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

Artikel: Conséquences de chocs de bateau sur le pont du Verdon
Autor: Fauchart, Jacques
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-32449

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: 13.07.2025

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

Conséquences de chocs de bateau sur le pont du Verdon

Konsequenzen einer Schiffskollision mit der Verdon Brücke

Consequences of a Ship Collision with the Verdon Bridge

Jacques FAUCHART
Consulting Engineer
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
Le projet du futur pont du Verdon, long de 10 km sur la Gironde a été dirigé par le problème du risque de choc de bateaux sur ses piles. La protection a été concentrée sur les deux piles encadrant le chenal de navigation; les conséquences de la rupture de toute autre pile courante ont été limitées.

ZUSAMMENFASSUNG
Bei der geplanten, 10 km langen Brücke über die Gironde (Pont Du Verdon) stand das Problem einer eventuellen Schiffskollision mit den Zwischenpfeilern im Vordergrund. Die Schutzmaßnahmen konzentrierten sich auf die beiden Pfeiler, die die Fahrrinne begrenzen; die Folgen eines Bruches eines anderen normalen Pfeilers wurden eingeschränkt.

SUMMARY
The project of the future 10 km long Gironde bridge »Pont du Verdon« was dominated by the problem of possible ship collisions with the piers. Measures of protection were concentrated on the piers marking the fairway. The consequences of a collapse of any other normal pier were limited.

0. PRESENTATION

0.1 Le constructeur en site aquatique (ponts, ports, "offshore") doit se soucier de plus en plus des accidents provoqués par le choc de bateaux. Pour tenter de les prévenir ou d'en limiter les conséquences, l'ingénieur est actuellement mieux renseigné sur le comportement du bateau-projectile(1) que sur celui de sa structure-cible. Notamment par les études empiriques de :

- MINORSKY, sur chocs réels entre bateaux [I] (§ 1.1)
- WOISIN, par essais de percussion de modèles de navires sur écrans fixes[II](§IV)

0.2 Hypothèses et notations (2)

1 - Le temps t et les déplacements $D(t)$ sont comptés à partir du début du choc ($t=0$; $D=0$). L'accent désigne la dérivation par rapport à t .

2 - Nous intéressant essentiellement au sort de la structure, le bateau-projectile (I) sera défini par un seul degré de liberté, de translation : $\vec{D}_1$, parallèle à sa vitesse initiale $\vec{V}_1 = \vec{D}'_1\ (-0)$.

La masse m_1 affectée au bateau comprend, en sus de sa masse propre, celle de l'eau qu'il entraîne dans son mouvement, soit, en pratique, de 10% (choc frontal : fig.1.1) à 40% (choc latéral : fig.1.2) de m_1 .

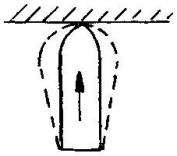

Fig. 1.1

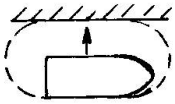

Fig. 1.2

3 - La structure frappée (II) est supposée élastique. Elle est, jusque là, en équilibre statique. Elle est discrétisée en noeuds K ($K \geqslant 2$, le noeud d'impact recevant le numéro 2). A chacun sont affectées la masse m_K et l'inertie massique J_K correspondant aux degrés de liberté (DDL) de translation et rotation du noeud.

4 - Le choc est supposé sans rebond : (I) et (II) restent en contact pour $t \geqslant 0$. Nous avons donc à étudier la structure globale ((I)+(II)), à N DDL, au total. Notre analyse portera sur :

- la schématisation de la structure (II)
- mais complétée, de surcroît, par un "élément de charge" entre noeuds 1 et 2 de façon à introduire les conditions à l'origine (+0), au noeud 1, soit, en notant :

$$\{i\} = \{1, 0, 0 \cdots 0\}^T$$

la colonne de terme courant (structure) nul, hormis le premier (bateau 1), égal à l'unité :

$$\{D(0)\} = \{0\} \quad \text{et} \quad \{D'(0)\} = V_1\ \{i\} \qquad (1)$$

Cet élément de charge (1-2) reçoit la raideur r_1 et l'amortissement relatif α_1. r_1 peut témoigner des capacités de déformation locale à l'impact. Supposer son amortissement "critique" ($\alpha_1 = 1$) peut permettre d'éviter tout rebond entre les 2 corps.

---

(1) essentiellement grâce aux compagnies d'assurances de ces bateaux, notamment quant ils sont à propulsion nucléaire.[1][2]

(2) Symboles : $\{\}$ = colonne 1xN ; $[\,]$ = matrice-carrée NxN ; $[\,]_{(u)}$ = matrice diagonale NxN ; T = transposée

1. CAS ELEMENTAIRES : CONNAISSANCE DU BATEAU PROJECTILE (I)

1.1 Choc entre 2 bateaux : (1) et (2)

1.1.1 Si l'on admet (02.2) que les phénomènes hydrodynamiques peuvent se traduire par simple majoration des masses propres des bateaux, les forces extérieures sont toutes verticales. D'où, en projection horizontale :

$$\sum F_j = \sum m_j D''_j = 0 \qquad (j = 1,2)$$

ce qui, par intégration, conduit à la conservation de la quantité de mouvement globale des 2 bateaux. Par ex., dans le cas où le bateau (1) (masse m_1, vitesse initiale V_1) heurte le bateau (2) (m_2, $V_2 = 0$), les 2 partent après le choc à la vitesse commune D' telle que :

$$m_1 V_1 + m_2 \cdot 0 = (m_1 + m_2) D' \quad \text{soit : } D' = D'_1 = D'_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} V_1$$

Il y a donc, lors du choc, perte d'énergie cinétique :

$$\delta E = \frac{1}{2} m_1 V_1^2 - \frac{1}{2}(m_1 + m_2) D'^2 = \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} V_1^2 \qquad (2)$$

qui se transforme en travail de déformation plastique (irréversible) des bateaux ou en chaleur.

1.1.2 Une étude statistique de chocs réels entre bateaux a permis à Minorsky de mettre en lumière une excellente corrélation linéaire entre δE (mMN) et le volume d'acier A (m^3) broyé lors du choc (fig.2) : $\delta E = 42{,}2\,A + 29{,}3$ (3)

En désignant par : $D_1 - D_2 = x$ (m) l'enfoncement mutuel des bateaux, la force extrême F (MN) qu'ils exercent l'un sur l'autre est donc :

$$F(x) = F_1 = F_2 = \frac{d\,\delta E}{dx} = 42{,}2 \frac{dA}{dx} \qquad (4)$$

Connaître l'architecture des bateaux permet de définir A (x), et donc l'effort F (x) qui provoque leur écrasement mutuel sur la longueur x. La figure 3 en donne quelques exemples [III] et [IV]. Mais il est plus simple d'étudier directement chaque bateau isolément.

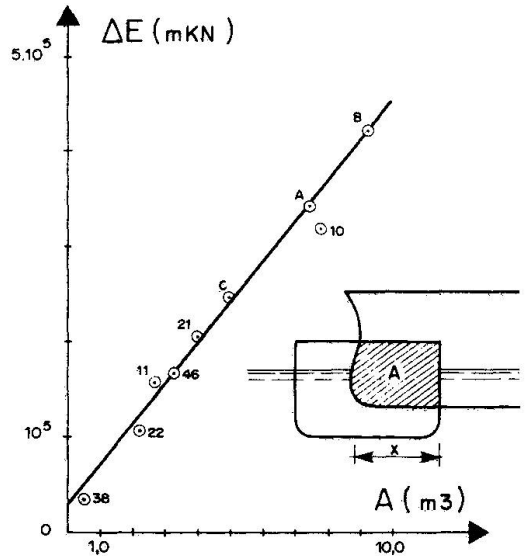

Fig. 2

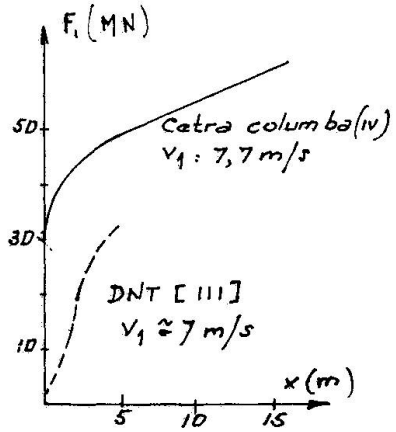

Fig. 3

1.2 Choc de bateau sur un écran rigide (essais de Woisin)

Nous négligeons ici tout amortissement (cf. néanmoins 3.3).

1.2.1 L'équation du mouvement du bateau élastique (de rigidité r_1) durant le choc est (fig.4) :

$$m_1 D''_1 + r_1 D_1 = 0$$

$$\text{soit, avec } \omega_1^2 = \frac{r_1}{m_1} \quad : \quad D_1 = \frac{V_1}{\omega_1} \sin \omega_1 t \qquad (5)$$

jusqu'au rebond ($\grave{a}\ t = \frac{\pi}{\omega_1}$; $D_1 = 0$; $D'_1 = -V_1$; $D''_1 = \omega_1 V_1$)

Puis le mouvement est parabolique : $D_1(t) = V_1 \left(t - \frac{\pi}{\omega_1}\right)\left[\frac{\omega_1}{2}\left(t - \frac{\pi}{\omega_1}\right) - 1\right]$

durant le temps $2/\omega_1$, et cela recommence (fig.5), avec une avancée, double du rebond vers l'arrière.

1.2.2 Pour un bateau réel, non élastique, la force $(r_1 D_1)$ est à remplacer par sa loi propre $F_1(D_1)$

L'équation du mouvement : $m_1 D_1'' + F_1(D_1) = 0$

donne, après multiplication par D_1', intégration, et compte tenu des conditions aux limites : $\int F_1 \, dD_1 = \frac{1}{2} m_1 \left(V_1^2 - D_1'^2\right)$

Si la loi $F_1(D_1)$ est monotone, le bateau subit son effort maximum F_{IM} quand D_1 est maximal, soit $D_1' = 0$. Alors (fig.6) :

$$\int F_1 \, dD_1 = \frac{1}{2} m_1 V_1^2 \qquad (6)$$

L'énergie cinétique initiale du bateau se transforme donc dans son travail de déformation, soit $\frac{1}{2} r_1 D_1^2$, pour un bateau élastique, auquel cas :

$$F_{1M} = V_1 \sqrt{m_1 r_1} \qquad (7) \qquad \text{et} \qquad D_{1M} = V_1 \sqrt{\frac{m_1}{r_1}}$$

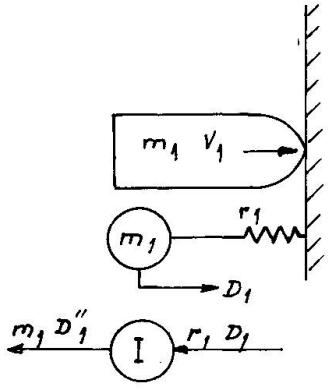

Fig. 4

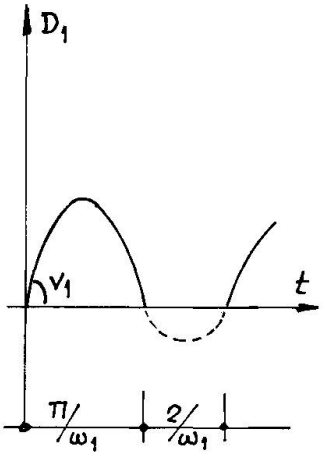

Fig. 5

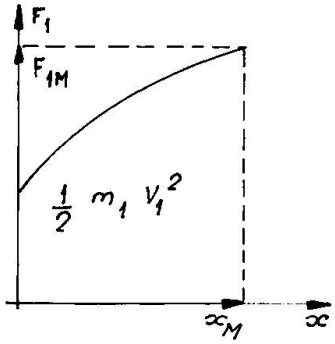

Fig. 6

2. CHOC DE BATEAU SUR STRUCTURE ELASTIQUE - ETUDE DE L'ENSEMBLE (I) + (II)

2.1 Equation du mouvement

La structure globale (bateau + structure, attelés par l'élément 12) a pour matrices (carrées symétriques NxN) : de rigidité [R], de masse [M] et d'amortissement [A]. Son comportement (supposé élastique) est régi, pour t>0, par l'équation classique en absence de force extérieure :

$$[M]\{D''\} + [A]\{D'\} + [R]\{D\} = \{0\} \qquad (8)$$

où $\{D\}$ est le vecteur des déplacements des N DDL de la structure globale.

2.2 Vibrations propres de la structure globale

2.2.1 Ce sont les vibrations harmoniques : $\{D(t)\} = \{\delta\} \sin\omega t$, que peut subir cette structure, non amortie (A=0). Elles répondent donc à :

$$\left[[R] - \omega^2 [M]\right]\{\delta\} = \{0\} \qquad (9)$$

Ce système homogène n'a de solution $\{\delta\}$ non nulle que si le déterminant de la matrice carrée de son premier membre est nul. D'où, en l'écrivant, les N pulsations propres = ωj, de la structure globale, que nous classons par valeurs croissantes $(\omega_1 < \omega_2 \ldots < \omega_N)$.

2.2.2 Nous notons la matrice (NxN), non symétrique, des vecteurs propres :

$$[\Delta] = \left[\{\delta_1\}\{\delta_2\}\cdots\{\delta_N\}\right] = \begin{bmatrix} \delta_1^1 & \delta_2^1 & \cdots & \delta_N^1 \\ \delta_1^2 & & & \\ \vdots & & & \\ \delta_1^N & & & \delta_N^N \end{bmatrix}$$

Ces vecteurs propres sont orthogonaux à $[M]$ et $[R]$. Le système (9) étant homogène, ils ne sont connus qu'à un facteur près. Nous précisons leur définition en les normant par rapport aux masses, soit :

$$[\Delta]^T[M][\Delta] = [1]_d \qquad \text{et donc} \quad [\Delta]^T[R][\Delta] = [\omega^2]_d$$

L'ensemble des déplacements modaux propres du projectile (1) constitue la colonne :

$$\{\delta^1\} = \{\delta_1^1 \ \delta_2^1 \cdots \delta_N^1\}^T = [\Delta]^T\{i\}$$

Quand les masses sont concentrées : $[M][\Delta]\{\delta^1\} = \{i\}$

2.3 Résolution

2.3.1 (8) se résout grâce au changement de variable : $\{D(t)\} = [\Delta]\{z(t)\}$ (10)

En prémultipliant par $[\Delta]^T$, et en supposant qu'on puisse définir dans chaque mode propre, j, un amortissement relatif αj (≤ 1) on obtient le système des N équations différentielles indépendantes :

$$z_j''(t) + 2\alpha_j\omega_j z_j'(t) + \omega_j^2 z_j(t) = 0 \qquad (j = 1 \text{ à } N)$$

D'où, en posant : $\omega_j' = \omega_j\sqrt{1-\alpha_j^2}$; $S_j(t) = \frac{1}{\omega_j'} e^{-\alpha\omega_j t}\sin\omega_j' t$;

$$C_j(t) = 1 - e^{-\alpha\omega_j t}\left(\cos\omega_j' t + \frac{\alpha\omega_j}{\omega_j'}\sin\omega_j' t\right) \quad : \quad z_j(t) = [1 - C_j(t)]\, z_j(0) + S_j(t)\, z_j'(0) \quad (11)$$

2.3.2 Les conditions à l'origine (1) s'écrivent :

$$\{z(0)\} = [\Delta]^{-1}\{D(0)\} = \{0\}, \text{ et : } \{z'(0)\} = [\Delta]^{-1}\{D'(0)\} = m_1 V_1 \{\delta^1\}$$

d'où = $$z_j(t) = m_1 V_1 \delta_j^1 S_j(t) \qquad (12)$$

Si l'amortissement du mode propre K devient "critique" ($\alpha_K = 1$)

$$z_K(t) = e^{-\omega_K t}\left[z(0) + t\left(z'(0) + z(0)\,\omega_K\right)\right] = \delta_K^1\, t\, e^{-\omega_K t}\, m_1 V_1$$

2.3.3 On repasse ensuite aux déplacements réels $\{D(t)\}$ par (10)

2.3.4 Les sollicitations et donc les contraintes dans la structure, ne dépendent que de sa déformation. Elles se calculent donc, à tout t, sous l'action des forces statiques :

$$\{F\} = [R]\{D(t)\} = [M][\Delta]\{\omega^2 z(t)\} = [M][\Delta]\{\delta^1\omega^2 S(t)\}\, m_1 V_1 \qquad (13)$$

3. EXEMPLE SIMPLE D'UNE STRUCTURE (II) A UN SEUL DDL

3.1 La structure-cible est supposée schématisable par un seul noeud : 2, où est concentrée la masse m_2, et dont le seul DDL (suivant l'axe de V_1) est : D_2 suivant lequel sa rigidité est r_2 (fig.7). Son amortissement relatif est α_2

La structure globale (aux 2 DDL : D_1 et D_2) a pour matrices :

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \qquad \text{et} \qquad [R] = \begin{bmatrix} r_1 & -r_1 \\ -r_1 & r_1 + r_2 \end{bmatrix}$$

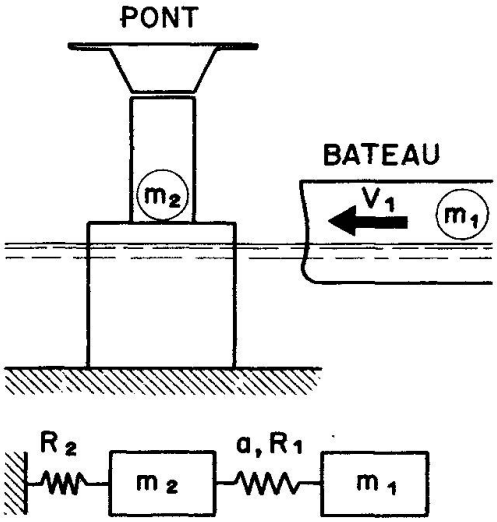

Fig. 7

Ses pulsations propres $\left(\omega_1 < \sqrt{\frac{r_1}{m_1}}\ ,\ \sqrt{\frac{r_2}{m_2}} < \omega_2\right)$ sont racines de :

$$\left(r_1 - m_1\omega^2\right)\left(r_1 + r_2 - m_2\omega^2\right) - r_1^2 = 0$$

Nous posons : $\underline{\beta} = \left(1 - \frac{m_1}{r_1}\omega_1^2\right)\sqrt{\frac{m_2}{m_1}}$

3.2 L'équation du mouvement (t>0) est :

$$\begin{Bmatrix} D_1(t) \\ D_2(t) \end{Bmatrix} = \frac{V_1}{1+\beta^2}\begin{Bmatrix} S_1(t) + \beta^2 S_2(t) \\ \beta\sqrt{\frac{m_1}{m_2}}\left(S_1(t) - S_2(t)\right) \end{Bmatrix}$$

D'où les actions servant à calculer les sollicitations (et les contraintes) à tout t :

$$\begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \end{Bmatrix} = \frac{m_1 V_1}{1+\beta^2}\begin{Bmatrix} \omega_1^2 S_1 + \beta^2\omega_2^2 S_2 \\ \beta\sqrt{\frac{m_1}{m_2}}\left(\omega_1^2 S_1 - \omega_2^2 S_2\right) \end{Bmatrix}$$

3.3 Tant que ω_2 reste fini (r_1 et r_2 finis) : $S_j(0) = C_j(0) = 0 \quad (j = 1,2)$ on vérifie bien les conditions aux limites pour t=0. Il en va de même si la structure devient rigide (r_2, donc ω_2 infinis ; D_2 (t)). Le projectile prend alors le mouvement harmonique amorti :

$$D_1(t) = V_1\ S_1(t) \qquad \text{avec} \qquad \omega_1 = \sqrt{\frac{r_1}{m_1}}$$

3.4 Mais si le projectile est rigide (r_1 infini) ω_2 devient infini. D'où une brutale discontinuité des vitesses à t = 0, car : $e^{-\alpha\omega_2 t}$ et $(1-C_2)$ passent de 1 à 0; et D_1' et D_2', respectivement de V_1 et 0, à la valeur commune : $\frac{m_1}{m_1+m_2}V_1$ (1). Il y a donc conservation de la quantité totale de mouvement.

Après le choc, bateau et cible prennent le mouvement commun :

$$D_1(t) = D_2(t) = \frac{m_1}{m_1+m_2}V_1 S_1(t)\ ;\ F_2(t) = \frac{m_1}{m_1+m_2}m_1 V_1\omega_1^2 S_1(t)\ ;\ F_1(t) = \frac{m_1}{m_2}F_2(t)$$

$$\left(\omega_1 = \sqrt{\frac{r_2}{m_1+m_2}}\right)$$

La structure (II) doit résister à la force totale ($F_1 + F_2$) de maximum, en absence d'amortissement : $m_1 V_1\sqrt{\frac{r_2}{m_1+m_2}}$

(1) Alors $\beta = \sqrt{\frac{m_1}{m_2}}$; $C_1(+0) \neq 0$

4. COMPARAISON AVEC L'EXPERIENCE

4.1 Cet essai d'analyse ne concerne que des corps restant dans leur domaine élastique et donc réversible. En réalité, ils le dépassent, comme le prouvent :

- la perte irréversible d'énergie cinétique initiale, δE, lors du choc
- la faible valeur du coefficient de Minorsky ③ et ④ = 42,2 MN/m2 (0,42 MPa, soit seulement le dixième de la résistance des aciers utilisés) : lors du choc, le comportement du bateau est donc essentiellement anélastique (voilement des tôles, flambement des longerons, déchirures) et non dirigé par l'épuisement mécanique de son acier.

4.2 La fig.8 [II, tiré de V] décrit l'effort $F_1(t)$ subi par un modèle de bateau durant un choc d'essai par Woisin. Au début, le comportement est élastique, avec un rebond, jusqu'à ce que l'étrave se plastifie, sous l'effort, désormais constant F_1*. Le bateau s'écrase sur la longueur x, assez importante pour que cette phase d'écoulement consomme la majorité de son énergie initiale, soit : $F_1* x \simeq \frac{1}{2} m_1 V_1^2$; l'effort F_1* est donc voisin de la moitié seulement de l'effort maximal F_{1M} ⑦ initial.

La courbe 9 [mêmes réf.] donne l'allure de F_{1M} en fonction de la masse m_1 du bateau (sans préciser la vitesse initiale V_1 (10 m/s d'après le montage d'essai) avec une variation de ± 50%, due à la différence des étraves des bateaux essayés). Cette allure est bien parabolique, comme l'indique ⑦.

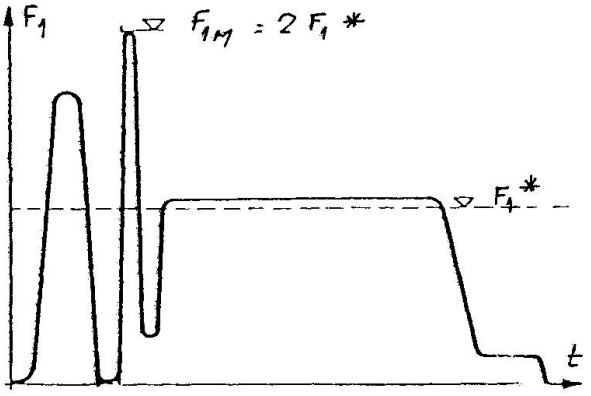

Fig. 8

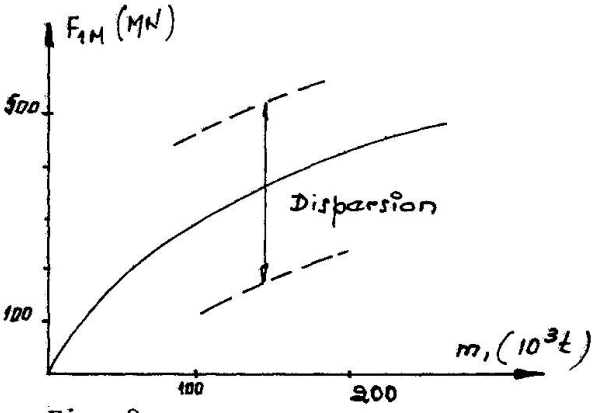

Fig. 9

4.3 Mais cela concerne le bateau. Pas ce qui nous intéresse directement : la structure frappée. Or, il faut bien prendre conscience que l'effort $F_2(t)$, qui agit sur celle-ci diffère de celui, $F_1(t)$, sollicitant le navire, car ces 2 forces connaissent leurs valeurs maximales à des temps différents. (F_2 bien avant F_1).

Les calculs précédents nous montrent que la cible (II) risque de subir son action maximale F_{2M} très peu après le début du choc, alors que son déplacement D_2 est encore très faible, et le bateau peu abimé. Dresser à ce moment un bilan énergétique est difficile, et ne nous renseigne guère sur la valeur de F_{2M} (plus proche de : $V_1\sqrt{k_2 m_2}$ que de F_{1M}, qu'elle peut fortement dépasser).

4.4 Certes, ces calculs supposent la structure élastique. Sa plastification pourrait aiderà réduire F_{2M}. Mais au prix de déplacements excessifs du tablier porté.

Par ailleurs, même en comportement strictement élastique, le calcul se heurte à un problème de schématisation de la structure. Plus, en effet, on discrétise celle-ci en de nombreux noeuds, pour affiner son comportement, et plus on réduit la masse affectée à chacun d'eux, en particulier m_2, au noeud d'impact 2. Or, l'exploitation numérique de la méthode prouve que, ce faisant, la sollicitation locale de la structure (déterminante pour son dimensionnement) augmente. Il faut donc connaître l'aire d'impact du bateau, à partir de laquelle celui-ci est supposé mobiliser la masse partielle m_2 de structure "arrosée". Il conviendrait de le vérifier par essais.

POUR CONCLURE

Même limitée à l'hypothèse élastique de comportement de ses piles, la tentative précédente d'analyse du choc d'un bateau sur une structure "offshore" s'avère délicate, notamment quant aux conditions aux limites, et à la discrétisation (en masses) de la cible. Son application au projet du Verdon (objet d'une autre communication) et au premier dégrossissage d'un pont sur Gibraltar [VI] nous a prouvé que nous manquons surtout de résultats expérimentaux pour en tester le bien-fondé. Compte tenu de l'augmentation inquiétante des accidents par chocs de bateaux et du coût qui en résulte, le temps semble bien venu de lancer un programme international d'essais, que pourrait utilement aider à définir le présent colloque de Copenhague.

REFERENCES

[I] V.U.MINORSKY : An analysis of ship collision with reference to protection of nuclear power plants (Journal of Ship Research, october 1959)

[II] G.WOISIN : Schiffbauliche Forschungsarbeiten für die Sicherheit Kernenenergies getriebener Handellschiffe (Jahrbuch der Schiffbaut. Ges.1971-Springer)

[III] Det Norske Veritas : Technical Note fixed Offshore Installations (TBA 101 dy 1.10.1981)

[IV] J.FAUCHART : Choc de bateau sur un obstacle déformable (Travaux : janvier 1982)

[V] R.SAUL et H.SVENSSON : Zum Schutz von Brückenpfeilern gegen Schiffsanprall, dargestellt am Beispiel der Brücken Zarate - Brazo-Largo Ober den Parana (Argentinien) "Die Bautechnik" (oct.nov.1981)

[VI] Colloque sur le franchissement routier du détroit de Gibraltar (Tanger, oct.nov.1980)