

LES USINES FLOTTANTES

par Ir. A. LEDERER

1. INTRODUCTION

Depuis ce qu'il est convenu d'appeler la « crise du pétrole », on a vu se développer considérablement la technique de l'« off-shore », qui, en fait, était déjà utilisée dans divers pays pour l'extraction du pétrole ; c'était le cas, notamment pour les Etats-Unis dans le golfe du Mexique, pour l'Arabie Saoudite et l'Iran dans le golfe Persique et, maintenant, en mer du Nord entre les côtes de la Norvège et de l'Ecosse.

Pendant certains pays producteurs de pétrole ont vu leurs revenus s'accroître soudainement depuis que le prix du pétrole a plus que décuplé et ils ont brusquement augmenté le volume de leurs importations, alors qu'ils ne disposaient pas des installations portuaires aménagées pour le transit et la manutention d'équipements industriels acquis outremer.

En outre, devant la perspective pointant à l'horizon d'une crise d'énergie, d'une part, ou pour se rendre indépendant de l'extérieur, afin d'épargner des devises fortes, d'autre part, des poches de gaz au large des côtes, ou à proximité de celles-ci, ont été exploitées pour produire des engrais chimiques, c'est le cas de l'Indonésie, soit pour exporter du méthane liquide, c'est le cas de certains pays du Moyen-Orient.

De leur côté, les armateurs et les industriels des pays occidentaux désiraient éviter les attentes des navires pendant deux à quatre mois, et parfois davantage, dans les ports sous-équipés de pays, riches de leurs pétrodollars, mais techniquement encore en voie de développement.

Pour éviter ces longues attentes, des solutions ont été recherchées, parmi lesquelles la plus radicale, l'usine flottante, qui connaît une certaine vogue ; elle pose toutefois un certain nombre de problèmes.

Le champ d'application peut être limité par la nature et par le tonnage des matières à traiter ; un facteur important réside également dans la distance du transport des matières premières intervenant dans le produit fabriqué.

2. LES AVANTAGES DE L'USINE FLOTTANTE

Les avantages évoqués en faveur de l'usine flottante sont cités ci-dessous.

1 - Il est souvent difficile de construire, d'achever et de mettre au point une usine dans un pays non-industrialisé, disposant de peu de main-d'œuvre spécialisée.

2 - On évite de déplacer au loin des spécialistes à haut salaire, avec tout ce que cela comporte de frais supplémentaires.

3 - Cette méthode réduit la congestion des ports et les retards dus au remplacement de pièces défectueuses ou à des malentendus pour la mise au point d'appareillages sophistiqués.

4 - L'usine étant importée complètement achevée, les formalités douanières sont plus simples et moins longues.

5 - L'infrastructure est réduite à une digue de protection, ou à un lit d'échouage si l'usine flottante est située dans une région à faible amplitude de marée et protégée contre les fortes houles. Si l'usine flottante est destinée à une région ébranlée périodiquement par des séismes, l'infrastructure consistera à draguer un chenal d'accès et un lagon, à protéger par une digue.

6 - L'usine flottante peut être mise à l'abri des secousses telluriques.

7 - Dans certains cas, cette solution pallie le manque l'espace de sites surpeuplés.

8 - En cas de troubles dans une région, ou un pays, l'usine flottante peut être déplacée ailleurs.

Cependant l'usine flottante doit répondre à certaines conditions pour éviter des détériorations pendant le voyage du lieu de construction au site définitif ou par accélérations provoquées lors de tremblements de terre, par le mode d'amarrage dans un lagon. Ces deux problèmes sont examinés ci-dessous.

3. PROBLÈME DE LA STABILITÉ

D'une façon générale, l'encombrement d'une usine à monter sur une barge ou sur un bateau est grand par rapport à son poids. En conséquence, on est conduit à adopter une flottaison de grandes dimensions par rapport au volume de la carène. Or on sait que

$$r = \frac{I}{V}$$

r = rayon métacentrique en m ;

I = moment d'inertie de la flottaison en m^4 ;

V = volume de la flottaison en m^3 .

Il en résulte une grande hauteur métacentrique qui peut donner naissance à des réactions trop vives du navire ou de la barge pendant le voyage en mer entre le pays de construction et le lieu d'utilisation de l'usine.

En effet, on sait que la période de roulis d'un flotteur est donnée par

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_0}{P(r-a)}}$$

T = période de roulis, en sec ;

r = rayon métacentrique, en m ;

a = hauteur du centre de gravité au dessus du centre de carène, en m ;

I_0 = moment d'inertie de la barge et de l'usine autour de l'axe longitudinal de l'ensemble, en $t.m^2$;

P = déplacement de la barge ou du navire en t.

Si θ_m est l'angle maximum d'inclinaison pendant le roulis, un appareil de masse m situé à une distance l de l'axe de roulis subira une vitesse linéaire $d\theta$

$l \frac{d\theta}{dt}$, avec θ variable à chaque instant selon la loi sinusoïdale :

$$\theta = \theta_m \sin \frac{2\pi t}{T}$$

et donc

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{2\pi}{T} \theta_m \cos \frac{2\pi t}{T} = \frac{2\pi}{T} \sqrt{\theta_m^2 - \theta^2}$$

Il sera soumis à une force tangentielle (fig. 1)

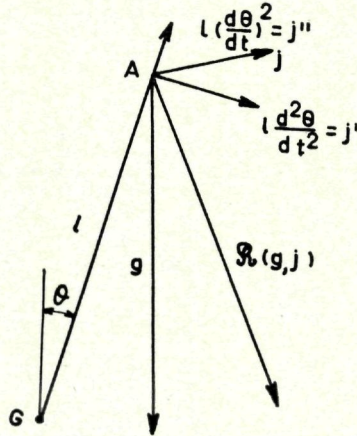


Fig. 1. - Accélération en un point d'un navire.

$$mj' = m l \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = - \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \theta_m \sin \frac{2\pi t}{T} = - \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \theta$$

et

$$mj' = - m l \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \theta$$

et à une force centrifuge

$$mj'' = m l \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2$$

$$mj'' = m l \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 (\theta_m^2 - \theta^2)$$

La résultante de la pesanteur, de la force tangentielle et de la force centrifuge en un point du navire et des différentes installations à bord doit être prise en considération pour le calcul des équipements incorporés dans la construction de l'usine (fig. 1).

Pour augmenter la période T et, par là, réduire les accélérations tangentielle et centrifuge, il faut réduire la valeur de $(r-a)$, soit en abaissant le métacentre, soit en relevant le centre de gravité, ou en agissant sur ces deux facteurs à la fois, en maintenant cependant le métacentre au dessus du centre de gravité d'une façon raisonnable pour assurer la stabilité du navire.

C'est ainsi qu'on peut remplir d'eau de ballast les compartiments du double fond et les réservoirs latéraux prévus sous le pont, lorsque le navire est conçu de cette façon (fig. 2).

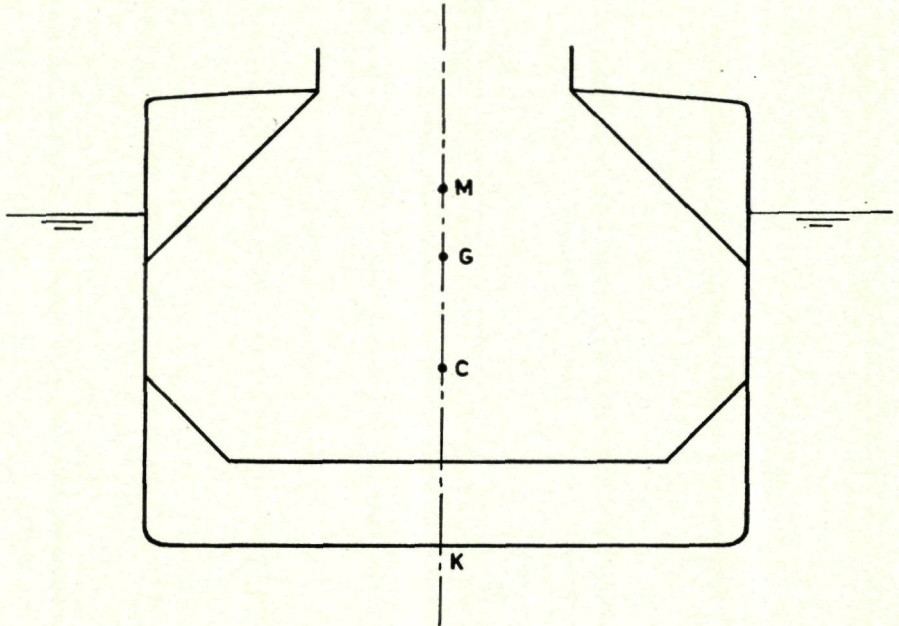


Fig. 2. - Section au travers d'une coque avec waterballasts supérieurs et inférieurs.

L'ensemble de ces réservoirs permet de régler la stabilité du navire. En augmentant le déplacement par remplissage des ballasts, on diminue la valeur du rayon métacentrique. En introduisant un volume d'eau dans les réservoirs sous le pont, on élève le centre de gravité, tandis qu'en ajoutant de l'eau uniquement dans le double fond, on l'abaisse.

Toutefois, une faible stabilité initiale n'empêche pas d'obtenir une stabilité dynamique totale élevée ; grâce à un grand franc-bord, la réserve de stabilité est confortable et l'angle de chavirement élevé.

Lorsque le projet comporte une usine avec colonne de distillation ou une « prilling tower », les accélérations angulaires doivent être réduites de façon à ne pas déranger le fonctionnement des appareillages situés dans les parties élevées ou en tout autre endroit de l'installation .

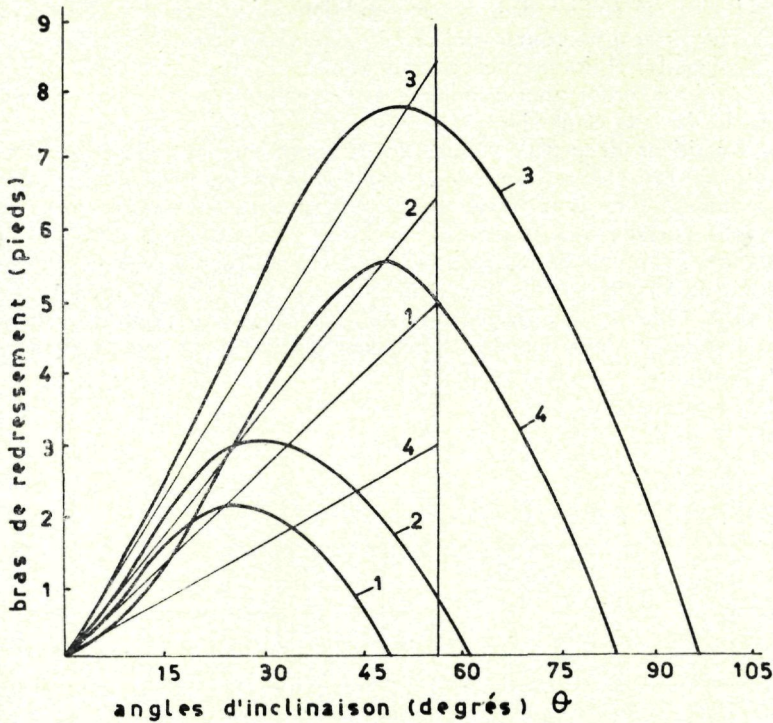


Fig. 3. - Courbes de stabilité d'un bateaux-usine.

4. EXEMPLE D'UN BATEAU-USINE À ENGRAIS AZOTÉ

Ci-dessous, on trouve un exemple d'une usine à engrais azoté d'une capacité de production de 1200 t/jour ; elle devait être montée sur un ancien minéralier qui, après jumboisation, avait été transformé en vracquier en allongeant la coque de 32m et en augmentant le creux de 2,50 m.

Après cette transformation, les caractéristiques principales du vracquier étaient les suivantes :

- Longueur hors tout	213,288 m
- Longueur entre perpendiculaires	203,836 m
- Largueur hors membrures	23,469 m
- Creux de côté sur quille	15,469 m
- Tirant d'eau maximum	11,207 m
- Déplacement au tirant d'eau max.	40 151 long ton

L'usine d'engrais azoté comportait notamment un réacteur pesant 370 t, d'un diamètre de 3,50 m et d'une hauteur de 31,50 m ; de plus, une « prilling tower » pesant 204 t mesurait 20 m de diamètre et 40 m de hauteur. Le navire usine, qui comportait une installation de propulsion avec turbine à vapeur de 10 500 ch, devait naviguer d'un port belge jusqu'en mer de Java et fonctionner en différents sites plus ou moins protégés.

- La stabilité a été étudiée dans quatre conditions de chargement, à savoir :
- 1 – Le navire léger avec l'usine complète, y compris les matières se trouvant à bord pendant la fabrication de l'engrais azoté.
 - 2 – Le navire en ordre pour le voyage avec combustible et consommables, mais tous les ballasts étant vides.
 - 3 – Les conditions de départ, comme en 2, avec l'eau de ballast dans des doubles fonds, mais les réservoirs situés sous le pont étant vides.
 - 4 – Les conditions de départ avec eau de ballast dans les doubles fonds et les réservoirs latéraux sous le pont.

La figure 3 montre la variation du bras de levier du couple de redressement en fonction de l'angle d'inclinaison, ainsi que le (r-a), ou G M initial.

Le tableau I donne les caractéristiques du vracquier après transformation en bateau usine ; à noter que le déplacement maximum est loin d'atteindre celui du navire initial à plein chargement.

TABLEAU I

Caractéristiques du navire avec usine à engrais.

Conditions	Déplacement long tons	K M ft	K G' ft	G' M ft	Tirant d'eau ft	
					avant	arrière
1	14 503,7	41,8	36,6	5,2	12,087	14,985
2	14 664,7	41,1	34,4	6,7	7,791	20,112
3	20 690,7	34,9	26,3	8,6	16,058	21,037
4	23 890,2	32,2	29,0	3,2	21,651	20,861

Le tirant d'eau du navire usine atteint à peine 6,50 m, alors qu'avec un chargement en vrac, la même unité pouvait caler 11,207 m. Grâce à la disposition des waterballasts, il est possible de naviguer avec un G'M compris entre 3 et 5 pieds, ce qui est raisonnable.

On remarque que l'aire comprise entre la courbe de stabilité 4 et l'axe des abscisses est plus grande que celle sous la courbe 2, alors que pour la première le G'M vaut 3,2 ft, contre 6,7 ft pour la seconde. L'aire entre la courbe de stabilité et l'axe des abscisses représente la stabilité dynamique totale.

Des calculs des accélérations ont été établis pour un vent exerçant une pression de 130 kg/m², en considérant des axes rectangulaires ayant pour origine le centre de gravité G du navire ; les résultats sont donnés au tableau II.

TABLEAU II

Accélération établies pour les divers mouvements (fig. 4).

Mouvements *	Direction	arrière	milieu	avant
cavement	linéaire selon x longitudinal	0,2 g	0,2 g	0,2 g
pilonnage et tangage	linéaire selon z vertical	0,86 g	0,34 g	1,05 g
lacet et embardée	linéaire selon y transversal	0,15 g	0,05 g	0,15 g
Roulis	rotation axe des x	0,10 radian/sec ²		
Tangage	rotation axe des y	0,077 radian/sec ²		

* Terminologie anglaise équivalente :

Surge = cavement, heave = pilonnage, pitch = tangage, sway = embardée, yaw = lacet, roll = roulis.

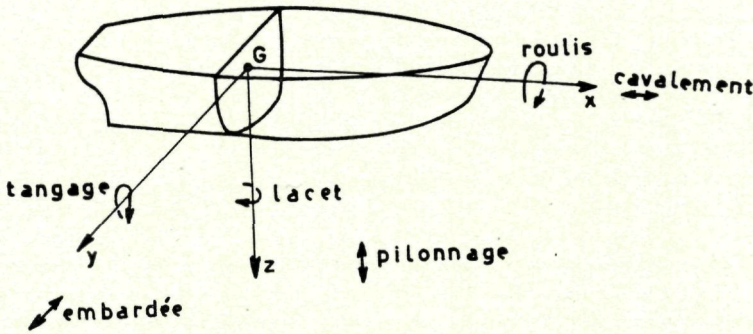


Fig. 4. - Les mouvements d'un navire.

Les angles maximum de roulis et de tangage pour le voyage envisagé ont été évalués respectivement à 25°36' et à 5°30'. Les périodes propres de roulis et de tangage valaient respectivement 13,5 sec. et 7,0 sec. A partir de ces données, il est possible de calculer les accélérations en tous points du navire-usine et elles sont loin d'être négligeables. Les fournisseurs d'équipements incorporés dans l'usine doivent être informés des accélérations génératrices de fatigues alternatives auxquelles seront soumises leurs fournitures, car elles diffèrent sensiblement de celles rencontrées dans les installations terrestres. Certaines parties, notamment les fixations, pourraient nécessiter des renforcements.

D'autre part, le fonctionnement correct de la « prilling tower » n'est possible que si l'inclinaison reste inférieure à 1°30'. Les réservoirs latéraux sous le pont ont une capacité de 3 250 t ; lorsqu'ils sont remplis, la variation du bras de redressement du bateau-usine correspond à la courbe de stabilité 4 (fig. 3) ; lorsque ces réservoirs sont vides, il faut considérer la courbe 3.

L'usine fonctionnant dans une baie protégée peut être soumise à des bourrasques et être mise en danger par des accélérations trop fortes ou une inclinaison supérieure à $1^{\circ}30'$. Ainsi, le personnel doit sentir quand le fonctionnement de l'usine flottante doit être arrêté. Si cette opération devait se répéter, le bras de redressement pourrait être modifié en vidant et en remplissant, selon les circonstances, les réservoirs de ballast latéraux situés sous le pont ; le remplissage et la vidange de ces réservoirs donnent la possibilité de faire varier le bras de redressement entre les courbes 3 et 4. Finalement, le personnel doit prendre l'habitude de régler le niveau dans ces waterballasts, compte tenu de l'intensité du vent et de l'état de la mer.

Il s'agit incontestablement d'une question d'observation et de sensibilité aux choses de la mer qui s'acquiert par l'expérience.

5. CHOIX ENTRE BATEAU OU BARGE-USINE

Ci-avant, nous avons exposé le cas d'un bateau-usine ; mais il est tout aussi concevable d'installer un ensemble industriel sur une barge ; quels sont les critères qui guideront dans le choix de l'une ou de l'autre solution ?

Actuellement, il est assez facile d'acquérir un ancien bateau en vue d'y ériger une installation industrielle. Grâce à sa mobilité, il peut se déplacer vers le port le plus proche du constructeur de l'usine qu'on envisage d'installer à bord ; éventuellement, si plusieurs constructeurs interviennent dans un ensemble, le bateau-usine peut se déplacer lui même de port en port ou de quai en quai. Une fois les travaux de montage et les essais achevés, l'ensemble peut se rendre vers le lieu de destination finale par ses propres moyens.

Si la matière première consiste en poches gazeuses situées au large, chacune d'elles permettant d'assurer trois ans d'exploitation, le bateau-usine peut passer de l'une à l'autre, sans devoir recourir aux services d'un remorqueur. Entre deux stations prolongées, il pourra d'ailleurs se rendre vers un port équipé d'un bassin de radoub, afin d'y subir un carénage d'autant plus nécessaire qu'un bateau à l'arrêt constitue un champ favorable pour la croissance de végétaux et de coquillages genre barnacles ou balanes, qui finissent par attaquer l'acier de la coque, en y formant de petits cratères.

Un vacquier répond généralement à des qualités nautiques assurant une stabilité ni trop faible, ni trop forte, car il est pourvu de réservoirs latéraux sous le pont et d'un double-fond permettant de régler les hauteurs du centre de gravité et du métacentre.

Cependant, il s'agit souvent de bateaux qui ont navigué sous pavillon de complaisance et dont l'état d'entretien laisse fortement à désirer, ce qui entraîne d'importants frais de réparation, sans compter les transformations pour y installer l'usine ; par ailleurs, il faut s'accommoder des formes de la coque, ce qui rend souvent malaisé la mise en place de l'appareillage ; un espace important est sacrifié pour conserver la salle des machines.

Une barge neuve présente l'avantage de pouvoir être mieux adaptée à l'usine à y installer, avec perte d'espace réduite ; on dispose aussi d'une construction neuve (fig. 5).

En revanche, elle nécessite d'être remorquée depuis le chantier de construction jusqu'au site d'exploitation et il faut recourir aux services de remorqueurs, ce qui en soi n'est pas très grave. Souvent de pareilles barges offrent une

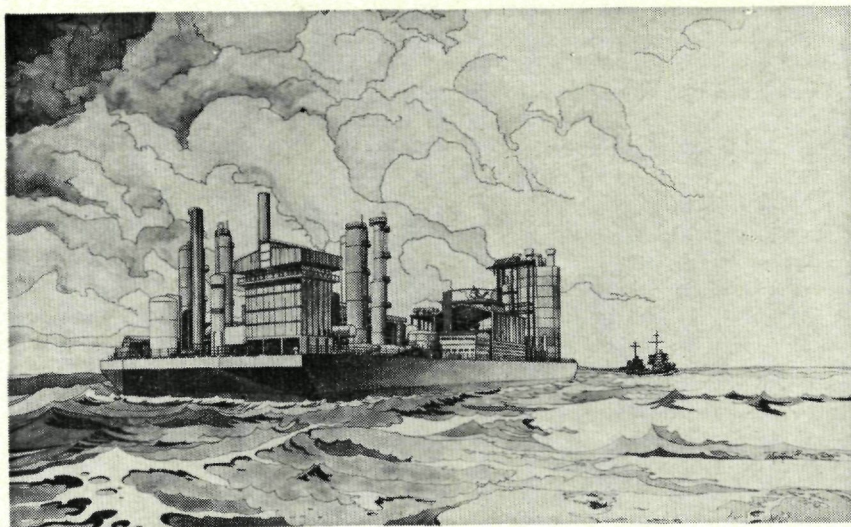


Fig. 5. – Vue d'artiste d'une barge-usine.

grande résistance à l'avancement, car les formes ne sont pas conçues en vue des qualités nautiques et la coque se compose uniquement de panneaux plans raccordés à angles vifs. De plus, les rapports des dimensions sont fréquemment défavorables, la largeur étant trop grande par rapport à la longueur, car le projet a été conçu pour servir de plate-forme à l'usine et non pour naviguer.

Ceci a pour conséquence une grande hauteur métacentrique et un bras de levier de stabilité élevé. Aussi on risque, au cours du périple en mer, des réactions très vives par gros temps. Dans ce cas, il est impérieux de n'effectuer le voyage sur longue distance qu'à la période pendant laquelle la probabilité de rencontre du gros temps est la plus faible. Si d'aventure un pareil convoi se trouvait pris dans une forte houle, il devrait se placer de façon à recevoir les vagues de front, pour éviter les fortes accélérations engendrées par le roulis.

Ainsi, par exemple, l'usine à engrais azoté, dont il a été question au paragraphe 4, aurait pu être montée sur une barge neuve conçue spécialement pour l'y installer. Si on défalque 20 % de la longueur du bateau du projet primitif, on disposerait d'une superficie d'environ 4000 m² pour la partie usine.

6. UN EXEMPLE DE BARGE-USINE

Ci-dessous, un exemple théorique de barge destinée à supporter une usine de liquéfaction de gaz à installer dans un pays soumis à des séismes.

Les caractéristiques principales de la barge-usine sont les suivantes.

– Longueur entre p.p. à 4,06 m t.e.	145,00 m
à 5,00 m t.e.	146,00 m
– Largeur hors membrures	28,00 m
– Creux de côté sur quille	9,00 m
– Tirant d'eau pour le voyage	4,06 m

- Tirant d'eau, en fonctionnement	5,00 m
- Coefficient de remplissage à 4,06 m	0,960
à 5,00 m	0,963
- Déplacement en long tons à 4,06 m	15 980 lt.
à 5,00 m	20 195 lt.
- Rayon métacentrique initial à 4,06 m	16,76 m
à 5,00 m	13,57 m
- KM à 4,06 m	18,87 m
à 5,00 m	16,17 m
- KG à 4,06 m	17,61 m
à 5,00 m	14,90 m
- KM - KG à 5,00 m	1,26 m
- KM - KG à 4,06 m	1,27 m

Pour le voyage, le $KM - KG$, c'est à dire le $r_0 - a$, vaut 1,26 m, ce qui est encore raisonnable. Par temps modéré, ceci ne pose pas de problème ; par gros temps, la possibilité existe de le réduire en remplissant partiellement certains compartiments du double-fond, en veillant à introduire une même quantité d'eau à babord et à tribord, afin d'éviter une gîte qui diminuerait la réserve de stabilité de la barge-usine (fig. 6).

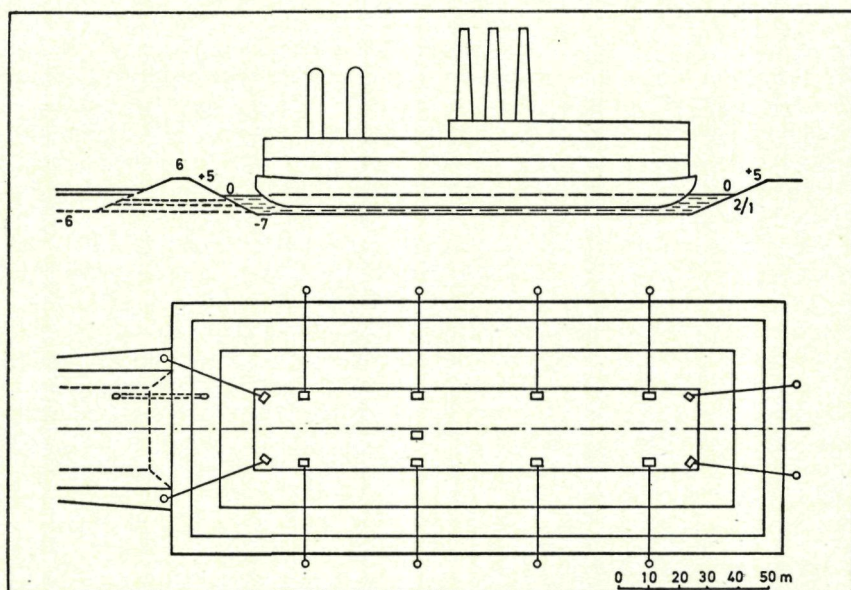


Fig. 6. - Barge-usine dans le lagon avec ses amacres.

La hauteur du centre de gravité relativement élevée provient de ce qu'une pareille usine comporte des colonnes de réfrigération atteignant 60 m de hauteur, leurs sommets se trouvent 62 m au dessus de la quille. Une superstructure assez développée avec escaliers, plates-formes de travail et d'accès à l'appareillage de l'usine, de salles de commande et de contrôle, des bureaux et le logement pour une quinzaine de personnes relèvent le centre de gravité

de la barge proprement dite. Le poids de la coque a été estimé à 4 385 l.t. et de la barge, y compris la superstructure, à 5 920 l.t. ; le poids de l'usine à vide vaut 10.060 l.t.

On considère que la barge-usine sera remorquée à vide à une vitesse de 5 nœuds ; pour éviter une résistance excessive à l'avancement, l'avant se relève selon une parabole en formant un angle de 45° à la flottaison au tirant d'eau de 4,06m.

Les calculs des accélérations ont été établis en considérant des axes rectangulaires conformément à la représentation de la figure 4.

Les résultats sont donnés dans le tableau III ci-dessous pour la barge à l'arrêt et à vide.

TABLEAU III

Accélérations établies pour les divers mouvements, la barge étant à l'arrêt et à vide.

Mouvements	Direction	arrière	milieu	avant
cavalement	linéaire selon x longitudinal	0,222 g	0,222 g	0,222 g
pilonnage et tangage	linéaire selon z vertical	0,682 g	0,334 g	0,771 g
lacet et embardée	linéaire selon y transversal	0,10 g	0,05 g	0,10 g
Roulis	rotation axe des x	0,096 radian/sec ²		
Tangage	rotation axe des y	0,069 radian/sec ²		

Les angles maximum de roulis et de tangage pour le voyage sont évalués respectivement à 27°06' et à 7°30' ; cependant si, par gros temps, on place la barge face à la direction de propagation de la houle, l'angle de roulis ne sera plus que de 13°33' ; les périodes propres de roulis et de tangage à l'arrêt valent respectivement 13''83/100 et 8''68/100.

En navigation à une vitesse de 5 nœuds, les accélérations et les périodes des mouvements ne sont pas sensiblement différentes.

La superficie de la plate-forme d'installation de l'usine vaut 145 × 28 = 4 060 m² ce qui est raisonnable et le rapport longueur/largeur égal à 5,18 est acceptable pour le remorquage en mer.

Pour le voyage, il est recommandable de haubaner les parties hautes de l'usine, de caler les pièces mobiles des équipements et de renforcer provisoirement les attaches servant à la fixation des appareils partout où cela s'avérerait nécessaire.

On pourrait encore réduire le rayon métacentrique apparent en disposant, à l'avant et à l'arrière, des compartiments partiellement remplis d'eau.

7. LE SÉJOUR AU SITE D'EXPLOITATION

Le bateau, ou barge-usine, travaillera soit le long de la côte dans un site protégé, soit dans un lagon dragué à la rive, avec chenal d'accès ; qu'il s'agisse de l'une ou l'autre situation, on peut échouer l'ensemble sur un fond aménagé. Ceci suppose cependant deux conditions. Il ne faut pas que la région soit sujette à des séismes ou à des tsunamis et il faut que les marées soient de faible amplitude. Des zones à raz de marée, comme le Bangladesh, sont évidemment exclues.

Une usine flottante échouée dans un site soumis aux séismes subirait des accélérations communiquées par la terre, sans aucun amortissement, et l'usine serait exposée à connaître des dégâts. L'amplitude des marées doit demeurer faible pour éviter que la coque ne flotte et s'échoue à chaque marée, avec détérioration des couches de peinture protectrice et des tôles de fond.

Le site de travail doit être protégé contre de fortes houles au moyen d'une digue formant un bassin abrité, avec une ouverture pour livrer passage aux bateaux évacuant régulièrement la production ou apportant l'approvisionnement.

Si l'usine flottante est installée dans un lagon, il faut draguer également le chenal d'accès, qui doit être d'une section suffisante et présentant un pied pilote d'au moins 1 m à marée basse (fig. 7).

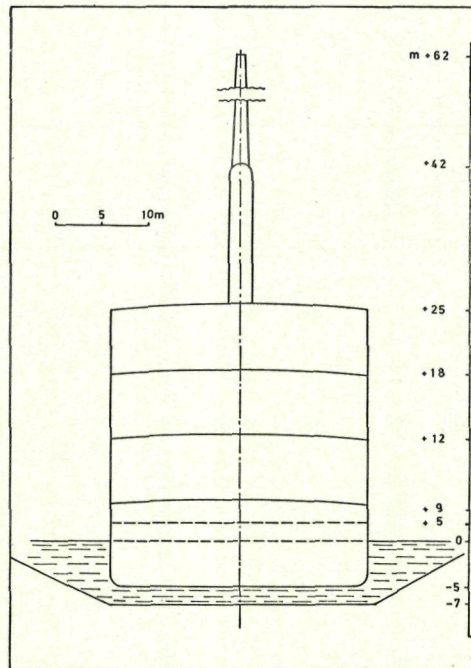


Fig. 7. - Section d'une barge-usine dans un lagon.

L'introduction d'une usine flottante dans un lagon constitue d'ailleurs une opération délicate qui ne peut être entamée qu'en période de prévisions météorologiques favorables. En effet, la barge usine de 145 m de long et de

28 m de large offre approximativement une surface latérale au vent S_l de 3 500 m² et frontale S_f de 750 m². Lorsque le vent atteint une vitesse de 100 km/h, ou 28 m/sec, il exerce une pression de 700 N/m² ; de pareilles circonstances doivent être prévues en régions tropicales et équatoriales. Dans ces conditions, compte tenu de la dépression sur la face opposée au vent, les efforts seront, sur la face latérale

$$F_l = 3\,500 \times 0,07 \times 1,3 = 318,5 \text{ t}$$

et sur la face frontale

$$F_f = 750 \times 0,07 \times 1,3 = 68,25 \text{ t}$$

C'est pourquoi, pendant l'introduction dans le lagon, il faut disposer de remorqueurs pour tirer axialement la barge, d'autres pour la pousser en la maintenant dans l'axe, d'autres encore pouvant exercer une traction latérale pour empêcher la dérive dans le chenal d'accès par vent latéral ou oblique.

Le moment le plus délicat survient lorsque la barge arrive vers l'extrémité du chenal et qu'elle va pénétrer dans le lagon, car le manque de profondeur près du rivage empêche de se servir utilement des remorqueurs destinés à exercer une traction latérale pour résister à la composante transversale d'un vent oblique. Pour cette manœuvre, il est d'ailleurs judicieux d'installer deux signaux lumineux d'alignement dans l'axe du chenal, afin de poursuivre l'opération et la contrôler par temps brumeux ou à la nuit tombante.

Lorsque la barge-usine est en place, le lagon doit être isolé du chenal au moyen d'une digue qui peut être construite avec des matériaux de dragage, s'ils sont de qualité convenant à cet usage. Tout le lagon sera d'ailleurs entouré d'une digue de hauteur suffisante pour le protéger de l'effet des tsunamis, s'il s'agit d'une région à séismes. Les berges du lagon, digue comprise, seront d'une pente inférieure à l'angle de talus naturel, soit de l'ordre de 2 à 3 horizontal pour 1 vertical.

En région tropicale, il faut compenser l'évaporation de l'eau. On pourrait songer à construire une digue perméable ; cependant ce système est à déconseiller, car le coût d'entretien en est élevé à cause de l'érosion. Une autre solution consiste à adopter des berges étanches à l'intérieur du lagon, protégées côté mer par des enrochements, et de prévoir, au travers de la digue, un tube avec clapet non-return, de façon à permettre à l'eau d'y pénétrer lorsque le niveau y est inférieur à celui de la mer et de n'en point sortir dans le cas inverse.

Reste encore un autre problème à résoudre ; une coque à l'état de repos en eau de mer tropicale s'abîme assez rapidement par suite de la croissance d'une flore et d'une faune sur la carène. Pour éviter cet inconvénient, il faut rendre l'eau biologiquement inerte en y déversant un acide empêchant toute vie animale ou végétale, sans risque de détérioration de la coque. Pour agir à bon escient, il faut connaître la composition de l'eau et avoir recours aux services d'un biologiste. Des additions seront effectuées à mesure des nouvelles quantités admises dans le lagon. En eau douce, le problème ne se pose pas.

8. L'AMARRAGE DE L'USINE FLOTTANTE AU MOYEN DE CABLES

Les moyens d'amarrage doivent être conçus pour résister aux efforts provoqués par l'action du vent et, éventuellement, des séismes. Les câbles seront choisis en adoptant un facteur de sécurité égal à 5, pour résister aux efforts engendrés par le vent.

Supposons un câble idéal unique, susceptible de résister à un effort de 320 t exercé latéralement sur la barge. Le module de Young de l'acier du câble vaut $21 \times 10^6 \text{ N/cm}^2$ et sa résistance à la rupture $160 \times 10^3 \text{ N/cm}^2$.

La section d'acier nécessaire vaut $\frac{5 \times 3,2 \times 10^6}{3,2 \times 10^6} = 100 \text{ cm}^2$; la fatigue dans le câble vaut $\frac{160 \times 10^3}{100} = 32 \times 10^3 \text{ N/cm}^2$. Avec un câble de 35 m de longueur, l'allongement vaut :

$$\Delta l = \frac{32 \times 10^3}{21 \times 10^6} \times 3500 = 5,33 \text{ cm}$$

Ce câble idéal, considéré comme une barre rigide, présente une constante élastique k de $320 / 0,0533 = 6000 \text{ t/m}$.

La période de vibration propre de l'ensemble barge-usine plus barre est donnée par l'équation

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = -k y$$

m étant la masse de la barge et k la constante élastique. La solution est donnée par

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

T étant la période propre de vibration de l'ensemble, en secondes.

Pour la barge chargée à 5 m de tirant d'eau, on trouve une période de $3,72/100$.

Mais en réalité, un câble ne se comporte pas comme une barre rigide, il s'allonge davantage et on considère que le module de Young ne vaut que $14 \times 10^6 \text{ N/cm}^2$. Avec un câble de 100 cm^2 de section et de 35 m, l'allongement vaut :

$$\Delta l = \frac{32 \times 10^3}{14 \times 10^6} \times 3500 = 8 \text{ cm}$$

Dès lors, $k = 320/0,08 = 5000 \text{ t/m}$ et la période propre $T = 4,57/100$.

Dans le sens longitudinal, la section d'acier capable de résister à la force engendrée par le vent vaut : $\frac{5 \times 0,7 \times 10^6}{700 \times 10^3} = 22 \text{ cm}^2$. La fatigue dans le câble s'élève à $\frac{160 \times 10^3}{22} = 32 \times 10^3 \text{ N/cm}^2$.

Avec un câble de 35 m de longueur, l'allongement vaut :

$$\Delta l = \frac{32 \times 10^3}{14 \times 10^6} \times 3500 = 8 \text{ cm}$$

La constante élastique vaut : $70/0,08 = 875 \text{ t/m}$ et la période propre $T = 9,71/100$, donc assez longue.

Dans la réalité, l'amarrage ne se fait pas par un seul câble de 100 cm² de section, mais par seize câbles de 6,25 cm² de section de 1''5/8 de diamètre, composés de 6 torons de 37 fils d'acier. Quatre de ces câbles suffiront pour l'amarrage longitudinal. Ces câbles passent par des moufles de façon à former des palans à quatre ou à deux brins.

L'amarrage transversal se fait au moyen de quatre palans à quatre brins et le longitudinal avec deux palans à deux brins.

Pendant un séisme, la barge-usine est supposée demeurer sans déplacement horizontal, grâce à sa masse.

Lors d'un tremblement de terre, trois trains d'ondes arrivent en un point de l'écorce terrestre. Les ondes P et S, primaire et secondaire, qui se succèdent sont de faible amplitude et à courte période ; enfin surviennent les ondes longues L, qui sont de plus forte amplitude, donc plus dangereuses. Au cours d'un séisme, un point du globe reçoit un complexe d'ondes multiples, tant horizontales que verticales. Les composantes verticales ne peuvent être reprises par le mode d'amarrage, mais elles sont amorties par l'eau du lagon, leur effet sur la barge-usine étant amorti par une variation cyclique de la poussée hydrostatique.

Les accélérations horizontales lui sont communiquées par les amarres et des précautions sont à prendre pour atténuer le risque d'effets nuisibles sur les équipements composant l'usine.

Pour compromettre le moins possible la sécurité, l'amarrage répondra aux conditions suivantes :

- 1 - les câbles d'un même bord doivent participer de façon identique à l'amarrage, donc reprendre le même effort ;
- 2 - l'amortissement doit être tel que, pour un séisme d'intensité probable, il n'y ait pas risque de rupture des câbles ;
- 3 - il ne peut y avoir résonance entre la période propre du système masse de l'usine plus moyen d'amarrage et celle du séisme, c'est à dire que les deux périodes doivent être suffisamment différentes, sans être multiples l'une de l'autre.

La première condition est difficilement réalisée en utilisant des câbles amarrés entre bollards fixes, à cause de la faible certitude de l'égale répartition de l'effort entre les câbles.

La seconde condition exige que la tension dans les câbles reste inférieure à la charge de rupture ; pour un séisme d'intensité probable, on peut choisir un coefficient de sécurité moitié moindre que celui admis pour résister à la pression du vent. Ainsi, pour la barge-usine considérée ci-avant, on peut admettre pendant un séisme d'intensité probable, une fatigue dans le câble de $64 \times 10^3 \text{N/cm}^2$. Ceci correspond à un effort total sur les câbles d'amarrage transversal de 640 t et donc à une accélération

$$j = \frac{640 \times 9,81}{20\,518 \times 1,020} = 0,298 \text{ m/sec}^2$$

ou $j = 0,0304 \text{ g}$.

Il y aura rupture lorsque l'effort total sur les câbles d'amarrage atteindra 1 600 t, ce qui correspond à une accélération de $0,75 \text{ m/sec}^2$ ou de $0,076 \text{ g}$.

Dans le cas considéré, l'amarrage par câbles entre points fixes convient si l'accélération probable des séismes est de $0,0304 \text{ g}$ et que l'accélération maximum croyable ne dépasse pas $0,076 \text{ g}$.

Il est difficile de maîtriser la troisième condition ; il faut, de préférence que la période du séisme soit courte, une fraction de seconde, et inférieure à la période de vibration du système masse du bateau-usine plus cables d'amarrage.

9. AMARRAGE AU MOYEN DE RESSORTS AMORTISSEURS INTERCALÉS

Une solution pour amortir les chocs subis lors d'un séisme ou de rafales de vent consiste à intercaler des ressorts entre les points d'amarrage et les palans. Ces derniers seront identiques à ceux prévus pour l'amarrage entre points fixes, donc quatre palans à quatre brins à chaque bord et deux palans à deux brins à chaque extrémité de la barge, soit douze points d'amarrage au total, disposés comme indiqué à la figure 6.

Les bollards fixes se trouvent sur la barge, tandis que les points d'amarrage élastique sont situés à la rive et raccordés aux extrémités libres des cables.

Les efforts sont évidemment identiques à ceux calculés au paragraphe 7, soit 80 t par palan latéral et 35 t pour ceux d'extrémité, la traction dans les cables étant de 20 t au maximum.

On choisira des ressorts hélicoïdaux à section rectangulaire et on les disposera de telle façon qu'ils travaillent à compression. Les formules du calcul de l'effort P et de la flèche f sont les suivantes :

$$P = \frac{4}{9} \cdot \frac{b^2 h}{D} \cdot R$$

$$f = 2,82 \frac{D^3}{G} \cdot \frac{b^2 + h^2}{b^3 h^3} \cdot P \cdot n$$

dans lesquelles :

P = charge, en N ;

h = hauteur de la section, en cm ;

b = largeur de la section, en cm ;

D = diamètre moyen de la spire, en cm ;

n = nombre de spires ;

R = tension du métal, en N/cm² ;

G = coefficient de cisaillement en N/cm² = 8 × 10⁶ N/cm² ;

f = flèche sous charge P, en cm.

Le pas des spires vaut 2 h lorsque les ressorts ne sont pas soumis à compression.

Si on choisit trois ressorts travaillant en parallèle composés de 15 spires d'un diamètre moyen de 30 cm et d'une section de 3,5 cm de hauteur et de 8 cm de largeur, l'acier travaillant à R = 50 × 10³ N/cm², on trouve que

$$P = \frac{4}{9} \cdot \frac{3,5^2 \cdot 8}{30} \cdot 50 \cdot 10^3 = 72\,593 \text{ N ou } 7,4 \text{ t}$$

$$f = \frac{2,82 \cdot 30^3}{8 \cdot 10^6} \cdot \frac{3,5^2 + 8^2}{3,5^3 \cdot 8^3} \cdot 72\,593 \cdot 15 = 36 \text{ cm}$$

avec trois ressorts en parallèle pour une fatigue de $50 \times 10^3 \text{N/cm}^2$, on peut supporter un effort de 22,2 t et l'allongement supplémentaire du palan à 4 brins, grâce à la présence des ressorts, est de $36/4 = 9 \text{ cm}$.

Au paragraphe 8, nous avons vu que l'allongement des cables du palan, sous la pression d'un vent de 100 km/h agissant sur la barge-usine, était de 8 cm.

Grâce à la présence des ressorts, on obtient :

$$\Delta l = 8 + 9 = 17 \text{ cm}$$

et la constante élastique de l'ensemble vaut donc :

$$k = 320/0,17 = 1\,894 \text{ t/m}$$

La période de vibration propre vaut :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{20\,518}{9,81 \times 1\,894}} = 6''6/10$$

Il s'agit d'une solution acceptable pour installer l'usine dans des régions où les séismes sont à période inférieure à 2'', avec accélération probable de 0,125 g et maximum croyable de 0,25 g ; ainsi qu'on peut le voir au tableau IV, si la période est plus longue ou l'accélération plus élevée, on remarque que le déplacement relatif de la barge et des points d'amarrage deviendrait supérieur à 17 cm. La fatigue dans les cables et les ressorts serait plus élevée et on court le risque de rupture de l'une ou l'autre pièce.

Ce système est plus onéreux que le précédent ; les ressorts amortisseurs mesurent 1,05 m de longueur ; si on dispose de suffisamment d'espace autour du lagon, on peut arriver à un résultat identique en adoptant des palans dont les axes des poulies soient distants l'un de l'autre de 55 m au lieu de 35 m.

Une troisième solution consiste à adopter des treuils à traction constante ; la description en est donnée au paragraphe 11.

10. CONSIDÉRATIONS SUR LES SÉISMES

On peut considérer que le mouvement horizontal est d'allure sinusoïdale ; si l'amplitude maximum du mouvement est A_m , et connaissant la période de vibration T de la terre, on peut en déduire la vitesse et l'accélération du mouvement à tout moment par les équations suivantes :

$$A = A_m \sin \frac{2\pi}{T} \cdot t$$

$$v = \frac{2\pi}{T} A_m \cos \frac{2\pi}{T} t$$

$$j = - \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 A_m \sin \frac{2\pi}{T} t$$

Ainsi, connaissant l'accélération maximum et la période, on peut déterminer également l'amplitude du mouvement par les équations ci-dessus, étant en-

tendu que A_m représente l'écart par rapport à la position au repos et que l'écart total, pendant une période, varie de $+ A_m$ à $- A_m$, soit $2 A_m$.

Supposons que la barge-usine, dont les données sont reprises au paragraphe 6, soit amarrée dans une zone où l'accélération probable des séismes soit évaluée à $0,125 g$, ou $1,23 \text{ m/sec}^2$, et l'accélération maximum croyable à $0,25 g$, ou $2,45 \text{ m/sec}^2$. Si les amarres sont raccordées entre bollards fixes, les efforts communiqués à la barge valent dans le premier cas $2\,573 \text{ t}$ et, dans le second, $5\,124 \text{ t}$, donc bien supérieurs à la limite de rupture de $1\,600 \text{ t}$ de l'ensemble des cables.

La période exerce une influence sur l'amplitude du mouvement relatif de la barge et de la terre, ainsi qu'il ressort du tableau IV établi pour des périodes de $1''$ à $8''$ et pour des accélérations de $0,125 g$ et de $0,25 g$; il donne les vitesses et les amplitudes maxima des mouvements relatifs.

TABLEAU IV

Vitesses et amplitudes des mouvements pendant un séisme pour des périodes de $1''$ à $8''$.

Période T en sec	j = 0,125 g ou 1,23 m/sec ²		j = 0,25 g ou 2,45 m/sec ²	
	v_m m/sec	A_m m	v_m m/sec	A_m m
1	0,195	0,031	0,390	0,062
2	0,393	0,125	0,785	0,250
3	0,586	0,280	1,173	0,560
4	0,782	0,498	1,565	0,997
5	0,979	0,779	1,958	1,558
6	1,175	1,122	2,350	2,243
7	1,370	1,526	2,739	3,0053
8	1,566	1,994	3,132	3,988

Des périodes inférieures à $2''$ sont à considérer comme courtes et se rencontrent souvent. Une durée de période de $5''$ à $7''$ est considérée comme moyenne et plus rare; exceptionnellement la période peut aller jusqu'à $10''$. Les calculs présentés ci avant sont théoriques, car il n'est pas certain que le mouvement au cours d'un séisme soit sinusoïdal, d'autant plus que plusieurs trains d'ondes arrivent simultanément en un point. Cependant ils constituent une bonne approche.

Le nomogramme de la fig. 8 donne la relation entre les déplacements, les vitesses, les accélérations et les fréquences $f = 1/T$.

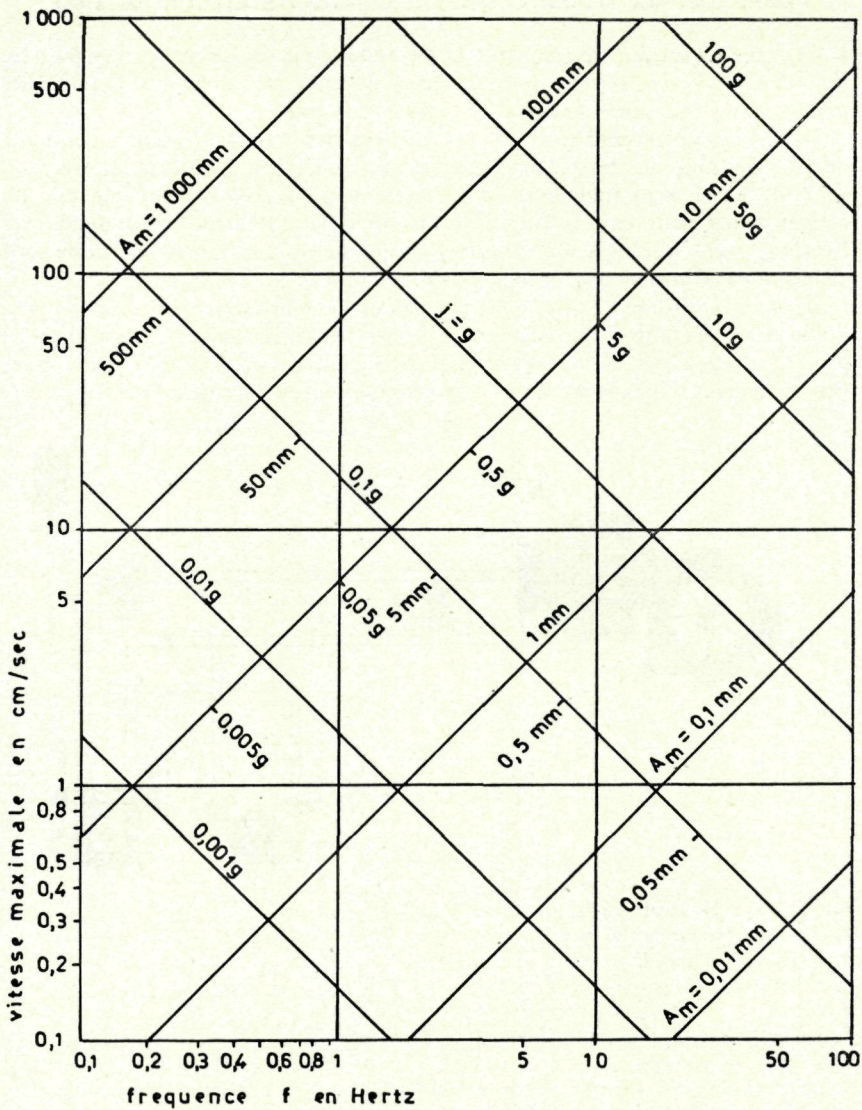


Fig. 8. — Nomogramme donnant les déplacements A_m et les accélérations, en g, en fonction de la vitesse maximale v_m en cm/sec et des fréquences $f = \frac{1}{T}$ en Hertz.

11. AMARRAGE PAR TREUIL À TENSION CONSTANTE ET SON RÉGLAGE

L'amarrage au moyen de treuils à traction constante est de nature à reprendre les efforts nés des séismes à courte période et à atténuer ceux-ci pour des périodes plus longues.

Dans l'exemple traité ci-avant, on utilisera des treuils à traction constante de 20 t agissant sur des palans à quatre brins de façon à obtenir une traction de 80 t dans le sens transversal ; des treuils identiques agiront sur des moufles à deux brins pour exercer un effort de 40 t dans le sens longitudinal. Ces treuils peuvent résister à une traction statique de 40 t et rentrer un câble sous charge 20 t à une vitesse de 0,4 m/sec.

Le treuil à tension constante est mû par un moteur électrique et se compose d'une partie mécanique semblable à celle des treuils ordinaires ; il est entraîné par engrenages avec embrayage à griffes et équipé d'un frein à friction commandé à main. Un schéma du circuit hydraulique est représenté à la figure 9.

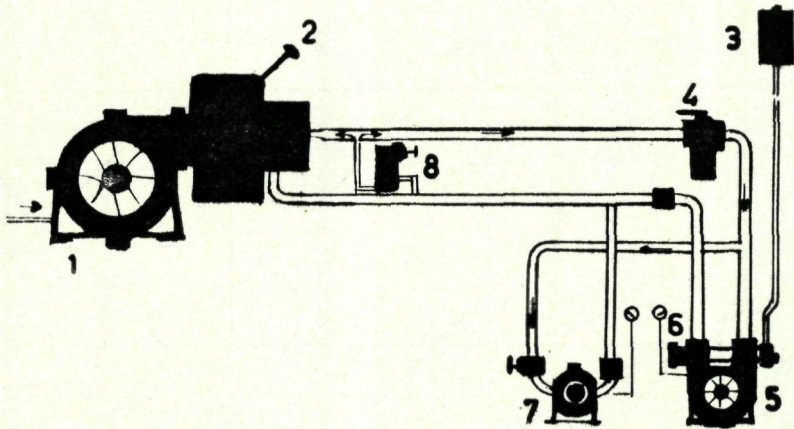


Fig. 9. — Circuit hydraulique du treuil à tension constante

1. moteur hydraulique du treuil
2. levier de commande
3. réservoir d'expansion
4. filtre
5. pompe principale
6. soupape de sécurité
7. pompe à vis pour amarrage à tension constante
8. vanne de contrôle de la tension

L'entraînement se fait par un moteur hydraulique (1) fonctionnant à l'huile, susceptible de tourner à une vitesse double pour les charges légères. Son rotor est à ailettes hélicoïdales lui permettant les deux sens de rotation, selon la direction de circulation de l'huile.

La vanne de contrôle de la tension (8) peut être actionnée à la main de façon à régler avec précision la traction dans le câble, en agissant sur la pression du circuit d'huile. La pompe principale (5) est utilisée pendant les manœuvres ordinaires d'amarrage, puis elle est arrêtée ou sert à actionner d'autres engins hydrauliques. Lorsque les amarres sont placées sous tension

constante, seule la pompe (7) fonctionne et la traction dans les cables est réglée par la pression du circuit, par l'intermédiaire de la vanne de contrôle (8). Si la tension dans le cable est plus élevée que celle sélectionnée, le treuil cède ; s'il y a du mou dans le cable, le treuil agit de façon à amener la tension au taux désiré.

Dès lors comment faut-il régler la tension dans les cables au moyen des treuils dans le cas d'une barge-usine amarrée dans un lagon ? Le cas est très différent de celui d'un bateau amarré à quai où il suffit de rester en contact avec l'ouvrage et d'allonger le cable en maintenant une tension déterminée si le bateau est en chargement ou à marée descendante ; dans le cas contraire, le treuil reprend le mou dans le cable, de façon à maintenir la tension prévue.

La barge-usine décrite au paragraphe 6 est amarrée au milieu du lagon et ne prend pas appui contre un quai. Elle est maintenue en place au moyen de huit palans à quatre brins, quatre à chaque bord agissant dans le sens transversal, deux à deux brins à chaque extrémité en direction longitudinale. Par temps calme, chaque palan exerce une légère traction, par exemple 1 tonne, ce qui maintient la barge-usine au milieu du lagon, car les forces exercées s'équilibrent.

Si un tremblement de terre survient et que les rives du lagon bougent par rapport au flotteur, les cables mis sous tension s'allongent d'autant plus rapidement que la traction initiale est plus faible, tandis que ceux qui prennent du mou se raccourcissent ; alternativement, les cables se tendent et se détendent. L'intensité des efforts développés dans les cables dépend des accélérations engendrées par le séisme, de la période des trains d'ondes et de l'accélération dont est capable le treuil.

Les séismes sont malheureusement encore imprévisibles. On a vu que des trois trains d'ondes qui parviennent en un point du globe terrestre, c'est celui des ondes longues qui est le plus à redouter.

Avant l'installation d'une barge-usine dans un lagon, il faut mener une enquête sur les séismes antérieurs. On calculera les moyens d'amarrage de telle sorte que pour une accélération probable, mettons 0,125 g, il n'y ait pas de destruction ; pour l'accélération maximum croyable, mettons 0,25 g, on admettra certains dégâts, sans destruction totale de l'usine.

Il est cependant impossible d'affirmer que dans une région donnée l'accélération et la période des séismes ne dépasseront jamais certaines limites. Pour le calcul des installations, il faut prévoir, dans les parties hautes, des accélérations plus fortes qu'au niveau du sol. Ainsi, lors du séisme du 22 mars 1957 à San Francisco, pour des ondes d'une période de 0,2", on a enregistré au sous-sol d'un immeuble une accélération de 0,05 g, tandis qu'au 15^e étage, elle atteignait 0,12 g.

Pour résister au vent, il faut agir tout autrement. Par temps calme ou légère brise, on peut maintenir le réglage de la traction de chaque palan à 1 t, soit 4 t pour l'ensemble des palans d'un bord de la barge-usine. On sait que la pression du vent sur une surface varie comme le carré de sa vitesse ; or pour une vitesse de 100 km/h, la force développée par le vent sur la structure de la barge-usine considérée s'élève à 320 t.

La tension dans les cables dépend de la force du vent et seuls les treuils du côté d'où vient le vent doivent résister à la traction, ceux sous le vent ayant à reprendre le mou.

D'autre part, les mouvements de la barge-usine doivent être suffisamment réduits, car elle est raccordée par tuyauteries aux installations terrestres de stockage et à celles d'adduction du gaz. Ces tuyauteries doivent être conçues avec des coudes et des boîtes de raccord articulées permettant un déplacement relatif sans ruptures.

Lorsque le vent se lève, la tension dans les cables doit être réglée de telle façon qu'elle équilibre la force développée sur la barge-usine. On peut exécuter le réglage en agissant manuellement sur les vannes de contrôle de la tension (8), mais il est opportun que cela se fasse d'un tableau centralisé à la passerelle supérieure et par l'intermédiaire d'une commande électro-mécanique.

Elle agira sur les vannes réunies en quatre groupes, un pour chaque bord et un pour chaque extrémité.

Puisque la traction dans les cables dépend de l'intensité du vent, on peut imaginer de placer la commande électro-mécanique des vannes, au moyen d'un ordinateur, sous contrôle d'un anémomètre. Néanmoins, lors de tempêtes et bourrasques, il est prudent de placer un surveillant au pupitre de contrôle pour intervenir manuellement en cas de réaction trop lente de l'appareillage, afin de réduire les écarts de la barge par rapport à sa position normale.

Jusqu'à une vitesse de 100 km/h, avec des treuils de 20 t, pour le cas étudié il n'y aurait pas de problème.

Si le vent dépassait cette vitesse, la barge-usine se déplacerait jusqu'à demeurer en contact avec la berge du lagon. Il est à noter que dans les zones équatoriales et tropicales, il est rare que le vent atteigne une vitesse de 80 km/h, ce qui correspondrait à un effort total de 205 t sur la barge-usine considérée. Le calcul avec 100 km/h constitue donc une bonne marge de sécurité, d'autant plus que le vent souffle souvent en rafale aux grandes vitesses. Sous l'action des rafales les cables se tendraient et se détendraient, en amortissant les chocs grâce à la présence des treuils à tension constante. Ceux-ci peuvent d'ailleurs résister à une traction de 40 t, ce qui correspond à une hypothétique vitesse de vent de 140 km/h pour le cas considéré, donc exceptionnelle, si pas improbable.

12. CONCLUSIONS

Les principales conclusions à tirer de cette étude sont les suivantes :

1 - Pour le voyage du chantier au lieu de travail, la stabilité initiale du bateau-usine doit être modérée, mais la stabilité dynamique totale élevée.

2 - Sur le lieu du travail, on a intérêt à augmenter la stabilité initiale pour réduire la gîte résultant d'un moment inclinant. Les exigences des points 1 et 2 peuvent être satisfaites grâce à des waterballasts judicieusement répartis dans la coque.

3 - Dans les zones à séismes modérés, on utilisera l'amarrage au moyen de palans dont la distance entre axes des moufles est suffisante pour porter la période propre de vibration au-dessus de la période probable des séismes.

4 - Dans des zones à séismes plus forts, on peut augmenter la période propre du système en intercalant des ressorts amortisseurs dans le moyen d'amarrage.

Dans les solutions indiquées en 3 et 4, par l'élasticité du mode d'amarrage, la barge est ramenée au milieu du lagon automatiquement dès que la perturbation cesse.

5 – Dans des zones à séismes forts pour allonger encore la période propre du système d'amarrage, on peut utiliser des treuils à tension constante et y raccorder l'extrémité libre du câble des palans d'amarrage.

Ce système convient pour les séismes ; pour résister au vent, il faut régler la tension des treuils de façon à ramener l'usine au milieu du lagon. Le coût de cet amarrage est plus élevé ; un contrôle et une surveillance rigoureuse s'imposent.

6 – En cas de séismes ou de tsunamis très violents, aucun mode d'amarrage ne soustraira l'usine à des dégâts, mais l'élasticité du mode d'amarrage peut réduire l'importance des destructions.

7 – Une station météorologique et sismologique sera installée à proximité du lagon et on se tiendra en relation avec les stations voisines.

Summary

The floating factories

The factory-ship is an up to date solution for sophisticated equipment destined to developing countries with underequiped harbours.

Two problems necessitate particular attention.

- 1 – The initial stability during the trip from the shipyard to the final destination must remain sufficient but not too high ; the total dynamic stability must be so high as possible.
- 2 – In seismic region, the mooring occurs in a lagoon with an elastic system to absorb the accelerations of the earthquake.

Samenvatting

De drijvende werkhuizen

Het drijvend werkhuus is een moderne oplossing voor ingewikkelde uitrusting van havens in onderontwikkelde landen.

Twee problemen vragen bijzondere aandacht :

- 1 – De stabiliteit onder kleine hoeken moet niet te groot zijn maar moet wel een zeer hoge totale dynamische stabiliteit hebben.
- 2 – In gebieden waar aardschokken te vrezen zijn, moet het schip gemeerd worden in een lagoon met voldoende elastische meertouwen om de versnellingen te dempen.