



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

NOUVEAUX TYPES DE RÉSERVOIRS SOUS-MARINS POUR HYDROCARBURES

PAR A. HERSENT *

Le développement de la recherche et de l'exploitation des gisements sous-marins, à des profondeurs de plus en plus grandes et à des distances des côtes ne permettant pas de liaisons économiques avec elles, conduit à envisager le stockage de brut près du gisement, soit au fond de la mer, soit en flottaison, soit hors d'eau.

Déjà en 1965, la Société des Grands Travaux de Marseille avait étudié plusieurs types de réservoir dont les deux principaux sont :

- un réservoir constitué d'un anneau torique, dit anneau de base, surmonté d'une coupole métallique;
- un réservoir constitué de cylindres en béton précontraint, les cylindres étant maintenus horizontalement par deux cadres surmontant les semelles de fondation.

Tous deux utilisent dans leur principe le déplacement de l'eau par le brut et vice-versa.

C'est le réservoir métallique en forme de coupole qui fait l'objet du présent exposé.

Les essais sur modèle et le complément d'étude qui ont abouti à la mise au point de ce type de réservoir ont été effectués dans le cadre d'une convention passée avec l'E.R.A.P./E.L.F.

Description d'un réservoir-coupole

Les réservoirs du type coupole sont principalement constitués d'un anneau de base et d'une coupole :

- la coupole est généralement constituée de douze sec-

teurs identiques. Chaque secteur est composé de tôles d'acier sur lesquelles s'exercent les effets de la houle et du produit stocké; ces tôles sont soudées sur des pannes dites tangentielles qui elles-mêmes prennent appui sur des arcs radiaux; deux tels arcs limitent un secteur;

- l'anneau de base est composé de douze cylindres raidis intérieurement et soudés aux extrémités des arcs radiaux.

Sous cet anneau de base est placé un lest béton dont le rôle est de donner à la structure un poids apparent égal à la poussée maximale du liquide stocké.

L'anneau de base sert de caisson de flottaison pendant le remorquage du réservoir, il est également divisé en compartiments, dont le ballastage permet l'immersion à poids apparent connu; il participe au stockage.

Exemple de réservoir

L'exemple suivant concerne un réservoir de 100 000 m³ de capacité utile étudié dans les hypothèses suivantes :

- profondeur d'eau 50 m;
- houle centenaire 10 m/10 s;
- densité du liquide stocké 0,85.

Un tel réservoir constitue, vu en plan, un dodécagone de 101 m de diamètre; sa hauteur est de 22,50 m et le diamètre de l'anneau de base 9 m. Le poids apparent d'une telle structure (acier + béton) est de 17 500 t, poids qui correspond à la poussée de 100 000 m³ de brut.

* Ingénieur civil des Ponts et Chaussées.

Les réservoirs coupole peuvent être installés partout où les plates-formes conventionnelles sont utilisées ; ils ont tous deux le même type de fondation sur piles. Les piles des réservoirs sont conçues pour ne pas être sollicitées lorsque le réservoir, plein d'huile, n'est pas soumis à l'action de la houle; ce critère pouvant d'ailleurs être abandonné dans le cas d'un sol de bonne qualité qui pourrait convenir à des piles travaillant en traction de façon permanente.

Les forces agissant sur le réservoir, dues à la houle centenaire et à la poussée du brut, sont répercutées sur les piles de fondation; leur taux de travail a volontairement été limité à environ 600 t en compression, 200 t en traction et 120 t en cisaillement, ce qui conduit à 48 piles de 42" pour le réservoir cité en exemple.

Un parafouille d'environ 1 m de hauteur et un tapis d'enrochements sont prévus pour les sols pouvant donner lieu à des affouillements sous l'action de la houle; les dimensions exactes du parafouille et la constitution du tapis d'enrochements sont fonction de la nature du sol.

Pour les sols inclinés, trois supports provisoires, actionnés par vérin, seront utilisés; le réglage à l'horizontale fera immédiatement suite à l'immersion, le poids du réservoir étant donc très faible.

Enfin, les réservoirs coupole peuvent être récupérés et ré-installés ailleurs après découpe des piles par l'intérieur et déballastage de l'anneau de base.

Construction du réservoir

La majorité des éléments du réservoir sera préfabriquée en usine, si bien que seule le montage restera à faire sur le site choisi pour la construction. Le réservoir sera assemblé dans une souille creusée au voisinage de la mer; la profondeur requise par la souille est assez faible, inférieure à 5 m sous le niveau moyen des hautes eaux pour un réservoir de 100 000 m³.

Avant remorquage, le réservoir sera équipé du lest de béton et de trois bonbonnes disposées à 120° dont le rôle sera expliqué plus loin.

Remorquage du réservoir

Les réservoirs coupole sont conçus pour flotter sans aucun effort extérieur mais, afin de diminuer le tirant d'eau et de faciliter le remorquage, l'air contenu à l'intérieur de la coupole sera mis sous pression.

Le remorquage à l'extérieur de la souille aura lieu à marée haute avec le tirant d'eau minimal, inférieur à 4,5 m et deux petits remorqueurs seront utilisés.

Dès que des fonds de 6 m seront atteints, la pression d'air intérieure sera réduite, et le tirant d'eau deviendra voisin de 5,70 m; le remorquage se fera alors à l'aide de deux remorqueurs de 5 000 ch à une vitesse voisine de trois nœuds.

L'équipement maritime utilisé est essentiellement composé de cargo-barges et de remorqueurs; il faut prévoir :

- une cargo-barge de 65 m pour loger le personnel, injecter les espaces annulaires pile-fourreau et éventuellement placer les enrochements;
- une cargo-barge pour l'immersion du réservoir et éventuellement les enrochements;
- une cargo-barge, si nécessaire, pour le transport des enrochements.

L'installation du réservoir se déroule de la façon suivante :

— *Mise de l'intérieur du réservoir en communication avec l'atmosphère.* A ce moment, les trois bonbonnes latérales sont partiellement immergées et garantissent une excellente stabilité au réservoir.

— *Attache des trois bras articulés au réservoir.* Ces bras articulés constituent le système d'immersion proprement dit; ils se composent d'un bras, articulé sur une barge et dont l'extrémité est attachée à un flotteur. Ils équipent les deux cargo-barges utilisées pour l'immersion.

— *Ballastage de l'anneau de base,* de telle façon que le réservoir atteigne un poids prédéterminé, les câbles reliant le réservoir aux barges par l'intermédiaire des bras articulés sont alors tendus. Les trois bonbonnes sont remplies d'eau et détachées du réservoir, lui donnant ainsi le poids apparent prévu pour l'immersion, soit 300 t pour un réservoir de 100 000 m³.

— *Immersion.* Par action des treuils, le réservoir est lentement immergé; l'écoulement de l'eau est facilité par l'ouverture centrale de la coupole et celles des fourreaux des piles. Grâce aux bras articulés, les mouvements des flotteurs ne dépendant pas des mouvements des barges et la tension dans les câbles ne peut varier qu'entre des limites bien définies par le petit diamètre des flotteurs.

A tout moment, la procédure d'immersion peut être arrêtée et le réservoir remonté en surface.

— *Ballastage provisoire de l'anneau de base* qui donne au réservoir une stabilité suffisante et l'assure contre une forte houle tant que les piles ne sont pas battues.

— *Battage des piles* et éventuellement forage puis injection de l'espace annulaire entre fourreau et pile.

— *Mise en place d'un tapis d'enrochements* si nécessaire. A ce moment, le réservoir est parfaitement protégé contre la vague centenaire.

Il reste à installer la tête amovible qui contient les vannes, l'équipement de mesure et à raccorder les lignes d'amenée du brut.

Exploitation d'un stockage immergé

Le système représenté sur les figures et qui va être décrit plus loin, concerne l'utilisation de deux réservoirs de 100 000 m³; ce n'est qu'un exemple et de nombreuses variantes peuvent être envisagées.

Les hypothèses suivantes ont été admises :

- chargement d'un pétrolier de 120 000 t en 10 h;
- le brut stocké est suffisamment dégazé pour ne plus libérer de gaz sous la coupole.

En outre, la tranche de brut directement utilisable, et dont le volume est 100 000 m³, est limitée à 2,20 m au-dessus du fond et 2,50 sous le sommet de la coupole, c'est-à-dire sous la tête amovible.

L'équipement d'un réservoir comprend :

— *Une tête amovible.* Elle sert de support aux deux vannes 20" qui sont commandées à distance, ou de la plate-forme voisine ou directement par les jauges du réservoir. Si ces deux vannes restent bloquées en position fermée, le réservoir est alors vidé au moyen d'une vanne manuelle, située elle aussi dans la tête amovible, mais commandée de l'extérieur. Toutes ces vannes sont en permanence dans un bain d'huile, type d'huile de transformateur.

— *L'équipement de mesure :* ce sont des jauges qui indiquent le niveau de brut entre les deux limites précédemment fixées, par exemple, des jauges qui, par l'intermé-

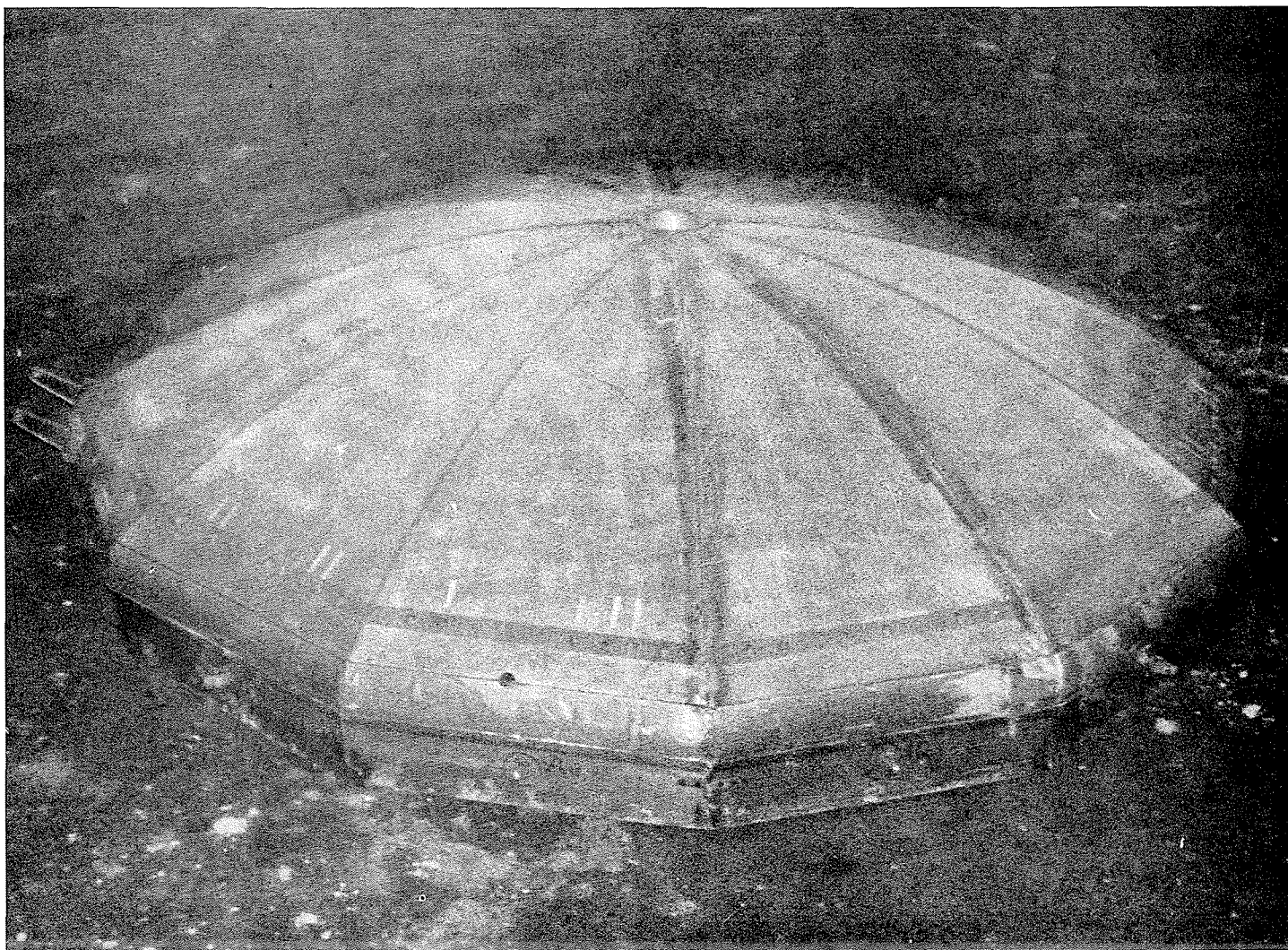
diaire de coffrets détecteurs, convertissent des changements de capacité en différences de potentiel.

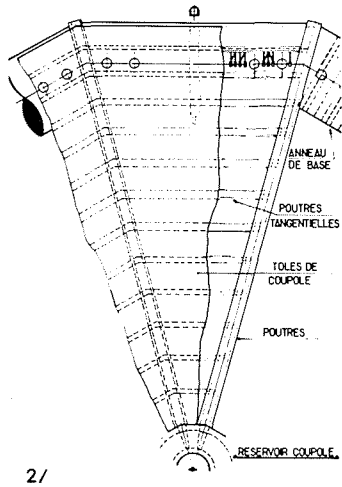
Différents types de jauges sont prévus :

- une jauge à indication continue sur toute la hauteur du réservoir;
- deux jauges à indication continue et à grande précision en haut et en bas du réservoir;
- deux jauges indiquant la fin de remplissage ou de vidange.

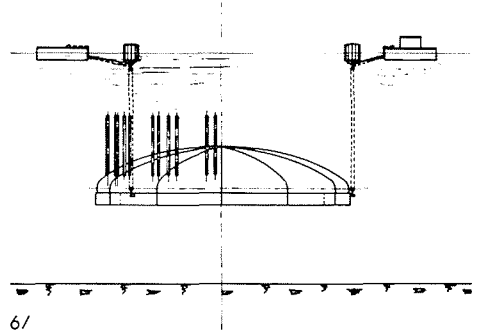
La tête amovible et les jauges constituant l'équipement de mesure peuvent être retirées lorsque le réservoir est vide.

Dans l'exemple considéré, deux lignes de 24" relient chaque réservoir à la plate-forme de production; afin d'arriver à vider les réservoirs à la vitesse souhaitée, il faut prévoir, par ligne, une pompe de reprise installée à faible profondeur sous la plate-forme et dont le rôle est d'assurer une charge suffisante à l'entrée des pompes principales de remplissage des tankers. Toute l'installation est conçue pour qu'une panne de l'une des pompes ne gêne pas le remplissage à haut débit.

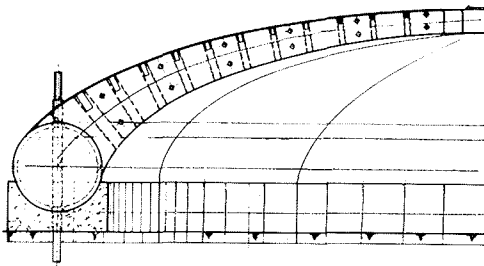




2/

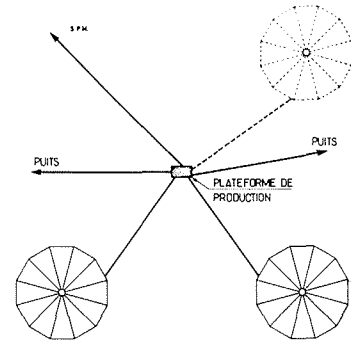


6/



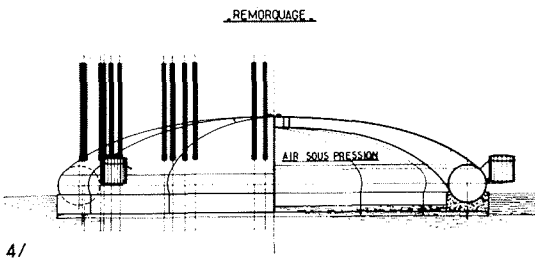
3/

RESERVOIR COUPOLE
ARG.

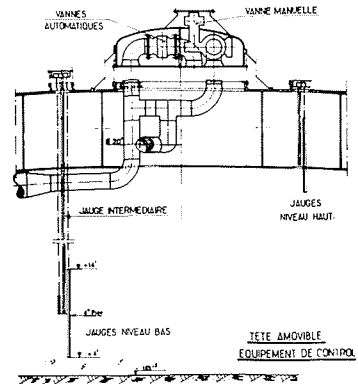


7/

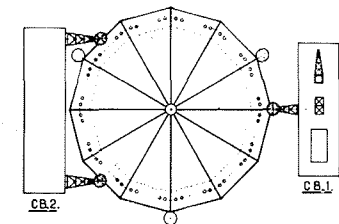
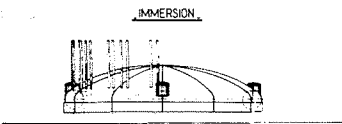
STOCKAGE
DE 200 000 m³



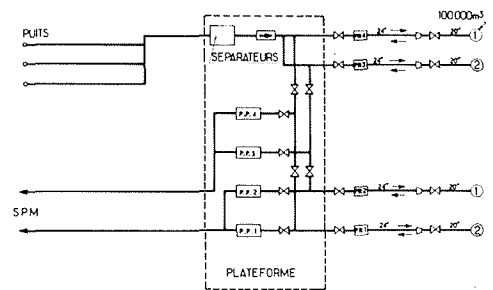
4/



8/



5/



9/

FLOW SHEET

Essais sur modèle

Trois modèles ont été réalisés afin d'effectuer les essais suivants :

— *Essais visant à déterminer l'action de la houle sur un réservoir* (Laboratoire National d'Hydraulique, Chatou).

Effectués pour des profondeurs de 50 à 100 m et pour des houles variant de 10 m à 18 m (périodes 10 s à 16 s), ils ont permis de déterminer :

— les efforts globaux exercés par la houle sur le réservoir;
— le champ des pressions différentielles agissant sur la coupole.

Les enregistrements correspondants ont pu, à tout instant, être corrélés avec le profil de la houle, ce qui a permis de dissocier parfois les deux mesures et d'éliminer ainsi certaines incertitudes dues à la liaison de la maquette et du sol.

La maquette était liée au sol par trois barreaux dynamométriques qu'il était possible de bloquer; ces barreaux fournissaient les composantes des efforts verticaux et horizontaux. Quant aux pressions, elles étaient enregistrées d'après les indications de quatorze capteurs à jauges de contraintes; des rotations de 120° de la maquette permettant d'explorer toute la coupole.

Une maquette à l'échelle 1/50° d'un réservoir de 30 000 m³ a été utilisée, mais une similitude permet de déterminer l'action de la houle, sur un réservoir de taille différente, par exemple un 100 000 m³; l'ordre de grandeur des efforts et des pressions est alors le suivant :

— effort horizontal : 5 000 t;
— effort vertical conventionnel (c'est-à-dire trois fois l'effort maximal enregistré sur un barreau) : 9 000 t;
— pression différentielle maximale : 2,5 t/m²;

pour une profondeur de 50 m et une houle d'amplitude de 10 m, période 10 s.

— *Essais concernant la stabilité de l'interface eau brut* (Laboratoire Central d'Hydraulique de France, Maisons-Alfort).

Ces essais effectués pour des profondeurs allant de 50 à 80 m pour des périodes variant de façon continue, ont été réalisés sur un modèle à l'échelle 1/65° d'un réservoir de 80 000 m³.

Ils ont permis de montrer que les mouvements à l'intérieur du réservoir restaient faibles; l'agitation à l'interface ne dépasse pas 5 % de l'amplitude de la houle en surface.

Quelques essais ont aussi été effectués en surélevant la maquette par rapport au fond afin de simuler un affouillement; dans ces conditions défavorables, l'agitation maximale se produit au voisinage du centre du réservoir et l'amplitude reste inférieure à 2 m. C'est pour éviter ce phénomène qu'un parafoille et un tapis d'enrochements sont prévus pour les sites où des affouillements pourraient se produire.

— *Essais de remorquage et d'immersion du réservoir* (Laboratoire National d'Hydraulique et Laboratoire Central d'Hydraulique de France).

Ces essais ont été effectués sur maquettes à l'échelle 1/60° d'un réservoir de 80 000 m³ de capacité. Cette maquette était équipée de trois stabilisateurs latéraux qui étaient chargés d'élever le centre de poussée; en effet, dans le cas étudié à l'origine, il était prévu de lester le réservoir

une fois immergé par injection de sable dans le tore de base; ce lest devant permettre de donner à l'ensemble de la structure un poids apparent s'opposant à la poussée du brut stocké. Depuis, un lest de béton, installé pendant la construction a été préféré; ce lest abaisse le centre de gravité.

Abaissement du centre de gravité, surélévation du centre de poussée donnent des caractéristiques similaires à la structure.

Les essais effectués ont montré que le remorquage pouvait s'effectuer sans problème avec deux remorqueurs de 5 000 ch à une vitesse de 3 nœuds.

Le système d'immersion était constitué d'un triangle en équilibre indifférent qui maintenait les trois flotteurs d'immersion à des écartements constants sans gêner les mouvements.

Deux types d'essais ont été effectués, à la houle et au courant.

Essais au courant. Ils avaient pour but d'étudier les inclinaisons prises par la maquette sous l'effet d'un fort courant et de mesurer l'effort supplémentaire de retenue. En fait, le réservoir n'a pas tendance à planer dans le courant et reste sensiblement horizontal; il est soumis par contre à une force portante qui conditionne le poids apparent avec lequel il doit être immergé.

Essais à la houle. Dès que l'anneau de base est immergé, la stabilité du réservoir est excellente et comparable à celle d'une plate-forme semi-submersible. A proximité du fond, le réservoir ne présente pas de tangage ni de pilonnement quelle que soit la période de la houle, pour des amplitudes inférieures à 4 m; il ne présente pas non plus de mouvements horizontaux pour une houle de période inférieure à 9 s.

Développements futurs

Il ne faut pas considérer que le réservoir de 100 000 m³ qui vient d'être décrit constitue toujours la meilleure solution dans cette gamme de capacité.

De très nombreuses solutions sont possibles et chaque cas demande une étude approfondie en fonction des paramètres essentiels suivants :

Profondeur; type de mer; quantité et nature du liquide à stocker; nature du sol de fondations; implantation du site de construction.

On peut envisager des réservoirs supportant une plate-forme de type quelconque, un réservoir suffisamment lesté pour pouvoir éliminer les piles de fondation dans certaines conditions de sol...

Conclusion

Malgré la complexité des problèmes de stockage sous-marin, plusieurs avant-projets de réservoirs en forme de coupole ont été étudiés dans les conditions les plus variées; ces avant-projets ont conduit à des propositions chiffrées.

Ce type de réservoir a été breveté en France et dans de nombreux pays étrangers.

Enfin, il nous faut remercier le comité d'Etudes Marines et l'E.R.A.P. qui ont cofinancé les études et les essais relatifs à ce réservoir.

