

CARACTERISATION DES FORMATIONS ARGILEUSES. Cas de Constantine

Reçu le 12/07/2004 – Accepté le 31/12/2004

Résumé

La connaissance du comportement des sols doit être prise en compte lors de l'établissement de tout projet de construction. Dans cette optique, des études de sols argileux, provenant de sites différents, a permis de mettre en évidence, à partir d'essais et d'analyses de laboratoire, les principales caractéristiques physique, mécanique et minéralogique de la formation argileuse du Mio-pliocène de Constantine. Les résultats de la présente étude constituent une base de données géotechniques utilisable pour le calcul des fondations et des ouvrages en terre.

Mots clés: Argile, compressibilité, comportement, géotechnique, identification, cisaillement, surconsolidation, Diffraction des rayons X.

Abstract

For any construction project, the behavior of soil is essential and has to be established at the beginning. For this, some laboratory tests have been undertaken on the Mio-Pliocene coherent soil of the Constantine region. The testing program included the characterization of soil, the mechanical behavior and the mineralogical composition.

The results of present study is a part of database information, which will help practical engineers to design different foundations and retaining structures.

Keywords: Clay, consolidation, behavior, geotechnique, identification, shear, overconsolidation, X-ray diffraction.

**N. CHIKHI
H. HOUARI**

Laboratoire Matériaux
et Durabilité des Constructions
Département de Génie Civil
Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Université Mentouri Constantine

ملخص

يؤخذ سلوك التربة بعين الاعتبار عند وضع مشروع البناء. وفي هذا المنظار للدراسات التربة الطينية المنتمية لعدة مناطق مختلفة مكننت بشكل واضح من خلال التجارب والتحليل المخبرية إبراز أهم المميزات الرئيسية: الفيزيائية، الميكانيكية وعلم المعادن للتكوين الطيني للميوليبوسان لمدينة قسنطينة. والنتائج المحصل من هذه الدراسة تشكل قاعدة للمعطيات الجيوتقنية المستعملة في إطار حسابات أساسيات ومنشآت التربة.

الكلمات المفتاحية: الطين، قابلية الضغط، سلوك، الجيوتقنية، التعريف، زائد المتن، القص، حيود أشعة X.

L'étude des propriétés physique et chimique, et la détermination des caractéristiques mécaniques et de déformation, sont nécessaires pour l'établissement d'un projet de construction. Elles sont aussi indispensables que le calcul de la structure de l'ouvrage. L'examen géologique du sol est intéressant car il apporte des éléments d'information qualitatifs sur l'histoire du sol étudié et sa composition, mais il est insuffisant pour l'étude d'un projet de construction, car il ne fournit pas les données nécessaires au calcul géotechnique. Les problèmes de fondation souvent rencontrés, comme le tassement différentiel, l'effondrement, le gonflement ou le poinçonnement du sol, proviennent en grande partie de la méconnaissance de l'importance de l'étude géotechnique. Dans certains projets de construction, le souci d'économie pousse le projeteur à négliger l'étude géotechnique ou à minimiser les moyens de reconnaissance du sol. Or, les accidents survenant au cours de la construction ou lors de l'exploitation de l'ouvrage sont beaucoup plus coûteux qu'une étude géotechnique courante.

Constantine souffre depuis des décennies de graves problèmes de glissements de terrain. Ces glissements mettent en action des matériaux sédimentaires continentaux hétérogènes de l'âge Mio-pliocène. Des argiles marneuses dont certaines sont excessivement plastiques, forment des zones irrégulières dans des séquences et aussi la matrice de conglomérat massif contenu dans les sédiments. Les surfaces de glissements de certains de ces mouvements de terrain se situent dans les marnes argileuses. C'est ce type d'argile qui a fait l'objet de notre investigation [1].

Pour mener à bien notre recherche, on s'est référé aux différents travaux qui ont touché le problème de glissement et qui ont fait l'objet de nombreuses études dans l'agglomération de Constantine [2-7].

L'objectif de notre étude est donc:

- de fournir les bases expérimentales de l'étude du comportement à court et long terme des ouvrages fondés sur ce type de sol.

- Etablir une évaluation raisonnable d'un secteur en se basant sur une investigation complète des lieux. Ce genre de recherche exige une analyse des conditions de sol et de la nappe aquifère, associée à une étude de la géologie locale.

- Effectuer une cartographie géotechnique de l'ensemble des zones argileuses. Ce qui faciliterait le travail du projecteur dont la première tâche est la recherche du meilleur site avant d'entamer les études d'avant projet. Ce choix initial a une importance accrue dans les problèmes d'aménagement et d'urbanisme.

1- CONTEXTE GEOLOGIQUE

La ville de Constantine, avec sa morphologie exceptionnellement accidentée, se trouve dans la zone nord de l'Atlas Tellien. La géologie de la zone se présente extrêmement compliquée à cause d'une structure tectonique dominée par des nappes. Il existe une grande variété de formations de roches constituées entièrement des couches sédimentaires. L'âge des dépôts se situe entre le Crétacé et le Récent. Brièvement, du point de vue de la géologie de l'ingénieur, il s'agit des formations importantes suivantes :

La série commence avec les calcaires massifs du Rocher de Constantine Cénomaniens à Turonien sur lesquels les vieux quartiers de la ville étaient construits (A) (Fig. 1). Au-dessus de ces calcaires, se trouve une série des marnes noires à allure schisteuse d'âge Campanien (B). C'est dans ces marnes que le glissement de terrain s'est développé et qui est à l'origine des graves problèmes de la culée orientale du pont de Sidi Rached. Plus tard, après les mouvements orogéniques alpines, une puissante série de couches continentales était déposée. Il s'agit d'une alternance des conglomérats et des argiles sableuses rouges du Mio-Pliocène (C à E). Il est bien connu que c'est cette formation qui est la plus sensible aux instabilités des pentes et aux glissements de terrain de Constantine [8-10].

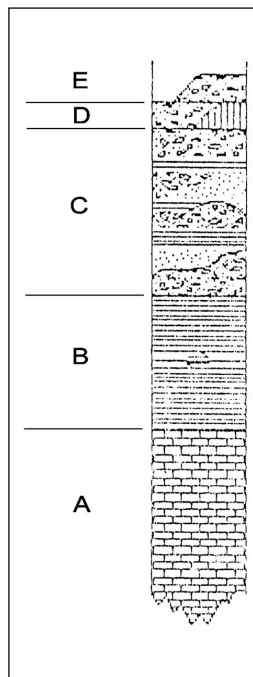


Figure 1: Série géologique de Constantine.

2- CARACTERISATION DES SOLS ETUDIES

Des échantillons ont été prélevés de différentes zones des formations argileuses du Mio pliocène de Constantine que nous caractériserons séparément d'un point de vue minéralogique et géotechnique. Ces zones sont : Bellevue, Ain el Bey et Boussouf (Fig. 2-4).

Certains sols ont fait l'objet de plusieurs essais afin d'en tester la répétitivité. Les essais effectués sur ces formations l'ont été à partir d'échantillons naturels. Pour l'ensemble des sites étudiés, plusieurs sondages carottés ont été réalisés.

2.1-Caractérisation minéralogique

La nature minéralogique a été déterminée par diffraction des rayons X sur les échantillons des trois sites [11]. Les spectres de diffraction obtenus (Fig.5 à 7) montrent la présence de la Kaolinite (Tab.1).

En se basant sur l'indice de plasticité et la fraction argileuse, différents comportements de l'argile peuvent avoir lieu. D'après Skempton, la valeur de Ac, qui est par définition le rapport de l'indice de plasticité Ip à la teneur en argile (particules de dimensions inférieures à 2 µm),

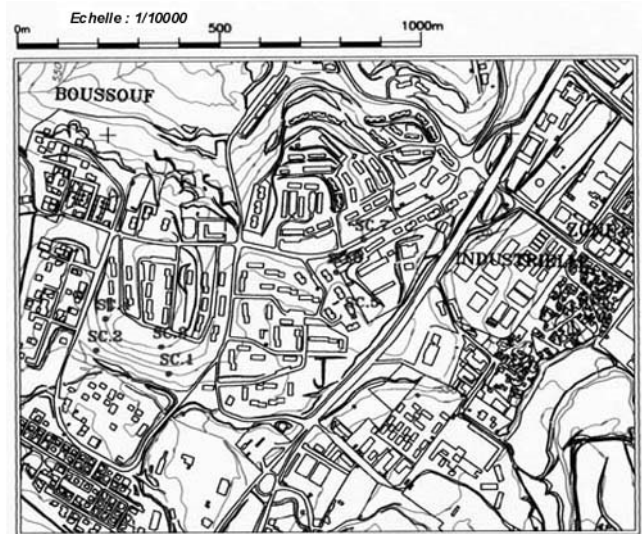


Figure 2: Carte de Constantine/ Boussouf.

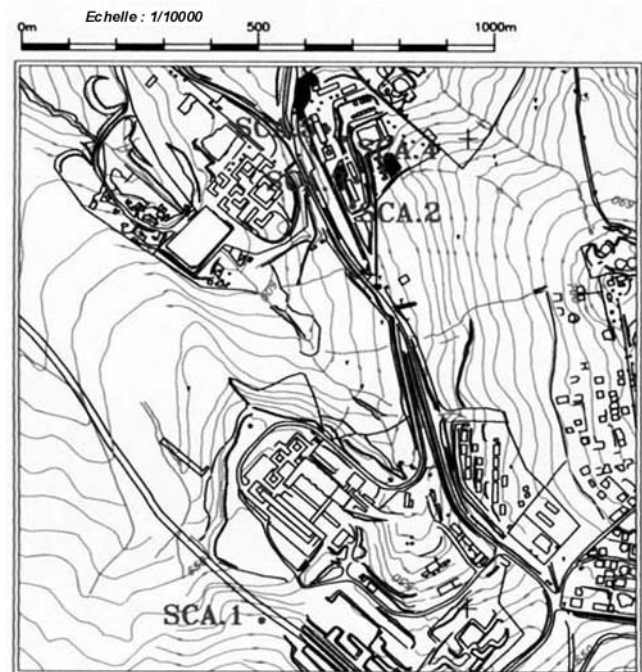


Figure 3: Carte de Constantine/ Ain-El-Bey.

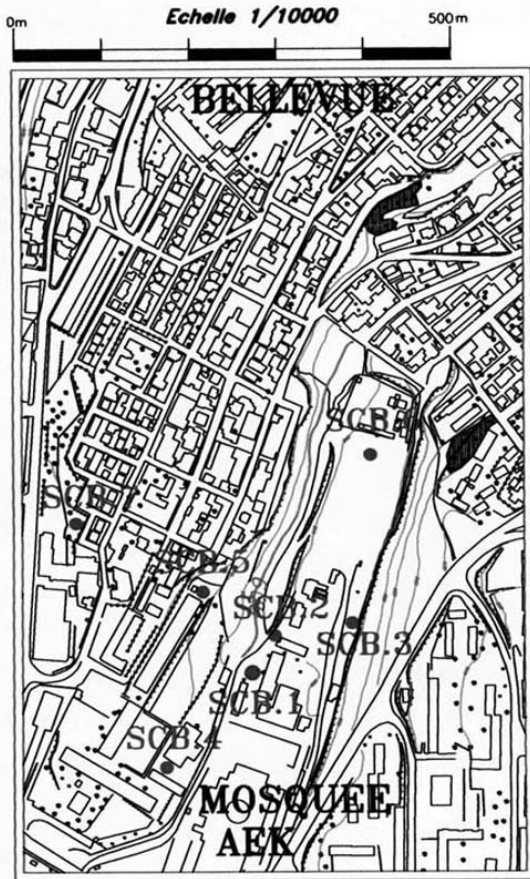


Figure 4: Carte de Constantine/ Bellevue – Mosquée Emir Abdelkader.

reflète directement le caractère minéralogique de l'argile [12,13]. Nous donc aurons:

- Ac < 0,75 argile inactive,
- 0,75 < Ac < 1,25 argile normale,
- Ac > 1,25 argile active.

Malgré l'importance de la fraction argileuse, l'ensemble des valeurs de l'activité (Ac) des sites étudiés est situé entre les droites de pentes comprises entre 0,5 et 1,12 (Fig. 8). Ces sols peuvent être considérés comme inactifs ou ayant une activité normale.

2.2-Caractérisation géotechnique

L'étude des caractéristiques rhéologiques du sol pour cette phase porte de manière générale sur la détermination des paramètres géotechnique, physique et mécanique à

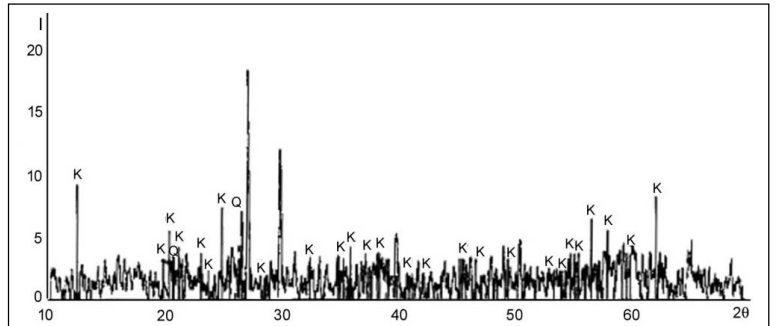


Figure 5: Spectre de diffraction X relatif au site Ain-El-Bey.

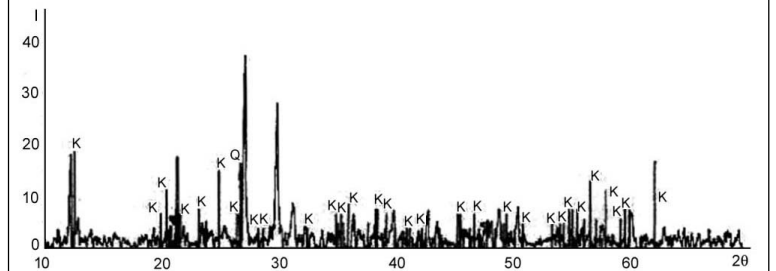


Figure 6: Spectre de diffraction X relatif au site Boussouf.

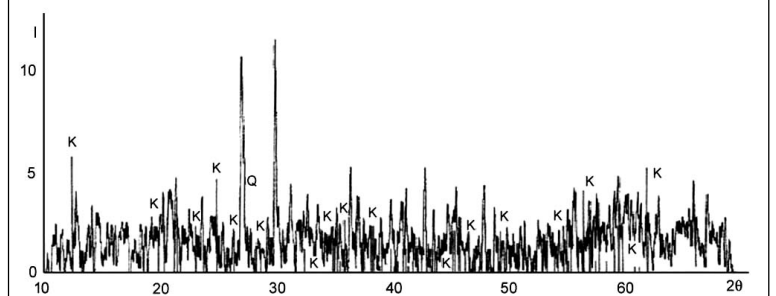


Figure 7: Spectre de diffraction X relatif au site Bellevue.

partir des échantillons naturels, dans les conditions de non drainage.

L'objectif recherché est de pouvoir, dans un premier temps, apprécier le comportement du sol à court terme.

Chaque sol prélevé a fait l'objet d'une identification visuelle qui permet de déterminer sa lithologie.

Site I : Le terrain est recouvert par une formation de remblais dont l'épaisseur varie entre 1 et 2 m. En-dessous, existent des formations argileuses compactes présentant des lentilles sableuses.

Tableau 1: Résultat du dépouillement.

Phases présentes	Structure N°Fiche	Structure Cristallographique	Site Ain El bey	Site Boussouf	Site Bellevue
Kaolinite Al ₂ SiO ₂ (OH) ₄	14-164	Triclinique	X	X	X
Lutecite (SiO ₂)	46-1441	Monoclinique	X	X	X
Quartz (SiO ₂)	46-1045	Hexagonale	X	X	X
Zeolite (SiO ₂)	35-63	Orthorhombique	X	X	X
Stishovite (SiO ₂)	45-1374	Tétragonale		X	X
Tridymite 2OH(SiO ₂)	14-0260	Hexagonale			X

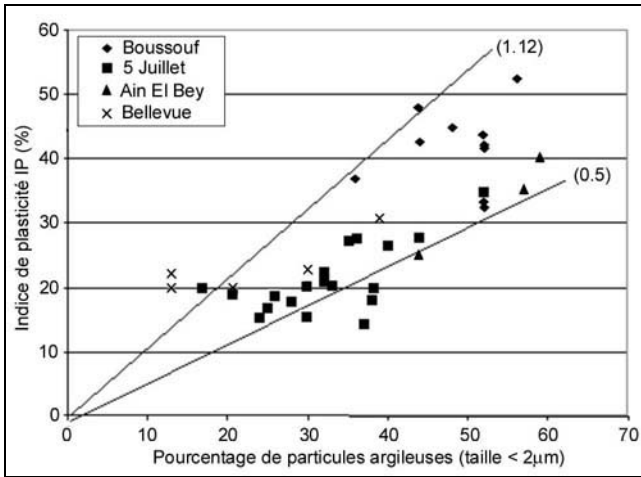


Figure 8: Activité des argiles de Constantine.

Site II : Le terrain est recouvert par une formation de remblais d'argile brune dont l'épaisseur varie entre 1 et 2 m. En-dessous, on observe des formations argileuses gypseuses et limoneuses.

Site III : Ce terrain est constitué principalement d'argile avec des alternances de sable, de graviers, ou à matrice argilo-limoneuse.

L'ensemble des résultats d'essais réalisés en laboratoire sur chaque échantillons figure dans les tableaux 2 et 3. L'analyse des valeurs des différents paramètres montre que tous les échantillons des différents sites ont des entités rhéologiques semblables, ce qui permet de dégager les valeurs caractéristiques géotechniques moyennes de l'écart type de WL, Wp, W et Ip ci-dessous:

$$W = 19,91 \pm 3,12 \qquad W_p = 25,56 \pm 4,18$$

$$WL = 58,82 \pm 13,41 \qquad I_p = 31,26 \pm 9,95$$

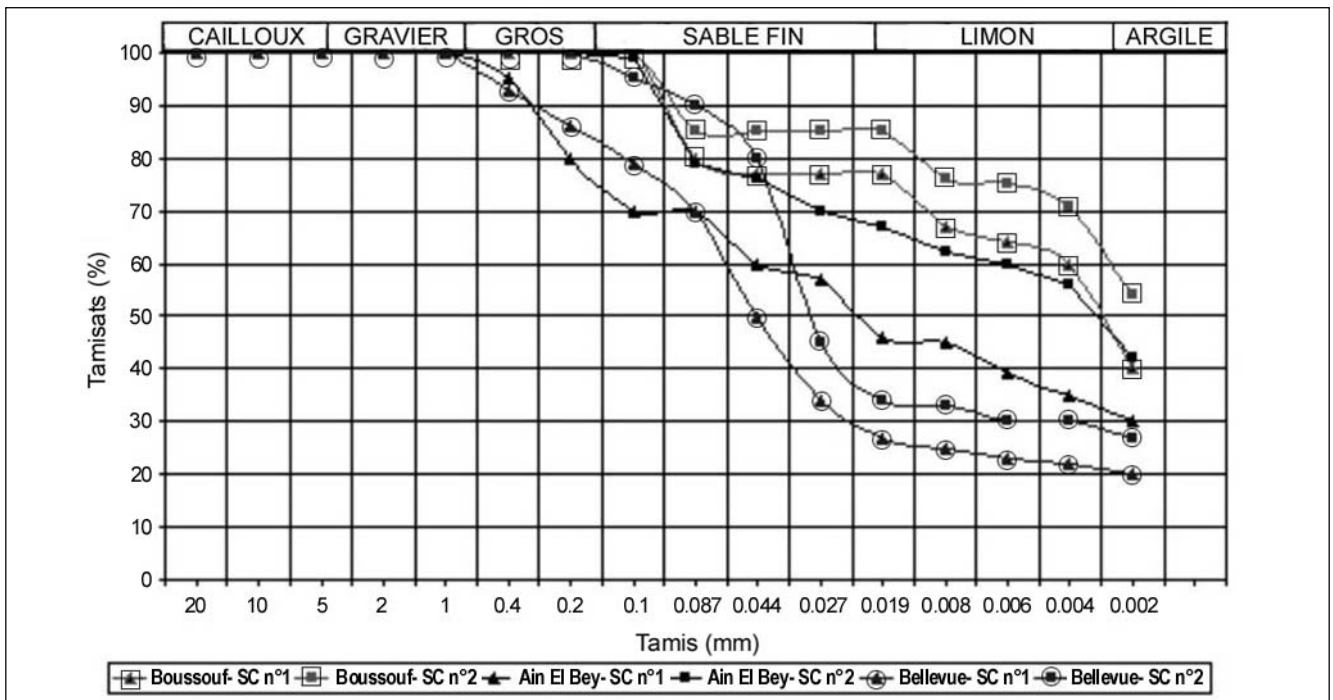


Figure 9: Courbes granulométriques des sites Boussouf, Ain El Bey et Bellevue.

Tableau 2: Principales caractéristiques physico-chimiques.

	N°de couche	W (%)	γ_d (t/m ³)	S _r (%)	WL	I _p	%<80µm	%<2µm	A _c	V _b	S.S.T
Site Ain-El-Bey	1-A	19	1,62	77,5	55,3	28,75	92	38,5	0,74	6,22	130,62
	2-A	19,5	1,72	92	45,3	24	85	28	0,85	6,77	142,17
	3-A	19,5	1,68	85,5	47,6	24,5	86,5	33	0,75		
	4-A	17,5	1,76	93,5	53,5	26,6	94,5	41	0,64		
Site Boussouf	1-B	22	1,5	76,5	76,25	42,2	100	54	0,77	8,38	175,98
	2-B	21,5	1,66	92	72	44	100	44	0,99	4,8	100,8
	3-B	20	1,68	89,5	73	42,2	100	46	1,02		
	4-B	26	1,61	100	73,7	48,6	100	52	0,93	7,49	157,29
Site Bellevue	1-C	15,8	1,65	92,2	46,6	23,5	72,5	13	1,80	3,43	72,03
	2-C	21,1	1,7	94,8	51,3	25,7	88,5	20	1,28	3,8	79,8
	3-C	22,7	1,58	93,4	49,5	25,6	87	40	0,64	4,8	100,8
	4-C	14,4	2,02	100	37,9	19,5	84	21	0,92	3,71	77,91

Tableau 3: Principales caractéristiques mécaniques.

	N°de couches	Cu (bar)	φ°	Cc	Cg	σ_c (bar)
Site Ain-El-Bey	1-A	0,18	6	0,188	0,039	0,91
	2-A	0,25	4,5	0,178	0,33	1,77
	3-A	0,34	5	0,227	0,036	2,17
	4-A	0,17	9	0,165	0,03	1,35
Site Boussouf	1-B	0,17	10	0,260	0,043	1,46
	2-B	0,55	9,5	0,227	0,051	2,88
	3-B	0,42	9	0,280	0,069	2,57
	4-B	0,27	6	0,252	0,047	2,89
Site Bellevue	1-C	0,44	4	0,184	0,033	0,38
	2-C	0,33	12,5	0,153	0,046	1,56
	3-C	0,54	11	0,118	0,028	1,95
	4-C	0,79	11,8	0,129	0,025	1,72

L'analyse granulométrique montre que la formation du mio-pliocène présente une granularité du type argile limoneuse parfois sableuse, de fraction argileuse (% > 2 μ m) variant de 20 à 54%.

Dans la figure 9, on remarque que l'allure des courbes révèle une argile à granulométrie uniforme à grains fins.

L'état en place montre qu'il s'agit d'une argile dense. La densité sèche varie de 1.5 à 2.02 t/m³.

Les teneurs en eau correspondantes sont très homogènes - W varie de (14.4 – 22%) - et nettement inférieures à W_p.

Ces argiles sont partiellement saturées à saturées.

On remarque que les indices de plasticité pour les sites Ain El Bey et Bellevue varient de 20 à 28%, sauf pour le site Boussouf, pour lequel les indices de plasticité variant de 42 à 48%, sont nettement supérieurs, ce qui explique la tendance au gonflement du site.

Les résultats oedométriques montrent une nette tendance au gonflement des sites Bellevue et Boussouf. Une pression de consolidation qui semble aussi indiquer que l'argile étudiée est surconsolidée sur toute la profondeur. Les terrains surconsolidés sont généralement fissurés; ils présentent une tendance à la fissuration qui favorise les cheminements préférentiels de l'eau dans le terrain, sans forcément avoir une nappe phréatique stable et homogène. L'expérience montre que pour ces terrains, la cohésion effective *in situ* peut être plus faible que les valeurs mesurées en laboratoire, et qu'il convient d'être prudent dans le choix de la cohésion pour les analyses de stabilité à long terme.

L'argile du Mio-pliocène possède des coefficients de compressibilité variant de 0,188 à 0,287, et une cohésion non drainée moyenne variant entre 0,25 à 0,6 bars. On constate que les premières profondeurs indiquent des coefficients de compressibilité et des cohésions relativement faibles. Ces valeurs correspondent pour la plupart des sondages aux formations de remblais; au-delà de ces formations, ces valeurs deviennent moyennes.

2.2.1- Les limites d'Atterberg

De manière classique, l'indice de plasticité Ip représente la plage de teneur en eau pour laquelle le sol agit comme un matériau plastique, les limites de liquidité et de plasticité

étant les bornes supérieure et inférieure du comportement plastique.

L'ensemble des résultats des essais des limites d'Atterberg effectués sur des échantillons sites se positionne sur l'abaque de Casagrande dans une zone bien définie, parallèle à la ligne "A" et juste au-dessus de celle-ci, d'équation : Ip = 0,73 (WL – 20). Elle sépare les sols gonflants (au-dessus) des sols non gonflants (en-dessous) de la ligne A. Cependant, une argile se trouvant au-dessus de la ligne A n'est pas nécessairement gonflante puisque les sols mous peuvent y être classés [14,15].

La plupart des échantillons étudiés, correspondant aux argiles des différents sites, sont de moyenne à forte plasticité (Fig. 10) avec des valeurs de Ip comprises entre 15 et 45%. Cela conduit à considérer Ip comme l'un des paramètres importants dans les propriétés de rétention d'eau du terrain et donc de gonflement. C'est la raison pour laquelle un certain nombre de corrélations ont été rapidement recherchées entre les limites d'Atterberg et les propriétés de gonflement des sols.

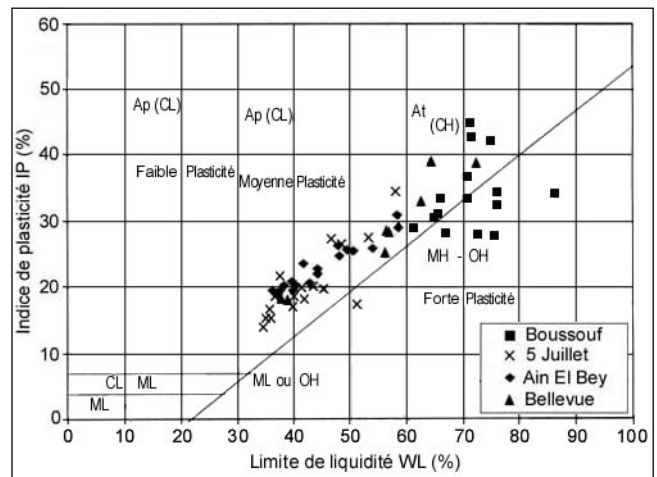


Figure 10: Classification des argiles de Constantine.

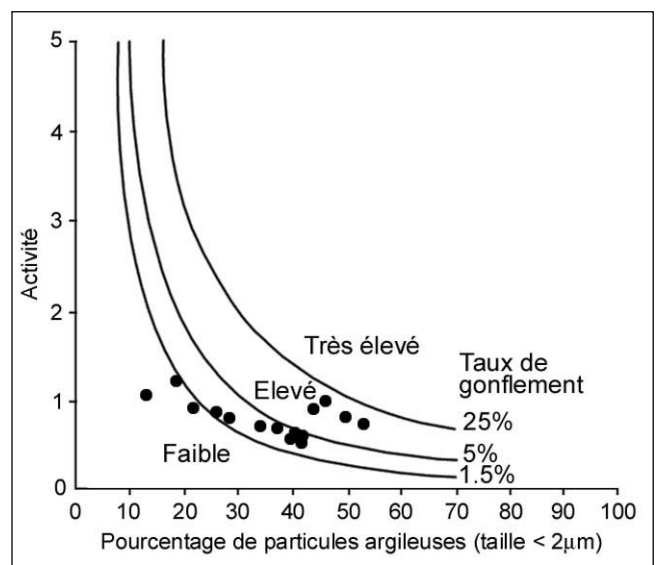


Figure 11: Diagramme de classification du potentiel de Gonflement (Seed *et al.*, 1962).

Sead *et al.* (1962) ont proposé une méthode d'estimation du taux de gonflement, en se référant à la teneur en argile du sol et à l'activité Ac du matériau.

En examinant la figure 11, on constate que l'argile du Mio-pliocène présente un taux de gonflement variant de faible à élevé.

Malgré la grande diversité des sols argileux, les grands principes contrôlant leurs comportements mécaniques sont toujours identiques, ce qui permet de développer des approches générales pour les différents problèmes pratiques.

Par ailleurs, il existe des relations entre les différentes propriétés qui sont validées pour la plupart des argiles. C'est ainsi que les propriétés caractérisant la consistance des argiles sont représentées par la relation entre l'indice de liquidité $I_L = \frac{W - W_p}{W_p}$ et la résistance au cisaillement non drainé (Fig. 12).

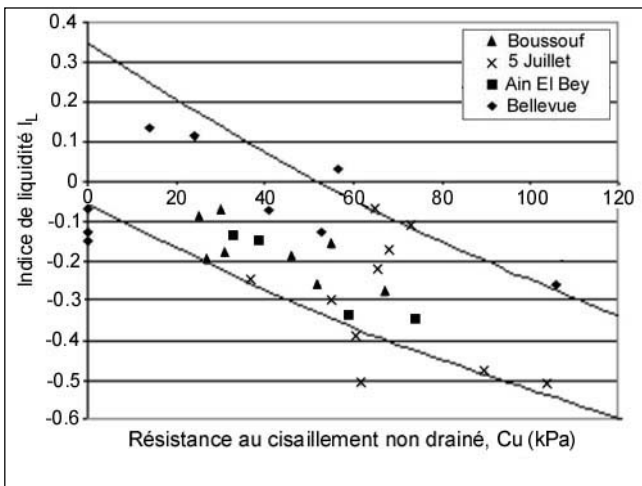


Figure 12: Cu en fonction de IL pour les argiles de Constantine.

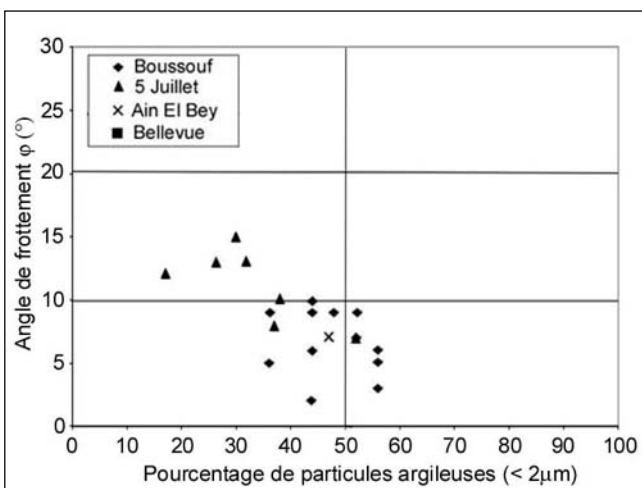


Figure 13: Influence de la fraction argileuse sur l'angle de frottement.

Deux corrélations ont été effectuées, l'une entre l'angle de frottement interne et la fraction argileuse et l'autre entre l'indice de plasticité et l'angle de frottement. Celles-ci

montrent bien l'influence de la fraction argileuse sur les propriétés physique et mécanique des argiles étudiées (Fig. 13 et 14).

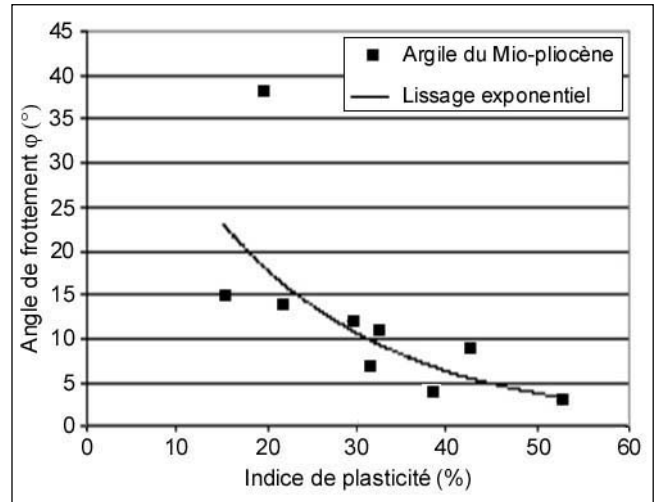


Figure 14: Corrélation entre l'indice de plasticité et l'angle de frottement interne.

CONCLUSION

La présente étude a permis une meilleure compréhension de la nature du sol de la ville de Constantine et par voie de conséquence d'appréhender davantage son comportement rhéologique.

Les principaux paramètres d'identification et ceux relatifs au cisaillement non drainé et de compressibilité, sont maintenant bien connus.

Cette étude, réalisée sur des sols argileux provenant de sites différents, a permis de mettre en évidence, à partir d'essais et d'analyses de laboratoire, les principales caractéristiques physiques, mécaniques et minéralogiques de la formation argileuse du Mio-pliocène de Constantine.

Schématiquement, le sous-sol des sites étudiés est composé de deux horizons :

- Une couche de couverture constituée essentiellement de remblais dont l'épaisseur varie de 1 à 2 m.
- Une couche d'argile limoneuse, parfois sableuse, de moyenne à forte plasticité et de forte à moyenne densité, partiellement saturée et surconsolidée sur toute la profondeur. Elle possède des coefficients de compressibilité variant de 0.095 à 0.257 et une cohésion non drainée moyenne variant entre 0.25 et 0.6 bar.

En ce qui concerne l'analyse minéralogique, la diffraction des rayons X a conduit à l'identification de la nature de l'argile. Les principaux minéraux sont la Kaolinite (qui est le seul minéral phyllosilicaté), le quartz, la Lutecite, la Zeolite, la Schistovite et la Tredimite.

Malgré la grande diversité des sols argileux, les grands principes contrôlant leurs comportements mécaniques sont identiques, ce qui permettra de développer des approches générales pour les différents problèmes pratiques.

Par ailleurs, il existe des relations entre les différentes propriétés qui sont validées pour la plupart des argiles. C'est ainsi que la propriété caractérisant la consistance des argiles est représentée par la relation entre l'indice de

liquidité et la résistance au cisaillement non drainée. Deux corrélations ont été effectuées, l'une entre l'angle de frottement interne et la fraction argileuse et l'autre entre l'indice de plasticité et l'angle de frottement interne. Ces deux corrélations montrent bien l'influence de la fraction argileuse sur les propriétés physiques et mécaniques des argiles étudiées.

Ce travail pourrait servir de base à l'établissement d'une cartographie géotechnique de la ville de Constantine, ce qui faciliterait le travail du projeteur dont la première tâche est la recherche du meilleur site avant d'entamer les études d'avant projet. Ce choix initial a évidemment une grande importance dans les problèmes d'aménagement et d'urbanisme.

REFERENCES

- [1]- Mouroux P., Margron P., Pinte J.C., "Construction économique sur sols gonflants", Manuels et méthode, N°14, (1988), p.9.
- [2]- Etude géotechnique, Lotissement Chekierbe, zone Boussouf, 06 Mars 1985 (L.T.P.E).
- [3]- Boudjellal K., "Glissement de terrain. Application au cas de Ciloc", Thèse d'ingénieur, Univ. Mentouri, juin (1990).
- [4]- Etude géotechnique, Echangeur, L.T.P.E., Constantine, 05 juillet (2000).
- [5]- Etude géotechnique, Contournement Sud de Constantine, Aïn El Bey, L.T.P.E., (1995).
- [6]- Bonnard, Gardel, "Rapport d'interprétation géologique et géotechnique des résultats de sondage, zone Bellevue", Lausanne (Suisse), n°1511-40, 14 décembre (1978).
- [7]- Stephen G. Evans (1998), "Les glissements de terrain dans la ville de Constantine", Commission géologique du Canada, 25 septembre 1998.
- [8]- Benaissa A., "Propriétés géotechniques de quelques formations géologiques propices aux glissements de terrains dans l'agglomération de Constantine", *Rummel*, n°6, (1998), pp.111-120.
- [9]- Leroueil S. et Tavenas F., "Propriétés fondamentales des sols compressibles dans le monde", Symposium international de mécanique des sols, Tome 1, Tiaret, 3-7 juin (1989).
- [10]- Leroueil S. et Tavenas F., "Figures", Symposium international de mécanique des sols, Tome 2, Tiaret, 3-7 juin (1989).
- [11]- Baralis J., Maeder G., "Métallurgie physique", Tome 1, Ed. Dunod (1982).
- [12]- Léonards G.A., "Les fondations", Ed. Dunod, (1968), pp. 22-27.
- [13]- Philipponnat G., "Fondation et ouvrage en terre", Ed. Eyrolles, (1979), pp.19-20
- [14]- Kaquot et Kérisel, "Traité de mécanique des sols", Gauthier-Villars, (1966), pp.18-27.
- [15]- Terzaghi K., Ralph B. Peck, "Soil Mechanics in Engineering Practice", Ed. Dunod, (1967). □