



## Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie civil

Option: Structures

Thème

---

**Classification des sols à partir des essais CPTs mécanique et électrique de  
deux sites situés dans la wilaya de Bejaïa**

---

Réalisé par :

- RACHDI KAMILIA
- SLAMANI CILINA

Encadré par :

Mme. Dj.Bouayad

Devant le jury composé de :

- Mme. Boukemouche
- Mme. Azirou

Année universitaire: 2022/2023

# Remerciements

Remerciements Le plus grand merci s'adresse au bon dieu, le tout puissant de nous avoir accordé le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

Nous remercions nos familles qui nous ont toujours encouragé et soutenu durant toutes nos études. On tient à exprimer nos profondes reconnaissances et remerciements à notre promotrice madame Bouayad Djamilia, enseignante chercheur pour sa présence, sa disponibilité à tout instant et surtout ses orientations, qu'elle trouve ici le témoignage de notre haute considération et de notre profond respect.

Nous adressons de chaleureux remerciements au laboratoire LNHC de Bejaia de nous avoir accueillis et pour ses précieux données, conseils, et disponibilité. Nous remercions également l'ensemble des enseignants du département de génie civil qui ont contribué à notre formation dans les meilleures conditions. Comme nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation de ce modeste travail, nous espérons qu'il sera un guide pour les futurs étudiants.

# Remerciement

Je dédie ce modeste travail particulièrement à mes très chers parents pour tout ce qu'ils ont fait pour que je puisse arriver à ce stade. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation. À mon frère et ma sœur pour leur véritable soutien, leur patience et leur aide durant toutes ces années. Je désire aussi remercier tous mes chers amis et tous ceux qui m'ont aidé à élaborer ce modeste travail ainsi que tous ceux que j'ai connus au cours de mon cursus.

# Remerciement

Je dédie ce modeste travail particulièrement à ma mère qui m'a encouragé durant toutes mes études, et qui sans elle, ma réussite n'aurait pas lieu. Qu'elle trouve ici mon amour et mon affection.

A ma grand-mère qui tient la place d'une seconde mère et qui sans sa contribution a mon éducation, je ne serai pas la personne que je suis aujourd'hui.

A mon petit frère, même s'il m'a causé plus de dérangement que d'aide.

A mon ami Nassim qui a toujours été là, dans le meilleur et dans le pire, je le remercie pour tout son aide, bien qu'un merci ne suffise pas

A et tous mes amis avec qui on a partagé ces 5 longues années.

## Table des matières

Introduction générale :	1
Chapitre 1 :	2
Principe de l'essai pénétrométrique au cône (cpt) et procédure d'exécution	2
I. Introduction	3
II. Présentation de l'essai de pénétration statique (CPT)	3
1. Principe du CPT	3
2. Développement du CPT	4
3. Appareillage et instruments de mesures	6
4. Mode opératoire et exécution de l'essai CPT	7
5. Types de pénétromètre statiques	8
III. Les utilisations des résultats du CPT	13
1. Classification des sols	13
2. La liquéfaction des sols	13
3. Calcul de fondation	14
4. La variabilité des sols	15
IV. Rôle de l'essai de pénétration statique (avantages et inconvénients)	16
V. Conclusion	16
Chapitre 2 :	17
I. Introduction	18
II. Systèmes de classification de sol :	18
III. Classification de sol en utilisant les essais de laboratoire (LCPC et USCS)	19
1. Classification du LCPC	19
2. Classification basée sur le type de comportement du sol à partir du CPT	22
Chapitre 3 :	39
I. Introduction	40
II. Présentation du projet	40
III. Aspect géologique de la région	41
IV. Reconnaissance du site	43
V. Résultats des sondages carottés	45
VI. Interprétation des résultats des sondages carottés	47
1. Essai de laboratoire	47

2.	Résultats des essais de laboratoires .....	49
VII.	Essai au pénétromètre à cône (CPT).....	53
1.	Classification de sol d'après le (CPT) .....	54
3.	Classification du sol avec l'abaque de Robertson (2010) .....	58
VIII.	Conclusion.....	61
	Chapitre 4 : .....	62
I.	Introduction : .....	63
II.	Présentation du projet : .....	63
III.	Reconnaissance du site : .....	63
1.	Sondages carotté : .....	65
2.	Essais de laboratoire : .....	65
a.	-Analyse granulométrique (NF P 94-056/NF P 94-057) : .....	66
b.	Caractéristiques physiques : .....	66
c.	Caractéristiques mécaniques (essai de cisaillement à la boîte (XP P94-071-1)) : .....	68
3.	Interprétation des essais de laboratoire : .....	69
IV.	Essai CPTu : .....	69
1.	Principe de l'essai : .....	69
2.	Interprétation des résultats de l'essai CPT .....	70
V.	Conclusion : .....	75
	Conclusion générale .....	76
	Références bibliographique .....	78
	ANNEXES .....	78

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1:Classification des sols grenus (selon L.C.P.C).....	20
Tableau 2: Classification de sol selon Robertson (1986).....	25
Tableau 3: Classification de sol selon Robertson (1990).....	27
Tableau 4:Représentation des zones SBT avec l'indice de comportement (Ic) .....	28
Tableau 5 : Comparaison entre la classification de sol de Robertson (1986) et (2010):.....	30
Tableau 6:Classification de sol selon Schneider et al. (2008).....	33
Tableau 7: Classification de sol selon Schneider et al. (2012).....	34
Tableau 8: Type de Comportement des Sols à partir de l'Indice de Classification $I_{B16}$ ) .....	37
Tableau 9:Nouveau type de comportement de sol basé sur le graphique Qtn-U2 modifié de Schneider et al. (2008 ; 2012).....	38
Tableau 10:Les coordonnées des sondages et des essais in situ. ....	45
Tableau 11:Résultat de l'analyse granulométrique .....	49
Tableau 12:Résultats obtenus à partir les limites d'Atterberg. ....	50
Tableau 13:Caractéristique physique.....	51
Tableau 14:Caractéristiques mécaniques .....	52
Tableau 15:Analyses chimiques du sol.....	53
Tableau 16:Description lithologique des sols en place. ....	65
Tableau 17:Résultats de l'analyse granulométrique.....	66
Tableau 18:Masse volumique sèche et humide, teneur en eau et degré de saturation du sol.....	67
Tableau 19:Limites d'atterberg .....	68
Tableau 20:Résultats de l'essai de cisaillement à la boîte. ....	68
Tableau 21:Résultats de l'analyse chimique .....	69

## LISTE DES FIGURES :

Figure 1:Composant d'un CPT (Robertson et Cabal (2010)).....	4
Figure 2: Premier cone mécanique néerlandais (Niazi 2021) .....	5
Figure 3:Pointe Delfte Barentsen, Robertson et Cabal (2010)).....	5
Figure 4:Pointe Begemann avec manchon de frottement (Robertson et Cabal (2010)) .....	5
Figure 5: Gamme de sondes CPT (Robertson et Cabal 2010).....	7
Figure 6: Unité CPT de 25 tonnes montée .....	8
Figure 7:Ramet portable pour CPT à l'intérieur des bâtiments .....	8
Figure 8:Schéma du CPT et de sa pointe mécanique statique Gouda (Niazi 2021). .....	9
Figure 9:Pointe électrique avec une coupe du manchon de frottement (Hassan.A. 2010).....	10
Figure 10: Représentation des différentes charges agissantes sur le cône électrique (Parez. L. 2005). .....	11
Figure 11:piézocone (CPTU) (Hassan 2010) .....	12
Figure 12:Fonctionnement de l'essai CPT sismique. (Fawad Niazi (2021)) .....	13
Figure 13: Classification des sols fins : Diagramme de Casagrande (L.C.P.C).....	21
Figure 14:Classification de sol d'après Begemann (1965).....	23
Figure 15:Classification de sol selon Robertson et al.(1986) .....	24
Figure 16:Classification du sol selon Robertson 1990.....	26
Figure 17:Classification de sol selon Robertson (2010) .....	29
Figure 18:Classification de sol selon Eslami et Fellenius (1997) .....	31
Figure 19:Classification de sol selon Schneider et al. (2008) .....	33
Figure 20:Classification de sol selon Schneider et al. (2012) .....	34
Figure 21:Proposition de tableau SBTn actualisé basé sur Qtn –Fr .....	35
Figure 22:Abaque de Schneider et al. (2008) modifié par Robertson (2016) .....	36
Figure 23:Localisation du site d'étude. ....	40
Figure 24:Carte géologique de Bejaia .....	42
Figure 25:promotion 1 .....	44
Figure 26:promotion 2 .....	44
Figure 27:promotion 3 .....	44
Figure 28:Classification de sol selon Robertson (2010) de la promotion 1.....	59
Figure 29:Classification de sol selon Robertson (2010) de la promotion 2.....	59
Figure 30: Classification de sol selon Robertson (2010) promotion 3 CPT 1.....	60
Figure 32:Classification de sol selon Robertson (2010) Promotion 3 CPT 2 .....	60
Figure 31:Classification de sol selon Robertson (2010) promotion 3 CPT 2 .....	60
Figure 33:Classification de sol selon Robertson (2010) promotion 3 CPT 3 .....	61
Figure 34 : Implantation du site des essais réalisés .....	64
Figure 35:Abaques de classification de sol non normalisé et normalisé de Robertson (1990) (2010) .....	70
Figure 36:Abaque non normalisé .....	71
Figure 37:Abaque normalisé .....	73
Figure 38:coupe verticale du sondage carotté.....	74



## **LISTE DES SYMBOLES**

**CPT** : Cône pénétration test

**CPTu** : Cône pénétration test électrique

**LNHC** : Laboratoire national de l'habitat et de la construction

**qc** : La résistance en pointe

**Qc** : force totale mesurée agissant sur le cône

**Ac** : la surface totale projetée du cône

**fs** : Le frottement latéral local

**Qs** : la force de frottement totale agissant sur le manchon

**As** : L'aire de la surface du manchon

**Rf** : Rapport de frottement (%)

**qa** : Pression atmosphérique

**$q_r$**  : Contrainte de rupture.

**$q_0$**  : Contrainte totale verticale au niveau de la base de fondation (après travaux).

**$q_{ce}$**  : Résistance de pointe équivalente.

**$K_c$**  : Facteur de portance pénétrométrique.

**SBT**: soil behaviour type

**USCS**: Unified soil classification system

**LCPC** : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

**Vs** : ondes de cisaillement

**Vp** : ondes de compression

**qt** : la résistance en pointe corrigé

**a**: Coefficient d'efficacité de la pointe

**u<sub>2</sub>** : La pression interstitielle

**U<sub>0</sub>** : Pression interstitielle du sol au repos

**$\sigma_{v0}$** : Contrainte verticale initiale totale

**$\sigma'_{v0}$** : contraint verticale initiale effective

**Bq** : le rapport de pression interstitielle normalisé

**Fr** : Rapport de frottement normalisé

**Qt** : Résistance de pointe normalisée

**SC** : Sondage carotté

**Ic** : Indice de comportement normalisé

**Is** : indice de comportement non normalisé

**qe** : La résistance effective du cône

**I<sub>B</sub>** : indice de classification du comportement de sol

## **Introduction générale :**

La classification des sols selon les essais CPT (Cone Penetration Test) est une approche courante en géotechnique utilisée depuis plus de 40 ans surtout dans les pays anglo-saxons. Cet essai présente des avantages majeurs par rapport aux méthodes traditionnelles (sondages, essais de laboratoire...) car il est rapide, reproductible et économique. De plus, il fournit des données précieuses et présente des bases théoriques très élaborées pour l'interprétation et permettent aux ingénieurs de prendre des décisions éclairées en matière de fondations, de stabilité des pentes, de consolidation des sols et d'autres aspects géotechniques. Ces avantages ont conduit à une augmentation constante de l'utilisation et de l'application du CPT à travers le monde. Comparé aux systèmes de classification basés sur la granulométrie et les limites d'Atterberg, effectués sur des échantillons remaniés, l'essai CPT traduit le comportement du sol sur place. Les ingénieurs sont donc plus tentés de comprendre ce comportement tout en gardant à l'esprit la complémentarité des deux classifications.

L'une des principales applications du CPT est la détermination de la stratigraphie et l'identification du type du sol en fonction de leurs caractéristiques. Cela est généralement accompli en utilisant des abaques qui relient les paramètres mesurés lors de l'essai, tels que la résistance de pointe ( $q_c$ ), la résistance au frottement latéral ( $f_s$ ), la pression interstitielle ( $U$ ) et d'autres paramètres dérivés, au type de sol. Plusieurs abaques ont été proposés dans la littérature, mais ceux de Robertson sont les plus utilisés.

L'essai CPT est très pratiqué par nos ingénieurs géotechniciens notamment pour le calcul des fondations superficielles et profondes, mais il reste peu utilisé pour la classification des sols. Ainsi, dans la présente étude nous allons utiliser les abaques de Robertson pour classier le sol de deux sites, situés à Bejaia, où des essais CPT mécaniques et électriques ont été effectués. Les résultats de cette classification seront confrontés avec les sondages carottés et les résultats des essais de laboratoire.

Notre travail est divisé en quatre chapitres. Dans le premier, nous présenterons le principe de l'essai CPT, les différents types et la procédure d'exécution. Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des abaques les plus utilisés pour la classification des sols à partir des essais CPT. Ensuite, une première application concernant un site où est exécuté plusieurs essais CPT mécaniques fera l'objet du chapitre trois, suivi d'une classification d'un deuxième site à partir d'un essai CPT électrique qui sera présenté au quatrième chapitre. Enfin, nous terminerons avec une conclusion générale qui résumera tous les résultats obtenus.

# **Chapitre 1 :**

**Principe de l'essai pénétrométrique au cône (cpt) et procédure d'exécution**

# Chapitre 1 : principe de l'essai pénétrométrique au cône et procédure d'exécution

## I. Introduction :

Ce chapitre présente un état de l'art sur la méthode de pénétration statique (CPT) en passant par le principe du fonctionnement de l'essai CPT, les différents matériels utilisés, et le mode opératoire. Ensuite nous présentons des différents types de CPT, (le pénétromètre mécanique, le pénétromètre électrique, le pénétromètre sismique et le Piézocône.....etc.), et leurs caractéristiques et avantages, puis nous donnons quelques domaines d'utilisation des résultats des essais CPT, (exemple : classification des sols dimensionnement des fondations, la liquéfaction et la variabilité des sols), enfin le rôle et l'utilisation de cet essai géotechnique.

## II. Présentation de l'essai de pénétration statique (CPT) :

### 1. Principe du CPT :

Le pénétromètre statique, en anglais cône pénétration test (CPT) est un essai in situ pour caractériser les paramètres mécaniques du sol .Ses avantages, tels que la répétabilité et la précision des mesures , ont conduit progressivement à le considérer comme un outil fiable en regard des autres essais in –situ de caractérisation mécanique .Le pénétromètre statique en général est constitué d'une série de tiges avec une pointe de forme cônica . La pointe et les barres sont enfoncées dans le sol à une vitesse de pénétration normalisée de 20 mm /s (norme NF P 94\_13 Afnor) .On mesure la force totale ( $Q_c$ ) agissant sur le cône, la force totale de frottement agissant sur le manchon et la pression inertielle ( $U_2$ ) dans le cas de piézocone (figure 1).on déduit alors :

La résistance à la pointe ( $q_c$ ) est définie comme la force totale mesurée agissant sur le cône ( $Q_c$ ) divisée par la surface totale projetée du cône ( $A_c$ ) :

$$q_c = \frac{Q_c}{A_c} \dots (1)$$

Le frottement du manchon ( $f_s$ ) est défini par la force de frottement totale agissant sur le manchon ( $Q_s$ ) divisée par la surface du manchon ( $A_s$ ) :

$$f_s = \frac{Q_s}{A_s} \dots (2)$$

Le rapport de frottement ( $R_f$ ) est exprimé comme le rapport (en pourcentage) du frottement du manchon ( $f_s$ ) à La résistance en pointe ( $q_c$ ) mesurée à la même profondeur.

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} * 100 \dots (3)$$

## Chapitre 1 : principe de l'essai pénétrométrique au cône et procédure d'exécution

Lorsqu'on utilise un piézocône, la pression interstitielle ( $U_2$ ) est également mesurée derrière le cône.

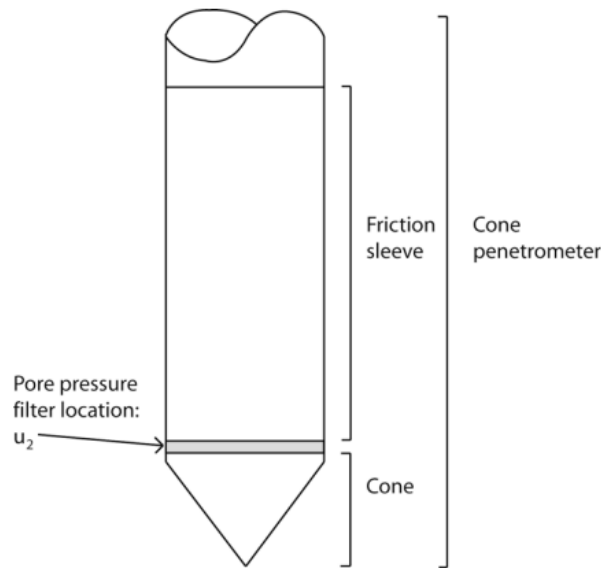


Figure 1: Composant d'un CPT (Robertson et Cabal (2010))

### 2. Développement du CPT :

Le pénétromètre statique a été développé dans les années 30 comme un outil pour étudier la stratigraphie du sol. Barentsen a construit le premier pénétromètre statique en 1932-1937. En 1946 le laboratoire de mécanique des sols de l'Université de Delft en partenariat avec la compagnie de Goudsche Machine fabriek de la ville de Gouda a construit un pénétromètre opérant manuellement avec une capacité de 2500 Kg. L'appareil avait été réalisé à partir d'un tube de gaz de diamètre intérieur de 19 mm et d'une tige centrale en métal avec un diamètre de 15 mm capable de coulisser à l'intérieur du tube. La tige était solidaire d'une tête de forme conique avec une ouverture de  $60^\circ$  et une surface de  $10 \text{ cm}^2$  (figure 2). L'ensemble était enfoncé dans le sol manuellement par le biais d'un ancrage dans le sol avec des vis sans fin et des vérins. La profondeur maximale atteinte par ce modèle été de 10 à 15 mètres et l'enregistrement était fait par simple lecture d'un manomètre. La pointe a été améliorée en ajoutant un manchon de frottement au-dessus du cône Begemann (1953, 1969) tel représenté sur la (figure 4). Le manchon de frottement a permis de mesurer le frottement latéral ( $f_s$ ) en plus de la résistance de pointe ( $q_c$ ). Les mesures étaient faites tous les 20 cm, mais dans certains cas les intervalles ont été réduits à 10 cm. Pour distinguer les différents types de couches de sol, Begemann (1965) a proposé d'utiliser le « rapport de frottement » qui est le rapport de frottement latéral sur la résistance de pointe (figure 5).

**Chapitre 1 : principe de l'essai pénétrométrique au cône et procédure d'exécution**

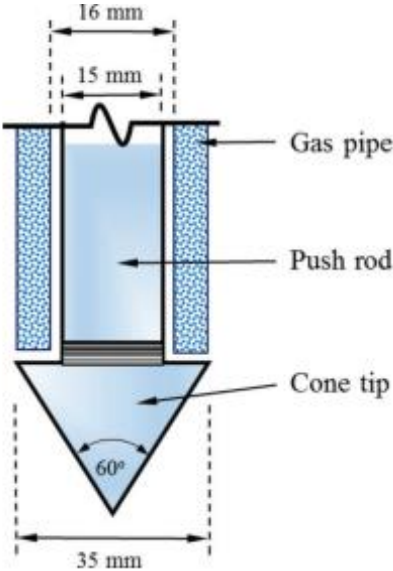


Figure 2: Premier cone mécanique néerlandais (Niazi 2021)

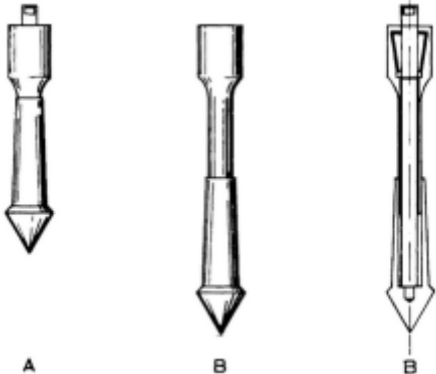


Figure 3:Pointe Delfte Barentsen, Robertson et Cabal (2010))

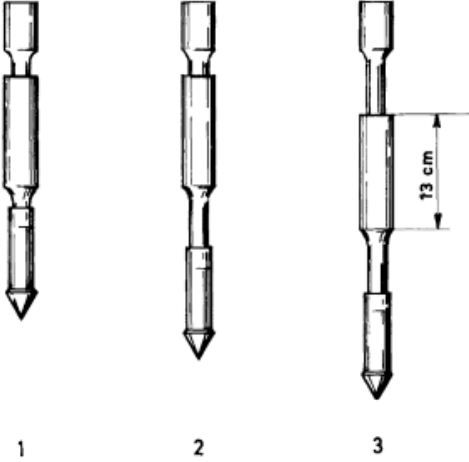


Figure 4:Pointe Begemann avec manchon de frottement (Robertson et Cabal (2010))

## Chapitre 1 : principe de l'essai pénétrométrique au cône et procédure d'exécution

En 1965, Fugro a développé un CPT électrique, en partenariat avec l'Institut de recherche de Delft et l'entreprise Philips, équipé de jauges de déformations pour mesurer la résistance de la pointe. Plus tard, le Norwegian Geotechnical Institute (NGI) a développé un piézocone électrique qui permettait, en plus de la résistance de la pointe, de mesurer la pression interstitielle. En parallèle des énormes progrès apportés aux Pays Bas, le pénétromètre électrique a également été largement développé en Amérique du Nord par Campanella et ses étudiants Campanella et al. (1983); Robertson and Wride (1998); Robertson (2009). Pour mesurer la vitesse de propagation des ondes de cisaillement et de compression, des géophones ont été introduit au CPT électrique. L'essai appelé, piézocone sismique (SCPTU), a été développé initialement à l'université de Columbia (Robertson et al, 1986).

### 3. Appareillage et instruments de mesures :

Le pénétromètre statique se compose de l'appareillage suivant :

- La pointe : Placée à l'extrémité inférieure du train de tige. Une gamme de cônes allant d'un mini- cône de 2 cm<sup>2</sup> à un grand cône de 40 cm<sup>2</sup>. Le mini cône est utilisé pour les investigations peu profondes, tandis que les grands cônes peuvent être utilisés dans le sol graveleux. Les différents cônes sont présentés sur la (figure 5).
- Train de tiges et système de guidage : Les tiges doivent être assemblées fermement pour constituer un train de tiges rigidement liées selon un axe rectiligne et continu ;
- Système de fonçage : C'est l'appareillage qui permet d'enfoncer le train de tige à vitesse sensiblement constante sans choc, ni vibration, ni rotation, dans un même mouvement vertical descendant pour l'ensemble tiges et pointe conique ;
- Structure de réaction : Le dispositif qui permet de transmettre, au train de tiges, l'effort de fonçage.

## Chapitre 1 : principe de l'essai pénétrométrique au cône et procédure d'exécution



Figure 5: Gamme de sondes CPT (Robertson et Cabal 2010)

### 4. Mode opératoire et exécution de l'essai CPT :

Avant de réaliser l'essai, il faut procéder aux différentes opérations successives suivantes :

- Vérification et étalonnage périodiques ;
- Examen des joints de protection de la pointe ;
- Faire coïncider l'axe du train de tige avec celui de l'effort de fonçage ;
- Enfoncez les tiges et la pointe verticalement. L'inclinaison maximale tolérée en surface est de 2% par rapport à la verticale ;
- S'assurer que la structure de réaction reste stable ;
- Vérifier que la vitesse de pénétration reste constante sur une longueur minimale de 0.8m durant le déplacement de la pointe ;
- L'intervalle de profondeur entre deux ensembles de saisie consécutifs ne doit en aucun cas être supérieur à 10cm et 20 cm.

L'essai est réalisé à l'aide d'un pénétromètre avec une pointe conique normalisée (norme EN ISO 22476-1 :2006) pénétrant le sol à vitesse constante (2cm/s). Pendant la pénétration, les forces sur le cône et sur le manchon de frottement sont mesurées. Les mesures sont effectuées en utilisant un transfert et un enregistrement électronique des données, avec une fréquence de mesure qui peut assurer des informations détaillées sur les conditions de sol.



## Chapitre 1 : principe de l'essai pénétrométrique au cône et procédure d'exécution

Les résultats d'un essai de pénétration statique peuvent être utilisés principalement pour évaluer :

- la stratigraphie
- le type de sol
- la densité de sol et l'état de contrainte in situ
- les caractéristiques de cisaillement.

Les résultats peuvent être aussi utilisés directement pour le dimensionnement des fondations profondes dans les sables ou indirectement (paramètres de cisaillement) dans les argiles. Le rapport de frottement ( $R_f$ ) est utilisé pour la classification de sol à partir des abaques.



Figure 6: Unité CPT de 25 tonnes montée



Figure 7: Ramet portable pour CPT à l'intérieur des bâtiments

### 5. Types de pénétromètre statiques :

#### a. Les pénétromètres à cône mécanique :

Un cône mécanique, qui peut être soit un cône à manchon simple (aussi appelé cône hollandais), permettant de mesurer la résistance en pointe et la résistance totale, soit un cône à manchon de friction (aussi appelé cône Begemann), est utilisé pour mesurer la résistance en pointe, le frottement latéral, et la résistance totale.

Des tiges CPT extérieures et intérieures, permettant la poussée et le transfert des forces de réaction à la surface pour leur mesure.

Une tête de mesure hydraulique affichant les forces appliquées en kN. Cette tête est équipée d'un manomètre pour les mesures en basse pression, et d'un autre pour les mesures en haute pression. Le premier manomètre est protégé par une vanne de surcharge contre les surpressions. Les résultats des essais CPT sont relevés manuellement par l'opérateur.

En option, les mesures peuvent être enregistrées automatiquement. Il suffit d'installer une tête de mesure électrique (au lieu de la tête hydraulique) à utiliser avec le système

## Chapitre 1 : principe de l'essai pénétrométrique au cône et procédure d'exécution

d'acquisition. Les résultats des tests sont enregistrés et traités directement sur ordinateur, simplifiant ainsi la méthode qui donne de plus des résultats plus fiables et plus précis. Les tests CPT mécaniques peuvent donc être réalisés automatiquement.

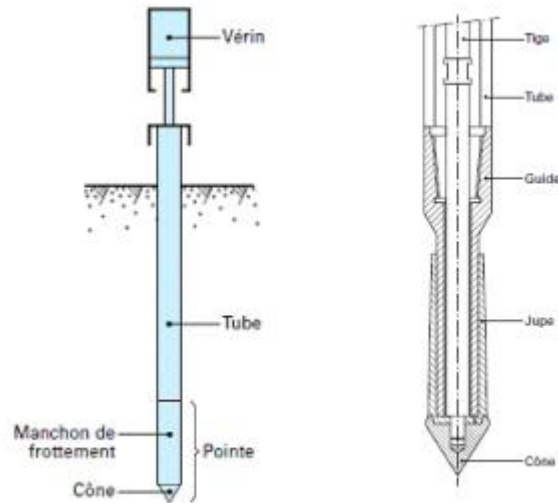


Figure 8:Schéma du CPT et de sa pointe mécanique statique Gouda (Niazi 2021).

### b. Les pénétromètres acône électriques :

C'est la méthode de mesure la plus avancée pour les essais CPT. Les mesures sont beaucoup plus précises que celles des cônes mécaniques, les cellules de pression étant bien plus sensibles. De plus, la méthode électrique permet d'enregistrer in-situ d'autres paramètres : pression interstitielle, température, la conductivité électrique, l'inclinaison...

Les signaux des cellules de pression sont transmis en tant que signaux analogiques amplifiés via un câble et sont convertis en signaux numériques 16 bits par le système d'acquisition. Ce dernier est disponible en version portable et étanche, idéale pour utilisation en extérieur, à intégrer dans une cabine.

Les cônes sont fabriqués en acier trempé de haute qualité. Les cellules de pression et les circuits électriques sont conçus par les ingénieurs, rompus aux techniques et méthodes CPT. Les cônes intègrent les composants les plus fiables et de dernière génération. La gamme complète des équipements est strictement conforme aux normes internationales et comprend :

- Cône électrique : de type compression ou soustraction (section 10 cm<sup>2</sup> ou 15 cm<sup>2</sup>). Les cônes électriques peuvent mesurer la résistance en pointe ( $q_c$ ), le frottement latéral ( $f_s$ ) et l'inclinaison ( $i$ ). En option, la pression interstitielle ( $u$ ), la température ( $T$ ) et l'inclinaison sur 2 axes peuvent également être mesurés.

## Chapitre 1 : principe de l'essai pénétrométrique au cône et procédure d'exécution

- Câbles électriques CPT : disponibles en plusieurs longueurs, ils sont munis de connecteurs étanches LEMO (connexions plaquées or), alliant une large flexibilité d'emploi à une durée de vie remarquable.
- Frein de poussée/traction : automatique avec contacteur de proximité. Le frein pousse les tiges et cône dans le sol puis les extrait. Le contacteur de proximité permet de contrôler le démarrage de l'acquisition.
- Système d'acquisition de données : comprenant 8 voies analogiques et 4 voies numériques, qui convertit les signaux et permet l'acquisition.

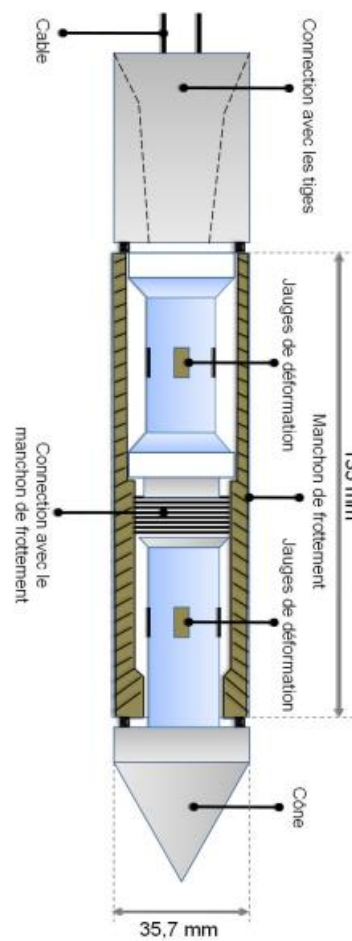


Figure 9: Pointe électrique avec une coupe du manchon de frottement (Hassan.A. 2010)

## Chapitre 1 : principe de l'essai pénétrométrique au cône et procédure d'exécution

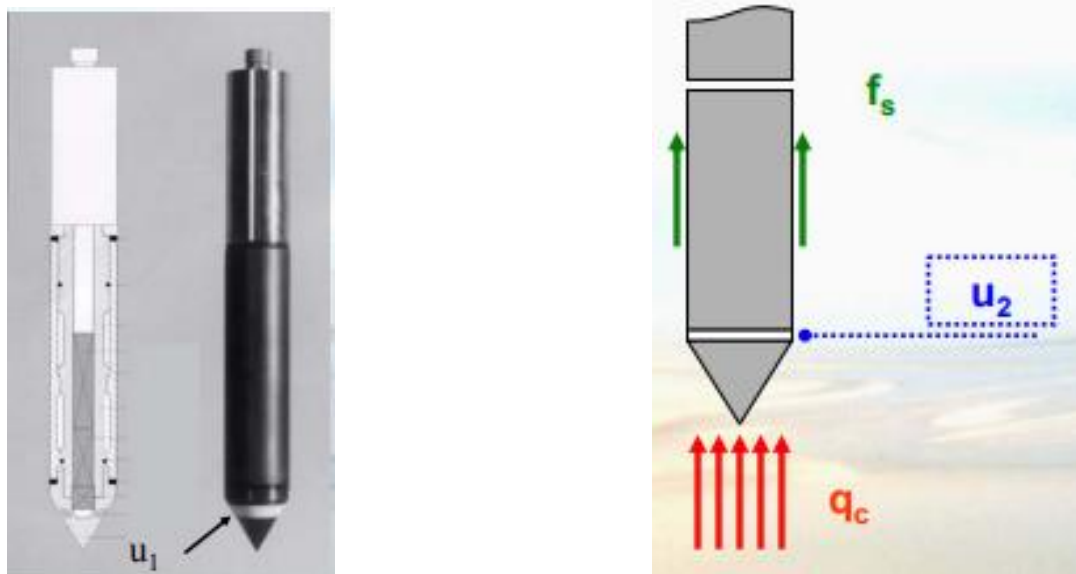


Figure 10: Représentation des différentes charges agissant sur le cône électrique (Parez. L. 2005).

### c. Piézocônes (CPTu) :

L'installation d'un capteur de pression interstitielle dans une pointe de pénétromètre statique a été un grand progrès dans les essais CPT, en permettant de mesurer à tout moment de la pénétration la valeur de la pression interstitielle générée.

Depuis 1974, un grand nombre de piézocônes ont été développés, avec différentes formes et positions de filtre. Certains ont des filtres sur l'extrémité conique de la pointe ou au milieu de la pointe et certains, sur la partie cylindrique juste derrière le cône. La position du filtre sur la pointe a été l'objet de nombreuses recherches, qui ont résulté en une tendance globale de positionner le filtre juste au-dessus du cône, car cette position est la moins sujette aux destructions et permet de mesurer des pressions interstitielles allant des négatives (limon et sables fins) aux fortement positives (argiles)

Le fonçage de la pointe dans un sol saturé provoque un cisaillement qui s'accompagne d'une variation  $\Delta u > 0$  pour les sols contractants et  $\Delta u < 0$  dans les sols dilatants. Les valeurs de  $\Delta u$  sont influencées par des facteurs dépendant du sol, et des facteurs dépendant de l'appareil (position du filtre, vitesse de pénétration, qualité de saturation...).

La vitesse recommandée par la norme est de  $2\text{cm/s} \pm 0,5\text{ cm/s}$ . A cette vitesse, il est admis qu'on est en conditions drainées dans le sable et en conditions non drainées dans les argiles. La saturation joue également un rôle important dans la qualité de mesure de la pression

## Chapitre 1 : principe de l'essai pénétrométrique au cône et procédure d'exécution

interstitielle. Elle permet d'éliminer toutes les bulles d'air présentes dans le filtre et la chambre de mesure où aboutit le capteur de u.

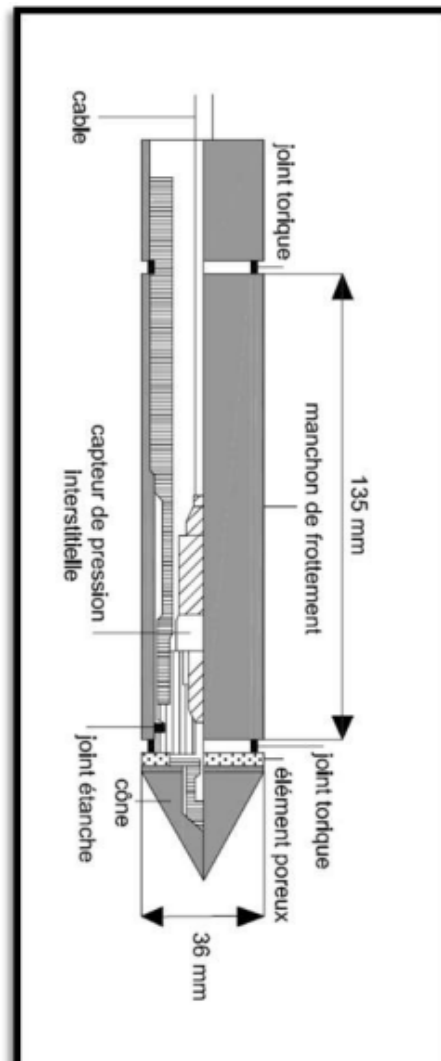


Figure 11: piézocone (CPTU) (Hassan 2010)

### d. Les pénétromètres acône sismique :

Tous les cônes et systèmes d'acquisition de données sont conçus pour des essais sismiques. L'ajout des géophones dans le corps du CPTu permet la collecte de données d'ondes de cisaillement ( $V_s$ ) et de compression ( $V_p$ ) pendant l'essai de pénétration au cône.

Les ondes de cisaillement ont un mouvement de particules à la direction du déplacement. Un faisceau normalement chargé est frappé horizontalement de chaque côté pour créer des ondes de cisaillement polarisées à des incréments de profondeur réguliers. Des sources manuelles, automatiques et vibratoires sont disponibles en fonction de l'application et de l'appareil de forage utilisé.

## Chapitre 1 : principe de l'essai pénétrométrique au cône et procédure d'exécution

Les ondes de compression ont un mouvement de particules parallèle à la direction du déplacement. Une source d'impact vertical est généralement utilisée comme source.

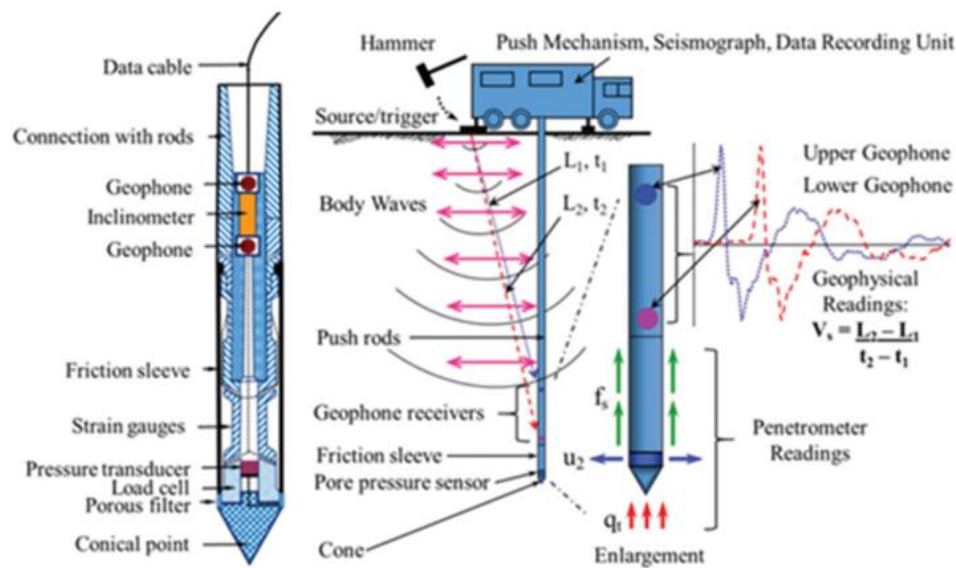


Figure 12: Fonctionnement de l'essai CPT sismique. (Fawad Niazi (2021))

### III. Les utilisations des résultats du CPT :

Les résultats des essais CPT peuvent être utilisés dans plusieurs études de sol tels, que :

#### 1. Classification des sols :

L'une des principales applications du CPT a été la détermination et l'identification du sol ainsi que le type de la stratigraphie du sol. Ceci se fait généralement à l'aide des abaques qui relient les paramètres du CPT au type de sol. Plusieurs abaques ont été proposés dans la littérature (Sanglerat et al. (1974) ; Schmertmann, 1978 ; Douglas et Olsen, 1981 ; Robertson et al, 1986 ; Robertson, 1990 ; Eslami et Fellenius, 2004 ; Robertson, 2010 ; Robertson, 2016), mais ceux de Robertson et al (1986), (1990) restent les plus populaires. Récemment, Robertson (2010) a actualisé son premier abaque en termes de résistance du cône adimensionnalisée ( $q_c/q_a$ ) et du rapport de frottement ( $f_s/q_c$ ) en % Son but est d'uniformiser les types de sols avec ceux de l'abaque normalisé (Robertson, 1990).

#### 2. La liquéfaction des sols :

De façon générale la liquéfaction est un phénomène qui se produit sous sollicitations statiques ou cycliques (sismiques) se traduisant par une perte de résistance d'un matériau pulvérulent saturé il subit une transition vers un comportement fluide, due à l'augmentation de la pression interstitielle engendrée par les déformations cycliques et par l'annulation des contraintes effectives régnant dans le sol.

## Chapitre 1 : principe de l'essai pénétrométrique au cône et procédure d'exécution

Parmi les méthodes d'évaluation de potentiel de liquéfaction c'est la méthode CPT qui est plus utilisée. Elle consiste à déterminer un facteur de sécurité vis-à-vis de la liquéfaction défini par la comparaison entre le rapport de résistance cyclique CRR en fonction de la résistance en point mesurée par le CPT et le rapport de contrainte cyclique générée par le séisme (CSR), il existe plusieurs formules comme :

$$F_s = CRR/CSR$$

Les zones considérées susceptibles à la liquéfaction sont donc celles où le CSR est supérieur au CRR

### 3. Calcul de fondation :

L'essai CPT est utilisé pour le calcul des fondations profondes et superficielles. Ces calculs résultent de certaine analogie que l'on peut établir entre le comportement d'un sol lors de cet essai et le comportement du même sol vis-à-vis des sollicitations d'une fondation.

En effet, plusieurs recherches (O'Neill, 1986 ; Jardine et al, 2005...) ont montré que le CPT donne une meilleure estimation de la capacité portante des pieux car le comportement du CPT est proche de celui du pieu.

#### - Fondation superficielle :

Le fascicule 62, titre V (1993) propose pour le calcul de la contrainte de rupture (capacité portante par unité de surface) sous charge verticale centrée à partir des résultats de l'essai de pénétration statique CPT, la formule suivante :

$$q_r = q_0 + K_c * q_{ce} \dots\dots (4)$$

Avec :

$q_r$  : Contrainte de rupture.

$q_0$  : Contrainte totale verticale au niveau de la base de fondation (après travaux).

$q_{ce}$  : Résistance de pointe équivalente.

$K_c$  : Facteur de portance pénétrométrique.

#### - Fondation profonde :

Dans le cas général des pieux travaillant en compression, la charge limite totale (Ql) se calcule comme suit :

$$Q_l = Q_p + Q_s \dots\dots (5)$$

Quant à la charge limite de pointe (Qp), selon le fascicule 62, elle est donnée par :

$$Q_p = A * k_c * q_{ce} \dots\dots (6)$$

## Chapitre 1 : principe de l'essai pénétrométrique au cône et procédure d'exécution

Avec :

A : section de pointe,

q<sub>ce</sub>: résistance de pointe équivalente au pénétromètre statique

k<sub>c</sub> : facteur de portance

La charge limite de frottement latéral sur toute la hauteur h concernée du fût de pieu est calculée par l'expression suivante :

$$Q_s = p * q_s(z) dz \dots (7)$$

Avec :

P : périmètre du pieu

q<sub>s</sub> : frottement latéral unitaire limite à la cote z.

La valeur de q<sub>s</sub> est déterminée par l'expression suivante :

$$q_s(z) = \min(q_c(z) / \beta ; q_s \text{ max})$$

Ou :

q<sub>c</sub>(z) : résistance de pointe lissée à la profondeur z

β et q<sub>s</sub> sont données en fonction de la nature du sol au niveau considéré et du type de pieu

### 4. La variabilité des sols :

Plusieurs études en géotechnique ont souligné l'importance de la prise en compte de la variabilité du sol dans une conception basée sur la fiabilité. Les résultats de l'essai CPT sont très utilisés pour étudier, en particulier, la variabilité verticale des sols car les mesures en continu du CPT en fonction de la profondeur forment une banque de données importante pour les études statistiques. De plus, les erreurs de mesures associées à l'essai sont très faibles et peuvent donc être négligées. L'analyse de la variabilité verticale du sol, à partir des essais CPT, permet de déterminer son échelle de fluctuation ainsi que son coefficient de variation. L'échelle de fluctuation représente la distance au-delà de laquelle il n'y a plus de corrélation entre les valeurs d'une propriété du sol suivant une direction donnée, le coefficient de variation est le rapport entre l'écart type et la moyenne de cette même propriété. Par exemple, une petite échelle de fluctuation indique une grande variabilité de la propriété du sol. Il est admis en général que le rapport entre l'échelle de fluctuation horizontale et verticale d'une propriété du sol est supérieur ou égale à 10.



## **Chapitre 1 : principe de l'essai pénétrométrique au cône et procédure d'exécution**

### **IV. Rôle de l'essai de pénétration statique (avantages et inconvénients) :**

L'application principale de l'essai de pénétration statique est le profilage des sols pour déterminer les types de sol en utilisant le type de comportement du sol (SBT). Le CPT et CPTu sont considérés avec intérêt pour l'investigation des sols géotechnique du fait des avantages suivants qu'ils présentent :

- rapidité de mise en œuvre et d'accès aux mesures (jusqu'à 80m/jour environ voire plus dans les sols peu résistants),
- mesures en continu sur un sondage donné
- répétabilité et fiabilité des résultats dus à l'indépendance des mesures vis-à-vis de l'opérateur
- coût relativement bas (excepté certains essais spécifiques comme le CPTu).
- Le coût très compétitif par rapport aux sondages pressiométriques

Par ailleurs, le CPT permet d'obtenir des informations précises de sub-surface et si selon la nature du projet, c'est nécessaire des tests spécifique ou échantillonnage pour laboratoire, les résultats de CPT permettent de bien viser l'endroit d'échantillonnage et aussi les profondeurs qui sont supposées problématiques. Toutefois, le CPT présente également des inconvénients tels :

- La complication (voire impossibilité) de la traversée de terrains durs tels que les matériaux cimentés,
- L'absence d'échantillonnage du sol,
- Matériel demandant une formation relativement évoluée des opérateurs,
- La difficulté d'accès pour les camions CPT pour certains types de sols, ou sites,
- La difficulté d'ancrage pour les machines légères.

### **V. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présentés le principe de l'essai CPT, les différents matériels utilisés, et le mode opératoire. Ensuite, nous avons présentés les différents types de CPT, (mécanique, électrique et le piézocône), leurs caractéristiques et avantages, après nous avons cité quelques domaines d'utilisation des résultats des essais CPT, par exemple : l'identification et la classification des sols, le dimensionnement des fondations, la liquéfaction et la variabilité des sols etc... Dans le chapitre suivant, on va voir les différentes classifications des sols à partir des essais CPT.

## **Chapitre 2 :**

Classification des sols a partir de l'essai (cpt)

## **Chapitre 2 : Classification des sols à partir de l'essai CPT**

### **I. Introduction :**

Ce chapitre porte sur la classification des sols à partir de l'essai de pénétration statique (Cône Pénétration Test, CPT). L'essai CPT est une méthode utilisée en géotechnique pour évaluer les propriétés mécaniques et géotechniques des sols. Il fournit des données précieuses sur la résistance, la compressibilité et la nature des différents types de sols. Une classification appropriée des sols facilite la compréhension de leur comportement et permet de prendre des décisions éclairées lors de la conception et de la réalisation de projets de génie civil. Nous examinerons les différentes approches de classification des sols à partir des données CPT, en mettant l'accent sur les méthodes les plus couramment utilisées

### **II. Systèmes de classification de sol :**

Un système de classification des sols est utilisé pour grouper des sols selon les caractéristiques basées sur des essais efficaces et peu coûteux. Les systèmes de classification de sol les plus utilisés en géotechnique sont basés sur des caractéristiques physiques (textures) tels que la taille des grains et la plasticité (ex USCS (Unified soil classification system) et LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées)). Idéalement, les géotechniciens tiennent également à classer les sols en fonction des caractéristiques de comportement fondamentaux qui ont un lien étroit avec le comportement in situ. L'inconvénient des systèmes existants de classification basés sur la texture c'est qu'ils sont mesurés sur des échantillons perturbés et remaniés. Les essais faits au moyen de pénétration au cône ont gagné en popularité pour les études de sites en raison des mesures peu coûteuses, rapides, continues et fiables. Les systèmes de classification basés sur le CPT les plus courants sont basés sur les caractéristiques du comportement in-situ et sont souvent appelés SBT (soil behaviour type) ; une classification de type de comportement de sol. L'essai de pénétration au cône électrique (CPT) est de plus en plus utilisé ces dernières décennies car il présente des avantages majeurs par rapport aux méthodes traditionnelles d'investigation sur le terrain, telles que le forage et l'échantillonnage. En outre, il fournit des données quasi continues et dispose d'une base théorique solide. Ces avantages ont conduit à une augmentation constante de l'utilisation et de l'application du CPT dans de nombreux endroits à travers le monde. On va présenter ci-dessous les méthodes plus utilisées pour la classification des sols.

## Chapitre 2 : Classification des sols à partir de l'essai CPT

### III. Classification de sol en utilisant les essais de laboratoire (LCPC et USCS) :

La classification USCS connu en Amérique du nord, la classification L.C.P.C et d'autres systèmes similaires utilisés à travers le monde sont basés sur les caractéristiques physiques mesurés sur des échantillons remaniés. Elle consiste à identifier un sol grâce à des mesures quantitatives et à lui donner un nom afin de le rattacher à un groupe de sols de caractéristiques semblables à partir des résultats fournis par :

- La granulométrie
- Les caractéristiques de plasticité de la fraction fine (limites d'Atterberg)

Les sols sont désignés par le nom de la portion granulométrique prédominante qualifiée par un adjectif relatif aux portions secondaires.

#### 1. Classification du LCPC :

Elle distingue trois grands types de sols :

- Les sols grenus : plus de 50 % des éléments en poids  $> 80 \mu\text{m}$ ,
- les sols fins : plus de 50 % des éléments en poids  $\leq 80 \mu\text{m}$
- Les sols organiques dont la teneur en matière organique est  $> 10 \%$ .

#### - Sols grenus :

La classification des sols grenus se fait par la granulométrie et les limites d'Atterberg pratiquées sur la fraction fine précisée dans le tableau ci-après :

## Chapitre 2 : Classification des sols à partir de l'essai CPT

Tableau 1: Classification des sols grenus (selon L.C.P.C).

Définitions		Symboles	Conditions	Désignation géotechnique
GRAVIERES	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ (*) et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	grave propre bien graduée
			Une des conditions de Gb non satisfaite	grave propre mal graduée
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	Limite d'Atterberg au-dessous de la ligne A (fig. 2)	grave limoneuse
			Limite d'Atterberg au-dessus de la ligne A	grave argileuse
SABLES	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué
			Une des conditions de Sb non satisfaite	sable propre mal gradué
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	Limite d'Atterberg au-dessous de la ligne A	sable limoneux
			Limite d'Atterberg au-dessus de la ligne A	sable argileux

## Chapitre 2 : Classification des sols à partir de l'essai CPT

### - Sols fins :

La classification des sols fins utilise les critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg. Elle est précisée dans le diagramme de plasticité ci-après. Selon la position dans le diagramme du point représentatif ayant pour abscisse la limite de liquidité ( $W_L$ ) et pour ordonnée l'indice de plasticité ( $I_p$ ), on définit six catégories principales :

- les limons très plastiques (LT)
- les limons peu plastiques (LP)
- les argiles très plastiques (AT)
- les argiles peu plastiques (AP)
- les sols organiques très plastiques (OT)
- les sols organiques peu plastiques (OP)

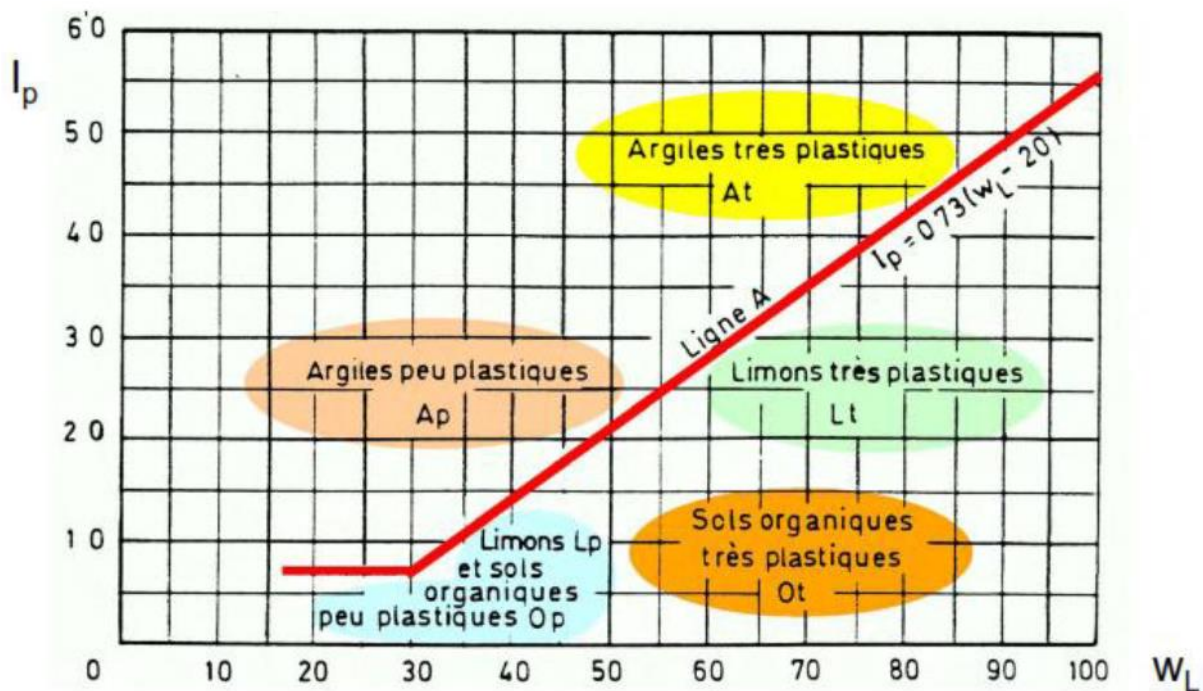


Figure 13: Classification des sols fins : Diagramme de Casagrande (L.C.P.C)

## Chapitre 2 : Classification des sols à partir de l'essai CPT

### 2. Classification basée sur le type de comportement du sol à partir du CPT :

L'une des applications majeures du CPT est la détermination de la stratigraphie et l'identification du type de sol. Cela se fait en général en utilisant des abaques reliant les paramètres du cône au type de sol, les premiers abaques développés en Hollande sont basés sur les résistances du cône ( $q_c$ ) et du frottement latéral ( $f_s$ ) mesurés avec le cône mécanique (Begemann, 1965). D'autres abaques utilisant ( $q_c$ ) et le rapport de frottement ( $R_f$  :  $f_s/q_c$  en pourcentage) ont été proposés par Douglas et Olsen (1981), Robertson et al. (1986), Robertson (1990,2009) etc... Ces deux derniers sont les plus populaires.

Depuis 1990, d'autres abaques basés sur le CPTu ont été développés par Jeffries et Davis (1993), Olsen et Mitchell (1995), Eslami et Fellenius (1997), Ramsey (2002), Schneider et al. (2008), (2012) et Robertson (2010), (2016) etc...

On présentera ci-dessous les abaques les plus utilisés dans la littérature pour la classification des sols.

#### a. Classification de sol selon Begemann (1965) :

Le premier abaque de classification des sols connu a été développé par Begemann (1965) en utilisant des données provenant de pénétromètres à cône mécanique munis d'un manchon de frottement. Sur la base de 250 sondages (et de leurs carnets de forage correspondants) dispersés à travers les Pays-Bas, les données de la résistance mesurée du cône ( $q_c$ ) ont été tracées en fonction du frottement latéral local ( $f_s$ ) sur une échelle arithmétique. Ensuite, à l'aide des informations provenant des sondages correspondants, des lignes ont été tracées montrant les pourcentages de particules inférieures à  $16\mu$ . Le graphique est présenté à la (figure 14). Comme indiqué, le graphique est valable pour les dépôts naturels non perturbés situés sous la nappe phréatique. Les noms des sols indiqués sur l'abaque sont basés sur la terminologie utilisée par le laboratoire de mécanique des sols de Delft. En substance, Begemann (1965) a indirectement introduit le concept de rapport de frottement ( $R_f$ ) qui représente l'inverse de la pente des droites de la (figure 14) tel que :

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \quad \dots \quad (8)$$

## Chapitre 2 : Classification des sols à partir de l'essai CPT

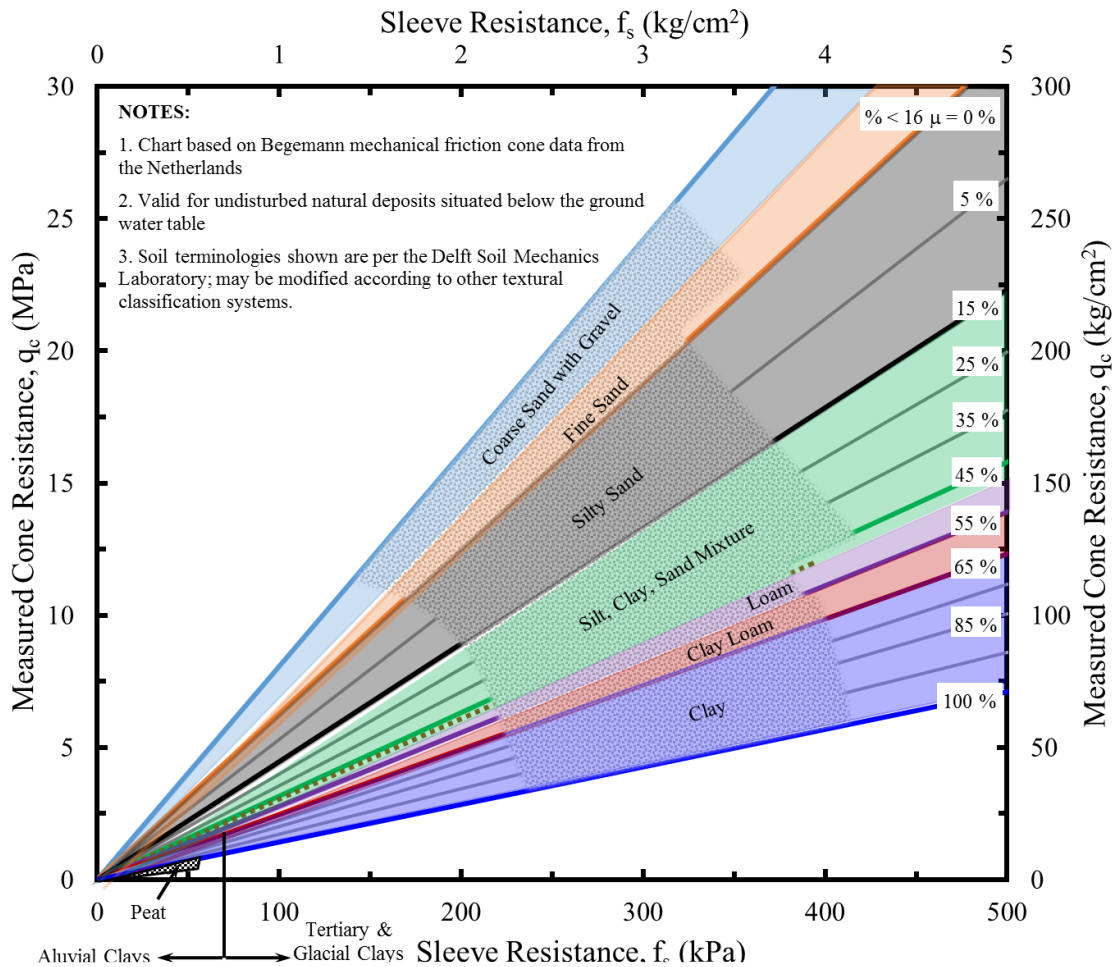


Figure 14: Classification de sol d'après Begemann (1965)

### b. Classification de sol selon Robertson et al. (1986) :

Robertson et al. (1986) ont mis au point une méthode de classification du type de comportement du sol à partir des valeurs mesurées de la résistance à la pénétration ( $q_c$ ), et du frottement latéral local ( $f_s$ ).

Ils ont proposé un abaque utilisant la résistance de pointe corrigée ( $q_t$ ) sur une échelle logarithmique et le rapport de frottement ( $R_f$ ) sur une échelle arithmétique comme données d'entrée tel que :

$$q_t = q_c + (1-a) \cdot u_2 \dots (9)$$

$$R_f = \frac{f_s \cdot 100}{q_c} \dots (10)$$



## Chapitre 2 : Classification des sols à partir de l'essai CPT

Avec:

**a**: Coefficient d'efficacité de la pointe

**$u_2$** : Pression interstitielle

Robertson et al. (1986) ont identifié douze zones avec différents types de comportement du sol, comme la montre la figure ci-dessous. L'abaque est représenté avec la résistance en pointe corrigée ( $q_t$ ), mais peut être utilisé avec la résistance ( $q_c$ ) puisque la différence est insignifiante, sauf dans le cas des sols fins mous avec des pressions interstitielles importantes. Les types de sol correspondants aux douze zones sont donnés dans le tableau n° 2.

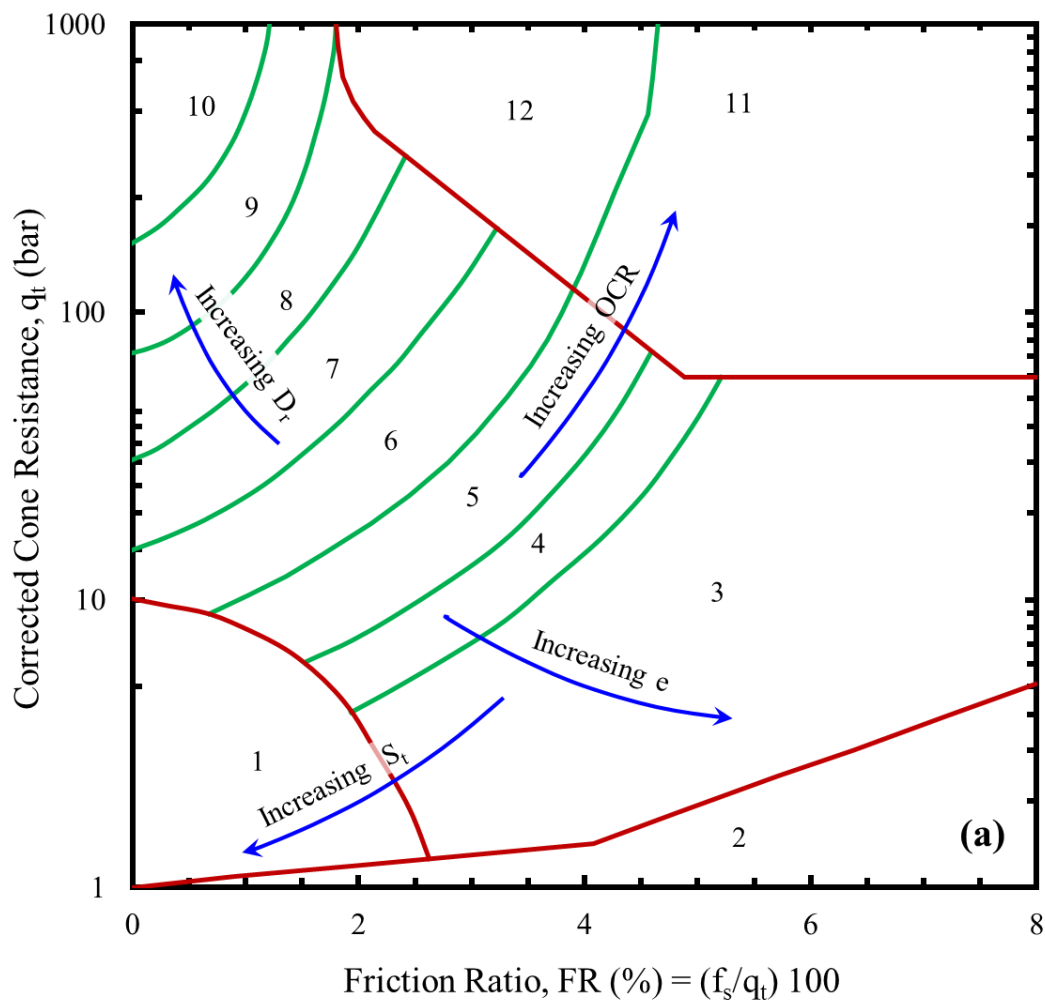


Figure 15: Classification de sol selon Robertson et al. (1986)

## Chapitre 2 : Classification des sols à partir de l'essai CPT

Tableau 2: Classification de sol selon Robertson (1986)

Zones	Type de sol
1	Sol sensible, à grains fins
2	Sol organique
3	Argile
4	Argile limoneuse à argile
5	Limon argileux à argile limoneuse
6	Limon sableux à limon argileux
7	Sable limoneux à limon sableux
8	Sable à sable limoneux
9	Sable
10	Sable graveleux à sable
11	Sol très raide, à grains fins *
12	Sable à sable argileux *

\* Sol surconsolidé ou cimenté

### c. Classification de sol selon Robertson 1990 (abaque normalisé) :

En 1990, Robertson a présenté des raffinements à sa classification de (1986) et a désormais identifié seulement 9 zones. Il a proposé deux abaques basés sur  $(Q_t-F_r)$  et  $(Q_t-B_q)$  avec des échelles logarithmiques. La résistance de pointe normalisée ( $Q_t$ ), le rapport de frottement normalisé ( $F_r$ ) et le rapport de pression interstitielle normalisé ( $B_q$ ) sont donnés par les relations suivantes :

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \quad \dots (11)$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \quad \dots (12)$$

$$B_q = \frac{U_2 - U_0}{q_t - \sigma_{v0}} \quad \dots (13)$$

## Chapitre 2 : Classification des sols à partir de l'essai CPT

Où  $U_0$  : Pression interstitielle du sol au repos  $U_2$  : Pression interstitielle

$\sigma_{v0}$ : Contrainte verticale initiale totale  $\sigma'_{v0}$ : contraint verticale initiale effective

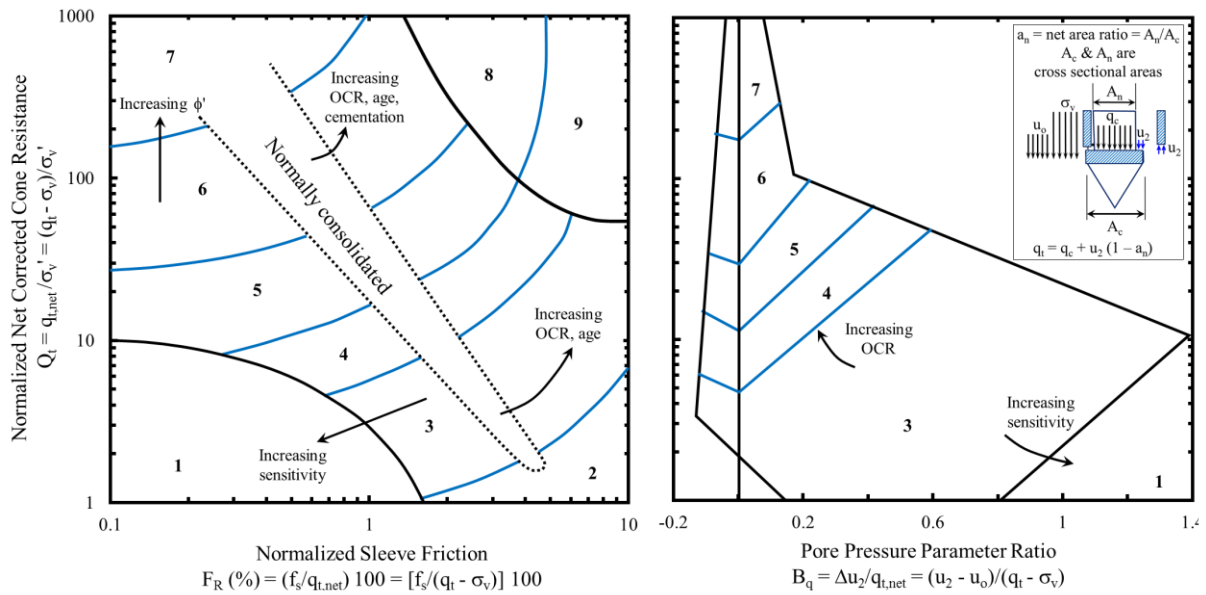


Figure 16: Classification du sol selon Robertson 1990

## Chapitre 2 : Classification des sols à partir de l'essai CPT

Les neuf zones sont définies dans le tableau n° 3.

Tableau 3: Classification de sol selon Robertson (1990)

Zones	Type de sol
1	Sensible, à grains fins
2	Sols organiques – Argile
3	Argile - Argile limoneuse à argile
4	Mélanges de limons - Limon argileux à argile limoneuse
5	Mélanges de sables - sable limoneux à limon sableux
6	Sables - Sable propre à limon sableux
7	Sable graveleux à sable dense
8	Sable très raide à sable argileux *
9	Très raide, à grains fins *

\* Sol surconsolidé ou cimenté

Robertson (1990), recommande l'abaque (Qt-Fr) qui est généralement plus fiable, étant donné que les pressions interstitielles de pénétration CPT (U2) peuvent souffrir d'un manque de répétabilité dû à la perte de saturation, surtout lorsqu'ils sont effectués dans des endroits où la nappe phréatique est profonde et (ou) dans des sols très raides. La résistance de frottement latéral local (fs) est souvent considérée comme moins fiable que la résistance à la pénétration (qc) en raison des variations dans la conception du cône. En 2009, Robertson a également montré que, dans les sols mous, les abaques normalisé ne sont pas trop sensibles aux variations de (fs).

Jefferies et Davies (1993) ont identifié qu'un indice de type de comportement du sol, (Ic), pourrait représenter les zones dans l'abaque normalisé où (Ic) est essentiellement le rayon des cercles concentriques qui définissent les limites du type de sol (voir tableau ci-dessous). (Ic) est défini comme suit :

$$I_c = \sqrt{(3.47 - \log(Q_t))^2 + (\log(F_r) + 1.22)^2} \dots\dots (14)$$

## Chapitre 2 : Classification des sols à partir de l'essai CPT

\*N/A : not applicable

Zones	Type de sol	Ic
1	Sensibles, à grains fins	N/A*
2	Sols organiques- Argiles	> 3.6
3	Argiles- Argiles limoneuse à argiles	2.95-3.6
4	Mélange de limons- Limon argileux à argile limoneuse	2.60-2.95
5	Mélange de sables- Sable limoneux à limon sableux	2.05-2.60
6	Sables- Sable propre à limon sableux	1.31-2.05
7	Sable graveleux à sable dense	<1.31
8	Sable très raide à sable argileux	N/A*
9	Très raides à grains fins	N/A*

Tableau 4: Représentation des zones SBT avec l'indice de comportement (Ic)

### d. Classification de sol selon Robertson 2010 (abaque non-normalisé) :

Le premier abaque de Robertson (1986) est basé sur la résistance corrigée du cône ( $q_t$ ) qui nécessite des mesures de la pression interstitielle pour effectuer la correction. Cependant, la différence entre ( $q_c$ ) et ( $q_t$ ) est généralement faible, sauf dans les sols très mous à grains fins. Par conséquent, l'abaque de la figure 15 est souvent utilisé avec succès avec les données CPT de base ( $q_c$ ) et ( $f_s$ ) dans la plupart des sols, puisque les sols sont essentiellement frictionnels et que la résistance et la rigidité augmentent avec la profondeur. Les paramètres normalisés sont plus cohérents avec le comportement in situ du sol. Dans le but d'unifier les 12 zones identifiés initialement avec les 9 zones de l'abaque normalisé (Robertson 1990), Robertson (2010) a fourni une mise à jour en termes de résistance de cône sans dimension  $q_c/p_a$  ( $p_a$  : pression atmosphérique = 1 bar) et  $R_f$  sur des échelles logarithmiques (figure 17).

## Chapitre 2 : Classification des sols à partir de l'essai CPT

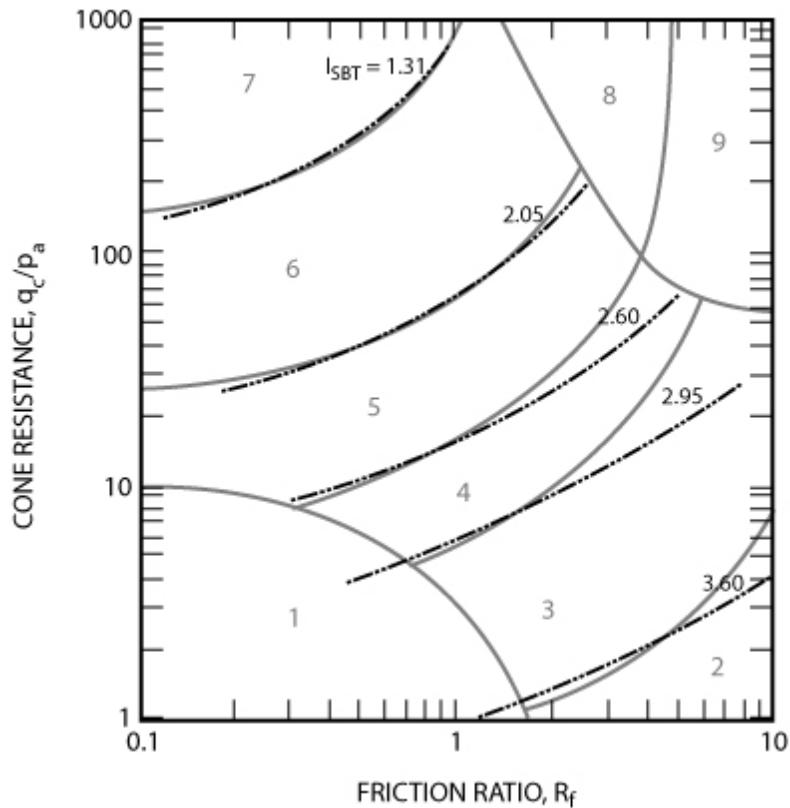


Figure 17: Classification de sol selon Robertson (2010)

Robertson et Wride, (1998) ont modifié la définition de ( $I_s$ ) pour l'appliquer à l'abaque ( $Q_t - Fr$ ) de Robertson (1990). Lorsque l'abaque SBT non normalisé est présenté sur des échelles log-log, ( $I_s$ ) est défini comme suit :

$$I_s = \sqrt{(3.47 - \log(qc/pa))^2 + (\log(Rf) + 1.22)^2} \dots (15)$$

L'indice ( $I_s$ ) non normalisé est essentiellement le même que le ( $I_c$ ) normalisé mais n'utilise que les mesures CPT de base. En général, lorsque la contrainte effective verticale est comprise entre 50 kPa et 150 kPa il y a souvent peu de différence entre les abaques normalisé et non normalisé.

### - Comparaison entre Robertson (1986) et Robertson (2010) :

Robertson et al (1986) et Robertson (2010) ont souligné que les abaques basés sur le CPT sont prédictif du type de comportement du sol, puisque le cône répond au comportement mécanique in situ du sol et non directement aux critères de classification du sol basés sur la

## Chapitre 2 : Classification des sols à partir de l'essai CPT

distribution granulométrique et la plasticité du sol. Ces deux critères fournissent des renseignements complémentaires aux essais in situ et ils sont souvent liés au comportement du sol in situ.

Le premier abaque de Robertson et al (1986) est basé sur la résistance du cône ( $q_t$ ) sur une échelle logarithmique et le rapport de frottement ( $R_f$ ) sur une échelle arithmétique, tandis que l'abaque de Robertson (2010) est basé sur la résistance de cône sans dimension, ( $q_c / p_a$ ), où ( $p_a$ ) est la pression atmosphérique ( $p_a = 1 \text{ bar}$ ) et  $R_f$  (en pourcentage), avec une échelle logarithmique pour les deux paramètres. Le nombre de types de comportement du sol a également été réduit à 9 pour correspondre à l'abaque de Robertson de 1990. Le tableau ci-dessous résume l'unification des 12 zones (Robertson et al, 1986) pour correspondre aux 9 zones (Robertson, 2010)

Tableau 5 : Comparaison entre la classification de sol de Robertson (1986) et (2010):

Zones	Robertson (1986)	Robertson (2010)
1	Sensibles, à grains fins	Sensible, à grains fins
2	Sols organiques- Argiles	Sols organiques – Argile
3	Argiles- Argiles limoneuse à argiles	Argile - Argile limoneuse à argile
4-5	Mélange de limons- Limon argileux à argile limoneuse	Mélanges de limons - Limon argileux à argile limoneuse
6-7	Mélange de sables- Sable limoneux à limon sableux	Mélanges de sables - sable limoneux à limon sableux
8	Sables- Sable propre à limon sableux	Sables - Sable propre à limon sableux
9-10	Sable graveleux à sable dense	Sable graveleux à sable dense
11	Sable très raide à sable argileux	Sable très raide à sable argileux *
12	Très raides à grains fins	Très raide, à grains fins *

## Chapitre 2 : Classification des sols à partir de l'essai CPT

### e. Classification de sol selon Eslami et Fellenius (1996) :

En 1997, Eslami et Fellenius ont développé une méthode de classification du sol basée sur la résistance effective du cône ( $q_c$ ) et le frottement latéral ( $f_s$ ). Ils ont compilé une base de données comprenant les données CPT et CPTu associées aux résultats des sondages, de l'échantillonnage, des analyses de laboratoire de 18 sources rapportant des données provenant de 20 sites dans 5 pays. Environ la moitié des cas provenaient d'essais au piézocône, CPTu, et incluaient des mesures de la pression interstitielle ( $u_2$ ). Les essais non-CPTu provenaient de sols sableux et ont été utilisés en supposant que chaque valeur ( $u_2$ ) est approximativement égale à la pression interstitielle du sol au repos ( $u_0$ ). Les valeurs de la base de données sont réparties en cinq catégories principales de types de sol énumérées ci-dessous :

- Argile et/ou limon sensibles et susceptibles de s'effondrer
- Argile et/ou limon
- Argile limoneuse et/ou limon argileux
- Limon sableux et/ou sable limoneux
- Sable et/ou gravier sableux

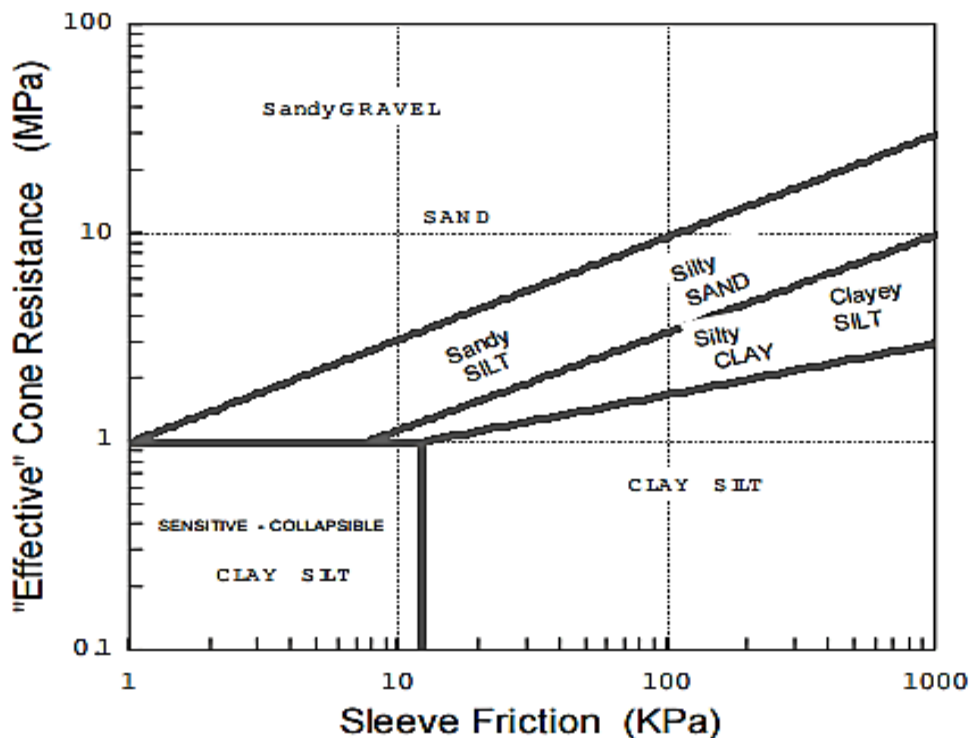


Figure 18: Classification de sol selon Eslami et Fellenius (1997)



## Chapitre 2 : Classification des sols à partir de l'essai CPT

La résistance effective du cône définie par l'équation  $q_E = (q_t - u_2)$  s'est avéré fournir une délimitation plus cohérente des enveloppes qu'un tracé de la résistance du cône seulement.

L'abaque Eslami-Fellenius est simple à utiliser et ne nécessite aucun ajustement pour estimer la contrainte effective et la contrainte totale. L'abaque est principalement destiné à l'analyse du type de sol des données CPTu. En ce qui concerne les limites entre les principales fractions de sol (argile, limon, sable et gravier), les pratiques internationales et nord-américaines s'accordent, mais des différences existent quant à la manière dont les noms des types de sol sont modifiés en fonction du contenu d'autres fractions que la fraction de sol principale.

### f. Classification de sol selon Schneider et al. (2008) :

Schneider et al. (2008) ont développé un abaque pour aider à déterminer si la pénétration CPT est drainée ou partiellement drainé. Il s'applique principalement aux sols argileux, car il nécessite la mesure de la surpression ( $\Delta u_2$ ) lors de pénétration du cône.

Schneider et al. (2008) ont fourni une différente évaluation du type de sol. Ils présentent des abaques de classification sous trois formes différentes, chacun adaptée à des cas particuliers. En plus du cadre typique du rapport des paramètres de pression interstitielle [càd,  $B_q = \Delta u_2 / (q_t - u_2)$ ], ils ont également proposé un abaque normalisé par rapport à la contrainte verticale effective  $\sigma'_{v0}$ , [càd,  $\Delta u_2 / \sigma'_{v0}$ ]. Schneider et al. (2008) ont noté que le comportement du sol est contrôlé par le degré de dissipation de la pression interstitielle pendant le chargement, le niveau de contrainte à la rupture et le ratio de surconsolidation initial. La figure suivante est l'abaque semi-log  $Q_t - \Delta u_2 / \sigma'_{v0}$  normalisé le plus utilisé :

## Chapitre 2 : Classification des sols à partir de l'essai CPT

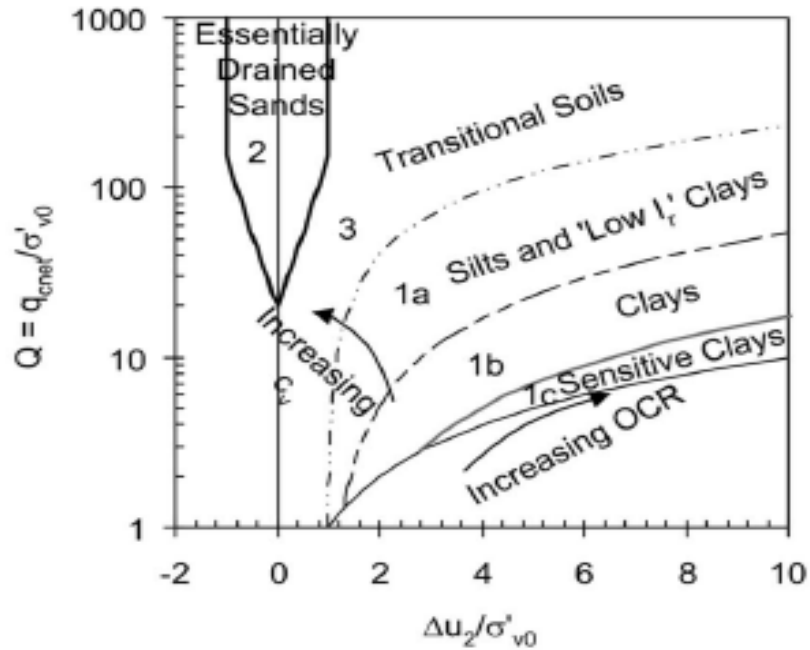


Figure 19: Classification de sol selon Schneider et al. (2008)

On distingue les cinq types de sol suivants :

Tableau 6: Classification de sol selon Schneider et al. (2008)

Zone 1a	argiles limoneuses (partiellement consolidées) et argiles (non drainées)
Zone 1b	argiles (non drainées)
Zone 1c	argiles sensibles (non drainées)
Zone 2	sables ou mélanges de sables (essentiellement drainés)
Zone 3	sols de transition (drainés, non drainés ou partiellement consolidés)

### g. Classification de sol selon Schneider et al. (2012) :

Schneider et al. (2012) ont étendu l'abaque précédent, de l'espace  $(Q_t - \Delta u_2 / \sigma'_v)$  pour la classification SBT (Schneider et al, 2008), pour inclure l'abaque  $Q_t - FR$ . Cet abaque complémentaire a également apporté de légères modifications à l'attribution des types de sol dans quelques zones de l'abaque  $(Q_t - \Delta u_2 / \sigma'_v)$ . Les modifications présentées ci-dessous avec des limites de types de sol plus hyperboliques dans le nouvel espace  $(Q_t - FR)$ .

## Chapitre 2 : Classification des sols à partir de l'essai CPT

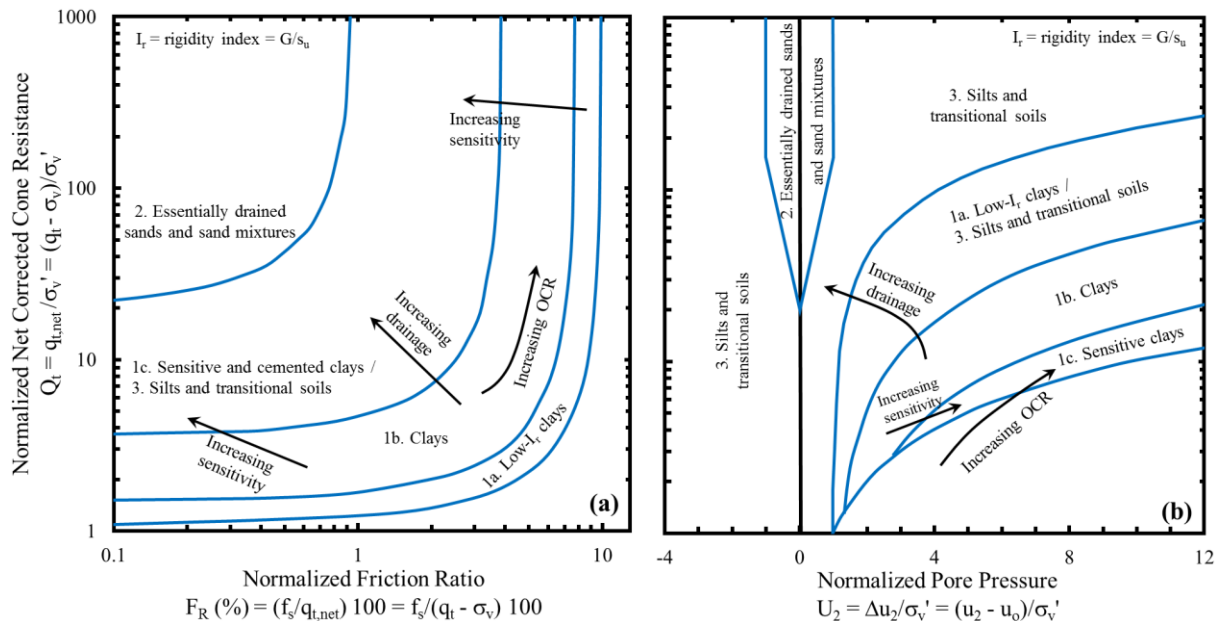


Figure 20: Classification de sol selon Schneider et al. (2012)

On distingue les 5 zones suivantes :

Tableau 7: Classification de sol selon Schneider et al. (2012)

Zone 1a	Argiles non drainées
Zone 1b	Argiles
Zone 1c	Argiles sensibles
Zone 2	Sables et mélanges de sables essentiellement drainés
Zone 3	Limons et sols de transition

### h. Classification de sol selon Robertson (2016) basé sur la microstructure :

Robertson (2016) a noté que les descriptions de sol utilisées par la plupart des classifications SBT basées sur le CPT sont celles des systèmes basés sur la texture, tels que le sable et l'argile, ce qui conduit à certaines confusions. Il a en outre détaillé que la plupart des premiers concepts de la mécanique des sols (à partir de laquelle ces descriptions de sol ont été développées) étaient basés sur des essais effectués sur des échantillons reconstitués isotropement consolidés, représentatifs des "sols idéaux" saturés. Le comportement naturel in

## Chapitre 2 : Classification des sols à partir de l'essai CPT

situ des sols pourrait être différent de ceux des sols idéaux en raison de l'influence de la macrostructure à l'échelle du dépôt (par exemple, la stratification et les fissures), ou de la microstructure à l'échelle des particules (par exemple, le collage ou la cimentation). Par conséquent, l'identification de toute structure significative dans les sols a été considérée comme importante pour comprendre leur comportement in situ et l'efficacité de tout système de classification dérivé.

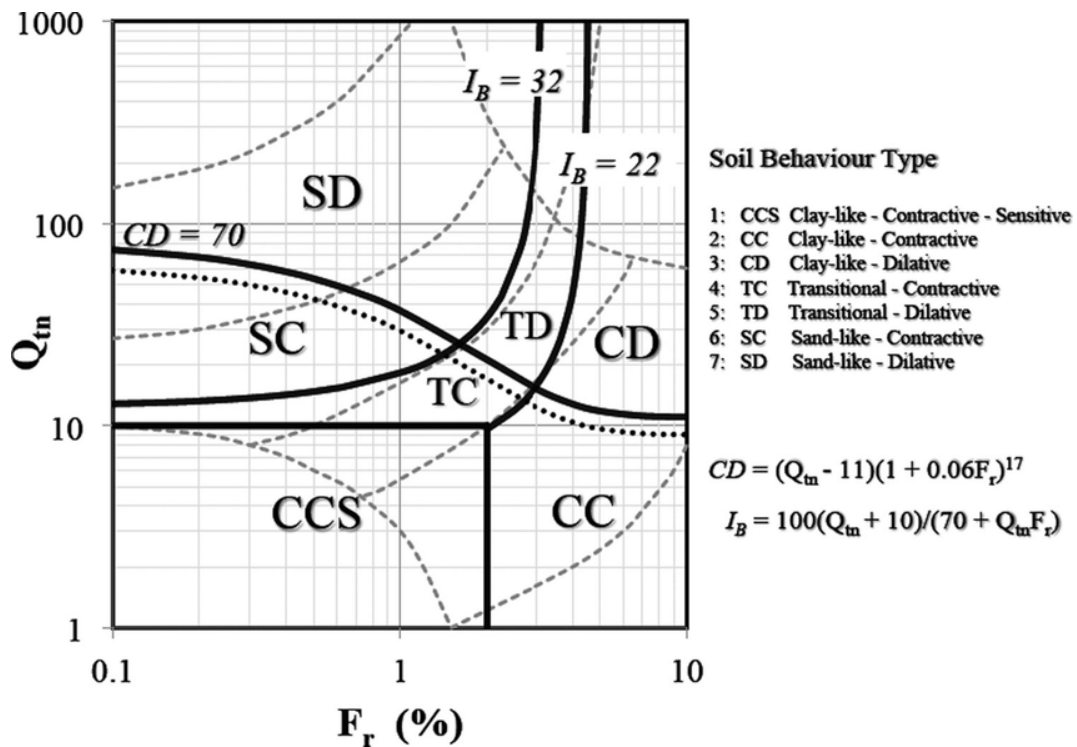


Figure 21: Proposition de tableau SBTn actualisé basé sur  $Q_{tn} - F_r$

## Chapitre 2 : Classification des sols à partir de l'essai CPT

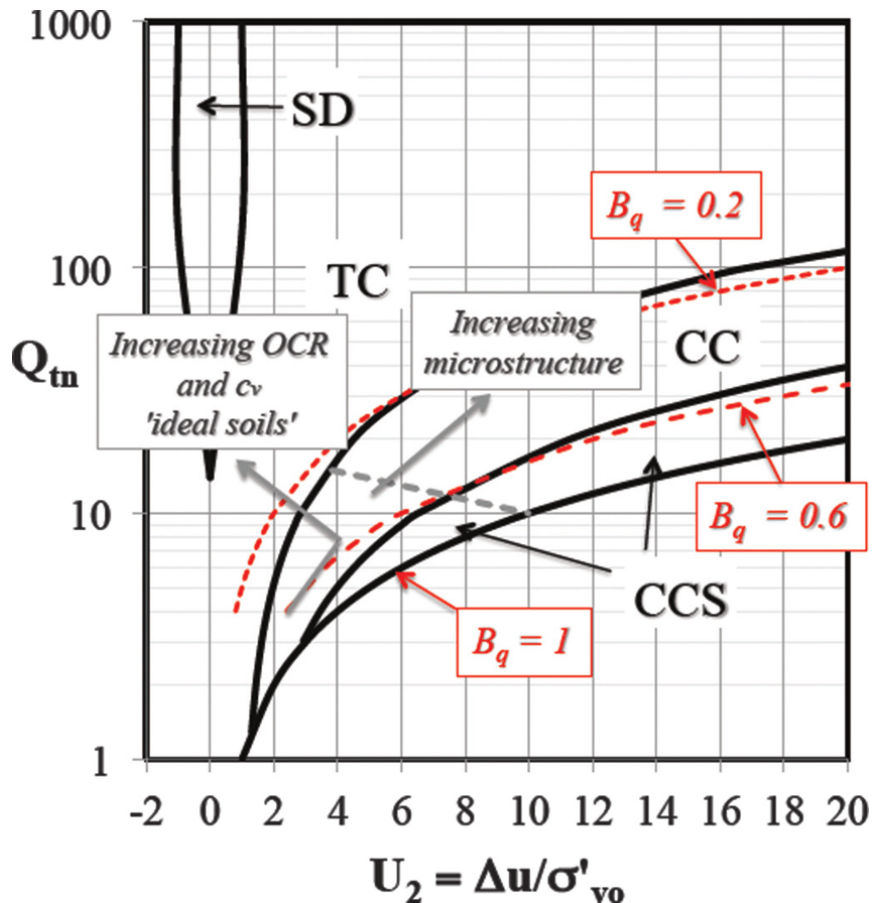


Figure 22: Abaque de Schneider et al. (2008) modifié par Robertson (2016)

Robertson (2016) a développé de nouvelles limites sur l'espace  $Q_{tn}$ -FR (%) pour séparer les sols qui sont soit contractifs soit dilatifs à de grandes déformations de cisaillement. Ceci est illustré dans la (figure 21) (marquée  $CD = 70$ ), et est également représenté par l'expression suivante :

$$CD=70 = (Q_t - 11)[1 + 0.06 Fr(\%)]^{17} \quad \dots (16)$$

CD signifie la limite contraction-dilatation, et  $Q_{tn}$  et Fr sont les mêmes que ceux définis dans Robertson et Wride (1998) et Robertson (2009). Robertson (2016) a précisé que cet abaque, qui présente également les limites des groupes des comportements de sol basées sur les descriptions des caractéristiques physiques (p. ex., sable et argile) suggérées par Robertson (1990 ; 2009), s'applique principalement aux sols ayant peu ou pas de microstructure (càd, les sols idéaux).

Suite à la suggestion de Schneider et al. (2012) pour une meilleure zonation de l'espace SBT ( $Q_{tn}$  en fonction de Fr (%)), Robertson (2016) a superposé les abaques de limites

## Chapitre 2 : Classification des sols à partir de l'essai CPT

supplémentaires basées sur une forme plus hyperbolique. Ces limites sont représentées par des lignes épaisses rouges continues dans la figure 21 et sont également définies via un indice de classification du comportement de sol modifié, tel suit :

$$I_{B(R16)} = \frac{100(Q_t+10)}{(70+Q_t F_r(\%))} \dots\dots (17)$$

Dans la figure 21, la ligne épaisse continue désignée par  $I_B = 32$  est la limite inférieure pour la plupart des sols idéaux de type sableux, tandis que celle représentée par  $I_B = 22$  est la limite supérieure pour la plupart des sols idéaux de type argileux. La région intermédiaire représentée par  $22 < I_B < 32$  est définie comme des "sols de transition" (par exemple, des sols fins à faible plasticité tels que des limons). Cette classification est également résumée dans le tableau 8. Certains sols de transition réagissent de manière partiellement drainée lors du CPT et sont également appelés "sols intermédiaires".

Tableau 8: Type de Comportement des Sols à partir de l'Indice de Classification  $I_{B16}$ )

Type de sol possible	Indice CPTu,
Sols idéaux de type sableux	$I_B > 32$
Sols idéaux de transition	$22 < I_B < 32$
Sols idéaux de type argileux	$I_B < 22$

La figure (21) inclut également (sous forme de lignes pointillées claires) les limites originales des types de comportement de sol suggérées par Robertson (1990, 2009) à des fins de comparaison et pour conserver le regroupement original basé sur des descriptions de caractéristiques physiques (par exemple, sable et argile). Comme la figure 21 présente des descriptions et des limites basées sur le comportement, elle s'applique principalement aux sols qui ont peu ou pas de microstructure.

Robertson (2016) a appliqué les nouveaux termes du type de comportement de sol proposés au graphique de Schneider et al. (2008, 2012) dans l'espace Qtn en fonction de U2, comme le montre la figure 22 (notez que la résistance nette normalisée du cône  $Q_t$  a été remplacée par Qtn). Robertson (2016) a proposé d'utiliser Bq comme indice de classification des sols pour cet abaque ; par conséquent, les courbes Bq qui coïncident avec les nouvelles limites de la SBT sont également représentés dans la figure 22. Le résumé des différents paramètres

## Chapitre 2 : Classification des sols à partir de l'essai CPT

définissant les limites des nouvelles zones du type de comportement de sol est donné dans le tableau 9. Ce tableau sert également d'aide à l'identification des sols à microstructure.

Tableau 9: Nouveau type de comportement de sol basé sur le graphique  $Q_{tn}$ - $U_2$  modifié de Schneider et al. (2008 ; 2012)

Type de sol possible	Gamme de paramètres normalisés
Sol idéal contractile	$U_2 > 0$
Sol idéal dilatif	$U_2 < 0$
Sol idéal dilatif de type argileux, CD	$U_2 < 0 ; Q_{tn} > 12$
Sol idéal contractif de type argileux, CC	$U_2 > 0 ; Q_{tn} > 12$ ou $0.2 < B_q < 0.6$
Sol idéal sensible à la contraction de type argileux, CCS	$0.6 < B_q < 1$ et $Q_{tn} > 4$
Sols présentant une microstructure significative	$U_2 > 0$ avec $Q_{tn} = 20$ et $U_2 > 10$ avec $Q_{tn} = 10$
Sol contractile avec microstructure significative	$U_2 > 4 ; Q_{tn} > 12$

## **Chapitre 3 :**

Classification de sol du site sis à Ighil Ouazoug à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT mécanique.



## Chapitre 3 : classification de sol du site sis à Ighil Ouazoug à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT mécanique.

### I. Introduction :

Ce chapitre a pour objectif l'application directe de la classification des sols selon Robertson (2010). Avant de passer à cette étape, nous allons présenter tout d'abord la banque de données exploitée pour l'élaboration de cette présente étude. Elle concerne les résultats des essais de laboratoire ainsi que ceux de l'essai CPT

### II. Présentation du projet :

Le site à étudier est destiné à recevoir trois types de logements promotionnels : promotion Sellam Ahmed (96 logements), promotion Foudil Construction (98 logements) et Tizra Immobilier (156 logements). Le site se localise au niveau du boulevard des frères Ouakouche à IghilOuazoug dans la wilaya de Bejaia. L'assiette du projet présente une topographie plate. La figure ci-dessous montre la localisation du site.



Figure 23: Localisation du site d'étude.

### **III. Aspect géologique de la région :**

La Géologie de la région de Bejaia est représentée par :

-Des terrains alluvionnaires de la vallée Soummam, secondaires et tertiaires des anticlinaux de djebel Gouraya et Adrar Oufarnou.

-Des dépôts alluvionnaires anciens et récents : basses terrasses, sables, argiles et argiles vaseuses de la vallée Soummam.

-Des brèches de pentes recimentées d'âge mio-pliocène rencontrées dans l'ancienne ville passant sous les argiles gris- blanchâtres de l'oued Sghir, on retrouve ce niveau argileux jusque dans la région de Mellala.

-Des schistes rouges et verts, des calcaires lenticulaires interstratifiés et des alternances régulières de marno-calcaires de 200 à 300 m d'épaisseur d'âge lias, jurassique des anticlinaux de djebel Gouraya et Adrar Oufarnou.

### Chapitre 3 : classification de sol du site sis à Ighil Ouazoug à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT mécanique.

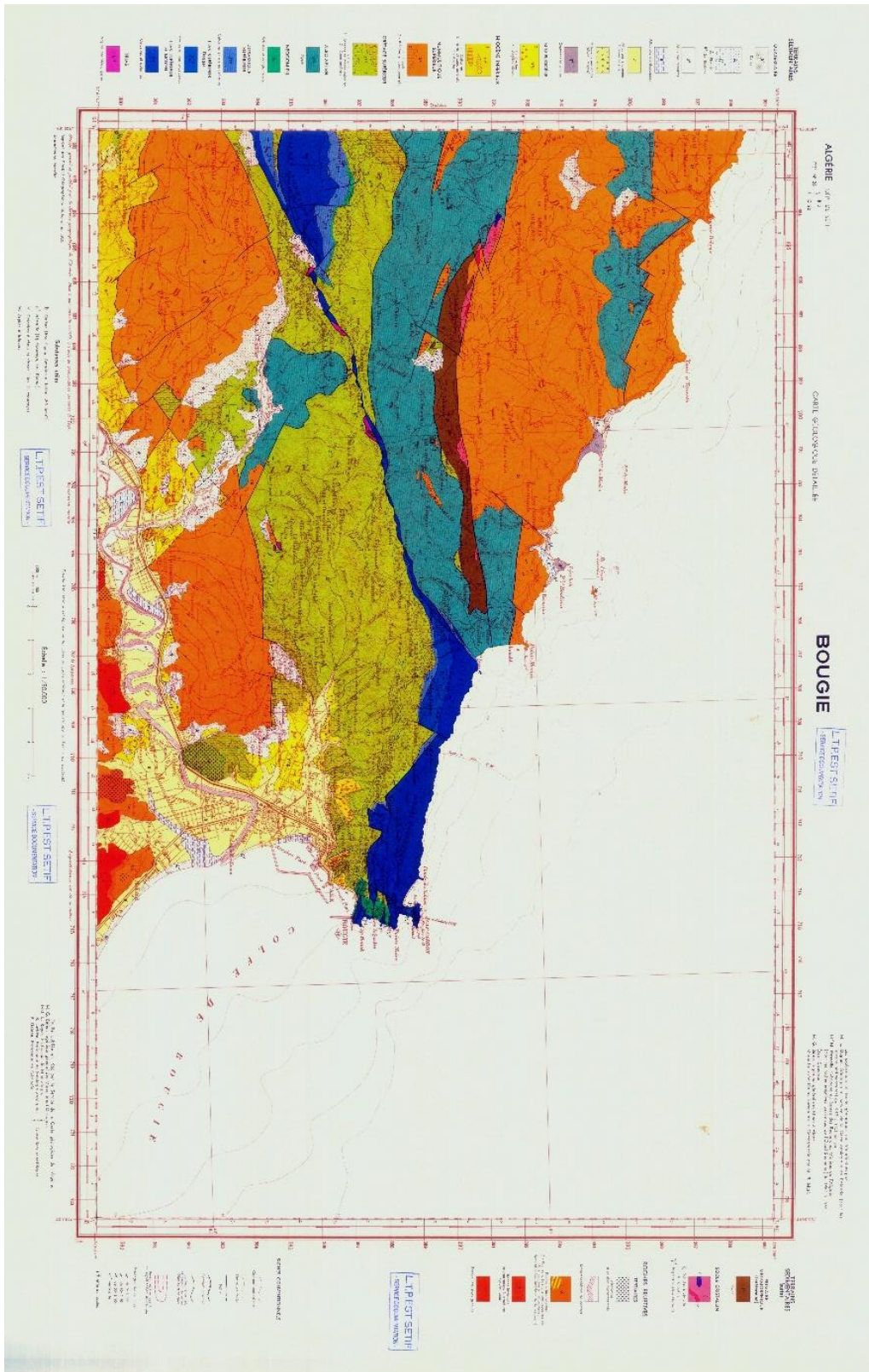


Figure 24: Carte géologique de Bejaia

#### **IV. Reconnaissance du site :**

Dans le but d'identifier les différentes couches et déterminer les paramètres du sol, une campagne de reconnaissance a été effectuée par LTPE EST de Bejaia. La campagne de reconnaissance de site des trois promotions comprend :

**Promotion 1 et 3 :** deux (02) sondages carottés et deux (02) sondages pressiométriques de 30 m de profondeur pour les deux promotions. Pour la promotion 1, un essai de pénétration statique(CPT) poussé jusqu'à une profondeur de 12 m, et trois essais CPT pour la troisième promotion.

**Promotion 2:** deux sondages carotté, deux (02) sondages pressiométriques de 40 m de profondeur et deux essais de pénétration statique poussé jusqu'à une profondeur de 20m ont été effectués, l'implantation des différents essais est montré sur la figure ci-dessous :

**Chapitre 3 : classification de sol du site sis à Ighil Ouazoug à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT mécanique.**

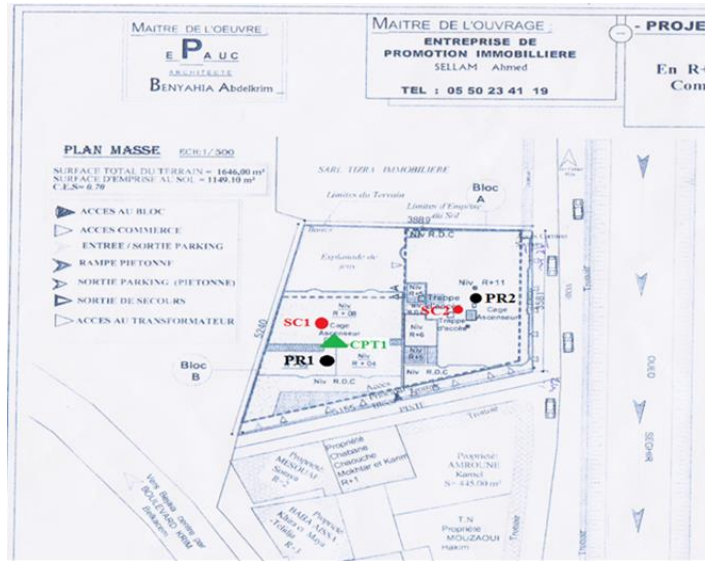


Figure 25:promotion 1

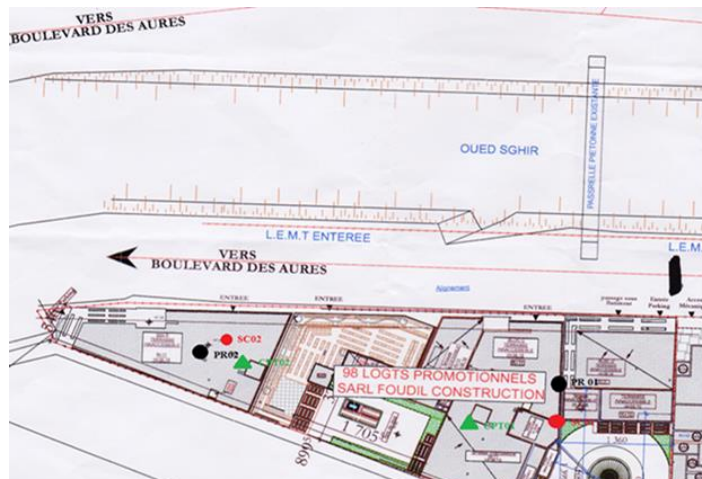


Figure 26:promotion 2

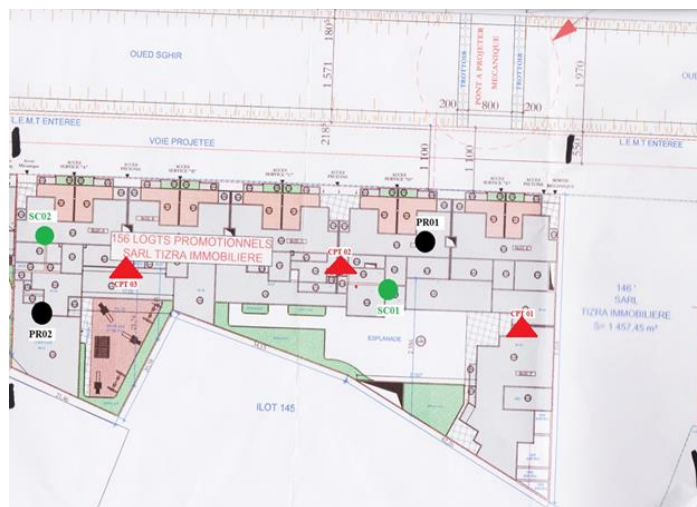


Figure 27:promotion 3

**Chapitre 3 : classification de sol du site sis à Ighil Ouazoug à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT mécanique.**

Les coordonnées des sondages et des essais in situ sont insérées dans le tableau suivant, ils serviront surtout à localiser les sondages les plus proches des essais CPT.

*Tableau 10:Les coordonnées des sondages et des essais in situ.*

	Sondages	Profondeur (m)	Coordonnées	
			X(m)	Y (m)
<b>promotion1</b>	SC 1	30	683 670	4 067 554
	SC 2		706 056	4 055 521
	SP 1		683 651	4 067 544
	SP 2		683 651	4 067 565
	CPT 1		Refus à 11.80	683 662
	<b>Promotion 3</b>	SC 1	30	0683612
SC 2		0683594		4067657
SP 1		0683613		4067620
SP 2		0683596		4067645
CPT 1		Refus à 20	0683613	4067611
CPT 2		Refus à 23	0683592	4067641
CPT 3		Refus à 22	0683581	4067665

**V. Résultats des sondages carottés :**

Les coupes lithologiques obtenues à partir des sondages carottés sont comme suit :

**Promotion 1 :**

- **Sondage carotté (SC1) :**

**0.00 – 11.50m :** Argiles limoneuses graveleuses de couleur beige.

**11.50–12.50m :** Passage alluvionnaire.

**12.50–15.00m :** Argiles limoneuses graveleuses de couleur beige.

**15.00–17.00m :** Passage alluvionnaire.

**17.00–27.00m :** Argiles limoneuses graveleuses de couleur beige.

**27.00–30.00m :** Marnes argileuses grisâtres.

**Chapitre 3 : classification de sol du site sis à Ighil Ouazoug à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT mécanique.**

- **Sondage carotté (SC 2) :**

**0.00 – 7.50m** : Argiles limoneuses graveleuses de couleur beige.

**7.50–9.00m** : Passage alluvionnaire.

**9.00–13m** : Argiles limoneuses graveleuses de couleur beige.

**13–15m** : Passage alluvionnaire

**15.00–20.50m** : Argiles limoneuses graveleuses grisâtres.

**20.50–30.00 m** : marnes argileuses grisâtres.

**Promotion 2 :**

- **Sondage carotté (SC 1) :**

**0.00 –21.60m** : Argiles limoneuses graveleuses de couleur beige.

**21.60–40m** : Marnes argileuses grisâtres.

- **Sondage carotté (SC 2) :**

**0.00–14.80m**:Argiles limoneuses graveleuses de couleur beige.

**14.80–19.0m**:Passage alluvionnaire.

**19.00 – 40.00m** : Marnes argileuses grisâtres.

**Promotion 3 :**

- **Sondage carotté (SC 1) :**

**0.00 – 2.00m** : Remblais.

**2.00 –5.00m** : Argiles graveleuses limoneuses brunâtre.

**5.00 –10.00 m** : Argiles graveleuses limoneuses de couleur grise.

**10 –12.75m** : Argiles vaseuses limoneuses de couleur noire.

**12.75 –20.00m** : Argiles limoneuses caillouteuses brunâtre.

**20.00 –30.00 m** : Marne argileuses de couleur grise.

- **Sondage carotté (SC 2) :**

**0.00 –3.70m** : Remblais.

**3.70–6.5m** : Argiles graveleuses limoneuses brunâtre.

**6.5–10.65m** : Argiles limoneuses graveleuses de couleur grise.

**10.65–19.10m** : Argiles limoneuses vaseuses de couleur noire.

**19.10–30m** : Argiles graveleuses limoneuses

## VI. Interprétation des résultats des sondages carottés :

De 0 à 21 m, on constate des argiles limoneuses pour tous les sondages, avec des passages alluvionnaires.

A partir de 21 m, on a des marnes argileuses.

### 1. Essai de laboratoire :

Les essais de laboratoire ont été effectués sur des échantillons prélevés des sondages carottés pour déterminer les caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques des sols en différentes profondeurs.

#### a. Essais physiques :

Mesure de la teneur en eau ( $W$ ) qui permet de déterminer la quantité d'eau existante dans le sol naturel (échantillon). La teneur en eau est exprimée en pourcentage, elle est donnée par :

$$W = \frac{M_w}{M_s} * 100 (\%)$$

Avec :

- $M_w$  : Masse de l'eau dans le sol (échantillon)
- $M_s$  : Masse des particules solides du sol (échantillon)
- Mesure du poids volumique sec apparent ( $\gamma_d$ ) qui est le poids sec de l'échantillon présent dans un volume donné, généralement exprimée en  $g/cm^3$ . Il est donnée par :

$$\gamma_d = \frac{W_{sec}}{V_t}$$

- Mesure du poids volumique humide ( $\gamma_h$ ) apparent qui est la somme des poids des particules solides et de l'eau d'un volume unité de sol, il est donné par :

$$\gamma_h = \frac{W_h}{V} = \frac{(W_w + W_s)}{V_t}$$

- $W_w$  : Poids d'eau contenu dans l'échantillon de sol.
- $W_s$  : Poids des grains solides contenus dans l'échantillon de sol.
- $V_t$  : Volume total de l'échantillon de sol.

On peut déterminer aussi  $\gamma_h$  à partir  $\gamma_d$  par l'équation suivante :

$$\gamma_h = \gamma_d * (1 + W)$$

#### b. Analyse granulométrique :

Elle se fait par tamisage par voie sèche après lavage pour les sols dont les éléments sont supérieurs à  $80\mu m$  et par sédimentation pour les éléments inférieurs ou égaux à  $80\mu m$ .



### Chapitre 3 : classification de sol du site sis à Ighil Ouazoug à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT mécanique.

La granularité est exprimée par une courbe granulométrique qui donne la répartition de la dimension moyenne des grains, exprimée sous forme de pourcentage du poids total du matériau.

Elle est tracée en diagramme semi-logarithmique avec :

- En abscisse, le logarithme de la dimension des ouvertures des tamis en valeurs croissantes ;
- En ordonnée, le pourcentage, en poids du matériau total, de la fraction du sol dont les grains ont un diamètre moyen inférieur à celui de l'abscisse correspondante (passant).

#### c. Limites d'Atterberg :

Ces limites sont déterminées sur la fraction de sol passant à travers le tamis 400µm. A partir des résultats obtenus, on détermine deux paramètres :

- L'indice de plasticité ( $I_p$ ) : qui définit l'étendu du domaine plastique du sol entre les limites de liquidité et de plasticité :

$$I_p = W_l - W_p$$

- L'indice de consistance ( $I_c$ ) : prend en compte la teneur en eau  $W$  du sol à l'état naturel pour la fraction inférieure à 400µm :

$$I_c = \frac{W_l - W}{I_p}$$

- L'indice de liquidité  $I_L$ :

$$I_L = \frac{W - W_p}{I_p}$$

#### d. Essai mécanique :

-Essai de cisaillement à la boîte : l'essai a pour objet de mesurer les caractéristiques de rupture : la cohésion ( $C$ ) et l'angle de frottement ( $\phi$ ) d'un échantillon de sol fin saturé soumis à un cisaillement direct selon un plan imposé, à une vitesse constante.

-Essai œdométrique : l'œdomètre est un appareil qui permet de mesurer le tassement d'un échantillon de sol sous un effort donné, et son gonflement au cours du déchargement des efforts soumis auparavant.

#### e. Analyse chimique :

Ces essais sont destinés pour la détermination de l'agressivité du sol vis-à-vis des bétons de fondations, dont :

- La teneur en carbonates.
- La teneur en insolubles
- La teneur en sulfates.

**Chapitre 3 : classification de sol du site sis à Ighil Ouazoug à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT mécanique.**

**2. Résultats des essais de laboratoires :**

**a. Analyse granulométrique :**

L'analyse granulométrique effectuée suivant la norme (NF P 94-056/NF P 94-057) fait apparaître les pourcentages dimensionnels des tamisât pour l'échantillon issu des différent sondage pour les trois promotions, les résultats sont montrés dans les tableaux n°11

*Tableau 11:Résultat de l'analyse granulométrique*

	N° du sondage	Profondeur	Fractions granulaires des échantillons (%)			
			Argiles $\Phi < 2 \mu$	Limons $2 \mu < \Phi < 63 \mu$	Sables $63 \mu < \Phi < 02 \text{ mm}$	Gravier $02 < \Phi < 63 \text{ mm}$
Promotion 1	SC1	8.50-8.95	34	35	30	0
		14.10-14.60	35	40	26	0
	SC2	24.70-25	25	30	45	0
		6.70-7	30	35	35	0
		16.50-16.90	25	25	50	0
23.5-24	48	35	17	0		
Promotion 2	SC1	10.10-10.60	32	56	12	0
		18-18.45	35	53	12	0
	SC2	5.05-5.40	40	53	3	0
		11.55-12	35	38	25	1
		19.40-19.9	33	52	14	1
Promotion 3	SC1	3.45-3.75	60	40	0	0
		11.25-11.55	25	40	35	0
	SC2	5.05-5.50	35	48	13	4
		10.20-10.65	55	40	5	0

**Chapitre 3 : classification de sol du site sis à Ighil Ouazoug à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT mécanique.**

**-Commentaire :**

Selon la classification des sols adoptés par L.C.P.C, les échantillons analysés sont essentiellement des sols fins, représentés par des limons argileux sableux pour la promotion 1 et la promotion 2 et des limons argileux sableux ou des argiles limoneuses pour la promotion 3.

**b. Limites d'Atterberg :**

Le tableau ci-dessous montre l'interprétation selon Casagrande des résultats obtenus à partir des limites d'Atterberg. (Limites de liquidité, plasticité, indice de plasticité et de consistance selon la norme NF P 94-051).

*Tableau 12: Résultats obtenus à partir les limites d'Atterberg.*

	N° du sondage	Profondeur (m)	WL (%)	WP (%)	IP (%)	IC	Classification du sol d'après Casagrande
Promotion 1	SC1	8.50-8.95	44.88	25.74	19.14	1.52	Argiles peu plastiques
		14.10-14.60	40.95	26.45	14.49	1.50	
		24.70-25	35.80	20.99	14.81	1.34	
	SC2	6.70-7	42.36	27.21	15.15	1.44	
		16.50-16.90	33.90	23.47	10.42	1.45	
		23.5-24	35.34	25.08	10.26	1.56	
Promotion 2	SC1	10.10-10.6	49.50	25.30	24.20	1.24	Argiles peu plastiques
		18-18.45	41.40	25.50	15.90	1.07	
	SC2	5.05-5.40	51.74	32.44	19.30	1.64	
		11.55-12	45.40	19.66	25.74	0.94	
		23.5-24	45.15	26.15	19	1.18	
Promotion 3	SC1	3.45-3.75	50.29	32.88	17.41	1.37	Sol organique très plastique
		11.25-11.55	-	-	-	-	-
		9-9.40	46.01	26.71	19.30	1.03	Argiles peu plastiques
	SC2	5.05-5.5	41.99	28.51	13.48	1.74	Limon et sols organiques peu plastique
		10.20-10.65	35.34	30.67	22.86	1.27	Sols organiques très plastique

**Chapitre 3 : classification de sol du site sis à Ighil Ouazoug à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT mécanique.**

**-Commentaires :**

La représentation des résultats des limites sur le diagramme de Casagrande indique que les sols sont des argiles peu plastiques et consistantes. Pour la promotion 1et 2 .Et des argiles organique peu a très plastique et consistantes pour la promotion 3.

**c. Caractéristiques physiques :(NF P 94-050 1995/ NF P 94-0.53 1991)**

*Tableau 13:Caractéristique physique*

	N° du Sondage	Profondeur (m)	Teneur en eau Wn (%)	Densité humide $\gamma_h$ (t/m <sup>3</sup> )	Densité sèche $\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	Degré de saturation Sr (%)
<b>Promotion1</b>	<b>SC1</b>	8.50-8.95	15.69	2.11	1.82	88.34
		14.10-14.60	19.21	2.06	1.73	92.78
		24.70-25	15.95	2.12	1.18	90.96
	<b>SC2</b>	6.70-7	20.50	2.08	1.72	98.73
		16.50-16.90	18.98	2.13	1.78	97.02
		23.5-24	19.36	2.13	1.78	98.62
<b>Promotion2</b>	<b>SC1</b>	10.10-10.6	19.35	2.12	1.77	94.13
		18-18.45	24.27	2.07	1.66	99.57
	<b>SC2</b>	5.05-5.40	20.05	2.09	1.73	92.27
		11.55-12	21.01	2.06	1.70	97.95
		23.5-24	22.57	2.06	1.65	96.87
	<b>Promotion3</b>	<b>SC1</b>	3.45-3.75	26.35	1.97	1.56
11.25-11.55			-	1.37	0.804	80.47
9-9.40			25.94		-	-
<b>SC2</b>		5.05-5.50	18.50	2.08	1.752	92.45
		10.20-10.65	24.45	1.96	1.57	92.34

**Chapitre 3 : classification de sol du site sis à Ighil Ouazoug à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT mécanique.**

**-Commentaire :**

Les valeurs de  $S_r > 80\%$  indiquent que les sols sont saturés pour les trois promotions et les valeurs de la densité sèche sont élevées sauf pour la profondeur 11.25-11.55 de la promotion 3 les sols sont moyennement dense.

**d. Essai mécanique (essai de cisaillement à la boîte) : Norme (XP P94-071-**

1)

*Tableau 14:Caractéristiques mécaniques*

	N° du sondage	Profondeur (m)	Résistance au cisaillement		Compressibilité à l'odomètre		
			Cu (bar)	$\Phi^\circ$	Cc	Cg	Pc (bar)
Promotion1	SC1	8.50-8.95	0.98	12	0.19	0.05	2.23
		14.10-14.60	0.89	4	0.15	0.05	1.37
		24.70-25	0.93	2	0.2	0.04	1.84
	SC2	6.70-7	0.8	7	0.2	0.07	1.87
		16.50-16.90	0.73	2	0.18	0.03	1.05
		23.5-24	1.07	8	0.14	0.09	1.06
Promotion2	SC1	10.10-10.6	1.17	14	0.16	0.09	2.23
		18-18.45	0.8	20	0.24	0.06	2.64
	SC2	5.05-5.40	0.8	20	0.19	0.08	1.65
		11.55-12	1.16	10	0.19	0.06	1.87
		19.40-19.9	0.11	10	0.11	0.04	2.56
Promotion3	SC1	3.45-3.75	0.297	1	0.07	0.01	1.66
		11.25-11.55	0.19	0.4	0.17	0.01	1.31
	SC2	5.05-5.50	0.293	14	0.03	0.01	1.6
		10.20-10.65	0.288	6	0.05	0.02	1

**Chapitre 3 : classification de sol du site sis à Ighil Ouazoug à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT mécanique.**

**-Commentaires :**

Selon ces résultats, les promotions 1 et 2 contiennent des argiles moyennement consistantes car ( $0.14 < C_c < 0.2$  bars la promotion 1) et ( $0.11 < C_c < 0.24$  bars la promotion 2). Pour la troisième promotion, on a des argiles moyennement consistante ( $0.03 < C_c < 0.17$ ), peu gonflantes ( $0.03 < C_g < 0.17$ ) et surconsolidées ( $P_c > \sigma'_{vo}$ ).

**e. Analyses chimiques :**

Les résultats des analyses chimiques réalisées sur des les échantillons de sol prélevés de la promotion 3 (seuls résultats fournis par le laboratoire) sont présentés dans le tableau ci-dessous :

*Tableau 15:Analyses chimiques du sol*

<b>Poromotion3</b>					
<b>N° de sondage</b>	<b>Profondeur (m)</b>	<b>Teneur exprimé en % par rapport au mat. sec</b>			<b>Teneur en anions de sulfate</b>
		<b>% insoluble</b>	<b>% carbonates</b>	<b>% gypses</b>	<b>% <math>So_4^{-2}</math></b>
<b>SC1</b>	3.45-3.75	79.60	16	0.00	0.00
	11.25-11.55	79.76	14.66	0.553	3.087
<b>SC2</b>	5.05-5.50	76.92	14	Traces	Traces
	10.20-10.65	73.06	18	0.00	0.00

**-Commentaires :**

Le taux de carbonates indique que les sols sont argileux.

**VII. Essai au pénétromètre à cône (CPT) :**

Un essai de pénétration statique (CPT) de type mécanique Gouda ayant une pointe conique de section  $A_p = 10 \text{ cm}^2$  et un manchon de frottement de section  $A_s = 150 \text{ cm}^2$  a été exécuté suivant la norme (NF P 94 -113). Les paramètres suivants sont mesurés chaque 20 cm de profondeur :

**Chapitre 3 : classification de sol du site sis à Ighil Ouazoug à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT mécanique.**

- l'effort total de penetration noté ( $Q_t$ ) en KN
- L'effort s'exercant sur le cone ( $Q_c$ ) en KN

Les paramètre deduits des mesure CPT sont :

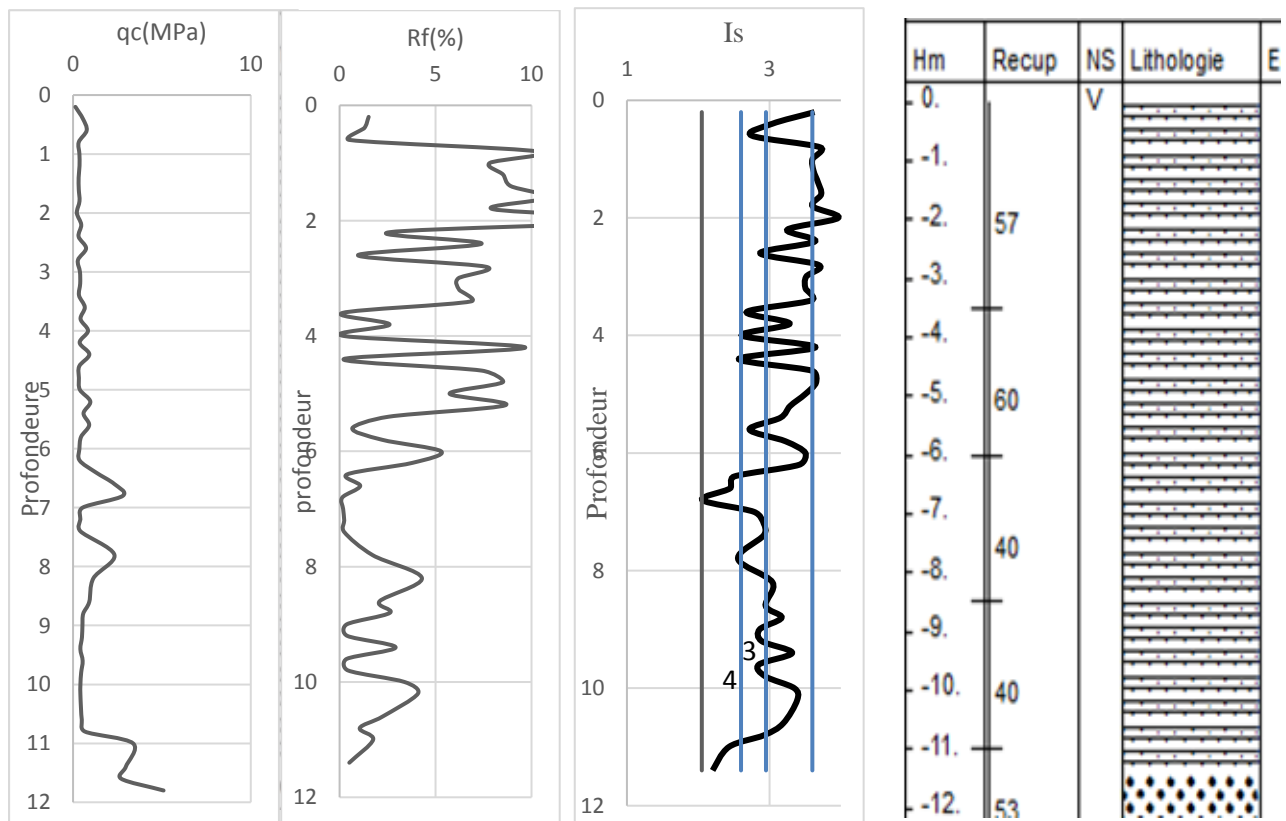
- Le rapport de frottement  $R_f$  (en %)
- L'effort de frottement latéral total  $Q_{st}$  en KN :

$$Q_{st} = Q_t - Q_c \dots (17)$$

- La résistance en pointe  $q_c$  en (MPa)
- Le frottement latéral unitaire  $f_s$  en (KPa)
- Le rapport de frottement  $R_f$  (en %)

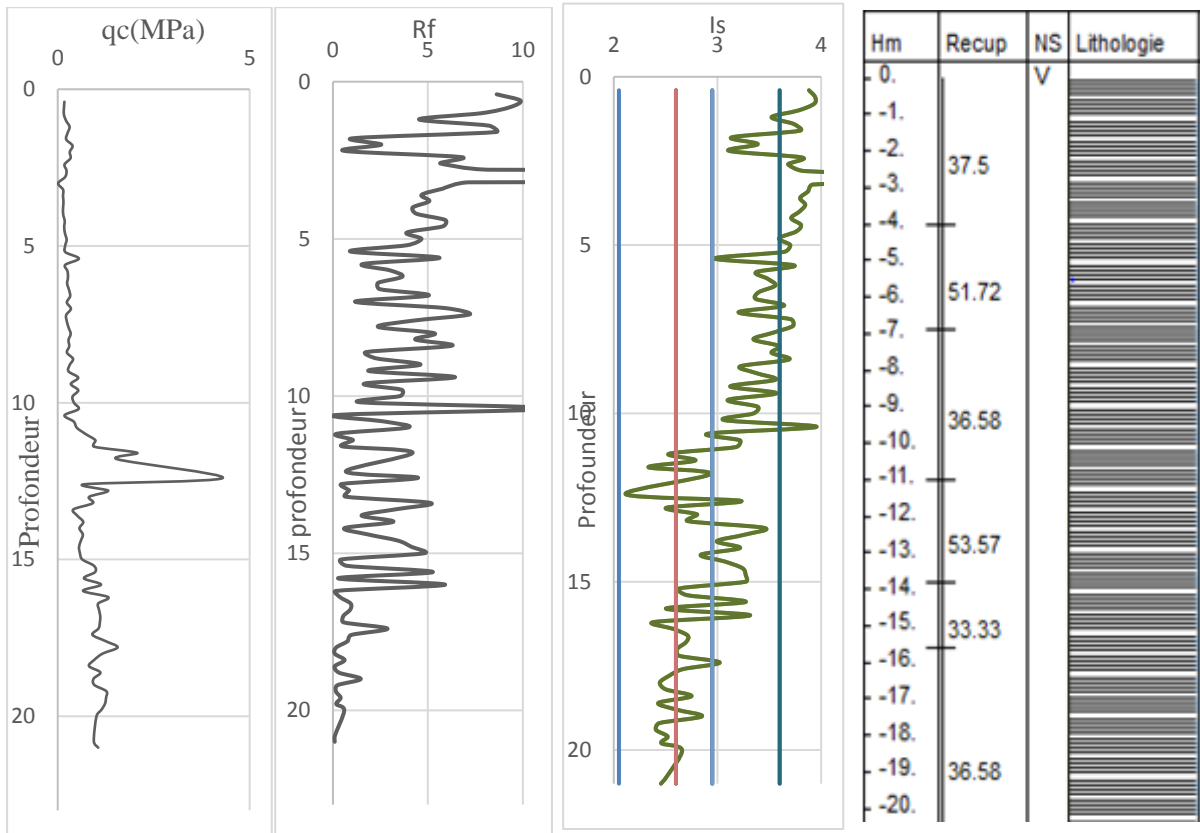
**1. Classification de sol d'après le (CPT) :**

Pour classifier le sol suivant la profondeur  $Z$ , nous avons calculer l'indice de comportement  $I_s$  en utilisant la formule 15 du chapitre 2. Les résultats sont présentés sous forme graphique en fonction de la profondeur ( $Z$ ) atteinte par la pointe du cone.



**Chapitre 3 : classification de sol du site sis à Ighil Ouazoug à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT mécanique.**

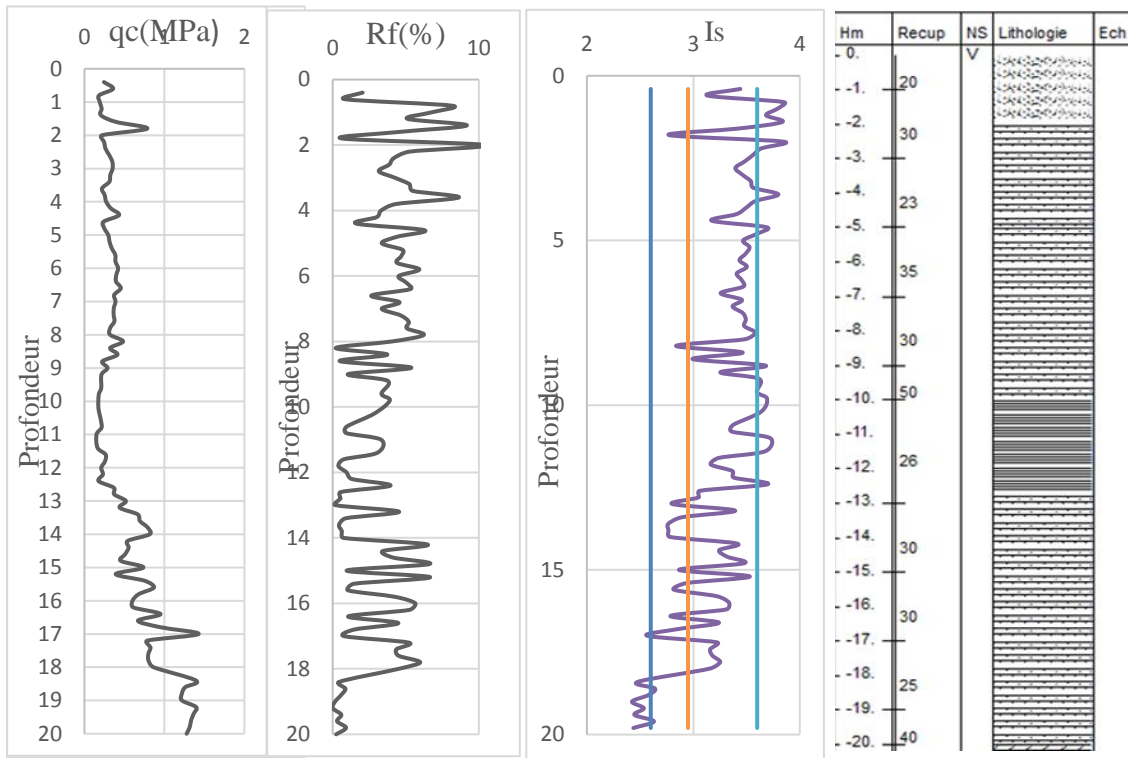
**Promotion (1)**



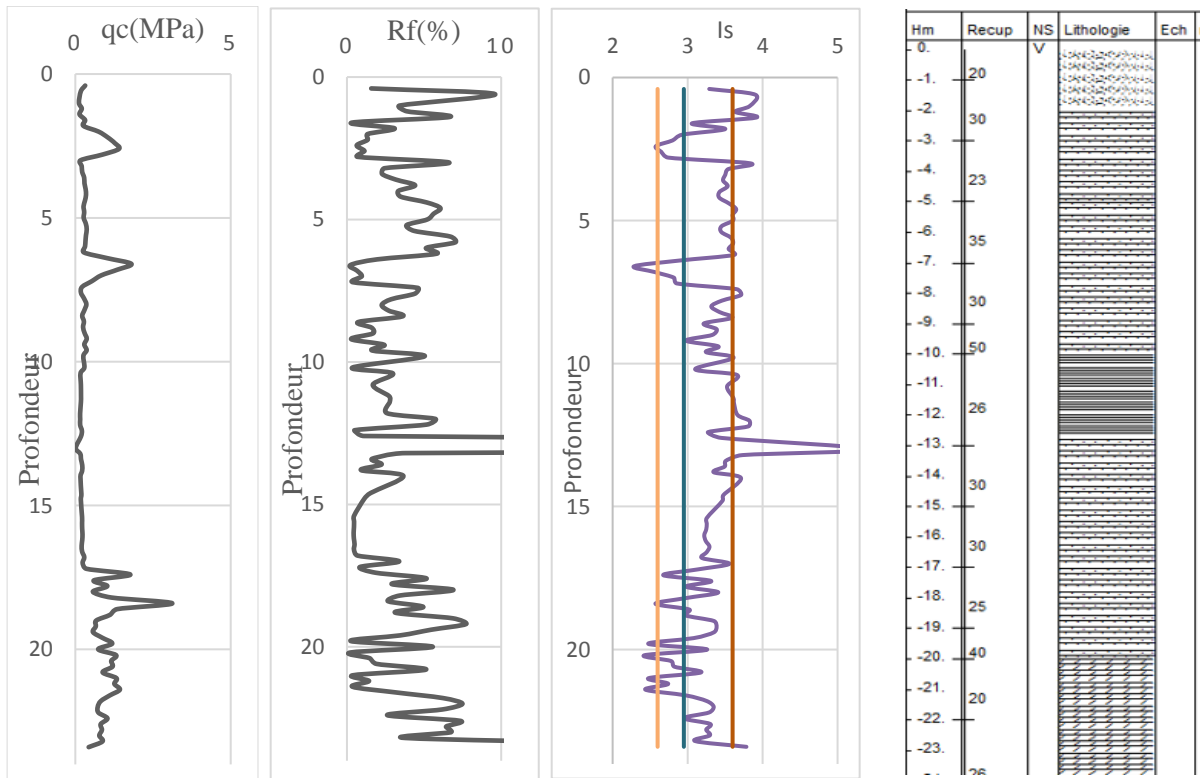
**Promotion 2**



**Chapitre 3 : classification de sol du site sis à Ighil Ouazoug à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT mécanique.**

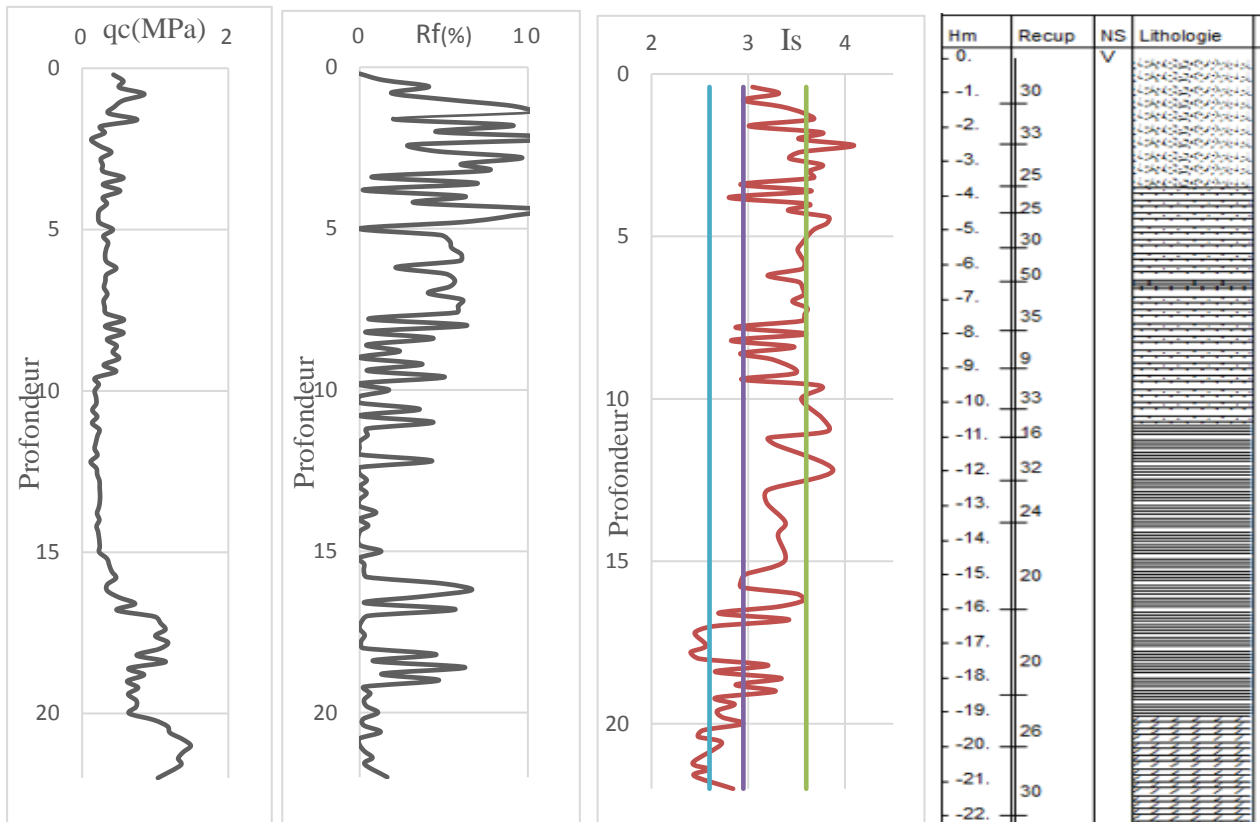


**Promotion 3 CPT1**



**Promotion 3 CPT2**

**Chapitre 3 : classification de sol du site sis à Ighil Ouazoug à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT mécanique.**



**Promotion 3 CPT 3**

**2. Interprétation des résultats des CPTs :**

**-Promotion 1 et 2 :**

Les abaques présentent la résistance de pointe ( $q_c$ ), le rapport de frottement ( $R_f$ ) et l'indice de comportement ( $I_s$ ) en fonction de la profondeur pour la promotion 1 et 2. On constate que la résistance ( $q_c$ ) varie très peu en fonction de la profondeur, avec des pics à 7 m et entre 11 m et 12 m pour la promotion 1 et un pic à 12 m pour la promotion 2. Le rapport de frottement fluctue rapidement en surface pour les deux promotions et moins en profondeur (à partir de 6 m pour la promotion 1 et de 11 m pour la promotion 2). La variation de l'indice ( $I_s$ ) pour la promotion 1 est :

- **De 0.5 à 2m :** Le  $I_s$  est dans la zone 2 qui correspond à une argile organique d'après l'abaque ( $I_s$ ) de la promotion 1

### **Chapitre 3 : classification de sol du site sis à Ighil Ouazoug à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT mécanique.**

- **De 2 à 12 m :** L'indice (Is) fluctue dans les zones 3 et 4, ce qui correspond (d'après l'abaque de Robertson) à une argile à argile limoneuse. On observe deux pics dans la zone 5 à 7 et 11 m ce qui indique probablement des passages sableux.

Pour la promotion 2, on a :

- **De 0 à 5,5 m :** L'indice (Is) indique une argile organique (zone 2) d'après l'abaque (Is) de la promotion 2
- **De 5,5 à 11 m :** L'indice (Is) est dans la zone 3 avec un pic dans la zone 2 à 10,5 m de profondeur
- **De 11 à 20 m :** L'indice (Is) fluctue entre les zones 3 et 4, ce qui correspond à une argile à argile limoneuse. On observe un pic dans la zone 5 à une profondeur de 12,5 m.

#### **-Promotion 3 :**

La résistance ( $q_c$ ) est presque constante jusqu'à 12 m pour le CPT1, 17 m pour le CPT 2 et 15 m pour le CPT 3, puis augmente par la suite. Tandis que le rapport de frottement varie rapidement le long de la profondeur pour les trois CPTs.

L'indice Is est globalement dans la zone 3 jusqu'à une profondeur de 12,5 m pour le CPT 1, 17 m pour le CPT 2 et 15 m pour le CPT3. Des passages d'argile vaseuse sont observés en surface pour les CPTs 1 et 3, à 12 m pour le CPT 2 et entre 10 et 12 m pour le CPT 3. En profondeur, le (Is) fluctue entre les zones 3 et 4 pour les trois CPTs et à partir de 19 m le (Is) se trouve dans la zone 5.

Globalement, les profils de (Is) sont en accord avec les résultats des sondages carottés qui indiquent des argiles limoneuses pour les trois promotions. Cependant, l'identification du sol à partir du Is est plus détaillée comparé aux sondages carottés puisque les mesures du CPT sont effectuées chaque 20 cm. En effet, des passages (couches fines) sableux et d'argile vaseuse ont été identifiés par le CPT pour les promotions 2 et 3 alors qu'on ne les retrouve pas dans les sondages carottés.

### **3. Classification du sol avec l'abaque de Robertson (2010) :**

Nous avons tracé l'abaque de la résistance de pointe adimensionnelle ( $q_c/p_a$ ) en fonction du rapport de frottement ( $f_r$ ) pour les Cinq CPT. La superposition de ces graphes avec l'abaque de Robertson (2010) est montrée sur les figures ci-dessous. On constate que la plupart des points se concentre dans la zone 3 et la zone 4 pour tous les essais CPT. On

### Chapitre 3 : classification de sol du site sis à Ighil Ouazoug à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT mécanique.

remarque aussi des points dans la zone 2 (surtout pour la promotion 2 (CPT 2) et la promotion 3 (CPT 1et 2)), indiquant ainsi une argile organique. On a peu de points dans la zone 1 et 5, ce qui correspond à l'argile et l'argile limoneuse.

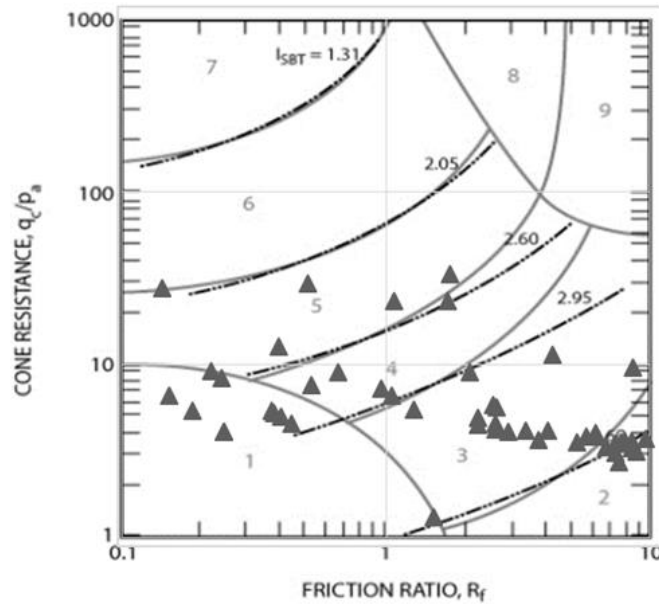


Figure 28: Classification de sol selon Robertson (2010) de la promotion 1

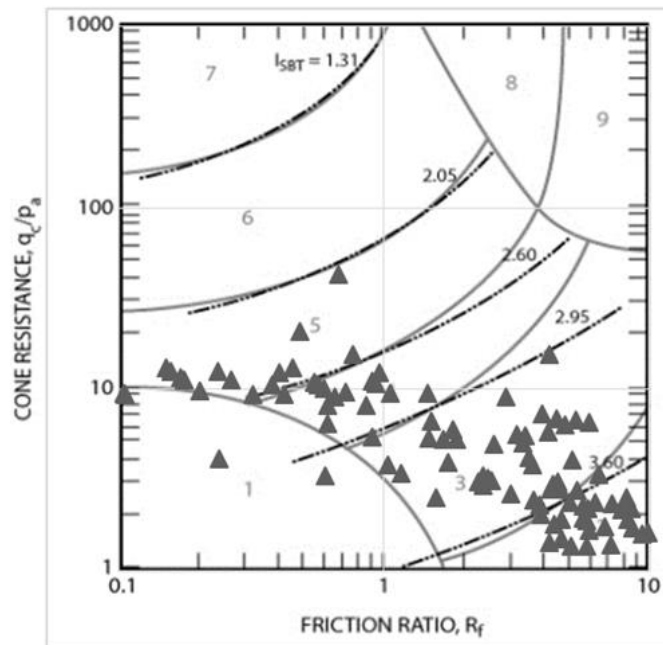


Figure 29: Classification de sol selon Robertson (2010) de la promotion 2

Chapitre 3 : classification de sol du site sis à Ighil Ouazoug à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT mécanique.

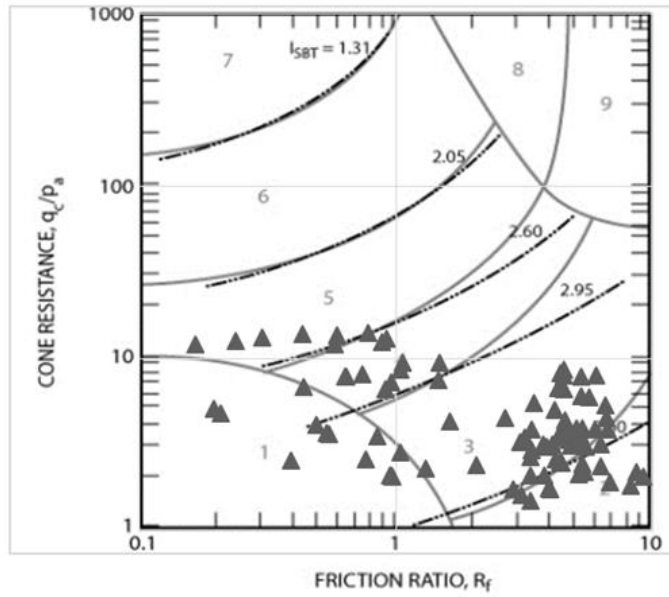


Figure 30: Classification de sol selon Robertson (2010) promotion 3 CPT 1

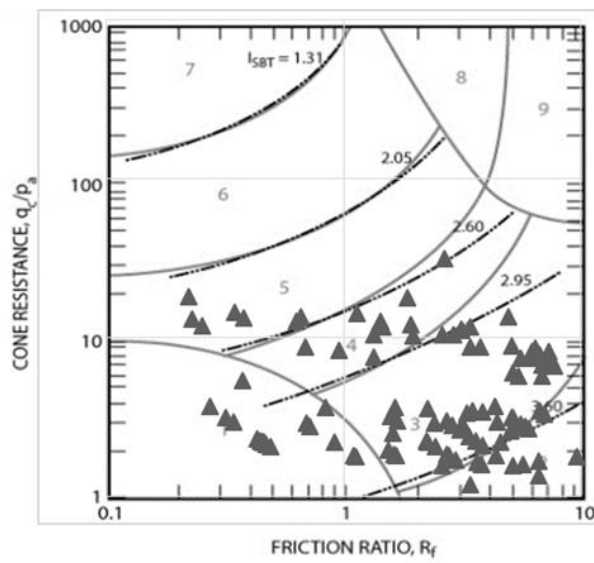


Figure 32: Classification de sol selon Robertson (2010) promotion 3 CPT 2

### Chapitre 3 : classification de sol du site sis à Ighil Ouazoug à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT mécanique.

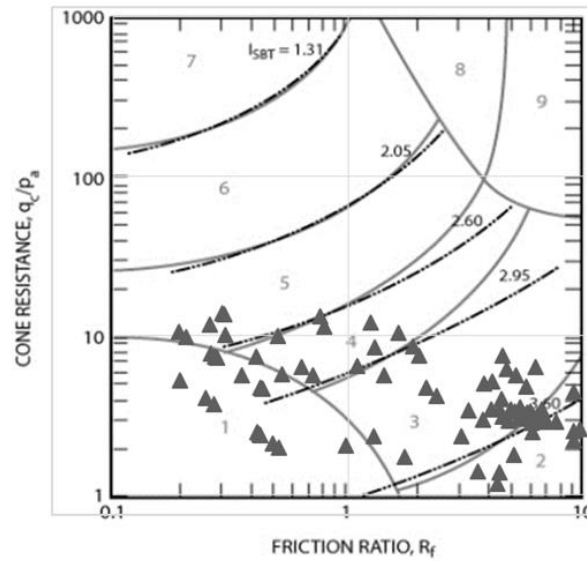


Figure 33: Classification de sol selon Robertson (2010) promotion 3 CPT 3

### VIII. Conclusion :

Les résultats des cinq essais de pénétration statique des trois projets nous ont permis de tracer les graphes de la résistance de pointe adimensionnelle ( $q_c/p_a$ ) en fonction du rapport de frottement ( $R_f$ ). La concentration de la majorité des points en zone 3 et 4 indique une argile à une argile limoneuse.

Nous avons aussi remarqué la présence de quelques points dans la zone 2 ce qui indique la présence de matières organiques dans les deux promotions 2 et 3.

## **Chapitre 4 :**

**Classifications du sol du site situé à l'arrière port de Bejaia à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT électrique**

## **Chapitre 4 : Classifications du sol du site situé à l'arrière port de Bejaïa à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT électrique**

### **I. Introduction :**

Dans ce chapitre, nous allons exposer la description et les résultats de la campagne de reconnaissance géotechnique réalisée in situ dans le cadre de la réalisation d'un mirador au niveau du cantonnement militaire EX-ENIP, Bejaia, par le Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction. Notre travail a pour objectif de classer les sols du site d'après les résultats du CPTu et les comparer par la suite avec les résultats du sondage carotté.

### **II. Présentation du projet :**

Le projet objet de cette étude consiste à réaliser un mirador (tour de surveillance) au niveau du cantonnement militaire EX-ENIP, ce dernier est classé par l'article 3.2 du RPA 99/2003 dans le groupe d'usage II : ouvrages courant d'importance moyenne.

Le site d'étude se localise au niveau de la zone industrielle de Bejaia, qui conformément à l'article 3.1 du RPA 99/2003 est classé en zone IIa (zone de sismicité moyenne). Ce dernier sera implanté sur un terrain appartenant à la société nationale SONATRACH. Il est délimité du nord par un mur de clôture, du sud-ouest par Oued Soummam, de l'est par la mer méditerranée et par un groupe de cuves de stockage cylindrique industriel de l'ouest.

### **III. Reconnaissance du site :**

Dans le but de déterminer, d'une part, la nature géologique du terrain et d'une autre, les caractéristiques géotechniques des sols en place, le Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction (LNHC-unité de Bejaia) a réalisé les essais suivant :

- Un sondage carotté d'une profondeur de douze mètres (12m) avec prélèvement d'échantillons intacts ou remaniés
- Des essais au laboratoire effectués sur les échantillons prélevés lors de la réalisation du sondage carotté.
- Un essai CPTu d'une profondeur de douze mètre (12m) avec des mesures chaque 2 cm
- 

L'implantation des essais in-situ est montrée sur la figure (34)



#### Chapitre 4 : Classifications du sol du site situé à l'arrière port de Bejaïa à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT électrique

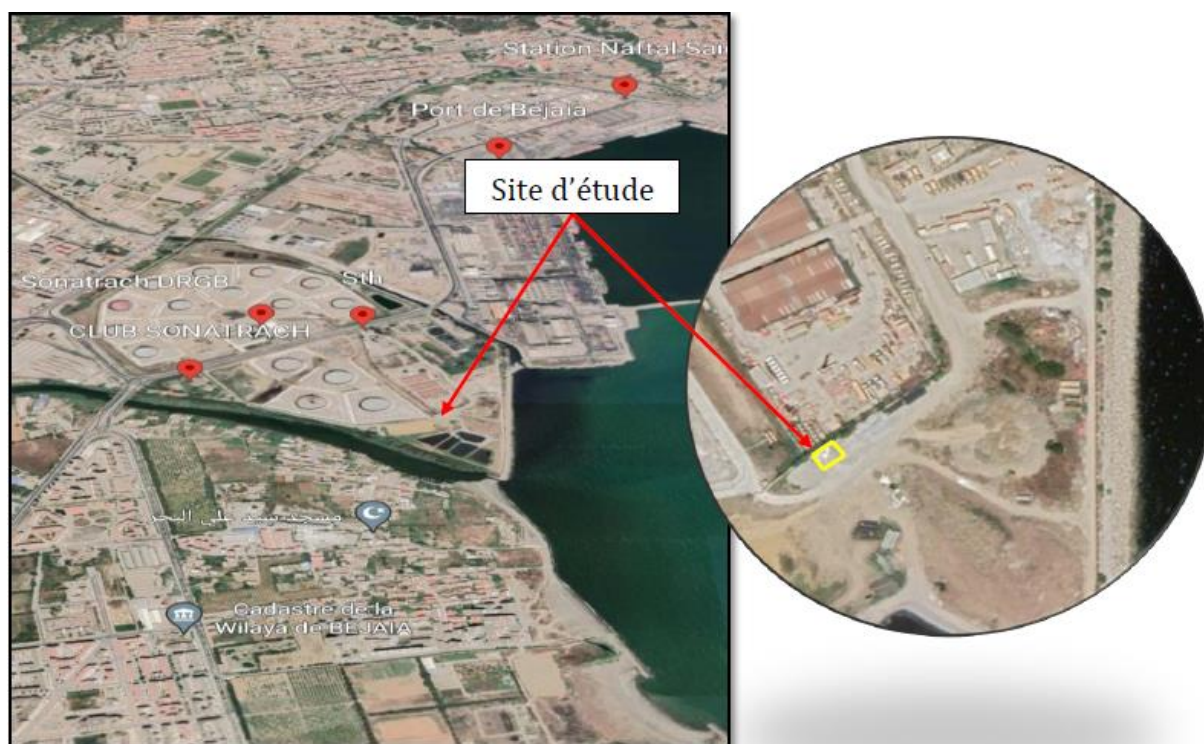


Figure 34 : Implantation du site des essais réalisés

## Chapitre 4 : Classifications du sol du site situé à l'arrière port de Bejaïa à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT électrique

### 1. Sondages carotté :

Afin de donner une description géologique du sol, le sondage a permis de décrire la nature lithologique des sols en place constituant le terrain. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 16:Description lithologique des sols en place.

Profondeur (m)	Nature de sol
0.00-0.70	Remblais
0.70-3.00	Sable limoneux graveleux, peu dense, enrobé dans une matrice argileuse, de couleur marron
3.00-6.00	Limons sableux, peu plastique, saturé, enrobé dans une matrice argileuse, de couleur grisâtre
6.00-10.50	Sables fins, limoneux, lâches et humides de couleur sombre.
10.50-12.00	Gros sables, lâches et humides de couleur grisâtre

### 2. Essais de laboratoire :

Les échantillons de sol prélevés, lors du sondage carotté réalisé, ont fait l'objet d'essais laboratoire suivants :

- Analyse granulométrique
- Détermination des densités sèche ( $\gamma_d$ ) et humide ( $\gamma_h$ ), de la teneur en eau (W) et le degré de saturation ( $S_r$ ) en pourcentage
- Détermination des limites d'Atterberg (limite de liquidité ( $W_l$ ), indice de plasticité ( $I_p$ ))
- Essai de compressibilité à l'oedomètre pour déterminer la contrainte de pré consolidation  $\sigma_c$  (bars), l'indice de compressibilité  $C_c$  (%) et l'indice de gonflement  $C_g$  (%).

**Chapitre 4 : Classifications du sol du site situé à l'arrière port de Bejaïa à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT électrique**

**a. -Analyse granulométrique (NF P 94-056/NF P 94-057) :**

Des essais d'analyse granulométrique ont été effectués sur des échantillons de sol prélevés à différentes profondeurs du sondage carotté réalisé, le tableau ci-après récapitule les résultats obtenus à différentes profondeurs :

*Tableau 17:Résultats de l'analyse granulométrique*

Type d'essai			Granulométrie (%)				Sédimentométrie (%)	
			< 5mm	< 2mm	< 0,2mm	< 0,08mm	< 25 µm	< 5 µm
Profondeur de l'échantillon (m)								
Sondage carotté	ECH N°1	1,50-2,00	89	70,33	40	21,33	/	/
	ECH N°2	3,70-4,50	100	100	99,66	96,67	69,77	33,38
	ECH N°3	5,40-6,00	100	100	99,66	98,67	58,63	22,66
	ECH N°4	8,50-8,80	100	100	99,66	67,67	50,04	14,97
	ECH N°5	10,50-11,00	94,8	75	11,4	3,6	/	/

**b. Caractéristiques physiques :**

- **Poids volumiques, teneur en eau et degré de saturation (NF P 94-050 Septembre 1995/ NF P 94-0.53 Octobre 1991 « Méthode par immersion dans l'eau ») :**

#### Chapitre 4 : Classifications du sol du site situé à l'arrière port de Bejaïa à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT électrique

La teneur en eau d'un sol est déterminée en mesurant la perte d'eau d'un échantillon représentatif après séchage à l'étuve jusqu'à une masse constante à une température de 105°C. On compare ensuite cette masse d'eau perdue (évaporée) à la masse des solides obtenus après séchage. La densité donne une indication utile sur la compacité des sols. C'est un paramètre important pour le calcul, entre autres, de la capacité portante du sol. Elle est proportionnelle à la valeur de la teneur en eau naturelle. Dans le tableau suivant sont résumés les résultats obtenus après étude des échantillons de sol au laboratoire :

*Tableau 18: Masse volumique sèche et humide, teneur en eau et degré de saturation du sol*

Sondage	Profondeur	Masse volumique "γ <sub>d</sub> " (t/m <sup>3</sup> )	Masse volumique humide "γ <sub>h</sub> " (t/m <sup>3</sup> )	Teneur en eau W (%)	Degré de saturation Sr (%)
Sondage Carotté	1,50-2,00	1.70	2.00	17.00	/
	3,70-4,50	1.48	2.07	39.91	94.7
	5,40-6,00	1.48	2.07	39.91	100
	8,50-8,80	1.45	2.05	38.06	/
	10,50-11,00	1.40	1.80	28.85	/

#### - Limites d'Atterberg (NF P 94-051) :

La fraction fine des échantillons de sols soumise au test de plasticité au moyen de l'essai des limites d'Atterberg a révélé les résultats illustrés dans le tableau suivant avec :

**W<sub>p</sub>** : Limites de plasticité

**W<sub>L</sub>** : Limite de liquidité **I<sub>p</sub>** : Indice de plasticité

**Chapitre 4 : Classifications du sol du site situé à l'arrière port de Bejaïa à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT électrique**

*Tableau 19: Limites d'atterberg*

-	<u>Profondeur(m)</u>	<u>Wl (%)</u>	<u>Wp (%)</u>	<u>Ip (%)</u>	<u>Observation</u>
<u>Sondage</u>	3,70-4,50	41,81	21,13	20,68	Sol peu plastique
	5,40-6,00	45,17	22,83	22,34	

**c. Caractéristiques mécaniques (essai de cisaillement à la boîte (XP P94-071-1)) :**

Les essais de cisaillement caractérisent le comportement du sol vis-à-vis de la déformation par l'application d'une contrainte normale, et un déplacement à vitesse constante, la composante horizontale qui s'oppose au déplacement du chariot suivant un plan de rupture caractérise la quantification de la résistance au cisaillement traduite par les mesures de la cohésion (C) et de l'angle de frottement ( $\varphi$ ) donne une possibilité de calculer la contrainte limite du sol. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

*Tableau 20: Résultats de l'essai de cisaillement à la boîte.*

Echantillon	Profondeur (m)	Consolidé, drainé	
		C <sub>CD</sub> (bars)	$\varphi_{CD}$ (°)
SC N°01	1,50-2,00	0,17	32
	3,70-4,50	0,17	27
	5,40-6,00	0,11	29

**d. Analyse chimique :**

Les résultats des analyses chimiques effectuées sur les échantillons de sol prélevés, sont représentées dans le tableau suivant :

## Chapitre 4 : Classifications du sol du site situé à l'arrière port de Bejaïa à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT électrique

Tableau 21: Résultats de l'analyse chimique

Echantillon	Profondeur	Sulfates So4	Carbonates CaCo3	Chlorures Cl	Matières organiques
SC N°01	1,50-2,00	Traces	32,12	Traces	1,93
	3,70-4,00	0,77	28,16	Traces	44,61
	4,00-4,50	1,03	22	Traces	3,76

### 3. Interprétation des essais de laboratoire :

Les résultats des différents essais de laboratoire peuvent être résumés comme suit :

- On constate d'après les valeurs des densités sèches obtenues, que le sol est peu dense (lâche), selon la norme P94-011..
- Les degrés de saturation indiquent un sol saturé ( $S_r > 80\%$ ).
- D'après les résultats du tableau n°17, on constate que plus de 50% des éléments passent au tamis 80  $\mu\text{m}$  selon LCPC, donc nous avons un sol sableux argileux peu plastique
- L'angle de frottement interne et la cohésion varient respectivement entre 27 à 32° et 0.11 à 0.17 bars donc c'est un sol fin limoneux à sableux.
- Selon la norme XP P94-011, les résultats des analyses chimiques et minéralogiques indiquent un sol faiblement organique.

## IV. Essai CPTu :

### 1. Principe de l'essai :

Un essai CPTu de type Begemann (pénétromètre statique avec mesure de la pression interstitielle) ayant comme caractéristiques, une section transversale du cône de 10 cm<sup>2</sup>, une section latérale du manchon de 150 cm<sup>2</sup>, a été effectué pour compléter les essais de laboratoire jusqu'à une profondeur de treize mètres (13m) avec des lectures chaque deux centimètre (2cm).

## Chapitre 4 : Classifications du sol du site situé à l'arrière port de Bejaïa à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT électrique

Dans ce travail, nous allons exploiter les résultats de cet essai au piézocone pour classer le sol et comparer les résultats avec le sondage carotté et les essais de laboratoire.

### 2. Interprétation des résultats de l'essai CPT :

Les mesures de l'essai CPTu est utilisé pour identifier et caractériser le sol en place en utilisant les abaques normalisés et non normalisés de Robertson (1990) et Robertson (2010). On a calculé l'indice du type de comportement de sol non normalisé ( $I_s$ ) et l'indice de comportement normalisé ( $I_c$ ) dans le but d'identifier le sol suivant la profondeur, puis les comparer avec les résultats du sondage carotté. L'indice ( $I_c$ ) et ( $I_s$ ) sont calculés en utilisant les équations n° 14 et 15 du chapitre 2.

Les deux abaques sont représentés sur la figure 34 et seront interprétés et comparés.

#### a. Comparaison de la classification des deux abaques :

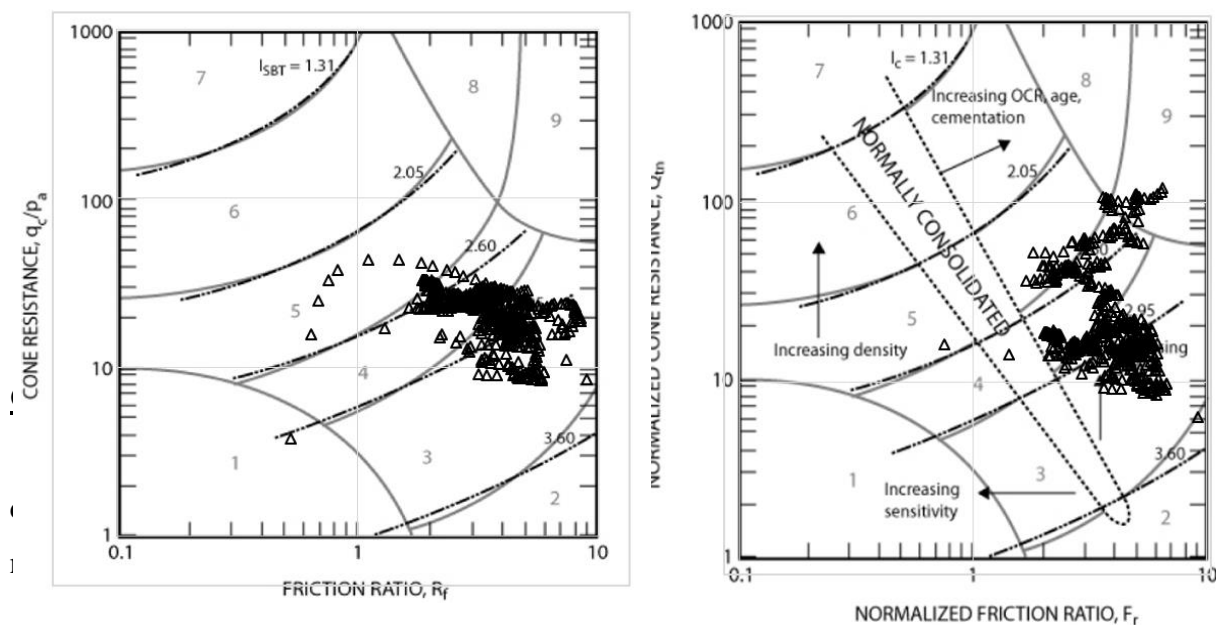


Figure 35: Aباques de classification de sol non normalisé et normalisé de Robertson (1990) (2010)

#### - Commentaire :

La figure 34 montre la représentation des données CPT sur les abaques normalisé et non normalisé. Elle montre que la majorité des points se situent dans la zone (03), (04) et (05). Pour les deux abaques, les deux zones correspondent respectivement aux limons et limons argileux selon les tableaux n° 4 et 5 du chapitre 2 .

## Chapitre 4 : Classifications du sol du site situé à l'arrière port de Bejaïa à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT électrique

Sur l'abaque normalisé il y a certains points qui, dans la zone (04) de l'abaque non normalisé, se sont décalés vers le haut ; ces points ont des valeurs ;  $Q_{tn}$  élevés dus à la contrainte effective qui est faible pour les points mesurés à faible profondeur. La différence entre les deux abaques est que les données CPT sont mieux classifiées sur l'abaque normalisé.

### b. Indice de comportement normalisé et non-normalisé :

#### - $I_s$ non normalisé :

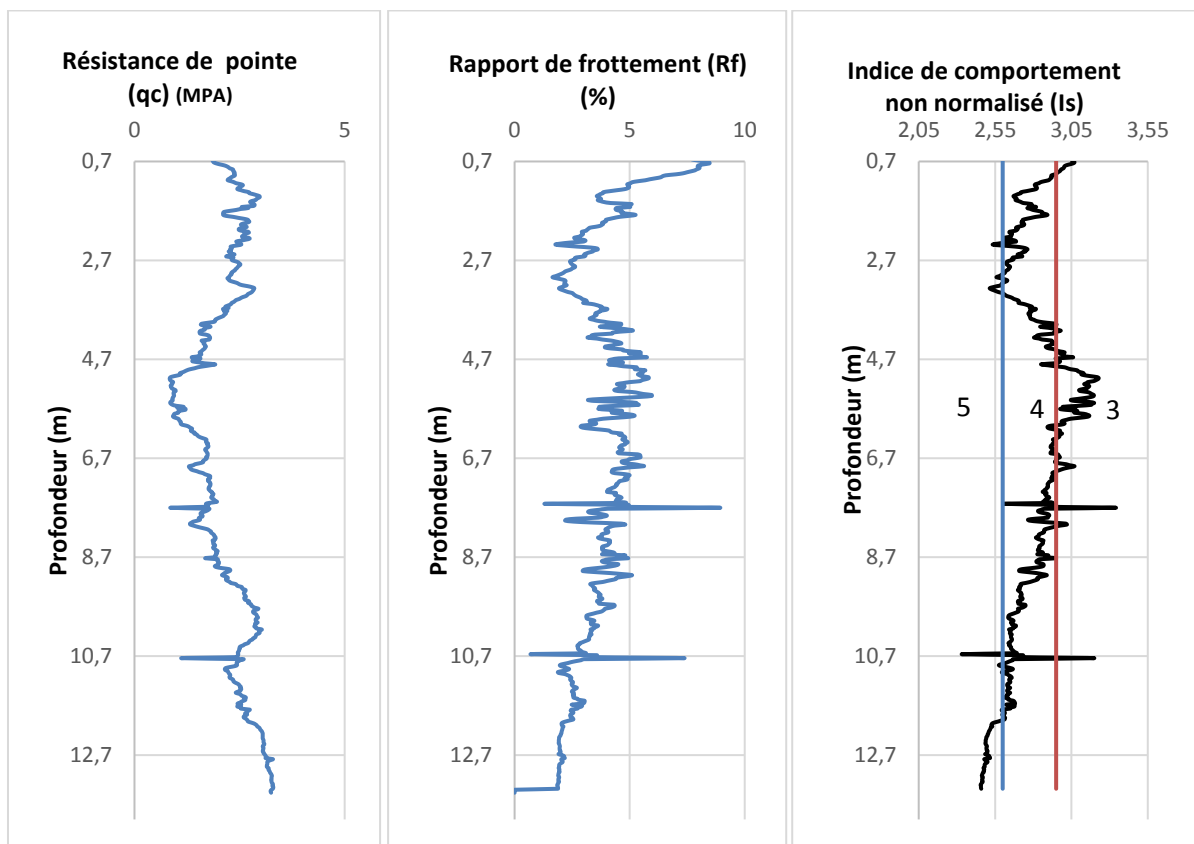


Figure 36:Abaque non normalisé



## Chapitre 4 : Classifications du sol du site situé à l'arrière port de Bejaïa à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT électrique

### - Commentaire :

Les figures ci-dessus représentent des graphes de la variation des paramètres CPT :

-La résistance de pointe ( $q_c$ ), le rapport de frottement ( $R_f$ ) et l'indice de comportement non normalisé du sol ( $I_s$ ) en fonction de la profondeur. On remarque que :

La résistance en pointe ( $q_c$ ) est inférieure à 4MPa et varie très peu jusqu'à 9 m de profondeur, puis augmente légèrement. Tandis que,  $R_f$  diminue dans le domaine 0.7-3m mais reste presque constant dans le domaine 3-9 m, puis diminue légèrement. On remarque des pics de  $R_f$  à 7.7m et 10.74m ; ceci est du probablement à la présence des couches très fines d'argiles organiques et vaseuses.

Concernant le graphe de ( $I_s$ ), on constate que :

**De 0.7 à 3 m :** ( $I_s$ ) diminue de 2.92 à 2.59, il se trouve dans la limite de la zone (04) et (05), ce qui indique un sol limoneux sableux.

**De 3 à 5 m :** ( $I_s$ ) augmente de 2.59 à 3.11, ce qui correspond à la zone (04) mais se rapproche plus de la limite de la zone (03), donc c'est plus un limon argileux.

**De 5 à 6m :** ( $I_s$ ) montre une couche fine d'argile.

**De 6 à 10.5 m :** ( $I_s$ ) se trouve toujours dans la zone (04) mais se rapproche de la limite avec la zone (05).

**De 10.5 à 13 m :** ( $I_s$ ) est dans la limite avec la zone (05), ce qui indique un sol sableux.

Les résultats de ( $I_s$ ) sont en concordance avec ceux du sondage carotté et de l'analyse granulométrique.

Chapitre 4 : Classifications du sol du site situé à l'arrière port de Bejaïa à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT électrique

- Ic normalisé :

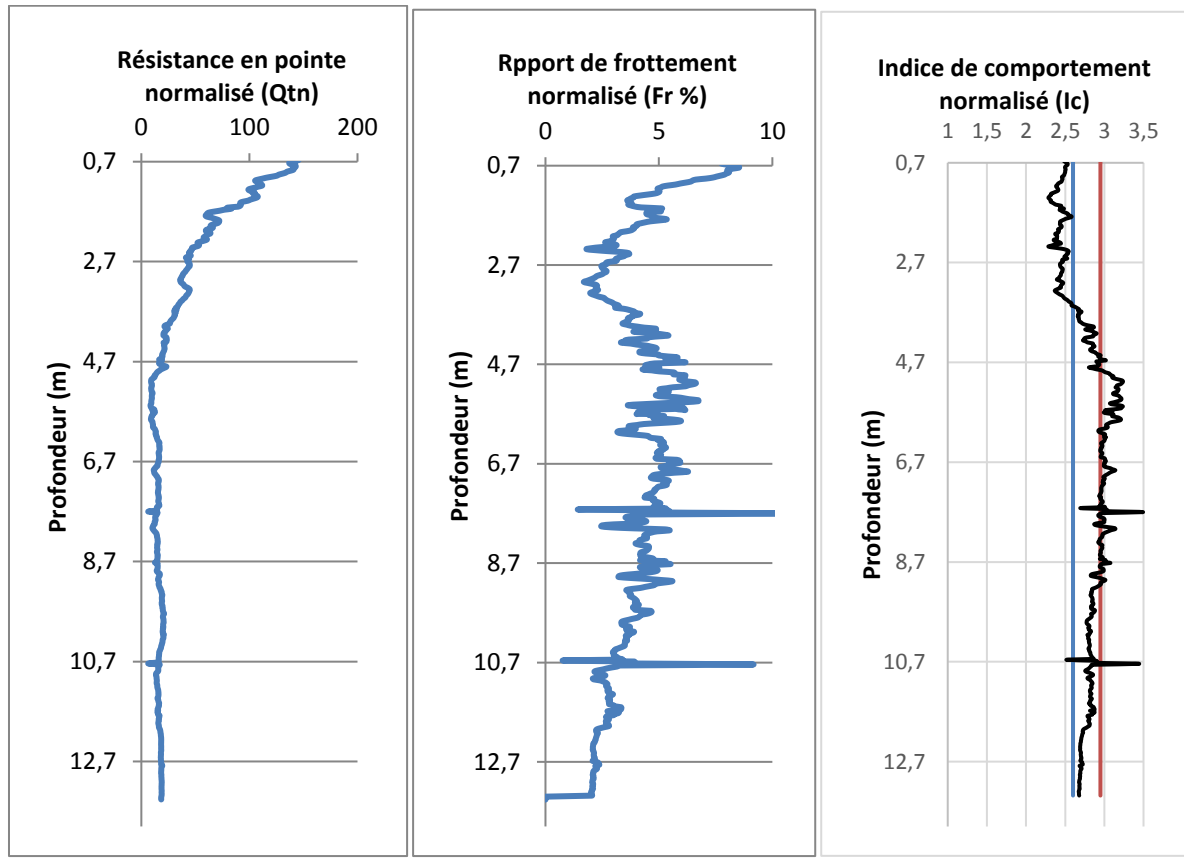


Figure 37:Abaque normalisé

#### Chapitre 4 : Classifications du sol du site situé à l'arrière port de Bejaïa à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT électrique

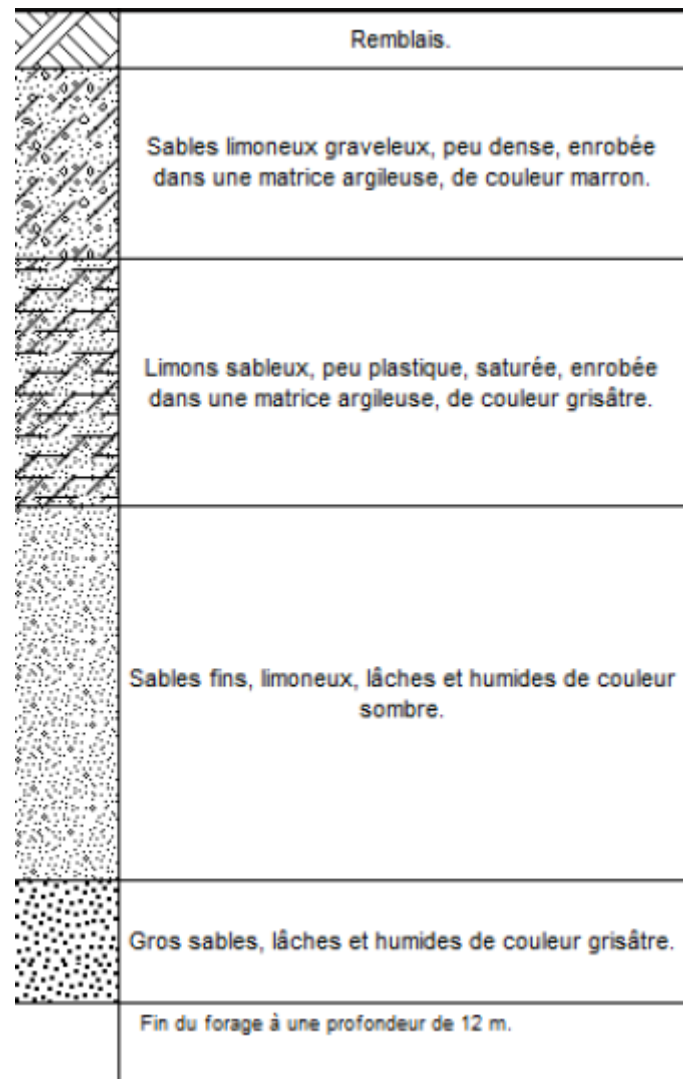


Figure 38: coupe verticale du sondage carotté

#### - **Commentaire :**

Les paramètres normalisés ( $Q_{tn}$ ,  $Fr$  et  $I_c$ ) sont représentés sur la figure 36. On remarque que la résistance en pointe ( $Q_{tn}$ ) diminue jusqu'à une profondeur de 3 m, puis reste pratiquement constante en profondeur. On constate la même chose pour le rapport de frottement ( $Fr$ ) sur les 3 premiers mètres, puis augmente jusqu'à 4.7 m de profondeur. Cependant, il reste constant jusqu'à 9.5 m puis diminue légèrement.

La couche 1 allant de 0.7 à 3 m, le ( $I_c$ ) normalisé se trouve dans la zone (05) indiquant un sable limoneux alors que le ( $I_c$ ) non normalisé indique un limon sableux. En profondeur, le ( $I_c$ ) est plus uniforme, on voit clairement en le comparant avec le ( $I_s$ ) non normalisé que l'effet de la profondeur est éliminé par la normalisation.

#### Chapitre 4 : Classifications du sol du site situé à l'arrière port de Bejaïa à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT électrique

Le  $(I_c)$  normalisé montre mieux le comportement du sol vis-à-vis de la sollicitation engendré par le CPTu

##### **v. Conclusion :**

En se basant sur les mesures de l'essai CPTu, les abaques de Robertson et al (1986) et Robertson (2010) ont été utilisés pour identifier le sol du site du mirador au niveau du cantonnement militaire EX-ENIP, Bejaia. Le premier abaque donne la résistance de cône sans dimension ( $q_c/p_a$ ) en fonction du rapport de frottement ( $R_f$ ) ; tandis que le deuxième abaque tient compte de la résistance de pointe normalisé ( $Q_t$ ) en fonction du rapport de frottement normalisé ( $F_r$ ).

Dans un premier temps, nous avons calculé les paramètres cité ci-dessus a partir des résultats de l'essai CPT, puis nous les avons projetés sur leurs abaques correspondantes à fin de pouvoir les comparer. Les résultats ont montrés que deux types de sol qui dominant pour les deux abaques sont des limons et des limons argileux.

Nous avons par la suite calculé et tracé l'indice de comportement de sol normalisé et non normalisé à fin d'identifier le type de sol en fonction de la profondeur. Les résultats ont montrés un sable limoneux sur l'abaque normalisé, tandis que l'abaque non normalisé indique un limon sableux.

### **Conclusion générale :**

L'essai de pénétration statique (CPT) est l'essai le plus utilisé à travers le monde car il traduit le comportement mécanique du sol in situ contrairement au système unifié de classification des sols (ex. USCS) qui est basé sur la granulométrie et la plasticité du sol. L'utilisation du CPT pour la classification du sol est basée en général sur des abaques reliant les paramètres mesurés du CPT au type de sol.

Dans ce travail, nous avons utilisé les abaques normalisés et non-normalisés de Robertson pour la classification de deux sites où des essais CPT mécanique (pour le premier site) et électrique (pour le deuxième site) ont été exécutés.

Pour le premier site, on n'a pas les données sur la nappe statique et sur la pression interstitielle pendant l'essai, c'est pourquoi nous avons représenté les mesures de la résistance en pointe en fonction du rapport de frottement sur l'abaque non-normalisé uniquement. Nous avons représenté l'indice de comportement de sol en fonction de la profondeur et nous l'avons comparé avec le sondage carotté le plus proche. Les résultats ont montré que :

- Pour le site regroupant les trois promotions, le sol est globalement une argile à argile limoneuse,
- les profils de l'indice de comportement non normalisé ( $I_s$ ) sont en accord avec les résultats des sondages carottés qui indiquent des argiles limoneuses pour les trois promotions,
- l'identification du sol à partir du ( $I_s$ ) est plus détaillée comparé aux sondages carottés puisque les mesures du CPT sont effectuées chaque 20 cm. En effet, des passages (couches fines) sableux et d'argile vaseuse ont été identifiés par le CPT pour les promotions 2 et 3 alors qu'on ne les retrouve pas dans les sondages carottés.

Pour le deuxième site, en plus de la résistance en pointe et du frottement latéral, la pression interstitielle a été mesurée juste derrière le cône. Les résultats sont représentés sur les abaques normalisé et non normalisé puis comparés. Ensuite, nous avons comparé l'indice de comportement non normalisé avec celui normalisé le long de la profondeur. Les résultats sont résumés comme suit :

#### **Chapitre 4 : Classifications du sol du site situé à l'arrière port de Bejaïa à partir des essais de laboratoire et de l'essai CPT électrique**

- La représentation des données CPT sur les abaques normalisé et non normalisé montre que la majorité des points se situent dans les zones 3 et 4 correspondant respectivement aux limons et limons argileux ; il n'y a pas de grande différence entre les deux abaques. Cependant, il y a certains points de la zone 4 sur l'abaque non normalisé qui sont décalés vers le haut sur l'abaque normalisé; ces points ont des valeurs de  $Q_{tn}$  élevés dus à la contrainte effective qui est faible pour les points mesurés à faible profondeur.
- Les résultats de l'indice de comportement en surface ont montré un sable limoneux sur l'abaque normalisé, tandis que l'abaque non normalisé indique un limon sableux. L'indice ( $I_c$ ) normalisé est en concordance avec ceux du sondage carotté et de l'analyse granulométrique

Il est important de noter que la classification des sols selon les essais CPT reste un domaine de recherche en évolution, avec des développements continus dans les méthodes et les approches. Ce mémoire a jeté les premières bases pour une compréhension de cette classification qui est peu connue par nos ingénieurs, il serait souhaitable de poursuivre le travail en utilisant d'autres abaques basés sur la microstructure et les appliquer pour d'autres sites

# ANNEXES

## Références bibliographique :

### Livres et thèses :

- Fawad Niazi Volume I: CPT Interpretation-Estimation of Soil Properties 2021
- Lunne, T., P.K. Robertson, and J.J.M Powell. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice, 1997
- P.K. Robertson Soil behaviour type from the CPT: an update
- Robertson P.K., and K.L. Cabal Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, 3rd Edition, 2010.
- HAMID H S Identification in-situ des sols liquéfiables par pénétromètre statique cyclique : modélisations physiques et numériques thèse Université Grenoble Alpes 2019.
- Hassan .A. Caractérisation améliorée des sols par l'essai de chargement de pointe au piézocone.
- Journée Louis Parez CFMS, 14 Juin 2005, Paris, Application au calcul des fondations profondes. Autre. Université Blaise Pascal - Clermont-FerrandII, 2010. Français.
- Mémoire de fin d'études de Master Étude numérique de l'essai CPT dans le sol pulvérulent Promotion : septembre 2020, Ladjel.Z. CHAPITRE 3 – b – essai de pénétration statique (2019-2020)
- Douglas, B.J., and Olsen, R.S., 1981. Soil classification using electric cone penetrometer. In Proceedings of Symposium on Cone Penetration Testing and Experience, Geotechnical Engineering 9.
- Evaluation based on the CPT Canadian Geotechnical Journal, 1998, Vol. 35, August
- Robertson and Cabal, Guide to penetration testing, 2010. 28.
- Robertson, P.K. and Wride, C.E., 1998. Cyclic Liquefaction and its 29.
- Robertson P. K., Campanella R. G., Gillespie D., Greig J. (1986). Use of piezometer cone data. Proceedings of In-situ 86 Conference, Blacksburg, June 23-25, Geotechnical Special Publication N°6, ASCE, pp. 1263-1280.
- Robertson P. K. (1990). Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, N°1, pp. 151–158.

### Site :

- [www.apageo.com](http://www.apageo.com) | [info@apageo.com](mailto:info@apageo.com)





Client : /

N° Projet : 18-23-0014

Projet : REALISATION D'UN MIRADOR AU NIVEAU DE CANTONNEMENT MILITAIRE

Endroit : BEJAIA

Sondage n° : 01

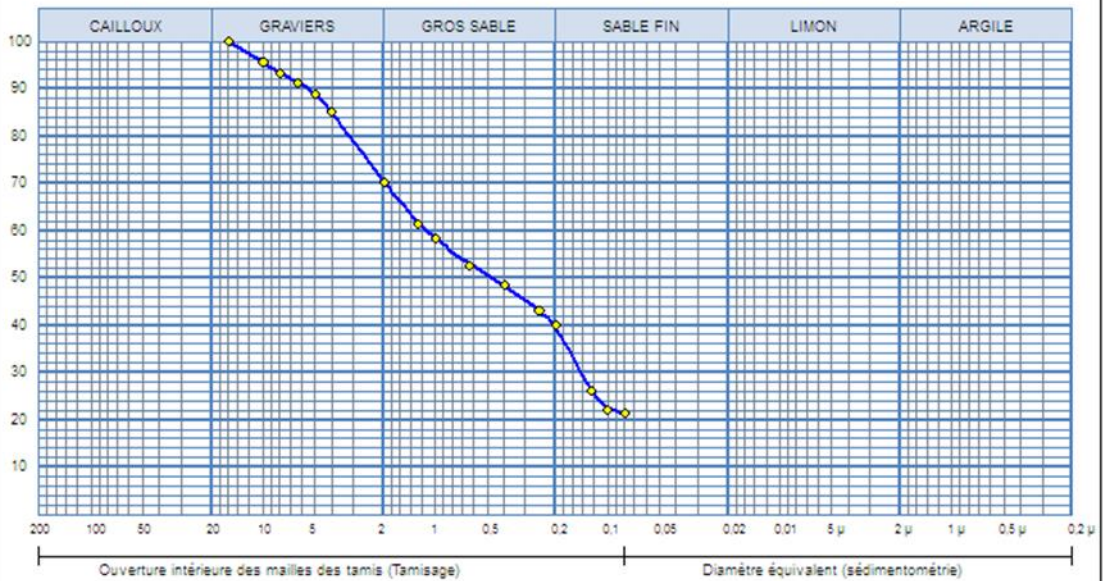
—◆— Sondage: 01 : 1.50/2.00

Profondeur : 1.50/2.00

Matériaux :

Provenance :

Date essais : 02/04/23



Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamis (mm)	Tamisat (%)	Diamètre équivalent	Tamisat (%)
18,00	100,00	80,00 μm	21,33
10,00	95,667		
8,00	93,333		
6,30	91,333		
5,00	89,00		
4,00	85,00		
2,00	70,333		
1,25	61,333		
1,00	58,333		
0,63	52,667		
0,40	48,50		
0,25	43,00		
0,20	40,00		
0,125	26,00		
0,10	22,00		

© SolTests 2013

Remarque :

Préparé par :  
BENSADI S

Approuvé par :  
BOUKOUCHA DJ

Date :  
05/04/23



Client : /

N° Projet : 18-23-0014

Projet : REALISATION D'UN MIRADOR AU NIVEAU DE CANTONNEMENT MILITAIRE

Endroit : BEJAIA

Sondage n° : 01

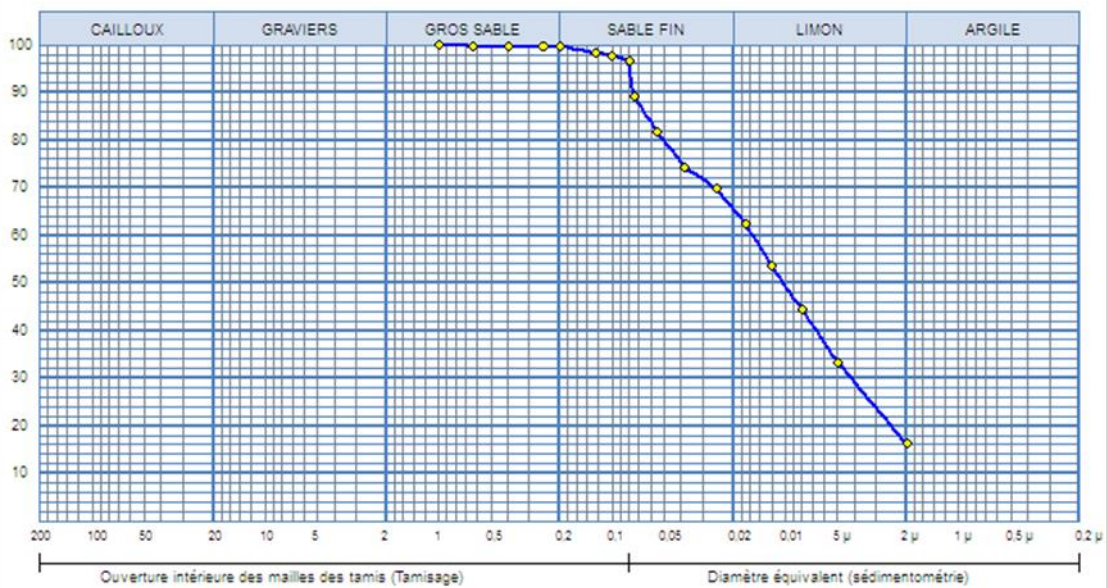
—●— Sondage: 01 : 3.70/4.00

Profondeur : 3.70/4.00

Matériaux :

Provenance :

Date essais : 04/04/23



Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamis (mm)	Tamisat (%)	Diamètre équivalent	Tamisat (%)
1,00	100,00	80,00 µm	96,67
0,63	99,667	75,00 µm	89,20
0,40	99,667	55,00 µm	81,73
0,25	99,667	38,00 µm	74,25
0,20	99,667	25,00 µm	69,77
0,125	98,333	17,00 µm	62,30
0,10	97,667	12,00 µm	53,70
		8,00 µm	44,38
		5,00 µm	33,38
		2,00 µm	16,17

© SoftTests 2013

Remarque :

Préparé par :  
BENSADI S

Approuvé par :  
BOUKOUCHI DJ

Date :  
05/04/23



Client : /

N° Projet : 18-23-0014

Projet : REALISATION D'UN MIRADOR AU NIVEAU DE CANTONNEMENT MILITAIRE

Endroit : BEJAIA

Sondage n° : 01

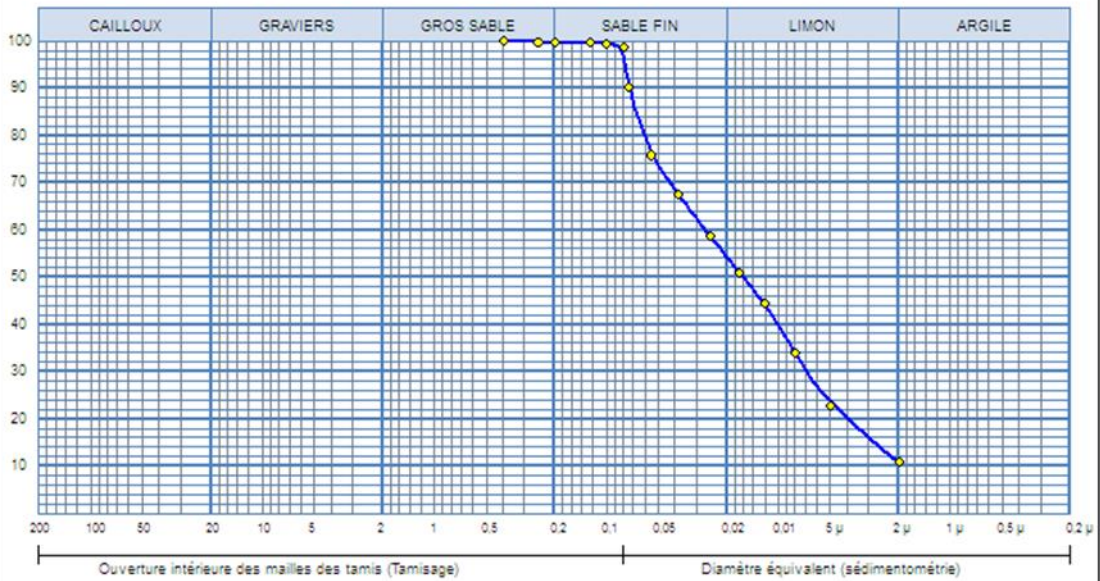
—◆— Sondage: 01 : 5.40/6.00

Profondeur : 5.40/6.00

Matériaux :

Provenance :

Date essais : 04/04/23



Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamisé (mm)	Tamisé (%)	Diamètre équivalent	Tamisé (%)
0,40	100,00	80,00 µm	99,67
0,25	99,667	75,00 µm	90,28
0,20	99,667	55,00 µm	75,79
0,125	99,667	38,00 µm	67,40
0,10	99,333	25,00 µm	58,63
		17,00 µm	51,00
		12,00 µm	44,52
		8,00 µm	33,84
		5,00 µm	22,66
		2,00 µm	10,78

© SoftTests 2013

Remarque :

Préparé par :

BENSADI S

Approuvé par :

BOUKOUCHA DJ

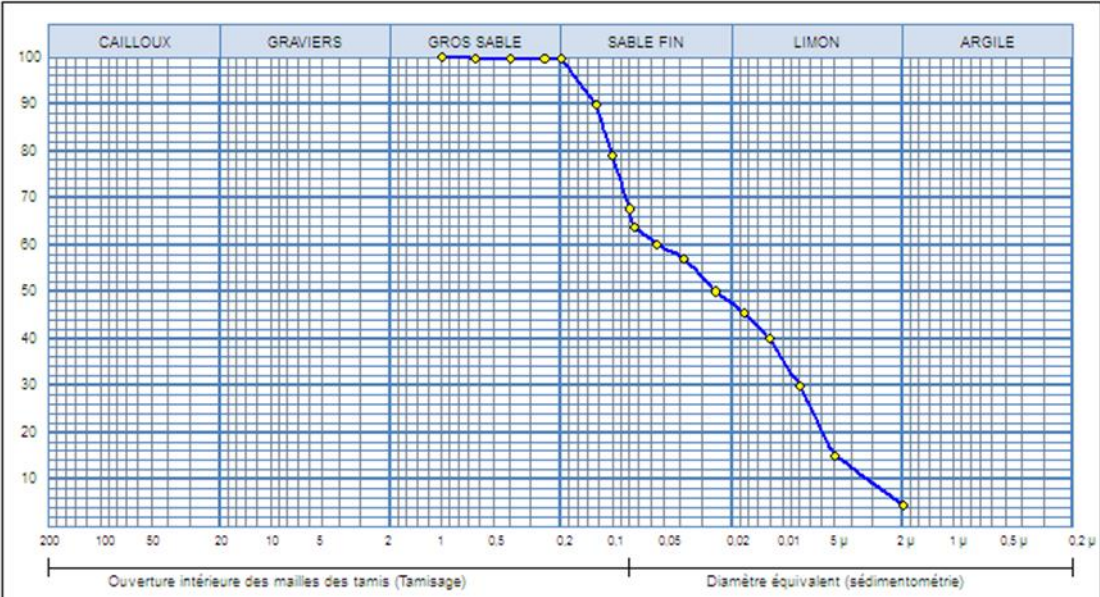
Date :

05/04/23



Client : / N° Projet : 18-23-0014  
 Projet : REALISATION D'UN MIRADOR AU NIVEAU DE CANTONNEMENT MILITAIRE  
 Endroit : BEJAIA

Sondage n° : 01  
 Profondeur : 8.50/8.80  
 Matériaux :  
 Provenance :  
 Date essais : 04/04/23



Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamis (mm)	Tamisé (%)	Diamètre équivalent	Tamisé (%)
1.00	100,00	80,00 μm	67,67
0,63	99,867	75,00 μm	63,89
0,40	99,867	55,00 μm	60,12
0,25	99,867	38,00 μm	57,09
0,20	99,867	25,00 μm	50,04
0,125	90,00	17,00 μm	45,51
0,10	79,00	12,00 μm	39,97
		8,00 μm	29,90
		5,00 μm	14,97
		2,00 μm	4,59

Echant	D80 (mm)	D30 (mm)	D10 (mm)	Cc	Cu
—◆—	0,05	0,01	0,00	0,37	16,51

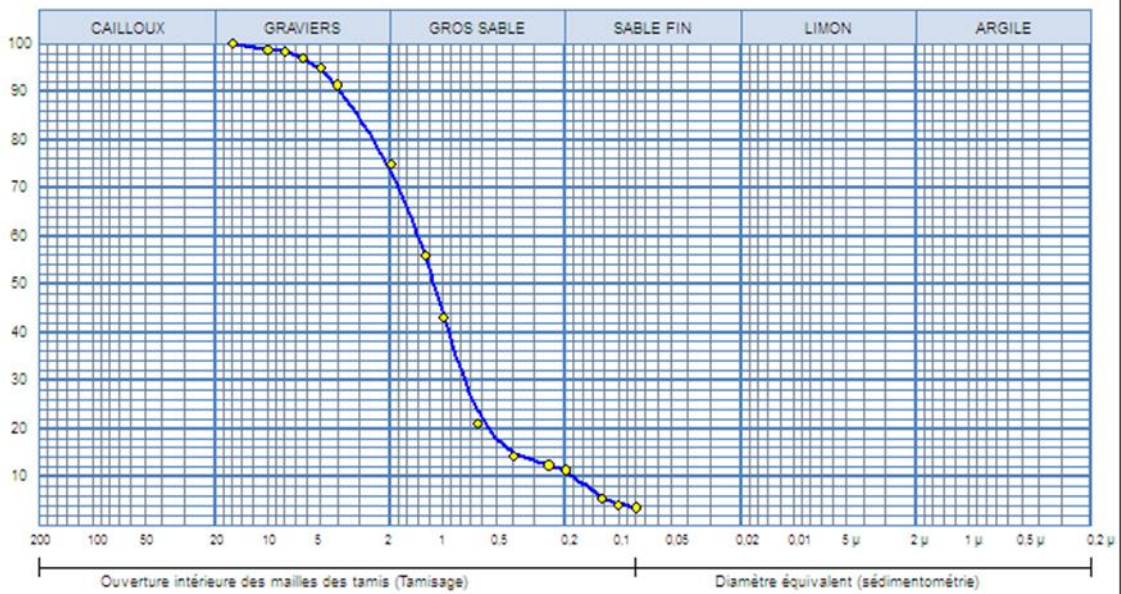
Remarque :

Préparé par : BENSADI S      Approuvé par : BOUKOUCHA DJ      Date : 05/04/23



Client : / N° Projet : 18-23-0014  
 Projet : REALISATION D'UN MIRADOR AU NIVEAU DE CANTONNEMENT MILITAIRE  
 Endroit : BEJAIA

Sondage n° : 01 Sondage: 01 : 10.50/11.00  
 Profondeur : 10.50/11.00  
 Matériaux :  
 Provenance :  
 Date essais : 04/04/23




Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamis (mm)	Tamisat (%)	Diamètre équivalent	Tamisat (%)
16,00	100,00	80,00 μm	3,80
10,00	98,80		
8,00	98,40		
6,30	97,00		
5,00	94,80		
4,00	91,40		
2,00	75,00		
1,25	58,00		
1,00	43,20		
0,63	21,20		
0,40	14,40		
0,25	12,40		
0,20	11,40		
0,125	5,80		
0,10	4,20		

Echant	D80 (mm)	D30 (mm)	D10 (mm)	Cc	Cu
—◆—	1,38	0,76	0,18	2,33	7,73

© SolTeds 2013

Remarque :

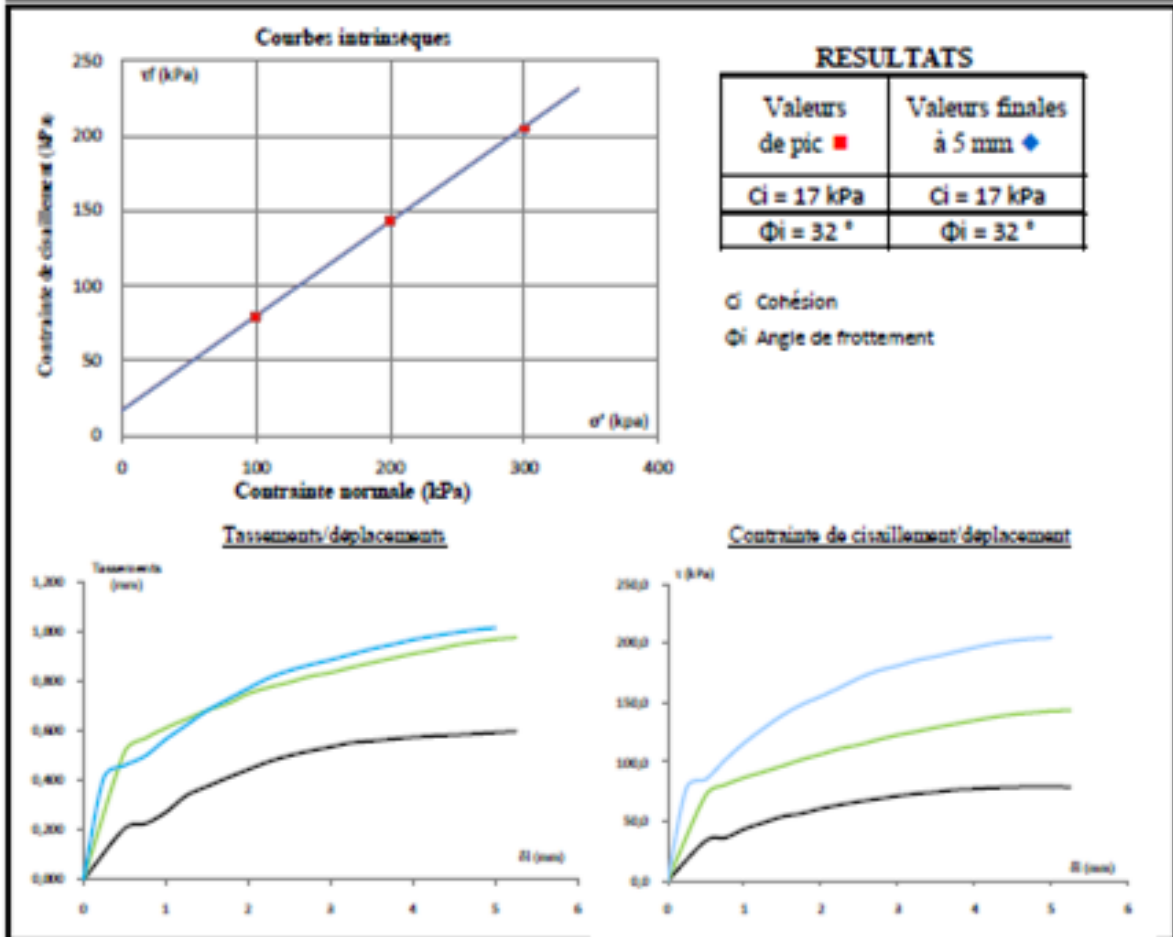
Préparé par : BENSADI S      Approuvé par : BOUKOUCHA DJ      Date : 05/04/23

Ref. Chantier :	REALISATION D'UN MIRADOR BEJAIA	 <b>Laboratoire National De l'Habitat Et De La Construction</b>
Sondage :	1	
Profondeur :	1.50/2.00	
Type de prélèvement :	SONDAGE	
Nature :		

### Essai de cisaillement rectiligne - cisaillement direct

Norme XP 94-071-1

type d'essai		CD						Eprouvette					
vitesse de cisaillement		0.025	mm/min						Section :		28.27	mm <sup>2</sup>	
ρs estimée		2.70	(Mg/m <sup>3</sup> )						hauteur :		20 / 20 / 20 mm		
N°	Etat initial					Après cisaillement	Après cisaillement	σ' (kPa)	Paramètres de résistance au cisaillement				
	Ep	ρh (Mg/m <sup>3</sup> )	ρd (Mg/m <sup>3</sup> )	W (%)	e				Sr (%)	ρd (Mg/m <sup>3</sup> )	W (%)	τ <sub>10</sub> (kPa)	δ <sub>10</sub> (mm)
1	1.50	1.28	17.0	1.11	41.4	2.08	19.4	100.0	79.4	4.8	79.2	5.0	
2	1.50	1.28	17.0	1.11	41.4	2.24	18.2	200.0	143.4	5.3	142.8	5.0	
3	1.50	1.28	17.0	1.11	41.4	2.31	17.4	300.0	204.6	5.0	204.6	5.0	

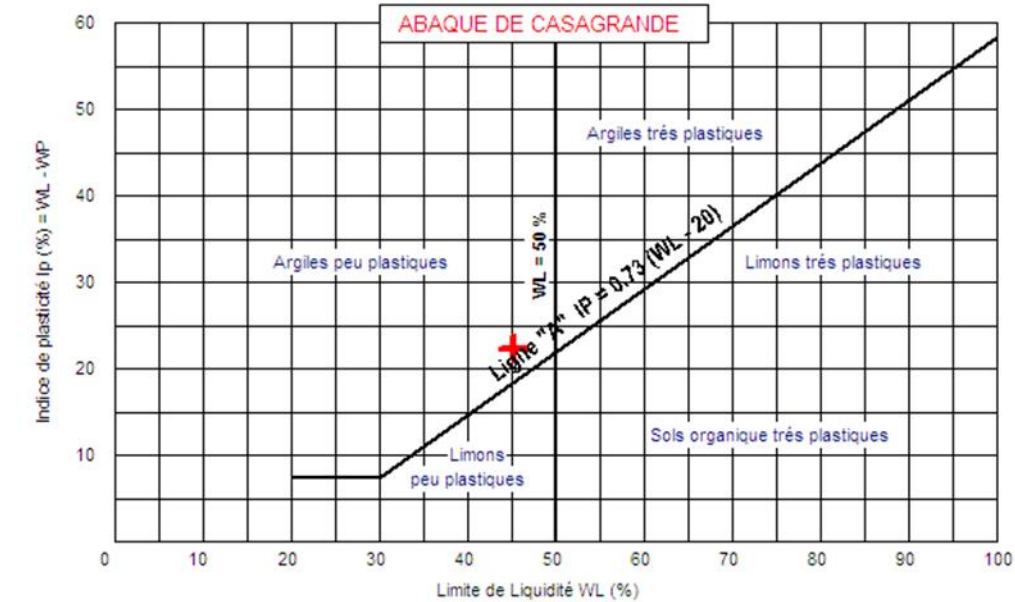
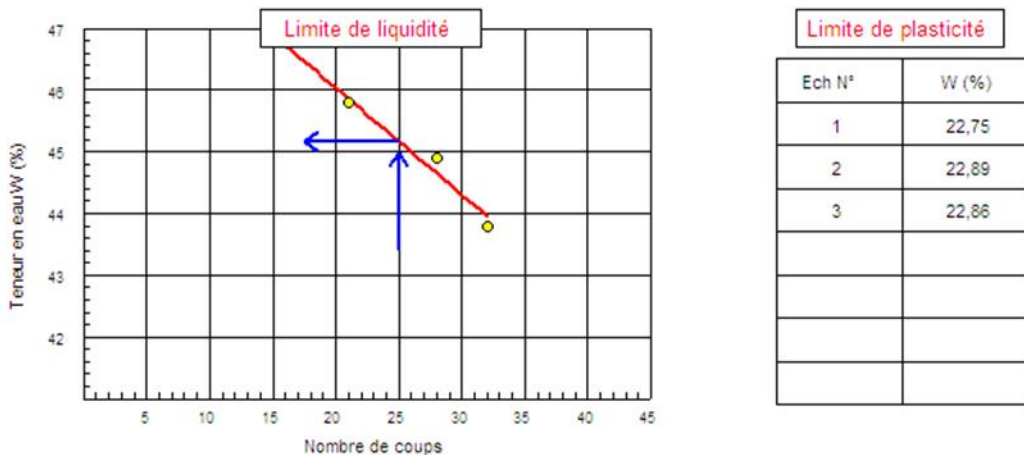


Charge d'essai :	DAIBOUN S K	Commentaires :	
Date :	06/04/2023		



Client : N° Projet : 18-23-0014  
 Projet : REALISATION D'UN MIRADOR AU NIVEAU DE CANTONNEMENT MILITAIRE  
 Endroit : BEJAIA  
 Sondage n° : 01 Date essais : 04/04/23  
 Profondeur : 5.40/6.00  
 Nature :

Limite de Liquidité (%) : WL = 45,17 Teneur en eau naturelle (%) : Weau = 38,06  
 Limite de Plasticité (%) : WP = 22,83  
 Indice de Plasticité (%) : IP = 22,34




Sollers 2013

Remarque :

Préparé par :  
DAIBOUN S K

Approuvé par :  
BOUKOUCHA DJ

Date :  
05/04/23

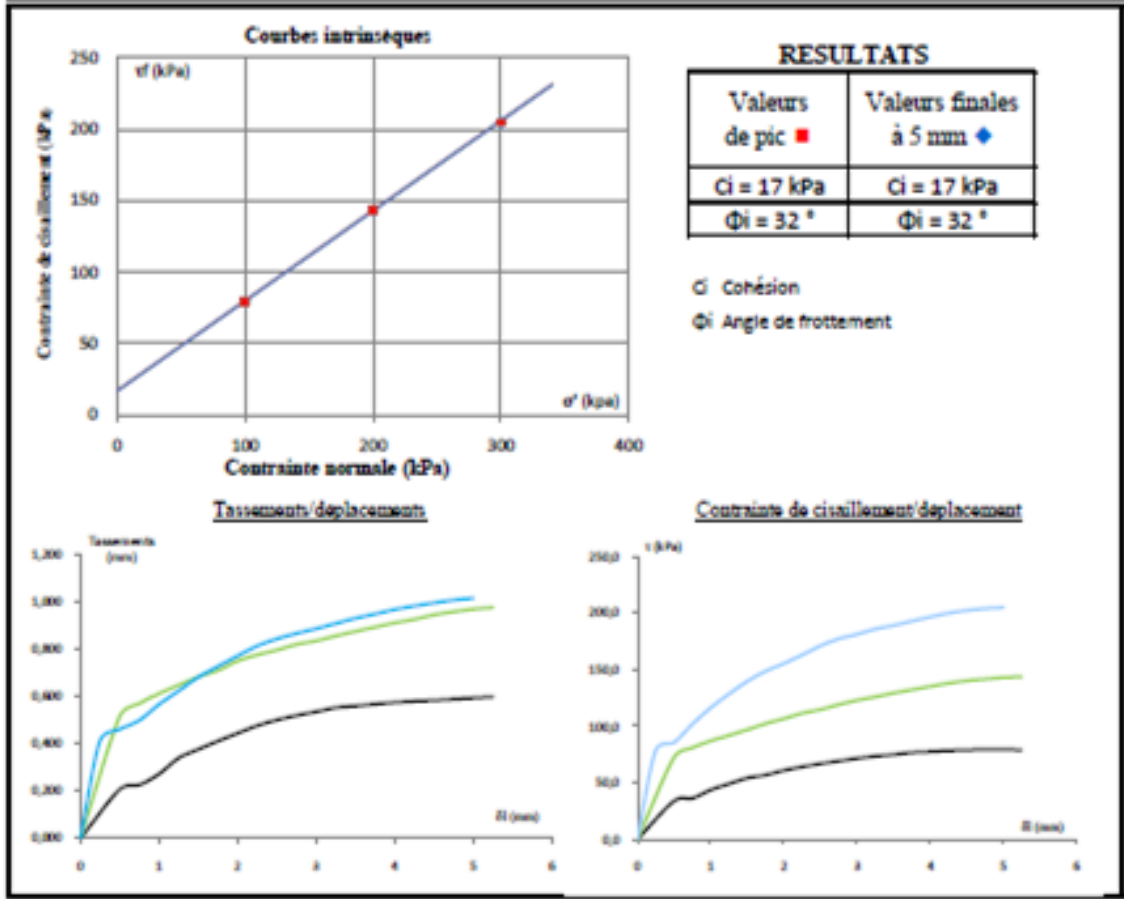
Ref. Chantier :	REALISATION D'UN MIRADOR BEJAIA	 <b>Laboratoire National De l'Habitat Et De La Construction</b>
Sondage :	1	
Profondeur :	1.50/2.00	
Type de prélèvement :	SONDAGE	
Nature :		

### Essai de cisaillement rectiligne - cisaillement direct

Norme XP 94-071-1


type d'essai	CD		Epreuve	
vitesse de cisaillement	0.025	mm/min	Section :	28.27 mm <sup>2</sup>
ps estimée	2.70	(Mg/m <sup>3</sup> )	hauteur :	20 / 20 / 20 mm

N°	Etat initial					Après cisaillement	Après cisaillement	σ' (kPa)	Paramètres de résistance au cisaillement				
	Ep	ρh (Mg/m <sup>3</sup> )	ρd (Mg/m <sup>3</sup> )	W (%)	e				Sr (%)	ρd (Mg/m <sup>3</sup> )	W (%)	τ <sub>ij</sub> (kPa)	δ <sub>ij</sub> (mm)
1		1.50	1.28	17.0	1.11	41.4	2.08	19.4	100.0	79.4	4.8	79.2	5.0
2		1.50	1.28	17.0	1.11	41.4	2.24	18.2	200.0	143.4	5.3	142.8	5.0
3		1.50	1.28	17.0	1.11	41.4	2.31	17.4	300.0	204.6	5.0	204.6	5.0



Charge d'essai :	DAIBOUN S K	Commentaires :	
Date :	06/04/2023		

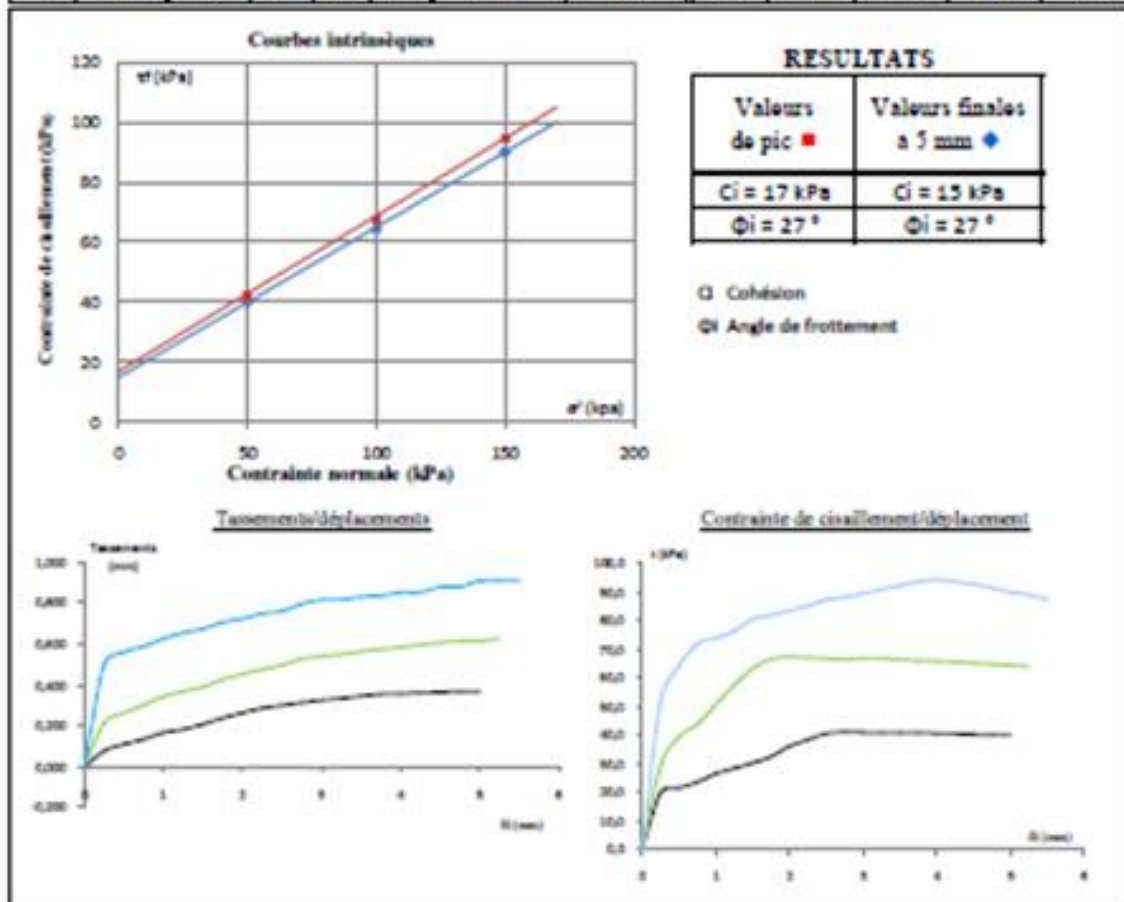


Ref. Client :	REALISATION D'UN MIRADOR BEJAIA	 <b>Laboratoire National De l'Habitat Et De La Construction</b>
Sondage :	1	
Profondeur :	3.70/4.50	
Type de prélèvement :	SONDAGE	
Nature :		

### Essai de cisaillement rectiligne - cisaillement direct

Norme XP 94-071-1

type d'essai		CD		Epreuve									
vitesses de cisaillement	0.025	mm/min		Section :	28.27	mm <sup>2</sup>							
pe optimale	2.70	(Mg/m <sup>3</sup> )		hauteur :	20 / 20 / 20	mm							
N°	Etat initial					Après cisaillement		σ' (kPa)	Paramètres de résistance au cisaillement				
	Ep	ph (Mg/m <sup>3</sup> )	pt (Mg/m <sup>3</sup> )	W (%)	e	Sr (%)	pt (Mg/m <sup>3</sup> )		W (%)	τ <sub>0</sub> (kPa)	β <sub>0</sub> (mm)	τ <sub>0</sub> (kPa)	β <sub>0</sub> (mm)
1		1.60	1.14	39.8	1.36	78.7	1.47	43.3	50.0	41.8	2.8	40.0	5.0
2		1.63	1.16	40.8	1.34	82.5	1.53	49.0	100.0	67.4	2.0	64.4	5.0
3		1.65	1.17	41.3	1.31	85.3	1.68	51.3	150.0	94.5	4.0	90.1	5.0



Chargé d'essai :	DAIBOUN S K	Commentaires :	
Date :	06/04/2023		