Communication
présentée au Comité technique
de la Société Hydrotechnique de France
le 20 novembre 1969

**DIRECTIONS DE
RECHERCHE DU PROGRAMME
"ACTION DES ÉLÉMENTS"
DU COMITÉ
D'ÉTUDES MARINES**

PAR G. SUSBIELLES *

L'Institut Français du Pétrole conduit, depuis 1963, un programme de recherche ayant pour objectif la mise au point de méthodes techniques et de matériels pour la prospection des gisements sous-marins d'hydrocarbures; la coordination de ce programme avec les travaux effectués dans le même domaine par l'ERAP et la C.F.P. a été confiée par la direction des Carburants à un Comité d'études marines qui, en 1967, a recommandé l'inscription au programme de l'I.F.P. d'une étude d'ensemble de l'action des éléments, houle, vent, courant, sur les structures flottantes ou fixes utilisées par l'industrie pétrolière. Cette étude avait pour but de doter les ingénieurs des sociétés pétrolières chargés de donner des normes aux constructeurs, de l'ensemble des indications de base qui leur étaient nécessaires. En même temps, ils pourraient bénéficier de l'expérience des étrangers, en particulier des Américains qui, depuis 1960, font un gros effort dans ce domaine.

Jusqu'à l'élaboration de ce programme, aucune étude concertée d'ensemble n'avait été faite en France dans ce domaine. Toutefois, des études particulières avaient été menées par divers maîtres d'œuvres et entrepreneurs pour résoudre les problèmes posés par la conception de nouveaux ouvrages (projets de plates-formes fixes de production, plate-forme oscillante expérimentale, plate-forme semi-sousmersible de forage). L'étude de la plate-forme semi-sousmersible Pentagone 81, confiée par l'I.F.P. à la Société Neptune, et réalisée avec le concours de SOGREAH, du Bassin des Carènes, de la Marine nationale et de la C.F.E.M., avait notamment mis en évidence un besoin de connaissances théoriques complémentaires et de coordination des compétences.

Différentes raisons justifient l'effort dans ce domaine :

— les perspectives offertes par la recherche et l'exploita-

tion des gisements de pétrole en mer, qui s'orientent maintenant vers des profondeurs plus importantes (300 m) sur le plateau continental;

- la nécessité de préciser l'action de l'environnement marin pour évaluer des facteurs tels que les possibilités annuelles de travail sur les structures et leur durée de vie;
- le besoin de limiter le facteur risque que l'on prend dans la construction d'une plate-forme.

Nous voulons, tenant compte d'accidents spectaculaires qui se sont produits aux Etats-Unis, éviter que pareille chose puisse survenir aux compagnies pétrolières françaises.

Notre but n'est donc pas de faire de « l'académisme » mais de donner aux ingénieurs des méthodes de calcul pour leur éviter une démarche semblable à celle que nous avons entreprise et, en même temps, de justifier nos choix.

Il nous faut donc informer et donner des critères de décision en fonction des nécessités de l'industrie pétrolière, tout autant que des phénomènes physiques relevant de l'hydrodynamique.

C'est avec la participation directe de la Société Neptune et avec le concours de nombreux organismes spécialisés (Doris, I.M.F. Lille, L.N.H. Chatou, Laboratoire d'Hydraulique de Delft, FRANLAB) que nous avons entrepris, en janvier 1968, ce travail en nous intéressant aux sujets suivants : la houle périodique, la houle aléatoire, les coefficients hydrodynamiques, l'action du vent sur les structures émergentes, le calcul des forces en houle aléatoire, les spectres et leur obtention, les calculs de mouvements, l'exploitation de résultats de mesure et les calculs de résistance des matériaux.

Nous allons très rapidement examiner chacun de ces sujets qui constituent les directions de recherche de notre programme « action des éléments ».

* Division Forages, Institut Français du Pétrole, Rueil-Malmaison.

1° LA HOULE PÉRIODIQUE.

A toutes les fois que l'on imagine une structure et qu'avant de passer aux stades des essais, on veut préciser les possibilités des modèles, on a recours à une estimation en houle périodique des forces et des mouvements (si la structure est mobile). D'autre part, les bassins d'essais sont équipés pour produire des houles sensiblement sinusoïdales.

Lorsque des estimations de ce genre sont effectuées suivant les moyens de calcul dont les bureaux d'études disposent, depuis la règle jusqu'aux ordinateurs les plus perfectionnés, on voit apparaître des modèles de houle périodique très différents les uns des autres.

Devant cette situation, nous avons essayé de comparer ces différents modèles qui sont le fruit du travail des hydrodynamiciens depuis cent cinquante ans. Une comparaison d'ordre strictement physique n'était pas possible car chacun sait que, dans la nature, ces vagues pures n'existent pratiquement pas. Nous avons donc limité nos activités à une comparaison strictement mathématique en reprenant une idée émise par le professeur R.G. Dean de l'Université de Floride.

Seule la représentation de la houle périodique à l'aide de la fonction de courant constitue pour une houle irrotationnelle en fluide parfait, la solution exacte du problème mathématique posé, recherche d'une fonction harmonique satisfaisant certaines conditions aux limites, à la surface et sur le fond. Les autres modèles (ceux de Stokes 1^{er}, 2^e, 3^e et 5^e ordres) n'en sont que des approximations ainsi que la houle cnéidale et les ondes solitaires. Nous avons comparé tous ces modèles à la représentation à l'aide de la fonction de courant, en nous basant sur la satisfaction des conditions aux limites. Pour illustrer les résultats, les forces exercées par la houle sur un pieu ont été calculées en gardant les mêmes coefficients hydrodynamiques pour toutes les théories et en utilisant la formule de Morison O'Brien.

En conclusion, on constate que les différences entre les valeurs trouvées sont loin d'être négligeables et qu'il y a nécessité impérieuse de choix en définissant des domaines de validité. Peut-être serait-il correct d'adjoindre un critère de comparaison physique à celui des mathématiques !

2° La démarche précédente ne pouvait être qu'une première étape: elle reste éloignée de la réalité, mais néanmoins nécessaire, car on continuera, c'est certain, pendant longtemps encore, des calculs simples en utilisant ces modèles.

Or, la houle est essentiellement, sauf quelques exceptions, un phénomène non périodique qui peut être représenté sous forme aléatoire, en la décomposant en une distribution d'ondes sinusoïdales dont les phases, comprises entre 0 et 2π , sont réparties au hasard. Un état de mer, une tempête, va être représenté par son spectre qui équivaut à la distribution de l'énergie en fonction des fréquences des ondes sinusoïdales composant le spectre. Il est certainement plus correct d'effectuer des calculs d'efforts sur ces bases, mais il faudrait alors posséder suffisamment d'enregistrement de tempêtes ou d'ouragans pour pouvoir couvrir toutes les situations. Actuellement, c'est impossible, car les moyens de mesure n'étaient pas suffisamment développés (bouées en particulier) et les navires fuyaient ces situations désagréables voire périlleuses. Il est donc impossible d'utiliser des spectres mesurés.

En pratique, on se servira de spectres analytiques. On en rencontre de quatre types différents et ils sont dus à : Neumann, Breitschneider, Scott et Pierson-Moscowitz. Ce dernier a été établi d'après les travaux de Darbyshire. Il y a lieu de tenir compte de la stabilité de ces spectres, c'est-à-dire de l'existence des moments d'ordre plus ou moins

élevé, moments qui sont des grandeurs caractéristiques des lois de probabilité. Ces modèles étant bâtis sur des formulations qui ne sont pas toutes semblables, il faut en plus les ajuster avant de pouvoir les comparer.

Enfin, si tous ces spectres donnent la densité d'énergie en fonction de la fréquence comme indiqué ci-dessus, l'élément de référence reste la vitesse du vent. Il faut donc connaître les situations météorologiques en des régions déterminées et admettre le processus d'interaction supposé par les auteurs pour la génération d'un certain état de mer. C'est le mécanisme des échanges d'énergie, atmosphère-mer, qui est concerné directement.

Il est donc possible pour ces spectres d'établir des domaines d'emplois et d'en déduire des critères pour le calcul des structures; c'est ce que nous allons nous attacher à faire, en essayant d'obtenir le plus de données possibles. C'est d'ailleurs là que l'on pose ces deux problèmes: celui de la mesure de la houle, bouées, et celui de la concentration ou de la collection de ces données. Ils ne nous incombent pas, mais nous ne pouvons nous désintéresser des solutions qui leur seront apportées.

3° A l'utilisation de spectres se rapportent les conditions de leur obtention. Comme l'état de la mer n'est pas constant sur un long intervalle de temps, il est nécessaire de définir une durée pendant laquelle on fera des mesures et pendant laquelle on pourra admettre comme sensiblement satisfaites les conditions d'ergodicité et de stationnarité. Longuet-Higgins a travaillé en cette voie et s'il n'y a guère de doute, pour prendre en compte des intervalles de temps de 15 ou 20 mn, il n'en est pas de même pour la valeur du pas d'échantillonnage à considérer. Mathématiquement, on remplace une certaine fonction inconnue par une fonction périodique qui coïncide avec elle sur l'intervalle choisi et cette dernière est soumise à l'analyse harmonique. Le choix est lourd de conséquence, les densités d'énergie que l'on trouve sont variables suivant ce pas. C'est pourquoi il a été décidé d'étudier l'influence de cette grandeur et des techniques de filtrage sur le spectre et de définir, d'une manière aussi claire que possible, les éléments à prendre en compte pour une étude correcte, en ne perdant pas de vue qu'il sera peut-être nécessaire d'effectuer un compromis entre la valeur du pas d'échantillonnage et la stabilité de la solution du problème posé. Il a également été envisagé d'étudier la détermination des spectres d'amplitude.

4° Si la définition de la houle et sa représentation aussi proche que possible de la nature est importante, avant de passer à l'expression des forces que cette houle exerce sur des ouvrages quels qu'ils soient, il y a lieu de faire appel à un intermédiaire qui est la formule de Morison O'Brien.

Lorsque l'on considère les structures mises à la mer pour le compte des recherches pétrolières, on ne voit trop souvent que des plates-formes fixes, formées de pieux entrecroisés (*). Il ne faudrait pas oublier tous les ensembles de grandes dimensions tels que les plates-formes semi-submersibles ou les réservoirs sous-marins, pour lesquels il n'est pas possible d'appliquer les mêmes méthodes de calcul car, à partir du moment où leur grande dimension horizontale n'est plus négligeable ($> 1/10$) devant la longueur d'onde de la houle, il faut tenir compte de leur interaction propre avec la houle.

(*) Ou de treillis.

a) *Corps de faibles dimensions.*

La formule de Morison-O'Brien qui s'applique à ce cas est le seul intermédiaire que l'on sache actuellement utiliser et elle consiste à écrire que :

$$F = 0,5 C_D \rho D u |u| + C_M \rho (\pi D^2 / 4) \dot{u}$$

F étant la force hydrodynamique, C_D le coefficient de traînée, C_M le coefficient d'inertie, D le diamètre d'un pieu, u la vitesse orbitale de la houle, composante horizontale, et $\dot{u}$ l'accélération. Comme tous les modèles de houle font appel à une houle irrotationnelle, on en arrive à reconstituer un fluide non parfait à l'aide d'hypothèses se rapportant à un fluide parfait et en présence d'un mouvement irrotationnel. L'ingénieur qui doit dimensionner une structure, ne veut pas entrer dans des considérations de cet ordre et ne demande qu'une méthode de calcul à laquelle il puisse se fier. Nous avons donc examiné un certain nombre d'articles traitant de ce problème et essayé d'en grouper les résultats pour arriver à une tentative d'explication de la dispersion obtenue sur les valeurs de C_D et C_M .

Comme les essais en bassin, s'ils conservent la similitude des efforts, ne conservent pas celle des écoulements, un jour ou l'autre, l'obligation de faire des essais *in situ* s'impose autant que celle des essais en bassin, moins chers mais beaucoup plus accessibles.

Nous nous proposons donc de traiter les résultats d'essais faits par la compagnie américaine Chevron Oil Research de 1954 à 1958 et de 1960 à 1963, car les résultats ont été mis à la disposition du public depuis peu de temps.

Il semble que la meilleure solution consiste non pas à rechercher des valeurs fixes de C_D et C_M , mais les valeurs de ces coefficients qui vont permettre d'obtenir par le calcul, pour une vague ou un groupe de vagues, le meilleur accord entre les forces calculées et les forces mesurées. L'écoulement du fluide autour de l'obstacle doit être représenté, et ceci n'est pas possible, mathématiquement, en faisant intervenir des tourbillons car les complications sont très grandes. Il ne reste alors qu'une seule possibilité : se servir de valeurs de C_D et de C_M qui sont fonctions du champ des vitesses et des accélérations de la houle en un point déterminé (ceci étant uniquement valable pour les petits obstacles), c'est-à-dire fonctions en fait de paramètres tels que le nombre de Reynolds et le nombre de Keulegan Carpenter $U_m T / D$. Il ne sera plus question d'associer à un pieu de forme définie un paramètre global. En conséquence, ceci semble alourdir considérablement les évaluations de force. Pratiquement, il n'en est rien, car ces opérations sont essentiellement des opérations simples et lorsque l'on calcule la force qui s'exerce sur une barre, pour la faire entrer dans un programme de calcul des contraintes en résistance des matériaux, il est demandé d'indiquer la force qui s'exerce sur un élément de barre et non d'un seul coup sur l'ensemble de la barre (ceci ne se conçoit que pour un calcul sur ordinateur).

Ce qui vient d'être exposé demande à être vérifié, aussi bien en houle périodique qu'en houle aléatoire. Nous y travaillons déjà depuis quelque temps. La possibilité d'essais *in situ*, quoique fortement liée à la conjoncture économique, n'est pas écartée. La technologie des instruments de mesure a beaucoup progressé et s'il était possible de mesurer la vitesse orbitale de la houle, il serait très tentant de monter une campagne de mesure sur une structure simple, un pieu par exemple. On pourrait penser échapper à la formulation de Morison-O'Brien en obtenant, pour chaque structure, des fonctions de transfert « boîtes noires », permettant de passer directement de la houle aux forces,

mais on requiert alors une expérimentation systématique et on masque la réalité.

b) *Corps de grandes dimensions.*

Lors de l'étude des corps de petites dimensions, on admet que leur présence ne perturbe pas le champ de la houle. Ce n'est plus possible si on doit envisager le cas de réservoirs sous-marins de grandes dimensions à faible profondeur ou d'unité flottante de stockage, d'îles artificielles, ou de plates-formes semi-submersibles. Il faut tenir compte des déformations du champ de houle dues à cet obstacle. Sans vouloir insister sur ce sujet, on peut remarquer que, étant donné la complexité des formes géométriques des plates-formes, il est nécessaire d'accroître les possibilités de ces programmes : les rendre plus « performants » car ils constituent le seul outil d'étude actuellement disponible pour atteindre les coefficients d'inertie, d'amortissement et les mouvements des corps qui viennent d'être mentionnés. Il n'est pas envisagé, dans le cadre de nos activités, de reprendre ce sujet, car ce ne serait qu'une duplication d'un travail qui est mené à bien dans notre voisinage.

5° L'ESTIMATION DES FORCES EN HOULE ALÉATOIRE. MÉTHODE DE BORGMAN.

Cette méthode est l'aboutissement des travaux de toute une équipe rassemblée à l'Université de Californie autour des professeurs Borgman et Wiegel. Elle a pour but, à partir d'un spectre de houle et en s'appuyant sur la formule de Morison O'Brien et la houle du premier ordre (ou houle d'Airy) de permettre le calcul d'un spectre de forces. Toute sa complexité apparente réside en les corrélations de vitesses entre elles ou d'accélérations entre elles qu'il est nécessaire d'effectuer. Comme on utilise une houle d'Airy, il n'y a pas de corrélation entre vitesses et accélérations, car les unes sont en cosinus et les autres en sinus. En conséquence, cette méthode donne de bons résultats pour les forces d'inertie ou les forces de traînée, mais pas pour les forces maximales.

Néanmoins, nous avons entrepris de l'appliquer au cas des plates-formes fixes, car c'est actuellement la seule qui permette un calcul direct en houle aléatoire. Elle n'est malheureusement pas d'un maniement facile. Nous l'avons appliquée au cas d'un pieu avant de passer à celui de n pieux et, ensuite, de pieux entretoisés. Cette méthode fait appel au spectre monodirectionnel, mais les auteurs l'ont déjà étendue au cas d'un spectre multidirectionnel. Cette dernière amélioration requerrait, pour être vérifiée, des mesures de houle en un assez grand nombre de points (quatre au moins).

6° L'ACTION DU VENT SUR LES STRUCTURES DE FORAGE EN MER.

Les plates-formes semi-submersibles dépassent très largement la surface de la mer puisque leur tablier se trouve à 20 ou 30 m au-dessus de son niveau moyen et qu'elles sont surmontées d'un derrick de 40 à 50 m de haut. Lors des fortes tempêtes, l'effet du vent n'est pas négligeable et lorsque la plate-forme, qui n'est jamais dotée d'engins de propulsion autonome, est remorquée, cette action peut devenir prépondérante. Le fait que ces structures sont en opération dans des zones où les informations météorologiques ne sont pas forcément abondantes et que l'on ne se soucie guère de leur carénage, nous a amené à entreprendre une étude (bibliographique pour l'instant) de l'action du vent. Elle doit déboucher sur des directives permettant d'insister sur certains aspects du phénomène.

Les investigations doivent porter à la fois sur les problèmes liés à la météorologie, l'aérodynamique et le génie civil ou naval, en essayant de couvrir simultanément les trois domaines.

En dehors des charges statiques, c'est-à-dire des charges correspondant à un vent supposé permanent, il existe tout un ensemble d'actions dynamiques, plus ou moins prépondérantes selon le type de structure étudiée et qui peuvent conduire, par des efforts répétés, d'intensité moyenne, à une fatigue précoce de certains éléments structuraux importants ou d'une manière beaucoup plus critique, par résonance, à des vibrations destructrices. Cet aspect dynamique des problèmes relatifs au vent, qui a été longtemps considéré comme mineur par les ingénieurs et les constructeurs, fait de plus en plus l'objet des préoccupations de ces derniers, beaucoup d'accidents survenus (en des domaines autres que l'off-shore) leur étant imputables.

Toutes ces actions ne sont pas susceptibles de se produire sur une plate-forme; c'est pourquoi il faut insister sur : les effets statiques, l'action des rafales et le phénomène de résonance roulis-rafales dans le cas d'une plate-forme flottante.

Ceci a donc fait l'objet d'une première étude bibliographique qui devra certainement être continuée dans des directions précises à définir avec les intéressés. Il est certain qu'il faudra faire des essais sur maquettes, ne serait-ce que pour en déduire certains principes élémentaires sur le carénage appliqué aux plates-formes, par exemple. En plus, on voit déjà apparaître la nécessité de mesures de vent faites sur les structures existantes.

Notre but était l'élaboration de méthodes générales, mais il est bien permis de se demander si ce sera possible en aérodynamique vu la complexité des formes de structures, les perturbations créées par la rugosité de toutes les surfaces et les interférences des ensembles les uns avec les autres. Ne vaut-il pas mieux regarder la structure dans son ensemble ? La question reste posée.

7° RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX.

Reste un dernier maillon à cette chaîne : celui du calcul des contraintes en résistance des matériaux. C'est l'étape ultime et celle pour laquelle tout doit être préparé car les efforts dus à la houle, au vent et au courant doivent former ce que l'on appelle un (ou des) cas de charges. Notre but n'est pas de nous immiscer dans les règles de l'engineering mais simplement de faire le lien avec le spécialiste du calcul des structures.

Tous ces calculs se font sur ordinateur à l'aide de programmes (FRAN, STRESS, STRUDL) qui n'ont pas été constitués en vue d'une utilisation spécifiquement liée à l'industrie pétrolière et dont les possibilités dépassent largement les besoins. La conséquence en est une certaine difficulté de maniement, quoique l'essentiel se ramène toujours à la résolution d'un système d'équations linéaires. Il faut donc travailler à accélérer la vitesse d'exécution de ces programmes et à en rendre les entrées plus faciles pour les ingénieurs, quoique désormais tout le monde apprend à programmer en FORTRAN (ou presque). Le calcul statique ne pose donc pas de difficultés.

Certains accidents qui se sont produits aux Etats-Unis en 1964 et 1965 ont mis l'accent sur l'excitation possible des plates-formes au voisinage de leurs fréquences propres de résonance. C'est là un problème beaucoup plus délicat et qui nécessite la détermination des fréquences propres des structures. Moyennant quelques hypothèses simples, cette difficulté peut être surmontée et il semble que les résultats obtenus soient tout à fait corrects (à la suite d'essais faits

aux Etats-Unis). En même temps, cela justifie l'étude spectrale de la houle, car il est important de savoir quelle quantité d'énergie est liée à la fréquence excitatrice (pour les plates-formes fixes, plus leur hauteur augmente, plus leur période propre augmente; à partir de 100 m de profondeur, cette période se trouve déjà dans les périodes que l'on rencontre pour la houle).

Il reste cependant un deuxième problème, c'est le calcul des efforts à la résonance ou calcul en dynamique. L'évaluation de l'amortissement est difficile et d'elle dépend le facteur d'amplification des efforts dus à la houle ou toute autre cause d'excitation.

On peut inclure dans l'ensemble du traitement l'étude des vibrations simultanément avec celle des déplacements de la structure pendant son mouvement, par exemple. Le calcul est compliqué car il faut alors discrétiser le temps et évaluer toutes les grandeurs à chaque instant : c'est une véritable simulation numérique du régime des contraintes.

Ce ne sont pas les seuls problèmes qui intéressent les ingénieurs des compagnies pétrolières. Il faudrait ajouter l'étude des nœuds et le flambement des coques minces.

Un tel programme, pour être profitable et justifier toute dépense, doit déboucher sur des méthodes précises et contribuer à la mise en ordre d'un certain nombre de connaissances. Si une partie de ce travail peut être accomplie par la consultation des ouvrages existants, c'est-à-dire avec quelques feuilles de papier, un crayon et quelques heures de calcul sur ordinateur, limiter nos travaux à cela serait profondément erroné. Toute conclusion doit, tôt ou tard, passer à l'épreuve de l'expérience.

Les compagnies américaines qui ont entrepris ces programmes, bien avant que nous nous y consacrons, se sont engagées dans des campagnes de mesure. Leurs conclusions les ont amenées à se regrouper pour faire face à la complexité des phénomènes et à tenter de tirer le maximum d'informations des structures déjà implantées.

Dans les années précédentes (1954-1958) et (1960-1963), plusieurs compagnies dont Shell Development, Esso Production Research et Chevron Oil Research ont mené des campagnes de mesure dans le golfe du Mexique et, en 1968, Esso Production Research a mis sur pied un projet d'étude comparée de neuf plates-formes ou bateaux en faisant appel à vingt-cinq compagnies pétrolières et dix constructeurs (*).

Toutefois, cette tendance à tirer le maximum de renseignements des installations *in situ* est excellente et riche de promesse, car la technologie des instruments de mesure a beaucoup progressé en ces dix dernières années. Les compagnies pétrolières françaises partagent ce point de vue puisque la plate-forme oscillante expérimentale de l'ERAP et le Pentagone 81 de la Société Neptune sont équipés de système de mesure et que la C.F.P. a lancé un programme de construction de bouées pour obtenir des informations sur les zones de permis. C'est d'ailleurs l'une des tâches importantes de notre programme pour l'année 1970 de tirer le maximum d'enseignement de ces mesures, afin d'établir une comparaison des trois étapes : modèle théorique, modèle essayé en bassin, structure réelle. Il devrait être possible de mettre au point un modèle mathématique permettant de simuler le comportement dans la houle de ces structures, en profitant des possibilités offertes par les ordinateurs, tels le C.D.C. 6600 que possède FRANLAB, filiale de l'I.F.P., et de l'expérience acquise dans les domaines de l'aéronautique par exemple et de l'astronautique. Les sociétés qui partici-

(*) Ces initiatives sont suivies avec un intérêt tout particulier et nous n'hésiterions pas à nous y joindre si les objectifs de certains de ces programmes recoupaient ceux des nôtres.

pent à notre programme devraient (comme elles sont engagées plus ou moins dans des campagnes de mesures ou possèdent des spécialistes de ces questions, à commencer par l'I.F.P.), nous aider à considérer les résultats de mesure d'une manière réaliste, en particulier dans le domaine de la précision à en attendre.

Cependant, il reste clair que la valeur technique des méthodes étant établie, elles seront utilisées si, et seulement si, il règne une compréhension entre les ingénieurs chargés des différentes étapes de ce programme. Il y a lieu, en particulier, de faciliter les rapports entre l'hydrodynamicien et le spécialiste de résistance des matériaux, afin que l'un et l'autre aient connaissance des hypothèses fondamentales de leurs travaux respectifs (en particulier aux limites), mais encore que les deux disciplines finissent par s'imbriquer pour que le résultat de nos travaux tienne compte de façon

harmonieuse de tous les critères à prendre en considération pour déterminer finalement l'architecture des structures marines de l'avenir.

En conclusion, nous nous proposons de guider la démarche des ingénieurs de projet en leur indiquant les méthodes de travail les plus appropriées. Cela les intéressera à la condition expresse qu'on leur montre des résultats concrets, pratiques. C'est pourquoi le traitement d'informations venant de structures en activité est une nécessité et, en même temps, la garantie de l'utilité d'un tel programme de recherche appliquée. Il reste maintenant à souhaiter que les compagnies françaises pour qui nous travaillons, et dont nous contribuons quelque peu à informer, voire former, les ingénieurs sur ces sujets, découvrent des gisements exploitables sur leurs permis. C'est en définitive, après cela que notre travail sera vraiment valorisé.

Discussion

Président : M. J. CHAPON

M. le Président remercie M. SUSBIELLES pour son exposé à la fois complet, clair et logique ; il ouvre la discussion en posant les questions suivantes :

- 1° Quel est l'écart entre les résultats de la théorie la plus simple et ceux de la théorie plus élaborée ?
- 2° Est-ce que les erreurs entachant notre connaissance des phénomènes naturels sont négligeables ou importantes par rapport à ces écarts ?

Pour des profondeurs d'eau assez importantes, les écarts visés peuvent être de l'ordre de 25 à 30 % ; ils dépassent ces chiffres en eau peu profonde du fait des incertitudes plus grandes dans ce cas sur le champ des vitesses et des accélérations, répond M. SUSBIELLES.

Remarquant que les coefficients de la formule de MORISON dépendent de la vitesse orbitale, M. PLANEIX demande : tient-on compte de cette dépendance et comment ? Si on adopte des coefficients moyens, quelle en est la source ?

On divise la hauteur d'eau totale en plusieurs tranches auxquelles on associe une valeur particulière du coefficient de traînée, répond M. SUSBIELLES.

A la demande de M. PLANEIX, M. ESTRADÉ apporte quelques précisions sur les valeurs numériques des coefficients d'inertie C_M et de traînée C_D généralement admises. La dispersion des valeurs publiées semble due essentiellement à la mauvaise connaissance de l'« histoire » de l'écoulement, et à la grande incertitude que l'on a sur les vitesses qui sont très souvent calculées à partir de théories de houle plus ou moins valables.

De très nombreux essais ont été effectués en bassin dans des écoulements de natures différentes (permanents, transitoires, oscillatoires), par MM. MORISON, CROOKE, SARPKAYA, GARRISON, BALENT, IVERSEN, GODA... Des campagnes de mesure *in situ* ont également été faites, en particulier par Chevron Oil dans le golfe du Mexique. Mais, dans l'état actuel de l'avancement de nos travaux dans ce domaine, il est fort difficile de dresser un « tableau » valable de coefficients C_M et C_D . L'approche probabiliste d'AGERSCHOU et EDENS est très certainement à considérer.

Pour mettre en évidence l'importance du choix d'un modèle mathématique de houle, M. ESTRADÉ précise que des écarts de 30 % ont été constatés sur l'évaluation des forces et que des hauteurs de crête au-dessus du niveau moyen de 75 % du creux de la houle ont été obtenues avec la théorie numérique de la fonction de courant (problème de l'air-gap dans l'estimation de la hauteur du tablier).

En ce qui concerne l'engineering des structures offshore, on a très souvent considéré jusqu'à présent des « vagues de projet »

périodiques, dont les caractéristiques étaient évaluées à partir de considérations plus ou moins extrapolées de données statistiques, comme la vague centenaire. La recherche du pétrole par des profondeurs d'eau de plus en plus grandes nécessite actuellement le calcul des structures fixes en « dynamique », c'est-à-dire en tenant compte des différentes périodes présentes dans la houle (analyse spectrale).

M. le Président souligne la nécessité de considérer une « série de houles » afin d'étudier l'effet d'éventuelles résonances. Or, ces phénomènes de résonance dépendent des caractéristiques géométriques des éléments auxquels sont appliqués les efforts. Une houle courte peut être très dangereuse pour une partie de la structure et moins dangereuse pour d'autres ; une houle longue peut endommager l'ensemble et être inoffensive pour certains éléments d'une plate-forme.

M. SAGNER voudrait savoir :

- 1° Si les valeurs des coefficients de la formule de Morison ont pu être vérifiées *in situ* ou au laboratoire ;
- 2° Si en se basant sur la mécanique des fluides (introduction de critères caractérisant le type de sillage, par exemple), il ne serait pas possible de mieux caractériser les conditions d'écoulement autour des obstacles et d'améliorer l'estimation des efforts auxquels ces derniers sont soumis.

Malgré quelques tentatives dans le sens suggéré par M. SAGNER, répond M. SUSBIELLES, les ingénieurs se contentent, pour le moment, de la formule de Morison dont l'avantage principal réside dans sa simplicité. D'ailleurs, dit M. BANAL, l'auteur de cette formule est probablement le premier surpris de la généralisation de son emploi, mais celui-ci durera tant que les chercheurs n'auront pas proposé une meilleure « approche ».

Effectivement, conclut M. le Président, il ne servirait à rien d'avoir des formules extrêmement exactes et des théories de la houle extrêmement élaborées si finalement les caractéristiques de la houle, susceptibles d'être introduites dans ces formules, étaient par trop approximatives.

De là, l'intérêt de collecter et de regrouper toutes les données sur les caractéristiques de la houle, tâche qui figure au programme de la « Section d'hydraulique fluviale et maritime » de la Société Hydrotechnique de France et à celui de bien d'autres organismes...

M. le Président clôt la discussion en remerciant tous ceux qui ont bien voulu y participer. Il prie l'assemblée de bien vouloir l'excuser de devoir, en raison des obligations de sa charge, abandonner la Présidence de la réunion et il remercie M. GRESLOU d'accepter de le remplacer.

Abstract

Lines of research followed by the Marine Studies Committee's group investigating wave, wind and current effects

The Institut Français du Pétrole has been running an overall study on the effects of wind, waves and currents on offshore drilling rigs since 1967, with the object of providing oil company engineers with better working methods. This is the first investigation of its kind ever to have been undertaken in France.

The work put into this study was amply justified in view of the wide scope offered by oil prospection at sea, the need for more precise knowledge of environmental action and the importance of narrowing down the risk factor in the construction of new rigs.

The programme is being carried out with direct participation of the Neptune undertaking and the assistance of « Doris », IMF Lille, LNH Chatou, the Delft hydraulics laboratory and Franlab. It covers the following subjects :

- (i) *Periodic waves*. Several models have been compared in the light of mathematical criteria and by considering the calculated forces acting on a pile in order to illustrate the results. The only really satisfactory form of wave representation is based on the stream function.
- (ii) *Random waves*, which are characterised by their energy spectrum. In this connection, models by Neumann, Breischneider-Scott-Pierson and Moscovitz will be compared with a view to establishing possible fields of application.
- (iii) The processing of recorded wave data and problems connected

with it with a view to determining a wave spectrum (filtering) will be examined.

- (iv) Wave forces on structures can be calculated by the Morrison-O'Brien formula.

This is the only convenient method available for small bodies. No precise values are known for coefficients C_d and C_m ; these should be expressed in terms of the wave velocity and acceleration field at a given point, which will also require experimental confirmation.

A different approach will be required for larger bodies, for which wave diffraction should be taken into account.

- (i) Random wave forces can be estimated by Borgman's method, which will be applied to a fixed rig.
- (ii) By studying wind action, closer information can be obtained on the action and structure of gusts, static effects, resonance effects between rolling motion and gusts, and other similar phenomena.
- (iii) Available strength of materials programmes more specifically designed for petroleum engineering applications should be established; for example, a study of vibrating structures should provide useful information.

As an overall programme of this type should produce concrete results, experimental *in situ* measurements or on actual operational structures require particular care and attention.