



## STOCKAGES IMMERGÉS D'HYDROCARBURES : RÉSEROIRS EN BÉTON PRÉCONTRAIT

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

PAR J. ROULET \*

Le thème général de la présente session et les exposés précédents rendent inutiles des développements sur les considérations générales qui conduisent les sociétés pétrolières à rechercher des solutions d'exploitation entièrement maritimes. Je ne dégagerai donc que les grandes lignes de l'évolution pour mieux situer la signification de la recherche dans le domaine du stockage immergé.

Historiquement, il est remarquable que les premières découvertes de gisements pétroliers en site marin remontent à la première époque du pétrole (1896), le long des côtes de Californie à Summerland. Ces tentatives ne sont renouvelées, fructueusement cette fois, qu'en 1933 dans le golfe du Mexique, à 2 km de la côte dans 4 à 5 m d'eau.

Mais le développement d'une recherche systématique en site marin, ne va prendre son essor qu'après la Seconde Guerre mondiale, en même temps que tous les pays industriels prennent conscience de la nécessité de disposer de ressources énergétiques sans commune mesure avec les estimations antérieures des besoins.

La prospection au large des côtes est alors une extension naturelle de la recherche en site terrestre, et il faudra attendre 1950 pour qu'apparaisse le premier bateau de forage. Simultanément les moyens de recherche géophysique font de tels progrès que les découvertes de gisements puissants se succèdent : il n'y a guère plus de cinq ans que la prospection est sortie des zones du golfe du Mexique, du golfe Persique ou de la mer du Japon. Actuellement, rares sont les régions côtières où aucune prospection n'est ou n'a été faite. Et dans le même temps, le champ s'est élargi hors de la côte, sur tout ce qui est appelé le « Plateau continental », jusqu'à 200 m d'eau, et qui représente environ cinquante fois la superficie de la France.

On estime que les gisements de ce plateau peuvent représenter la moitié en volume des réserves totales d'hydrocarbures en site terrestre, soit plus d'une centaine d'années de consommation au rythme actuel.

Encore faut-il pouvoir les exploiter et les exploiter dans des conditions économiquement satisfaisantes.

Si la recherche s'est développée sur le Plateau continental, c'est d'abord parce que de nouvelles méthodes d'exploration l'ont rendue possible et parce que ce plateau recèle des chances considérables de trouver des réservoirs de très grande puissance qui ouvrent la perspective de coûts unitaires de production moins élevés que ceux des gisements à terre. Comme l'évolution de ceux-ci a connu des hausses aussi rapides qu'imprévisibles en raison des exigences des gouvernements des grands pays producteurs de pétrole, et de l'insécurité des investissements, l'effort de recherche se porte sur l'outillage spécialisé qui permet l'exploitation en mer dans des conditions économiques et sûres.

Aux exigences techniques des mers ouvertes et des grands fonds vont donc s'ajouter des raisons économiques et politiques de mettre au point des techniques spécialement conçues pour les gisements en site marin, c'est-à-dire totalement indépendantes du rivage le plus proche.

C'est dans cette optique que se situe la conception du stockage immergé qui supprime les dépenses du sea line conduisant le pétrole au rivage, et de l'apportement conduisant le pétrole du stockage à terre jusqu'au pétrolier, intérêt économique, et qui supprime l'insécurité d'installations à terre, intérêt politique.

Pour déterminer les solutions spécifiques à ce problème de stockage immergé — j'ai éliminé *a priori* le stockage flottant qui ne présente qu'un caractère transitoire hybride puisqu'il est un compromis entre l'absence de stockage et la spécialisation aux opérations de transport de pétroliers

\* Groupement d'Entreprises françaises Sea Tank C<sup>o</sup> (Entreprises Léon Ballot, Boussiron, H. Courbot et Etablissements Sainrapt et Brice).

géants — il convient d'analyser les données du problème.

Un réservoir immergé doit être :

- dimensionné en fonction des besoins du champ;
- stable au regard des efforts de l'environnement;
- fiable dans sa résistance et son système d'exploitation;
- durable et économique.

Une conception nouvelle doit en outre pouvoir s'adapter sans grandes difficultés à diverses profondeurs et aux diverses caractéristiques du fond marin.

Pour satisfaire à la première exigence, il suffit de pouvoir faire varier d'une manière continue à l'intérieur de grandes limites, les dimensions du réservoir, c'est-à-dire concevoir des familles de formes homothétiques. A y regarder de plus près, on remarque que la hauteur ne joue pas le même rôle que les dimensions horizontales, en raison de l'influence relative de la profondeur et on est assez naturellement conduit à une homothétie dans le plan horizontal.

L'exigence de stabilité au regard des efforts d'environnement s'analyse sur deux fronts : la stabilité générale et la résistance locale aux déformations. Il est immédiatement clair que la seule solution économiquement possible est à rechercher dans un système à déplacement de liquides. Mais l'effort de poussée du réservoir plein de pétrole, accru par les résultantes des efforts verticaux de la houle au fond ne peut être compensé que par un clouage ou par un lest. Quant à la résultante des efforts horizontaux de la houle au fond, elle doit être transmise au terrain, soit par une couture travaillant au cisaillement, soit par le simple frottement sur le sol. Tout esprit averti sait que la difficulté majeure d'une construction réside dans sa fondation c'est-à-dire son adaptation à un milieu naturel qui n'est jamais, ou presque, homogène et qui est souvent mal connu. Fonder un réservoir géant de pétrole, en fond de mer dans des conditions difficilement contrôlables, est donc une opération *a priori* délicate et de validité d'applications limitée. Faut-il nécessairement au moment où il est décidé de se libérer de la Terre-rivage, dépendre de la Terre-fond de mer ? On y serait conduit par une motivation économique si le lest jouait un rôle inerte. Or, il se trouve qu'on dispose d'un matériau lourd et économique dont une judicieuse répartition de la masse nécessaire pour constituer le lest permet de satisfaire au mieux aux exigences de résistance locale : c'est le béton.

Considérons d'ailleurs ces contraintes locales : la résultante statique liée à la différence des densités de l'eau de mer et du pétrole est une force de traction qui ne dépend pas de la profondeur du réservoir, mais uniquement de la distance entre son fond et l'horizon considéré. Les contraintes provenant des effets de la houle, au contraire, dépendent de la profondeur de l'horizon et des caractéristiques de la houle. Il paraît actuellement exclu de déterminer par le calcul les effets dynamiques de la houle sur un corps solide de forme quelconque dont les dimensions sont d'un ordre de grandeur comparable à celui de la longueur d'onde de la houle. Il n'en demeure pas moins que la distribution des contraintes peut aboutir, sur une coque entièrement comprimée, à des phénomènes stationnaires créant des tensions locales élevées et à des phénomènes de fatigue. Pour pallier cette éventualité, il est préférable de disposer d'une certaine épaisseur de coque, ce qui est aisé dans le cas du béton et d'utiliser la précontrainte pour se prémunir contre les tractions des moments secondaires et les cisaillements de déformation dynamique.

En réalité, nous le verrons dans un moment, le béton précontraint offre une sécurité supplémentaire contre ces phénomènes, car la structure est conditionnée pour satisfaire

aux exigences plus rigoureuses des opérations d'immersion.

Le même souci de réduire les inconnues de structure peut conduire à préférer une forme cylindrique à une forme à double courbure : en effet, il est illusoire de vouloir déterminer une forme hydrodynamique réduisant la traînée, puisqu'il faut composer une houle d'effet cyclique avec un courant, c'est-à-dire au mieux une hypocycloïde, et plus généralement une hélice à section elliptique. En revanche, on peut espérer, par une bonne observation quantifiée, connaître la loi d'influence de la houle sur un plateau horizontal et pendant réduire l'effort de traînée en choisissant une section circulaire, isotrope dans toutes les directions.

C'est ce chemin qui a servi d'inspiration à l'un de nos premiers modèles mais, dans l'étude que nous avons développée sur les réservoirs en béton précontraint, nous avons étudié un très grand nombre de formes diverses, géométriques, car le choix de la solution lest ne conduit pas à donner à la résistance de la structure le premier plan des préoccupations : il convient de considérer aussi et peut-être plus encore, les conditions d'exécution et les conditions de mise en œuvre.

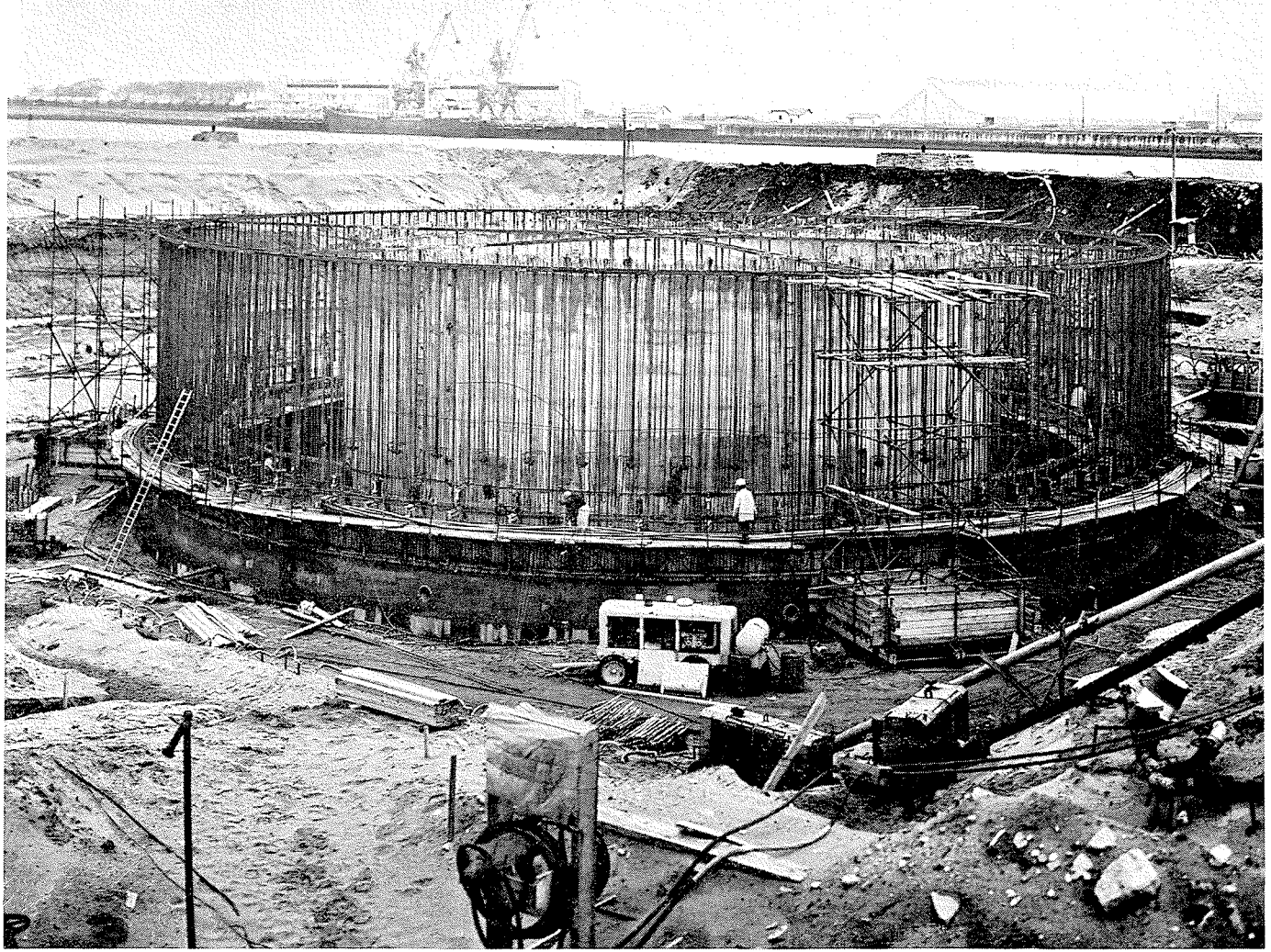
L'option prise d'une totale indépendance du terrain support est évidemment une option de sécurité : aucune manœuvre aveugle n'est prévue sur le site. Il est donc logique d'aller jusqu'au bout de l'idée en prévoyant une exécution complète, à terre, dans des conditions parfaitement contrôlables et sûres. Ainsi le réservoir en béton précontraint est-il, dans sa phase de construction proprement dite, un ouvrage tout à fait classique. Il est aisé de définir des procédés d'exécution assez élaborés pour obtenir une qualité supérieure des bétons, dans le domaine de la résistance comme dans le domaine de l'imperméabilité, c'est-à-dire de la compacité. Ce faisant, on peut affirmer la pérennité de l'ouvrage et sa fiabilité, d'autant plus aisément qu'on dispose d'ores et déjà d'une technologie fort avancée dans le domaine des ouvrages maritimes. Il suffit de prévoir une protection contre la corrosion des aciers de précontrainte pour obtenir les garanties nécessaires. On notera à ce sujet que le tonnage à protéger est beaucoup plus faible que celui d'une enceinte métallique, ce qui réduit à des valeurs infimes les puissances énergétiques nécessaires — avantage non négligeable pour des ouvrages qui doivent être autonomes loin de toute centrale d'énergie.

Le souci de sécurité qui, au départ, prédomine, compte tenu en particulier de la psychose de pollution répandue, à juste titre, après des accidents récents, nous a néanmoins conduits à procéder à une étude de revêtements d'étanchéité, étude actuellement en cours et dont nous attendons beaucoup plus la détermination d'un produit économique que celle d'un produit nouveau.

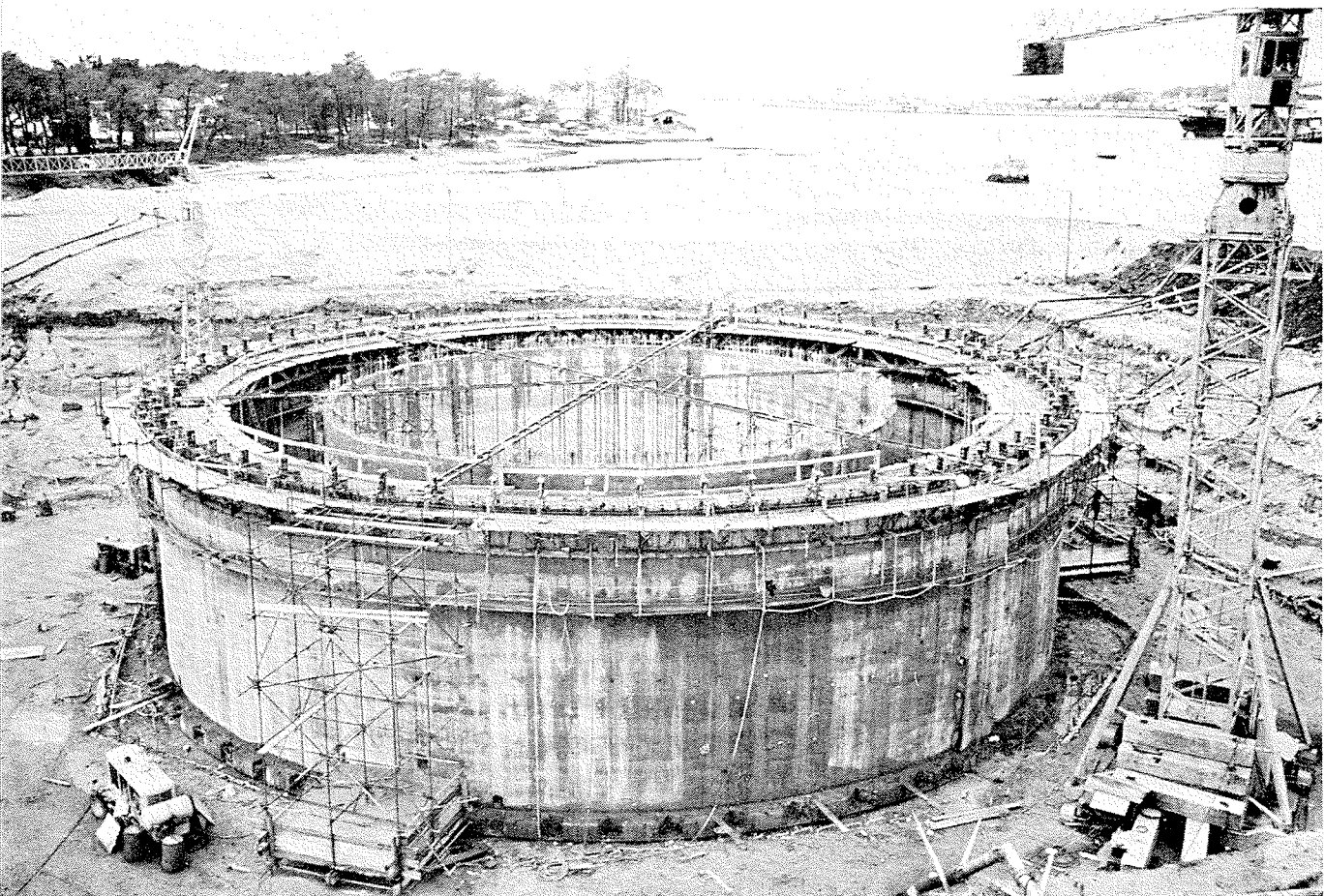
En revanche, l'exécution à terre implique qu'un soin spécial soit apporté au problème du lancement et du remorquage — celui de l'immersion restant en tout état de cause la pierre d'achoppement de tout stockage immergé.

Nous avons pour ce faire extrapolé certaines idées classiques, puis nous les avons confrontées à l'expérimentation en bassin. En effet, ces études nous ont obligés de repenser les types de structure et ont fait apparaître un avantage certain au modèle cylindrique moyennant un certain nombre d'adaptations de répartition de masses et une procédure précise et néanmoins simple.

Ainsi le remorquage a retenti sur la conception de l'ouvrage, mais, ce problème correctement résolu, il a été



1/



2/



possible de s'affranchir d'une contrainte de proximité du lieu d'immersion, ce qui ouvre un vaste horizon de possibilités pour déterminer le lieu de fabrication et de lancement. Il n'est plus nécessaire en effet de se limiter à une distance compatible avec la couverture météorologique, qui n'existe pas toujours, car le réservoir a une stabilité suffisante pour pouvoir, en cas de besoin, être abandonné à lui-même dans une tempête survenant à l'improviste sans aucun danger. Il est clair cependant que l'on s'efforcera d'éviter des conditions mauvaises, mais il est non moins clair que la solution retenue permet largement si nécessaire de ne pas tenir compte des saisons pour fixer le créneau disponible pour ces opérations.

La vraie difficulté est en réalité l'immersion. Là encore les essais de laboratoire ont joué un rôle capital. Mais notre philosophie était, dès le départ, de trouver une méthode qui ne crée pas une contrainte de matériel : on pouvait craindre en effet que le poids du réservoir en béton n'oblige à disposer d'un matériel exceptionnel, donc coûteux, souvent indisponible et aléatoire. Ayant opté pour une indépendance de la terre, il fallait rechercher des moyens spéciaux et légers. Tel est le cas de notre méthode — que nous avons brevetée, car elle vaut pour l'immersion de quantités d'ouvrages importants et lourds. Cette méthode consiste à mettre le réservoir en très légère flottaison par des flotteurs disposés en une chaîne, chacun étant successivement mis en action par le noyage du précédent. Ainsi la chaîne de flotteurs marque-t-elle les marches d'un escalier de descente. A l'autre extrémité de la chaîne, des ancrages, par corps mort, permettent de centrer la structure et de l'assurer contre les effets du courant.

La stabilité du réservoir, fruit de sa conception originale, est telle que les mouvements de la houle sont sans effet sur lui et qu'au contraire il est l'élément de stabilité aux grands mouvements des flotteurs qui le supportent.

Comme je l'ai indiqué au départ, il est impensable de vouloir résister à la pression hydrostatique, le réservoir étant maintenu vide, c'est-à-dire à la pression atmosphérique. L'équilibre des pressions doit donc être recherché par un gonflage de l'air inclus dans le réservoir au cours de la descente. Nous avons choisi un processus discontinu, du moins pour le moment, en arrêtant le mouvement de descente à chaque marche de l'escalier, le temps suffisant pour insuffler l'air de contre-pression et retrouver une position d'équilibre. Cette méthode permet d'utiliser à son maximum la résistance de la structure pendant chaque dénivelée, de telle sorte qu'elle se trouve ainsi éprouvée plusieurs fois (autant que de paliers) au cours de sa descente.

Pour mémoire, je rappellerai que le béton précontraint étant au départ sollicité au maximum de compression, l'application de la charge conduit à un allègement de cette contrainte, tandis que l'acier lui-même, sous l'effet de la relaxation, s'est trouvé éprouvé pendant la mise en précontrainte. Nous disposons donc du produit de deux coefficients de sécurité : celui de la résistance initiale du béton précontraint par rapport à la sollicitation maximale de descente et celui de la sollicitation maximale de descente par rapport à la sollicitation de service la plus dure. Au total, ce coefficient est de l'ordre de 5, ce qui donne une marge considérable pour les phénomènes secondaires dynamiques mal appréhendés jusqu'à présent.

A l'arrivée au fond, le réservoir trouve ses conditions d'appui et sa stabilité est immédiatement acquise par un surballastage opéré par scaphandrier. Rien ne s'opposant à une automatisation ou une télécommande de cette ma-

nœuvre, la limitation apparente de profondeur que constitue le record actuel de plongée n'est que provisoire. Il est clair que la solution retenue peut sans peine être extrapolée aux grandes profondeurs.

La fondation n'est pas non plus un problème difficile puisque, suivant la nature et les caractéristiques du sol, on peut passer de la formule tripode à une formule radier général, en passant par une solution d'appui coronaire avec un dispositif nouveau de moulage de terrain par coussin injectable. En réalité, de nombreuses études en laboratoire ont porté sur les conditions d'exploitation, en particulier sur l'incidence des pompages de remplissage et vidange sur la stabilité d'ensemble et sur les déplacements solides des grains de sol. Cependant il paraît difficile de donner à ces essais en laboratoire une représentativité suffisante pour tenir compte des problèmes d'affouillements, liés aux effets d'écoulement et de cavitation. C'est la raison pour laquelle une expérimentation à demi-grandeur est actuellement en cours dans le golfe de Gascogne, expérimentation qui porte aussi, sinon essentiellement, sur le fonctionnement du système complet : liaison tête de puits-réservoir, poste de chargement (en l'occurrence la plate-forme articulée Elf-Océan).

Mais le phénomène d'échelle est favorable et la dimension du réservoir permet des affouillements considérables sans danger ou limitation de sa capacité utile : on songera que sur 74 m de diamètre, une inclinaison de 5° correspond à un enfoncement de 6,50 m.

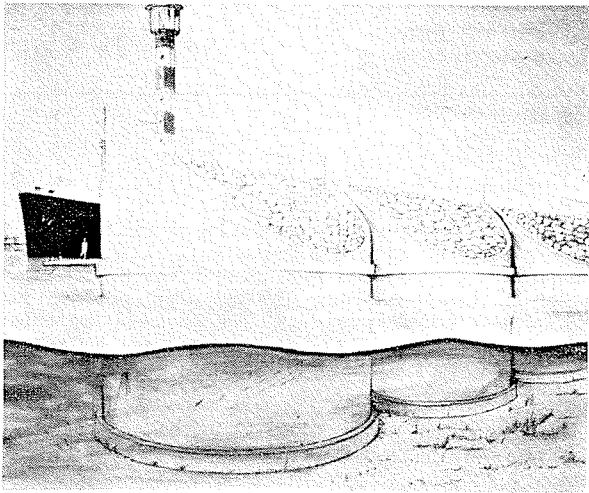
Quels sont les types d'application possibles de ce procédé ? Ils semblent actuellement différenciables beaucoup plus par les autres éléments d'exploitation que par le réservoir — pour ce qui concerne les centres de chargement sur champ pétrolier.

Diverses images montreront l'état actuel des idées en la matière :

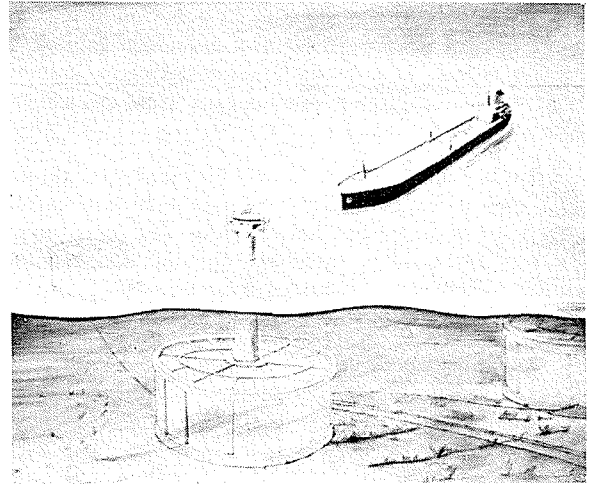
- par des profondeurs inférieures à 50 m, le réservoir peut être surmonté d'une cheminée fixe portant les installations de traitement et assurant le raccordement au navire;
- par des profondeurs comprises entre 50 et 100 m, le réservoir doit être complété par une plate-forme fixe supportant les installations de traitement (en attendant la mise au point d'appareillages sous-marins) et le raccordement au navire peut se faire sur bouée flottante;
- par des profondeurs de 100 à 180 m, la plate-forme fixée et la bouée peuvent être remplacés par une plate-forme articulée prenant appui sur la tête du réservoir;
- par des fonds inférieurs et jusqu'à 300 m, la plate-forme articulée devient entièrement indépendante;
- au-delà de 300 m, le réservoir attend les solutions nouvelles pour le raccordement fond-surface et pour l'arrimage du pétrolier.

Mais les mêmes idées sont également applicables aux terminaux d'éclatement. Certes des réservoirs immergés à faible profondeur sont sollicités d'une manière très vigoureuse par les houles, *a fortiori* lorsqu'il y a déferlement. Cependant le béton précontraint trouve, là encore, une application tout à fait favorable et nous avons pu proposer récemment un type de digue stockante fort intéressant pour le futur projet de création d'un port pétrolier artificiel au large du port du Havre.

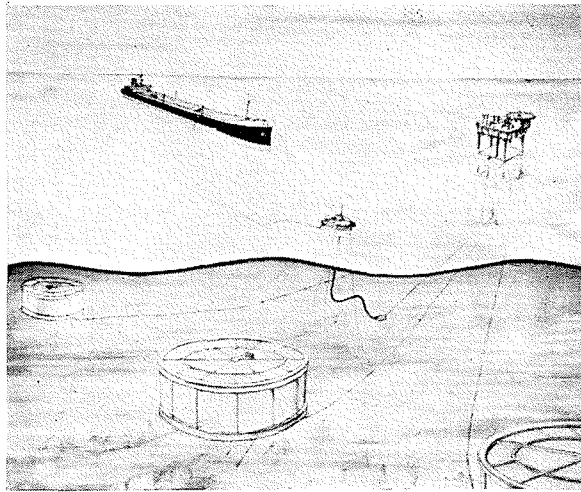
Il est actuellement prématuré d'en parler puisque les autorités du port autonome du Havre ne se sont pas encore



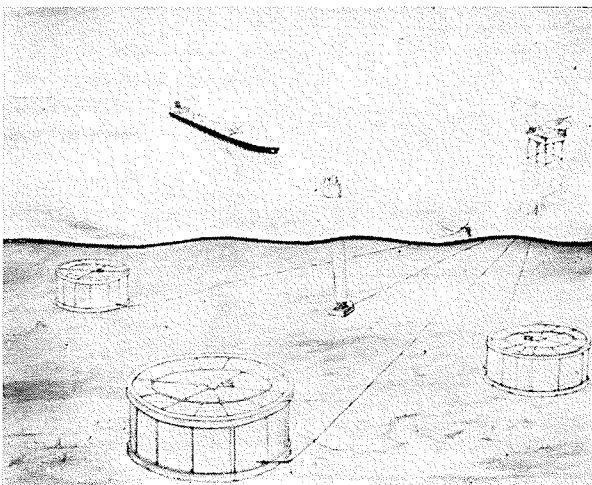
**3 a/** Profondeurs de 14 à 30 m.  
*Depths from 45 to 100 Ft.*



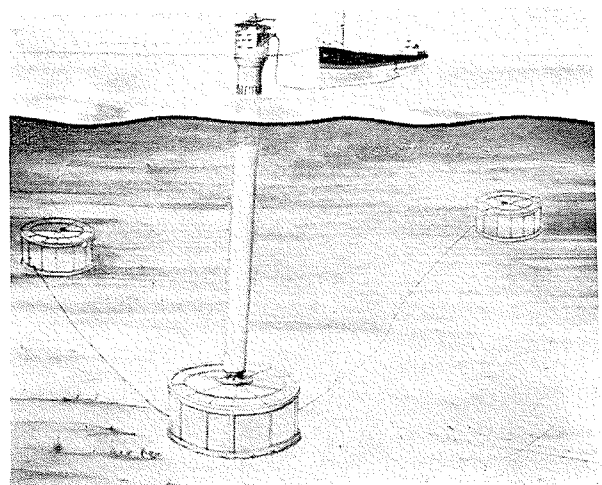
**3 b/** Profondeurs de 30 à 50 m.  
*Depths from 100 to 160 Ft.*



**3 c/** Profondeurs de 50 à 100 m.  
*Depths from 160 to 320 Ft.*



**3 d/** Profondeurs de 60 à 100 m et supérieures à 180 m.  
*Depths from 200 to 330 Ft and over 600 Ft.*



**3 e/** Profondeurs de 100 à 180 m.  
*Depths from 330 to 600 Ft.*

prononcées entre les diverses solutions originales et astucieuses qui leur ont été offertes. Il n'en demeure pas moins que seules les appréhensions de la pollution et l'habitude de petits navires sensibles à la mer, paraissent écarter, dans le proche avenir, la construction de stockages immergés au large en eau profonde analogues à ceux projetés sur les points d'embarquement.

En tout état de cause, il peut, *a posteriori*, paraître évident que le béton, qui n'a été que fort rarement discuté pour les projets de construction de ports maritimes, contient les qualités majeures qui lui donnent une très grande valeur dans le stockage immergé :

- adaptabilité au champ pétrolier;
- stabilité intrinsèque;
- sécurité et durabilité;
- économie.

Il appartenait sans doute aux entreprises de génie civil françaises de donner une nouvelle possibilité d'application à la technique extraordinaire d'origine française d'Eugène Freyssinet.

---

## Discussion

Président : M. Ph. CLEMENT

---

M. le Président remercie M. ROULET de son très remarquable exposé.

Personne ne demandant la parole, il conclut en ces termes :

« Deux réflexions me viennent à l'esprit :

« La première, c'est qu'après avoir entendu ces quatre remarquables exposés, beaucoup d'entre vous ont craint de poser des questions, faute de temps; je crois que c'est infiniment regrettable.

« Je voudrais donc dire, et c'est la suggestion que je fais aux organisateurs, combien il serait nécessaire que la partie fut remise.

« Mais, je pense que les exposés seront diffusés et que vos remarques pourront faire l'objet d'écrits complémentaires...

« J'en arrive à ma seconde remarque: je représente ici la Fédération des Travaux publics, en tant qu'administrateur de cette organisation professionnelle. Je souhaiterais beaucoup que cette Maison prît une conscience extrêmement précise de l'intérêt qu'elle a à suivre de près vos travaux et de la nécessité dans laquelle elle se trouve de soutenir et de développer votre action.

« Je souhaite être en cette matière votre meilleur avocat. »

