



CONTRIBUTION A LA CARACTERISATION ET AU COMPORTEMENT MECANIQUE DE SOLS STRATIFIES D'UN SITE PORTUAIRE ESTUARIEN

M. Kismi ; G. Moulin

Laboratoire de Génie Civil ENSM Nantes - IUT Saint-Nazaire
B.P. 420 - 44606 Saint-Nazaire Cedex

ABSTRACT

In estuarine zones, portuary works need an indepth study of the fine sediments which are sometimes stratified. Such sediments are present in the Loire estuary particularly in the industrial zones of Montoir-de-Bretagne, which are built on ancient mud flats which have been filled with sand. These sediments are subjected to heavy charges due to the loads effects at the wharfs which produce failures of the underlying stratified sediments.

Maritime works done on the Loire estuary have provided us with a good knowledge of the underlying geology. The origin of the geological material lies in the overdigging of the rock riverbed during the Preflandrien regression and the infilling by recent sediments during the Flandrien transgression.

These sediments, locally called "Jalle" are made up of clays, about one centimeter of thickness, interbedded with very fine sands and silts, of millimeter thickness. This material is well known locally, on the one hand for its resistance to hydraulic dredging and on the other hand for its ambiguous response to geophysical studies. The physico-chemical characteristics of the mechanical behavior are studied by in-situ and laboratory experiments.

Inpite of the differences in structure due to its heterogeneity, this material behaves mechanically like a homogeneous clay.

1. INTRODUCTION

La création des zones industrielles et des zones d'activité économique portuaire sur les rives de l'estuaire de la Loire ont nécessité d'importants travaux de génie civil. Ces travaux d'aménagement ont conduit à des ruptures occasionnées sur les sols de fondation. Un tel constat impose pour les aménagements futurs une meilleure connaissance des propriétés géotechniques et mécaniques des sols stratifiés du site.

Tous les sondages, toutes les études ou travaux scientifiques concernant l'estuaire de la Loire mentionnent la présence d'une formation sédimentaire particulière appelée localement "Jalle". Ces sédiments désignent un complexe formé d'une alternance de passées argileuses, d'épaisseur centimétrique et de lits de sables très fins et de limons d'épaisseur millimétrique.

Les travaux d'aménagement nécessitent une bonne connaissance de la morphologie du substratum et de l'évolution du remplissage quaternaire. Des expérimentations *in-situ* et en laboratoire ont permis une identification géotechnique et mécanique de ces sédiments. Ainsi des sondages avec un carottier à piston stationnaire de 96 mm de diamètre et des essais *in-situ* au scissomètre de chantier et au pénétromètre dynamique ont été réalisés.

2. MORPHOLOGIE DU SUBSTRATUM ET EVOLUTION DU REMPLISSAGE SEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE DE LA LOIRE

Les travaux d'aménagement effectués sur l'estuaire de la Loire donnent une bonne connaissance de la géologie du paléolith de la Loire, et de l'évolution de son remplissage sédimentaire. La caractéristique essentielle de l'estuaire de la Loire est la grande profondeur du bed-rock, résultat du creusement lors de la dernière période glaciaire.

Comme le révèlent de nombreux sondages effectués dans la région (2000 sondages référencés par le B.R.G.M), la morphologie du substratum est très complexe. Celui-ci est constitué en grande partie de roches métamorphiques: micaschistes, gneiss, leptynites...

Les bancs redressés presque à la verticale ont généralement une orientation armoricaine (110 à 140° Nord). De nombreux filons de quartz et quelques massifs granitiques recoupent ces séries.

Le remplissage quaternaire de l'estuaire de la Loire est le résultat de phases successives de régressions et de transgressions dont les dernières datent de l'époque gallo-romaine.

Lors de la remontée du niveau de la mer, un remplissage sédimentaire (post-würmien) du lit s'est opéré. Il en est résulté une succession de sédiments constituée du bas vers le haut:

- de graviers et de galets du remplissage post-glaciaire (sans doute lors d'une période de régression),
- de sables gris à jaunes (sables inférieurs),
- de vases grises à noires à forte teneur en eau,
- d'un complexe de sables très fins et de vases dures appelé localement "Jalle". Ce faciès peut changer tant verticalement qu'horizontalement créant une structure feuilletée,
- de sables supérieurs appelés "sables de Loire",

- de vases molles, très compressibles âgées de quelques dizaines d'années au plus [DUPAIN :1982].

Cette succession sédimentaire apparaît nettement sur la coupe schématique présentée en figure 1.

Compte-tenu du relief tourmenté du paléolith, l'épaisseur des sédiments est très variable et atteint plus de 50 m à certains endroits.

Dans ce contexte, l'installation de stockage de pondéreux induit des tassements différentiels importants ainsi que des poinçonnements de la vase molle chargée par les remblais hydrauliques, comme le montre la figure 2 [DUPAIN:1982].

3. PROPRIETES GEOTECHNIQUES DES SEDIMENTS

3.1- Teneur en eau

Les sols concernés sont localisés dans une zone de 25 mètres de diamètre, au nord de la concavité de Montoir-de-Bretagne au lieu dit ; "Butte de Tir", sur la rive droite de l'embouchure de la Loire. Les sédiments sont essentiellement formés de "Jalle".

La figure 3 représente une coupe des sondages effectués. Sur cette même figure sont représentées les variations de la teneur en eau (47% à 110 %). Ces variations importantes de la teneur en eau indiquent des modifications rapides de la structure du sédiment. 40 mesures de teneurs en eau effectuées sur un échantillon intact de 15 cm de hauteur et de 9,6 cm de diamètre montrent des variations de teneur en eau de 65% à 100% (tableau I).

h = 15 cm

68	81	92	84	84
65	74	98	79	85
70	81	92	75	82
71	79	100	69	78
68	79	100	77	83
69	80	85	76	89
66	75	94	77	81
65	82	88	88	80

Tableau I : Variation de la teneur en eau dans un échantillon intact de sédiment.
 Profondeur de prélèvement : 6,00 m à 6,15 m
 Diamètre de carotte : 9,6 cm.

3.2- Limites d'Atterberg.

Les limites réalisées selon la méthode de Casagrande, montrent d'après la figure 3 que la teneur en eau naturelle W_0 (moyenne de 4 à 8 valeurs) est généralement inférieure ou égale à la limite de liquidité w_L .

Suivant le diagramme de plasticité de Casagrande (figure 4.a), les sédiments de Montoir-de-Bretagne se situent en-dessous de la "Ligne A". Ces matériaux se comportent donc comme des limons très plastiques avec traces de matières organiques.

Ces résultats ont été comparés (figure 4.b) à ceux obtenus pour des matériaux ayant le même mode de formation : Stocaloire [DUPAIN et al :1982] très proche du site étudié ; Pornic [MOULIN :1988]. Malgré la dispersion des points obtenus, on remarque une évolution comparable de l'indice de plasticité (I_p) en fonction de la limite de liquidité (w_L).

L'ensemble de ces résultats permet de définir un domaine limité par les relations:

$$I_p = 0,88 (w_L - 18) \text{ et } I_p = 0,62 (w_L - 36)$$

3.3- Analyse granulométrique et minéralogique.

Les résultats de l'analyse par sédimentométrie réalisée sur 54 échantillons sont présentés sur la figure 5.

Les deux familles de courbes granulométriques enveloppes représentées sur cette figure correspondent à la distinction des sédiments suivant un examen visuel. Ces matériaux se différencient uniquement par leur fraction grossière plus ou moins abondante confirmant en fait les caractéristiques macroscopiques directement observables.

Les diagrammes de diffraction X effectués sur la fraction argile ($C < 2 \mu\text{m}$) montrent (figure 6) que pour tous les échantillons (18), le cortège argileux reste identique quelle que soit la granulométrie.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau II.

Minéraux	% *	Moyenne %
Smictites (montmorillonite)	32,5 à 45	39
Illites	25 à 30	28
Kaolinites	17,5 à 25	23
Chlorites	traces à 5	1
Interstratifiés (10-14)(14c-14v)	2,5 à 15	9
* résultats à 5% près		

Tableau II : analyse aux rayons X de la fraction argile des sédiments de Montoir de Bretagne.

Des prélèvements de crème de vase effectués dans le bouchon vaseux au niveau de l'estuaire externe de la Loire avaient abouté à une répartition des minéraux présents tout à fait semblables [GALLENNE : 1974] (voir tableau III ci-après) :

Minéraux	%	Moyenne %
Montmorillonites	20 à 40	25
Illites	20 à 50	40
Kaolinites	20 à 35	25
Chlorites	5 à 15	10

Tableau III : résultats obtenus par Galenne [1974].

Dans les deux cas, on constate en effet la nette prédominance de la montmorillonite et de l'illite.

4. CARACTERISTIQUES MECANIKES DES SEDIMENTS

Trois types d'essais ont été réalisés sur le sédiment :

- Essais oedométriques sur des éprouvettes issues de carottes de 96 mm de diamètre.
- Essais au scissomètre (mesure in-situ et en laboratoire)
- Essais au pénétromètre dynamique.

4.1 Essais *in-situ*

4 essais au pénétromètre dynamique et 5 essais au scissomètre de chantier ont été réalisés.

Les résultats des essais in-situ Pd2 et Sc3 distants de 5 m l'un de l'autre, sont présentés sur la (figure 7).

Les deux graphes font apparaître un sol de surface de 0 à 1,50 m de profondeur, puis un matériau légèrement surconsolidé de 1,50 m à 2,80 m de profondeur. Ensuite pour les profondeurs supérieures à 2,80 m, la cohésion non drainée ainsi que la résistance de pointe évoluent linéairement. Les valeurs caractéristiques sont présentées dans le tableau IV.

profondeur (m)	cohésion c_u (kPa)	Résistance de pointe Rd * (kPa)
2,80	20	2000
12,00	40	5000
* Rd calculé suivant la formule des Hollandais.		

Tableau IV : valeurs caractéristiques de la cohésion
et de la résistance de pointe dynamique en fonction de la profondeur

4.2 Caractéristiques oedométriques.

4.2.1 - Indice des vides naturels $-e_0-$

Compte-tenu des variations rapides du faciès du matériau, les résultats oedométriques obtenus montrent une grande dispersion : en particulier, comme le montre la figure 8.a, l'indice des vides naturels (e_0) du matériau varie de 1,0 à 2,5 et ce, de façon aléatoire en fonction de la profondeur. Comme il a été indiqué précédemment, la teneur en eau sur une même éprouvette peut varier de 65% à 100% ; ainsi, l'indice des vides variera de même ($e_0 = 2,65 w_0$).

4.2.2 -Indices de gonflement et de compression

56 essais oedométriques ont été réalisés. Bien que la dispersion des résultats obtenus soit importante, il est à noter une augmentation sensible de C_s et de C_c avec la profondeur (figures 8.b et 8.c).

Des relations moyennes ont été obtenues pour les échantillons prélevés entre 2 m et 8 m de profondeur :

$$C_s = 0,063 + 0,006 (Z-2) \quad \text{et} \quad C_c = 0,83 + 0,15 (Z-2)$$

avec Z exprimée en mètres

Comme pour les valeurs de e_0 , les variations de C_s et de C_c pour des variations de profondeur de quelques centimètres sont importantes, au voisinage de 6 m de profondeur.

$$0,05 \leq C_s \leq 1,25$$

$$\text{et} \quad 0,9 \leq C_c \leq 1,90$$

Les variations rapides des caractéristiques oedométriques du matériau sont parfaitement mises en évidence par les courbes oedométriques de la

(figure 9) obtenues à partir d'éprouvettes issues de la même carotte pour une profondeur variant de 5,55 m à 5,85 m. Les indices des vides initiaux (e_i) varient de 1,92 à 2,63 ; parallèlement, les indices de compression s'échelonnent entre 1,19 et 1,69 et les indices de gonflement entre 0,07 et 0,12.

Nous avons ainsi mis en évidence la relation suivante à l'aide des 56 essais réalisés.

$$\frac{C_c}{1+e_0} = 0,755 \frac{w_0}{100} - 0,07$$

$$\text{avec } w_0 = 9,81 (e_0 / 26)$$

Nos résultats vont dans le sens de ceux obtenus par MOULIN : 1988, qui avait établi la relation suivante concernant l'argile de Pornic (Sud-Loire) :

$$\frac{C_c}{1+e_0} = 0,405 \frac{w_0}{100} - 0,025$$

La confrontation des travaux de MOULIN et de nos résultats nous amène à dégager une plus grande compressibilité de l'argile de Montoir-de-Bretagne.

Malgré une dispersion des indices des vides et de compression liée au caractère feuilleté et hétérogène du matériau étudié, ce dernier se comporte comme une argile naturelle homogène.

5. CONCLUSION

Dans cette région estuarienne, caractérisée par la continuité des faciès, les sédiments argileux présentent une hétérogénéité de structure qui est à l'origine d'une grande variabilité des caractéristiques géotechniques et géomécaniques.

Les variations horizontales et verticales du faciès qui sont engendrées par la configuration du paléolith affectent en particulier le comportement oedométrique du sédiment.

REFERENCES

- DUPAIN R. (1982). *Liaisons entre les travaux d'aménagement et la géotechnique dans l'estuaire de la Loire : la concavité de Montoir*. Thèse de Doctorat Université de Nantes, 197 p.
- KISMI M. (1986). *Etude et caractérisation de sédiments estuariens proches de la concavité de Montoir*. D.E.A E.N.S.M Nantes, 136 p.

KISMI M. , DUPAIN R. (1987). *Un sédiment fin de l'estuaire de la Loire : "Jalle" nature et origine sédimentologique*. 3èmes Journées Universitaires de Géotechnique St-Nazaire, pp.73-82.

LEROUEIL S. (1977). *Quelques considérations sur le comportement des argiles sensibles*. Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec.

LEROUEIL S. , TAVENAS F. , LE BIHAN J.P. (1983). Propriétés caractéristiques des argiles du l'Est de CANADA. *Can.Géotech. J.* 20. pp 681-705.

MOULIN G. (1988). *Etat limite d'une argile naturelle : l'argile de Pornic*. Thèse de Doctorat Génie civil E.N.S.M Université de Nantes, 121 p.

MOULIN G., KISMI M., DUPAIN R., THOMAS P. *Caractérisation et lois de comportement des sols stratifiés d'un site portuaire estuarien*. 6ème Congrès Int. de Géologie de l'ingénieur. Amsterdam. 6-10 Août 1990. Balkema Ed., pp. 2907-2912.

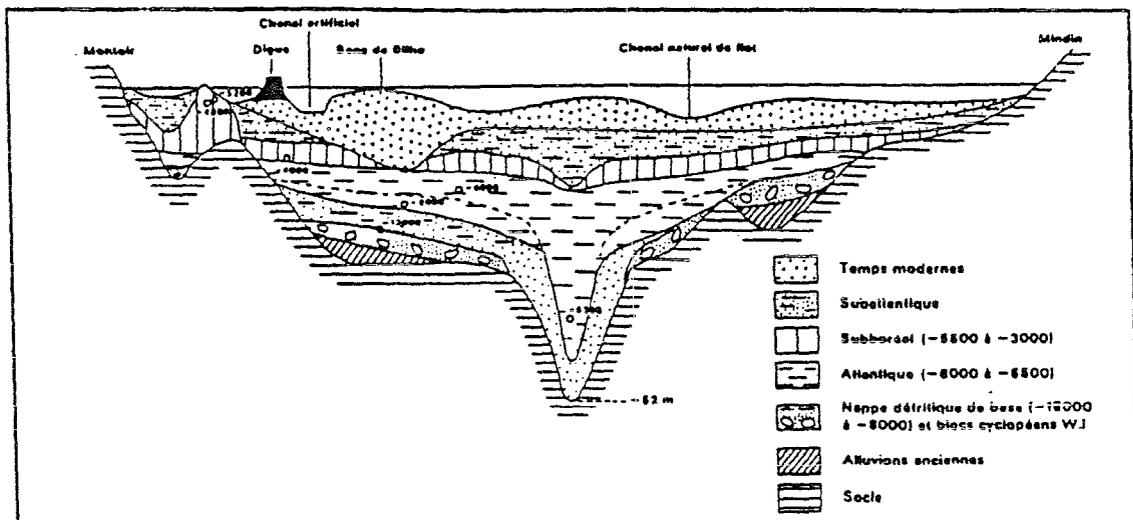


Fig. 1 : coupe schématique du remplissage de la Loire en fonction de l'âge des terrain (Datations ^{14}C , d'ap. Barbaroux et al. 1980)



Fig. 2 : rupture observée (Dupain, 1982)

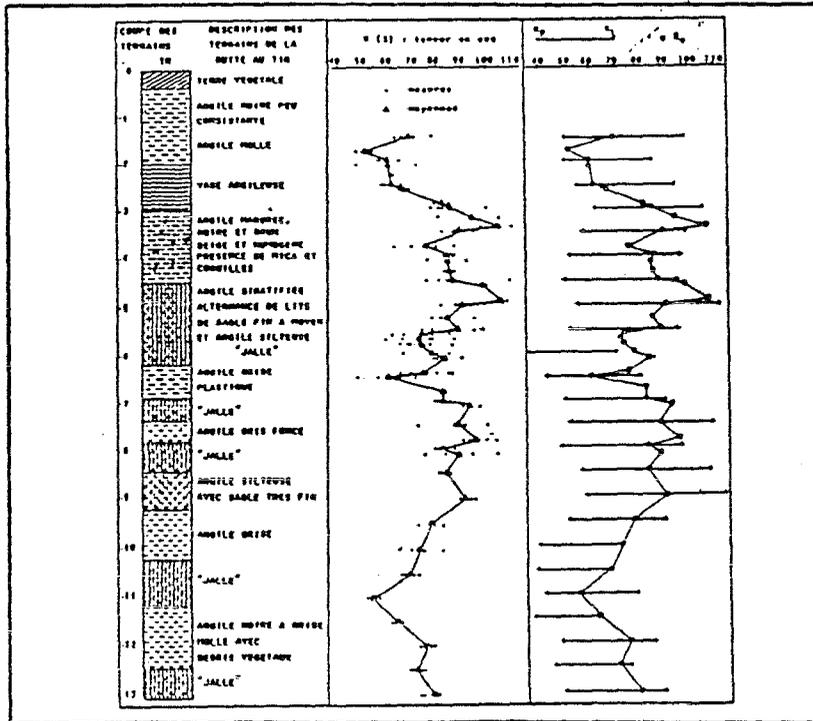


Fig. 3 : coupes des sondages effectués, variations de la teneur en eau et limites d'Atterberg.

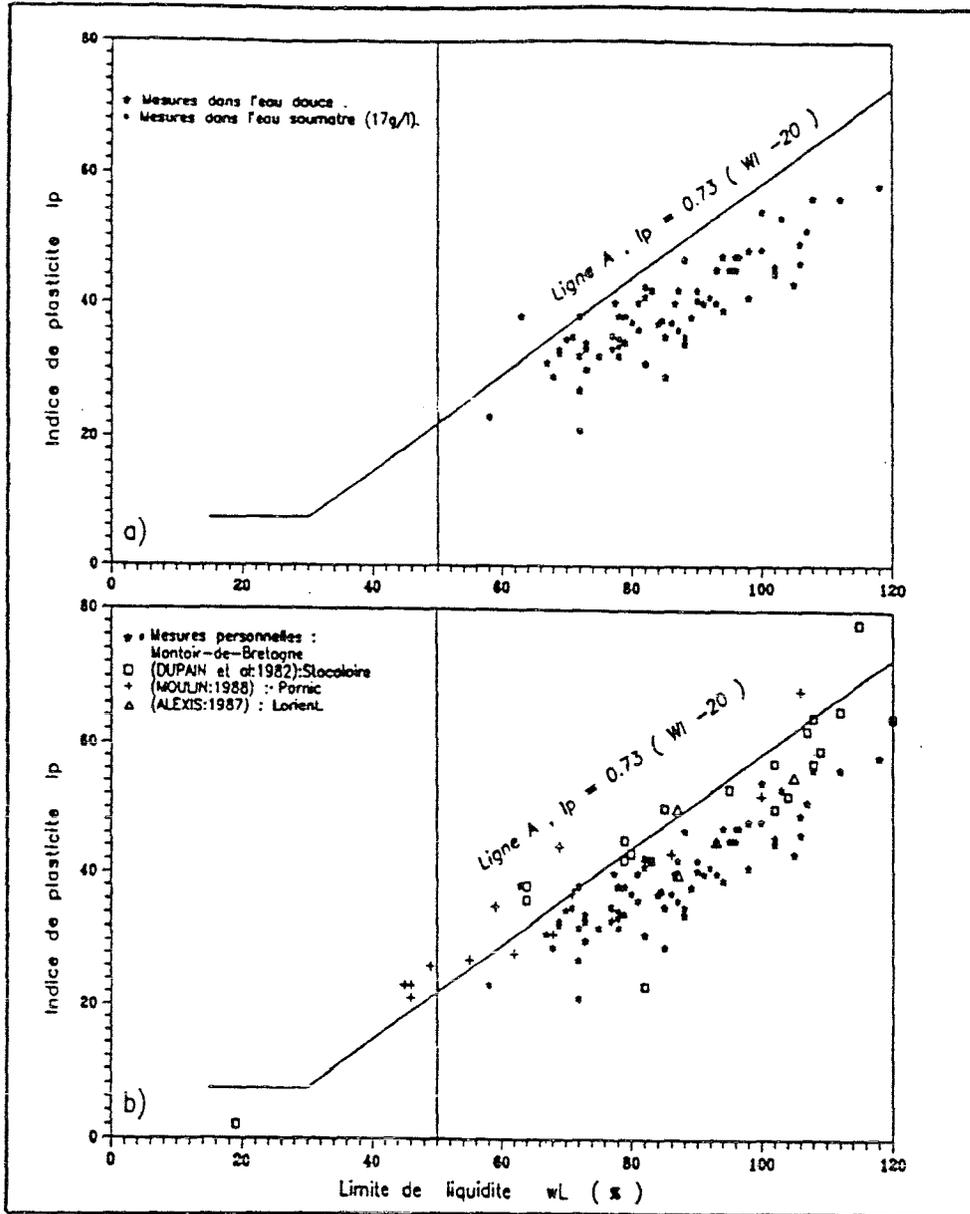


Fig. 4 : relation entre la limite de liquidité w_L et l'indice de plasticité I_p

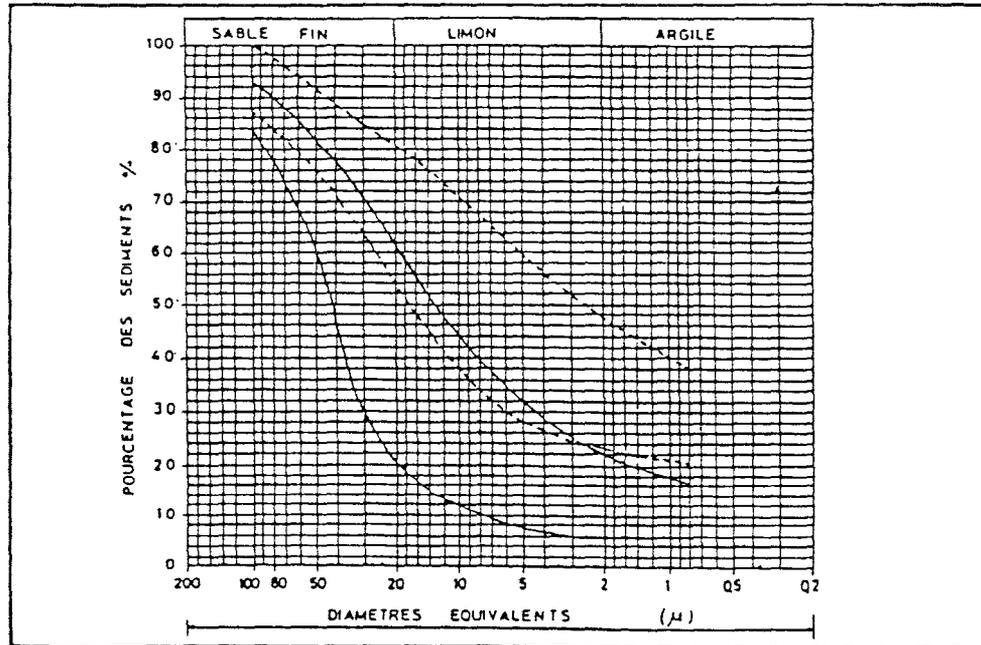


Fig. 5 : courbes enveloppes des sédiments.

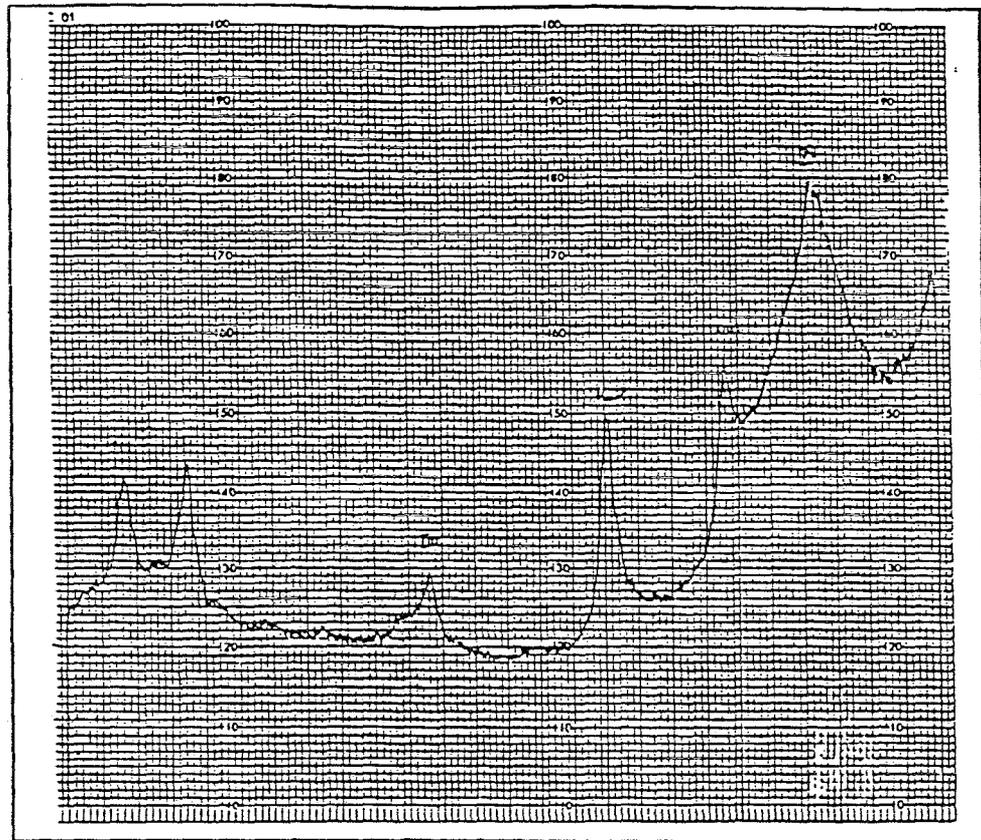


Fig. 6 : exemple de diffractogramme obtenu. [- - - : argile ; — : 'Jalle']

SESSION IV

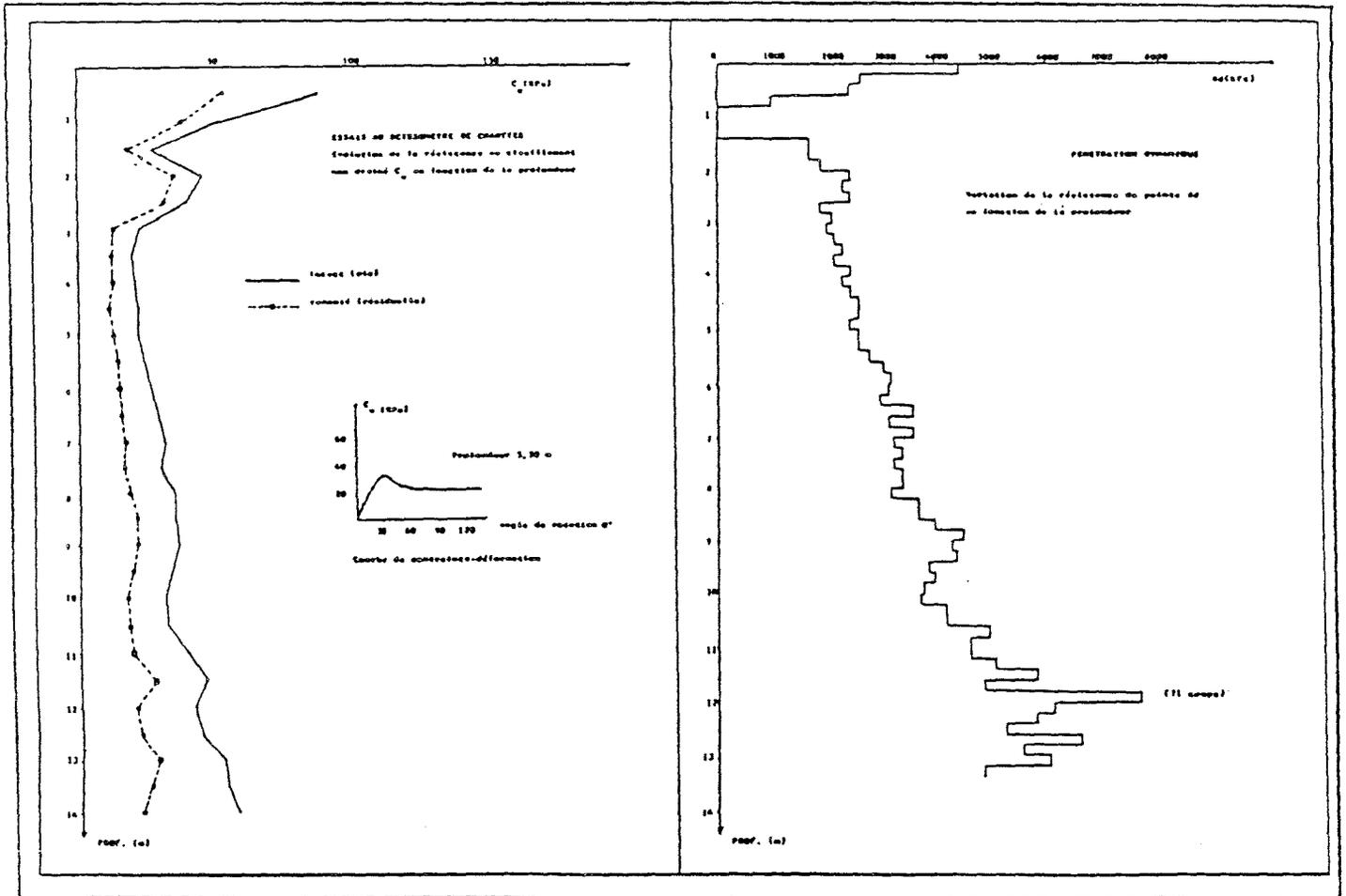


Fig. 7 : essais *in situ*
 scissomètre : mesure de la résistance au cisaillement non drainé.
 pénétromètre : indication sur la résistance du sol à la suite d'un battage.

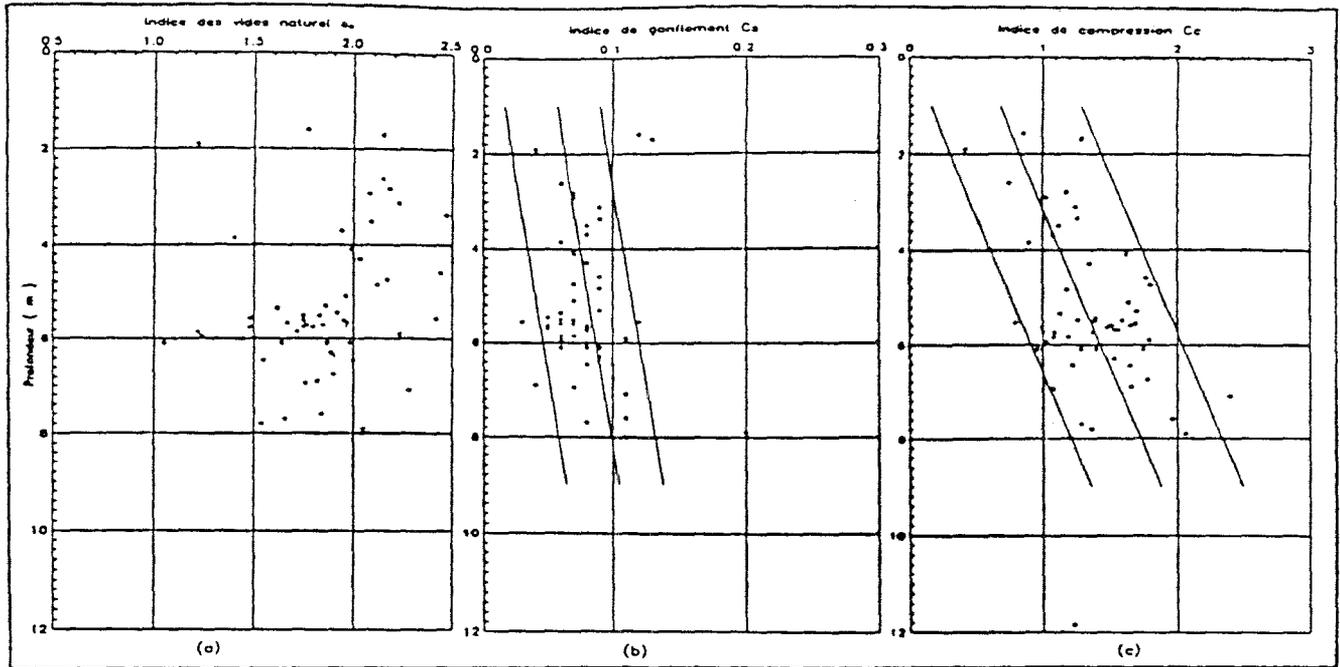


Fig. 8 : caractéristiques œdométriques en fonction de la profondeur

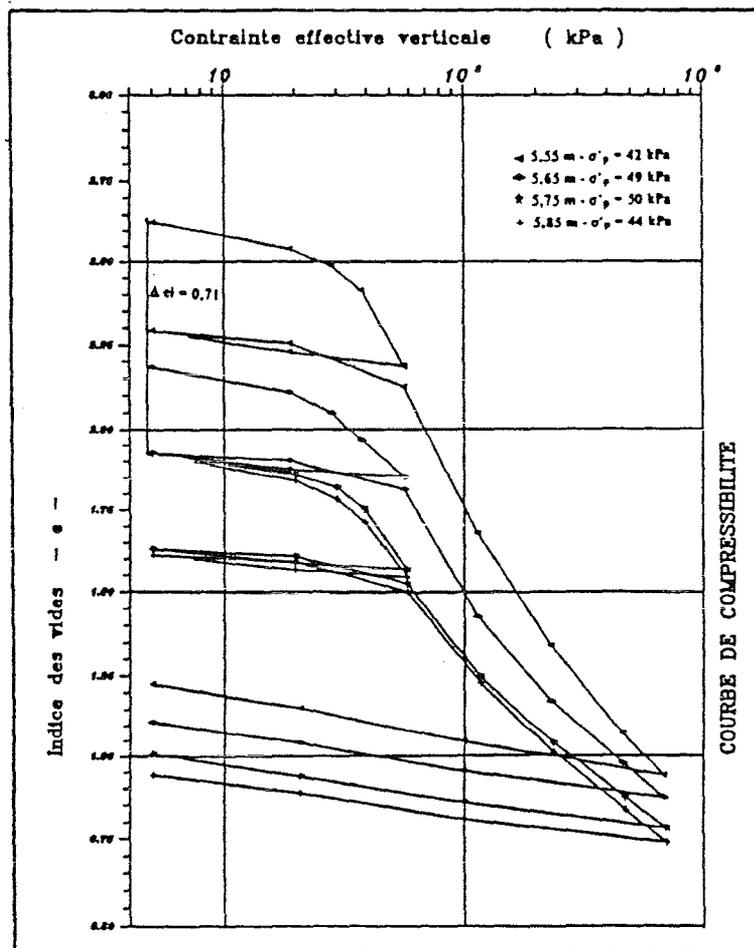


Fig. 9 : courbes œdométriques de 5,55 à 5,85 mètres de profondeur