



LES PROBLÈMES DE FONDATION ET LES SOLlicitATIONS SUPPORTÉES PAR LES PLATES-FORMES DE FORAGES ARTICULÉES SUR LE FOND

Communication présentée au
Comité technique de la Société Hydrotechnique de France
le 21 novembre 1969

PAR M. COUPRIE *

L'apparition d'un nouveau type d'ouvrage, la tour oscillante articulée sur le fond, ouvre de nouvelles possibilités à l'exploitation des fonds océaniques.

L'originalité du système imposait que tous les aspects du fonctionnement fussent examinés à partir d'une étude générale des conditions d'équilibre du système. Nous traiterons ici du point précis des fondations des tours oscillantes, mais nous l'aborderons, indépendamment de certains projets précis, dans le cas général et ferons appel à des secteurs de recherche variés : géologie marine, relation entre couches limites et transport des sédiments, moyens d'intervention par grands fonds.

La colonne Elf Océan immergée dans le golfe de Gascogne, est la preuve de la qualité de ce nouvel ouvrage.

Peut-être serait-il utile de rappeler ce que sont les tours oscillantes, appelés aussi colonne oscillante ou plate-forme articulée.

La figure 1 rappelle le schéma de principe.

La figure 2 montre la colonne Elf Océan.

La figure 3 montre une colonne de forage en treillis.

La figure 4 montre une colonne de forage.

La question qui nous intéresse ici, la fondation de ces tours, sera examinée des points de vue suivant :

- forme et nature des sols d'appuis ;
- stabilité du sol : sous pression et érosion ;
- efforts appliqués sur l'embase.

Le sol

La forme et la nature du sol sous-marin conditionnent l'implantation des colonnes et la stabilité de leurs embases. Destinées à supporter des outils d'exploration ou d'explo-

tation par des profondeurs de 100 à 400 m, ces dernières se situent dans les régions marines que l'on appelle la marge continentale : partie immergée du continent qui descend jusqu'au début des plaines océaniques régnant à plus de 2 000 m de profondeur. On y distingue plusieurs zones géographiques :

- la plate-forme continentale, relativement plate, qui s'abaisse doucement de la côte jusqu'à 200 m ;
- le talus continental, de pente beaucoup plus raide, souvent très accidenté dans le haut et qui se poursuit par une pente plus douce pour se raccorder aux plaines océaniques.

Cette pente douce s'accompagne de petites ondulations et de bourrelets : les ondulations précontinentales.

- Le talus est séparé de la plate-forme par une rupture de pente assez nette dite « rebord continental ».

La plate-forme continentale, de largeur très variable suivant les régions, représente des surfaces considérables pour l'implantation des colonnes de 100 à 150 m de hauteur seulement. La pente est très faible, de l'ordre de 0,07° en moyenne selon F. P. Shepard et elle n'est pas uniforme. De plus, de nombreuses irrégularités affectent la plate-forme :

- les reliefs d'origine tectonique, lithologique ou biologique, plus fréquents dans la zone des faibles profondeurs, sont exceptionnels dans la zone qui nous intéresse ;
- les dépressions et les bassins dus à des phénomènes tectoniques ou à une érosion subaérienne.

La deuxième zone qui nous intéresse est la partie supérieure du talus continental. La pente du talus est faible : F. P. Shepard a montré statistiquement que la moyenne est seulement de 7,5/100 et encore dans la partie supérieure. Le long des zones d'accumulation des sédiments elle est

* Chef du Service des Etudes Techniques à la Compagnie Française d'Entreprises, Paris.

beaucoup plus faible, 2/100 environ, tandis que les escarpements les plus raides seraient de 15 à 20°.

La pente du talus est loin d'être régulière mais comprend un certain nombre d'accidents d'amplitudes diverses :

- le « rebord » est la rupture de pente plus ou moins marquée qui sépare la plate-forme du talus. Cette rupture peut être soit très nette et correspondre presque à une falaise, soit, au contraire, très difficile à localiser lorsqu'il s'agit de vases ;
- des pointements rocheux dans la partie supérieure du talus le long des côtes plissées où la plate-forme est particulièrement étroite et accidentée ;
- des escarpements, dus à la lithologie, qui conduisent à une série de gradins correspondant à des couches dures ;
- des canyons sous-marins ;
- des arrachements et glissements de vase.

La marge continentale présente une grande variété de faciès puisque l'on y rencontre presque tous les types de sédiments littoraux et profonds, à l'exception des argiles rouges et des boues à radiolaires. Les sédiments de la marge continentale peuvent avoir des origines diverses, d'abord les sédiments continentaux ou terrigènes, puis les sédiments dus aux organismes constructeurs comme les coraux et les algues, et, enfin, les produits biodétritiques qui peuvent être associés.

La répartition des faciès sur la marge continentale ne se fait pas seulement en fonction de la profondeur mais aussi en fonction de facteurs hydrodynamiques océaniques et même climatiques. Il est difficile de généraliser la répartition des sédiments, il est toutefois possible de définir la distribution des divers faciès des sédiments sur la plate-forme et le talus.

Les blocs, galets et graviers se trouvant sur le littoral et autour des écueils de la plate-forme, on a peu de chance de les rencontrer dans les zones qui nous intéressent. On trouve la roche en place plus souvent qu'on pourrait le penser. On la rencontre surtout sur les marges continentales très plissées ou fracturées ou celles qui portent de nombreuses îles et sur les côtes volcaniques. La présence de roche en place crée souvent des irrégularités de relief. On trouve les sables un peu partout dans la zone littorale jusqu'à 100 m de profondeur. Ils sont purs, vaseux ou coquilliers selon les régions. Ils donnent des fonds relativement plans et horizontaux à l'échelle qui nous intéresse. On peut cependant signaler la présence de dunes hydrauliques, mais ces dernières se situent généralement par des fonds inférieurs à ceux que nous considérons. Les vases et les vases sableuses se trouvent, en principe, dans les zones abritées des courants ou de l'agitation mécanique. On les trouve généralement aux embouchures des grands fleuves qui coulent dans les plaines alluviales, dans les dépressions de la plate-forme, mais aussi sur les flancs des canyons et sur le rebord du talus, sur la partie externe de la plate-forme à des profondeurs variant au-delà de 40 à 100 m selon les régions où prédominent souvent des éléments pélagiques.

Finalement, la forme du fond est peu contraignante puisque les parties accidentées sont peu importantes si l'on se permet, en plus, une marge de quelques dizaines de mètres pour le choix de la position.

Les fonds rocheux, de portance correcte posent des problèmes d'horizontalité. Les fonds sableux ne posent que des problèmes d'érosion. Les fonds vaseux joignent les problèmes de portance et d'érosion.

Nous venons de voir sommairement la forme et la nature des sols qui seront en contact avec l'embase de la colonne ; nous allons étudier maintenant quelles sont les actions de la houle et des courants appliqués à une tour oscillante.

Stabilité du sol

Si l'on calcule la pression au voisinage du fond en utilisant la théorie de la houle irrotationnelle de première approximation pour une amplitude : $2h = 10$ m, nous obtenons les résultats suivants :

La variation, en plus ou en moins, de la pression exprimée en mètres d'eau varie de $1,7 \cdot 10^{-4}$ m pour $2T = 6$ s à $2,37$ m pour $2T = 18$ s à 100 m de profondeur, de $3 \cdot 10^{-9}$ pour $2T = 6$ s à 1 m pour $2T = 18$ s à 200 m de profondeur, de $5 \cdot 10^{-14}$ m pour $2T = 6$ s à $2,6 \cdot 10^{-1}$ m pour $2T = 18$ s à 300 m de profondeur.

Ainsi, la variation de pression au fond, bien que très faible en valeur relative, peut atteindre cependant des valeurs notables en valeur absolue. Une houle de 16 s période et 22,50 m de creux donne une variation de ± 4 t/m² à 100 m de profondeur, de ± 1 t/m² à 200 m et de $\pm 0,2$ t/m² à 300 m.

Une embase, de forme massive, de dimension notable, étanche et munie d'un parafouille subit sur le dessus une variation de pression sinusoïdale. Le dessous de l'embase supporte un système de pressions complexes car l'onde de pression de l'eau chemine dans le terrain, sous l'embase, où, suivant les points, elle subit un amortissement et un déphasage. Il n'existe malheureusement pas à notre connaissance d'étude développée sur ce sujet. Rien ne nous permet actuellement d'évaluer la valeur de la sous-pression et nous sommes réduits soit à la considérer comme égale à la pression moyenne, et d'affecter la variation de pression sur le dessus d'un coefficient de majoration, soit de choisir des dispositions constructives afin que la pression sous l'embase soit toujours égale à la pression extérieure.

Les trajectoires des particules liquides sont horizontales au fond de l'eau et la vitesse varie sinusoïdalement. En reprenant la même théorie que précédemment on peut calculer la valeur maximale de la vitesse ; pour une amplitude de $2h = 10$ m nous obtenons les résultats suivants :

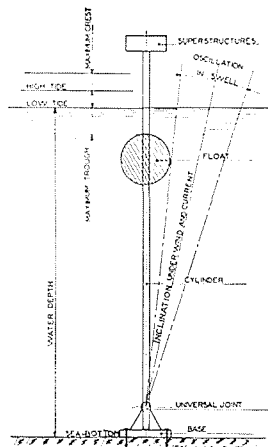
La vitesse maximale U_{\max} exprimée en mètres par seconde varie de $2,1 \cdot 10^{-4}$ pour $2T = 6$ s à $9,4 \cdot 10^{-1}$ pour $2T = 18$ s à 100 m de profondeur, de $4,1 \cdot 10^{-9}$ pour $2T = 6$ s à $3 \cdot 10^{-1}$ pour $2T = 6$ s à $9,1 \cdot 10^{-2}$ pour $2T = 18$ s à 300 m de profondeur.

Ainsi, l'agitation de l'eau, par les fonds qui nous intéressent, est très notable, nous voyons que pour les périodes longues de 14 à 18 s les vitesses maximales au fond sont de l'ordre du décimètre et même du mètre par seconde. Ces vitesses paraissent suffisantes pour mettre en mouvement des particules solides du fond ce qui, en présence de la fondation, peut entraîner des affouillements et nuire à la stabilité de l'ouvrage.

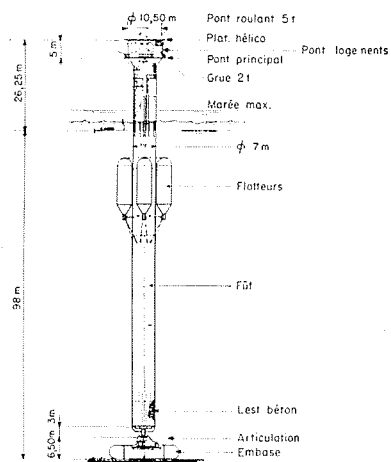
En admettant la répartition des vitesses dans la couche limite proposée par Eagleson qui permet de relier U^* à la vitesse U_{\max} , calculée par la formule de M. Bonnefille, nous trouvons une relation très simple entre D et U_{\max} de la forme :

$$D = K U_{\max}$$

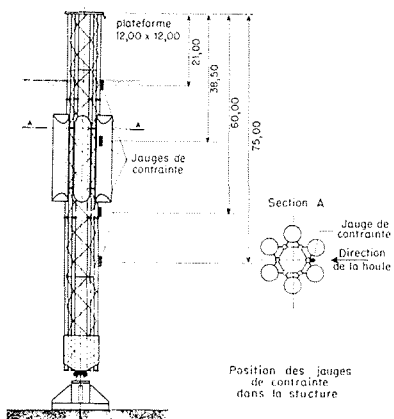
où K dépend principalement de la période de la houle et de la viscosité cinématique de l'eau de mer et varie entre 5



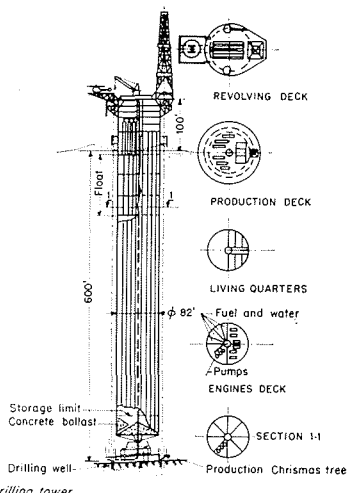
1/ Schéma de principe - General set-up



2/ Colonne Elf Océan - Elf Ocean tower



3/ Colonne de forage en treillis - Trellis drilling tower

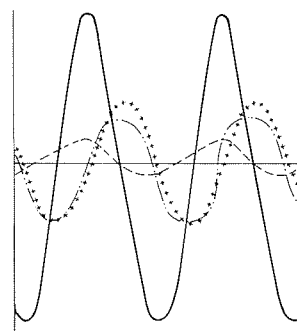


4/ Colonne de forage - Drilling tower

COLONNE FÛT LISSE
SMOOTH-WALLED TOWER

H = 12,00
T = 12 S
F = 0

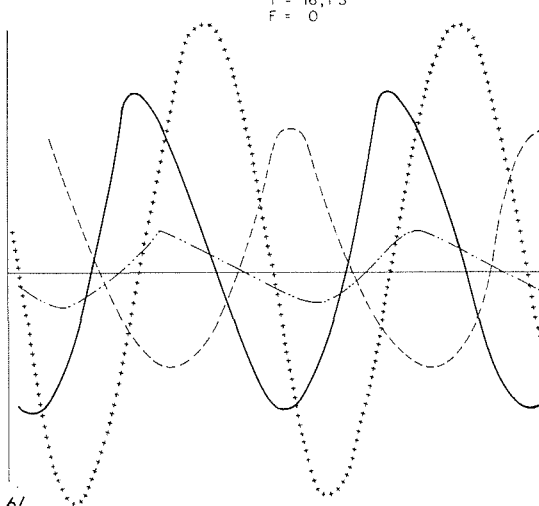
5/



COLONNE TREILLIS
TRELLIS TOWER

H = 20,5
T = 16,1 S
F = 0

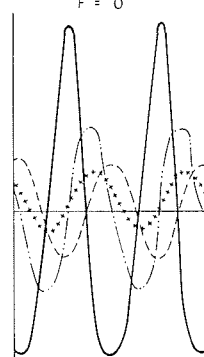
6/



RÉSERVOIR ÉMERGENT
FLOAT TANK

H = 12,00
T = 8,2 S
F = 0

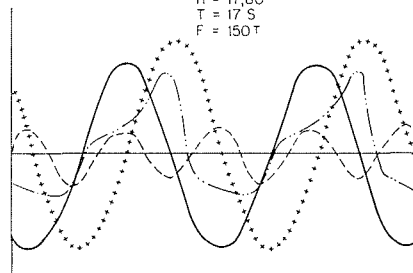
7/



RÉSERVOIR ÉMERGENT
FLOAT TANK

H = 17,80
T = 17 S
F = 150T

8/



Légende : — Houle - Swell
..... Déplacement - Displacement
- - - Effort vertical - Vertical force
- - - " horizontal - Horizontal force

et 7.10^{-4} s si l'on exprime U_{max} en mètres par seconde et D en mètres.

Ce calcul nous montre que par un fond de 100 m il y a risque de début d'entraînement pour des grains de 1 mm de diamètre, pour un fond de 200 m pour des grains de 0,25 mm et pour 300 m pour des grains de 0,05 mm. On voit donc que la limite se situe toujours dans la catégorie des sables pour laquelle la loi est valable et qu'il y a toujours risque d'érosion donc d'affouillement dans les terrains granulaires.

La limite inférieure du domaine d'application des lois considérées se situe pour un diamètre d'environ 100 μ . Le comportement de terrains doués d'une certaine cohésion est sensiblement différent par suite des forces de contact entre les particules.

En l'état actuel de nos connaissances, il est difficile d'analyser d'une façon générale ce problème.

Voyons rapidement l'action sur le fond des tsunamis qui ont des périodes s'étalant de quelques minutes à une heure.

Pour une période de l'ordre de 30 mn, le calcul des vitesses au fond montre que ces dernières ne dépendent pratiquement plus de la période, mais seulement de l'amplitude et de la profondeur : pour 2 h = 2,50 m, 0,28 m/s à 200 m et 0,23 m/s à 300 m.

On constate que les vitesses sont d'autant plus modifiées que le rapport H/L est grand. De plus, la valeur maximale de la vitesse pour H = 100 m n'est supérieure que de 70 % à celle obtenue pour une période de 18 s. Les tsunamis ne paraissent pas remanier les fonds plus violemment que les grandes houles océaniques.

Efforts appliqués

Les efforts appliqués au pivot sous l'action de houles d'amplitudes et de périodes diverses ont été obtenus par le calcul et par des essais sur modèle réduit qui ont permis d'enregistrer les fluctuations des déplacements, des efforts verticaux et horizontaux en fonction du temps, ce qui permet une analyse qualitative des phénomènes.

Le Laboratoire National d'Hydraulique de Chatou a expérimenté dans un canal à houle des modèles réduits de différents types de colonnes réalisés à l'échelle 1/50.

Nous distinguons deux types de colonnes :

- les colonnes à fût lisse ;
- les colonnes treillis à flotteurs.

Sur le diagramme relatif à la colonne fût lisse (fig. 5) on peut observer :

- le déplacement en tête est décalé d'un quart de période par rapport à la houle ;
- l'effort vertical est en phase avec la houle ;
- l'effort horizontal est en phase avec le déplacement.

Sur le diagramme relatif à la colonne treillis (fig. 6), on peut observer :

- le déplacement en tête est analogue à celui du type précédent ;
- l'effort vertical est décalé de $1/8^e$ de période par rapport à l'opposition de phase ;
- l'effort horizontal est, soit en phase avec le déplacement, soit légèrement décalé.

L'analyse de différentes courbes de ces deux graphiques conduit aux explications suivantes :

— les fluctuations de l'effort vertical pour la colonne fût lisse sont provoquées par la variation de pression au fond; pour la colonne à treillis, elles résultent de la combinaison de l'action du gradient de pression appliqué aux flotteurs en opposition de phase avec la houle et de l'action des vitesses verticales sur ces mêmes flotteurs décalés d'un quart de période par rapport au gradient de pression ;

— les fluctuations de l'effort horizontal pour la colonne fût lisse sont dues à l'action de l'eau sur la colonne dont le mouvement à certains niveaux n'est pas le même que celui des particules liquides voisines. Les forces d'inertie sont prépondérantes par rapport à celles des vitesses relatives. Pour la colonne treillis le phénomène est le même mais moins pur, les forces de vitesses devant avoir une certaine importance.

(Cette remarque vérifie l'influence du paramètre de Keulegan et Carpenter : Um/D sur le partage des forces entre actions d'inertie et de vitesse.)

Le déplacement en tête est en phase avec celui des particules liquides, on peut donc en déduire que la colonne « se laisse aller dans la houle ».

Nous allons voir comment les explications précédentes s'adaptent à une plate-forme complexe comme un réservoir émergent muni de flotteurs.

Sur le diagramme pour T = 8,2 s relatif au réservoir émergent (fig. 7) on retrouve :

- une courbe analogue aux précédentes pour les déplacements horizontaux.

Les fluctuations de l'effort vertical ressemblent à celles rencontrées pour la colonne treillis (force d'inertie sur les flotteurs prépondérante et variation de pression négligeable au fond, du fait de la faible période).

Les fluctuations de l'effort horizontal sont analogues à celles de la colonne fût lisse (effort d'inertie prépondérant).

Sur le diagramme pour T = 17 s, relatif au réservoir émergent (fig. 8) on retrouve :

- la même courbe de déplacements en tête.

Pour les fluctuations de l'effort vertical on observe un dédoublement de période. Les effets cinétiques qui interviennent dans les deux cas examinés ne paraissent pas de nature à expliquer ce dédoublement. L'action de la variation de pression au fond non négligeable pour les longues périodes vient se combiner à celle des flotteurs, et il est probable que la houle de laboratoire n'est pas pure, qu'on a affaire à un clapotis partiel qui, on le sait, donne des fluctuations de pression au fond en T/2.

La courbe de l'effort horizontal reste en phase avec celle des déplacements mais subit des distorsions qui proviennent du fait que les forces de vitesses ne sont plus négligeables pour cette période.

Nous avons vu que des architectures différentes conduisent pour les colonnes à des efforts différents tant par leurs valeurs que par leurs déphasages. La combinaison de diverses dispositions constructives permet d'agir sur les efforts dans le but de les réduire.

Toutes les possibilités ne sont pas encore épuisées, par exemple, la mise en communication de réservoirs avec l'extérieur peut présenter de l'intérêt.

L'action de houles irrégulières n'a pas été analysée directement sur modèle, mais on a étudié le cas où la colonne subit un effort en tête, donc un déplacement dans une houle régulière. Dans ce cas, le déphasage relatif entre l'effort horizontal et l'effort vertical varie ; ce qui conduit, pour le calcul des efforts appliqués à l'embase, à associer les efforts maximaux, d'où l'importance de pouvoir maîtriser les efforts agissant sur le pivot.

Discussion*Président : M. P. WILLM*

M. le Président remercie M. COUPRIE pour son intéressant exposé et ouvre la discussion.

M. COIRAL ne croit pas que le dédoublement de la période observée dans certains cas sur la force verticale exercée sur la pile puisse être attribué à des particularités de la cinématique de la houle; d'après l'exposé de M. COUPRIE, cela entraînerait le dédoublement de l'accélération verticale, dans le cas où la houle est progressive et parfaitement monochromatique. Or, dit-il, nous avons fait avec l'Institut français du pétrole des calculs numériques quasi exacts qui ne donnent aucun effet de ce genre; il n'y a qu'un seul maximum par période pour chacun des paramètres cinématiques considérés.

Se référant à divers essais effectués en canal à houle, M. COUPRIE réplique que la « houle régulière » n'existe pas; il y a toujours un « clapotis partiel » qu'il serait utile d'analyser en utilisant les appareils enregistreurs précis dont disposent aujourd'hui les laboratoires. D'ailleurs, dans son mémoire, il a simplement voulu suggérer une explication aux phénomènes observés.

Pour M. VILAIN (E.M.H.), le dédoublement de la période des efforts verticaux peut s'expliquer simplement par l'effet centrifuge

sur la masse de la plate-forme au cours du mouvement d'oscillation qui lui est imposé par son articulation au fond (pendule inversé). La composante verticale de l'effort sur le pivot est la même et de même sens à l'aller comme au retour du mouvement, et c'est le seul phénomène qui puisse expliquer un dédoublement de la période.

Les efforts correspondants étant faibles, ce phénomène n'apparaît nettement sur les enregistrements que lorsque les efforts hydrodynamiques sont faibles (longues périodes, et compensation entre les effets de pression aux différents niveaux).

Lorsque les efforts hydrodynamiques sont plus importants, ce phénomène n'apporte qu'une légère déformation des courbes. Il a d'ailleurs été pris en compte dans les calculs prévisionnels établis par E.M.H. avant les essais.

M. COUPRIE remercie M. VILAIN de ses explications qu'il conviendrait d'étayer, dès que possible, par quelques calculs et par des mesures expérimentales donnant l'ordre de grandeur des divers paramètres considérés. M. VILAIN étant très familiarisé avec l'instrumentation de la tour Elf-Océan pourra, sans doute, fournir ces éléments dans un proche avenir.

M. le Président remercie MM. COUPRIE, COIRAL et VILAIN et clôt la discussion.

