

ESSAI EN PLACE A GRANDE PROFONDEUR A L'USINE HYDROELECTRIQUE SOUTERRAINE DE MATMATA (MAROC)**IN SITU TESTS AT GREAT DEPTH FOR THE UNDERGROUND MATMATA POWER PLANT (MOROCCO)****EL GHORFI Abdellatif***, **MAGNIN Maurice****, **KARPOFF Roman****, **LAKSHMANAN Jacques*****

Résumé

Une des variantes de l'aménagement hydroélectrique de Matmata présentait une usine souterraine devant être creusée dans des marnes miocènes, à près de 200 m de profondeur. Ces marnes étaient susceptibles d'être gonflantes. Des mesures en place ont été réalisées au pressiomètre Ménard pour la mesure des modules d'élasticité, et au Géocell pour la mesure des contraintes en place. Les mesures ont présenté des difficultés technologiques importantes du fait de la grande profondeur. Les modules obtenus sont très faibles à l'intérieur d'une lentille de marnes molles. Géologiquement, cette lentille s'expliquerait par des conditions de sédimentation rapide. Les mesures de pression de gonflement ont donné des valeurs hydrostatiques s'annulant ensuite en fonction du temps (prise d'une gangue de ciment autour de la sonde), les marnes de la lentille "molle" étant "prégonflées" et ne pouvant plus subir de gonflement.

Summary

One of the alternatives of the Matmata power scheme includes an underground power plant to be built in Miocene marls at 200 meters depth. These marls are known to swell. *In situ* tests were made with the Ménard pressiometer for deformability and with the Géocell for *in situ* stress measurement. Due to great depth, various technical difficulties were met. Inside a lense of soft clay, moduli were very low. Geologically, this lense may be due to a phenomenon of fast sedimentation. Swelling stress measurements first give values close to hydrostatic head, but then slowly decreased to zero, due to hardening of a cement shell around the sonde ; the clay itself being practically stress free, could no longer swell.

1. Aménagements hydroélectriques du Haut Sebou

La chute hydroélectrique de Matmata est un des éléments de l'aménagement dit du Haut Sebou qui fait lui-même partie de l'aménagement intégré de l'ensemble Sebou-Inaouène-Quergha, conçu pour la satisfaction des besoins en eau (principalement d'irrigation) et des besoins énergétiques.

La chute de Matmata, la plus en aval des chutes équipant le Haut Sebou, utilise la dénivellation de 200 m environ existant entre le cours du Sebou et celui de l'Inaouène, en dérivant l'eau de la retenue du barrage de Ait Youb sur le Sebou, vers une usine restituant l'eau dans la retenue du barrage Idriss 1er sur l'Inaouène (fig. 1).

2. Projet de l'Usine souterraine de Matmata

Le schéma initial d'équipement de la chute de Matmata comportait de l'amont vers l'aval : un ouvrage de prise d'eau dans la retenue du barrage d'Ait Youb suivi d'une longue galerie d'adduction à écoulement libre aboutissant sur le plateau de Matmata à un bassin de compensation suivi d'une adduction en charge de 160 m³/s alimentant une usine souterraine profonde de 240 MW, restituant l'eau à la retenue du barrage Idriss 1er par un ensemble cheminée d'équilibre et galerie de restitution en charge.

Ce schéma d'équipement n'a finalement pas été retenu et remplacé par un aménagement entièrement à l'air libre,

à la suite des reconnaissances dont les résultats sont développés dans ce qui suit. La position de l'usine souterraine et des sondages est représentée figure 2.

3. Cadre géologique

A l'aval du futur barrage d'Ait Youb, entre les oueds Sebou et Inaouène, s'étend un vaste plateau charpenté dans sa partie méridionale par des dolomies et quelques calcaires peu plissés mais souvent faillés datant du Jurassique inférieur ou Lias ; cette formation appartient au Grand Causse du Moyen Atlas. Au Nord, au-delà du col de Bir-Tamtam, le Lias est recouvert par des marnes transgressives à niveaux sablo-gréseux grossiers au sommet ; cet ensemble miocène et plus précisément Tortonien à la base, s'épaissit vers le Nord où sa puissance pourrait dépasser 500 m. Il est voilé par endroits par de minces sédiments quaternaires d'origine continentale.

Le secteur de Matmata étudié ici se trouve dans la région à remplissage miocène située entre le Moyen-Atlas et le Prérif charrié au Nord de l'Inaouène ; c'est le "couloir Sud-Rifain". Cette partie du Maroc a subi localement de nombreuses et violentes contraintes au cours de sa longue histoire depuis l'orogénèse hercynienne ; l'apparition d'une zone de sous-consolidation dans les marnes miocènes est peut-être un lointain écho, enregistré par les sédiments, des mouvements provoqués par les charriages qui défer-

* Chef du Service de l'Équipement Hydroélectrique à l'Office National de l'Électricité, Casablanca (Maroc)

** SAFEGE, NANTERRE (FRANCE)

*** Compagnie de Prospection Géophysique Française, Rueil-Malmaison (France)

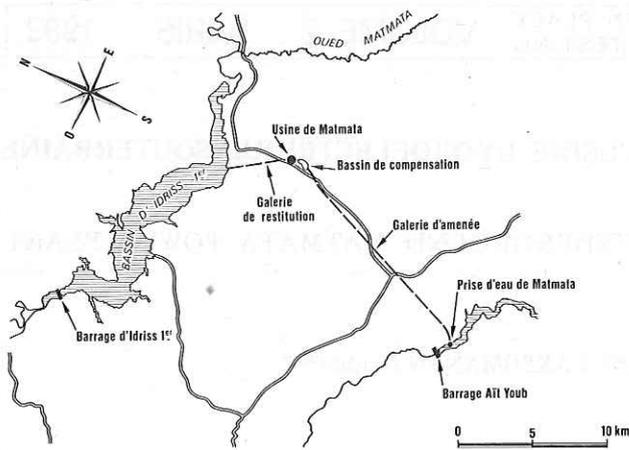


Fig. 1 : Plan de situation générale

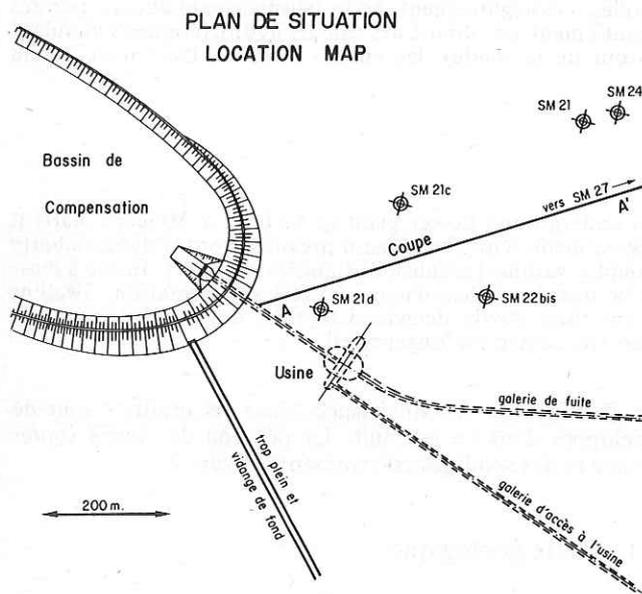


Fig. 2 : Plan d'implantation des sondages

laient à l'époque dans le Rif. Les marnes sous-consolidées semblent former des "poches" à contours irréguliers au milieu des marnes bleues silteuses ou gréseuses normales. Des venues d'eau en charge, issues du substratum jurassique profond, pourraient également avoir provoqué le phénomène ; leur montée a pu être facilitée par le rejeu récent, quaternaire, de certaines failles majeures observées sur le terrain.

4. Problèmes géotechniques à résoudre

L'usine projetée constituait une cavité de grandes dimensions, située à grande profondeur dans un terrain relevant de la mécanique des sols et non de la mécanique des roches.

Pour dimensionner l'ouvrage, il fallait donc connaître les caractéristiques mécaniques d'un milieu supposé homogène à l'échelle métrique. En premier lieu, le creusement de la cavité ne pouvait se faire qu'à l'abri d'un soutènement provisoire calculé d'après les valeurs des paramètres tels que cohésion, angle de frottement, modules de déformation.

Ensuite, le revêtement définitif devait être ajusté en fonction des valeurs des poussées à long terme au sein du terrain en place. C'est ainsi que la forme de cylindres emboîtés donnée à l'usine au stade de l'avant-projet présupposait une répartition quasi-hydrostatique, qui devait être confirmée.

Pour obtenir les données nécessaires au projet, un ensemble de moyens de reconnaissance a donc été mis en œuvre à partir de sondages carottés. Dans cet ensemble, les mesures *in situ* étaient d'importance primordiale, car il est très délicat d'obtenir des échantillons intacts de matériaux évolutifs tels que les marnes, soumis ici à grande profondeur à des pressions au repos avoisinant 1,5 MPa.

L'article cité en référence (Delarue 1953) avait permis de se fixer a priori certaines caractéristiques moyennes des marnes miocènes, mais seuls des essais *in situ* pouvaient fournir des résultats fiables dans le cas de matériaux à faible consistance.

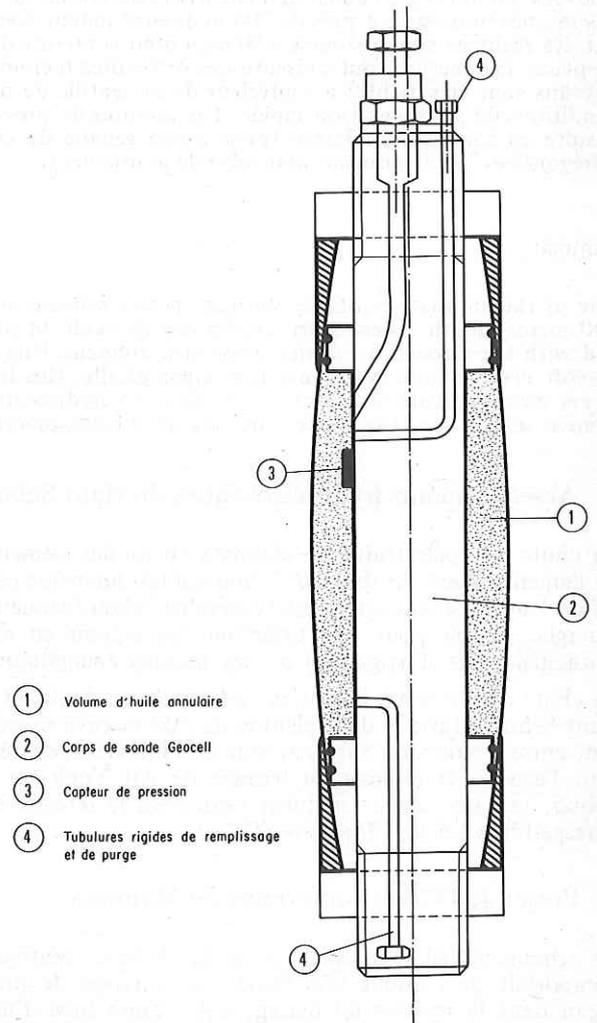


Fig. 3 : Coupe de la sonde de gonflement (Geocell modifié)

5. Campagne de mesures

5.1. Adaptation du matériel et de la technique de mesure

5.1.1. Mesures de déformabilité

Lors de quatre études précédentes, réalisées pour la Direction de l'Hydraulique sur les sites de barrage de Timi N'Outine, M'Dez, Sidi Dirss et Ait Chouarit, C.P.G.F. avait mis

en œuvre un appareil de haute précision, le dilatomètre-Médératec ϕ 95. Ici, du fait des grandes profondeurs à atteindre, et le risque de coincement des sondes par les marnes gonflantes, nous avons opté pour un matériel moins onéreux, le pressiomètre Ménard.

Le matériel mis en œuvre, mis à disposition par Intrafor Cofor, est l'appareillage Ménard type G n° 668 et les sondes NX longues ϕ 74.

Les diverses procédures étaient conformes aux normes établies par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (1971), avec en plus, des étalonnages à l'air libre et dans un tube métallique rigide avant chaque essai. Le respect scrupuleux de la méthodologie était ici un impératif.

Compte tenu de la grande profondeur des essais, atteignant 184 m, il s'est avéré nécessaire de modifier le mode de correction piézométrique habituel, en ajoutant progressivement la hauteur piézométrique séparant la sonde du manomètre de mesure. En effet, lorsque la sonde est descendue dégonflée dans le forage, la hauteur manométrique dans les tuyauteries est presque totalement compensée par la hauteur d'eau dans le forage. Par contre, lorsque la sonde est parfaitement plaquée à la paroi du forage, celle-ci subit la pression totale ; il faut donc ajouter à la lecture au manomètre p_0 , la pression totale Δp de la colonne d'eau. L'expérience montre qu'il faut ajouter totalement cette pression lorsque p_0 dépasse 4 bars environ.

Compte tenu de l'importance de l'ouvrage, chaque mesure a compris 4 cycles de chargement et de déchargement (en MPa) :

1er cycle : 0 - 0,05 - 0,01 - 0,15 - 0,2 - 0,375 - 0,5 - 0,375 - 0,25 - 0,15

2ème cycle : 0,25 - 0,5 - 0,75 - 1,0 - 0,9 - 0,75 - 0,5 - 0,25 - 0,15

3ème cycle : 0,25 - 0,5 - 0,75 - 1,0 - 1,25 - 1,5 - 1,75 - 2,0 - 1,8 - 1,5 - 1,0 - 0,5 - 0,25 - 0,15

4ème cycle : 0,25 - 0,5 - 1,0 - 1,5 - 2,0 - 2,5 - 3,0 - 3,5 - 4,0 - 3,8 - 3,5 - 3,0 - 2,0 - 1,0 - 0,5 - 0,25 - 0,15

Les mesures ont été effectuées à l'avancement du forage, afin d'éviter une dégradation du forage et d'avoir un sondage frais.

Le dépouillement a compris le calcul du module pressiométrique classique ou module de déformation, appelé ici Γ , avec en plus sa variation en fonction des cycles (Γ^1 à Γ^4). En outre, on a calculé le module d'élasticité réversible pour chaque cycle (E1 à E4), ainsi que la pression de fluage. Pour les modules d'élasticité réversible, la méthodologie de calcul s'est inspirée de celle mise au point pour le Médératec au Maroc (Dinia *et al.*, 1982). Enfin, à titre expérimental, on a tenté d'établir la courbe intrinsèque à partir de la courbe pressiométrique, à l'aide de la méthode de la sous-tangente (Baguelin *et al.*, 1972).

Suivant cette méthode, les contraintes principales sont données par :

$$\sigma_3 = (P - P_0)$$

$$\sigma_1 = (P - P_0) - 2 \frac{V_w}{V_0} (V_0 + V_w) \frac{\partial p}{\partial V_w}$$

V_0 étant le volume initial de la sonde, V_w la déformation volumétrique correspondant à la pression P .

P_0 est la pression horizontale des terres, et correspond au début de la partie linéaire de la courbe de chargement.

5.1.2. Matériel de mesures de gonflement

Les marnes dans lesquelles devrait être construite l'usine souterraine étaient réputées gonflantes ; il s'agit de tenter d'apprécier les pressions de gonflement, *in situ*, et non pas

seulement à l'aide d'essais en laboratoire. Après enquête sur les matériels existants, il s'est avéré qu'aucun ne convenait à ces mesures, notamment du fait de leur grande profondeur.

Il a alors été décidé de modifier la sonde Géocell NX de Ménard (diamètre 70 mm), afin d'y adjoindre un capteur de pression miniature et ses accessoires (fig. 3).

La chambre de mise en pression a été modifiée pour recevoir un capteur de pression, puis remplie d'huile ; les tuyauteries ont ensuite été scellées hermétiquement. Un passage étanche pour les câbles électriques a été aménagé, le seul lien avec la surface étant électrique. La mesure de pression se fait à l'aide d'une porteuse de 5 000 Hz. La chaîne comprend, outre une alimentation en 12 V, une démodulation, un amplificateur, un redresseur, puis la lecture se fait avec un voltmètre électronique.

Un premier capteur prototype a fait l'objet d'étalonnages complets en laboratoire en caisson sous pression. Puis, 6 autres capteurs ont été construits et testés. Les contrôles ont compris :

- Contrôle de pression : essai à 5 MPa pendant une semaine
- Essai d'endurance des divers composants du capteur
- Etalonnage en fonction de la pression : pour une température ambiante de 17°5, la réponse en tension est de la forme :

$$V = V_0 + ap \quad (V, V_0 \text{ en mV, } p \text{ en MPa})$$

Pour la sonde n° 1, par exemple :

$$V = 63 + 59 p$$

- Contrôle de la dérive thermique : pour des variations statiques (température stabilisée pendant 12 heures), cette variation est linéaire :

$$V = V_0 + ap + bt$$

Toujours pour le capteur 1, on a :

$$V = 63 + 59 p + 27 (t - 17,5) \\ t \text{ en degrés}$$

5.1.3. Conditions théoriques de la mesure de gonflement

Il était prévu de poser ces sondes en fond de forage, aussitôt après fin de foration. Les parties intéressées devaient être forées au carottier NXL en ϕ 76,2, puis après descente des sondes, celles-ci devaient être scellées avec un coulis dosé pour ressembler le plus possible au terrain ; enfin, une deuxième cimentation devait remplir le trou.

5.2. Mesures réalisées

5.2.1. Mesures de déformabilité

21 essais, répartis dans 6 sondages, ont été réalisés, comme indiqué tableau 1.

Tableau 1

Zone A	SM21	Puits de l'usine	60-61 m, 102-103 m, 150-151 m, 170-172 m, 179-180 m
	SM24	Cheminée d'équilibre	77-78 m, 130-331 m, 171,5-172,5 m, 183-184 m
Zone Galerie	SM27	Galerie de restitution	120-121 m, 140-141 m
Zone B	SM22b	Milieu de nef usine	138,5-139,5 m, 155-156 m
Zone C	SM21c	Puits de l'usine	72,6-73,6 m, 100-101 m, 152,5-153,5 m, 173-174 m
Zone D	SM21d	Puits de l'usine	78,8-79,8 m - 116-117 m - 157,8-158,8 m - 180,6-181,6 m

5.2.2. Mesures de gonflement

Il était prévu initialement la pose de 7 cellules de mesure de pression de gonflement. Compte tenu des résultats d'ensemble défavorables, il a été sursis à la suite, en l'attente de la comparaison de diverses variantes du projet. Les 3 essais effectivement réalisés se répartissent comme indiqué dans le tableau 2.

Tableau 2

	Date scellement	Profondeur	Coulis	N° sonde	N° d'essai
SM27	23-4-78	139-140m	$\frac{C}{E} = 0,9$ Bentonite 2% : 500 l Retardateur 0,5% : eau	3	G1
SM21c	01-6-78	170-171m	$\frac{C}{E} = 0,95$ Bentonite 6% : 500 l Retardateur 0,25% : eau	2	G2
SM1d	03-6-78	174-175m	$\frac{C}{E} = 0,95$ Bentonite 6% : 500 l Retardateur 0,25% : eau	4	G3

6. Résultats

6.1. Résultats des mesures de déformation

Les résultats du dépouillement figurent dans le tableau 3. Les numéros de couche correspondent aux entités géologiques suivantes qui présentent un pendage apparent vers le Nord, et qui se résume comme suit :

- (1) De 0 à 57 - 67 m : grès et marnes
- (2) De 57-57 m à 80-110 m : marnes compactes parfois craquelées

- (3) De 80-110 m à 140-175 m : marnes molles "chenillées" ou "boudinées"
- (4) De 140-175 m à 165-195 m : marnes sableuses et coquillères
- (5) De 165-195 m à 195-205 m : marnes boudinées.

Par rapport à ces limites géologiques, il apparaît qu'une lentille à caractéristiques géotechniques défavorables correspond à peu près à la couche (3) de marnes molles dont les carottes présentent généralement un aspect "boudiné" ou "chenillé" et où les quelques résultats d'essais de laboratoire présentent des valeurs très défavorables (densités descendant jusqu'à 1,50).

Les essais d'établissement de la courbe intrinsèque ont donné des résultats très encourageants comme le montre le tableau 4 où figure la comparaison avec la cohésion "Ménard" calculée à partir de la pression limite (pl). En suivant Ménard (1963), on a :

$$C = \frac{pl - po}{5}$$

po étant la pression hydrostatique (lorsque pl n'a pas été atteint, on a pris $pl = 1,38 pf$, 1,38 étant la valeur moyenne obtenue ici).

L'interprétation de la courbe intrinsèque permet de calculer ph, pression horizontale des terres, c et θ . On a porté dans le tableau 4, $q_0 = \frac{\gamma h}{10} = 0,18$, poids des terres, ainsi que le rapport po/qo.

On note une bonne concordance entre les cohésions "Ménard" et celles calculées à partir de la courbe intrinsèque. Les caractéristiques moyennes des terrains en présence sont représentées tableau 5, en distinguant les 8 essais défavorables situés à l'intérieur d'une lentille qui correspond en partie à la couche (3).

Les figures 4 et 5 représentent des exemples de courbes pressiométriques, l'une dans les marnes compactes, l'autre dans les marnes molles.

Tableau 3

Essai	N° sondage	Profondeur	Couche N°	E (MPa) (cycle à 3 MPa)	(MPa) (cycle à 3 MPa)	Pression de fluage (MPa)	Pression limite (MPa)
1	SM21	60 - 61	(1)	> 180	280	~ 3,5	
3	SM21	102 - 103	(2)	> 160	160	> 4,3	
4	SM21	150 - 151	(3)	< 210	11	2,7	3,1
5	SM21	170 - 171	(3)	< 92	< 21	1,7	2,8
6	SM21	179 - 180	(4)	< 80	< 36	2,2	2,8
2	SM24	77 - 78	(2)	~ 200	~ 300	> 4,6	
10	SM24	130 - 131	(3)	< 140	< 9	2,3	2,9
12	SM24	171,5 - 172,5	(3)	< 200	~ 80	2,5	3,8
13	SM24	183 - 184	(4)	210	65	> 5,7	
7	SM27	120 - 121	(4)	220	80	> 5,1	
8	SM27	140 - 141	(4)	250	96	> 5,3	
9	SM22bis	138,5 - 139,5	(3)	< 250	< 16	2,3	2,9
11	SM22bis	155 - 156	(4)	< 100	13	2,5	3,0
14	SM21C	72,6 - 73,6	(2)	< 380	< 250	> 4,6	
15	SM21C	100 - 101	(3)	< 150	< 43	~ 1,8	~ 3,2
17	SM21C	152,5 - 153,5	(4)	460	100	> 5,4	
19	SM21C	173 - 174	(4)	160	330	> 5,6	
16	SM21D	78,8 - 79,8	(2)	260	110	> 4,7	
18	SM21D	116 - 117	(3)	250	340	> 5,0	
20	SM21D	157,8 - 158,8	(4)	~ 190	~ 650	> 6,0	
21	SM21D	180,6 - 181,6	(5)	334	~ 1900	> 5,7	

Tableau 4

	Profondeur	po	qo	ph	ph/qo	C	ϕ	Cohésion Ménard
SM21	1	60,5	0,61	1,09	0,9	0,83	?	> 0,85
	3	102,5	1,03	1,85	1,35	0,73	?	> 1,00
	4	150,5	1,51	2,71	1,30	0,48	9°	0,32
	5	170,5	1,71	3,07	0,95	0,31	10°	0,22
	6	179,5	1,80	3,23	1,10	0,34	13°	0,20
SM24	2	77,5	0,78	1,40	1,10	0,79	?	> 1,10
	10	130,5	1,31	2,35	0	0,42	5°	0,32
	12	172	1,72	3,10	1,15	0,37	11°5	0,42
	13	183,5	1,84	3,30	1	0,30	13°	1,30 ?
SM27	7	120,5	1,21	2,17	0,80	0,37	19°	> 1,20
	8	140,5	1,41	2,52	1	0,40	17°	> 1,20
SM22bis	9	139	1,39	2,50	0	0,30	25°5	0,30
	11	155,6	1,56	2,80	0,80	0,29	21°	0,29
SM21C	14	73,1	0,73	1,32	1,10	0,84	?	> 1,10
	15	100,5	1,01	1,81	0,88	0,49	15°	0,44
	17	153	1,53	2,75	1,40	0,51	?	> 1,20
	19	173,5	1,74	3,12	1,50	0,48	?	> 1,20
SM21D	16	79,3	0,79	1,43	1	0,70	?	> 1,10
	18	116,5	1,17	2,10	1,40	0,67	?	> 1,10
	20	158,3	1,58	2,85	1,50	0,53	?	> 1,30
	21	181,1	1,81	3,26	1,60	0,49	?	> 1,20

po, qo, ph, C en MPa

Tableau 5

	8 essais défavorables	13 autres essais
Module d'élasticité E (MPa)	175	220
Module de déformation Γ (MPa)	18,5	250
Pression de fluage Pf (MPa)	2,3	> 5,1
Pression limite Pl (MPa)	2,95	> 7,0
Cohésion d'après pl (MPa)	0,31	> 1,20
Cohésion (MPa) d'après courbe ϕ intrinsèque	0,34 14°3	> 1,00 ?
Pression horizontale des terres ph (MPa)	0,92	1,10
Pression hydrostatique po (MPa)	1,53	1,21
Poids des terres qo (MPa)	2,75	2,17
ph/qo	0,33	0,51
ph/po	0,60	0,91

La figure 6, coupe d'interprétation, localise les marnes molles.

6.2. Résultats des mesures de gonflement

Les 3 essais réalisés ont montré une première stabilisation après 4 à 10 jours, comme le montre le tableau 6.

Ces chiffres semblent plausibles. En particulier, le rapport $\frac{\text{pression mesurée}}{\text{poids de terre}}$ est à rapprocher de celui obtenu lors des essais de déformation (0,54 au lieu de 0,51).

Cependant, après ces paliers, les pressions apparentes ont continué à baisser (avec une échelle des temps logarithmiques), les mesures étant poursuivies pendant 5 mois, sans aucune remontée due à un gonflement quelconque. A la fin de la période de mesures, la stabilisation semblait atteinte, mais avec des pressions apparentes voisines de zéro sur les 3 sondes.

Après contrôle et élimination des causes métrologiques (fuites, influence de la température, détérioration des câbles), il nous semble que l'explication de ce phénomène

Tableau 6

	Pression "hydrostatiques" du coulis	Pression naturelle d'après sondes de gonflement	Pression naturelle d'après interprétation des essais de déformation	Poids des terres
SM27 139-140m	1,68	1,2 à 1,5	1,0	2,51
SM21c 170-171m	2,02	1,6 à 2,0	1,5	3,07
SM21d 174-175m	2,06	1,3 à 1,4	1,6	3,14
Moyenne	1,89 MPa	1,50 MPa	1,37 MPa	2,91 MPa

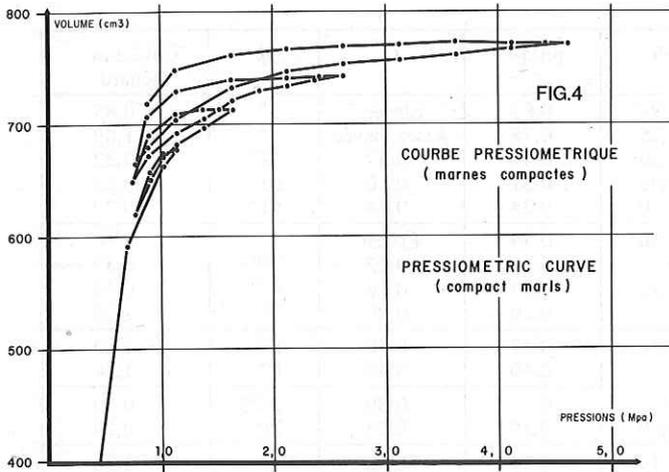


Fig. 4 : Courbe pressiométrique, marnes compactes

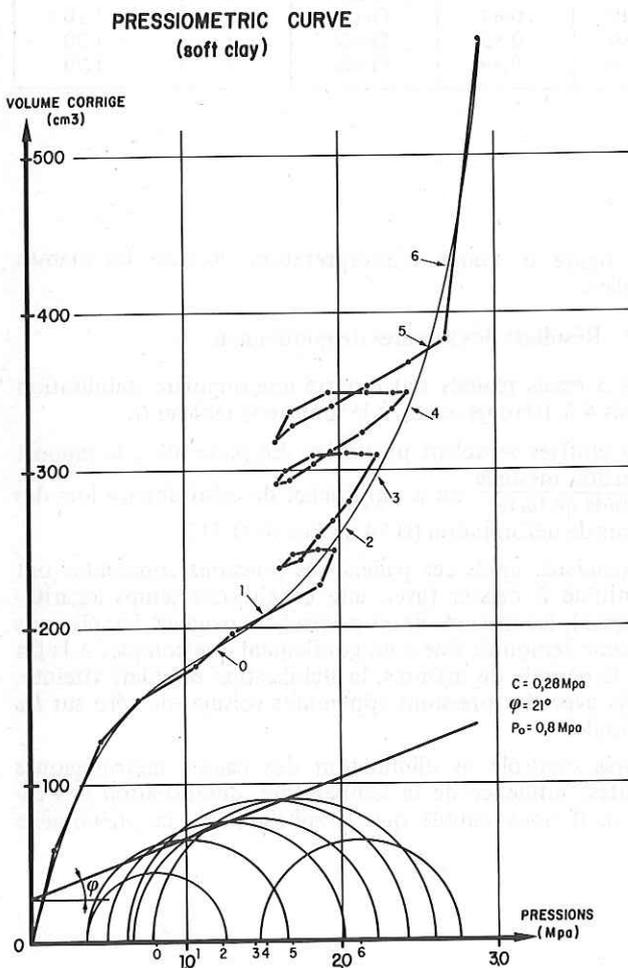


Fig. 5 : Courbe pressiométrique, marnes molles

doit être la suivante : nous avons pu contrôler, à l'aide d'un gabarit, que le diamètre des sections de mesure dépassait largement les 78 mm théoriques et devait être de plus de 90 ou 100 mm, phénomène inévitable dû au forage à grande profondeur dans des terrains mous. De plus, le coulis avait été dosé pour les marnes dures attendues comme devant

GEOLOGICAL CROSS SECTION

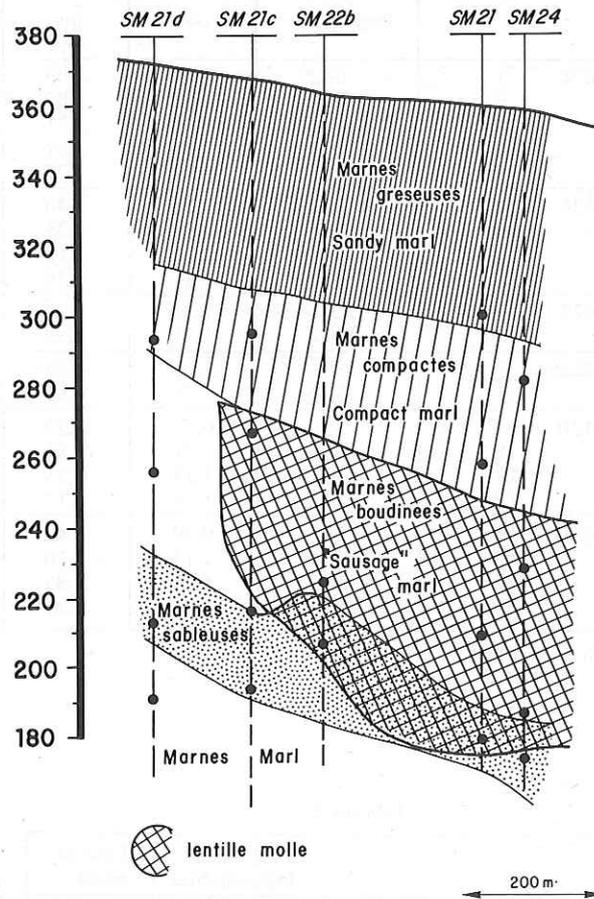


Fig. 6 : Coupe d'interprétation

être gonflantes. On a ainsi constitué une "coque" rigide autour des sondes, dont l'épaisseur était trop grande pour que les contraintes extérieures puissent la fissurer et permettre la transmission des contraintes.

Références

BAGUELIN F., JEZEQUEL J., LE MEE E. et LE MEHAUTE A., (1972) : Expansion de sondes cylindriques dans les sols cohérents, Bull. Liaison Lab. P. & C., Paris, n° 61.

BRONSTEIN M.I., MIKHEEV V.V., RUPPENIT L.V., LUSHNIKOV V.V., SHVETS V.B., (1973) : The pressurement method of investigating soil properties and its theoretical basis, 8ème Congrès de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondation, Moscou.

DELARUE J., MARIOTTI M.V., BERTHIER R.L., (1953) : Caractéristiques mécaniques des argiles préconsolidées marocaines, Congrès International de Mécanique des Sols, Zurich.

DINIA N., LONDE P., SALEMBIER M., SCHNEIDER B., HABERSTROH A., LEMOINE Y. et LAKSHMANAN J., (1982) : Méthodologie des essais au dilatomètre, application à quatre grands barrages marocains, Symposium International, Reconnaissance des sols et des roches par essais *in situ*, Paris.

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (1971) : Modes opératoires du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, essai pressiométrique normal, Dunod, Paris.

MENARD L. (1963) : Calcul de la force portante des fondations sur la base des essais pressiométriques : théorie, Sol Soils, n° 5.