



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de master en Génie civil

Option : structures

Thème

Classification du site de la pénétrante Autoroutière Reliant le Port de Skikda à l'Autoroute Est –Ouest à partir des essais CPTu.

Réaliser par :

- SACI Redouane
- KERDJADJ Tarik

Encadré par :

Mme : D.BOUAYAD

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom :

- SADAQUI
- BOUCHE

Année Universitaire : 2019/2020

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 **BOLLAÏD** Djamila, maitre assistante, 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 **LVAE** de **Skikda** 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.

Dédicace

Au nom de dieu, le tout Miséricordieux, le très Miséricordieux.

Je remercie le dieu le tout puissant de m'avoir motivé à réaliser ce modeste travail, également je remercie infiniment mes parents, qui m'ont encouragé et aidé à arriver à ce stade de ma formation.

Je dédie ce laconique travail à ma très cher mère, qui m'a accompagné durant les moments les plus rudes de ce long parcours de mon éducation, celle qui a fait preuve de ces plus copieux desseins pour me permettre de goûter le fardeau de ce monde et de chercher la voie de ma vie avec ces précieux conseils, dont je devais incessamment être de grande compétence et motivation. Cependant, Je prie dieu le Miséricordieux qu'il te portera récompenses, car la mienne ne sera guère complète.

A mon père qui a sacrifié sa vie afin de me voir grandir et réussir dans le parcours de l'enseignement. Celui qui a toujours resté à mes côtés dans les moments pénibles de ma vie.

A mon brave frère ; Mouhande Ameziane

A toute la famille S'ACI

A tous mes copains et amis, et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Enfin, à tous ceux qui m'aiment.

Redouane

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail particulièrement

*A mes très cher parent , qui on consacre leur existence à
bâtir la mienne, pour leur soutien, patience ,tendresse et
affection.*

*A ma mère qui m'a encouragé durant toutes mes études ,et
qui sans elle , ma réussite n'aura pas lieu.*

Qu'elle trouve ici mon amour et mon affection.

*A mon père ,qui est toujours disponible pour nous , et près à
nous aider , je lui confirme mon attachement et mon
profond respect .*

*A mes très chers frères et sœurs : Larbí et sa femme , Daïe ,
Massí , Kahína , Nassíma , Samía et son mari . tous
spécialement à mes petit neveu : Agnes , Aksíl , Youdass et le*

A tous mes amis les plus chers amis

Tarik

TABLES DE MATIÈRES

Sommaire :

Chapitre I : Présentation de l'essai de pénétration CPT

I-1) Principe de l'essai CPT.....	3
I-2) Développement de l'essai CPT.....	6
I-3) Matériels utilisés.....	10
I-4) Mode opératoire.....	11
I-5) Les différents types des CPTs.....	14
I-6) Les caractéristiques et avantages des essais CPTs.....	24
I-7) Les utilisations des résultats du CPT.....	25
I-8) Les exigences normative.....	26
I-9) Conclusion.....	28

Chapitre II : Classification du sol à partir de l'essai CPT

II-1) Introduction.....	29
II-2) Abaque de Robertson et al. (1986).....	30
II-3) Abaque de Robertson normalisé (1990)	31
II-4) Abaque de Robertson non-normalisé (2010).....	32
II-5) Comparaison entre les deux abaques de Robertson (1986 et 2010).....	34
II-6) Indice de comportement des sols (I_c).....	35
II-7) Conclusion	36

Chapitre III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu

III-1) Introduction.....	37
III-2) Reconnaissance du site.....	37
III-3) Campagne de reconnaissance.....	39
III-4) Les données utilisées.....	47
III-5) Classification du sol à partir des abaques de Robertson et al (1986) et Robertson (2010) et comparaison avec les essais de laboratoire.....	50
III-6) Conclusion.....	58

Liste des figures :

Figure 1 : Composants d'un CPT	3
Figure 2 : Gamme de sondes CPT (2cm , 10 cm , 15cm , 40cm)	4
Figure 3 : Représentation des différentes charge agissante su le cône	5
Figure 4 : Cône mécanique hollandais ancien.....	6
Figure 5 : Pénétrromètre à cône mécanique néerlandais à manteau conique.....	7
Figure 6 : Cône de type Begemann avec manchon de friction.....	8
Figure 7 : Première classification du sol pour le cône mécanique de Begemann.....	8
Figure 8 : Mise en œuvre du CPT sur terre.....	12
Figure 9 : Mise en œuvre du CPT sur la mer à 1500m.....	13
Figure 10 : Mise en œuvre du CPT sur la mer à 2000m.....	13
Figure 11 : Pénétrromètre mécanique au cône de Dutch.....	14
Figure 12-13 : Les réducteurs de frottement.....	17
Figure 14 : Les différentes tiges du cône électrique	19
Figure 15 : le piézocône.....	20
Figure 16 : Localisation du filtre sur un piézocône.....	21
Figure 17 : fonctionnement de l'essai CPT sismique.....	22
Figure 18 : mode opératoire du CPT sismique.....	23
Figure 19 : quelques résultats obtenus grâce au CPT sismique.....	23
Figure 20 : Diagramme de types de comportement du sol CPT selon Robertson, 1986.....	30
Figure 21 : Diagramme de types de comportement du sol CPT selon Robertson, 1990.....	32
Figure 22 : Diagramme de types de comportement du sol CPT selon Robertson, 2010.....	33
Figure 23 : Carte géologique de l'Algérie nord orientale.....	38

Figure 24 : Coupe verticale du sondage carotté (S11-1) au niveau du PK11+660	40
Figure 25 : Coupe verticale du sondage carotté (S13-1) au niveau du PK13+750.....	41
Figure 26 : a) Résistance en pointe corrigée (q_t), b) rapport de frottement (F_r), c) pression interstitielle (u), d) indice de comportement de sol (I_c) pour le CPT 3.....	44
Figure 27 : a) Résistance en pointe corrigée (q_t), b) rapport de frottement (F_r), c) pression interstitielle (u), d) indice de comportement de sol (I_c) pour le CPT 6.....	45
Figure 28 : Diagramme du PK11+380 (CPT1).....	47
Figure 29 : Diagramme du PK11+400 (CPT2).....	48
Figure 30 : Diagramme du PK11+420 (CPT3).....	48
Figure 31 : Diagramme du PK 13+580 (CPT4).....	49
Figure 32 : Diagramme du PK13+600 (CPT5).....	49
Figure 33 : Diagramme du PK 13+620 (CPT6).....	50
Figure 34 : Projection des mesures des six CPTs sur l'abaque de Robertson (2010).....	53
Figure 35 : Projection des mesures des six CPTs sur l'abaque de Robertson et al (1986).....	57

Liste des Symboles :

CPT : Cône pénétromètre test

CPTu : Cône pénétromètre test avec dissipation

PDL : Pénétromètre dynamique lourd

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

U2 : La pression interstitielle

qc : La résistance en pointe

Qc : La pointe du cône

Ac : L'aire de la surface du cône

fs : Le frottement latéral local

As : L'aire de la surface du manchon

qt : la résistance en pointe corrigé

Fr : Rapport de frottement

pa : Pression atmosphérique

[a] : Rapport de la section du manchon du cône

Rf : Friction ratio en (%)

Qtn : Résistance du cône normalisé

σ_v : Contrainte verticale totale

σ'_v : Contrainte verticale effective

PK : Point kilométrique

SC : Sondage carotté

Ic : Indice de comportement

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Classification des sols selon Robertson, 1986.....	15
Tableau 2 : Classification des sols selon Robertson , 2010.....	17
Tableau 3 : Unification proposée entre 12 zones (Robertson et al, 1986) et 9 zones (Robertson, 1990).....	19

Introduction générale

Le test de pénétration au cône (CPT) est utilisé depuis plus de 40 ans. Le CPT 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 continues et il présente des bases théoriques très élaborées pour l'interprétation. Ces avantages ont conduit à une augmentation constante de l'utilisation et de l'application du CPT à travers le monde.

L'une des principales applications du CPT est la détermination de la stratigraphie et l'identification du type de sol. Cela est généralement accompli en utilisant des abaques qui relient les paramètres du cône au type de sol. Plusieurs abaques ont été proposés dans la littérature, mais ceux de Robertson sont les plus utilisés.

Le premier abaque de Robertson, proposé en 1986, est fonction de la résistance du cône corrigée et du rapport de frottement. La correction de la résistance du cône est nécessaire pour tenir compte de l'effet de la pression de l'eau, en particulier dans les argiles molles. Cet abaque divise le sol en 12 catégories alors que l'abaque normalisé de Robertson (1990) possède 9 types uniquement. L'avantage du premier abaque est qu'il peut être utilisé en temps réel (pendant et immédiatement après le CPT) pour identifier le type de sol contrairement à l'abaque de Robertson (1990) qui est donné en fonction des paramètres normalisés et qui nécessite la connaissance du poids volumique du sol et le niveau de la nappe.

Pour unifier la classification basée sur le CPT, Robertson (2010) a actualisé son premier abaque en utilisant les neuf types de sol définis dans l'abaque de Robertson (1990). Il est donné en fonction de la résistance en pointe adimensionnelle et du rapport de frottement. Son utilisation est plus simple et donne des résultats qui sont très peu différents de ceux de l'abaque normalisé lorsque la contrainte verticale effective initiale est comprise entre 50 kPa et 150 kPa.

Dans le présent travail, on s'intéresse à la classification du site de la pénétrante autoroutière reliant le port de Skikda à l'Autoroute Est-Ouest sur 31 Km en utilisant les abaques non normalisés de Robertson et al (1986) et Robertson (2010). En se basant sur les résultats de six CPTu, nous comparons les deux classifications qui utilisent la résistance de pointe brute et la résistance de pointe corrigée en fonction du rapport de frottement. Les résultats seront confrontés avec ceux des sondages carottés et les résultats des essais de laboratoire. Pour ce fait, nous adoptons le plan de travail suivant :

- Introduction générale
- Chapitre 1 : Présentation de l'essai de pénétration CPT
- Chapitre 2 : Classification du sol à partir de l'essai CPT
- Chapitre 3 : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu
- Conclusion générale

CHAPITRE : I

I) Présentation de L'essai de pénétration CPT :

I-1) Principe de l'essai CPT

L'essai de pénétration au cône (CPT) consiste à enfoncer dans le sol une tige à pointe conique, à une vitesse constante (2 cm/s en général), puis mesurer en continu (l'intervalle de lecture n'excédant pas 20 cm) la résistance du cône et le frottement de la surface latérale (sur le manchon). La figure 1 montre les différents composants d'un pénétromètre statique. Lorsqu'on utilise un piezôcône, la pression interstitielle (u_2) est également mesurée derrière le cône.

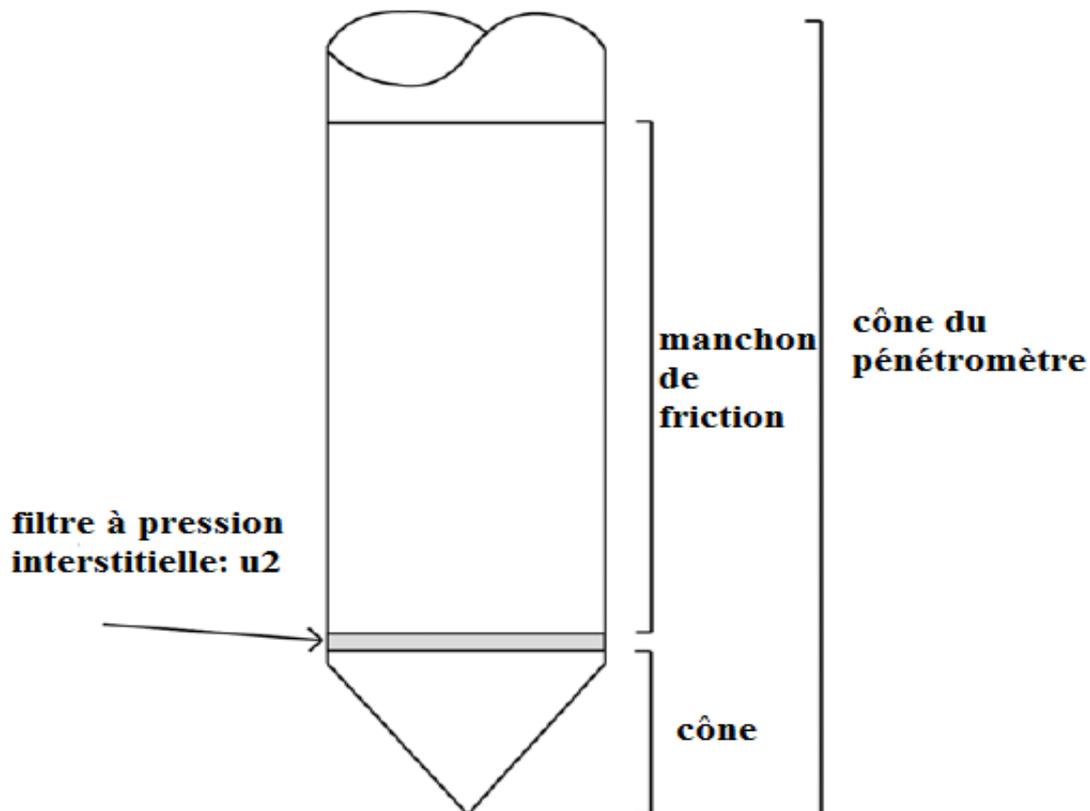


Figure 1 : Composants d'un CPT [27].

Chap I : Présentation de l'essai de pénétration CPT

Les pénétromètres à cône sont disponibles dans plusieurs gamme de tailles avec les sonde de diamètre 2 cm , 10 cm , 15 cm , 40 cm . les sondes les plus utilisées dans la plus part des normes sont les tiges de 10 et 15 cm , pour la plus petite sonde, elle est utilisée pour des essais peu profonds et pour la plus grande, elle est préférée pour les sols graveleux .Comme nous le montre la figure 2.



Figure 2 : Gamme de sondes CPT (2cm , 10 cm , 15cm , 40cm) [27].

Chap I : Présentation de l'essai de pénétration CPT

La tige du cône est soumise à des forces dû au sol voir la figure 3.

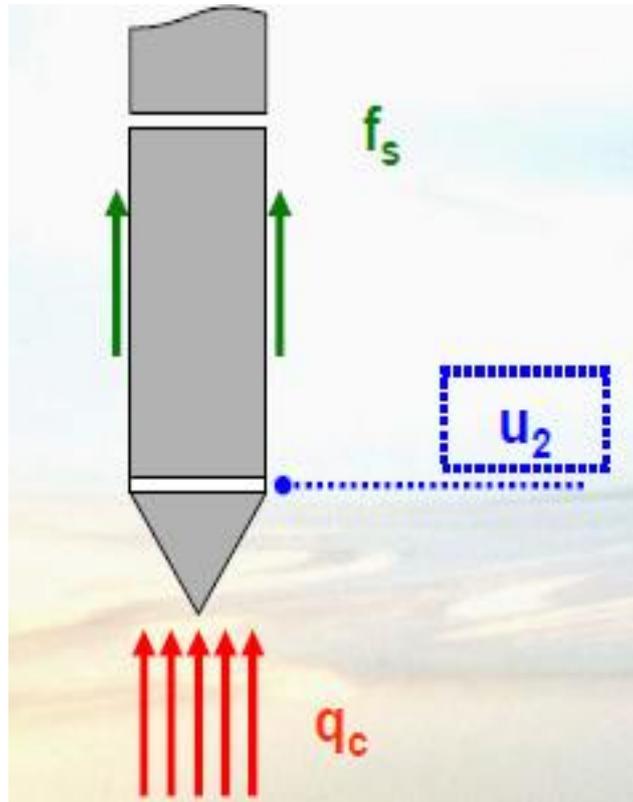


Figure 3 : Représentation des différentes charges agissantes sur le cône[1].

- La **résistance de pointe** q_c représente le rapport entre la force mesurée sur la pointe du cône Q_c et l'aire de la surface de projection normale de la pointe du cône A_c .
- Le **frottement latéral local** f_s représente le rapport entre la force de frottement sur le manchon f_s et de l'aire de sa surface A_s .
- La **pression interstitielle** U_2 .

Les résultats des essais de pénétration au cône est leur distribution, peuvent être représentées sous forme de graphes.

I-2) Développement de l'essai CPT

- **Travaux de Sanglerat (1932)**

Les premiers pénétromètres à cône mécanique ont été développés en Hollande à l'aide de tuyau à gaz de diamètre extérieur de 35 mm et possédant une tige de poussée intérieure en acier de 15 mm. Une pointe cônica de 10 cm² de surface projetée et un angle de 60° a été fixé aux tiges de poussée intérieures en acier, comme le montre la figure 4.

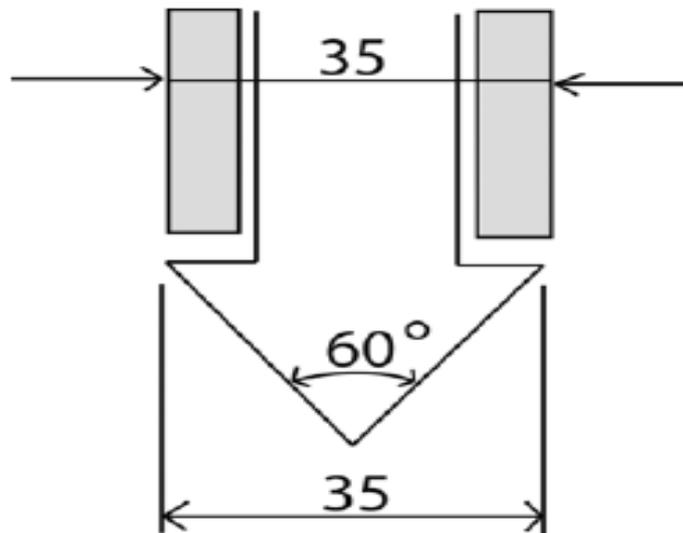


Figure 4 : Cône mécanique hollandais ancien[28].

- **Travaux de Begemann (1948)**

Le cône mécanique néerlandais d'origine a été amélioré en ajoutant une partie cônica juste au-dessus du cône. Le but de la géométrie était d'empêcher le sol d'entrer dans l'espace entre le boîtier et les tiges intérieures.

Les cônes mécaniques, représentés sur la figure 5, sont encore utilisés dans certains pays du monde.

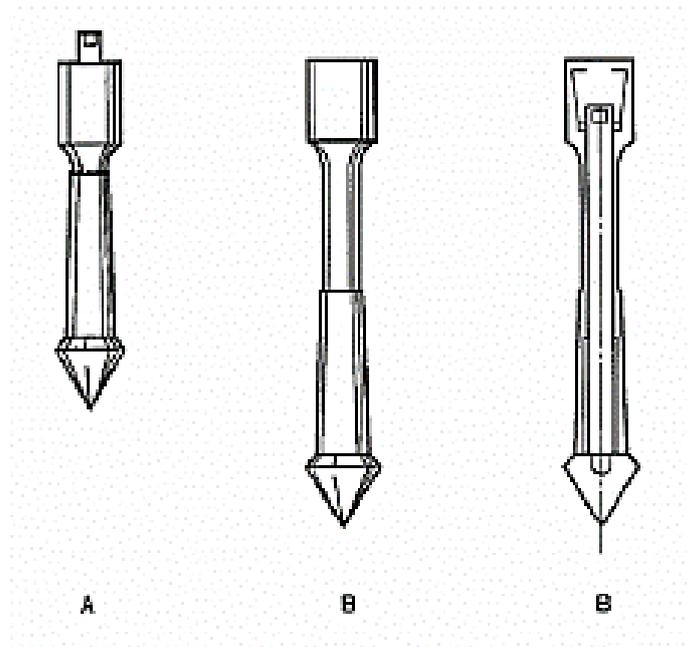


Figure 5 : Pénétrömètre à cône mécanique néerlandais à manteau cône[28].

- **Travaux de Begemann (1953)**

En 1953, Begemann a introduit un manchon de friction derrière le cône pour inclure la mesure du frottement local du manchon (voir figure 6). Des mesures sont effectuées tous les 20 cm et pour la première fois, Begemann a montré que le type de sol est fonction du rapport entre le frottement latéral et la résistance de pointe, appelé rapport de frottement. La figure 7 montre l'abaque de classification de Begemann donnant la résistance de pointe q_c en fonction du frottement latéral f_s . Cet abaque montre que les sols pulvérulents présentent des valeurs de résistance de pointe et de frottement latéral plus grandes que les sols fins.

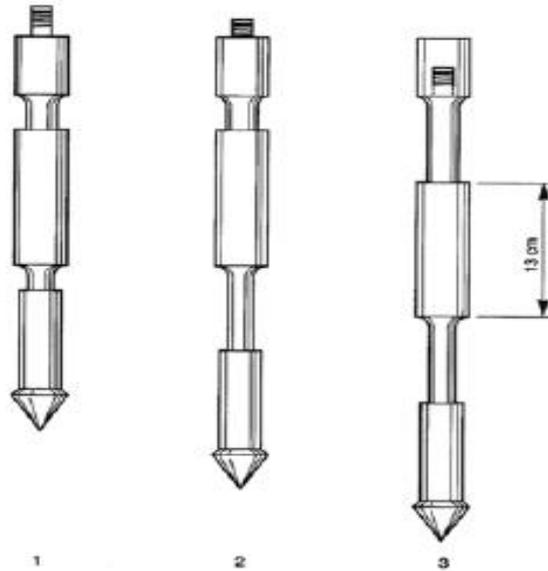


Figure 6 : Cône de type Begemann avec manchon de friction[29].

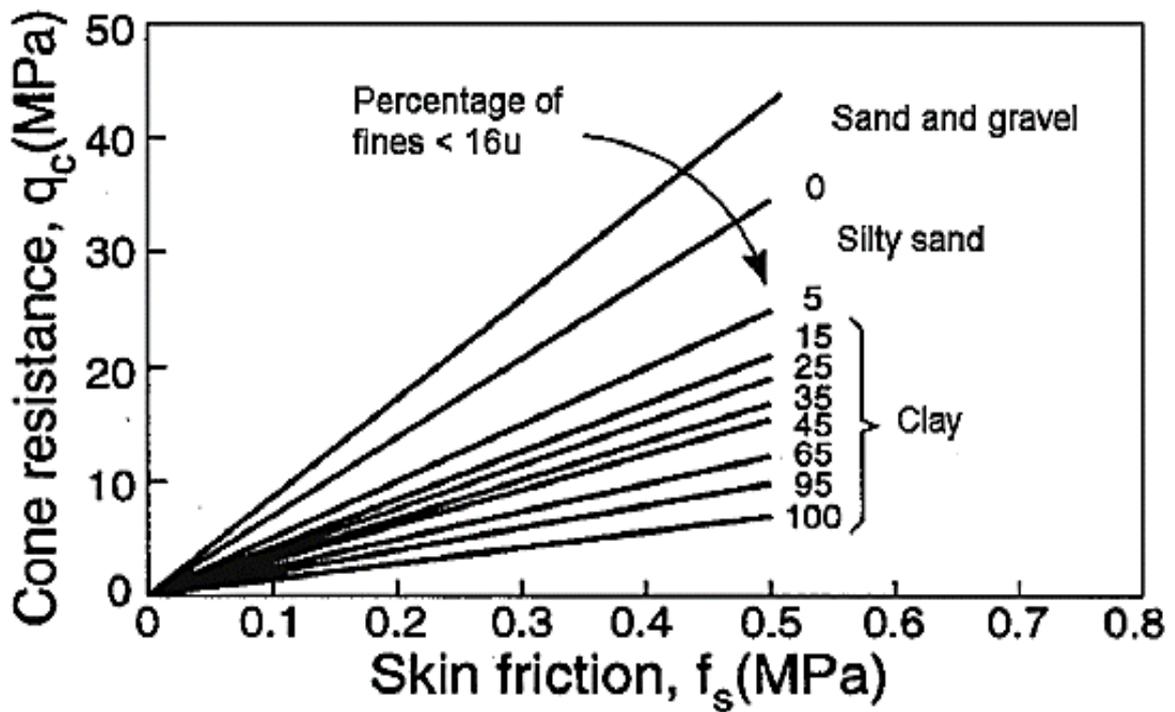


Figure 7 : Première classification du sol pour le cône mécanique de Begemann[29].

- **Travaux de Fugro (1965)**

Fugro a développé un cône électrique dont la forme et les dimensions sont à la base des cônes modernes et du test international de référence et procédure ASTM. Les principales améliorations par rapport au cône mécanique sont :

- Élimination des lectures erronées dues au frottement entre les tiges intérieures et les tiges extérieures et le poids des tiges intérieures.
- Test continu avec taux de pénétration continu sans la nécessité de mouvements alternés des différentes parties du pénétromètre et aucun mouvement indésirable du sol influençant la résistance du cône.
- Mesure électrique plus simple et plus fiable de la résistance du cône et frottement du manchon.

- **Travaux de Schmertmann et al (1974)**

Les pénétromètres à cône qui pouvaient également mesurer la pression interstitielle (*piézocône*) étaient introduit.

Les premiers modèles avaient différentes formes et filtres à pression interstitielle.

Peu à peu, la pratique s'est normalisée de sorte que la position recommandée de l'élément filtrant est proche derrière le cône au niveau de u_2 (la pression interstitielle). Avec la mesure de la pression interstitielle de l'eau, il est devenu évident qu'il était nécessaire de corriger la résistance du cône pour la pression interstitielle de l'eau (q_t), en particulier dans l'argile molle.

q_t : représente la résistance en pointe corrigé.

I-3) Matériels utilisés

- **Appareillage et instrument de mesure**

a) Le pénétromètre statique se compose de l'appareillage suivant :

- Structure de réaction : Le dispositif qui permet de transmettre, au train de tiges, l'effort de fonçage ;
- 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 ;
- Train de tiges et système de guidage : Les tiges doivent être assemblée fermement pour constituer un train de tiges rigidement liées selon un axe rectiligne et continu ;
- La pointe : Placée à l'extrémité inférieure du train de tige, la pointe est constituée d'un cône et d'un corps de même axe que le train de tiges.

Le corps de pointe qui sert de tube de garde au cône comporte éventuellement un manchon de frottement, placé alors, immédiatement au-dessus du cône, ainsi qu'un inclinomètre.

b) Les appareils de mesure sont adaptés en fonction des informations à recueillir pour :

- La longueur de pénétration : la profondeur atteinte par le cône peut être différentes de la longueur de pénétration lorsque le train de tige a dévié par rapport à la verticale ;
- La résistance à la pénétration du cône ;
- Le frottement latéral local : la mesure se fait à partir d'un dispositif relié au manchon de frottement ;
- L'inclinaison de la pointe : Un capteur inclinométrique éventuel solidaire du corps de pointe donne l'inclinaison de la pointe.

I-4) Mode opératoire

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

- Repérage sur un plan de situation et identification de l'essai pénétrométrique sur un plan coté ;
- Vérification et étalonnage périodiques ;
- Examen des joints de protection de la pointe ;

Pendant l'essai, il faut effectuer un ensemble de manœuvres souvent simultanées qui sont :

- Faire coïncider l'axe du train de tige avec celui de l'effort de fonçage ;
- Enfoncer 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 ;

Les mesures :

L'intervalle de profondeur entre deux ensembles de saisie consécutifs ne doit en aucun cas être supérieur à 10cm.

Les lectures et leur saisie comprennent :

- Obligatoirement :
 - * La profondeur ;
 - * L'effort apparent sur le cône seul q_c
- Eventuellement :
 - * L'effort total de pénétration du train de tige q_t
 - * L'effort de frottement latéral local f_s
 - * L'inclinaison de la pointe

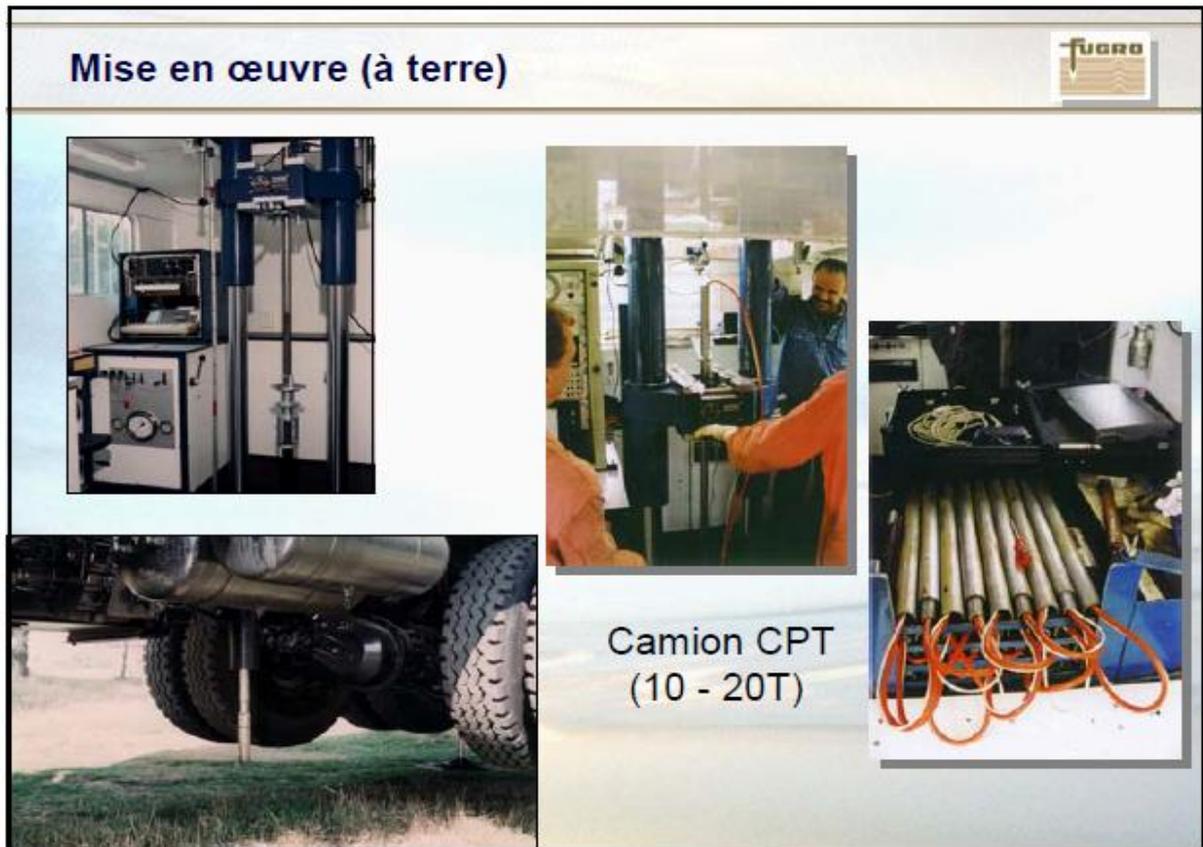


Figure 8 : Mise en œuvre du CPT sur terre[1].

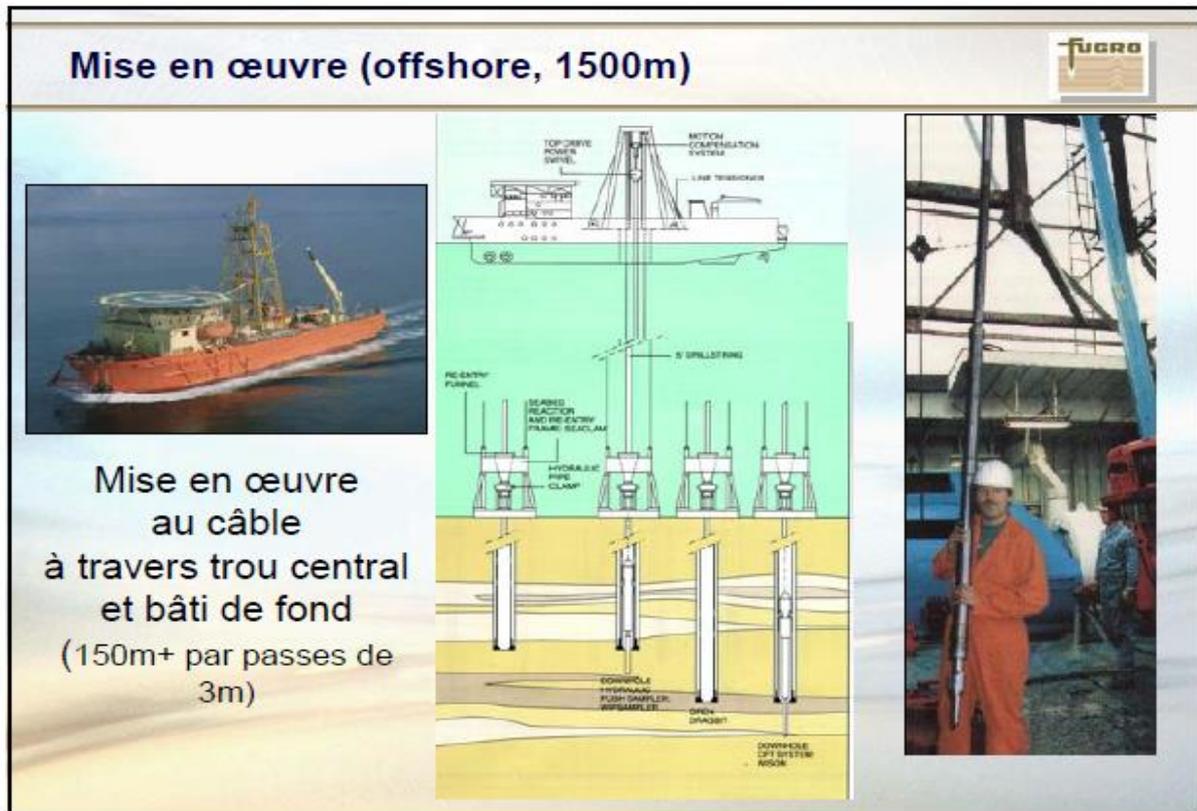


Figure 9 : Mise en œuvre du CPT sur la mer (à 1500m)[1].

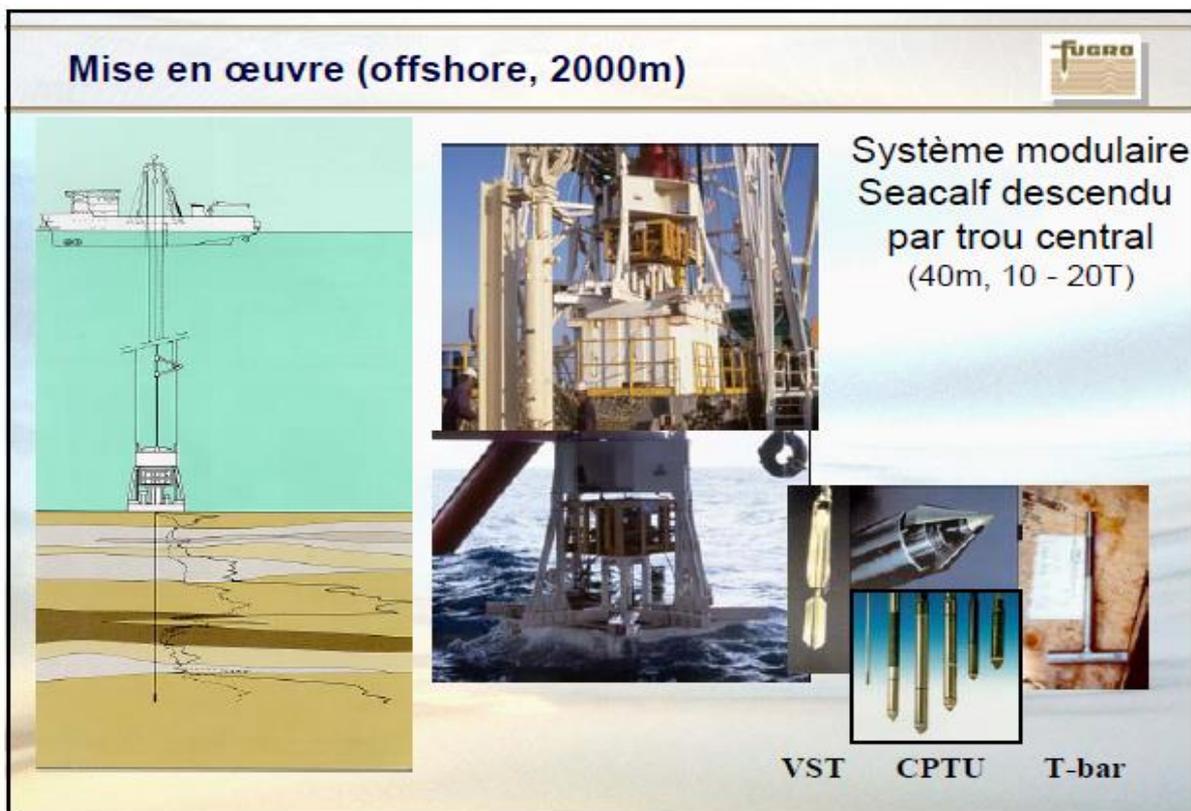


Figure 10 : Mise en œuvre du CPT sur la mer (à 2000m)[1].

I-5) Les différents types de CPT

- **Le pénétromètre à cône mécanique**

Dans ce type d'essai de pénétration, le cône est enfoncé dans le sol au moyen de tubes d'acier munis de tiges intérieures. Les forces nécessaires à cet effet sont mesurées en haut des tubes à l'aide de manomètres (pression d'huile dans un vérin) ou de dynamomètres (capteurs de force) électroniques.

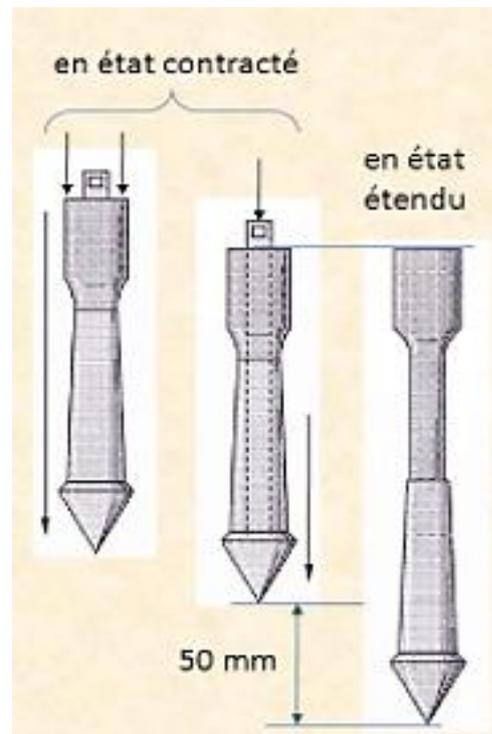


Figure 11 : Pénétromètre mécanique au cône de Dutch[23].

On peut déviser le CPT mécanique en deux types

1) CPT mécanique discontinu

Les CPT mécaniques discontinus sont caractérisés par le fait que, pendant la mesure, le cône subit un mouvement relatif par rapport aux tubes de sondage.

Chap I : Présentation de l'essai de pénétration CPT

La méthode d'exécution d'un CPT mécanique discontinu se déroule comme suit : mesure 1 résistance au cône - mesure 2 résistance totale = résistance au cône + résistance au frottement latéral

Lors de CPT mécaniques discontinus, les cônes peuvent effectuer des mouvements par rapport aux tubes. Ils sont entraînés mécaniquement au moyen de tiges. Ces tiges de 15 mm de diamètre peuvent coulisser librement dans des tubes d'acier étiré de même diamètre que le cône. Au fur et à mesure que le cône s'enfonce, le nombre de tubes nécessaires est vissé sur le tube terminal. Un raccord, situé au-dessus du niveau du sol, permet d'exercer la pression soit sur les tubes soit sur les tiges. Une chambre à huile équipée d'un manomètre ou des dynamomètres (capteurs de force) électroniques permettent de mesurer à tout moment la force exercée sur les tubes, d'une part, et sur les tiges, d'autre part.

On procède comme suit: quand les tubes et les tiges ont été enfoncés à la profondeur souhaitée, la force est transmise aux tiges et augmentée jusqu'au moment où le cône pénètre lentement dans le sol. Une fois que le cône a atteint sa position la plus basse par rapport au tube, la pression est à nouveau transmise aux tubes. Le bas des tubes entre bientôt de nouveau en contact avec le cône; à partir de ce moment, le cône est entraîné par les tubes et il est possible de mesurer la résistance totale à la pénétration; à la profondeur nouvellement atteinte, on peut à nouveau déterminer séparément la résistance au cône. En ce qui concerne la résistance au cône proprement dite, on note la valeur maximale de la résistance pendant la course libre.

2) CPT mécanique continu

Lors de la réalisation d'un CPT mécanique continu, le cône est enfoncé dans le sol au moyen de tubes d'acier munis de tiges internes. Avant le début de l'essai de pénétration, le cône est écarté de 1 à 2 cm (de manière à ne plus buter contre le tube de sondage). Ensuite, les tubes et les tiges internes sont poussés ensemble en un même mouvement continu. La résistance au cône et la résistance latérale au frottement sont déterminées par mesure, à l'aide d'un corps de mesure, de la force exercée sur les tubes et les tiges internes.

Dans ce type d'essai de pénétration, le cône est enfoncé dans le sol au moyen de tubes d'acier munis de tiges internes. Les forces nécessaires à cet effet sont mesurées en haut des tubes et des tiges internes au moyen de dynamomètres (capteurs de force) électroniques.

Le CPT mécanique continu est caractérisé par le fait que, pendant la mesure, le cône reste dans la même position écartée tandis que les tubes et les tiges internes sont poussés ensemble en un même mouvement continu à une vitesse constante de ± 2 cm/sec.

Chap I : Présentation de l'essai de pénétration CPT

Avant le début de l'essai de pénétration, le cône est écarté de quelques centimètres. Cette distance doit être suffisamment grande pour compenser la compression élastique des tiges internes afin que la force exercée sur le cône soit transmise entièrement par les tiges internes. Cette distance ne peut pas non plus être trop grande au point qu'aucune pression ne serait plus exercée sur les tubes (en fonction des appareils utilisés).

Les forces sont mesurées en continu en haut des tubes et des tiges internes pendant les opérations de sondage: la résistance de la pointe est mesurée par la force exercée sur les tiges internes et la résistance totale, par la force totale exercée sur les tubes et les tiges internes; on peut ainsi déduire la résistance de frottement latéral.

Si l'on rencontre des inclusions dures, on peut envisager de refermer le cône afin d'éviter le bris du matériel. A cet effet, on enlève une tige interne et, de ce fait, il n'est plus possible de transmettre de force au cône mais la pression est exercée uniquement sur les tubes. Le cône sera ainsi ramené contre les tubes extérieurs, ce qui permettra de pousser à la capacité maximale de l'appareillage CPT sans être limité à la résistance au cône. Quand les inclusions ont été perforées, la tige interne peut être remise dans les tubes de façon à obtenir une position du cône écartée, et l'on peut à nouveau exercer une force sur le cône. Pendant cette action, on ne peut mesurer que la résistance totale et l'on perd toutes les informations en rapport avec la résistance de la pointe et donc également sur le frottement latéral.

(On peut aussi cité les réducteurs de frottement)

Réducteurs de frottement

L'emploi d'un réducteur de frottement réduit le frottement sur les tubes et permet ainsi d'atteindre une plus grande profondeur lorsque ce n'est pas la résistance au cône qui limite l'essai.

Le réducteur de frottement se compose d'un élargissement annulaire ou à ailettes du tube, placé à une certaine distance derrière le cône.

Afin de ne pas influencer la mesure de la résistance au cône et le frottement latéral local, les normes préconisent que le réducteur de frottement soit placé à 400 mm au moins derrière la pointe de sondage.



Figure 12-13 : Réducteurs de frottement[9].

- **Le pénétromètre à cône électrique**

Pendant l'exécution d'un CPT électrique, les forces exercées sur le cône sont mesurées par des cellules de pression situées dans le cône même; les signaux sont ensuite envoyés sous forme électrique, optique, acoustique ou par signaux radio au système d'enregistrement installé dans le véhicule de sondage. Ce cône porte le nom de cône électrique.

Lors de sondages électriques, les tubes et le cône sont toujours enfoncés ensemble et en continu dans le sol; c'est pourquoi l'on parle d'essai de pénétration *continu*. Au moment où la résistance

Chap I : Présentation de l'essai de pénétration CPT

au cône est mesurée, les tubes ont la même vitesse de pénétration que le cône. Lors de la réalisation de CPT électriques, chaque tube de sondage, d'1 m de long, est enfoncé en continu dans le sol en une seule passe.

Les cônes électriques sont équipés d'un manchon de frottement. Ce manchon a une superficie standard de 150 cm² et un diamètre qui doit ne pas être inférieur et être si possible égal à celui du cône. Le manchon de frottement est muni d'un équipement qui permet une lecture électrique de la résistance de frottement latérale exercée sur le manchon lors de la poussée. On peut alors déduire de ce relevé le frottement local par unité de surface f_s .

Un rapport de frottement (ou friction ratio) R_f peut être déduit de la résistance au cône q_c et du frottement local f_s : R_f est le rapport en % entre le frottement local f_s et la résistance au cône q_c , mesurés à la même profondeur et exprimés en pour-cent. Comme ces rapports sont caractéristiques d'un type de sol donné, on peut déduire la nature du sol de la valeur R_f . Par exemple, pour les sables, R_f est de l'ordre de 1% et, pour l'argile, R_f est de l'ordre de 2 à 5%.

En outre, un inclinomètre intégré dans le cône permet de mesurer l'inclinaison du cône. Par intégration, on peut déterminer l'écart par rapport à la verticale et, au besoin, corriger la mesure de profondeur.

Un inclinomètre est également positionné dans le cône, ce qui permet de mesurer l'inclinaison du cône. Par intégration, il est ainsi possible de déterminer la déviation du sondage par rapport à la verticale, et de corriger si nécessaire la mesure de profondeur.

Des cônes électriques de plus grand diamètre (notamment le cône de 15 cm²) peuvent être utilisés (figure 14); ils permettent dans certains cas d'atteindre des profondeurs plus importantes, grâce à leur plus grande robustesse.



Figure 14 : Les différentes tiges du cône électrique[1].

- **Le piézocône (CPT-U)**

Différents capteurs spécifiques peuvent être reliés au cône électrique en vue de récolter encore plus d'informations sur le sol. L'une des possibilités intéressantes est le sondage électrique avec mesure de la pression interstitielle. Ce sont les CPT munis d'un piézocône (figure 15), désignés par l'abréviation internationale CPTU. Les principaux avantages des mesures CPTU par rapport au CPT conventionnel peuvent se résumer comme suit:

- Possibilité d'établir une distinction entre pénétration totale drainée, partielle drainée et non drainée, d'où l'on apprend énormément sur la nature du sol;
- Possibilité de déterminer les caractéristiques de consolidation du sol;
- Possibilité d'évaluer les pressions hydrostatiques du sol;
- Meilleur profilage et meilleure identification du sol.

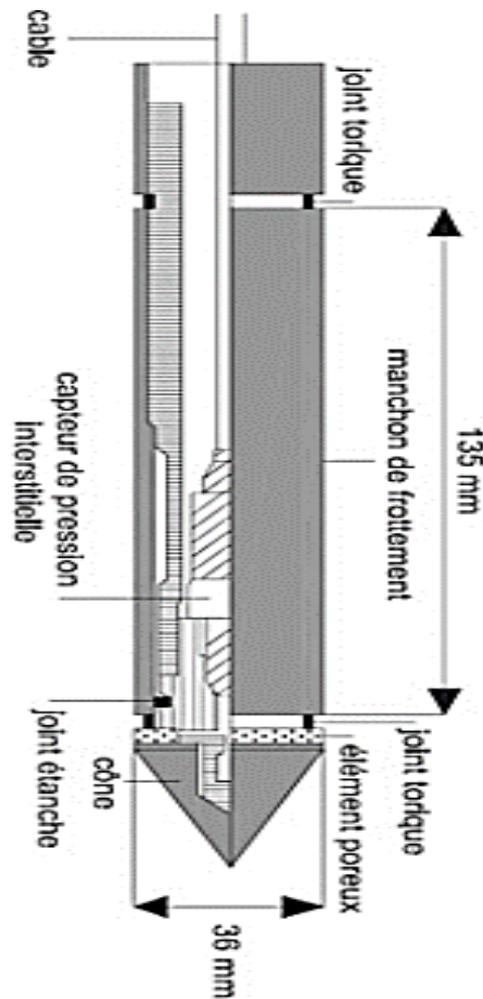


Figure 15 : le piézocône[7].

Les variations entre les différents types de piézocônes sont essentiellement dues à la localisation de ce filtre dans le cône proprement dit (figure 16); p.ex. le piézocône avec filtre placé au bout du cône (u1), le piézocône avec filtre dans la partie cylindrique juste derrière la surface du cône (u2) et le piézocône avec filtre immédiatement derrière le manchon de frottement (u3).

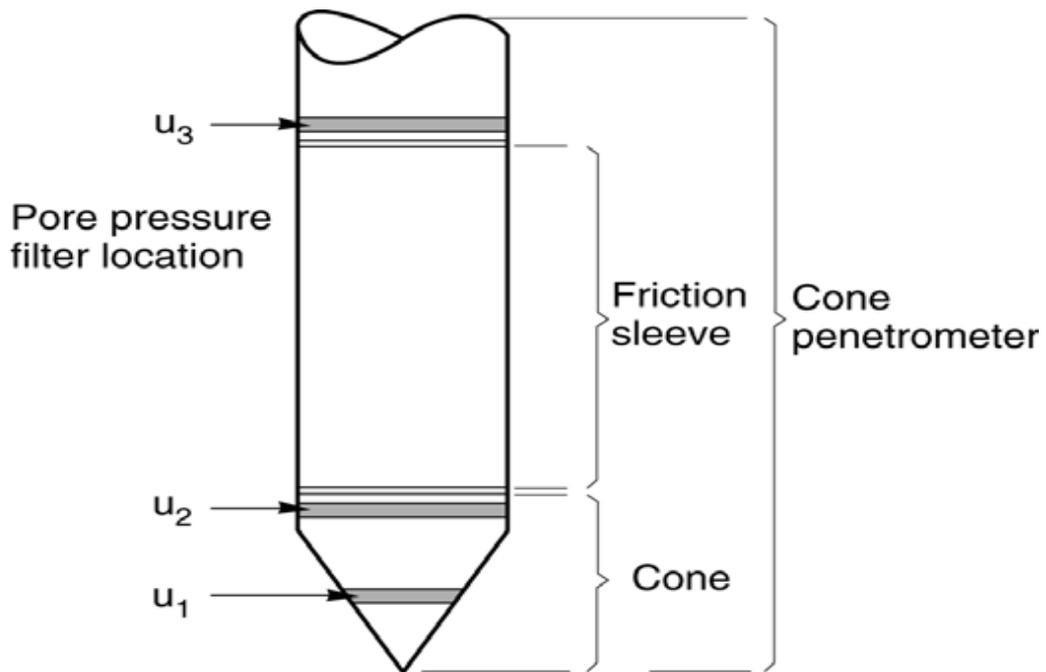


Figure 16: Localisations du filtre sur un piézocône[20].

La configuration standard est le piézocône type u_2 . Pour une bonne réalisation d'un CPTU, il est important de saturer correctement le filtre et le respect d'une vitesse d'exécution de 2cm/s. Un filtre non correctement saturé peut donner lieu à des mesures incorrectes de la pression interstitielle, surtout dans des sols mous peu perméables. Dans des sols très perméables, la surpression ou la sous-pression d'eau interstitielle disparaît (dans les sables dilatants) presque aussi vite qu'elle ne se crée du fait de la pénétration du cône. Le CPTU se produit donc dans des conditions 'drainées'. Toutefois, dans les sols cohérents, comme l'argile et le limon, d'importantes surpressions ou sous-pressions interstitielles peuvent se créer.

Chap I : Présentation de l'essai de pénétration CPT

- Le CPT sismique

L'introduction des géophones, pour mesurer la vitesse des ondes sismiques (V_s), a donné naissance du CPT sismique (SCPT) (figure 17 et 18). La vitesse de l'onde de cisaillement est mesurée par la technique downhole pendant les pauses du CPT et on obtient un profil continu de V_s en fonction de la profondeur (figure 19). Elle permet de déduire le module de cisaillement du sol donné par :

$G_{max} = \rho V_s^2$ (ρ étant la masse volumique du sol). La vitesse de l'onde de cisaillement peut aussi être utilisée pour évaluer directement le potentiel de liquéfaction du sol.

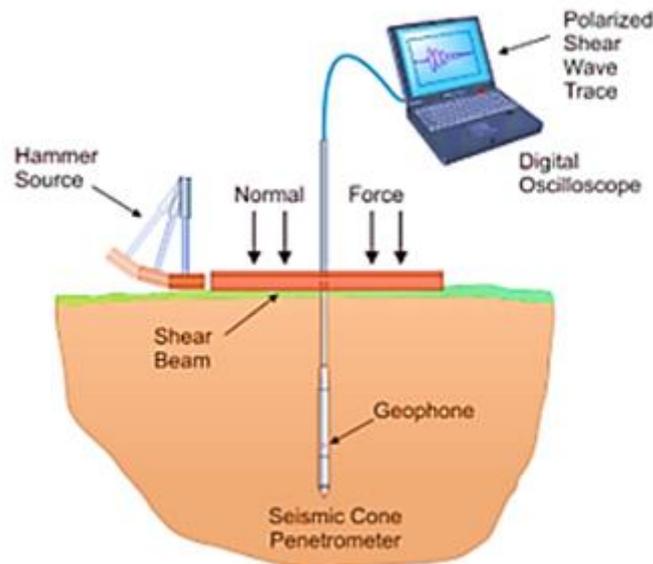


Figure 17 : fonctionnement de l'essai CPT sismique.



Figure 18 : Mode opératoire du cône sismique[1].

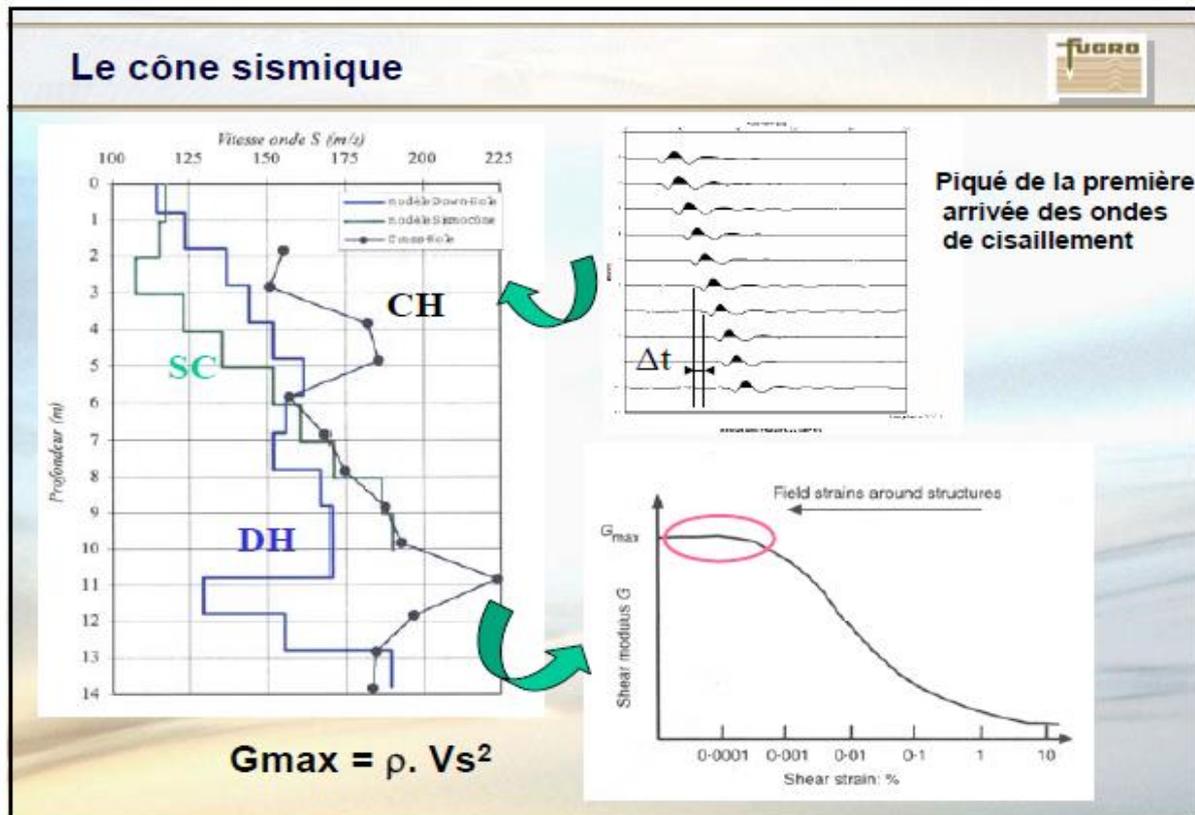


Figure 19 : quelques résultats obtenus grâce au CPT sismique[1].

I-6) Les caractéristiques et avantages des essais CPT

L'essai de pénétration statique peut fournir un large éventail d'informations dans les sols appropriés, et permet d'obtenir d'importantes données à moindre coût et avec moins d'impact que les méthodes alternatives. L'essai CPT a les caractéristiques et les avantages suivants :

- Faible impact – Le CPT dresse un portrait souterrain continu avec une perturbation du sol minimale par rapport au forage.
- Très mobile – Le CPT peut être utilisé dans la plupart des situations où une étude de terrain est requise. Sur terre, il peut être déployé à partir de camions, de véhicules chenillés et de véhicules sur mesure, tels que des wagons de chemin de fer. Au-dessus de l'eau, les tests CPT peuvent être effectués à partir de navires, barges et plates-formes autoélevatrices.
- Mesure in situ – Une méthode moins affectée par les perturbations de l'échantillon ou les contraintes que les méthodes de laboratoire
- Données volumineuses, livrées rapidement – Grâce à une acquisition rapide (>100 m par jour), le CPT génère des milliers de points de données pour permettre une caractérisation de site fiable et offre une sortie numérique qui peut être transférée en temps réel
- Une méthode largement reconnue – Les résultats des CPT sont reconnus à l'échelle internationale, et répondent aux codes de conception et aux normes de qualité les plus couramment utilisés
- Évolution constante – Au cours du développement des tests de pénétration au cône (CPT) ces 50 dernières années, le travail est axé sur l'amélioration de la sécurité, la résilience et la performance technique de la méthode.

I-7) Les utilisations des résultats du CPT

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

- **L'identification (classification) des sols**

L'une des principales applications du CPT a été la détermination de la stratigraphie du sol et l'identification du type de sol. Ceci se fait généralement à l'aide d'abaques qui relient les paramètres du CPT au type de sol. Plusieurs abaques ont été proposés dans la littérature

Chap I : Présentation de l'essai de pénétration CPT

(Schmertmann, 1978 ; Douglas et Olsen, 1981 ; Robertson et al, 1986 ; Robertson, 1990 ; Eslami et Fellenius, 2004 ; Robertson, 2010....), mais celui de Robertson et al (1986) reste le plus populaire. Récemment, Robertson (2010) a actualisé son premier abaque en termes de résistance du cône adimensionnalisée (q_c/p_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).

Dans notre étude, on va s'intéresser uniquement aux abaques non-normalisés de Robertson et al (1986) et Robertson (2010).

- **Le dimensionnement des fondations**

L'essai CPT est utilisé pour le calcul des fondations superficielles et profondes. 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 ; Bustamante et Frank, 1997 ; 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. Ainsi, la plus part des règlements en vigueur (Fascicule 2, DTR Algérien, Eurocode 7...) relie directement la capacité portante des pieux aux mesures du CPT.

- **La liquéfaction des sols**

Pour évaluer le risque de la liquéfaction d'un sol, les ingénieurs ont recours de plus en plus aux méthodes classiques basées sur les essais in situ tels que le CPT. Cette méthode qui repose sur le calcul d'un facteur de sécurité (rapport entre la contrainte de cisaillement cyclique induit par le séisme et la résistance au cisaillement cyclique du sol) suppose en général des conditions de saturation et de l'état lâche du sol. La résistance au cisaillement du sol est déterminée par corrélations directes avec la résistance en pointe (q_c) donnée par le CPT (Youd et al. 2001 ; Robertson, 2009). L'utilisation du CPT sismique permet aussi d'estimer la résistance par corrélation avec la vitesse de l'onde de cisaillement (Youd et al. 2001). Cette approche a longtemps été limitée par le manque de données expérimentales disponibles.

- **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 (Phoon and Kulhawy 1999, Teixeira et al. 2012, Luo et al. 2015). 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 de 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 supérieure ou égale à 10 (Jaksa 2007, Simoes et al. 2014).

I-8) Exigences normatives

- Dans le contexte de la normalisation européenne, des exigences strictes sont imposées à l'établissement d'un programme d'essais géotechniques, en l'occurrence d'essais de pénétration.

En particulier, la NBN EN 1997-2 stipule que les organisations qui exécutent une reconnaissance géotechnique doivent travailler suivant un système de qualité *“Un système d'assurance qualité approprié doit être mis en place dans le laboratoire de l'organisme qui intervient sur le terrain et dans le bureau d'études, et le contrôle qualité doit être exercé avec compétence lors de toutes les phases de reconnaissance et de leur évaluation.”*

Par ailleurs, des normes spécifiques européennes et ISO ont été élaborées pour l'exécution de sondages électriques et mécaniques.

Un élément important de ces nouvelles normes est qu'elles introduisent le concept de catégories d'application. Les catégories sont définies en vue d'interpréter les essais en

Chap I : Présentation de l'essai de pénétration CPT

fonction de l'usage qui sera fait de leurs résultats. La catégorie d'application choisie détermine le type d'essai de pénétration, la précision exigée des mesures et l'espacement des essais.

- Les essais de pénétration sont exécutés conformément aux (projets de) normes européennes en matière d'exécution, d'appareillage, de calibration et de rapportage des résultats, en particulier :

o NBN EN ISO 22476-1:2006 "Electrical cone and piezocone penetration tests" pour les sondages électriques

o NBN EN ISO 22476-12:2009 "Reconnaissance et essais géotechniques – Essais en place – Partie 12 : Essais de pénétration statique (CPTM)" pour les essais de pénétration au cône à pointe mécanique

- Une série de normes européennes sont entrées en vigueur dans le domaine de la technique civile au niveau international.

Il s'agit de l'Eurocode Basis of design et des Eurocodes 1 à 9, parmi lesquels l'Eurocode 7 décrit le "calcul géotechnique" (Geotechnical Design). Les autres codes abordent les exigences fondamentales, les contraintes, le calcul des ouvrages en béton ou les ouvrages en autres matériaux.

L'Eurocode 7 "Calcul géotechnique" comporte 2 parties:

* Partie 1 (EN 1997-1): "Règles générales", où quelques chapitres (3.2 à 3.4) sont également consacrés au "Planning of ground investigations".

* Partie 2 "Reconnaissance des terrains et essais" (EN1997-2) décrit le calcul géotechnique reposant sur des essais en laboratoire ou in situ.

Dans ce cadre, le comité technique européen CEN/TC341 s'occupe de rédiger des normes européennes pour l'étude des sols.

L'état des normes relatives aux sondages électriques et mécaniques se présente comme suit:

- "Electrical cone and piezocone penetration tests" a été publié sous forme de prénorme ISO/DIS 22476-1-2006.

- "Mechanical cone penetration test (CPTM)" a été publié sous forme de norme internationale ISO 22476-12:2009

I-9) Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe du fonctionnement de l'essai CPT, puis son développement à travers l'histoire, (Begemann, Fugro...), après on a cité les différents matériels utilisés, et le mode opératoire.

Ensuite, nous avons parlé des différents types des CPT, comme le mécanique , le sismique ou l'électrique et le piézocône, et de leurs caractéristiques et avantages, puis nous avons donné quelques domaines ou utilisé les résultats des essais CPTs, exemple : le dimensionnement des fondations, la liquéfaction et la variabilité des sols, ou même l'identification et la classification des sols.

Enfin, on a conclu avec quelques exigences normatives.

CHAPITRE : II

II) Classification du sol à partir de l'essai CPT :

II-1) Introduction

La première application de l'essai CPT est la détermination de la stratigraphie du sol et l'identification des types de sol. Ceci se fait en général en utilisant des abaques qui relient les paramètres du cône au type de sol. Plusieurs abaques ont été proposés dans la littérature (Douglas et Olsen (1981), Robertson et al. (1986), Robertson (1990),.....), mais ceux de Robertson et al. (1986) et Robertson (1990) sont les plus populaires.

L'abaque de Robertson et al. (1986) utilise les mesures CPT de base qui sont la résistance de pointe (q_c) et le frottement latéral (f_s). Il est donné en fonction de la résistance de pointe corrigée (q_t) et du rapport de frottement (F_r). L'avantage de l'abaque de Robertson et al. (1986) est qu'il peut être utilisé en temps réel pour évaluer le type de sol pendant et immédiatement après le CPT, car il nécessite que les mesures CPT de base.

L'abaque de Robertson (1990) utilise des paramètres normalisés et a 9 types de sol. Bien que l'abaque normalisé de Robertson (1990) est considéré comme plus fiable car il utilise les paramètres CPT normalisés en termes de contrainte effective, il ne peut être appliqué qu'après le CPT, pendant le post-traitement, car il nécessite des informations sur le poids volumique du sol et les conditions des eaux souterraines qui ne sont pas disponibles pendant le CPT.

Récemment, Robertson (2010) a actualisé son premier abaque en termes de résistance du cône adimensionnalisée (q_c/p_a) et du rapport de frottement (f_s/q_c) (en %).

Chap II : Classification du sol à partir de l'essai CPT

II-2) Abaque de Robertson et al. (1986)

L'abaque de Robertson et al. (1986) utilise les mesures CPT de base qui sont la résistance de pointe (q_c) et le frottement latéral (f_s). Il est donné en fonction de la résistance de pointe corrigée (q_t) et du rapport de frottement qui sont définis par :

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

$$R_f = f_s / q_t \dots\dots\dots(2)$$

Avec a qui est défini comme le rapport de la section du manchon et du cône , il varie entre 0,7 et 0,85 . Dans notre cas on prend $a=0,75$ qui est donné pour l'appareil utilisé dans notre cas.

Cet abaque est représenté sur la figure 20 ; il divise le sol en 12 zones et chaque zone correspond à un type de sol donné, comme résumé dans le tableau N°1.

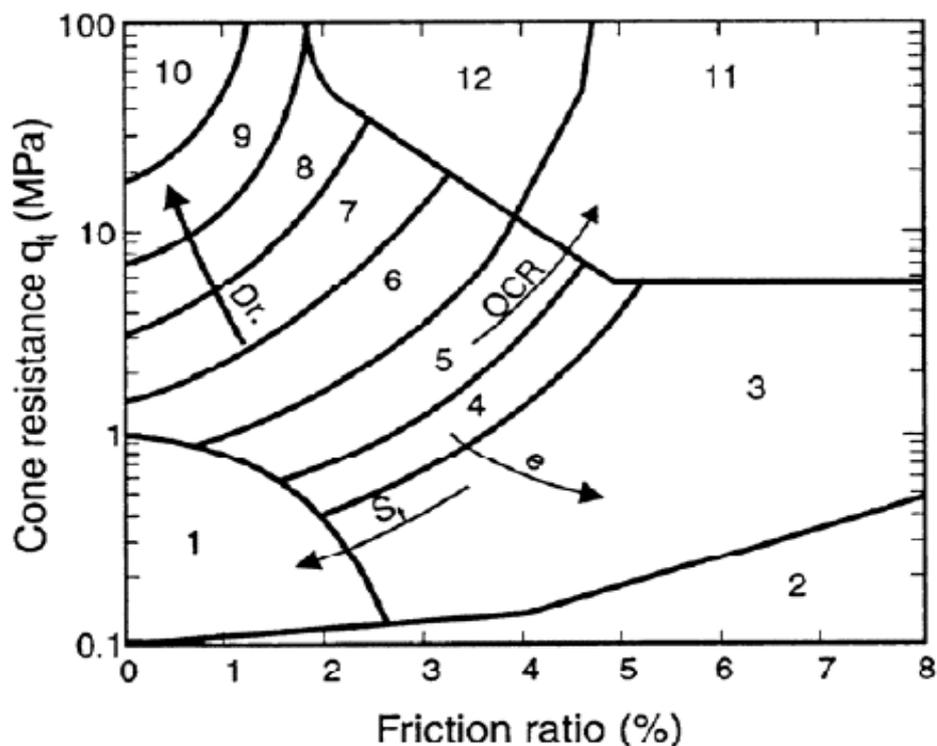


Figure 20 : Diagramme de types de comportement du sol CPT selon Robertson, 1986 [35].

Chap II : Classification du sol à partir de l'essai CPT

Tableau 1 : Classification des sols selon Robertson, 1986 [35].

Zone	Type de sol
01	Sol sensible à grains fins
02	Sol organique
03	Argile
04	Argile limoneuse à argile
05	Limon argileux à argile limoneuse
06	Limon sableux à limon argileux
07	Sable limoneux à limon sableux
08	Sable à sable limoneux
09	Sable
10	Sable graveleux à sable
11	Grains fins très rigide*
12	Sable à sable argileux*

Sur consolidé ou cimenté *

II-3) Abaque de Robertson normalisé (1990)

L'abaque de Robertson (1990) utilise des paramètres normalisés et a 9 types de sol. Les différents types de sol sont montrés dans le tableau N°2 . L'abaque normalisé de Robertson (1990) est considéré comme plus fiable car ils utilise les paramètres CPT normalisés en termes de contrainte effective, il ne peut être appliqué qu'après le CPT pendant le post-traitement, car il nécessite des informations sur le poids volumique du sol et les conditions des eaux souterraines qui ne sont pas disponibles pendant le CPT.

En général, les abaques normalisés fournissent des identifications de sols plus fiables que les abaques non normalisées, bien que lorsque la contrainte effective verticale in situ se situe entre 50 à 150 kPa, il y a souvent peu de différence entre le CPT normalisé et le CPT non normalisé. La normalisation ci-dessus est basée sur le travail de Robertson (1990) , qui a suggéré la normalisation de la résistance en pointe et le frottement latéral suivante :

$$Q_{tn} = (q_t - \sigma_v) / \sigma'_v \dots \dots \dots (3)$$

$$F_r = [f_s / (q_t - \sigma_v)] 100\% \dots \dots \dots (4)$$

Avec :

σ_v : Contrainte verticale totale.

σ'_v : Contrainte verticale effective

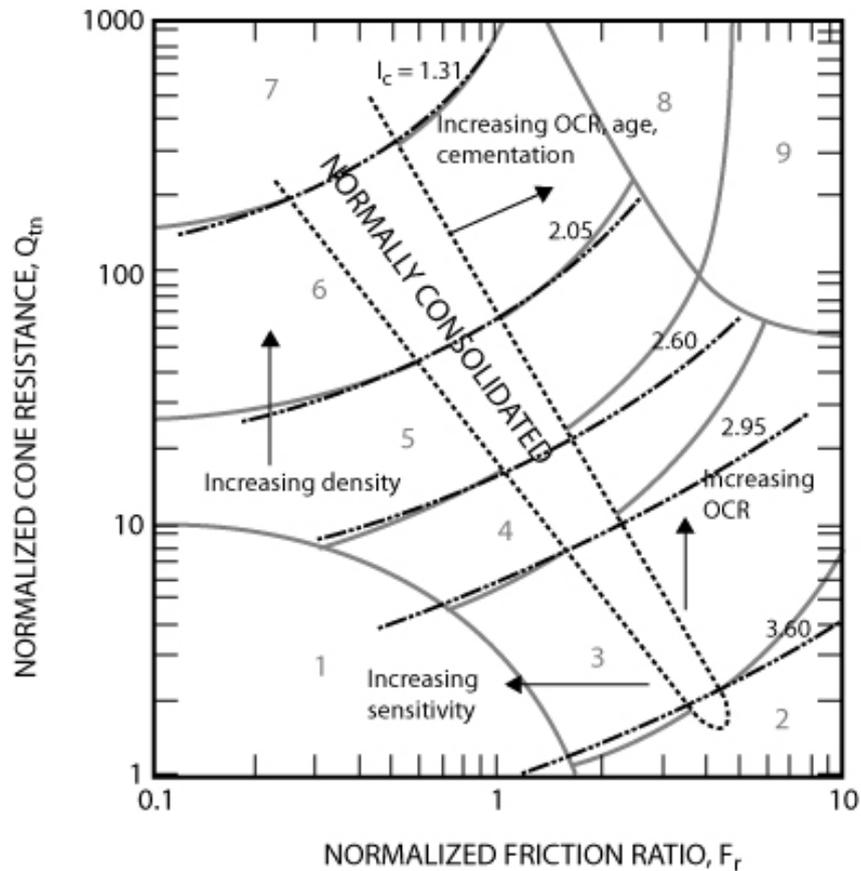


Figure 21 : Diagramme de types de comportement du sol CPT selon Robertson, 1990 [27].

II-4) Abaque de Robertson non-normalisé (2010)

Le premier abaque de Robertson et al (1986) est basé sur la résistance du cône, q_t avec une échelle logarithmique et le rapport de frottement, R_f avec l'échelle naturelle.

La figure 22 présente une mise à jour de l'abaque de Robertson (2010) en termes de résistance de cône sans dimension, (q_c / p_a), où p_a = pression atmosphérique ($p_a = 1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa} = 0,1 \text{ MPa}$) et R_f (en pourcentage), tous deux sur des échelles logarithmiques pour étendre la portion où $R_f < 1\%$. Le nombre de types de comportement du sol a également été réduit à 9 le même que celui de l'abaque normalisé de (1990) voir le tableau 2.

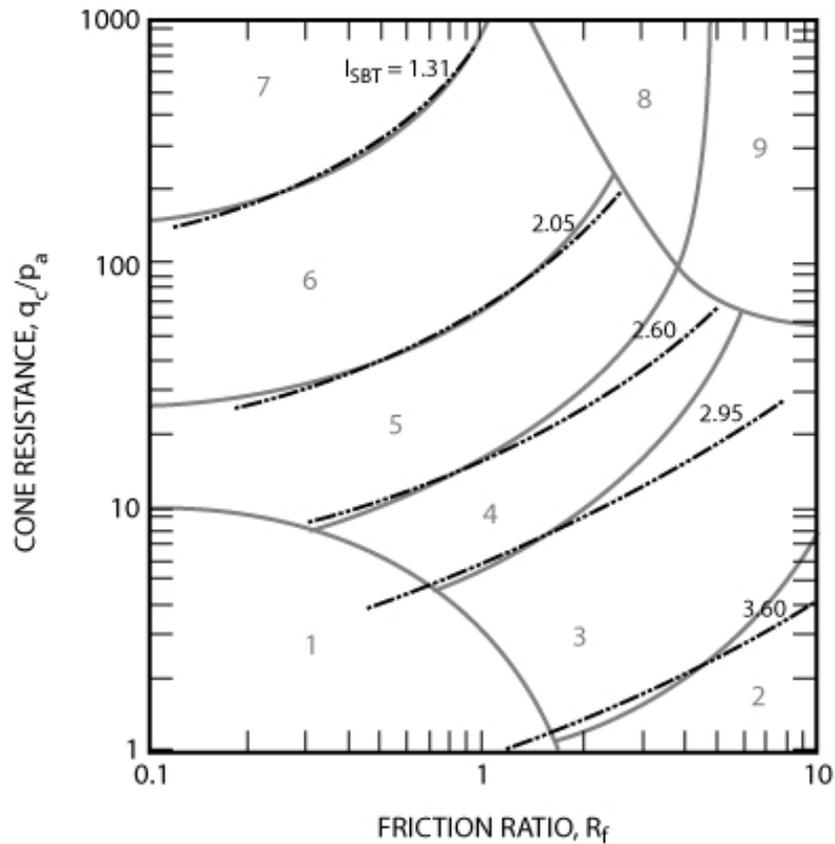


Figure 22 : Diagramme de types de comportement du sol CPT selon Robertson, 2010 [27].

Tableau 2 : Classification des sols selon Robertson, 1990 [27].

Zone	Type de sol
01	Sol sensible à grains fins
02	Sol organique –Argile
03	Argile : argile à argile limoneux
04	Mélange limoneux : Limon argileux a argile limoneuse
05	Mélange sableux : Sable limoneux à limon sableux
06	Sable : Sable à sable limoneux
07	Sable dense à sable graveleux
08	Sable rigide à sable argileux *
09	Sol rigide à grains fins*

Sur consolidé ou cimenté *

II-5) Comparaison entre les deux abaques de Robertson (1986 et 2010)

Robertson et al (1986) et Robertson (2010) ont souligné que les graphiques 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 distribution granulométrique et la plasticité du sol. Ces deux critères fournissent des renseignements complémentaires aux essais in situ et ils sont souvent liés raisonnablement bien 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 avec rapport de frottement, R_f à l'échelle naturelle, 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 : ($p_a = 1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa} = 0,1 \text{ MPa}$) 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 3 résume l'unification des 12 zones (Robertson et al., 1986) pour correspondre aux 9 zones (Robertson, 2010). La réduction du nombre de zones dans l'abaque de Robertson et al (1986) permet une comparaison plus facile et plus fiable entre les deux abaques.

Chap II : Classification du sol à partir de l'essai CPT

Tableau 3 : Unification proposée entre 12 zones (Robertson et al, 1986) et 9 zones (Robertson, 1990) [35].

Robertson et al (1986)	Robertson (2010)	Proposition commune (type de sols)
1	1	Sensitive à grains fins
2	2	Argile - sol organique
3	3	Argiles: argile à argile limoneuse
4 & 5	4	Mélanges limoneux: limon argileux & argile limoneuse
6 & 7	5	Mélanges de sable: sable limoneux à limon sableux
8	6	Des sables propres aux sables limoneux
9 & 10	7	Sable dense à sable graveleux
12	8	Sable rigide à sable argileux*
11	9	Sable rigide à grain fin*

* Sur consolidé ou cimenté *

II-6) L'indice de comportement des sols (Ic)

Jefferies et Davies (1993) ont défini un indice de type de comportement du sol (Ic) pour représenter les différentes zones sur les abaques de classification du sol basées sur le CPT.

L'indice (Ic) est essentiellement le rayon de cercles concentriques qui définissent les limites des différents type de sol.

Robertson et Wride, (1998) ont modifié la définition de Ic pour l'appliquer au diagramme Qt - Fr de Robertson (1990). Quand l'abaque CPT non normalisé est présenté sur des échelles logarithmiques les limites sont également des cercles essentiellement concentriques et un indice de type de comportement du sol non normalisé, IC peut également être défini par:

$$Ic = [(3,47 - \log(qc / pa))^2 + (\log Rf + 1,22)^2]^{0.5} \dots \dots \dots (5)$$

où:

qc = résistance du cône CPT (ou résistance du cône corrigée, qt)

Rf = rapport de frottement = (fs / qc) 100%

fs = frottement du manchon CPT

Chap II : Classification du sol à partir de l'essai CPT

L'indice IC non normalisé est essentiellement le même que le IC 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.

II-7) Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents abaques de Robertson (abaques non normalisés de Robertson et al. 1986 et Robertson 2010, abaque normalisé de Robertson 1990) qui sont les plus utilisés pour la classification du sol à partir des essais CPT. On s'est intéressé en particulier aux abaques non normalisés car ils peuvent être utilisés en temps réel pendant le CPT, de plus ils sont faciles à appliquer. Enfin, nous avons présenté l'indice du type de comportement du sol (I_c), qui est très important, car il nous permet d'identifier le sol en fonction de la profondeur.

CHAPITRE : III

Chap III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu

III) : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu :

III-1) Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons la description et quelques résultats de la campagne de reconnaissance géotechnique réalisée in situ dans le cadre de la réalisation de la pénétrante autoroutière Reliant le Port de Skikda à l'Autoroute Est-Ouest sur 31Kms (section N°02) entre PK 11+000 au PK 17+415 (section N°2). Ensuite, nous présentons l'application des abaques non-normalisés de Robertson pour la classification du sol en place à partir de six essais CPTu (avec dissipation).

Cette classification sera comparée aux résultats des essais de laboratoire et des sondages carottés les plus proches des essais CPTu.

III-2) Reconnaissance du site

Géologie régionale

D'après la carte géologique de l'Algérie nord orientale, d'après J.M.VILLA (1980), la région de Skikda appartenant au tell septentrional, formée essentiellement de :

- Roches sédimentaires représentées par des formations du Mio-Plio-Quaternaire.
- Roches métamorphiques représentées par des schistes argileux talqueux, sériciteux ou satinés de couleur gris bleuâtre à noirâtre, des schistes micacés, et des micaschistes granuleux ainsi que les gneiss glanduleux et schisteux.

Chap III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu

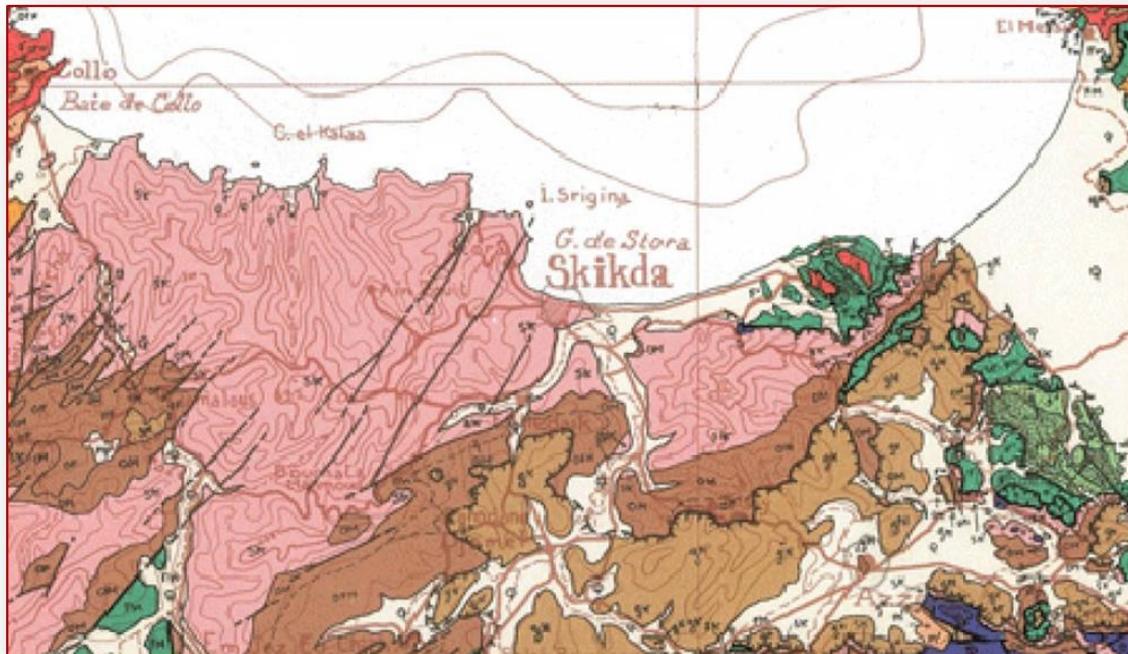


Figure 23 : Carte géologique de l'Algérie nord orientale [14]

Légende :

SBA	Socle kabyle: SBA- Paléozoïque de Béni Afeur.
SK	Socle métamorphique de Petite kabylie et du Bou Hatem (phyllades micaschistes, porphyroïde, gneiss et marbres..)
SB	Socle basique du Cap Bougaroun (péridotites et kinzigites rétromorphosées).

Chap III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu

III-3) Campagne de reconnaissance

Dans le but de déterminer d'une part, la nature géologique du terrain et d'autre part, les caractéristiques géotechniques des sols en place, le laboratoire national de l'Habitat et de la Construction « LNHC- Unité de Skikda » a réalisé le programme de reconnaissance du PK 11+000 au PK 17+415 suivant :

- Dix (10) sondages carottés (SC) avec prélèvement d'échantillons intacts ou remaniés avec des lectures CPT chaque 1.50 m.
- Treize (13) puits de reconnaissance avec prélèvement d'échantillons intacts ou remaniés.
- Sept (07) essais de pénétrations dynamiques au pénétromètre dynamique lourd de type BORRO «P.D.L».
- Pose de Huit Piézomètres.

Des essais CPTu (pénétromètre statiques avec mesure de la pression interstitielle) ont été effectués pour compléter la première campagne. Six essais sont réalisés ente le PK11+380 et le PK13+620 jusqu'à une profondeur variant entre 15 et 23 m.

Dans ce travail, nous exploitons uniquement les résultats d'une partie de cette campagne, à savoir les résultats liés aux sondages carottés les plus proches des essais CPTu pour pouvoir effectuer des comparaisons.

3-1) Sondages carottés

Les deux sondages carottés (S11-1 et S13-1), exécutés au PK11+660 et au PK13+750 sont respectivement les plus proche des (CPT3) et (CPT6), La coupe verticale pour les deux sondages est montrée sur la figure 24 et la figure 25.

Chap III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu

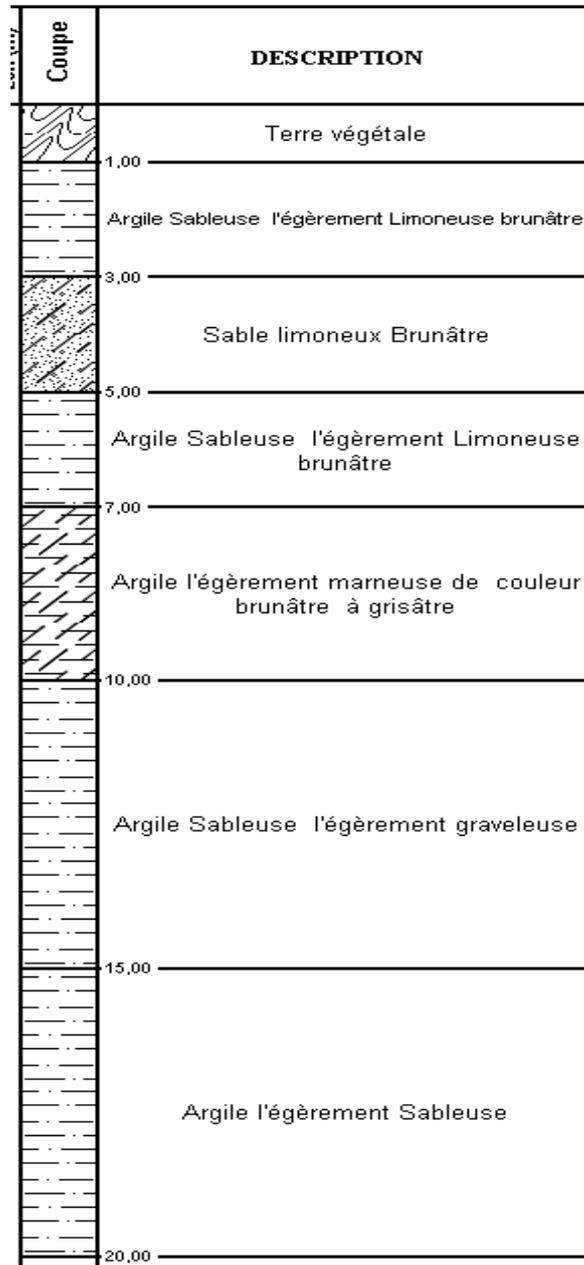


Figure 24 : Coupe verticale du sondage carotté (S11-1) au niveau du PK11+660.

Chap III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu

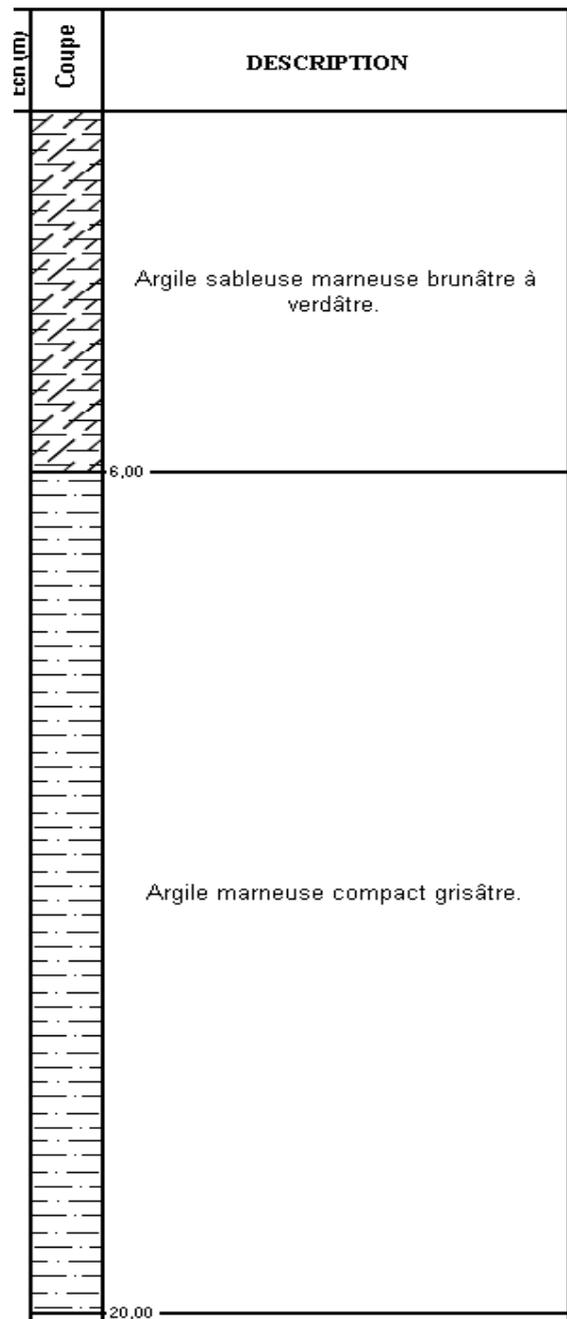


Figure 25 : Coupe verticale du sondage carotté (S13-1) au niveau du PK13+750.

Chap III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu

- Interprétation**

Pour le sondage S11-1

Le sol est une argile sableuse peu limoneuse en surface, avec présence d'une couche de sable limoneux entre 3 et 5m de profondeur, on retrouve de l'argile légèrement marneuse entre 7 et 10m , et une argile légèrement sableuse à partir de 10m.

- De 1 à 3m : On a une argile sableuse légèrement limoneuse brunâtre.
- De 3 à 5m : On a un sable limoneux brunâtre.
- De 5 à 7m : On retrouve l'argile sableuse de la première couche (1-3m).
- De 7 à 10m : On a une argile légèrement marneuse de couleur brunâtre à grisâtre.
- De 10 à 15m : On a de l'argile sableuse légèrement graveleuse.
- De 15 à 20m : on a de l'argile légèrement sableuse.

Pour le sondage S13-1

On a une argile sableuse marneuse en surface, puis une argile marneuse compact en profondeur.

- De 1 à 6m : On a une argile sableuse marneuse brunâtre à verdâtre.
- De 6m jusqu'à 20m : On a de l'argile marneuse compact grisâtre.

3-2) Essais de laboratoire

Les échantillons récupérés lors des sondages carottés ont été soumis aux essais de laboratoire suivants :

- Analyse granulométrique selon la norme (NF P 94-056 et NF P 94-057)
- Détermination des limites d'Atterberg (limite de liquidité w_l , indice de plasticité I_p) selon la norme (NF P 94-051),
- Détermination des densités sèche γ_d et humide γ_h , de la teneur en eau W_n (%) et du degré de saturation S_r (%) selon la norme (NF P 94-050)

Chap III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu

- Essai de compressibilité à l'œdomètre selon la norme (NF P 94-090-1) pour déterminer la contrainte de préconsolidation σ_c (bar), l'indice de compressibilité C_c (%) et l'indice de gonflement C_g (%).

- **Interprétation des résultats**

Les résultats de l'analyse granulométrique, montrent que le sol est une argile légèrement limoneuse en surface (jusqu'à 10 m pour le sondage 11-1). En profondeur (à partir de 15 m pour le sondage 13-1), le sol est une argile limoneuse sableuse. Le tableau 1 de l'annexe montre que, pour le sondage 13-1, le taux de carbonates est supérieur à 10% dans l'argile qui se trouve en profondeur.

Les résultats des limites d'Atterberg sont présentés dans le tableau 1 de l'annexe ; la projection de ces limites sur l'abaque de Casagrande montre des argiles limoneuses très plastiques.

Le tableau 2 de l'annexe montre des densités sèches moyennes, le sol peut être classé comme moyennement compact à compact.

Le niveau de la nappe se trouve à une profondeur variant entre 2 et 5 m d'après les mesures piézométriques.

3-3) Résultats des essais CPTu

Les mesures de six essais CPTu sont utilisées pour identifier et caractériser le sol en place en utilisant les abaques non normalisés de Robertson (2010) et Robertson et al. (1986). Les résultats des mesures CPTu en termes de résistance de pointe (q_t), du rapport de frottement (F_r) et de la pression interstitielle (u) le long de la profondeur sont montrés sur la figure 26 pour le CPT3 (le plus proche du sondage S11-1) et la figure 27 pour le CPT6 (le plus proche du sondage S13-1). Les résultats des autres CPT sont présentés dans l'annexe.

3-3-1) Profil de l'indice du type de comportement de sol (I_c) et comparaison avec les sondages carottés

Nous avons calculé l'indice du type de comportement de sol non normalisé (I_c) pour les six CPTs dans le but d'identifier le sol suivant la profondeur, puis le comparer avec les résultats des deux sondages carottés. L'indice I_c est calculé en fonction de (q_t) et du rapport de frottement

Chap III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu

(f_s/q_t) à partir de l'équation 5 du chapitre 2. Les figures 26 (d) et 27 (d) montrent les profils de l'indice (I_c) non normalisé en fonction de la profondeur pour les CPT3 et CPT6 respectivement. Les différentes zones de l'abaque de Robertson, délimitées par des droites verticales en gras, sont indiquées par des chiffres en gras. La résistance de pointe corrigée (q_t), le rapport de frottement (Fr) et la pression interstitielle (u) sont aussi représentés en fonction de la profondeur. On observe des valeurs faibles de q_t et des valeurs élevées du rapport de frottement (Fr) dans les zones 3 et 4 (argile et argile limoneuse). Dans les zones 5 et 6 (sols sableux), on a des pics de q_t et des valeurs faibles de Fr (inférieures à 1%). Les figures 26 (c) et 27 (c) montrent les pressions interstitielles générées dans les zones 3 et 4.

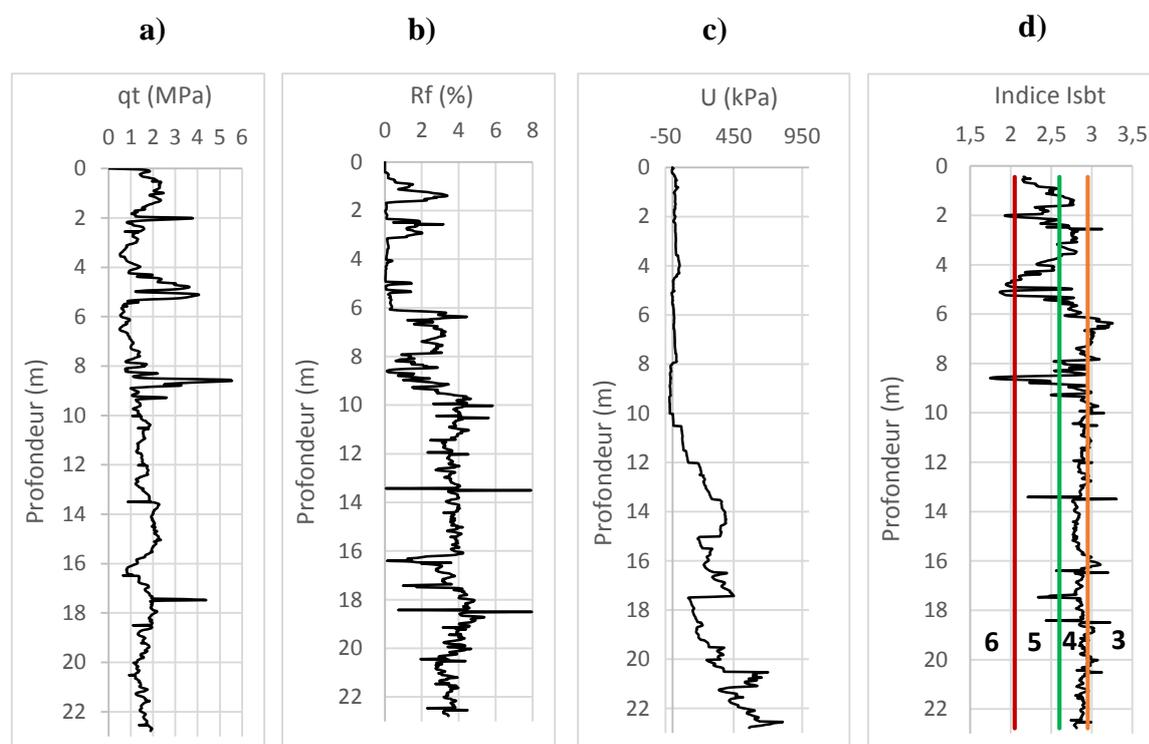


Figure 26. a) Résistance en pointe corrigée (q_t), b) rapport de frottement (Fr), c) pression interstitielle (u), d) indice de comportement de sol (I_c) pour le CPT 3.

• Interprétation

Pour le CPT 3, la figure 26 (d) montre que :

- De 1 à 3m : Le graphe (I_c) est dans la zone 4, ce qui correspond dans l'abaque de Robertson à un mélange limoneux : limon argileux à argile limoneuse, on remarque aussi que au niveau

Chap III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu

de 1.8m jusqu'à 2.2m, on a un pic qui entre dans la zone 5, ce qui veut dire : à ce niveau-là, on a une couche fine de 0.4m de sable limoneux à limon sableux (d'après l'abaque de Robertson).

- De 3 à 5m : L'indice (I_c) est dans la zone 5, d'après l'abaque de Robertson : on a un mélange sableux : sable limoneux à limon sableux, et on a un pic dans la zone 6 au niveau de 4.9m, d'après l'abaque de Robertson c'est une couche fine de sable : sable à sable limoneux
- De 5m jusqu'à 23m : Notre graphe fluctue, mais ne sort pas de la zone 4, ce qui correspond à de l'argile limoneuse, avec quelques pics dans la zone 5, au niveau de 8.8m à 9m et 13.5m et 17.5m et 18.3m qui sont des petites couches fines de sable limoneux.

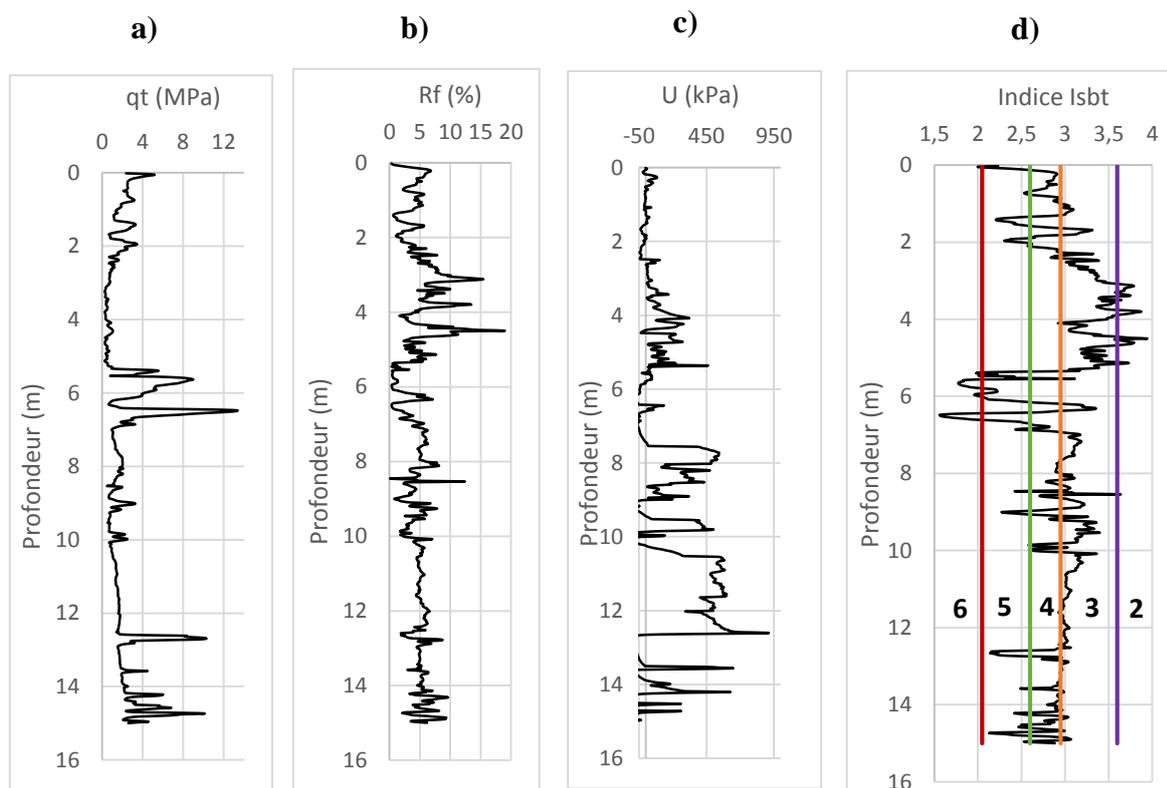


Figure 27. a) Résistance en pointe corrigée (qt), b) rapport de frottement (Fr), c) pression interstitielle (u), d) indice de comportement de sol (I_c) pour le CPT 6.

Chap III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu

- **Interprétation**

Pour le CPT6, la figure 27 (d) montre que :

- De 1 à 3m : L'indice (I_c) est majoritairement dans la zone 3 et 4, ce qui correspond (d'après l'abaque de Robertson) à une argile limoneuse, par contre on a deux piques dans la zone 5 à 1.5m et 2m de profondeur, ce qui veut dire qu'à ce niveau-là on a deux couches fines de sable limoneux.
- De 3 à 5m : Le graphe de (I_c) est dans la zone 3, dans l'abaque de Robertson : c'est une argile : argile à argile limoneuse, et on a quelques piques dans la zone 2, qui correspond à une argile organique.
- De 5 à 7m : Notre graphe de (I_c) fluctue entre les zones 3, 4, 5 et 6, ce qui veut dire que notre sol est un mélange de sable limoneux et de l'argile limoneuse.
- De 7 à 15m : L'indice (I_c) se trouve à la limite entre les zones 3 et 4, d'après l'abaque de Robertson : c'est une argile limoneuse. On note trois passages très fins de sable limoneux à 9m, 12.5m et 14.5m de profondeur.

3-3-2) Comparaison entre les résultats des CPTs et des sondages carottés

L'indice I_c est un indicateur du type de sol en place puisqu'il regroupe la résistance en pointe et le frottement latéral. On remarque que l'identification du sol en profondeur à partir de l'indice I_c est plus détaillée comparé aux sondages carottés puisque les mesures des CPT sont effectuées chaque 1 cm. Néanmoins, on note globalement une concordance entre les profils de l'indice I_c calculé à partir des résultats des CPT et les sondages carottés.

Chap III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu

III-4) Les données utilisées

Pour notre étude les données ont été acquises au sein du Laboratoire d'Habitat et de la Construction LHC-EST – Unité de SKIKDA a entrepris l'étude géophysique par méthode du cône pénétromètre teste par dissipation (CPTu) .

Cette étude rentre dans le cadre de la réalisation complémentaire de la pénétrante autoroutière de Skikda.

L'apport de cette campagne sur la conception, le dimensionnement et la réalisation de cette route, c'est que les essais CPTs effectués, nous permet de bien étudié notre sol, l'identifié et le classé (argile, sable, limon...). Savoir les caractéristiques de notre sol et ses paramètres(le I_c donne l'avantage de voir les différentes couches de sol en fonction de la profondeur), nous permet de construire des fondations sur des bases solides et fiables, pour éviter tous risques de danger sur la cette pénétrante autoroutière.

L'étude du PK11 au Pk13 cela consiste à faire 6 tests a une profondeur avoisinant les 20 m (**PK 11+380 , PK 11+400 , PK11+420 , PK13+580 , PK13+600 , PK 13+620**)

Les résultats de ses testes qui nous ont était données sont représentés si dessous :

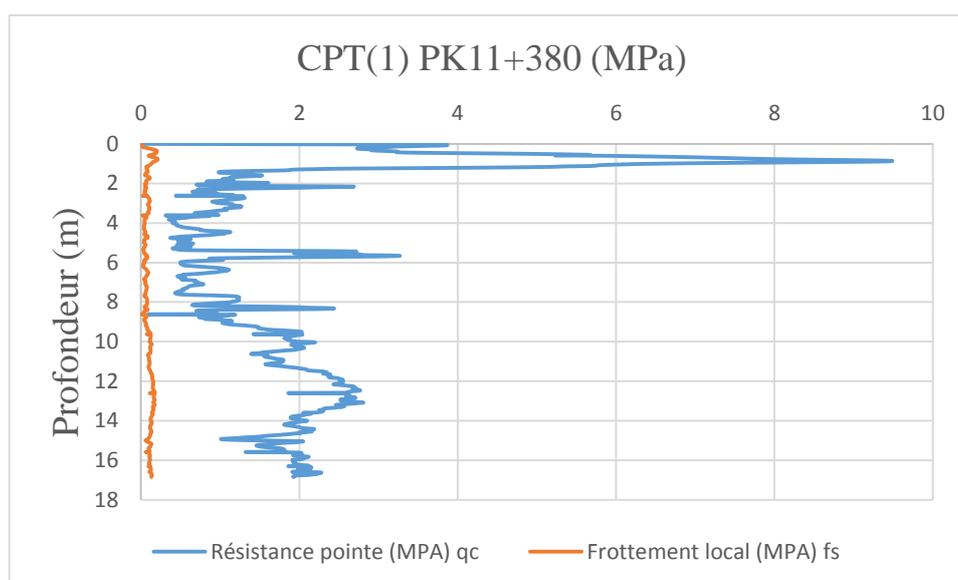


Figure 28 : Diagramme du PK11+380 (CPT1).

Chap III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu

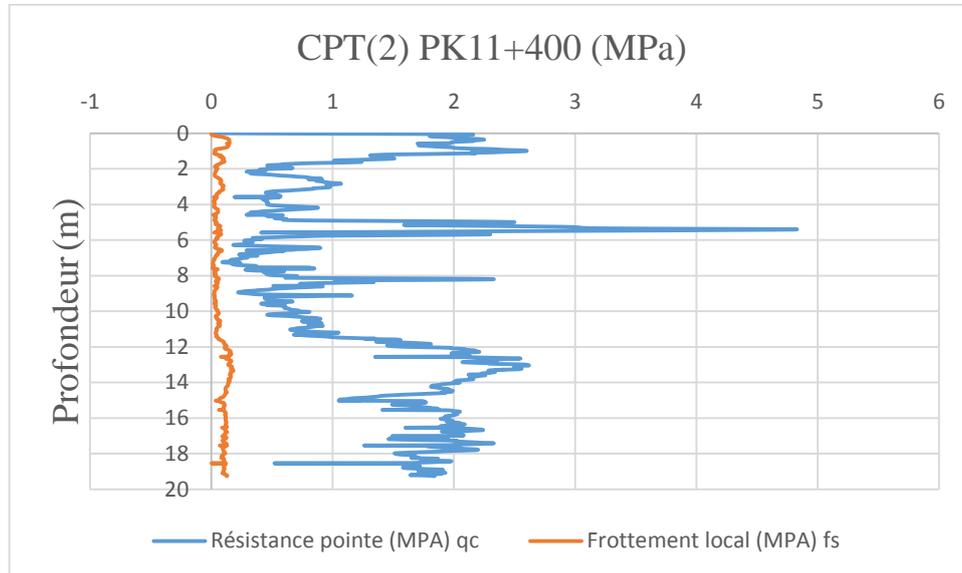


Figure 29 : Diagramme du PK11+400 (CPT2).

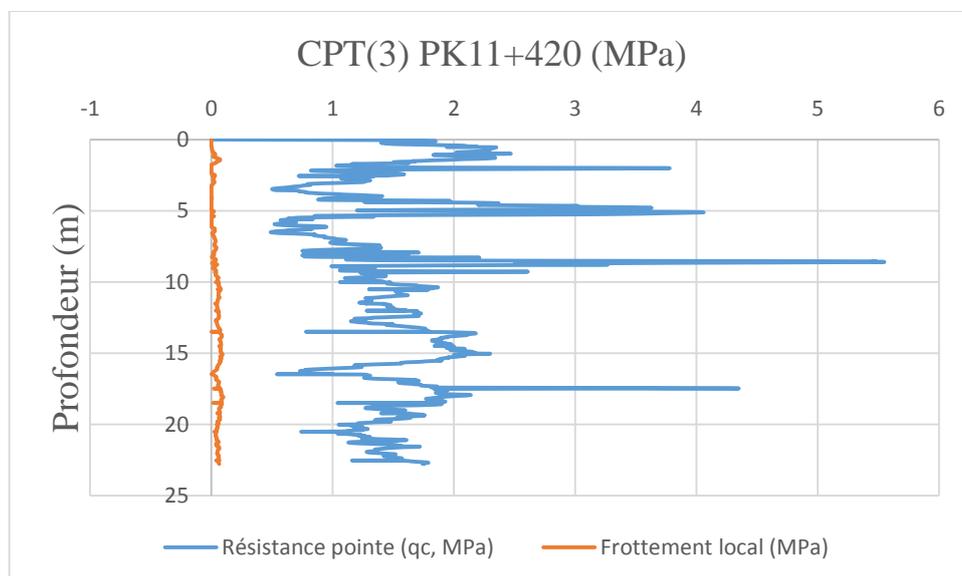


Figure 30 : Diagramme du Pk11+420 (CPT3).

Chap III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu

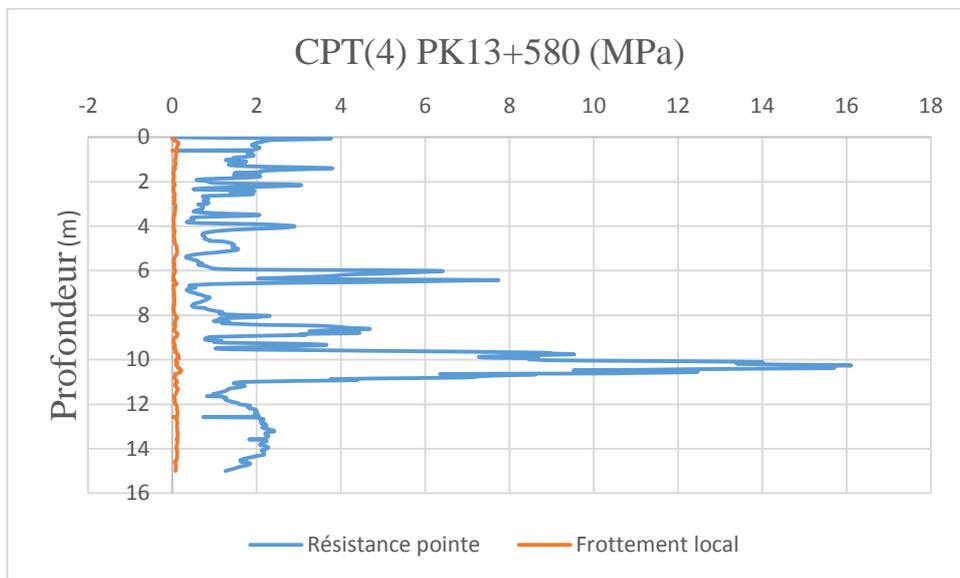


Figure 31 : Diagramme du PK 13+580 (CPT4).

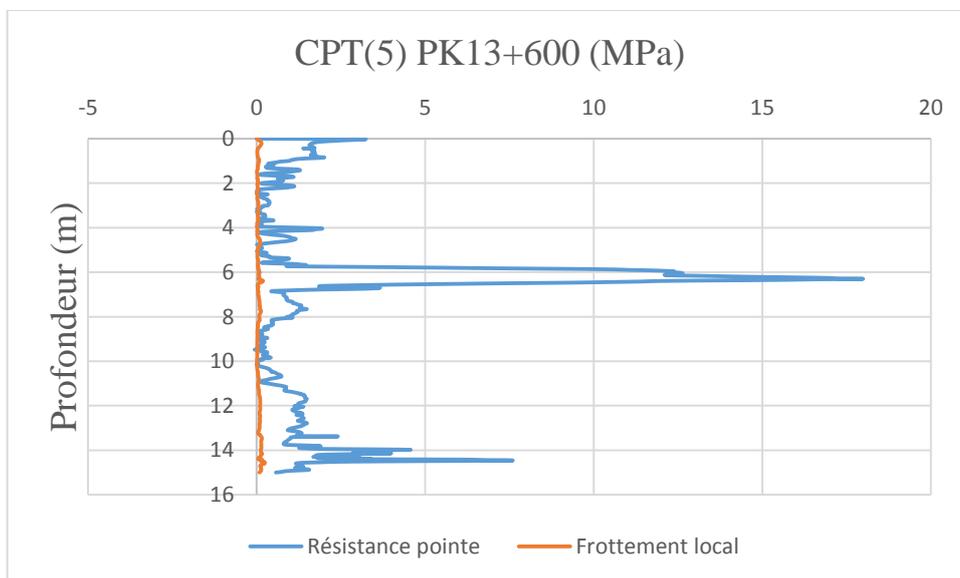


Figure 32 : Diagramme du PK13+600 (CPT5).

Chap III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu

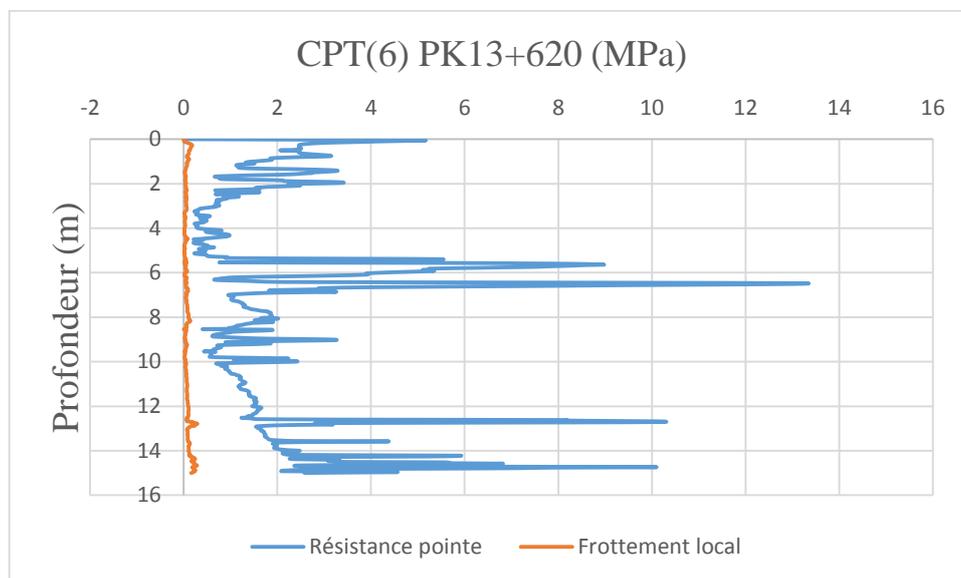


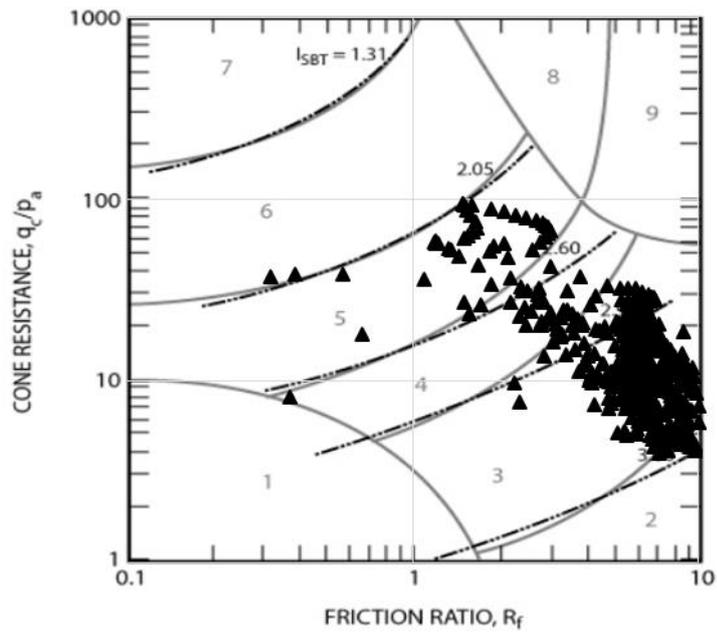
Figure 33 : Diagramme du PK 13+620 (CPT6)

Remarque : Le graphe du frottement local (f_s) est mesuré en (MPa), alors que l'unité du frottement est le (kpa). C'est pour sa donc que le graphe s'approche de 0, vue qu'on a multiplié toutes les valeurs de (f_s) fois 10^{-3} .

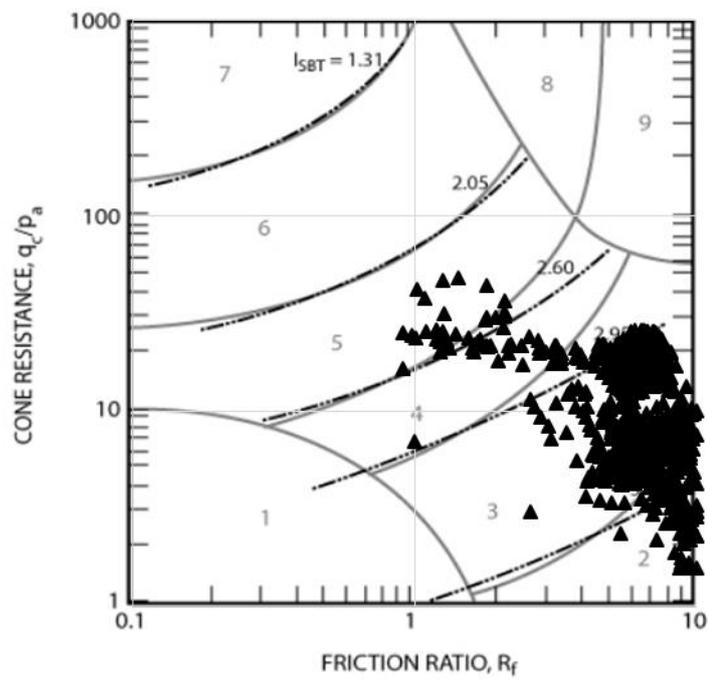
III-5) Classification du sol à partir des abaques de Robertson et al (1986) et Robertson (2010) et comparaison avec les essais de laboratoire

Nous avons tracé en premier les graphes de la résistance de pointe adimensionnelle (q_c/p_a) en fonction du rapport de frottement (F_r) pour les six CPTu. La superposition de ces graphes avec l'abaque de Robertson (2010) (échelle logarithmique) est montrée sur la figure 28. On constate que la plupart des points se concentre dans la zone 3 pour les essais CPT1, CPT2 et CPT 5. On remarque aussi des points dans la zone 2 pour les CPT 2 et CPT 5 indiquant une argile organique. Pour les autres CPTs une grande partie des points se trouve majoritairement dans les zones 3 et 4 et l'autre partie des points se répartie dans les zones 5 et 6. D'après le tableau 2 du chapitre 2, les zones 3 et 4 correspondent respectivement à l'argile et l'argile limoneuse, la zone 5 est un sable limoneux et la zone 6 est un sable.

Chap III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu

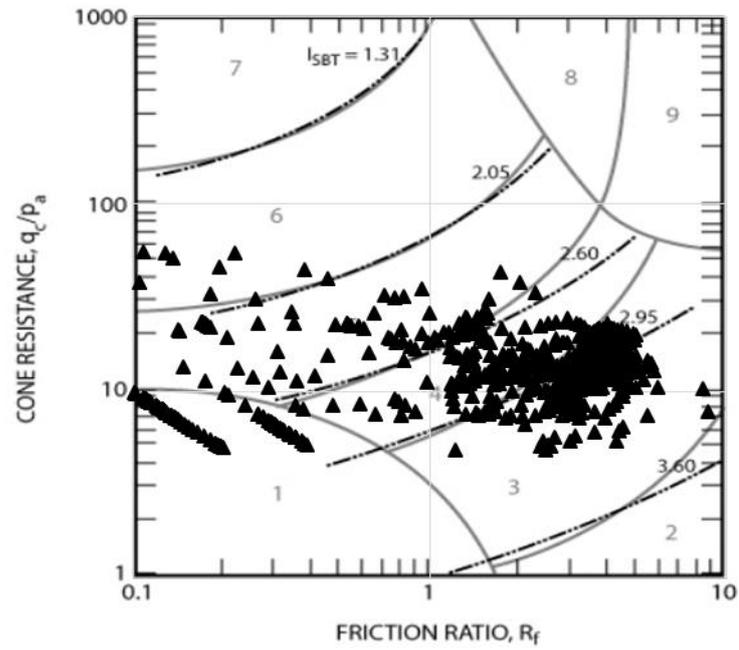


a) CPT1

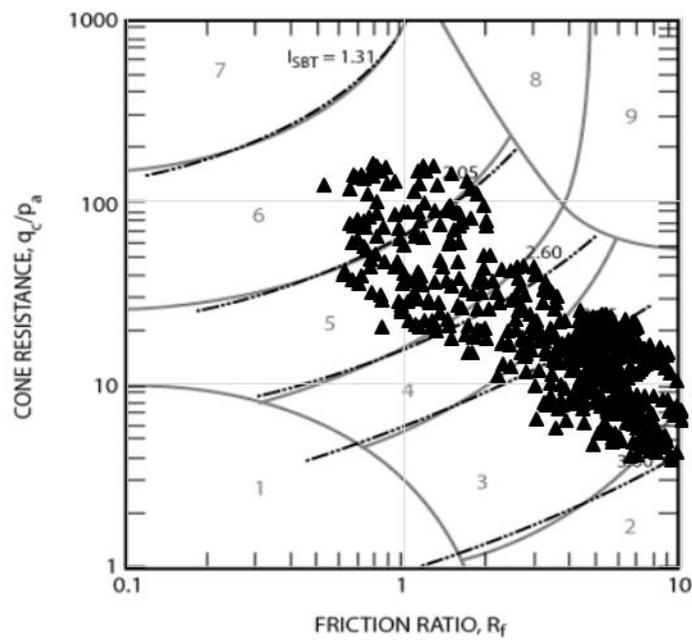


b) CPT2

Chap III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu

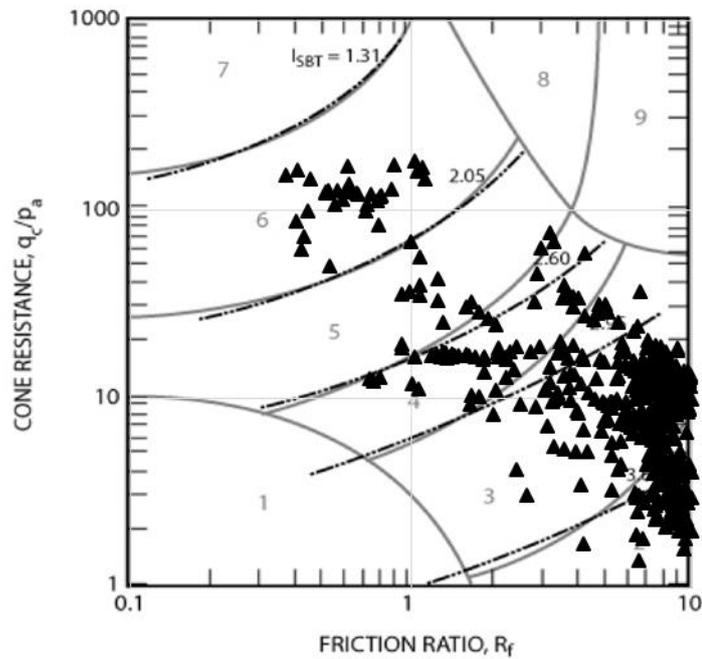


c) CPT3

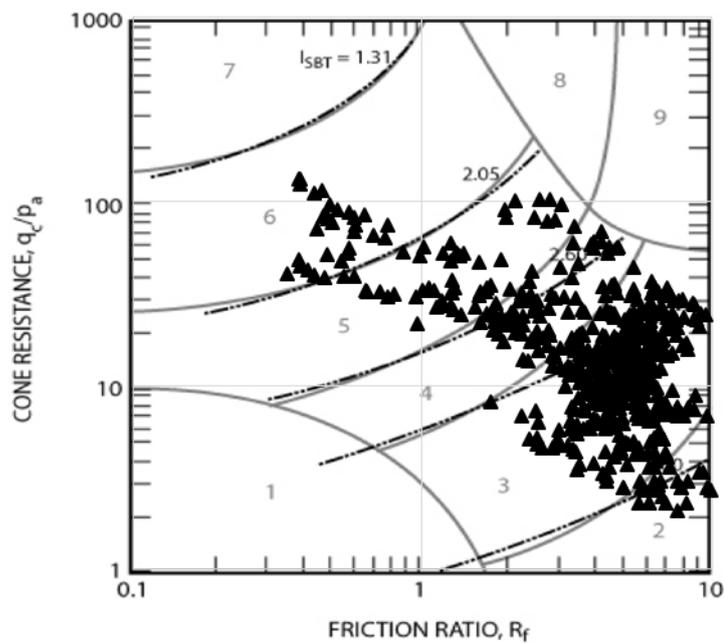


d) CPT4

Chap III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu



e) CPT5

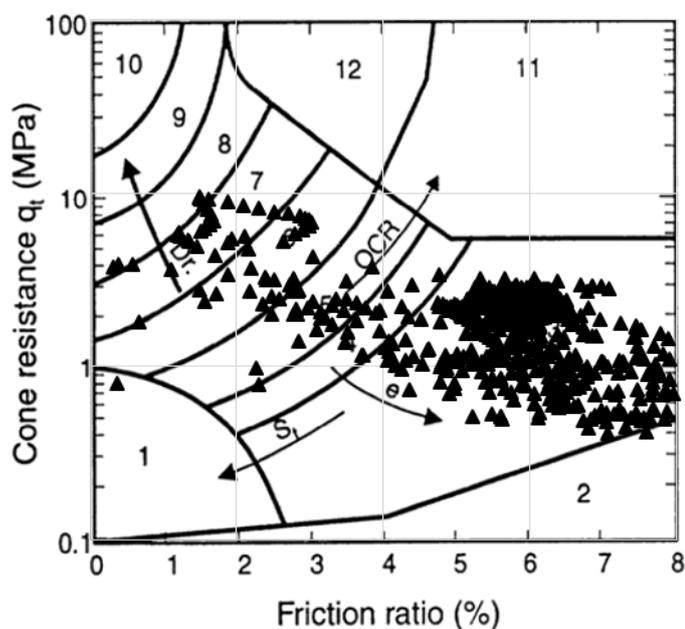


f) CPT6

Figure 34 : Projection des mesures des six CPTs sur l'abaque de Robertson (2010)

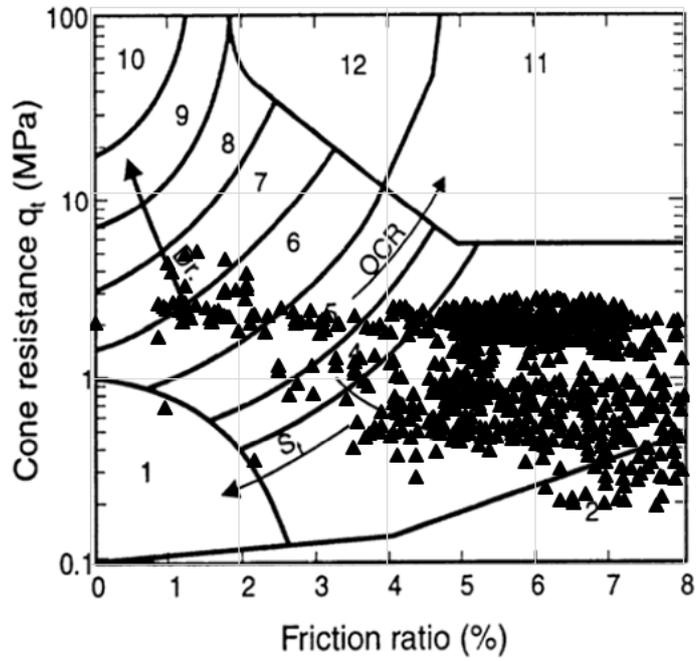
Chap III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu

Pour prendre en compte les mesures de la pression interstitielle, nous avons calculé la résistance en pointe corrigée (q_t), ensuite nous avons tracé les graphes de (q_t) en fonction du rapport de frottement (Fr) pour les six CPTu. La superposition de ces graphes avec l'abaque de Robertson et al. (1986) est montrée sur la Figure 29. On constate que pour les CPT1, CPT2 et CPT5 la majorité des points se trouve dans la zone 3 et un nombre très limité de points se répartissent dans les zones (4, 5, 6, 7 et 9). Pour les CPT4 et CPT6, une partie des points se trouve dans la zone 3, et l'autre partie est répartie dans les zones 4, 5, 6, 7 et 8. Pour le CPT 3, les points se concentrent essentiellement dans les zones 4 et 5 et quelques points se trouvent dans les zones 1, 3, 6 et 7. Les zones 3, (4 et 5) où il y a plus de points correspondent respectivement à l'argile et l'argile limoneuse en se référant au tableau 1 du chapitre 2. Les zones (6 et 7) et 8 correspondent respectivement à un sable limoneux et un sable propre d'après le même tableau.

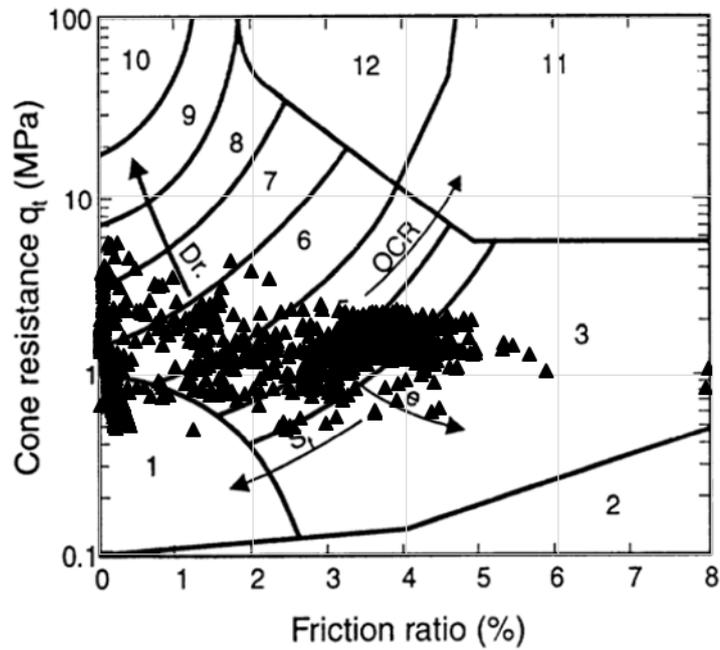


a) CPT1

Chap III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu

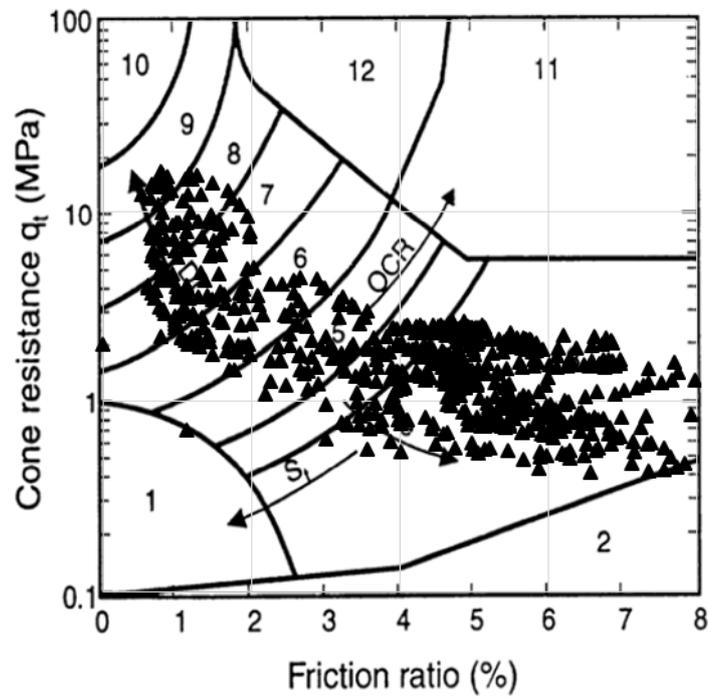


b) CPT2

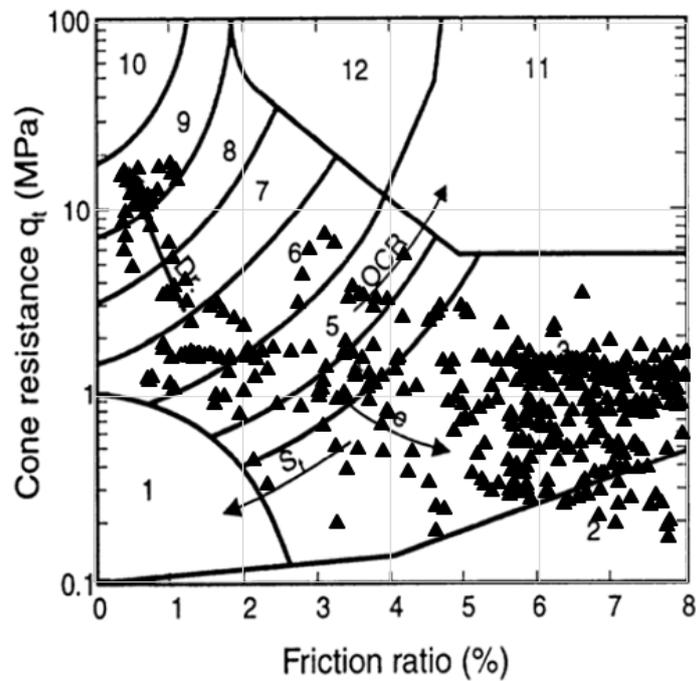


c) CPT3

Chap III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu

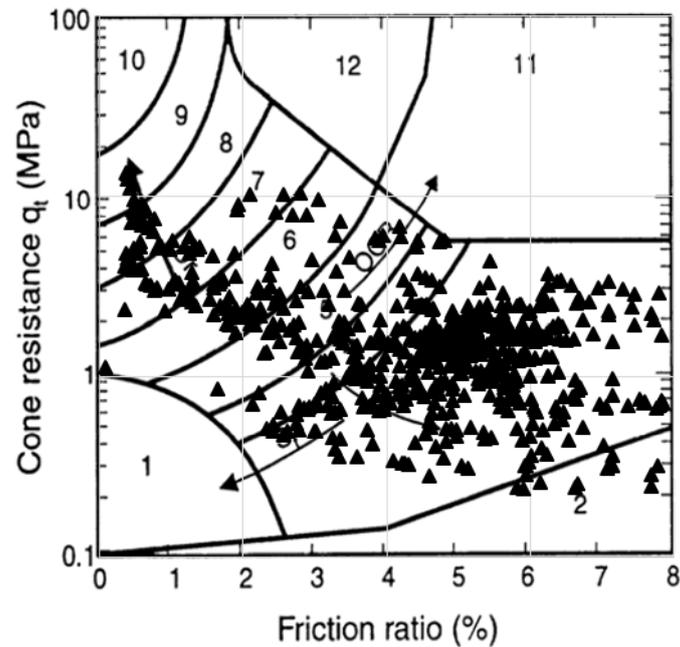


d) CPT4



e) CPT5

Chap III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu



f) CPT6

Figure 35 : projection des mesures des six CPTs sur l'abaque de Robertson et al (1986)

- **Comparaison des résultats des deux abaques**

En comparant les deux classifications, on constate une correspondance entre les zones (tableau 3 du chapitre 2) et on retrouve donc les mêmes types de sols dominants qui sont l'argile et l'argile limoneuse. Ces résultats ont été mis en évidence par l'analyse granulométrique. On note cependant un léger décalage des courbes vers le haut et vers la gauche dans la deuxième classification puisque la résistance corrigée (q_t) est supérieure à q_c dû à la pression interstitielle. Il y a aussi une légère diminution du rapport de frottement puisqu'on divise sur (q_t). Ceci est notable pour le CPT 3 pour lequel on observe les points qui étaient dans la zone 3 dans la classification de Robertson (2010) se retrouvent dans la zone 4 dans la deuxième classification. On peut conclure que les abaques de Robertson et al (1986) et Robertson (2010) ont permis d'identifier le sol du site de la pénétrante de Skikda qui est essentiellement une argile à argile limoneuse avec des passages de sable limoneux. Ces résultats sont en accord avec ceux des sondages carottés et des essais de laboratoire.

Chap III : Classification du site de la pénétrante de Skikda à partir des essais CPTu

III-6) Conclusion

En se basant sur les mesures de six CPTu, les abaques de Robertson et al (1986) et Robertson (2010) ont été utilisés pour identifier le sol du site de la pénétrante de Skikda. Le premier abaque donne la résistance en pointe corrigé, qui tient compte de la pression interstitielle mesurée lors du CPT, en fonction du rapport de frottement. Tandis que le deuxième donne la résistance en pointe adimensionnée, par rapport à la pression atmosphérique, en fonction du rapport de frottement.

Dans un premier temps, nous avons tracé les profils de l'indice de type de comportement de sol, calculé à partir des résultats des CPT, afin d'identifier le sol en fonction de la profondeur. Les résultats ont montré un sol argileux en surface, et un sol argileux limoneux en profondeur avec des passages de sable limoneux. Ces résultats sont globalement en concordance avec les sondages carottés.

Nous avons ensuite projeté les mesures de chaque CPT sur les deux abaques et nous avons comparé les deux classifications. Les résultats ont montré les mêmes types de sols qui dominent pour les deux classifications qui sont l'argile et l'argile limoneuse. Ces résultats sont en accord avec ceux des sondages carottés et des essais de laboratoire.

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 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 les abaques de Robertson reliant les paramètres mesurés du CPT au type de sol. Ces abaques sont basés sur l'indice du type de comportement de sol qui est un indicateur direct du type de sol puisqu'il est calculé en fonction de la résistance en pointe et du frottement latéral.

Dans le présent travail, nous avons utilisé deux abaques non normalisés (Robertson (2010), Robertson et al (1981)) pour identifier le sol du site de la pénétrante autoroutière reliant le port de Skikda à l'Autoroute Est-Ouest. Le premier abaque donne la résistance de pointe adimensionnelle en fonction du rapport de frottement (rapport du frottement latéral sur la résistance de pointe), le deuxième représente la résistance de pointe corrigée, qui tient compte de la pression interstitielle, en fonction du rapport de frottement.

En se basant sur les mesures de six essais CPTu (avec mesure de la pression interstitielle), nous avons tracé en premier lieu les profils de l'indice du type de comportement de sol en fonction de la profondeur. Ces profils ont montré un sol argileux en surface (jusqu'à 12 m de profondeur) avec des passages de sable limoneux par endroit. Au-delà de 12 m, le sol est une argile limoneuse. Ces résultats sont globalement en concordance avec les sondages carottés. Cependant, on remarque que l'identification du sol suivant la profondeur à partir de l'indice de comportement de sol est plus détaillée comparé aux sondages carottés puisque les mesures des CPT sont effectuées chaque 2 cm. Le CPT permet donc l'identification même les couches très minces.

Dans un deuxième temps, nous avons projeté les mesures de chaque CPTu sur les deux abaques et nous avons comparé les deux classifications. Les résultats ont montré une correspondance entre les zones identifiées par les deux abaques et les mêmes types de sols dominants qui sont l'argile et l'argile limoneuse ont été retrouvés. Ces résultats ont été mis en évidence par l'analyse granulométrique. Nous avons noté cependant un léger décalage des nuages de points vers le haut et vers la gauche dans la zone 3 de l'abaque de Robertson et al (1981). Ceci est dû au fait que la résistance corrigée (q_t) est supérieure à q_c dû à la pression interstitielle générée

dans l'argile (zone 3), il y a aussi une légère diminution du rapport de frottement puisqu'on divise sur q_t . Ceci est notable pour le CPT 3 pour lequel les points qui étaient dans la zone 3 dans l'abaque de Robertson (2010) se sont retrouvés dans la zone 4 dans le deuxième abaque.

On peut conclure que les abaques de Robertson et al (1986) et Robertson (2010) ont permis d'identifier le sol du site de la pénétrante de Skikda qui est essentiellement une argile à argile limoneuse avec des passages de sable limoneux. Ces résultats sont en accord avec ceux des sondages carottés et des essais de laboratoire.

Références bibliographiques

1. Alain PUECH Fugro France CFMS, *14 Juin 2005, Paris*.
2. ASTM-D5778-07. 2007. Standard test method for performing electronic friction cone and piezocone penetration testing of soils. ASTM
3. Baligh, M.M. and Levadoux, J.N. 1986. Consolidation after undrained piezocone penetration, II: Interpretation, *J. of Geotech. Engineering, ASCE*, 112(7): 727-745.
4. Blackie Academic, EF Spon/Taylor & Francis Publ., New York, 1997, 312 pp.
5. Canadian Geotechnical Society 2006. *Canadian Foundation Engineering Manual*, 4th Edition, BiTech Publishers, Vancouver, BC.
6. Division, ASCE. St. Louis, Missouri, October 1981, pp. 209-227. Geologismiki Geotechnical Software, CPeT-IT v 1.6, 2009, CPT interpretation software, <http://www.geologismiki.gr/Products/CPeT-IT.html>
7. Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K.,
8. 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.
10. Highway Administration Report FHWA-TS-78-209, Washington, D.C.
11. Induced Ground Settlements from the CPT, *Canadian Geotechnical Journal*, 39: pp 1168-1180.
12. Induced Lateral Displacements using the SPT and CPT, *ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 8, 861-871.
13. International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
14. J.M.VILLA (1980).
15. Jamiolkowski, M., Ladd, C.C., Germaine, J.T. and Lancellotta, R. 1985. New developments in field and laboratory testing of soils, State-of-the art report, *Proceedings of the 11th International Conference on Soil*
16. Jefferies, M.G. and Davies, M.P. 1993. Estimation of SPT N values from the CPT, *ASTM*.
17. Jefferies, M.G., and Davies, M.P., 1993. Use of CPTU to estimate equivalent SPT N60. *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, 16(4): 458-468.
18. Koester, J., Liao, S., Marcuson III, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K.,

19. Kulhawy, F.H. and Mayne, P.W. 1990. *Manual on estimating soil properties for foundation design*. Report EL-6800, Electric Power Research Institute, Palo Alto, 306 p. www.epri.com.
20. Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction
21. Long, M., 2008. Design parameters from in situ tests in soft ground – recent developments. Proceedings of Geotechnical and Geophysical Site Characterization. Taylor & Francis Group, 89-116
22. Lunne, T., Robertson, P.K., and Powell, J.J.M 1997. Cone penetration testing in geotechnical practice, E & FN Spon Routledge, 352 p, ISBN 0-7514-0393-8.
23. Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 1, 57-153, Balkema.
24. Molle, J., 2005. The accuracy of the interpretation of CPT-based soil classification methods in soft soils. MSc Thesis, Section for Engineering Geology, Department of Applied Earth Sciences, Delft University of Technology, Report No. 242, Report AES/IG/05-25, December. Schmertmann, J.H., 1978. Guidelines for Cone Penetration Test, Performance and Design. Federal
25. Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R., and Stokoe, K.H.,
26. Resistance of Soils, ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, October, pp 817-833.
27. 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.
30. Robertson, P.K., 2010. Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the Cone Penetration Test. ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Vol. 136, No. 6, 842-853.
31. Robertson, P.K., 2009, Performance based earthquake design using the CPT. Keynote lecture, IS-Tokyo.
32. Robertson P. K. (2010). Soil behavior type from the CPT: an update. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT'10, Huntington Beach, CA, USA.
33. Robertson P. K. (1990). Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, N°1, pp. 151–158.

34. Robertson, P.K., Sully, J.P., Woeller, D.J., Lunne, T., Powell, J.J.M. and Gillespie, D.G. 1992. Estimating coefficient of consolidation from piezocone tests, *Canadian Geotechnical J.*, 29(4): 551-557.
35. Soil behavior type by the CPT (an update).
36. Teh, C.I. and Houlsby, G.T. 1991. An analytical study of the cone penetration test in clay, *Geotechnique*, 41(1): 17-34.
37. Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T.,
38. Zhang, G., Robertson. P.K., Brachman, R., 2002, Estimating Liquefaction
39. Zhang, G., Robertson. P.K., Brachman, R., 2004, Estimating Liquefaction

ANNEXES

Annexe : Rapport de sol sur le tronçon 1 (du PK11+660 au PK13+750) d'après le LNHC de Skikda

1. Limites d'Atterberg

Sondage	PK	Profondeur (m)	< 80 μ (%)	limites d'Atterberg			VBS	W (%)	Carbonates (CaCo3) (%)
				WL (%)	WP (%)	IP (%)			
11-1	11+660	2.00-2.30	100	65.97	32.66	33.35	3.40	24.25	
		10.20-10.60	78	59.00	29.37	29.63	2.93		
		29.50-30.00	100	63.79	31.92	31.87	3.16		
13-1	13+750	2.40-2.60	100	78.54	38.92	39.62	-		8.00
		6.00-8.00	100	69.58	34.58	35.0	-		7.20
		14.00-16.00	100	-	-	-	-		17.80
		16.00-18.00	85	58.7	28.97	29.73	-		13.20

2. Densité sèche (γ_d), densité humide (γ_h) et teneur en eau (w)

Sondage	Profondeur (m)	W (%)	γ_d (t/m3)	γ_h (t/m3)	Sr (%)
13-1 au PK 13+750	2.40-2.60	16.12	1.67	1.94	70.45
14-03 au PK 14+480	8.00-8.40	13.12	1.85	2.09	76.95

3. Analyse granulométrique

RAPPORT D'ESSAI ANALYSE GRANULOMETRIQUE																																																																																						
Client : TEIXEIRA DUARTE			N° Projet :																																																																																			
Projet : Investigation géotechnique de la pénétrante Skikda sur 31.00Kms																																																																																						
Endroit :																																																																																						
Sondage n° : S 11-1 au PK 11+660			Sondage : S 11-1 au PK 11+660 : 2.00m-2.30m																																																																																			
Profondeur : 2.00m-2.30m																																																																																						
Matériaux :																																																																																						
Provenance :																																																																																						
Date essais :																																																																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Analyse Granulométrique</th> <th colspan="2">Analyse sédimentométrique</th> </tr> <tr> <th>Tamis (mm)</th> <th>Tamisat (%)</th> <th>Diamètre équivalent</th> <th>Tamisat (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,08</td> <td>100,00</td> <td>58,00 µm</td> <td>100,00</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>40,00 µm</td> <td>97,00</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>24,00 µm</td> <td>94,00</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>18,00 µm</td> <td>90,00</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>13,00 µm</td> <td>87,00</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>9,00 µm</td> <td>84,00</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>6,00 µm</td> <td>81,00</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>4,00 µm</td> <td>77,00</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>2,80 µm</td> <td>74,00</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>1,00 µm</td> <td>71,00</td> </tr> </tbody> </table>		Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique		Tamis (mm)	Tamisat (%)	Diamètre équivalent	Tamisat (%)	0,08	100,00	58,00 µm	100,00			40,00 µm	97,00			24,00 µm	94,00			18,00 µm	90,00			13,00 µm	87,00			9,00 µm	84,00			6,00 µm	81,00			4,00 µm	77,00			2,80 µm	74,00			1,00 µm	71,00	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Echant</th> <th rowspan="2">< 80 µ</th> <th colspan="3">LIMITES D'ATTERBERG</th> <th rowspan="2">Classificat°</th> </tr> <tr> <th>W.L (%)</th> <th>W.P (%)</th> <th>I.P (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>—◆—</td> <td>100,00 %</td> <td>%</td> <td>%</td> <td>0 %</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Echant	< 80 µ	LIMITES D'ATTERBERG			Classificat°	W.L (%)	W.P (%)	I.P (%)	—◆—	100,00 %	%	%	0 %																			
Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique																																																																																				
Tamis (mm)	Tamisat (%)	Diamètre équivalent	Tamisat (%)																																																																																			
0,08	100,00	58,00 µm	100,00																																																																																			
		40,00 µm	97,00																																																																																			
		24,00 µm	94,00																																																																																			
		18,00 µm	90,00																																																																																			
		13,00 µm	87,00																																																																																			
		9,00 µm	84,00																																																																																			
		6,00 µm	81,00																																																																																			
		4,00 µm	77,00																																																																																			
		2,80 µm	74,00																																																																																			
		1,00 µm	71,00																																																																																			
Echant	< 80 µ	LIMITES D'ATTERBERG			Classificat°																																																																																	
		W.L (%)	W.P (%)	I.P (%)																																																																																		
—◆—	100,00 %	%	%	0 %																																																																																		
Remarque :																																																																																						
Préparé par :			Approuvé par :		Date :																																																																																	

RAPPORT D'ESSAI ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Client : TEIXEIRA DUARTE

N° Projet :

Projet : Investigation géotechnique de la pénétrante Skikda sur 31.00Kms

Endroit :

Sondage n° : S 11-1 au PK 11+660

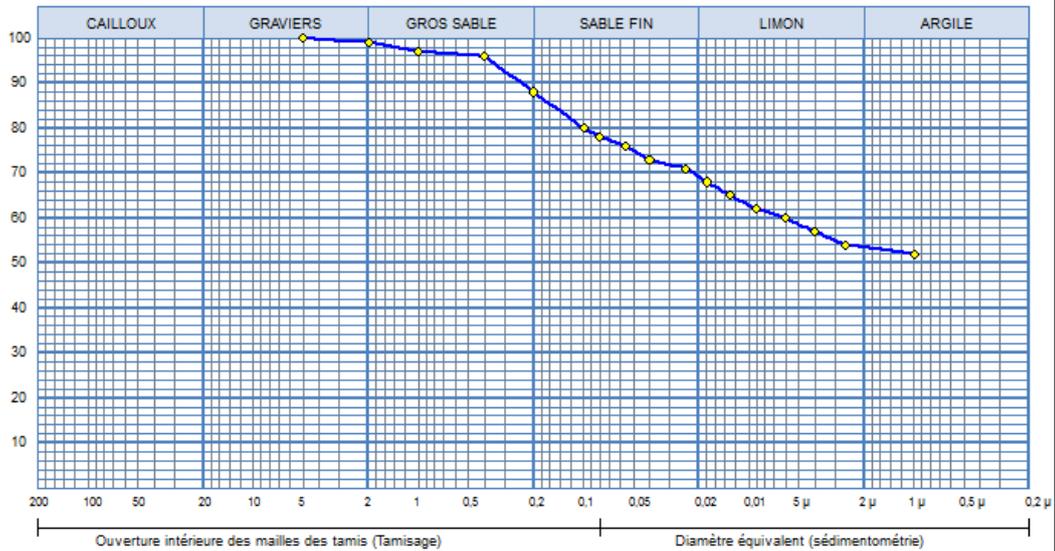
—◆— Sondage: S 11-1 au PK 11+660 : 10.20m-10.60m

Profondeur : 10.20m-10.60m

Matériaux :

Provenance :

Date essais :



Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamis (mm)	Tamisat (%)	Diamètre équivalent	Tamisat (%)
5,00	100,00	56,00 µm	76,00
2,00	99,00	40,00 µm	73,00
1,00	97,00	24,00 µm	71,00
0,40	96,00	18,00 µm	68,00
0,20	88,00	13,00 µm	66,00
0,10	80,00	9,00 µm	62,00
0,08	78,00	6,00 µm	60,00
		4,00 µm	57,00
		2,80 µm	54,00
		1,00 µm	52,00

Echant	< 80 µ	LIMITES D'ATTERBERG			Classificat
		W.L (%)	W.P (%)	I.P (%)	
—◆—	78,00 %	%	%	0 %	

© SofTests 2013

Remarque :

Préparé par :

Approuvé par :

Date :

RAPPORT D'ESSAI ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Client : TEIXEIRA DUARTE

N° Projet :

Projet : Investigation géotechnique de la pénétrante Skikda sur 31.00Kms

Endroit :

Sondage n° : S13-1 au PK 13+750

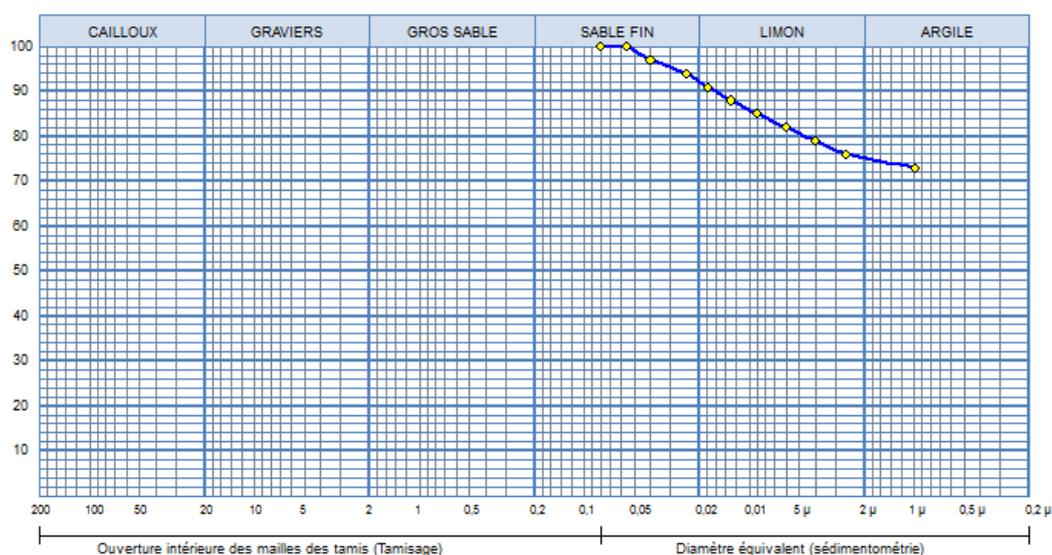
—◆— Sondage: S13-1 au PK 13+750 : 2.40m-2.60m

Profondeur : 2.40m-2.60m

Matériaux :

Provenance :

Date essais : 10/06/2015



Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamis (mm)	Tamisat (%)	Diamètre équivalent	Tamisat (%)
0,08	100,00	56,00 μm	100,00
		40,00 μm	97,00
		24,00 μm	94,00
		18,00 μm	91,00
		13,00 μm	88,00
		9,00 μm	85,00
		6,00 μm	82,00
		4,00 μm	79,00
		2,60 μm	76,00
		1,00 μm	73,00

Echant	< 80 μ	LIMITES D'ATERBERG			Classificat ⁿ
		W.L (%)	W.P (%)	I.P (%)	
—◆—	100,00 %	%	%		

© SolTetas 2013

Remarque :

Préparé par :

Approuvé par :

Date :

RAPPORT D'ESSAI ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Client : TEIXEIRA DUARTE

N° Projet :

Projet : Investigation géotechnique de la pénétrante Skikda sur 31.00Kms

Endroit :

Sondage n° : S13-1 au PK 13+750

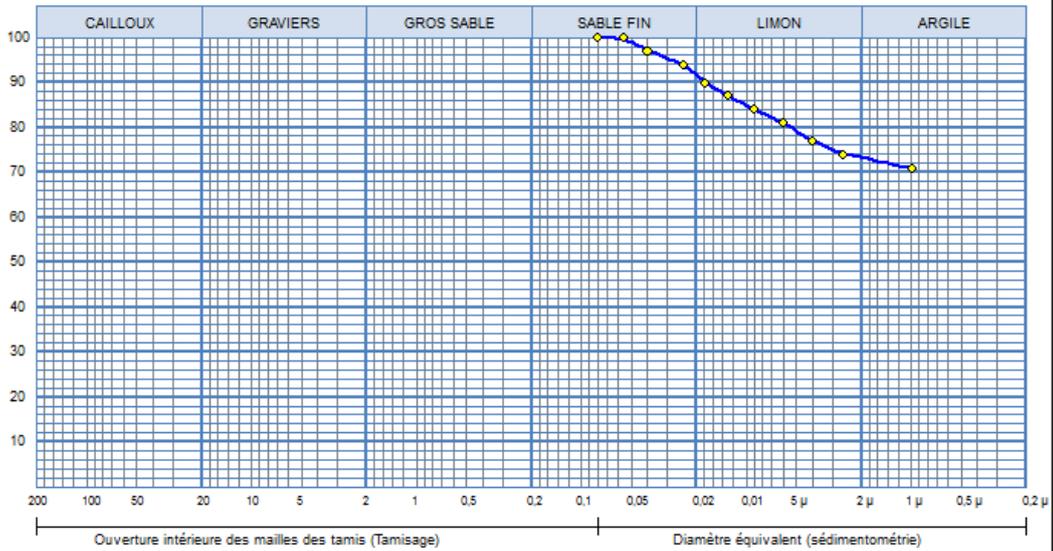
—◆— Sondage: S13-1 au PK 13+750 : 6.00m-8.00m

Profondeur : 6.00m-8.00m

Matériaux :

Provenance :

Date essais : 10/06/2015



Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamis (mm)	Tamisat (%)	Diamètre équivalent	Tamisat (%)
0,08	100,00	56,00 μm	100,00
		40,00 μm	97,00
		24,00 μm	94,00
		18,00 μm	90,00
		13,00 μm	87,00
		9,00 μm	84,00
		6,00 μm	81,00
		4,00 μm	77,00
		2,60 μm	74,00
		1,00 μm	71,00

Echant	< 80 μ	LIMITES D'ATERBERG			Classificat ^f
		W.L (%)	W.P (%)	I.P (%)	
—◆—	100,00 %	%	%	0 %	

© SolTetas 2013

Remarque :

Préparé par :

Approuvé par :

Date :

RAPPORT D'ESSAI ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Client : TEIXEIRA DUARTE

N° Projet :

Projet : Investigation géotechnique de la pénétrante Skikda sur 31.00Kms

Endroit :

Sondage n° : S13-1 au PK 13+750

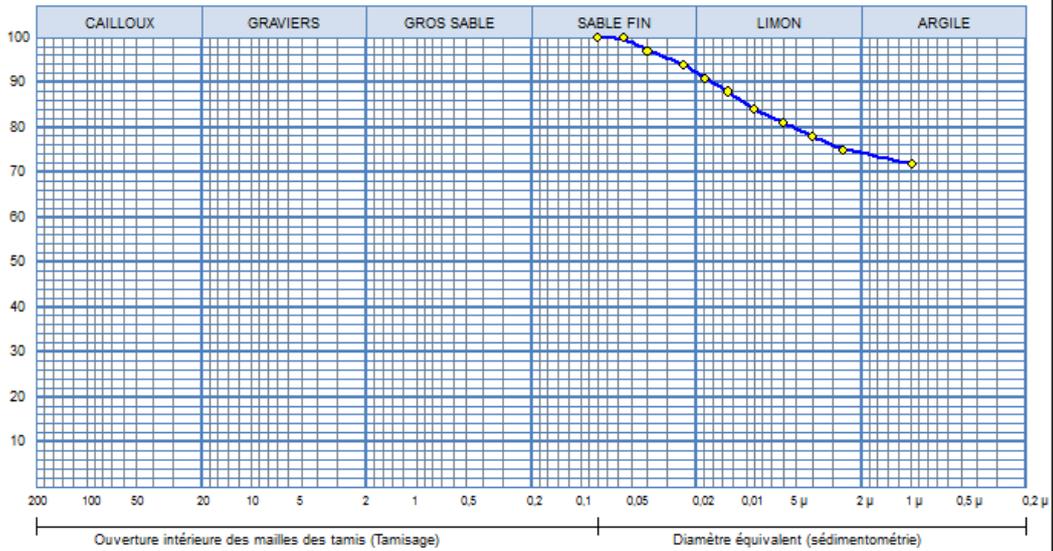
—◆— Sondage: S13-1 au PK 13+750 : 14.00m-16.00m

Profondeur : 14.00m-16.00m

Matériaux :

Provenance :

Date essais : 10/06/2015



Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamis (mm)	Tamisat (%)	Diamètre équivalent	Tamisat (%)
0,08	100,00	56,00 µm	100,00
		40,00 µm	97,00
		24,00 µm	94,00
		18,00 µm	91,00
		13,00 µm	88,00
		9,00 µm	84,00
		6,00 µm	81,00
		4,00 µm	78,00
		2,60 µm	75,00
		1,00 µm	72,00

Echant	< 80 µ	LIMITES D'ATTERBERG			Classificat ^f
		W.L (%)	W.P (%)	I.P (%)	
—◆—	100,00 %	%	%	0 %	

© SolTetas 2013

Remarque :

Préparé par :

Approuvé par :

Date :

4. Abaques de Casagrande

RAPPORT D'ESSAI Limites d'Atterberg	
Client : TEIXEIRA DUARTE	N° Projet :
Projet : Investigation géotechnique de la pénétrante Skikda sur 31.00Kms	
Endroit :	
Sondage n° : S11-1 au PK 11+660	Date essais :
Profondeur : 2.00m-2.30m	
Nature :	
Limite de Liquidité (%) : WL = 65,97	Teneur en eau naturelle (%) : Weau =
Limite de Plasticité (%) : WP = 32,62	
Indice de Plasticité (%) : IP = 33,35	

Limite de liquidité

Teneur en eau W (%)

Nombre de coups

Limite de plasticité

Ech N°	W (%)
1	32,45
2	32,78

ABAQUE DE CASAGRANDE

Indice de plasticité I_p (%) = $W_L - W_P$

Limite de Liquidité W_L (%)

Solsstats 2013

RAPPORT D'ESSAI Limites d'Atterberg

Client : TEIXEIRA DUARTE

N° Projet :

Projet : Investigation géotechnique de la pénétrante Skikda sur 31.00Kms

Endroit :

Sondage n° : S11-1 au PK 11+660

Date essais :

Profondeur : 10.20m-10.60m

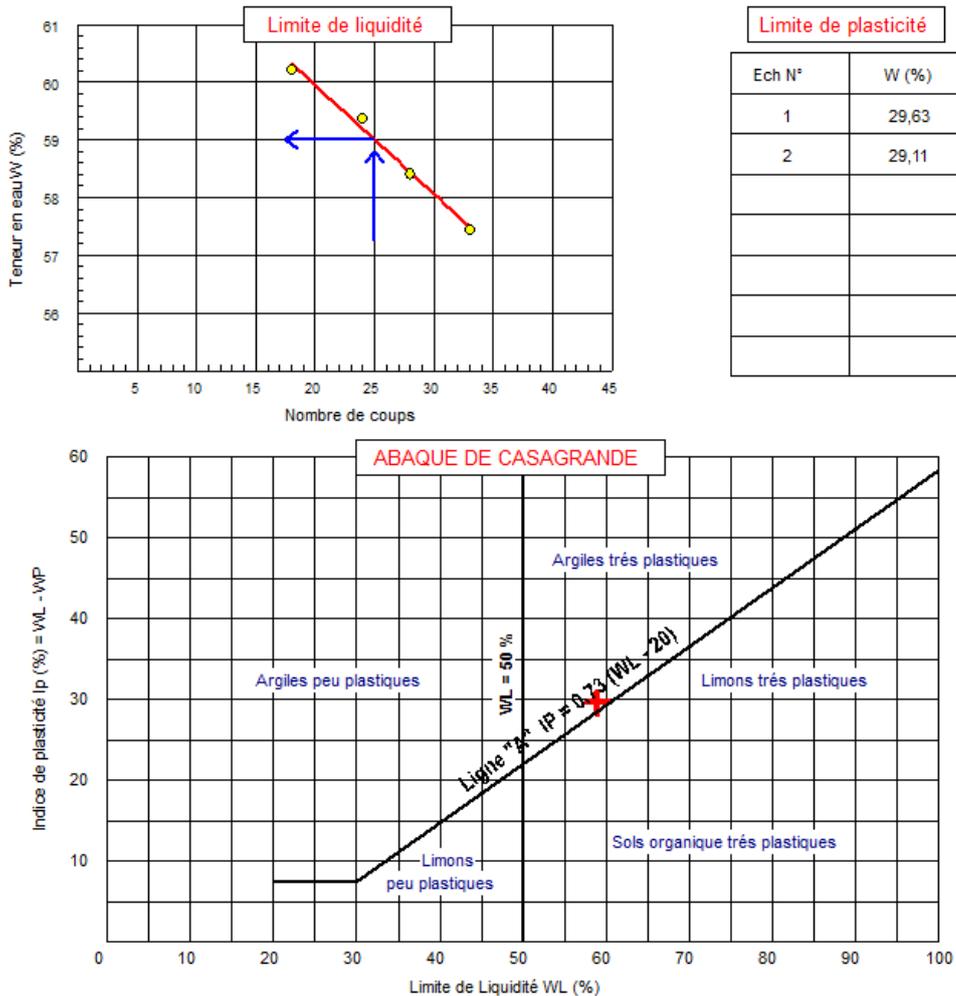
Nature :

Limite de Liquidité (%) : WL = 59,00

Teneur en eau naturelle (%) : Weau =

Limite de Plasticité (%) : WP = 29,37

Indice de Plasticité (%) : IP = 29,63



Solbeis 2013

Remarque :

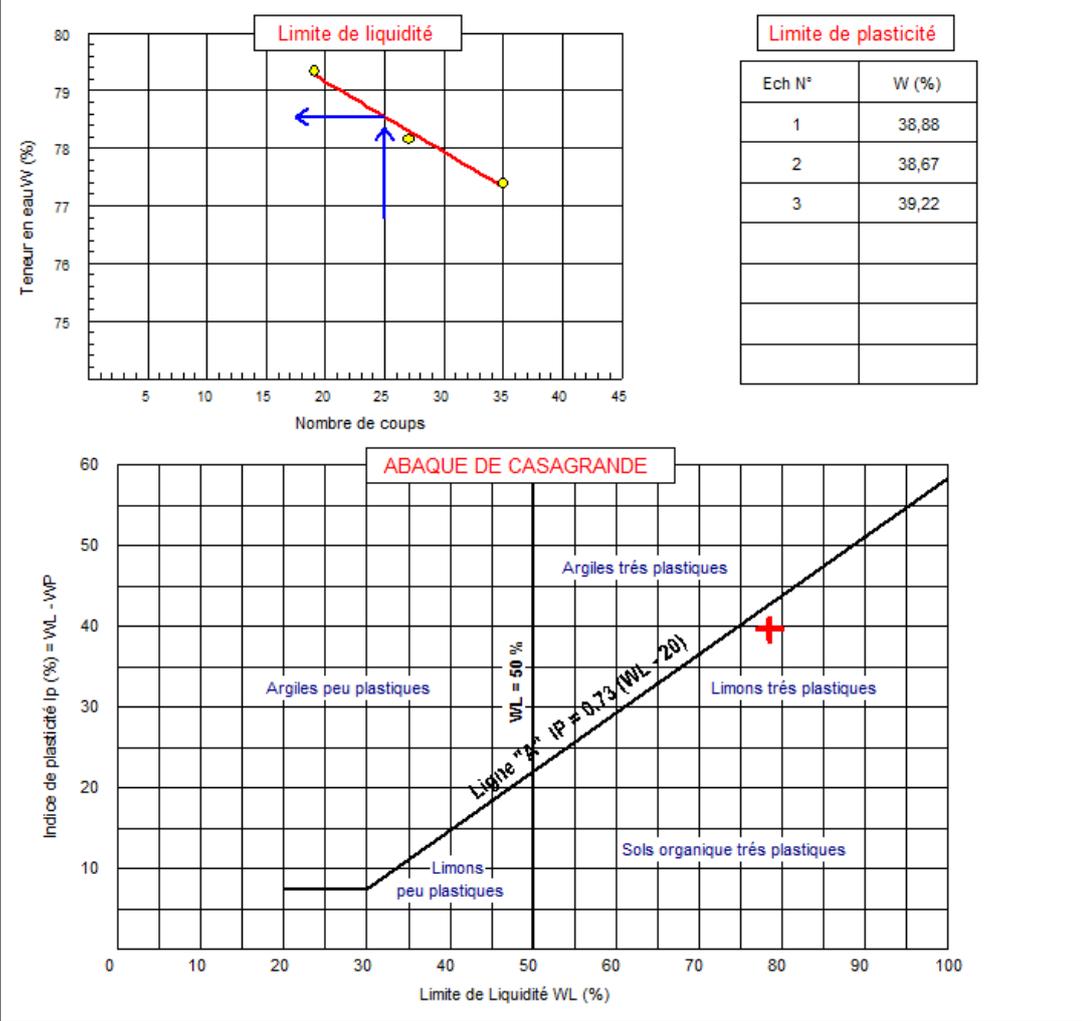
Préparé par :

Approuvé par : Date :

RAPPORT D'ESSAI Limites d'Atterberg

Client : TEIXEIRA DUARTE **N° Projet :**
Projet : Investigation géotechnique de la pénétrante Skikda sur 31.00Kms
Endroit :
 Sondage n° : S13-1 au PK 13+750 **Date essais :**
 Profondeur : 2.40m-2.60m
 Nature :

Limite de Liquidité (%) : WL = 78,54 **Teneur en eau naturelle (%) :** Weau =
Limite de Plasticité (%) : WP = 38,92 **Indice de consistance :** Ic = 1,98
Indice de Plasticité (%) : IP = 39,62



Solista 2013

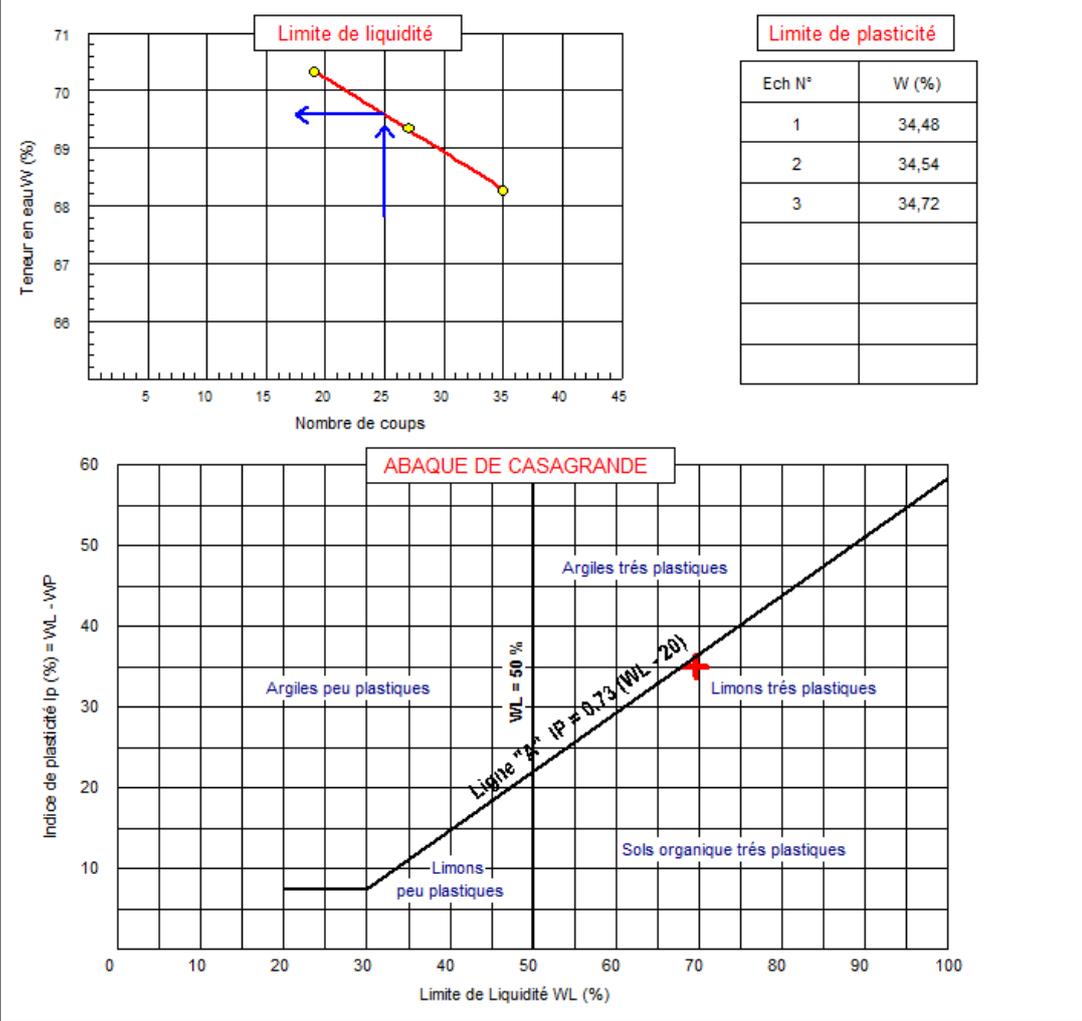
Remarque :

Préparé par : Approuvé par : Date :

RAPPORT D'ESSAI Limites d'Atterberg

Client : TEIXEIRA DUARTE **N° Projet :**
Projet : Investigation géotechnique de la pénétrante Skikda sur 31.00Kms
Endroit :
 Sondage n° : S13-1 au PK 13+750 Date essais : 29/06/2015
 Profondeur : 6.00m-8.00m
 Nature :

Limite de Liquidité (%) : WL = 69,58 **Teneur en eau naturelle (%) :** Weau =
Limite de Plasticité (%) : WP = 34,58 **Indice de consistance :** Ic = 1,99
Indice de Plasticité (%) : IP = 35,00



Solsdate 2013

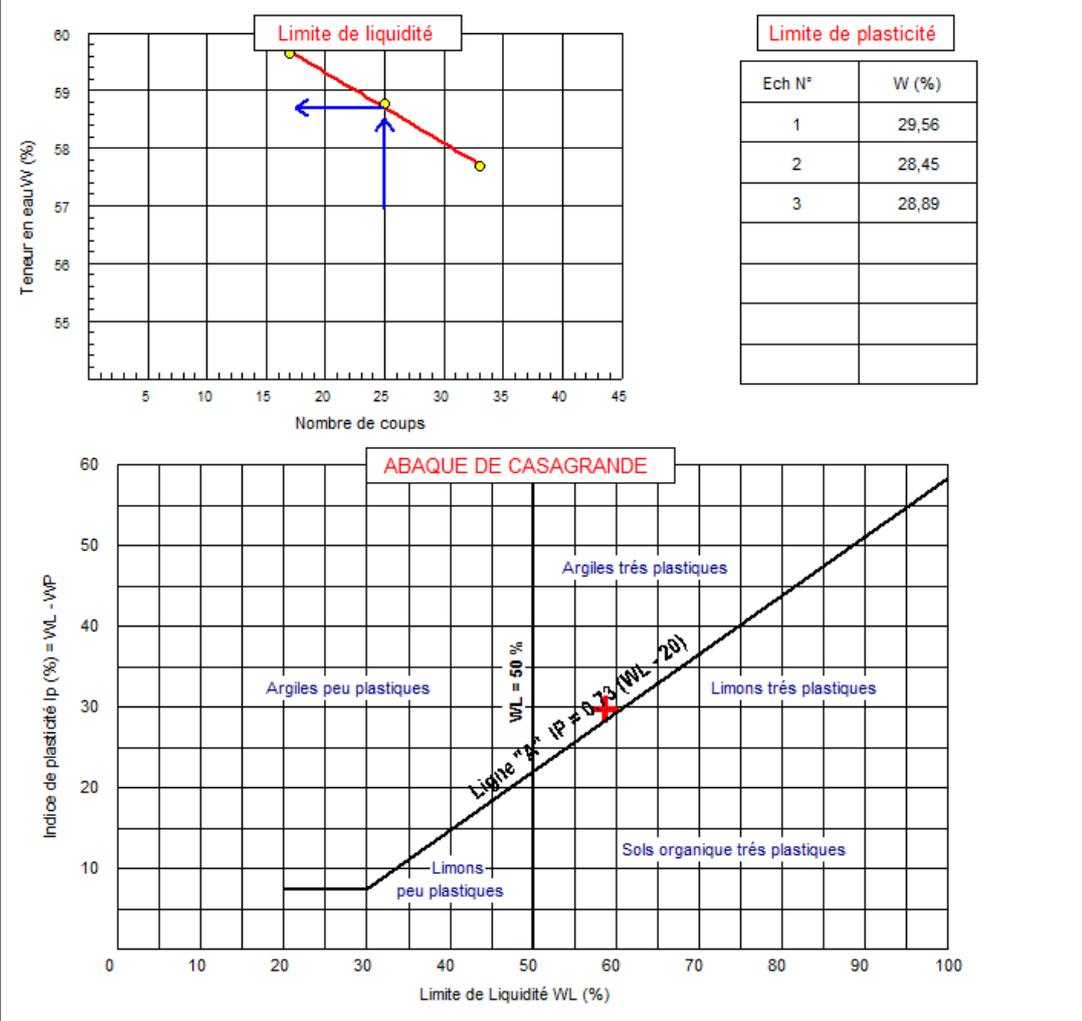
Remarque :

Préparé par : Approuvé par : Date :

RAPPORT D'ESSAI Limites d'Atterberg

Client : TEIXEIRA DUARTE **N° Projet :**
Projet : Investigation géotechnique de la pénétrante Skikda sur 31.00Kms
Endroit :
 Sondage n° : S13-1 au PK 13+750 Date essais : 28/06/2015
 Profondeur : 16.00m-18.00m
 Nature :

Limite de Liquidité (%) : WL = 58,70 **Teneur en eau naturelle (%) :** Weau =
Limite de Plasticité (%) : WP = 28,97 **Indice de consistance :** Ic = 1,97
Indice de Plasticité (%) : IP = 29,73



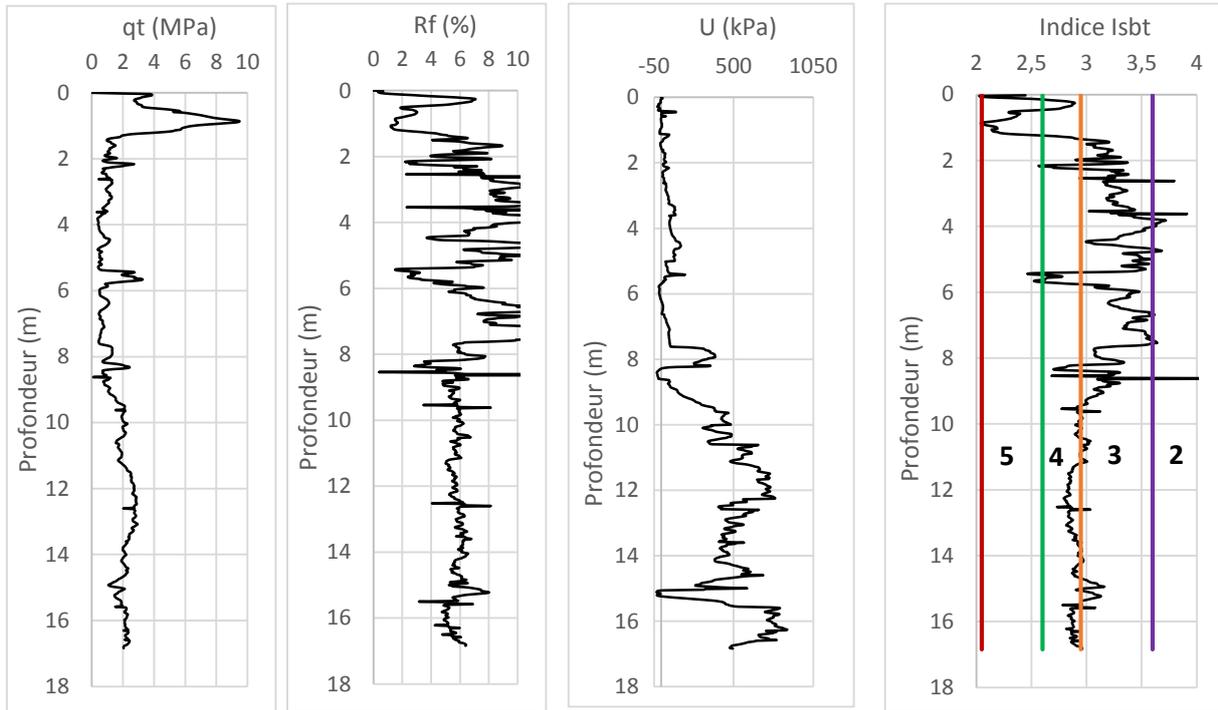
Remarque :

Préparé par : Approuvé par : Date :

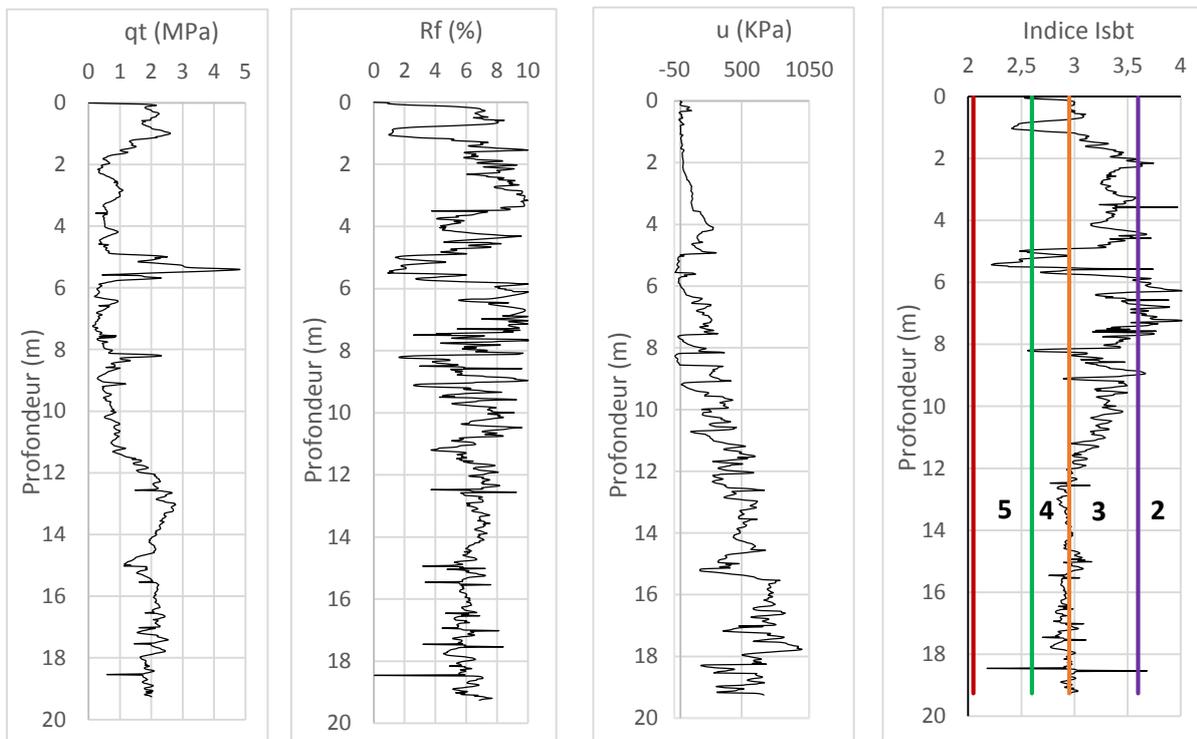
Solsdate 2013

5. Les résultats des autres CPTs (CPT1, CPT2, CPT4, CPT5)

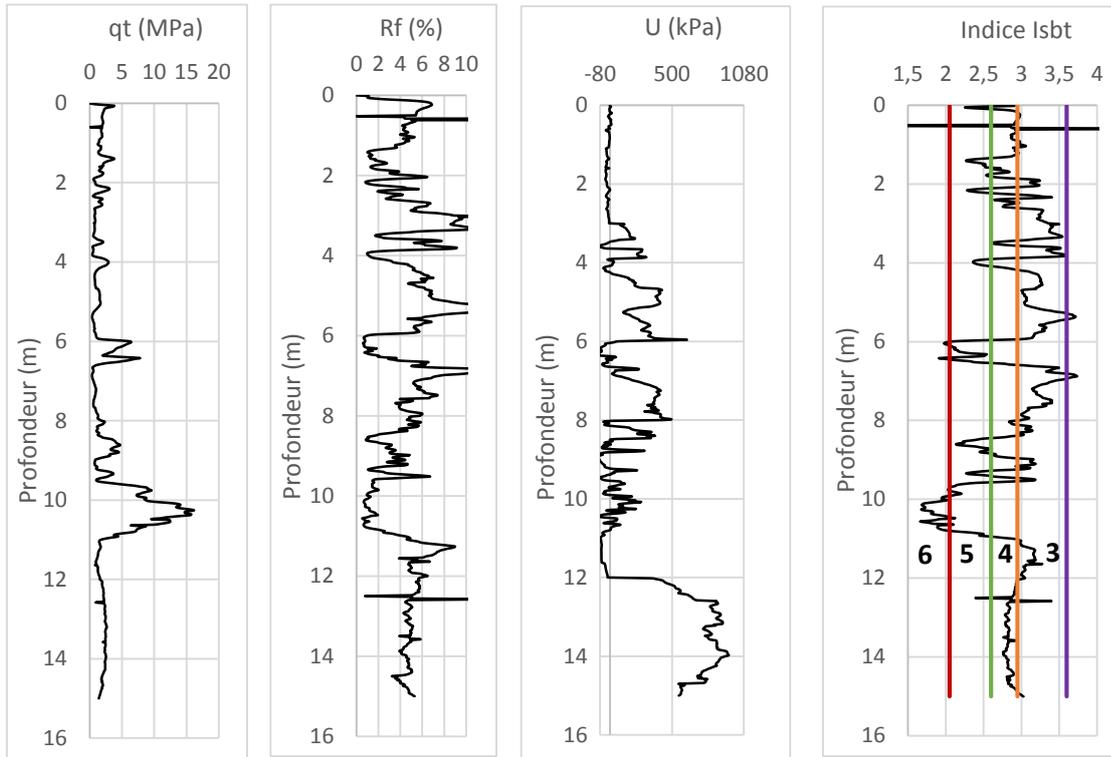
CPT 1



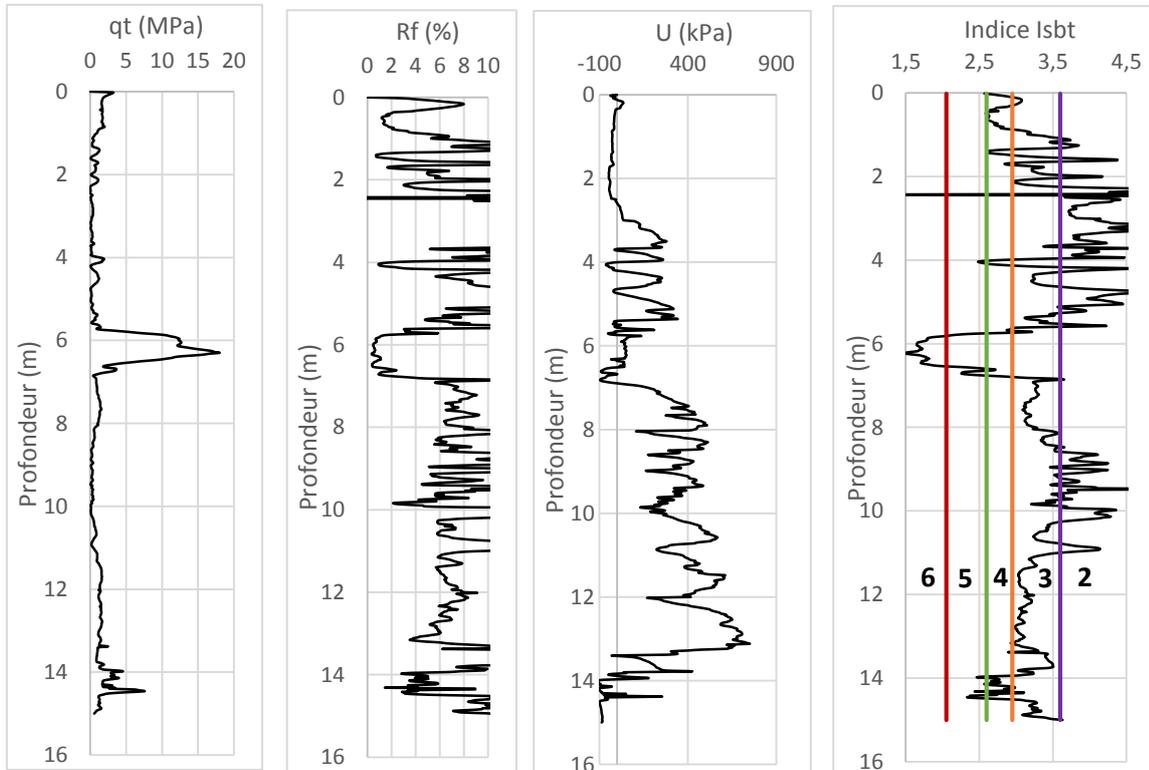
CPT 2



CPT 4



CPT 5



6. Sondages carottés

- Sondage 1 (PK 11+660)

SC 11-1 du PK 11+660
De 0.00m-5.00m



SC 11-1 du PK 11+660
De 5.00m-10.00m)



SC 11-1 du PK 11+660
De 10.00m-15.00m)



SC 11-1 du PK 11+660
De 15.00m-20.00m



- Sondage 2 (PK 13+750)



SC 13-1 de PK 13+750

De 10.00m-15.00m)

10.0



15.0

SC 13-1 de PK 13+750

De 15.00m-20.00m)

15.0



20.0