

l'ancrage par succion

études sur modèles réduits

suction anchors model test studies

Didier FAU

Chercheur au Laboratoire Géomatériaux de l'ENTPE *

Daniel RAYNAUD

Ingénieur à Single Buoy Moorings Inc., **

Résumé

Le développement permanent des travaux pétroliers en haute mer, requiert des techniques d'amarrage de plus en plus performantes. Les ancrés à succion classées dans la catégorie des ancrés dites spéciales, ont été conçues et testées depuis peu. Ce type d'ancrage nécessite des moyens d'installation réduits et peut être utilisé en eaux profondes.

Des essais sur modèles réduits menés en laboratoire ont permis d'étudier le comportement de telles ancrés dans des sols sableux et argileux. Il en résulte que connaissant un minimum d'informations géotechniques sur le fond marin, l'ancrage par succion se révèle fiable et peu onéreux, car il permet la récupération des ancrés. Ce dernier point représente un atout considérable pour ce type d'ancrage.

Abstract

The constant evolution of the offshore oil industry requires more and more efficient and reliable anchoring techniques. The suction anchors which are classified as special anchors, have been designed and tested over the past years. This type of anchoring necessitates only light means of installation and can be used in deep water.

The behavior of suction anchors placed in sand and clay has been investigated with model tests in a laboratory. The obtention of some geotechnical data for the seabed are necessary for suction anchor design. This type of anchoring has been proven to be reliable and cost effective, and it allows the re-use of the anchors, which is a considerable advantage.

* ENTPE, rue M.-Audin — 69120 Vaulx-en-Velin.

** SBM, 24, avenue de Fontvieille. P.O Box 199 MC — 98007 Monaco Cedex.

1. INTRODUCTION

L'intensification et la constante évolution des travaux pétroliers en mer intervenues au cours des dernières décennies ont créé des besoins nouveaux en matière d'ancrages.

Les structures flottantes telles que les plate-formes semi-submersibles ou les bouées de chargement (fig. 1) ont tout d'abord été amarées à l'aide d'ancres classiques très lourdes reliées aux structures flottantes par des chaînes ou des câbles de gros diamètre. A mesure que la taille des structures à ancrer : plate-formes, bouées, tankers devenait de plus en plus importante, il a fallu rechercher d'autres systèmes plus adaptés aux nouvelles demandes. Les méthodes classiques d'ancrage qui sont actuellement employées par l'industrie pétrolière en haute mer sont des ancres à haute efficacité, des embases gravitaires, des pieux ou encore des ancres spéciales. Une brève revue des systèmes d'ancrage couramment utilisés en mer est présentée dans le premier chapitre. Parmi les ancres spéciales, une attention particulière sera portée sur le système « d'ancrage par succion ».

Le principe de l'ancre à succion est explicité en détail dans le chapitre suivant. L'installation et le comportement d'ancres à succion installées à titre expérimental puis commercial sont revus et commentés.

Les phénomènes qui se produisent lors de l'enfoncement d'une ancre à succion dans un massif de sol sableux ou argileux ont été étudiés en laboratoire. Cet article présente dans sa deuxième partie les résultats des recherches qui ont été effectuées sur des modèles réduits d'ancres à succion à l'ENTPE (Vaulx-en-Velin). Ces études

ont permis de mieux comprendre le comportement en vraie grandeur des ancres à succion placées dans des matériaux pulvérulents ou cohérents.

2. REVUE DES SYSTEMES D'ANCRAGE UTILISES DANS L'INDUSTRIE PETROLIERE OFFSHORE

Les supports flottants destinés à l'exploitation des hydrocarbures en mer peuvent être soit mobiles (barges de travail), soit temporaires (plate-formes semi-submersibles) ou bien encore permanents, pour une durée de 5 à 20 ans (bouées, terminaux ou colonnes articulées). La sélection d'un système d'ancrage se fait sur la connaissance des diverses possibilités offertes, puis sur l'étude détaillée de la réalisation et de la mise en place du système sélectionné.

2.1. Systèmes d'ancrage

Les techniques actuelles d'ancrage de supports flottants peuvent se diviser en cinq catégories :

- ancres marines de fortes capacités à haut rendement ;
- embases gravitaires ou corps morts ;
- pieux d'ancrages ;
- ancres spéciales ;
- ancrage dynamique.

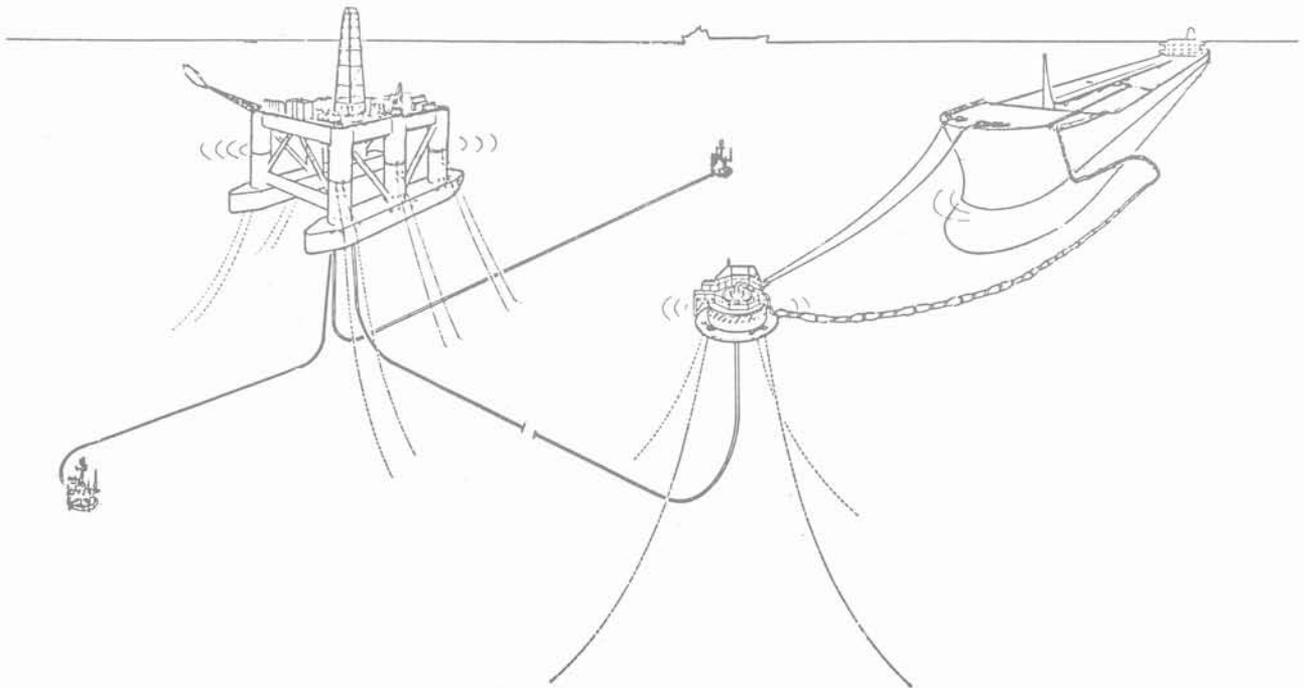


Fig. 1 — Systèmes d'ancrage caténaire de plate-forme semi-submersible et de bouée d'amarrage.

Les quatre premiers types d'ancrage sont schématiquement représentés sur la figure 2. La technique des ancres a été largement développée dans l'ouvrage de PUECH (1983). A partir de 1970, de nouveaux types d'ancres à haute efficacité (rapport entre la tenue et le poids dans l'air de l'ancre) sont apparus sur le marché. Des ancres de 100 à 150 kN permettent de reprendre des efforts de 1 000 à 2 000 kN par point d'ancrage. Des ancres plus lourdes et plus performantes permettent de reprendre des efforts de 5 000 à 6 000 kN dans le cas d'ancrage permanent de supports de production.

L'ancrage gravitaire est une solution fiable pour la reprise d'efforts verticaux et horizontaux importants. Dans le cas de colonnes articulées construites en Mer du Nord, les efforts appliqués à l'unijoint sont de l'ordre de 10 000 kN. L'amarrage de structures à l'aide de corps morts en béton est peu utilisé à cause des difficultés de transport et d'installation.

Les pieux d'ancrage sont souvent utilisés car peu onéreux. Ils offrent l'avantage de pouvoir être placés à une position bien déterminée et ils permettent de reprendre des efforts verticaux et horizontaux. Suivant la nature des sols rencontrés, les méthodes d'installation sont bien contrôlées. En variant le diamètre, l'épaisseur et la longueur, ainsi que la position du point d'attachement, on peut reprendre des efforts variant de 1 000 à 7 000 kN.

Les ancres spéciales sont elles aussi apparues dans les années 70. L'objet de ces systèmes est d'offrir un moyen d'ancrage fiable, pouvant résister à des efforts importants, être réutilisables parfois, et pouvant être mis en œuvre d'une manière économique. C'est ainsi que sont apparues entre autres, les ancres vibrofoncées, les ancres propulsées, les ancres mises en place par fluidisation et les ancres à succion. Les ancres à succion qui font l'objet de cet article peuvent être considérées comme des pieux d'ancrage de grand diamètre (en général supérieur à trois mètres) et pouvant reprendre des efforts latéraux de 2 000 kN. Elles offrent l'avantage de pouvoir être réutilisables, elles nécessitent des moyens d'installation légers donc peu coûteux, et elles sont très économiques dans le cas d'ancrage en eaux profondes (plus de 300 mètres).

Le cinquième type, l'ancrage dynamique, est une technique particulière récente qui se caractérise par l'absence de liaison mécanique entre le fond marin et la structure à amarrer. Cette technique est surtout utilisée en eaux

très profondes (plus de 1 000 mètres) pour des structures mobiles ou des ancrages temporaires.

2.2. Critères de sélection d'un système d'ancrage

La sélection d'un système d'ancrage de forte capacité est fonction d'un nombre important de critères, les principaux sont les suivants :

- le temps d'immobilisation du support flottant. Pour de courtes durées, les ancres marines sont fréquemment utilisées. Pour des ancrages permanents, les pieux ou structures gravitaires seront considérés, de même que les ancres marines à haute efficacité ;
- l'intensité et la direction des efforts dans les lignes d'ancrage. Les efforts horizontaux à considérer sont en général de 1 000 à 7 000 kN tandis que les efforts verticaux peuvent aller jusqu'à 10 000 kN ;
- la profondeur d'eau qui est encore de nos jours un critère sévère. De 100 à 200 mètres de profondeur, les techniques sous-marines sont bien maîtrisées. De 200 à 300 mètres de profondeur, le coût des travaux sous-marins croît rapidement, au-delà de 300 mètres de profondeur, l'ancrage du type « chaîne-caténaire » est remplacé par l'ancrage dynamique ;
- la nature du sol qui est un critère prépondérant dans le choix du type d'ancrage. Le tableau I présente une méthode de sélection d'un système d'ancrage en fonction de la nature du sol et des efforts appliqués ;
- finalement le critère économique sera sans doute le facteur décisif lorsque plusieurs solutions seront techniquement envisageables.

3. SYSTEME D'ANCRAGE PAR SUCCION

3.1. Principe et description du système

Les premières ancres à succion ont été expérimentées par la Société Shell en 1976 dans un lac, puis étudiées plus en détail par des essais en vraie grandeur au cours

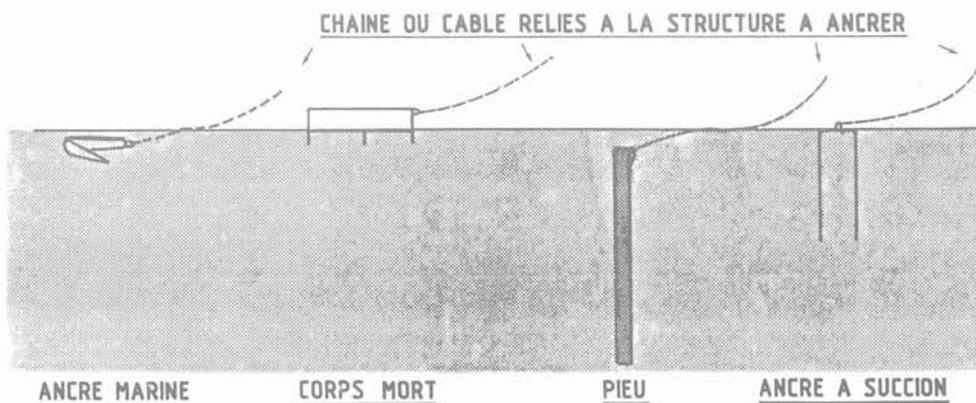


Fig. 2 — Types d'ancrage actuellement utilisés.

Tableau I

CHOIX D'UN SYSTEME D'ANCRAGE EN FONCTION DE LA NATURE DU SOL ET DE L'EFFORT APPLIQUE (PUECH 1983)

Type d'ancrage	Ancres Bêches Pelles		Corps morts		Pieux battus	Pieux vibro-foncés	Pieux à chaîne	Pieux forés et cimentés « classiques »		Ancres à succion
	H		V	H		V et/ou H		V	H	V et/ou H
T Y P E	Sols argileux									
	x	x	?		x	x	x	x		x
	x		x	?	x	x	x	x	x	x
	?		x	x	x			x	x	x
D E	Sables lâches									
	x		x	x	x	x		x	x	x
S O L	Sables denses									
	x		x	x	x			x	x	x
			?	?				x	x	

Note : H : effort horizontal
 V : effort vertical d'arrachement
 X : solution compatible avec la nature du sol.

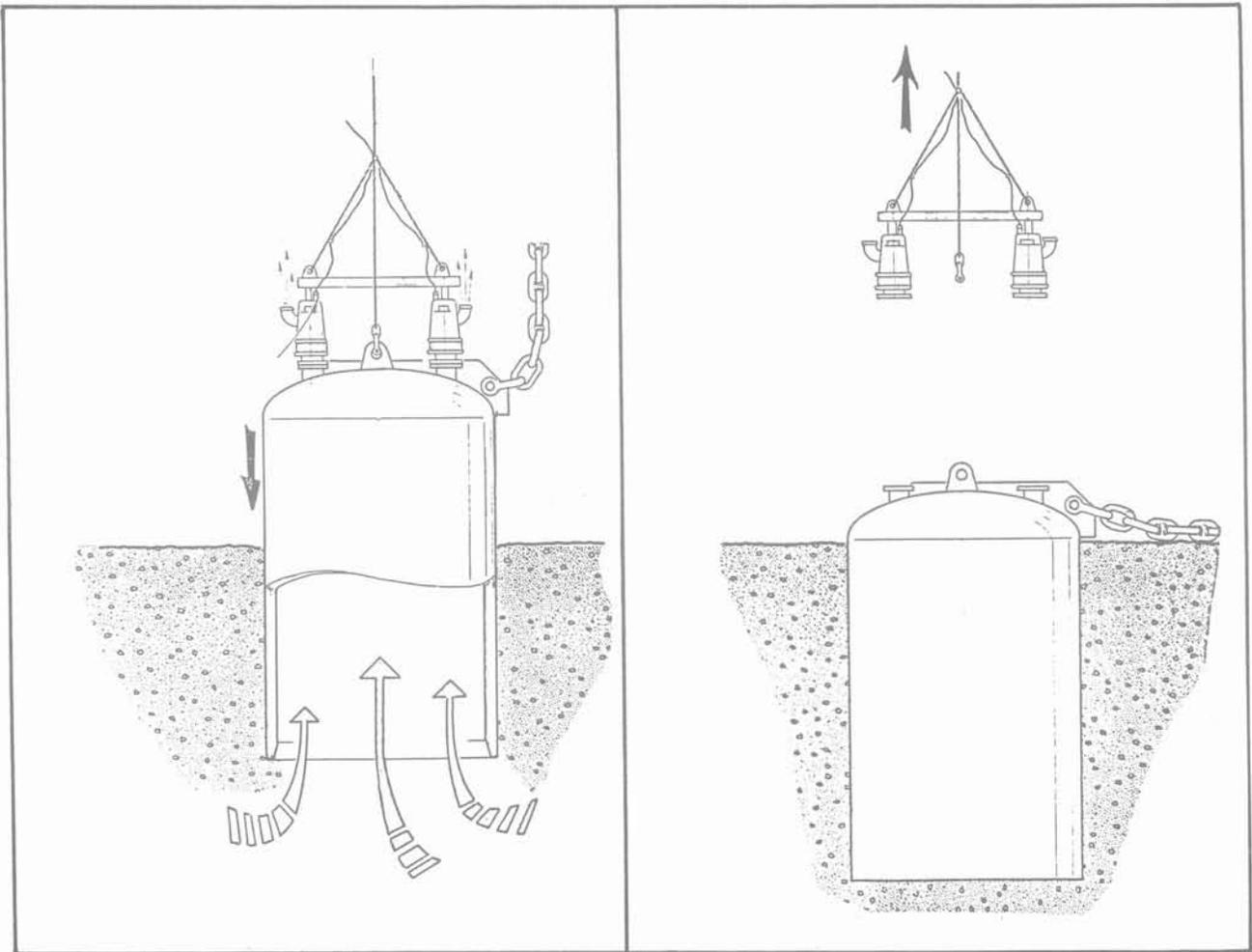


Fig. 3 — Exemple d'ancrage à succion a) En cours d'installation b) Après installation.

des années suivantes (HOGERVORST, 1980). La Société Single Buoy Moorings Inc. de Monaco a commercialisé le principe des ancrages à succion sous licence Shell à partir de 1980 (CUCKSON, 1981, MAARI, 1985).

Une ancre à succion est définie comme une pile de grand diamètre dont l'extrémité supérieure est fermée. La partie supérieure est en forme de dôme ou bien plate et renforcée par des poutres (fig. 3). Le principe de l'ancre à succion est simple, il consiste à utiliser la pression hydrostatique exercée au sommet de l'ancre pour vaincre la résistance à la pénétration offerte par le sol. Pour cela on exerce une dépression à l'intérieur de l'ancre par l'intermédiaire de pompes qui évacuent l'eau contenue à l'intérieur de l'ancre ainsi que l'eau qui peut percoler dans les couches de sol perméables. Lorsque l'ancre a pénétré dans le sol de la hauteur désirée, les pompes sont déconnectées et remontées à la surface. L'ancre est alors prête pour la mise en tension des chaînes. Un des avantages des ancrages à succion est que le principe de base peut être aussi utilisé pour récupérer l'ancre. Il suffit d'injecter de l'eau sous pression à l'intérieur de l'ancre pour la récupérer. Cette technique est très utile lorsque les ancrages doivent être réutilisés sur un site voisin, ou encore lorsque des difficultés imprévues arrivent lors de la mise en place des ancrages.

Les caractéristiques des ancrages à succion utilisés jusqu'à présent sont les suivantes :

- diamètre extérieur : 3 à 5 m
- longueur totale : 5 à 10 m
- épaisseur des parois : 25 à 54 mm
- poids : 150 à 300 kN
- efforts appliqués : 500 à 2 500 kN.

L'équipement nécessaire à l'installation d'ancrages à succion est relativement limité :

- une pompe submersible de capacité suffisante. Un

débit de 150 m³/h permettra le plus souvent la pénétration complète d'une ancre en moins d'une heure ;

- une boîte de mesures pour suivre l'enfoncement et l'inclinaison de l'ancre et la pression à son sommet ;

- une pompe à haute pression pour la récupération de l'ancre. Les pompes à incendie à bord des bateaux peuvent être suffisantes.

Une ancre à succion est un moyen économique de remplacer des pieux d'ancrage. Les méthodes d'installation ne nécessitent pas de barges avec des grues de grandes capacités pouvant manipuler les marteaux de battage aériens et les rallonges de battage ou encore les marteaux submersibles. Bien que le poids d'une ancre à succion soit équivalent au poids d'acier d'un pieu battu, le poids des pompes submersibles est très léger en comparaison de celui des marteaux de battage. De plus, l'installation en mer de l'ancre à succion est grandement facilitée par la stabilité même de l'ancre posée sur le fond marin, son grand diamètre permet à l'ancre de rester verticale sans support à partir de la surface, ce qui présente un autre avantage, en cas de mauvais temps en mer.

3.2. Exemples d'application d'ancrage par succion

Les premières ancrages à succion ont été développées à titre expérimental par la société Shell aux Pays-Bas. Une publication présentée par HOGERVORST (1980) résume les résultats des essais en vraie grandeur réalisés avec des ancrages à succion sur les sites de Noordland, Delfzijl et Scharendijke aux Pays-Bas. De plus une méthode de calcul permettant d'évaluer les efforts de pénétration de l'ancre dans le sol, ainsi que la résistance latérale d'une ancre sont proposées.

Tableau II
EXEMPLES D'ANCRAGES REALISES

Site	Année	Coupe de sondage	Pro-fondeur d'eau (m)	Diamètre (m)	Longueur (m)	Charge latérale max. (kN)	Nombre d'ancres ou d'essais
Noordland Pays-Bas	1978	0-3 m sable fin silteux 3-8 m sable fin	17	3,8	7,0	1000	5 essais
Delfzijl Pays-Bas	1979	0-10 m argile très raide	12	3,8	5,0	2000	5 essais
Scharendijke Pays-Bas	1980	0-5 m sable moyen 5-10 m argile sableuse raide	31	3,8	7,0	2000	2 essais
Gorm Field Danemark	1980	0-6 m sable dense 6-12,5 m argile molle à raide	39	3,5	9,0	> 2000	2 essais 12 ancrages
Champion Field Brunei	1980	0-2,5 m sable lâche 2,5-10 m argile molle à raide	20 à 45	3,8 4,5	5,0 6,2	2000 700	4 essais 4 ancrages
Thistle Field Mer du Nord	1982	Argile très raide	162	3,6	8,0	510 horiz. 800 vert.	2 ancrages
Estuaire Scheldt Pays-Bas	1981	0-5,0 m sable fin à moyen	6	3,8	7,0	1750	1 ancre

L'article de SEMPERE et AUVERGNE (1982), présente la méthode de calcul employée pour le dimensionnement des ancrés à succion installées dans le champ de Gorm, secteur danois, en Mer du Nord. Ce même article présente de façon détaillée une analyse de la méthode d'installation. Le tableau II présente une liste d'ancres à succion qui ont été mises en place par la Société Shell ou commercialisées. Les conditions de sol et les dimensions principales des ancrés sont résumées dans ce tableau.

4. RESULTATS DES ETUDES SUR MODELES REDUITS

4.1. Objet des études

Les recherches menées au Laboratoire Géomatériaux de l'ENTPE ont eu pour but d'acquérir une meilleure connaissance des possibilités offertes par les ancrés à succion. Les études ont porté sur le comportement du sol et sur l'interaction sol-ancré. La capacité d'ancrage n'a pas été abordée, les méthodes classiques de calcul de la capacité portante axiale et latérale des pieux pouvant être appliquées.

Trois thèmes ont orienté ces recherches.

La récupération de l'ancré est l'un des attraits de ce système. Or, il a été mis en évidence, par un modèle théorique, un rapport *diamètre sur hauteur enfoncée*, pour lequel la récupération de l'ancré nécessite une pression infinie. Ce rapport est appelé *rapport critique* et noté : $(D/H)_c$. C'est pourquoi, la possibilité pour un sol donné, d'enfoncer et de récupérer une ancre très élançée, a fait l'objet du thème principal de recherche. Un modèle théorique a été développé, reliant la pression « P », fournie par les pompes, à la hauteur « H » d'enfoncement de l'ancré.

Le deuxième thème a été l'analyse qualitative des phénomènes observés. Généralement, les conditions d'installation in situ, ne permettent pas une bonne observation.

Enfin, les premières études réalisées à l'ENTPE ont montré, lors de l'enfoncement d'une ancre, l'existence d'une remontée de sol à l'intérieur de celle-ci. Une attention particulière a été portée sur ce phénomène afin de l'analyser et de le quantifier en laboratoire.

4.1.1. Présentation des modèles et types de sol utilisés

Les ancrés à succion utilisés en Mer du Nord, ont les caractéristiques suivantes :

- longueur : 9 m
- diamètre : 3,5 m
- poids : 300 kN
- épaisseur : 25 mm
- matière : acier.

Pour augmenter la capacité d'ancrage, il a été envisagé également de construire des ancrés plus élançés atteignant une hauteur de dix diamètres.

C'est pourquoi, les maquettes d'ancres utilisées pour cette étude sont des modèles réduits au 1/60^e, 1/50^e,

1/35^e et 1/25^e de l'ancré présentée ci-dessus, mais respectant un élançement de l'ordre de dix. Ces maquettes sont, soit en acier, soit en plexiglass.

En ce qui concerne le sol, deux types de matériaux ont été retenus :

a) matériaux pulvérulents

Deux sables de carrière ont été utilisés : S 31 et F 25.

Tableau III

PROPRIETES DES MATERIAUX PULVERULENTS

Nom	Perméabilité k (m/s)	γ' (kN ^o /m ³)	ϕ (degrés)	e	d 60 (mm)	Classification LCPC
S 31	12 10 ⁻⁴	9,2	34°	0,80	0,40	S m
F 25	7 10 ⁻⁴	8,4	32°	0,93	0,14	Sk

b) matériaux cohérents :

L'argile employée est la « terre de Vallauris » dont les limites d'Atterberg sont : $W_p = 26 \%$, $W_L = 51 \%$, $I_p = 25 \%$. Trois cohésions différentes ont été utilisées :

Tableau IV

PROPRIETES DES MATERIAUX COHERENTS

Désignation des argiles	A 3	A 4	A 9
Cohésion : C_p (kPa) au pic	9,0	4,7	1,2
Cohésion : C_r (kPa) résiduelle	7,0	4,0	1,0

Le fond marin est représenté par un volume de sol saturé d'environ un mètre cube, noyé sous deux mètres d'eau. Afin de conserver l'axisymétrie de l'ensemble, le massif de sol est de section circulaire de diamètre 1,0 m, de hauteur 1,1 m (fig. 4). Les dimensions relatives du massif de sol et des différentes ancrés sont telles que les effets de bord sont négligeables. Les maquettes d'ancres sont équilibrées par un contre poids, de telle sorte que le poids propre de l'ancré n'est pas pris en compte lors de l'enfoncement. Le système d'acquisition des données permet de mesurer en fonction du temps, l'enfoncement de l'ancré, la hauteur de la remontée du sol et la pression à l'intérieur de l'ancré.

4.1.2. Conditions de similitude

L'expérimentation sur modèle réduit doit être précédée d'une étude sur les conditions de similitude. Un examen détaillé du phénomène d'ancrage fait apparaître un nombre important de variables à prendre en compte :

- les caractéristiques du sol (cohésion, angle de frottement, granularité, perméabilité, propriétés mécaniques) ;
- la géométrie de l'ancré (diamètre, longueur, épaisseur) ;

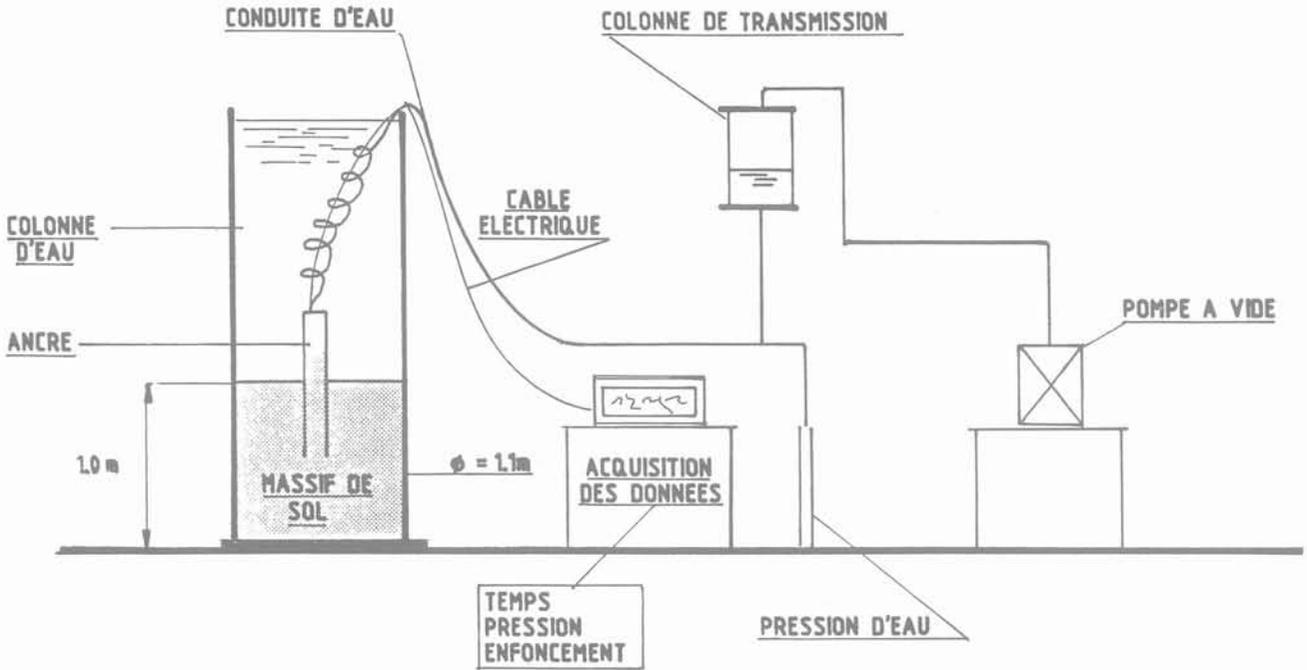


Fig. 4 — Schéma du dispositif expérimental utilisé pour les études sur modèles réduits d'ancres à succion.

— les conditions de mise en œuvre (pression et débit à fournir par les pompes, enfoncement à atteindre, vitesse d'enfoncement de l'ancre).

Le respect de la similitude pour chacun de ces paramètres n'est guère réalisable, des hypothèses sont nécessaires.

Les lois de la similitude ont été respectées sur les variables qui paraissent primordiales. L'écriture des conditions d'équilibre, du critère de plasticité, et de la loi de Darcy ont permis d'obtenir les paramètres suivants :

- longueur $L^* = L_{\text{modèle}}/L_{\text{réelle}}$
- contrainte $\delta^* = L^*$
- poids volumique $\gamma^* = 1$
- déplacement $\xi^* = L^*$
- perméabilité $k^* = 1$
- cohésion $C^* = L^*$
- angle de frottement $\text{tg}\phi^* = 1$

Le fait de ne pas connaître la loi de comportement du sol, et de ne pas le soumettre en laboratoire aux contraintes qu'il subirait in situ, nous amène à considérer avec prudence toutes les extrapolations quantitatives que l'on pourrait envisager.

4.2. ANCRAGE PAR SUCCION DANS UN MATERIAU PULVERULENT

4.2.1. Modèle théorique

PRELIMINAIRE

Les essais d'ancrage dans un matériau pulvérulent ont permis de mettre en évidence les phénomènes suivants :

— En raison du gradient de pression imposé, le mouvement de l'ancre s'accompagne d'un écoulement d'eau

à travers le sol qui l'entoure. Ce dernier est soumis à des forces de « percolation », proportionnelles au gradient hydraulique.

— De plus, la succion et l'écoulement hydraulique conjugués font monter le sol à l'intérieur de l'ancre. Si l'ancre est enfoncée d'une hauteur « H », la hauteur intérieure de sol est « H + h » (fig. 5). L'expérience montre que « h » est fonction linéaire de « H », soit : $h = H/a$ (« a » étant constant pour un sol donné). Nous noterons la hauteur intérieure « H (1 + 1/a) ».

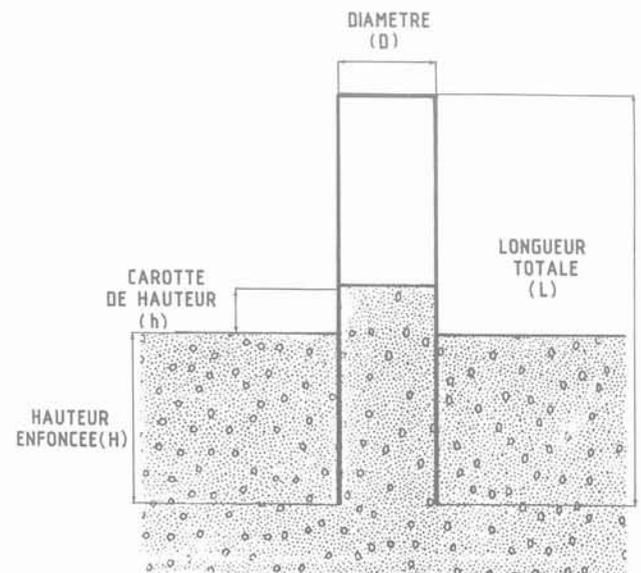


Fig. 5. — Phénomène de remontée du sol à l'intérieur de l'ancre sur une hauteur (h).

EVALUATION DES DIFFERENTS PARAMETRES

Les paramètres à prendre en compte sont :

- le poids volumique déjaugé du sol, « γ' », et « d' » la densité déjaugée,
- le coefficient de frottement « $\text{tg}\delta$ » entre l'ancre et le sol,
- le coefficient « K » de pression latérale des terres : $K = s_v/s_h$
- le gradient hydraulique « i ».

les trois premiers paramètres peuvent être estimés sans trop d'incertitude. Les deux derniers méritent une attention particulière :

— Tout d'abord, le coefficient de pression latérale des terres « K ». Lors de l'enfoncement de l'ancre, les efforts normaux appliqués par le sol sur les parois de l'ancre vont varier, en raison du refoulement du sol en tête de l'ancre, et de l'effet de la dilatance ou de la contractance (suivant que le sol est dense ou lâche) liée au cisaillement (fig. 6). Ainsi s_v peut être évalué seulement de manière approximative. Il en est de même pour le coefficient « K » qui reste mal connu. Un coefficient unique sera pris dans le modèle théorique pour l'intérieur et l'extérieur de l'ancre. Pour une meilleure estimation, l'approche expérimentale semble être la seule méthode réaliste à envisager. Notons cependant qu'il est d'usage de prendre « $K = 1 - \sin\phi$ » (formule de Jaky), ou encore « $K = 0,8$ » comme conseillé par « l'American Petroleum Institute » (1984).

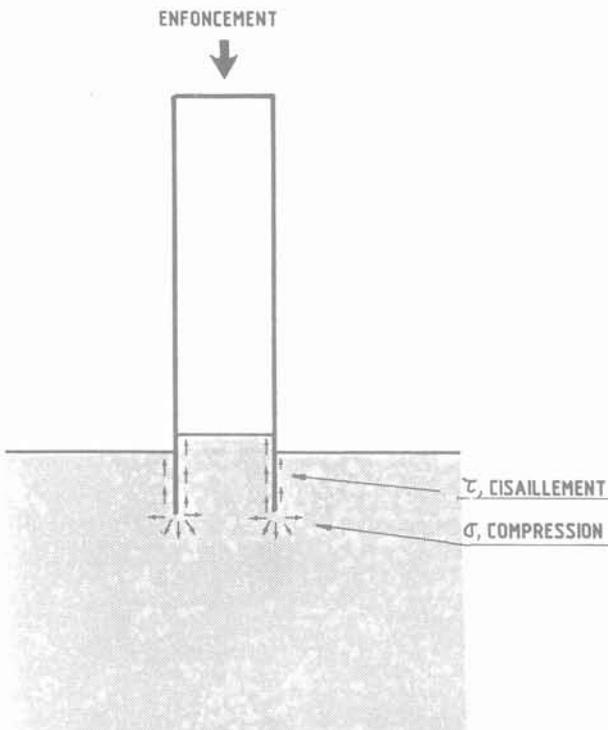


Fig. 6. — Efforts de compression et de cisaillement exercés par l'ancre sur le sol lors de son enfoncement.

— Le second paramètre délicat est le gradient hydraulique. Afin de l'évaluer en tout point le long de l'ancre, le réseau d'écoulement de l'eau à travers le sol a été si-

mulé numériquement sur ordinateur. Le programme « SEEP », basé sur la méthode des éléments finis a permis, pour trois configurations différentes d'enfoncement de l'ancre, de connaître le gradient hydraulique. Les résultats obtenus sont les suivants :

Hypothèse :

Soit P la surpression (ou dépression) dans la partie haute de l'ancre, « P_1 » la pression à sa base côté intérieur et « P_2 » la pression à sa base côté extérieur.

Soit H la charge hydraulique en un point d'altitude « z » :

$H = u/\gamma_w + z$, (u pression, z altitude comptée sur un axe vertical ascendant). Le gradient hydraulique est défini par : $\vec{i} = -\text{grad } H$. Dans notre cas, seule la composante verticale du gradient est non nulle, et à pour valeur absolue :

$$i = \frac{du}{dz} \frac{1}{\gamma_w} + 1.$$

Un calcul immédiat montre que : $i = \frac{dp}{dz} \frac{1}{\gamma_w}$

- Le gradient hydraulique « i » peut être considéré, en chaque instant, constant le long de l'ancre (fig. 7) et ce, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur.

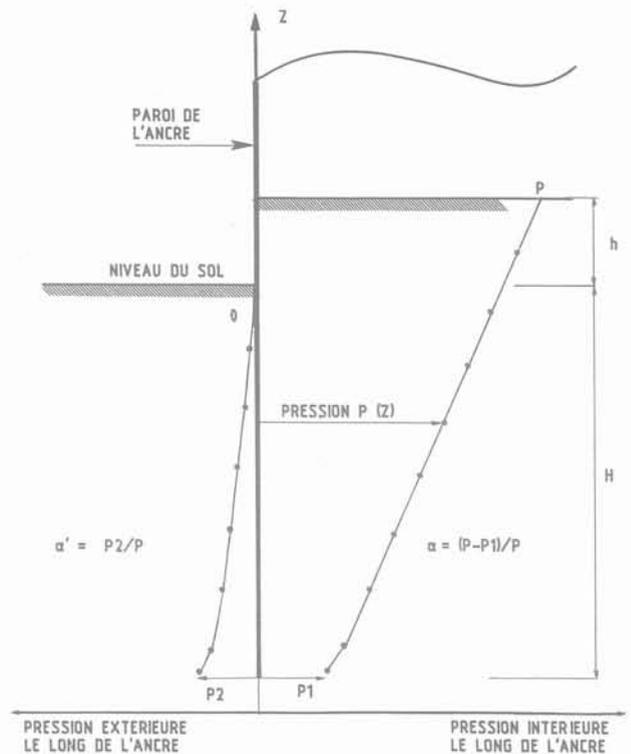


Fig. 7 — Distribution du gradient hydraulique « i » à l'intérieur et à l'extérieur d'une ancre.

Aussi, nous dirons qu'en tout point du sol au voisinage de la paroi de l'ancre, le gradient hydraulique est : « $i = (P-P_1)/[(H+h)\gamma_w]$ » pour l'intérieur, et « $i = P_2/[H\gamma_w]$ » pour l'extérieur. Si on introduit les coefficients « $\alpha = (P-P_1)/P$ » et « $\alpha' = P_2/P$ » qui représentent les pertes relatives de pression à l'intérieur

et à l'extérieur de l'ancre, les gradients hydrauliques s'expriment en fonction de « P » :

$$i = \alpha P / [(H + h) \gamma_w]$$

$$i' = \alpha' P / (H \gamma_w)$$

La pression « P » se dissipe à travers le sol, d'une part à l'intérieur de l'ancre (α), d'autre part à l'extérieur de l'ancre (α') et enfin en bout de l'ancre $(P1-P2)/P$, ce qui s'exprime par la relation $1 = \alpha + \alpha' + (P1-P2)/P$.

• Le terme « $(P1-P2)/P$ » varie continûment avec H et il est aisé de voir que sa limite est zéro, lorsque H devient très grand. Lorsque « H » s'approche de zéro $(P1-P2)/P$ tend vers un. La courbe représentant $(P1-P2)/P = f$

$[(H + h)/D]$ est donc strictement décroissante de un à zéro. De même, le terme « $\alpha = (P-P1)/P$ » varie continûment avec « H » et la courbe « $\alpha = g [(H + h)/D]$ » croît strictement de zéro à un pour « H » variant de zéro à l'infini.

Les trois simulations numériques résumées dans le tableau V, ont permis de « caler » les fonctions f et g. Une expression ajustée sur l'intervalle qui nous intéresse, $[(H + h)/D$ compris entre 0,5 et 10], est donnée par :

$$\alpha = 0,5 \left(\frac{H + h}{D} \right)^{0,15}$$

$$\alpha + \alpha' = 1 - 0,25 \left(\frac{H + h}{D} \right)^{-1,5}$$

Tableau V

SIMULATIONS NUMERIQUES

TEST N°	1	2	3
D (m)	3,5	3,5	3,5
H (m)	3,5	7	14
H + h (m)	4,2	8,5	17,5
P (10 kPa)	100	100	100
P1 (10 kPa)	47,9	39,7	36,4
P2 (10 kPa)	29,2	32,2	36,4
α	0,521	0,602	0,636
α'	0,292	0,322	0,364

Remarque : Les variations de α et α' en fonction de « H » sont faibles (tableau V). En première approximation, on prendra α et α' constants avec : $\alpha = 0,55$ et $\alpha' = 0,33$

PRESSIONS NECESSAIRES AU MOUVEMENT DE L'ANCRE

Supposons que l'ancre soit enfoncée d'une certaine profondeur dans le sol. Si l'on désire alors, soit l'enfoncer davantage, soit la retirer, il faut que la force agissant sur l'ancre par l'action des pompes, compense les frottements qui existent entre le sol et l'ancre.

La force due à la différence de pression de l'eau entre l'intérieur et l'extérieur de l'ancre est : $F_p = \pi D^2 P / 4$.

Au voisinage de l'ancre, le sol est soumis, d'une part à son poids propre, d'autre part aux forces de percolation. Ces deux types de force contribuent au frottement sol-ancre :

Forces de frottement agissant sur la paroi de l'ancre dues aux forces gravitaires :

à l'intérieur, $F_{\tau i} = 0,5 \text{ tg} \delta K \gamma' D H^2 (1 + 1/a)^2$
à l'extérieur, $F_{\tau e} = 0,5 \text{ tg} \delta k \gamma' D H^2$

Forces de frottement agissant sur la paroi de l'ancre dues aux forces de percolation :

à l'intérieur, $F_i = 0,5 \text{ tg} \delta K \gamma_w i \pi D H^2 (1 + 1/a)^2$
à l'extérieur, $F_e = 0,5 \text{ tg} \delta K \gamma_w i' \pi D H^2$

Toutes ces forces, F_p , F_i , F_e , $F_{\tau i}$, $F_{\tau e}$, sont verticales. Elles sont, soit ascendantes, soit descendantes.

Lors de l'ancrage, les forces ascendantes sont : $F_{\tau i}$, $F_{\tau e}$, et F_e les forces descendantes sont : F_p et F_i . La condition d'enfoncement est :

$F_p > F_{\tau i} - F_i + F_{\tau e} + F_e$ soit,

$$\frac{P}{H \gamma_w} > \frac{2 \text{tg} \delta d'K [(1 + 1/a)^2 + 1]}{D/H - 2 \text{tg} \delta K [\alpha' - \alpha (1 + 1/a)]} \quad (1)$$

Lors de la récupération, les forces ascendantes sont : F_p et F_e ; les forces descendantes $F_{\tau i}$, $F_{\tau e}$, et F_i . La condition de récupération est :

$F_p > F_{\tau i} + F_i + F_{\tau e} - F_e$ soit,

$$\frac{P}{H \gamma_w} > \frac{2 \text{tg} \delta d'K [(1 + 1/a)^2 + 1]}{D/H - 2 \text{tg} \delta K [\alpha (1 + 1/a) - \alpha']} \quad (2)$$

On notera que le poids propre de l'ancre ainsi que l'effort de pointe ne sont pas pris en compte dans ce modèle.

REMARQUES :

— Pour un sol et une ancre donnés, les relations (1) et (2) permettent d'obtenir « $P/(H \gamma_w)$ » en fonction de « D/H ». Ces deux grandeurs sont sans dimension.

— La formule (2) fait apparaître une valeur critique du rapport « D/H » pour laquelle le rapport « $P/(H \gamma_w)$ » devient infini. Ce rapport est :

$$(D/H)_c = 2 \text{tg} \delta K [\alpha (1 + 1/a) - \alpha']$$

— Le terme « $2 \text{tg} \delta K [\alpha' - \alpha (1 + 1/a)]$ » est toujours négatif. Si bien, qu'il n'existe pas de rapport critique « $(D/H)_c$ » à l'enfoncement.

— En valeur absolue, la dépression nécessaire à l'enfoncement est toujours inférieure à la surpression nécessaire à l'arrachement.

— La pression « P » varie comme le carré de l'enfoncement « H ».

— Les pressions théoriques obtenues d'après ces relations, doivent être corrigées pour un projet en vraie grandeur, afin de prendre en compte le poids propre de l'ancre et l'effort de pointe.

4.2.2. Résultats expérimentaux

PHENOMENES OBSERVES AU COURS DE L'ENFONCEMENT ET DE LA RECUPERATION DE L'ANCRE

a) enfoncement de l'ancre

L'usage d'une ancre à succion suppose la possibilité d'enfoncer celle-ci. Deux cas de refus à l'enfoncement ont été observés :

— Si le sol sur lequel repose l'ancre n'est pas plan, un

courant d'eau de l'extérieur vers l'intérieur s'établit dans les creux, entraînant le sol et formant ainsi des « cratères ». la dépression interne ne peut se faire et l'enfoncement est impossible. Notons cependant, que sous l'action de son propre poids, une ancre en grandeur réelle s'enfonce d'une hauteur de l'ordre de 0,5 m. Si la plénitude du sol est telle que les côtes extrêmes n'ont pas plus de 0,5 m d'écart, l'enfoncement débutera sans problème.

— Si la perméabilité du sol est trop forte pour que les pompes puissent fournir une dépression « P » sous un débit « Q » (ce débit est de l'ordre de $Q = \pi D^2 ki/4$). Lorsque le sol est constitué de plusieurs couches de caractéristiques différentes, c'est la couche de plus faible perméabilité qui, une fois atteinte, règle le débit.

En écartant ces deux éventualités, l'enfoncement est toujours réalisable. Il s'accompagne de la formation d'une carotte de sol de hauteur « h » à l'intérieur de l'ancre au-dessus du fond marin. Ceci peut apparaître comme un handicap de ce système d'ancrage car cela entraîne un surdimensionnement de l'ancre : pour un enfoncement d'une hauteur « H », il faut que l'ancre ait une hauteur minimale de « H + h » (fig. 8). Notons cependant que lors d'ancrages in situ, il est possible d'évacuer l'excédent de sol constituant la carotte par différents moyens techniques.

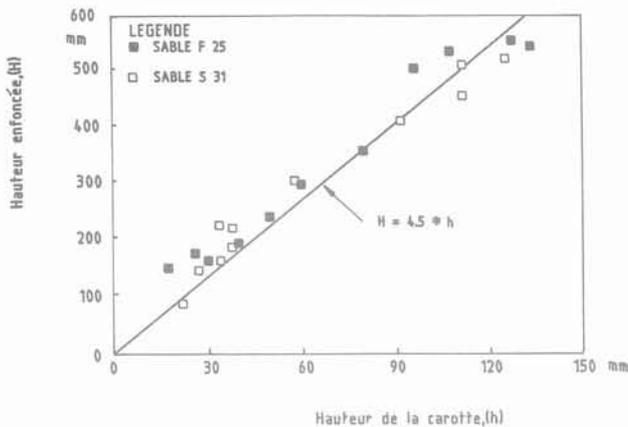


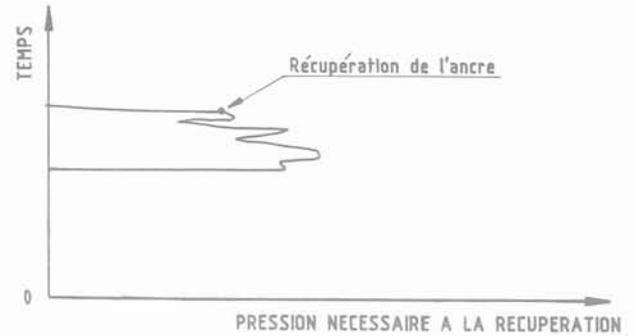
Fig. 8 — Relation entre la hauteur de la carotte (h) et la hauteur enfoncée (H).

b) Récupération de l'ancre

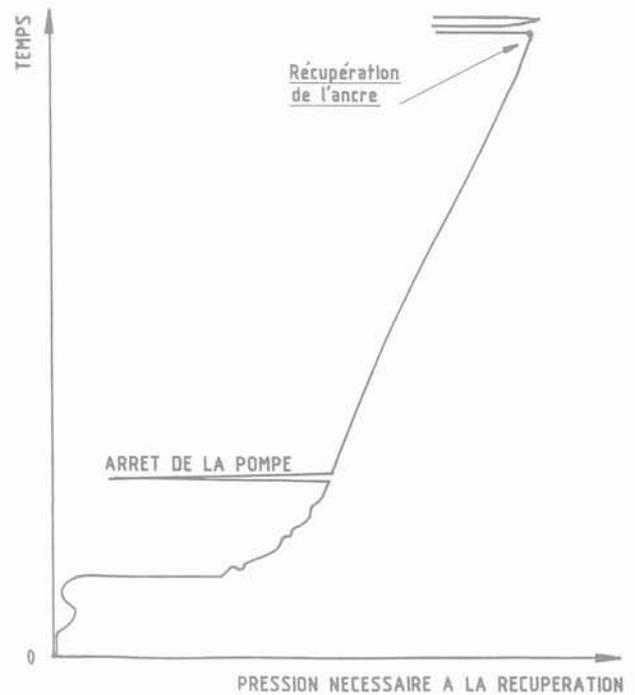
La récupération s'obtient par une montée en pression de l'eau enfermée dans l'ancre. Le mouvement de l'ancre est très différent suivant que la montée en pression est régulière ou brusque. Toutes choses étant par ailleurs égales, la surpression nécessaire à la libération de l'ancre est très inférieure avec une montée en pression brusque, à celle qu'il faudrait avec une montée en pression régulière (fig. 9).

Cette constatation permet d'établir une règle de mise en pression :

- les conduites doivent être parfaitement saturées ;
- l'ouverture des vannes doit être aussi rapide que possible.



a) MONTEE EN PRESSION BRUSQUE



b) MONTEE EN PRESSION CONTINUE

Fig. 9 — Influence de la montée en pression sur la récupération de l'ancre.

c) Comparaison des deux phases : enfoncement et récupération

Durant ces deux phases, le sol n'a pas le même comportement, en effet :

- la pression nécessaire, pour enfoncer une ancre d'une hauteur « H » est inférieure, en valeur absolue, à celle nécessaire à sa récupération ;
- à hauteur enfoncée égale, le débit que doivent fournir les pompes pour arracher l'ancre est supérieur à celui nécessaire pour l'enfoncer.

On remarquera, que bien qu'elle n'apparaisse pas dans le modèle théorique, la perméabilité est un paramètre du sol important à considérer. C'est en effet de la perméabilité du sol que dépend le débit minimum que doivent fournir les pompes.

L'EFFET D'ECHELLE D'APRES LES ESSAIS EXPERIMENTAUX

On peut constater sur la figure 10 que les résultats, relatifs à deux modèles homothétiques sont analogues. Ceci montre qu'il n'y a pas d'effet d'échelle entre les deux modèles considérés. On peut alors espérer qu'il n'y en aura pas non plus entre ces modèles et la vraie grandeur.

COMPARAISON ENTRE LES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET THEORIQUE

La figure 10 montre aussi sur un même graphe les résultats relatifs aux essais dans le sable S 31, et la courbe obtenue d'après le modèle théorique.

Les paramètres du modèle sont les suivants :

$$d' = 0,92$$

$$\delta = \phi - 10 = 24^\circ$$

$$a = 4,5$$

$$\alpha = 0,55 \text{ et } \alpha' = 0,33$$

$$K = 0,5$$

La courbe théorique permet de rester du côté de la sécurité. Le rapport critique théorique « $(D/H)_c$ » est égal à 0,15. Notons que l'application de la formule de Jaky donne $K = 0,44$, ce qui sous estime ce paramètre. Par contre, $K = 0,8$ (comme conseillé par l'API) est une valeur trop grande, car alors, le rapport critique « $(D/H)_c$ » est égal à 0,24.

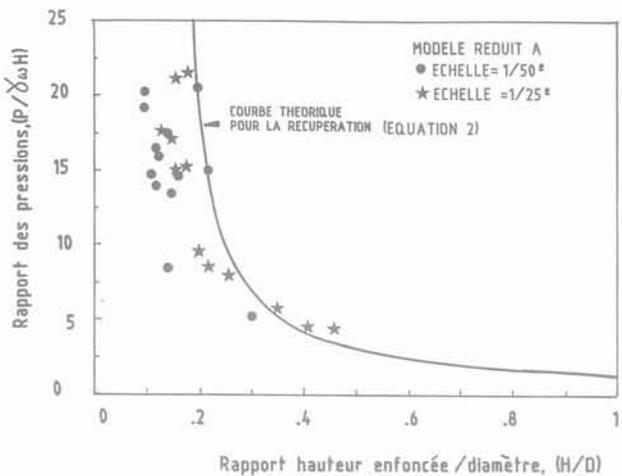


Fig. 10 — Comparaison des résultats expérimentaux obtenus sur le sable S-31 avec la courbe du modèle théorique.

4.3. Ancrage par succion dans un matériau purement cohérent

4.3.1. Modèle théorique

En ce qui concerne les ancrages dans un matériau purement cohérent, le modèle théorique repose sur deux hypothèses basées sur l'expérience :

- le sol remonte à l'intérieur de l'ancre, d'une hauteur « h » ;
- l'adhérence sol-ancre est prise égale, en première approximation, à la cohésion résiduelle du matériau : « C_r ».

On remarquera à nouveau que l'effort de pointe et le

pois propre de l'ancre ne sont pas pris en compte dans les modèles analysés.

Dans le cadre de ces hypothèses, le seul paramètre à considérer est la cohésion résiduelle « C_r ». Le modèle théorique est alors très simple.

La force provenant de l'action des pompes est toujours :

$$F_p = \pi D^2 P/4$$

L'adhérence entre le sol et l'ancre s'oppose au mouvement de cette dernière. Cette résistance se traduit par une force « F_c », égale au produit de la surface de contact sol-ancre, par la cohésion « C_r ». Il a été observé expérimentalement, que sous l'effet de la succion, la carotte de sol enfermée dans l'ancre se rétracte sur une hauteur au moins égale à « h » (fig. 11). Il se crée alors, dans l'espace ainsi libéré un film d'eau. En conséquence, l'adhérence ancre-carotte est négligée sur la hauteur h . La force de résistance « F_c » est donc :

$$F_c = 2\pi D H C_r$$

Nous supposons de plus, qu'entre le moment où l'ancre est mise en place, et celui où elle est récupérée les caractéristiques du sol et de l'interface, n'ont pas changé.

Ainsi il y a mouvement de l'ancre, ascendant ou descendant, si et seulement si F_p est supérieur à F_c soit :

$$P/C_r > 8H/D \quad (3)$$

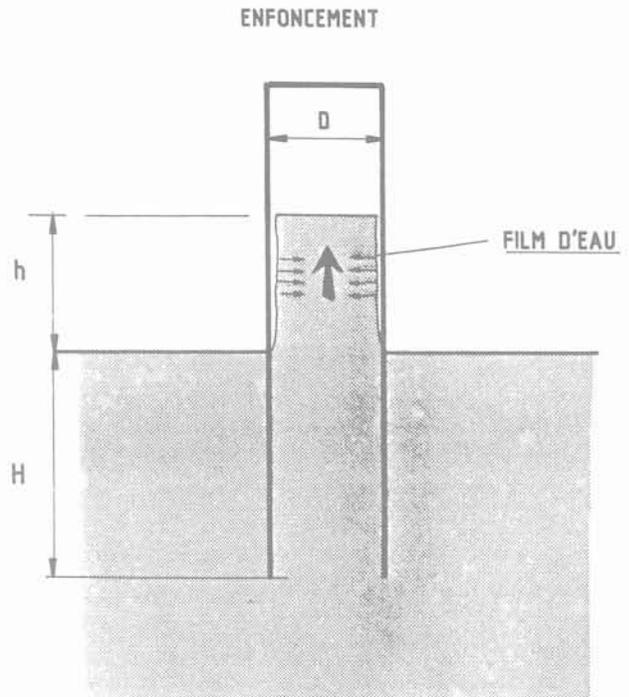


Fig. 11 — Effet de la succion sur la carotte dans le cas de sols cohérents.

4.3.2. Résultats expérimentaux

PHENOMENES OBSERVES AU COURS DE L'ENFONCEMENT ET DE LA RECUPERATION DE L'ANCRE

a) Enfouissement de l'ancre :

Comme pour les matériaux pulvérulents, chaque enfouissement d'une ancre s'accompagne d'une remontée de

sol à l'intérieur de celle-ci. La relation liant cette remontée « h » à la hauteur enfoncée « H » s'avère être constante. La figure 12 montre les résultats de neuf essais, réalisés avec trois ancres d'échelles différentes et trois types d'argile de cohésions différentes. La courbe représentant au mieux ces résultats a pour équation :

$$h/D = (H/D)^3/6 \quad (4)$$

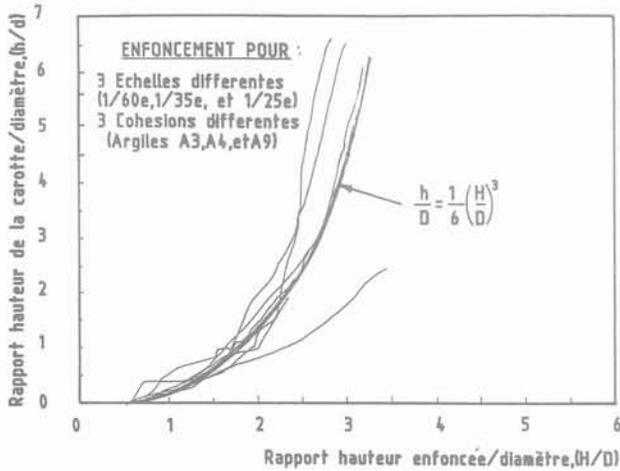


Fig. 12 — Relation entre le « rapport hauteur de la carotte sur diamètre » (h/D) et le rapport « enfoncement sur diamètre » (H/D).

Remarques :

— Les résultats expérimentaux obtenus tendent à montrer que la relation « h » en fonction de « H » est indépendante du sol.

— On a pu observer que si l'on maintient une dépression constante dans l'ancre, la hauteur de la carotte augmente alors que l'ancre ne s'enfonce plus. Ce phénomène de fluage doit être évité. C'est pourquoi, lors de la mise en place d'une ancre, si la succion doit être interrompue pour une raison quelconque, il faut immédiatement libérer l'arrivée des pompes, afin de ramener la pression à l'intérieur de l'ancre à la pression hydrostatique.

D'autre part si l'argile contenue dans l'ancre présente une discontinuité ou une faiblesse, la partie supérieure de la carotte se détache pour aller obturer l'orifice d'arrivée des pompes. l'enfoncement est alors stoppé.

Enfin, comme le montre la figure 13, la succion provoque le mouvement de tout un massif de sol, ce massif est limité en surface par un cercle. Il se sépare du reste du fond marin par rupture en traction.

b) Récupération de l'ancre

Deux points particuliers ont été observés au cours de la récupération.

— Lorsque la pression augmente à l'intérieur de l'ancre, la carotte commence à se tasser avant que l'ancre bouge. Ce tassement peut atteindre 20 à 30 % de la hauteur « h » de la carotte.

— Une fois l'ancre récupérée, il reste, sur le fond, une carotte de hauteur h' . Celle-ci peut représenter 60 à 70 % de la hauteur « h » maximale atteinte à l'enfoncement.

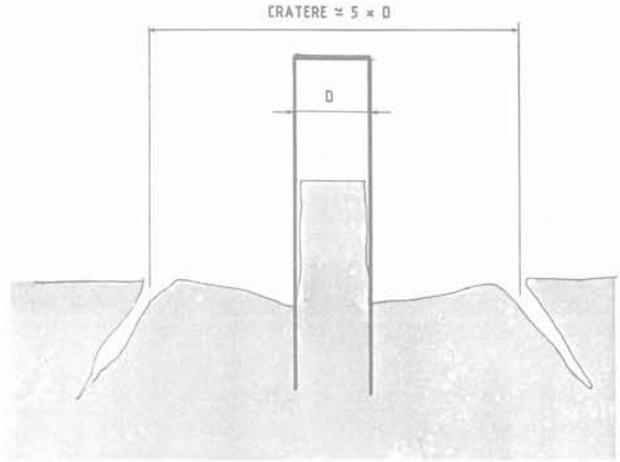


Fig. 13 — Rupture d'un massif de sol cohérent lors de la pénétration d'une ancre.

c) Comparaison des deux phases : enfoncement et récupération

Soit une ancre enfoncée d'une hauteur « H ». Contrairement à ce que l'on observe dans les sols pulvérulents, pour mettre l'ancre en mouvement, ascendant ou descendant, une même différence de pression est nécessaire dans le cas d'ancres à succion placées dans un massif d'argile (ce qui est conforme au modèle théorique).

On remarquera que les maquettes ayant une épaisseur très mince, l'effort de pointe n'apparaît pas dans les résultats. Il en est de même pour le poids de l'ancre.

COMPARAISON ENTRE LES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET THEORIQUES

Neuf essais distincts sont représentés sur la figure 14. Sur chacune des trois argiles : A3, A4 et A9, trois essais ont été effectués avec les échelles ; 1/60e, 1/35e et 1/25e. Sur la même figure, est représentée la courbe « $P/C_r = 8 H/D$ » correspondant au modèle théorique. On constate, une bonne concordance entre tous les résultats, ce qui valide le modèle proposé, quant à l'enfoncement. La remarque faite dans le paragraphe précédent permet aussi de valider le modèle pour la récupération.

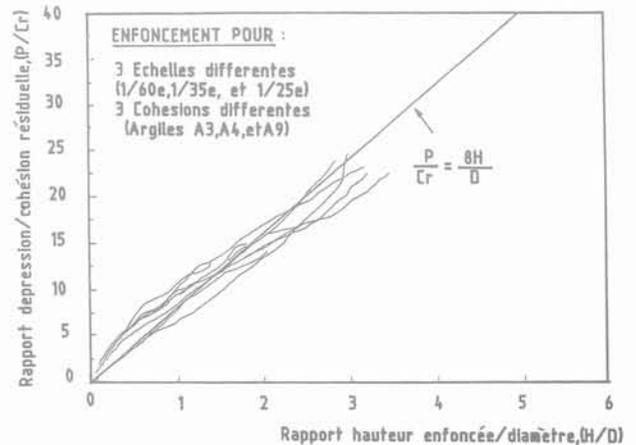


Fig. 14 — Comparaison des résultats obtenus pour neuf essais distincts (trois échelles et trois cohésions différentes) lors de l'enfoncement d'ancres dans des sols cohérents.

VERIFICATION EXPERIMENTALE DE LA SIMILITUDE

Tout en restant conscient que les expériences ont été menées sur des argiles de cohésion différentes mais de même ordre, de même pour les échelles des ancrs, la vérification de la similitude (fig. 12 et 14) doit être considérée comme satisfaisante ainsi que l'absence d'un effet d'échelle entre les différents modèles. Toutefois, des résultats d'essais sur des ancrs en vraie grandeur sont nécessaires pour compléter et confirmer cette étude. En effet, on a pu constater au cours d'essais en vraie grandeur que la remontée d'argile « h » observée in-situ est plus faible que celle observée en laboratoire.

4.4. Conclusion sur les essais en laboratoire

Les expériences réalisées à l'aide de modèles réduits ont permis l'observation et l'analyse d'un grand nombre de phénomènes. Conscient que la similitude n'a pas été respectée sur certains paramètres et que les dimensions des différentes ancrs employées étaient du même ordre de grandeur (de 1/60^e à 1/25^e), on peut, tirer les conclusions suivantes :

— Quelle que soit la nature du sol dans lequel s'effectue l'ancrage, ses caractéristiques mécaniques sont profondément modifiées au cours de la succion : la perméabilité d'un sable augmente, la cohésion d'une argile diminue.

— L'enfoncement d'une ancre à une profondeur « H » s'accompagne d'une remontée de sol d'une hauteur « h » à l'intérieur de celle-ci. Pour des matériaux pulvérulents, « h » est de l'ordre de « 0,25 H » ; pour des matériaux cohérents, la formule « $h/D = (H/D)^3/6$ » représente bien les résultats obtenus en laboratoire.

— La récupération d'une ancre enfoncée dans un sol cohérent est aisée. Le débit à fournir correspond simplement au déplacement de l'ancre.

La récupération d'une ancre enfoncée dans un sol pulvérulent nécessite certaines précautions :

— L'enfoncement de l'ancre ne doit pas être tel que le rapport « diamètre sur hauteur enfoncée » soit proche du rapport critique « $(D/H)_c$ ».

— Les pompes employées doivent être suffisamment puissantes, car il est possible que la perméabilité du sol à l'intérieur de l'ancre ait fortement augmenté du fait de la succion.

— La pression nécessaire à la récupération d'une ancre est :

- dans le cas d'ancrage dans un sable, supérieure à la pression nécessaire à l'enfoncement ;
- dans le cas d'ancrage dans une argile, du même ordre que la pression nécessaire à l'enfoncement.

— Enfin, lors de la récupération d'une ancre enfoncée dans un matériau pulvérulent, la montée en pression à l'intérieur de celle-ci doit être la plus brusque possible.

5. FUTURS DEVELOPPEMENTS ET CONCLUSION

Les chantiers expérimentaux ainsi que les divers sites utilisant des ancrs à succion ont permis de montrer que

cette technique d'ancrage pouvait être une bonne solution. Les études menées en laboratoire à l'ENTPE ont permis d'acquérir une meilleure connaissance des phénomènes mis en jeu lors de la pénétration et de la récupération des ancrs. Ceci devrait se traduire in situ par une plus grande sécurité d'action.

Comme les ancrs à succion peuvent reprendre aussi bien des efforts horizontaux que verticaux, leur champ d'application est très étendu. Une étude géotechnique des couches de sol traversées par l'ancre (perméabilité, densité, CPT, etc.) et l'utilisation de matériel adéquat (pompes et instrumentation) doivent assurer dans tous les cas d'utilisation, à la fois l'enfoncement et la récupération de l'ancre, et ce, quelle que soit la hauteur d'eau à l'endroit considéré. Ce dernier point constitue un atout considérable pour cette technique, notamment en comparaison avec des pieux classiques. Un autre avantage est le peu de matériel nécessaire à la mise en place, ce qui permet de réduire les coûts d'installation. A l'heure actuelle, les ancrs à succion sont employées pour l'ancrage permanent de bouées de type CALM (Catenary Anchor Leg Mooring), mais leur performance doit permettre leur utilisation pour l'amarrage de systèmes de production flottants ou d'autres types de SPM (Single Point Mooring). Récemment, des ancrs surmontées d'un joint tournant fluide ont été mises à l'étude, ce qui pourrait devenir une solution très économique par rapport aux bouées classiques.

La conception même des ancrs a été repensée de manière à les alléger, tout en conservant leur résistance. Ainsi des ancrs en matériaux mixtes : acier-béton, acier-résine, ont fait l'objet d'études (MONTAGUE et GOODE, 1979).

La technique d'ancrage par succion est amenée à se développer, non pas en concurrence avec d'autres systèmes, mais plutôt par complémentarité en introduisant sur le marché une possibilité d'ancrage en eaux profondes (300 mètres et plus).

ANNEXE

NOTATION UTILISEE

CARACTERISTIQUES DES ANCRS A SUCCION

D	Diamètre de l'ancre
L	Longueur de l'ancre
Ep	Epaisseur de l'ancre
p	Poids de l'ancre
h	Hauteur de la remontée du sol à l'intérieur de l'ancre
H	Hauteur de l'ancre enfoncée dans le sol
a	Rapport entre H et h.

PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES SOLS

γ'	Poids volumique du sol déjaugé
d'	Densité déjaugée du sol

ϕ	Angle de frottement interne des matériaux pulvérulents
C	Cohésion des matériaux cohérents (C_p , au pic ; C_r résiduelle)
e	Indice des vides
K	Coefficient de pression latérale des terres
δ	Angle de frottement ancre-sol
σ	Contrainte
i	Gradient hydraulique
k	Perméabilité.

PARAMETRES DE PRESSION

P	Surpression ou dépression par rapport à la pression hydrostatique à l'intérieur de l'ancre due à l'action des pompes
α	Perte relative de pression à l'intérieur de l'ancre
α'	Perte relative de pression à l'extérieur de l'ancre
P1	Pression interne au bas de l'ancre
P2	Pression externe au bas de l'ancre

BIBLIOGRAPHIE

1. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (1984), « *API Recommended practice for planning, designing, and constructing fixed offshore platforms* », 15^e édition, American Petroleum Institute, Washington, D.C., 22 octobre 1984, 115 pages.
2. CUCKSON J. (1981), « *The suction pile finds its place* », *Offshore Engineer*, avril 1981.
3. HOGERVORST J.R. (1980), « *Field trials with large diameter suction piles* », 12th Annual Offshore Technology Conference in Houston, Mai 5-8 1980, OTC n° 3817, pp. 217-220.
4. MONTAGUE P. et GOODE C.D. (1979), « *Some aspects of double-skin composite construction for subsea pressure chambers* ». Second International Conference on « *Behaviour of Offshore Structures* », Imperial College, London, 28-31 août 1979, Paper 76, pp. 415-424.
5. MAARI R. (1985), « *Single Point Moorings* », SBM Inc. publication, 334 pages.
6. PUECH A. (1983), « *La technique des ancrés dans l'exploitation pétrolière en mer* », Editions Technip, 185 pages.
7. SEMPERE D. & AUVERGNE G. (1982), « *Suction anchor piles, a proven alternative to driving and drilling* », 14th Annual Offshore Technology Conference in Houston, mai 3-6 1982, OTC n° 4206, pp. 483-494.

Remarque : Plusieurs notes internes, non publiées, et traitant des ancrés à succion sont disponibles à la bibliothèque de l'ENTPE.