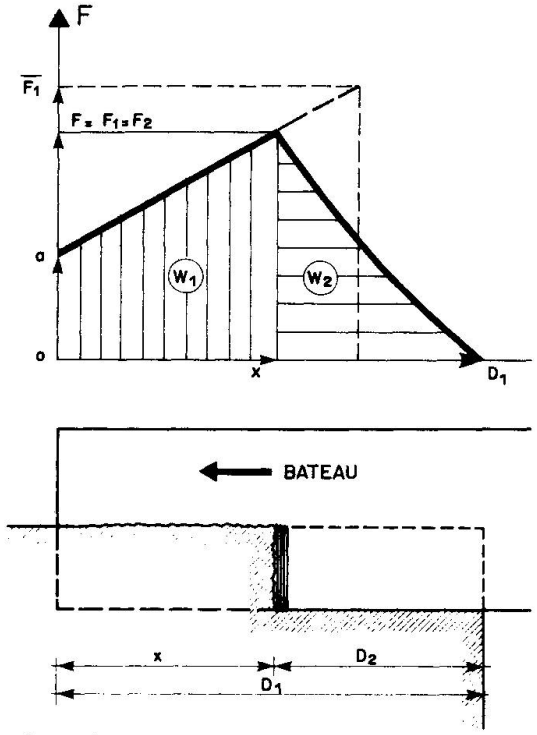



Fig. 6

III.2 Application au projet du Verdon

III.2.1 Ce qui précède n'est qu'approximatif (négligence des effets dynamiques dans le sol ; conditions aux limites). Mais nous manquons cruellement à cet égard de résultats expérimentaux, surtout pour estimer la loi $F_2$ ($D_2$) du talus, car on ne connait pas le faciès d'attaque du bateau, variant à mesure que celui-ci s'écrase.

Dans le cas du Verdon, nous avons fait l'hypothèse (certainement trop conservatrice) que le bateau avait une géométrie indéformable, et qu'il repousse, devant sa paroi frontale (barge à front plat) ou ses 2 parois d'étrave, un (ou 2) coins de terre (butée de Coulomb), normalement à ces parois.

II.2.2 D'où notre solution d'iles artificielles, allongées suivant l'axe du chenal (fig 7), pour :

a - faciliter l'écoulement du fleuve, et donc limiter les affouillements
b - s'adapter à la puissance des chocs à redouter :
  - les plus à craindre sont évidemment ceux de bateaux à pleine vitesse $V_1$, s'écartant assez peu de l'axe du chenal pour frapper quasiment de front les petits pans de l'ile.
  - ses longs pans sont menacés par les bateaux connaissant, peu avant leur passage sous le pont, une panne de barre en position de rotation, qui les rend ingouvernables. Mais en ce cas, l'eau dans laquelle tourne le bateau le ralentit, et le fait attaquer les longs pans sous vitesse initiale réduite.

Le coût des 2 iles (à talus de 5/1 et de 2/1) représente environ 10% du prix total de l'ouvrage. Une variante réduite, car à parements verticaux, réalisés par remplissage en sable de grands sacs en plastique, voire par un procédé inspiré de la "terre armée", reste néanmoins en compétition.

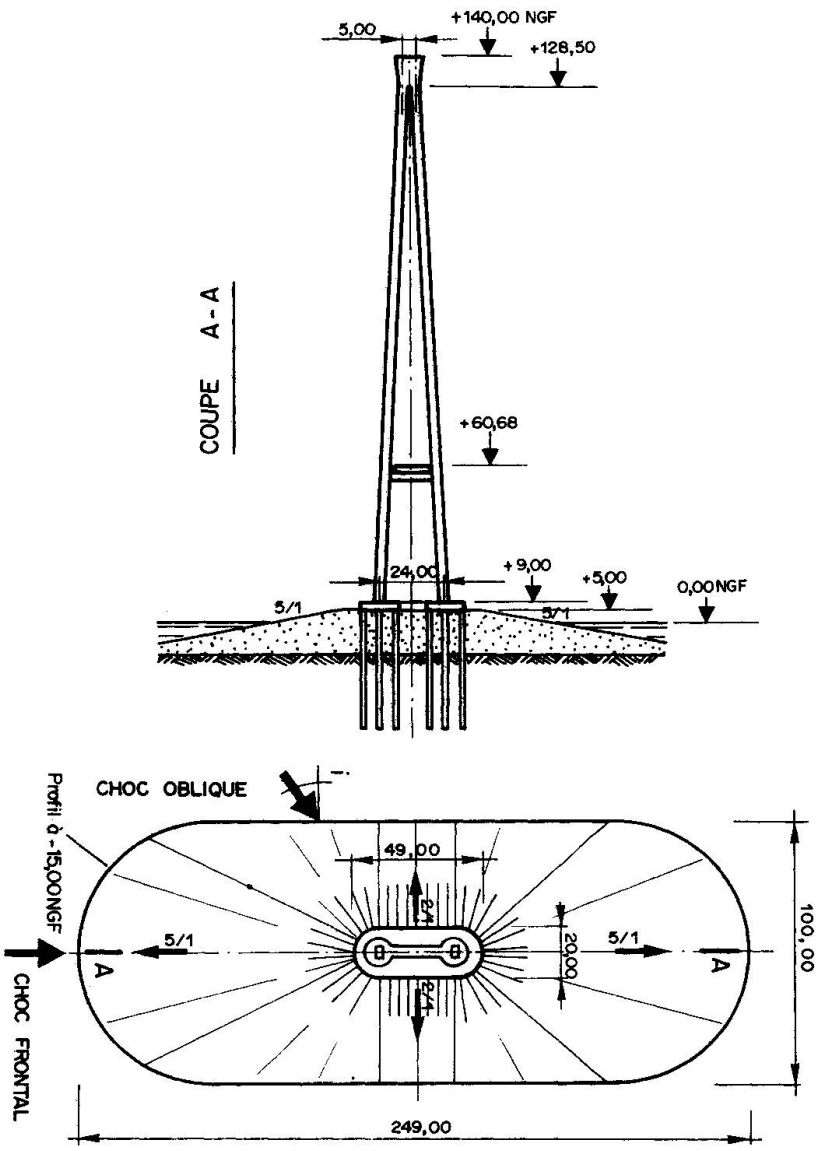



Fig. 7

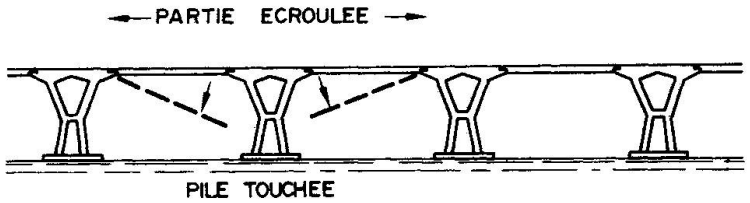



Fig. 8.1

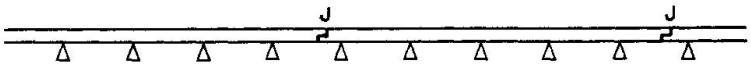



Fig. 8.2

Fig. 8.3

## IV CONSEQUENCES DU RISQUE DE CHOC DE BATEAUX POUR LE PROJET DU PONT DU VERDON

### IV.1 Généralités - Partie centrale, sur chenal

C'est cette question qui a déterminé l'architecture générale du projet. Pour laisser le chenal (de 300 m) libre à la navigation en toute circonstance, de façon à ne pas asphyxier, en amont, le port de Bordeaux, nous avons choisi :

a - de concentrer la protection sur les 2 piles principales encadrant la passe, en les enterrant dans 2 iles artificielles, dont l'encombrement a fait porter la travée centrale à 400 m.
b - de limiter les conséquences qu'entrainerait la rupture, par choc, de toute autre pile du pont. On ne peut en effet économiquement envisager de toutes les protéger par des iles (qui , d'autre part, barreraient l'écoulement de la Gironde) Pour assurer la stabilité de l'ouvrage, même en cas de rupture d'une de ses 2 piles-culées d'extrêmité (n'empêchant donc plus le soulèvement du tablier) chacune des 2 travées de rive à dû être allongée à environ 200 m .

### IV.2 Viaducs d'accès à l'ouvrage principal

Leur schéma statique est "cantilever" pour que la rupture éventuelle d'une pile courante n'entraîne que la chute du tronçon qu'elle porte, et des 2 travées indépendantes adjacentes, sans risque de propagation en chaîne à l'ensemble du tablier.

Un tel dispositif (cf les "fusibles" de nos installations électriques) a prouvé son efficacité lors de la rupture d'une pile du pont de Maracaïbo (1964, pétrolier, $m_l$ = 47 000 T) (fig 8.1) et de 2 piles du pont de Hobart (1975, minéralier $m_l$ = 17 000 t).

Les conséquences de la rupture d'une pile d'un pont continu (fig 8.2) seraient bien plus graves, puisqu'elle entraînerait l'effondrement de plusieurs centaines de mètres de tablier, et la nécessité d'en réparer le reste (mais comment?).

A l'inverse, la conception la moins admissible est évidemment celle d'un tablier isostatique sans "coupe-circuit" (fig 8.3) dont la rupture d'une seule pile entrainerait inéluctablement l'effondrement en chaîne de l'entière longueur du tablier.

## REFERENCES

[I] J. FAUCHART : Choc de bateau sur un obstacle déformable : essai d'analyse pour l'étude de "faisabilité" du pont du Verdon sur la Gironde (Travaux, janvier 1982)

[II] DERUCHER et HEINS : Bridge and pier protective systems and devices (Dekker-New York - 1979)

[III] N. JONES : A litterature Survey on the collision and grounding protection (SCC 283 - United States coast guard - Washington - 1979)

[IV] J. FAUCHART : Choc de bateau sur obstacle déformable (présent congrès)