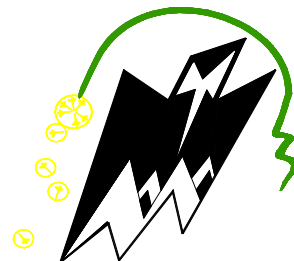


REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU
Faculté du génie de la construction
Département de génie civil



Mémoire de fin d'études

En vue d'obtention du diplôme MASTER 2 en Génie Civil.
Option : Géotechnique et environnement.

THEME

Corrélations entre les caractéristiques géotechniques
et les caractéristiques géophysiques.

ETUDIE PAR :DIRIGE PAR :

Mr NAIT CHABANE Mohand Ourabah M_{me} BAÏDI FAWZIA

JURY :

Mr MELBOUCI BachirPrésident

M^{elle} BELHASSANI Ouarda

Examinatrice

M^{elle} BOUBRIT Hassiba

Examinatrice

Année: 2013-2014.



REMERCIEMENTS

A l'issue de ce modeste travail, je présente, de prime abord, mes sincères remerciements à Mme. BAIDI Fawzia du Laboratoire Géo matériaux Environnement et aménagement (LGEA) et enseignante à l'université de Mouloud MAMMERRI de TIZI OUOU d'avoir acceptée de m'encadrer, d'orienter mes pas dans l'élaboration cette étude, d'avoir mis à ma disposition toute son attention et les documents nécessaires à l'élaboration de ce modeste travail. De n'avoir pas lésiné sur son temps de travail pour prodiguer ses précieux conseils.

Je suis honoré par la présence de Mr. MELBOUCI Bachir, professeur à l'université Mouloud MAMMERRI de TIZI OUZOU et Chef d'équipe au Laboratoire Géomatériaux Environnement et aménagement (LGEA), en sa qualité de président de jury.

Que M^{lle} BELHASSANI Ouarda et M^{lle} BOUBRITE Hassibay trouvent l'expression de mes remerciements pour avoir accepté d'honorer de leurs présences le jury et d'accepter d'examiner ce modeste travail.

Mes remerciements à Mr A. BOUGUERRA chef de département géotechnique, Mr R. MAZARI chef de département géophysique du Laboratoire National de l'habitat et de la construction (LNHC) de m'avoir fournies données géotechniques et géophysiques nécessaires pour la réalisation de mon étude et leurs précieuse aide à travers toutes les discussions que nous avons eues autour de ce thème.

*Sans oublier, Mr CHIKH Lounis, enseignants géologue à
l'université de USTHB auquel j'attribue mes vifs remerciements
pour son soutiens morale et
son aide précieuse en documentations et en conseils*

*A ma très chère famille, à mes parents, à mes frères et sœurs,
A ma chère future épouse K. Lamia*

*Auxquels je dois de la gratitude et beaucoup de respect,
pour leur soutien morale et leurs attention.*

A Mes collègues de la section géotechnique et environnement.

A mes cher(es) ami(es) notamment,

Nabil CHIKHDENE, BENALI AMER Ouramdane,

SIHADJ MOHAND Amokrane, AIT AMRANE Juba, YACINI

*Aghilès pour leur soutien et encouragements et pour tout le
temps et l'expérience partagée durant toutes les longues années de
l'université.*

*Que les enseignants du département génie civil en général,
et ceux de la Géotechnique et environnement en particulier,
soient remercié(es) d'avoir permis à cette spécialité
multidisciplinaires de voir le jour en raison de son rôle
prépondérant dans l'art de bâtir et le domaine du génie civil.*





Dédicaces

*Je dédie ce travail en guise de reconnaissance et
de respect :*

*Avant tout à mes chers parents, mes frères et
mes sœurs*

Pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard.

A ma chère future épouse.

A tous mes proches et tous mes amis

*A tous ceux qui me sont chers. A tous les enseignants qui
m'ont suivi durant tout mon cursus.*



NAIT CHABANE Mohand Ourabah.

SOMMAIRE

Table des figures	(I)
Liste des tableaux	(II)
Table des notations.....	(III)

INTRODUCTION GENERALE	(1)
-----------------------------	-----

I. GENERALITES

I.2.Objectif de l'étude.....	(3)
I.3.Intérêt et Domaines d'utilisation des corrélations.....	(3)
I.4.Méthodologie de l'étude.....	(4)

II. ETUDE GEOLOGIQUE

Introduction.....	(6)
II.1.Géologie de la région d'Alger.....	(6)
II.1.1. Localisation de la région d'Alger	(6)
II.1.2. Les grands ensembles géomorphologiques.....	(7)
II.1.3. Lithostratigraphie.....	(8)
II.1.4. Tectonique de la région d'Alger.....	(10)
II.2. Hydroclimatologie et Hydrogéologie.....	(11)
II.2.1.Hydroclimatologie.....	(11)
II.2.2.Précipitations et Températures.....	(12)
II.2.3. Courbe ombrothermique de Gaussen.....	(13)
II.2.4 Hydrologie	(14)
II.2.5. Hydrogéologie	(14)
II.3. Aperçue sur la sismicité de la région d'Alger	(15)
II.4. Présentation de la région d'études	(16)
II.4.1. Situation géographique de la zone d'étude	(16)
II.4.2 Situation géographique du P.O.S sud de Ouled Fayet.....	(17)
II.4.3.Géologie de la région de Ouled Fayet.....	(18)
II.4.4. Topographie et morphologie.....	(19)
II.4.5.Lithologie de la zone d'étude.....	(21)
Conclusion :.....	(25)

III. ETUDE GEOTECHNIQUE

Introduction	(26)
III.1. La reconnaissance géotechnique	(27)
III.1.2. Choix de la méthode et de l'appareillage.....	(27)
IV.1.3. Campagne de reconnaissance du projet d'étude.....	(28)
III.1.4. Essais in situ.....	(29)
III.1.4.1-Essai pressiométrique Menard	
Introduction.....	(30)
III.1.4.2.2. Domaine d'utilisation du pressiomètre Menard.	(31)
III.1.4.2.3. Description de l'appareillage.....	(31)
III.4.1.3.Les autres conceptions.....	(35)
III.1.4.2.4.Mode opératoire.....	(35)
III.1.4.2.5. Résistance propre de la sonde de Menard.....	(36)
III.1.4.2.6.Expansion propre du pressiomètre Menard.....	(36)
III.1.4.2.7.Mise en place de la sonde du pressiomètre Menard.....	(36)
III.1.4.2.8. Exécution de l'essai proprement dit.....	(37)
III.1.4.2.9. Interprétation de la courbe pression volume $\Delta V=f(P)$	(39)
III.1.4.2.10. Expression des résultats.....	(41)
Conclusion.....	(41)
III.1.5.2-Essai pénétromètre dynamique	
Introduction	(45)
III.4.2.1. Essai Standard Pénétration Test (SPT)	(46)
III.4.2.2. Objectif de l'essai	(46)
III.4.2.3. Description schématique du pénétromètre dynamique	(46)
III.4.2.4. Principe de l'essai	(47)
III.4.2.5. Détermination de la résistance dynamique de pointe.....	(48)
III.4.2.6.Choix du type de l'essai.....	(48)
III.4.2.7. Mesure de La Résistance Dynamique De Pointe	(50)
Conclusion	(52)
III.4.3.Essai cône Pénétration Test (CPT)	
Introduction.....	(52)
III.4.3.1. Objectif de l'Essai de pénétration statique CPT	(53)
III.4.3.2. Description schématique du pénétromètre statique CPT.....	(53)
III.4.3.3. Principe de l'Essai de pénétration statique CPT	(54)
III.4.3.4. Profile du pénétrométrique CPT.....	(54)
III.4.3.5. Identification des sols	(55)
III.4.3.6. Ordre de grandeur des résistances de pointe qc	(56)

Conclusion	(56)
Conclusion.....	(57)

IV. ETUDE GEOPHYSIQUE

Introduction.....	(58)
IV.1. Objectif	(58)
IV.2. Ondes sismiques	(59)
IV.3. propagation dans un milieu monophasique:	(61)
IV.4. ESSAI DOWNHOLE	
IV.4.1. Principe de l'essai	(63)
IV.4.2.Enregistrement des résultats	(64)
IV.4.2.Précision des résultats	(66)
IV.4.3. Catégories et Critères de classification	(67)
Conclusion	(68)

V. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Introduction	(69)
V.1. Interprétation des essais géotechnique	
V.1.1. Interprétation des résultats et des essais IN SITU.....	(69)
V.1.1.1 Sondages carottés	(69)
V.1.1.2. Essais au Pénétrromètre dynamique	(69)
V.1.1.3. Essais au pénétromètre statique.....	(70)
V.1.1.4.Essais préssiométriques	(71)
V.1.1.5. Niveau piézométrique	(72)
V.1.2. Résultats et interprétations des essais de laboratoire	
V.1.2.1. Essais d'identification physique	(73)
V.2. Interprétation des essais géophysiques	
V.2.1. Interprétation des résultats de l'essai Downhole	(74)
V.2.2. Discussion des résultats	(77)
Conclusion	(78)

VI. ETUDE DES CORRELATION

Introduction	(79)
1) Première parties des corrélations	
2) VI.1. Traitement de Données	(80)
VI.2. Analyse de données	(81)
VI.3. Phasage pour l'étude des équations des corrélations.....	(82)
VI.4. Elaboration des équations de corrélations.....	(86)
VI.4.1Corrélation Vs-N.....	(87)
VI.4.1.1 Détermination de (vs) à partir del'équation de corrélation....	(90)

VI.4.1.2 Détermination de (vs) à partir	(92)
VI.4.2. Corrélations entre les paramètres géodynamiques et N	
VI.4.2.1. Corrélation par progression linéaire.....	(93)
VI.4.2.2. Corrélation par progression puissance.....	(95)
VI.4.3. Corrélations Vs- q_c	(97)
VI.4.3.1. Analyse des résultats.....	(97)
VI.4.4. Corrélations entre les paramètres géodynamiques et q_c	
VI.4.4.1. Corrélation par progression linéaire	(100)
VI.4.4.2. Corrélation par progression puissance	(102)
Conclusion partielle.....	(104)

3) Deuxième partie des corrélations

VI.5. Corrélation entre les paramètres pressiométriques et pénétrométriques....	(106)
VI.5.1. Analyse de données.....	(107)
VI.5.2.1. Corrélation entre q_c - P_1	(108)
VI.5.2.2. Corrélation entre q_c - E_p	(109)
VI.5.2.3. Corrélation entre E_p - P_1	(110)
Conclusion	
.....	(112)

CONCLUSION GENERALE	(113)
---------------------------	-------

TABLE DES FIGURES

Fig. II. 1. Localisation de la wilaya d'Alger (Google Maps).....	(06)
Fig.II.2 Les grands ensembles géomorphologiques de la région d'Alger (In DERRICHE et CHEIKH LOUNIS, 2004).....	(08)
Fig.II.3. Carte géologique de la région d'Alger (Source, carte géologique de l'Algérie du nord par MM. Cornet A. et al.1952).....	(10)
Fig. II.4: Esquisse tectonique de la région d'Alger.....	(11)
Fig. II.5: Variation mensuelles de la précipitation- Station de Dar El Beida (2000-2009).....	(12)
Fig. II.6: Variation annuelles de la précipitation- Station de Dar El Beida (2000-2009).....	(12)
Fig. II.5: Variation mensuelles des températures- Station de Dar El Beida (2000-2009).....	(13)
Fig. II.8. Courbe ombrothermique- Station de Dar El Beida (2000-2009).....	(13)
Fig. II.9. Carte hydrogéologique de la région de Ouled Fayet (Extrait de la carte hydrogéologique d'Alger, échelle 1/500 000 ; ANRH).....	(15)
Fig. II.10. Carte de zonage sismique après le séisme de Boumerdès (CGS 2003).....	(15)
Fig. II. 11. Carte des communes de la wilaya d'Alger (51 Ouled Fayet).....	(16)
Fig. II.12. : Situation géographique de la région d'Ouled Fayet (Source Google Earth).....	(16)
Fig. II.13. Situation géographique des sites Sud, Est et Ouest de Ouled Fayet (Source Google Earth).....	(17)
Fig. II.14. Plan de masse du plateau Sud de Ouled Fayet.....	(17)
Fig.II.15. Coupe schématique du faciès marneux présent dans la région d'Ouled Fayet (MAOUCHE.S).....	(18)
Fig.II.16- Carte géologique de plateau Ouled Fayet (Extrait de la carte géologique de Koléa, feuille 41- Echelle 1/50 000).1901.....	(19)
Fig.II.17 : Photos du plateau Ouled Fayet Sud.....	(20)
Fig. II.18. Carte des pentes du plateau sud Ouled Fayet.....	(20)
Fig. II.19. Coupes de sondages du plateau Ouled Fayet sud.....	(22)
Fig. II.20.Plan De Coupes Des Profils Lithologiques.....	(23)
FIG II.21. Profil Lithologique AA'.....	(23)
FIG II.22. Profil Lithologique BB'.....	(24)
FIG II.23. Profil Lithologique CC'.....	(24)
FIG II.24. Profil Lithologique DD'.....	(24)
Fig.III.1. Méthodologie générale d'une étude.....	(28)
Fig.III.2. Méthodologie pour le choix des essais géotechniques.....	(28)
Fig III.3 -Plan d'implantation des essais géotechnique.....	(29)
Fig.III.4. Photo réelle du pressiomètre Menard.....	(31)
Fig. III.5. Schéma de principe du pressiomètre Menard.....	(32)
Fig. III.6. Photo des principaux composants du pressiomètre Menard.....	(34)

FIG III.7. Différent type de pressiomètre Menard.....	(34)
FIG.III.8. Essais pressiométrique avec le système rotostaf.....	(35)
III.9. Courbe de résistance propre Ménard.....	(37)
Fig. III.10. Courbe d'expansion propre d'une sonde d'une sonde Menard.....	(37)
Fig. III.11. Schéma du CPV Louis Menard.....	(38)
Fig.III.12. Circuitdefluide.....	(38)
Fig III.13. Chargement par paliers en fonction du temps.....	(39)
Fig. III.14. Courbe pressiométrique (forage préalable).....	(40)
Fig. III.15 : Courbe de fluage pressiométrique.....	(41)
Fig. III.16. Courbe pressiométrique corrigée.....	(42)
Fig. III.17. Profil Pressiométrique de Menard.....	(43)
Fig. III.18. Schéma d'un pénétromètre dynamique.....	(46)
Fig. III.19. Carottier pour essai SPT.....	(47)
Fig. III.20. Dispositif de battagedel'essai SPT.....	(47)
Fig. III.21. Mode d'interaction entre le pénétromètre dynamique et les sols.....	(49)
Fig. III.22. Diagrammes de pénétration dynamique avec pointe débordante perdue (1) ou fixe (2) et une injection de boue (courbes moyennes de trois essais).....	(51)
Fig. III.23. Diagrammes de pénétration dynamique dans des sols cohérents.....	(51)
Fig. III.24. Schéma d'un pénétromètre statique CPT.....	(53)
Fig. IV.25. Relation entre q_c et f_c d'après Bergman.....	(54)
Fig. III.26. Pénétrogrammes obtenu à partir d'un essai CPT.....	(55)
Fig. III.27. Abaque d'identification des sols d'aprèsRobertson et Campanella.....	(55)
Fig. IV.1. Déformation produite par des ondes de volume.....	(59)
Fig. IV.2. Déformations produites par des ondes de surfaces.....	(60)
Fig. IV.3. Vitesse de propagation des ondes sismique en fonction du coefficient de poisson.....	(61)
Fig. IV.4 : Allure de l'onde de cisaillement V_s et de compression V_p.....	(63)
Fig. IV.5. Diagramme schématique du dispositif pour l'essai Downhole.....	(64)
Fig. IV.6. Enregistrement composite typique.....	(65)
Fig. IV.7. Enregistrement et correction des vitesses d'ondes-S et P.....	(65)
Fig.IV.8. Courbe des vitesses d'ondes S et P.....	(66)
Fig. V.1. Schéma d'installation du tube piézométrique.....	(72)
Fig. V.2. Courbe des vitesses V_s et V_p pour le sondage Sc03.....	(75)
Fig. V.3. Courbe des vitesses V_s et V_p pour Sc05.....	(76)
Fig. V.4. Courbe des vitesses V_s et V_p pour Sc06.....	(77)
Fig. VI.1 Plan d'implantation des essais utilisés dans l'étude des corrélations.....	(82)
Fig. VI.2. Courbes de corrélation V_s-N pour tout le sol.....	(87)
Fig. VI.3. Courbes de corrélation V_s-N pour couche « terre végétale ».....	(88)

Fig. VI.4. Courbes de corrélation Vs-N pour couche « argile de Ouled Fayet ».....	(89)
Fig. VI.5. Courbes de corrélation Vs-N pour couche « marnes de Ouled Fayet ».....	(89)
Fig.VI.6. Courbes de corrélation par progression linéaire (terre végétale).....	(93)
Fig.VI.7. Courbes de corrélation par progression linéaire (Argiles).....	(93)
Fig.VI.8. Courbes de corrélation par progression linéaire (Marnes).....	(94)
Fig.VI.9. courbes de corrélation par progression linéaire (tout le sol).....	(94)
Fig.VI.10. Courbes de corrélation par progression en puissance (Terre végétale).....	(95)
Fig.VI.11. Courbes de corrélation par progression en puissance (Argiles).....	(95)
Fig.VI.12. Courbes de corrélation par progression en puissance (Marnes).....	(96)
Fig.VI.13. courbes de corrélation par progression en puissance (tout le sol).....	(96)
Fig.VI.14.courbes de corrélation Vs-qc pour la terre végétale.....	(97)
Fig.VI.15.courbes de corrélation Vs-qc pour la couche argileuse.....	(97)
Fig.VI.16.courbes de corrélation Vs-qc pour la couche marneuse.....	(98)
Fig.VI.17.courbes de corrélation Vs-qc pour Tout le sol.....	(98)
Fig.VI.18. Courbes de corrélation par progression linéaire (terre végétale).....	(100)
Fig.VI.19. Courbes de corrélation par progression linéaire (argiles).....	(100)
Fig.VI.20. Courbes de corrélation par progression linéaire (Marnes).....	(101)
Fig.VI.21. Courbes de corrélation par progression linéaire (tout le sol).....	(101)
Fig.VI.22. Courbes de corrélation par progression en puissance (terre végétale).....	(102)
Fig.VI.23. Courbes de corrélation par progression en puissance (Argiles).....	(102)
Fig.VI.24. Courbes de corrélation par progression en puissance (Marnes).....	(103)
Fig.VI.25. Courbes de corrélation par progression en puissance (tout le sol).....	(103)
Fig VI.26.Courbe de corrélation qc - (PI-P₀) CASSAN (1978).....	(106)
Fig. VI.27. Corrélation entre (qc-pl) pour les marnes de Ouled Fayet.....	(108)
Fig. VI.28. Corrélation entre (qc-pl) pour les Argiles de Ouled Fayet.....	(108)
Fig. VI.29. Corrélation entre (qc-PI) pour le sol de Ouled Fayet.....	(109)
Fig VI.30. Corrélation entre (qc-Ep) pour les argiles de Ouled Fayet.....	(109)
Fig. VI.31. Corrélation entre (qc-Ep) pour les marnes de Ouled Fayet.....	(110)
Fig. VI.32. Corrélation entre (qc-Ep) pour le sol de Ouled Fayet.....	(110)
Fig. VI.33. Corrélation entre (Ep-PI) pour les argiles de Ouled Fayet.....	(111)
Fig. VI.34. Corrélation entre (Ep-PI) pour les marnes de Ouled Fayet.....	(111)
Fig. VI.35. Corrélation entre (Ep-PI) pour les marnes de Ouled Fayet.....	(111)

LISTE DES TABLEAUX

Tableau. II.1. Caractéristiques climatiques de la région d'étude. -Station de Dar El Beida (2000-2009).....	(12)
Tableau. II.2. Classification des pentes.....	(21)
Tableau. II.3. Principales formations géologique du P.O.S sud.....	(22)
Tableau.III.1. Récapitulatif de la campagne de reconnaissance.....	(29)
Tableau.III.2. Diamètre du forage pour des pressiomètre.....	(36)
Tableau.III.3. Classification selon le rapport (E_m/ P_1).....	(43)
Tableau.III.4. Classification Des Sols Suivant P_1	(44)
Tableau.II.5. Compacité du sable à l'aide de l'essai SPT (Terzaghi et Peck).....	(49)
Tableau. III.6. Résistances dynamique de pointe mesurées dans différents sols.....	(51)
Tableau. III.7. Classification des sols suivant Q_c	(56)
Tableau.IV.1. Classification des sols selon RPA 99 modifié 2003.....	(67)
Tableau.V.1. Résultats de l'essai au pénétromètre statique (CPT).....	(70)
Tableau.V.2. Résultats de l'essai prèssiométrique Menard.....	(71)
Tableau.V.3. Classification des sites suivant les résultats prèssiométriques (RPA 99 version 2003).....	(71)
Tableau.V.4. Niveau piézométrique dans les sondages.....	(72)
Tableau.V.5. Résultats des essais physiques de laboratoire (1).....	(73)
Tableau.V.6. Résultats des essais physiques de laboratoire (2).....	(74)
Tableau.V.7. Récapitulatif des résultats de l'essaiDownhole Sc03.....	(75)
Tableau.V.8. Récapitulatif des résultats de l'essaiDownhole Sc05.....	(76)
Tableau.V.9. Récapitulatif des résultats de l'essaiDownhole Sc06.....	(77)
Tableau.VI.1. Données $N(\text{moy})$, $V_s(\text{moy})$ et $V_p(\text{moy})$ du Sc03.....	(81)
Tableau.VI.2. Données $N(\text{moy})$, $V_s(\text{moy})$ et $V_p(\text{moy})$ du Sc05.....	(82)
Tableau.VI.3. Les mesures de N et V_s de Sc03 et Sc05.....	(85)
Tableau.VI.4. Equations de corrélation proposés par différents auteurs.....	(87)
Tableau.VI.5. Résultats de $V_s- N$ de la couche terre végétale.....	(88)
Tableau.VI.6. Résultats de $V_s- N$ de la couche argileuse.....	(88)
Tableau.VI.7. Résultats de $V_s- N$ de la couche marneuse.....	(89)
Tableau.VI.8. Coefficients de corrélations V_s-N	(90)
Tableau.VI.9. Récapitulatif des valeurs des coefficients de corrélations.....	(104)
Tableau.VI.10. Récapitulatif des valeurs q_c , N et V_s	(105)
Tableau.VI.11. Base de données q_c , p_l et E_p	(107)
Tableau.VI.12. Récapitulatif des corrélations (q_c , p_l , E_p).....	(112)

NOTATIONS :

Certains symboles peuvent avoir des significations différentes, dans ces cas, leurs significations sont indiquées et mise dans l'ordre de leurs utilisations et leurs importances relatives en cette étude.

- σ_{ij} Tenseur des contraintes.
- δ_{ij} Symbole de Kronecker.
- ϵ_{ij} Tenseur des déformations.
- λ Multiplicateur plastique.
- Coefficient de Poisson.
- Poids volumique.
- Angle de frottement interne.
- c Cohésion.
- c_u Cohésion non drainée.
- P_f Pression de fluage.
- P_l Pression limite.
- Sc Sondage carotté.
- N Résistance à la pénétration dynamique.
- q_d Résistance dynamique unitaire.
- q_c Résistance de pointe.
- f_s Frottement latéral unitaire.
- R_f Rapport de frottement.
- E Module d'Young.
- E_p Module préssiométrique.
- G Module de cisaillement.
- V_s Vitesse de propagation des ondes de cisaillement.
- V_p Vitesse de propagation des ondes de compression.
- Vitesse moyenne d'onde de Cisaillement.
- R Coefficient de corrélation.
- R^2 Coefficient de détermination.
- LNHC Laboratoire national de l'Habitat et de la Construction.
- LHCC Laboratoire de l'Habitat et de la Construction Centre.
- CGS Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique.
- P.O.S Plan d'Occupation et de Situation.

Résumé

Actuellement, il est de plus en plus courant qu'on construise des ouvrages lourds ou de configuration spéciale sur des sols médiocres ou de faible portance. Un tel fait est à la fois un challenge et un stimulus continu au développement de la recherche appliquée en mécanique des sols.

Aujourd'hui, au 21^{ème} siècle l'ingénieur géotechnicien dispose de moyens sophistiqués et perfectionnés pour le calcul de fondations, des ouvrages en terre et l'étude du comportement du sol ;appareillages, logiciels, normes ...etc. En outre il se réfère à la littérature technique et scientifique, cet ingénieur à l'impression qu'il peut résoudre, par la modélisation numérique, les problèmes les plus complexes avec précision. Cependant la grande hétérogénéité des sols fait que cette impression est trompeuse.

L'utilisation des codes de calculs dans la prévision du comportement des sols ou des ouvrages de grande importance nécessite la détermination des paramètres mécaniques du sol sur de très grandes échelles géométriques. Les données obtenues de la reconnaissance géotechnique ne sont représentatives que de la zone située dans le voisinage immédiat du sondage, Elles permettent par contre une identification précise de la stratigraphie du terrain rencontré et une évaluation de ses caractéristiques mécaniques et physiques. Par ailleurs les reconnaissances géophysiques par les méthodes sismiques permettent une approche globale de la zone, définissant les horizons les plus importants et les valeurs moyennes de leurs modules dynamiques sur une grande échelle.

Les paramètres utilisés pour décrire les propriétés des sols sont de nature très variées, il est rare que, sur un même site, tous ces paramètres soient mesurés en un nombre de points suffisant pour que l'on puisse juger, l'ensemble du sol.

Habituellement, les reconnaissances géotechniques et géophysiques sont limitées au strict minimum, on ne dispose que des valeurs de certains paramètres en certains points et d'autres paramètres en d'autres points. L'ingénieur géotechnicien doit alors tirer le meilleur parti possible de ces informations éparses pour établir une coupe géotechnique représentative du site étudié.

CORRELATION ENTRE LES PARAMETRES GEOTECHNIQUES ET LES PARAMETRES GEOPHYSIQUES

Une complémentarité entre les reconnaissances géophysiques globales et les reconnaissances géotechniques locales doit donc être trouvée, cette complémentarité est cruciale dans les reconnaissances des sols pour la mise en place des ouvrages de grandes importances. C'est dans ce cadre général que l'utilisation des corrélations entre les différentes propriétés des sols peut contribuer efficacement au travail de synthèse du géotechnicien.

Mots clés: Géotechnique, Géophysique, CPT, SPT, résistance de pointe, résistance à la pénétration, pressiomètre, Downhole, vitesse sismique, paramètres géodynamiques, corrélations.

Summary

Nowadays, build a heavy works and special configurations on delicate grounds are increased on this era. Such fact is at the same time a challenge and stimulus in developing applied research on the ground.

Today, in the 21st century, a geotechnical engineer owes a sophisticated means and developed calculations in his research on the ground's behaviors as well as; different equipments, software, standards...etc. These permit him to rely on technical and scientific theories with digital modeling, in order to solve the complicated issues with high precision. But this application of ground's heterogeneity can be misleading.

The use of the calculated codes on the forecast of ground's behavior or a heavy works pushes us to search about the mechanical parameters of the sols on a great geotechnical scales. The obtained ideas by the geotechnical attempts are representing only the vicinity of located area; it allows a precise identification of the ground's stratigraphy also, the evaluation of its mechanical and physical characteristics. This geotechnical recognitions and seismic study is applied on the area as a whole, it also defines the important horizons and their values on a very great scales.

The applied parameters to describe the physical and mechanical characteristics of the sols are varied by nature; on the same area of study these settings must be measured accordingly with sufficient points this in order to be able to evaluate the whole sols.

Usually geotechnical recognition and the geophysical one are limited on detailed points, because we owe only limited values in some parameters, for this reason, the geotechnical engineer have to apply a more possible ideas in order to establish an adequate geotechnical analyzes on the subject of study.

To shed light on what we have said above, we can say that it is necessary to find the complementarities within a global geophysical recognitions and local ones. In the case the use of correlation between different ground's characteristics can contributes an effective geotechnical work.

CORRELATIONS WITHIN GEOTECHNICAL SETTINGS AND GEOPHYSICAL SETTINGS.

Keywords: Geotechnical Engineering, Geophysics, CPT, SPT, tip resistance, penetration resistance, pressure meter, Downhole, seismic velocity, geodynamic parameters correlations.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis l'antiquité, l'homme a toujours cherché à connaître mieux la nature et les caractéristiques des sols, pour pouvoir y assier les fondations.

De nos jours, les ouvrages sont tellement importants, que l'homme s'est trouvé contraint de développer les méthodes de reconnaissances et de recherches.

La connaissance des paramètres physiques et mécaniques s'avère, comme une première étape, impérativement incontournable pour tout projet géotechnique, et cela bien sûr après avoir réalisé une étude géologique basée sur une visite du terrain, une consultation des cartes et enfin, établissement d'une coupe géologique, qui nécessite des connaissances détaillées et précises du sol.

Toutes fois en présence d'un ouvrage de grande envergure, la reconnaissance géotechnique seule devient insuffisante. Cependant, à fin de mieux cerner la configuration du sol, on fera recourt à une troisième méthode beaucoup plus rapide et moins couteuse qui est la géophysique.

En analysant les résultats de chacune de ces prospections, plusieurs questions viennent à nos esprits, parmi les quels ;

- y a-t-il une relation étroite entre les résultats obtenus par les deux méthodes géophysiques et géotechniques ?
- peut-on faire une étude de sol en se basant uniquement sur la reconnaissance géotechnique ou géophysique ?
- est-ce que une étude statistique nous permet d'avoir des ordres de grandeur qui seront utiles pour les études ultérieures ?
- comment évoluent les paramètres géophysiques en fonction des paramètres géotechniques ?

Pour répondre aux questions posées, Ceci nous a amené à étudier les moyens d'obtenir ces paramètres, notamment par des essais in situ tels que les essais géotechniques et géophysiques dans le but d'étudier les éventuelles relations qui peuvent exister entre eux du fait que dans certains projets il n'est pas aisé d'avoir un nombre de mesures suffisant.

Dans cette optique, des travaux scientifiques ont permis d'introduire une réflexion portant sur la possibilité d'étudier les corrélations entre le paramètre géophysique V_s et les paramètres géotechnique N et q_c et les étayées par de nombreuses études récentes qui ont montré qu'elles sont significatives.

une étude de corrélations générales et statistiques entre les paramètres géotechniques; résistance à la pénétration(**N**) de l'essai Standard Pénétration Test et la résistance en pointe(**q_c**) de l'essai au pénétromètre statique et les principaux paramètres géophysiques de l'essai Downhole à savoir les vitesses sismiques; vitesse d'onde de cisaillement (**V_s**), vitesse d'onde de compression(**V_p**) et les autres paramètres géodynamiques; module de cisaillement (**G**), module de Young(**E**), coefficient de poisson(ν) et le module d'incompressibilité (**K**), a été étudiée.

Ces trois paramètres **V_s**, **N** et **q_c** peuvent être utilisés pour la classification d'un sol (R.P.A 99/version 2003).La vitesse de cisaillement **V_s** permet, en plus, de déterminer la réponse dynamique d'un sol lors d'un séisme.

De plus, une étude de corrélations a été envisagée aussi entre les paramètres pressiométriques à savoir le module pressiométrique (**E_p**), la pression limite (**P_L**) de l'essai Menard et la résistance de point **q_c** du pénétromètre statique (CPT).

L'objectif principal de ce mémoire est d'essayer de faire des corrélations entre les différentes caractéristiques géologiques, géotechniques et géophysiques des différentes formations rencontrées au niveau du site d'étude (P.O.S sud de Ouled Fayet).

Les travaux de cette étude ont été scindés en trois principales parties ;

- La première partie est une synthèse bibliographique qui comporte les données géologiques, hydrogéologiques, climatiques, sismique...etc.les documents consultés sont essentiellement les mémoires d'ingénieur en géologie et géologie appliquée, réalisés sur la région de Ouled Fayet, et/ou des rapports d'études de sol élaborés par les organismes et les laboratoires national.
- La seconde partie est une application théorique ponctuée par la présentation des essais géotechniques et géophysiques utilisés lors de la campagne reconnaissances et une application pratique ponctuée par interprétation des résultats obtenus en vue de déterminer la nature des couches et leurs configurations.
- La dernière partie consiste à établir des corrélations générales et statistiques entre les différents paramètres cités précédemment.

Notre contribution à l'étude de ces corrélations s'est faite à partir des données obtenues lors de l'étude du P.O.S sud de Ouled Fayet.

I. GENERALITES SUR LES CORRELATIONS :

I.1 - Objectif de l'étude :

L'intérêt du présent travail est d'étudier, en l'absence d'un nombre suffisant de mesures obtenues à partir des essais géophysiques et géotechniques, une méthode d'analyse statistique de données permettant d'établir une relation, principalement;entre la vitesse de cisaillement V_s et la résistance à la pénétration N de l'essai (SPT), V_s et la résistance de pointe q_c de l'essai(CPT) et celle qui existe entre les paramètres géophysique à savoir (G , E , K , V_p) et les paramètres géotechniques N (SPT) et q_c (CPT).de plus une corrélation complémentaire a été réalisée reliant ainsi les paramètres préssiométriques (E_p , PI) et la résistance de pointe q_c du pénétromètre statique (CPT).

A cet effet, nous présenterons les équations régissant ces relations à partir des données consignées dans des rapports d'études géotechniques et géophysiques que nous avons traitées en tenant compte de la nature lithologique des formations géologique en place mises en évidence lors de l'exécution des sondages carottés.

I.2. Intérêt et Domaines d'utilisation des corrélations :

Dans la pratique de la mécanique des sols ,les corrélations entre les paramètres sont utilisées comme moyen de contrôle des résultats des essais en place et en laboratoire, et comme moyen de fabrication de nouvelles valeurs complémentaire de certains paramètres inconnus en fonction d'autres paramètres connus.

Par exemple, sur un site donné, on peut analyser la relation entre deux paramètres mesurés sur une même carotte de sol (indice des vides (e) et indice de compression (C_c)...etc.)ou mesurer en place dans le même essai (module pressiométrique(PI), vitesse de cisaillement (V_s) et N ou les résistance de point q_c ... etc.) et détecter les variations de la nature ou de l'histoire des sols d'après les modifications de leurs relations. Dans un tel cas, les corrélations servent d'outil de contrôle de l'homogénéité des sols (ou de la qualité des essaies, si on sait de façon certaine que le sol est le même que celui qui a servi pour établir les corrélations).

On utilise aussi les corrélations pour estimer certaines propriétés des sols en fonctions d'autres propriétés physiques mesurées comme le poids volumique ou la teneur en eau).

On peut ainsi, lors des études préliminaires et dans certaines situations de projets, disposer de valeurs des paramètres nécessaires au dimensionnement des ouvrages sans les avoir déterminées par les essais.

Les conditions d'utilisation des corrélations dans les études géotechniques dépendent de la fiabilité des corrélations utilisées. Cette fiabilité des corrélations dépend à son tour de plusieurs conditions ;

- Fiabilité et précisions des résultats des essais de reconnaissances.
- Application des corrélations sur des sols de nature bien définie.
- Tenir compte de toutes les conditions qui y régissent en ce sol.
- Faire le bon choix des paramètres à corrélérer.

Certains paramètres sont liés, d'une couche de sol d'un site déterminé, par des relations proches d'une relation mathématique exacte .par contre si l'on analyse simultanément des données provenant de deux sites , pour des sols de même nature , on trouve en général que les valeurs des paramètres sont relativement dispersées. Cette dispersion augmente quand le nombre de sites s'accroît et quand on regroupe des données relatives à différents types de sols.

Les erreurs expérimentales, lors de la détermination des paramètres qui servent à établir les corrélations, exercent également une influence défavorable sur la qualité des corrélations obtenues. il est, pour cette raison , indispensable de connaître l'origine des corrélations que l'on envisage d'utiliser dans le cadre d'une étude géotechnique, et d'être conscient de la variabilité possible des paramètres autour de leur relation moyenne affichée, notamment quand les corrélations ont été établies entre des fonctions logarithmiques des paramètres.

I.3 - Méthodologie de l'étude :

En prévision de l'étude des corrélations existant entre les paramètres géophysiques (V_s , G , E , K , V_p) et aussi entre les paramètres géotechniques N de l'essai (SPT) et q_c de l'essai (CPT), et de l'étude de corrélations reliant aussi les paramètres préssiométriques (E_p , PI) et pénétrométriques (q_c) notre travail va s'articuler autour de différentes étapes qui vont nous permettre de l'inscrire dans un contexte prenant en considération, dans une **première phase**, une approche qualitative portant sur les données suivantes : la situation de la zone d'étude , la carte géologique, un aperçu hydrologique et hydrogéologique et sismique de la région d'étude.

Dans une **deuxième phase**, une approche quantitative portant sur les essais in situ réalisés tels que les essais géophysiques et géotechniques avec leurs mesures et leur traitement par une méthode d'analyse des données à partir d'un programme informatique.

1ère Phase :

Approche qualitative:

Cette phase a porté essentiellement sur la consultation des documents suivants :

- La situation géographique de la région d'étude sur **Google Earth** qui nous a permis de délimiter la zone d'étude.
- Un extrait de la carte géologique au 1/500 000e de l'Algérois mettant en relief les grands ensembles géologiques de la zone d'étude.
- aperçu sur la géomorphologie de la zone d'étude (P.O.S sud de Ouled Fayet).
- Un aperçu hydrologique et hydrogéologique fournissant les informations sur la présence de l'eau en surface et dans le sous-sol de la zone d'étude.
- Classification sismique de la région d'étude.

2ième Phase :

Approche quantitative :

Cette phase a porté essentiellement sur les informations suivantes :

- L'introduction de la nature des essais in situ tels que les essais géotechniques et géophysiques appliqués dans le cadre de cette étude avec une corrélation entre les mesures recueillies dans la zone d'étude; Downhole (V_s , V_p , E , G , K), pénétromètre dynamique SPT (N), pénétromètres statique CPT (q_c) et pressiomètre (E_p , PI).
- La collecte et des mesures des paramètres V_s , V_p , G , E , K , N , q_c , E_p et PI .
- présentation des valeurs moyennes des mesures collectées pour chaque formation
- L'application d'une méthode d'analyse à partir du programme Excel.
- Analyse et interprétation des résultats obtenus.
- Etablir des équations de corrélation pour les paramètres choisis pour cette étude.
- Etablir une base de données regroupant l'ensemble des mesures avec les équations de corrélation qui relie les paramètres en question.
- Conclusion et recommandations.

Introduction

La région d'Alger fait partie du domaine interne des Maghrébides. Ce dernier est composé du socle cristallophyllien kabyle, d'un ensemble sédimentaire paléozoïque peu ou pas métamorphiques et de la dorsale kabyle.

Le socle kabyle d'âge paléozoïque est constitué de terrains cristallophylliens métamorphiques. Ces terrains apparaissent dans le massif d'Alger, au centre, à Sidi Ferruch à l'Ouest, et à Tamenfoust, El-marsa à l'Est. Ce massif est formé de gneiss de marbre d'amphibolites des micaschistes et des schistes.

L'ensemble sédimentaire paléozoïque forme une couverture en discordance sur le socle kabyle. Cette couverture est représentée par des formations pélitiques gréseuses et carbonatées. La série est connue depuis le Cambrien supérieur (Bourrouilh et al. 1976).

La dorsale kabyle ou chaîne calcaire (Glangeaud ; 1932) se présente sous forme d'écaillés d'âge permo-triasique à Eocène moyen (Lutétien).

II.1. Géologie de la région d'Alger

II.1.1. Localisation de la région d'Alger :

La wilaya d'Alger est située dans l'Algérois au Nord de l'Algérie, elle est délimitée :

- au nord, par la mer Méditerranée ;
- à l'est, par la wilaya de Boumerdès ;
- à l'ouest, par la wilaya de Tipaza ;
- au sud, par la wilaya de Blida.



Fig. II. 1. Localisation de la wilaya d'Alger (Google Maps).

II.1.2. Les grands ensembles géomorphologiques :

Selon les caractéristiques géomorphologiques et géologiques, la région d'Alger peut être subdivisée en cinq grands ensembles (Figure II.2) :

- Le massif d'Alger (Bouzeréah) ;
- Le sahel d'Alger ;
- La plaine de la Mitidja ;
- La plaine littorale ;
- Le cordon littoral dunaire.

❖ le massif de Bouzeréah:

Il s'étend suivant la direction Est Ouest sur une longueur de 20Km et une largeur de 6Km, dont le plus haut sommet atteint 407m. Il présente une topographie très accidentée, recoupé par des talwegs profonds.

❖ Le sahel d'Alger:

Il englobe tous les petits reliefs qui s'étendent entre le massif de Bouzeréah en Nord et la rive gauche de l'oued El Harrach au Sud et au Sud-est ainsi que la rive droite de l'oued Mazafran au Sud-ouest.

Les mouvements tectoniques post astien individualisent le sahel en une ride anticlinale d'altitude maximale 265m (à Ben Aknoun), on distingue dans celle-ci trois grandes parties.

- Le sahel marneux ;
- Le plateau molassique d'Alger ;
- Le piémont sud de sahel.

❖ La plaine littorale orientale :

Elle se développe entre la mer méditerranée au Nord-est et la corniche molassique du Hamma au Sud-ouest, la place du 1^{er} Mai au Nord-ouest et la rive gauche de l'oued ElHarrach au Sud-est.

❖ Le cordon littoral dunaire :

Il se développe dans les secteurs suivants :

- ✓ entre la rive gauche de l'oued El Harrach et Bordj El Kiffan où il sépare la rive maritime des zones basses septentrionales de la Mitidja, il s'agit d'une petite barrière sablogréseuses allongée parallèlement au rivage.
- ✓ A l'ouest de AinBenian jusqu'à Zéralda où il forme les piémonts du sahel marneux, dans cette zone sa topographie est étagée.

❖ La plaine de la Mitidja :

Elle se présente comme une vaste dépression recouverte par des dépôts alluvionnaires d'âge quaternaire. Elle correspond à un bassin allongé selon la direction Est-ouest, de 100Km environ de long et 20Km de large, et bordées par deux régions surélevées: le Sahel au Nord et l'Atlas Blidéen au Sud.

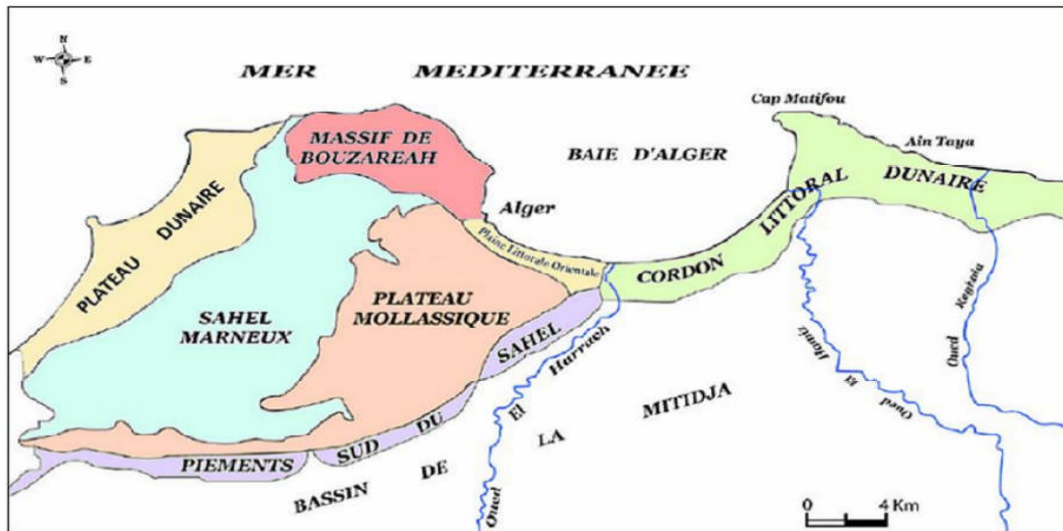


Fig.II.2 Les grands ensembles géomorphologiques de la région d'Alger (In DERRICHE et CHEIKH LOUNIS, 2004).

II.1.3. Lithostratigraphie

II.2.1. Le Primaire :

Métamorphique (schistes, micaschistes, gneiss, gneiss granitisés, calcaire) très tectonisé et affleure entre Ain-Bénian, Bouzareah et le port d'Alger.

II.2.2. Le Secondaire :

Les terrains du secondaire n'affleurent pas dans la région d'Alger à l'exception des bordures de la Mitidja (Atlas Blidéen et Chenoua), où ils sont représentés par des roches sédimentaires (calcaire, marno-calcaire).

II.2.3. Le Tertiaire :

Il forme une couverture reposant en discordance sur le faciès métamorphique. Cette couverture est marquée par une lacune stratigraphique de l'Eocène et de l'Oligocène. Les formations tertiaires sont représentées par les faciès suivant :

A. Le Miocène :

Il est représenté par des dépôts littoraux de conglomérats, grès et des Poudingues. Le Miocène regroupe les formations d'âge Burdigalien et Pontien.

- Burdigalien (Miocène inférieur) :

Il est formé de grés et de poudingues, grossiers, tendres et grisâtres, localement marneux, sableux ou même calcaire. Il affleure dans le Revin d'oued Koriche, Beni Messous et Télémly.

- Pontien :

Ce sont des formations continentales représentées par des Poudingues et Conglomérats rougeâtres.

B. Le Pliocène :

Dans le sahel le pliocène forme un relief monoclinal, il est constitué de :

-Le plaisancien :

Cet âge a été établi définitivement par (Dalloni, 1933) et a été confirmé un peu plus tard par (Muraour, 1949). Il est constitué essentiellement de marnes bleues compacte parfois légèrement gréseuses vers le sommet, à cassures conchoïdales, lorsqu'elles sont saines et de couleur jaune ocre à grisâtre, à cassures subconchoïdales lorsqu'elles sont altérées ; le plus souvent dénommées marnes du plaisancien.

Ces marnes plaisanciennes étant des matériaux peu perméables à non perméables. Elles sont riches en microfaunes, (Muraour, 1949).

- L'Astien :

il est séparé du Plaisancien par un niveau repère glauconie de quatre mètre (4m) à quelque centimètre d'épaisseur. Il est caractérisé par plusieurs faciès : Le faciès marno-sableux jaunâtre à blanchâtre, très fossilifère, est le plus répandu. Le faciès calcaire-gréseux est représenté par de larges dalles fossilifères (Bivalves et Gastéropodes). Le faciès gréseux à sableux terminent le niveau Astien. La molasse récifale à sub-récifale, se distingue par de hautes falaises de couleur ocre pouvant atteindre 50 m.

II.2.4. Le Quaternaire :

Il est représenté essentiellement par des terrasses marines, des sables rouges et des alluvions récentes. Ces formations résultent de l'érosion de l'Atlas Tellien et de l'accumulation des produits de cette érosion dans la Mitidja et le Sahel.

Les dépôts du Quaternaire regroupent :

-Le Quaternaire ancien (Villafranchien) :

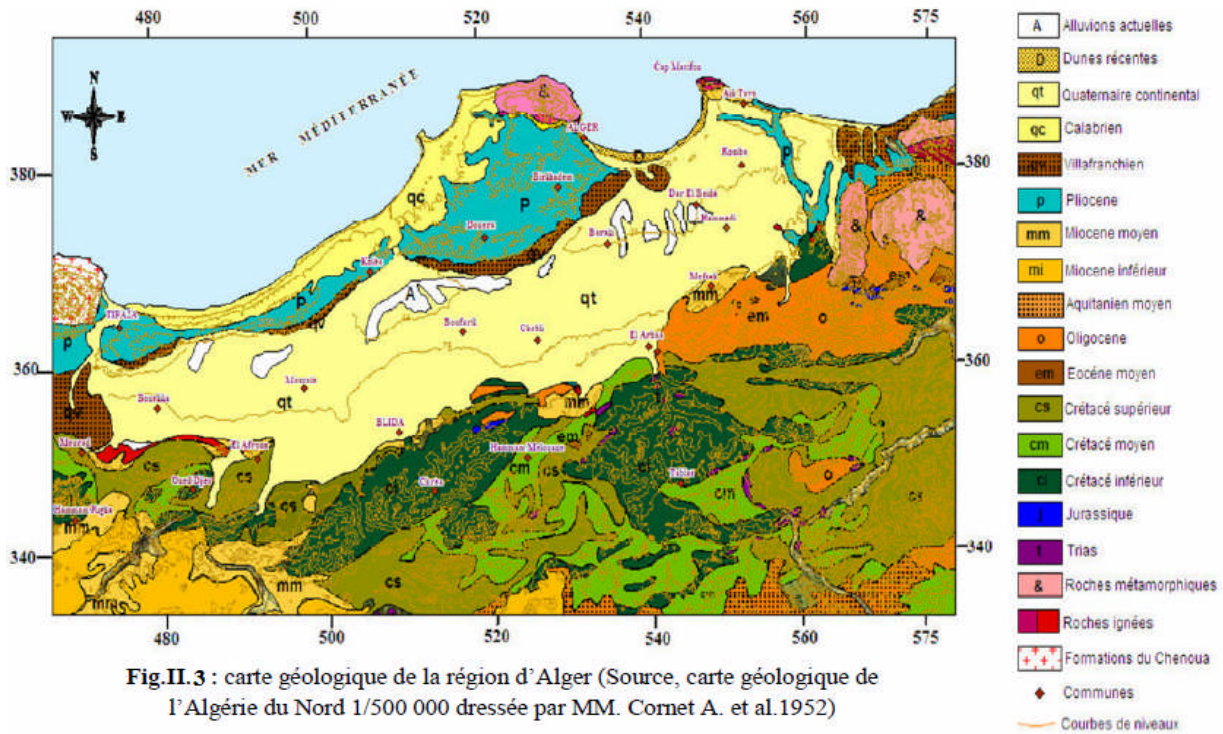
Il est représenté par des sables argileux rouge (Aymé, 1964), des dépôts d'argiles vaseux et des tourbes argileuses.

-Le Quaternaire moyen (Sicilien-Tyrrhénien) :

Il est constitué par des terrasses marines sableuses, sablo-gréseuses et lumachelliques.

-Le Quaternaire récent (Flandrien) :

Il est représenté par des sables argileux rougeâtres, des limons et des dépôts actuels (Fig. II.2).



II.1.4. Tectonique de la région d'Alger:

L'activité tectonique récente de l'Algérie du Nord est la conséquence de la convergence entre les plaques africaines et eurasiennes (Mc Kenzie, 1972).

Le début de l'Astien correspond à un mouvement tectonique certain qui est suivi par des déformations à grand rayon de courbure qui mènent à la formation du synclinal de la Mitidja et de l'anticlinal du Sahel. La zone d'étude correspondant au plateau Ouled Fayet fait partie du sahel d'Alger, ce dernier est un bourrelet côtier constitué essentiellement par des dépôts néogènes datant du Pliocène et du Quaternaire.

Le sahel d'Alger qui occupe la partie Ouest de la région d'Alger est un simple anticlinal asymétrique, mis en place lors de la déformation post-astienne, il est caractérisé par une activité sismique modérée à forte. Plusieurs séismes de magnitudes inférieures à 5 ont été localisés dans les régions de Mhelma, Zéralda, Bérard et Koléa. Le plus fort séisme qu'a connu la région occidentale du Sahel est celui de Chenoua du 29 octobre 1989 d'une magnitude $M_w = 6$.

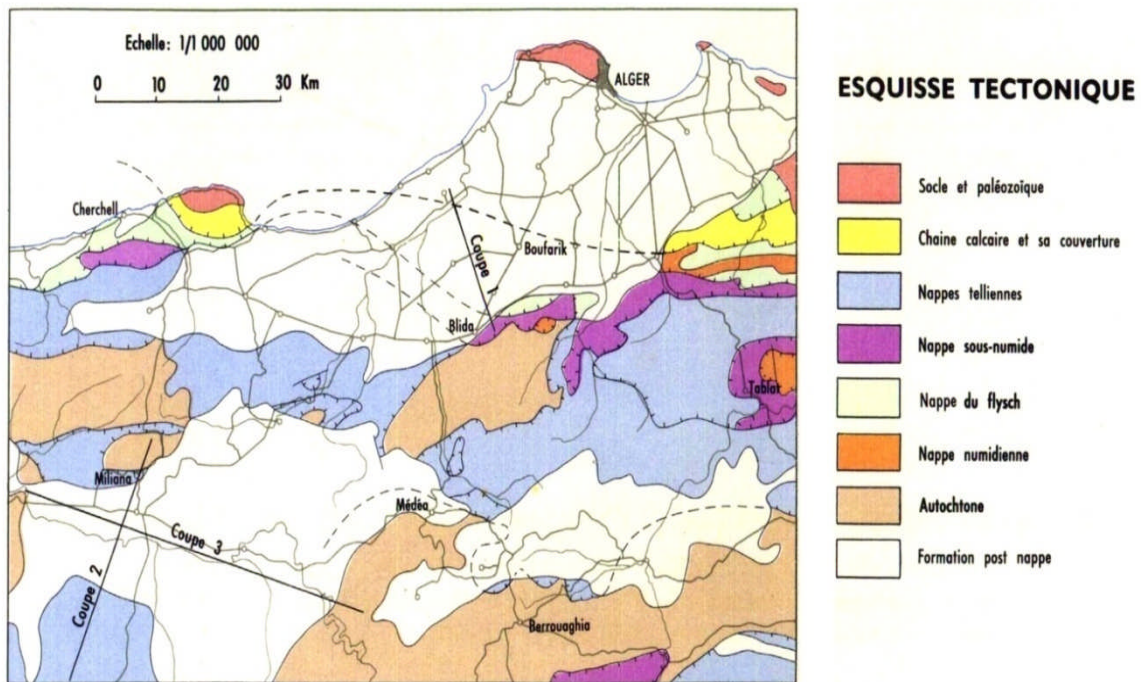


Fig. II.4: Esquisse tectonique de la région d'Alger.

II.2. Hydroclimatologie et Hydrogéologie

L'eau joue un rôle important dans les instabilités des sols et la variation des valeurs des caractéristiques physico-mécaniques du sol ce qui porte une influence directe sur les équations de corrélations entre les paramètres géotechniques et géophysiques. C'est pourquoi une étude hydrologique et hydrogéologique est nécessaire dans tous les projets. Cette étude a pour but de définir les systèmes d'écoulement des eaux superficielles et souterraines de caractériser ainsi leur influence sur le comportement évolutif des sols.

II.2.1. Hydroclimatologie :

La région d'Alger est régie par un climat méditerranéen (tempéré), caractérisé par l'alternance d'une période pluvieuse relativement courte, qui s'étale entre le mois d'octobre et le mois d'avril, et une période sèche qui s'échelonne du mois de mai au mois de septembre. En raison d'absence d'une station dans la région d'Ouled Fayet, les caractéristiques climatiques de la région d'étude ont été évaluées grâce aux données fournies par l'Office National de la Météorologie (ONM), station de Dar El-Beida, sur une période de 10ans entre 2000 à 2009, qui sont regroupées sur le (Tab. II.1) et sur l'histogramme de la figure II.5.

II.2.2. Précipitations et Températures:

Les valeurs des précipitations moyennes mensuelles, annuelles et les températures mensuelles de la région d'Ouled Fayet sont représentées dans le Tableau. II.1 et en histogramme dans les Figures (Fig. II.5, Fig. II.6, Fig. II.7).

**Tableau. II.1. Caractéristiques climatiques de la région d'étude.
-Station de Dar El Beida (2000-2009).**

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Moyenne annuelle
Précipitation (mm)	85.2	57.5	49.7	41.3	45.8	1.9	1.9	10.3	32.4	48.7	102.3	97.5	574.5
T° min	4.8	5	7.3	9.3	12.8	16.4	19.5	20	17.5	14.5	9.6	6.9	11,96
T° moy	10.8	11.3	13.7	15.6	19.1	23.1	25.9	26.4	23.5	20.7	15.4	12.4	18,15
T° max	16.8	17.5	20.1	22	25.4	29.8	32.3	32.8	29.6	26.8	21.1	17.8	21,64
Années	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2009	2009	2009
Précipitation (mm)	282,6	443,3	477,7	733,4	706,3	539,3	608,9	801	530	621,3	621,3	621,3	621,3

Nous remarquons que les précipitations sont inégalement réparties sur l'année. La période pluvieuse s'étale du mois de Septembre au mois de Mai, avec un maximum de 102.3 mm enregistré au mois de Novembre, tandis que la période sèche s'étale entre juin et Août avec un minimum de 1.9 mm enregistré au mois de Juin (Fig. II.4). Egalement, la répartition annuelle des pluies varie de façon irrégulière, en effet, l'année 2007 est la plus pluvieuse, avec une précipitation annuelle de l'ordre de 801 mm tandis que l'année 2000 est la plus sèche avec une moyenne de 282.6 mm (Fig. II.5).

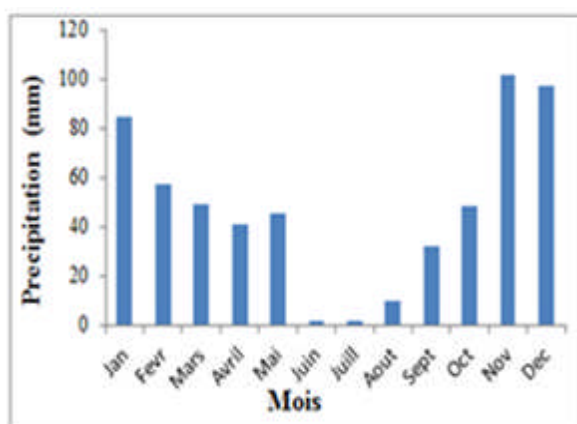


Fig. II.5: Variation mensuelles moyenne de la précipitation Station de Dar El Beida (2000 – 2009)

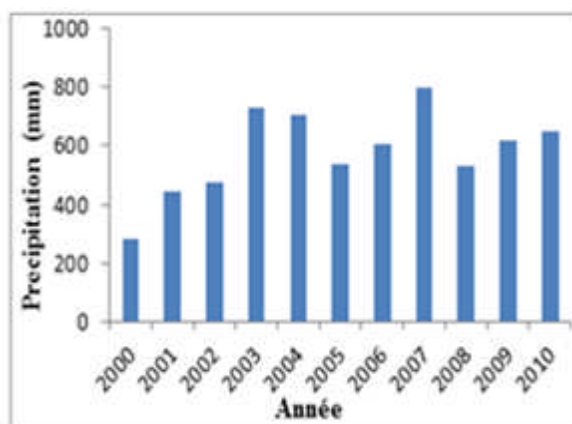


Fig. II.6: Variation annuelles de la précipitation- Station de Dar El Beida (2000 – 2009)-

L'analyse des températures mensuelles enregistrées pour la période 2000-2009 à la station de Dar El-Beida montre que la température la plus basse (4,8°C) est enregistrée au mois de Janvier, par contre le maximum (32.8°C) est enregistré au mois d'Août (Fig.II.7).

On distingue deux périodes :

- Une période humide comprise entre les mois de Novembre au mois d'Avril.
- Une période sèche s'étalant entre les mois de Mai et Octobre.

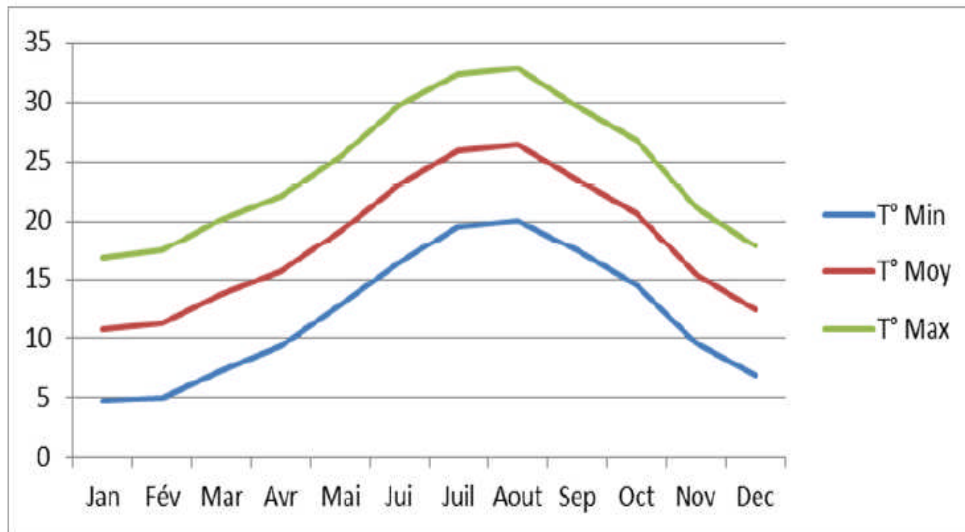


Fig. II.7 : Variation mensuelles moyennes des températures -Station de Dar El Beida (2000 – 2009).

II.2.3. Courbe ombrothermique de Gausсен:

GAUSSEN considère qu'un mois est sec quand la pluviométrie est inférieure ou égale à deux fois la température moyenne mensuelle ($P \leq 2T$). La courbe ombrothermique (Fig.II.8) est le produit de la combinaison entre les données pluviométrique moyenne et celles de la température moyenne. Elle montre une période sèche s'étale du mois de Mars au mois de Novembre, et une période humide entre Novembre et Avril.

En période sèche, les fortes températures provoquent le phénomène de retrait (l'apparition de fissures de dessiccation des marnes), alors qu'en période pluvieuse, l'apport d'eau remplit les fissures et provoque le phénomène de gonflement.

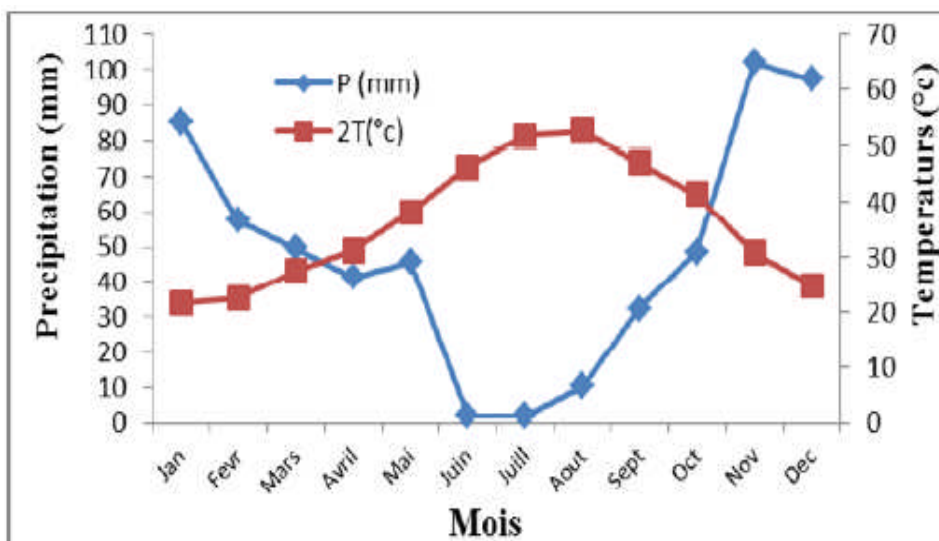


Fig. II.8. Courbe ombrothermique- Station de Dar El Beida (2000-2009).

II.2.4 Hydrologie :

Le sahel d'Alger appartient au bassin versant de la Mitidja, il est bordé par deux principaux oueds : oued El- Harrach et oued Mazafran. Il est caractérisé par un réseau hydrographique irrégulier (sec en été, parfois il connaît des fortes crues en hivers).

Le réseau hydrographique au niveau de la région de Ouled Fayet est relativement bien développé et caractérisé par des oueds à régimes temporaires (chaabas) et des oueds permanents (OuedZitoun , Oued Ben Brahim, OuedBridja, oued El – Fouara).

Les sites d'étude Sud et Est sont traversés par une multitude de cours d'eau allant de simples ruisseaux aux oueds. (Oued Zitoun occupe la partie Nord-Ouest du plateau Est) et celui de l'Ouest est traversé par des oueds à régime temporaire (chaabas).

II.2.5. Hydrogéologie :

Le Sahel d'Alger est caractérisée par la présence de deux réservoirs aquifères : l'aquifère astien et l'aquifère alluvial- quaternaire.

❖ L'aquifère astien :

Le terrain aquifère le plus important de la région d'Alger est la molasse astienne. Le mur de cette nappe est représenté par des argiles marneuses bleues du Plaisancien. Cet aquifère est subdivisé en deux nappes distinctes :

- la nappe profonde de la Mitidja ;
- la nappe du plateau molassique.

Il est caractérisé par des grandes surfaces d'affleurement et une forte perméabilité.

❖ L'aquifère alluvial de la Mitidja :

Il est formé par des alluvions du Quaternaire moyen et par des alluvions récentes (graviers, galets alternant avec des limons).

Ces deux aquifères sont séparés par la formation semi imperméable de Villafranchien appelé marnes d'El Harrach.

La région de Ouled Fayet est constituée par des marnes et des argiles bleues du Plaisancien et de l'Astien argileux. De point de vue hydrogéologique, cette formation est caractérisée par une perméabilité très faible qui ne favorise pas la présence de nappe d'eau importante, elle constitue le substratum de la nappe astienne (Fig. II.9).

Les formations de l'astien argileux recouvrant les marnes plaisanciennes dans la région de Ouled Fayet ne permettent aucune possibilité d'infiltration.

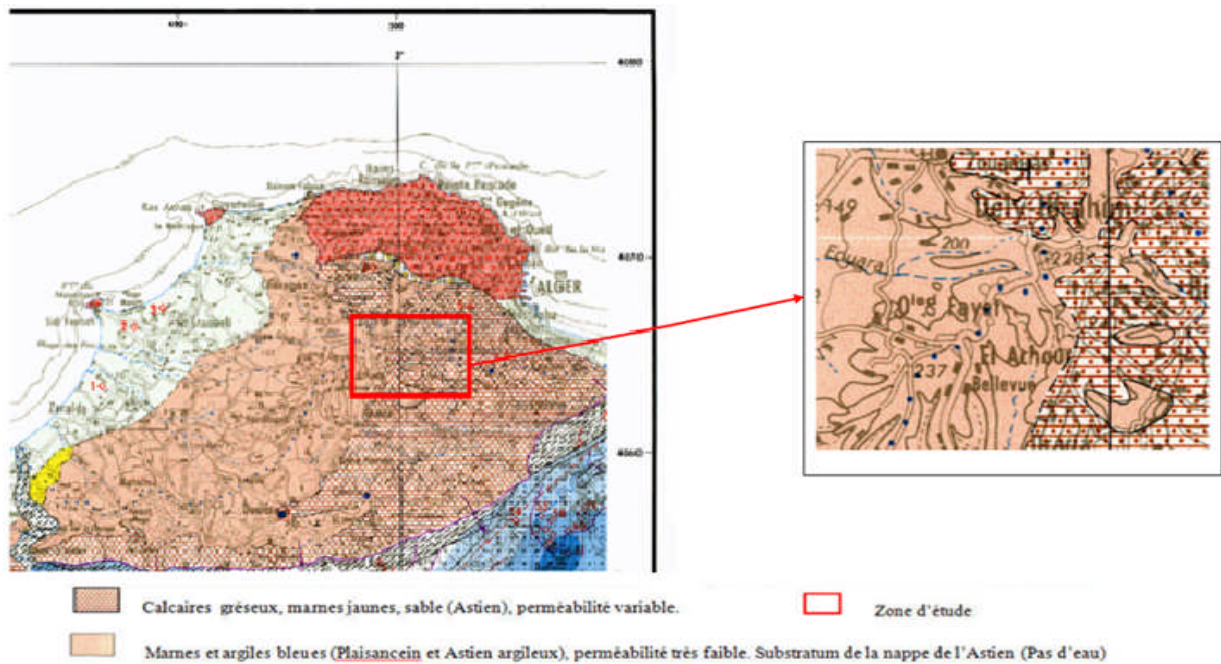
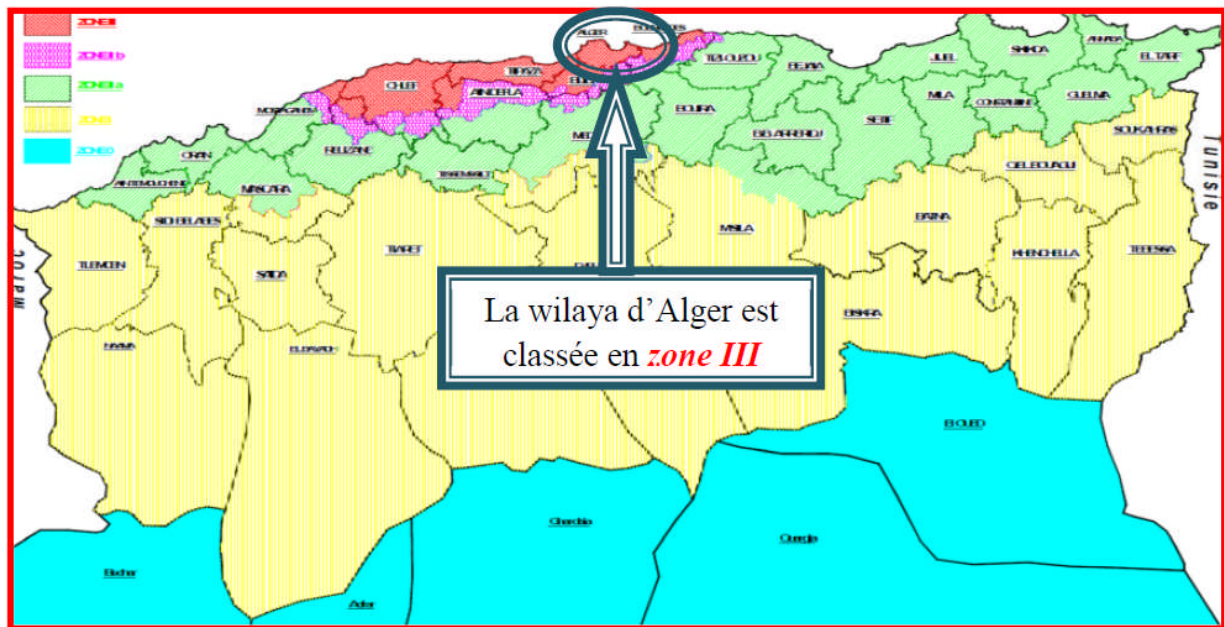


Fig. II.9. Carte hydrogéologique de la région de Ouled Fayet (Extrait de la carte hydrogéologique d'Alger, échelle 1/500 000 ; ANRH).

II.3. Aperçue sur la sismicité de la région d'Alger :

En se basant sur la sismicité historique, l'Algérie est subdivisée selon les règles parasismiques Algériennes (RPA 1999, révisées par CGS en 2003) en 5 zones :



Zone 0 : Sismicité négligeable ;

Zone IIa et IIb : Sismicité moyenne ;

Zone I : Sismicité faible ;

Zone III : Sismicité élevée.

Fig. II.10. Carte de zonage sismique après le séisme de Bumerdès (CGS 2003).

La Wilaya d'Alger, à laquelle appartient la région de Ouled Fayet se classe dans la **zone III** de forte activité sismique (Fig. II.10).

II.4. Présentation de la région d'études :

II.4.1. Situation géographique de la zone d'étude :

La zone d'étude se situe dans la région d'Ouled Fayet, distante de sept kilomètres (7km) du Sud-ouest de la wilaya d'Alger et de quatre kilomètres (4 km) au Sud de Chéraga. Elle est limitée par les communes suivantes : Chéraga et Dely Ibrahim au Nord, El Achour à l'Est, Baba Hssen et Douera au Sud et Souidania à l'Ouest (Fig. I.11) et (Fig. I.12).

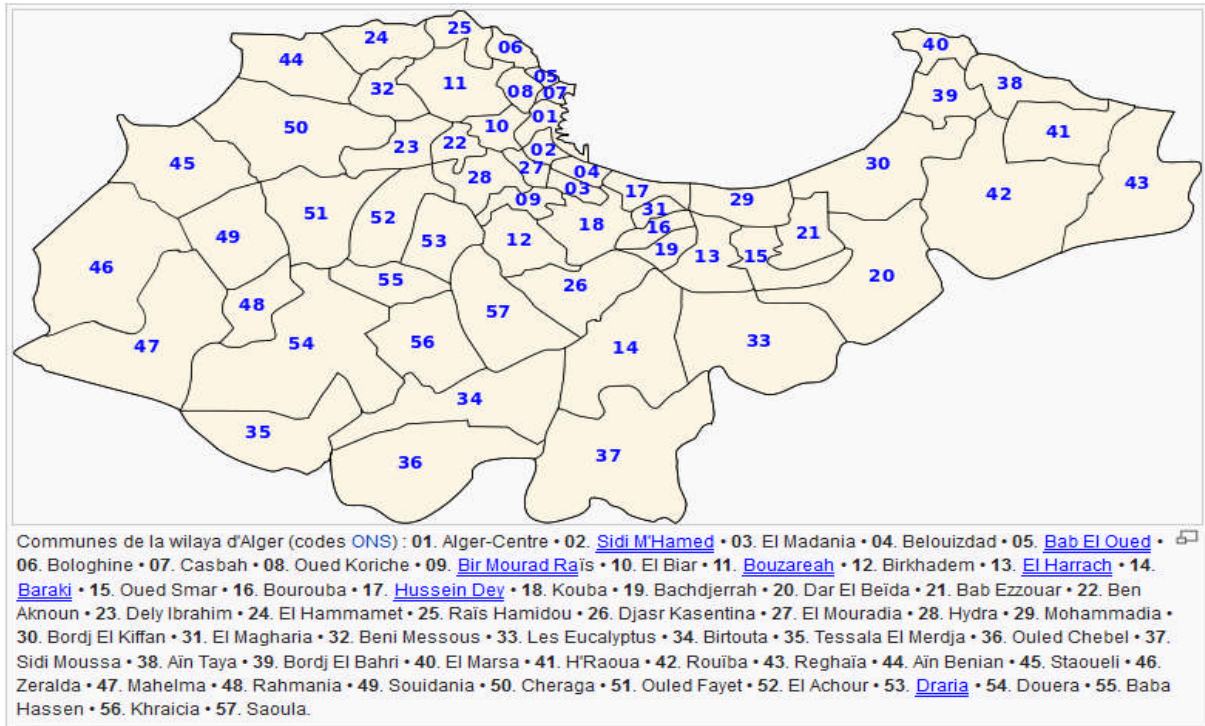


Fig. II. 11. Carte des communes de la wilaya d'Alger (51 Ouled Fayet).

Les coordonnées géographiques de la région sont :36° 44 ' 10" Nord et 2° 56' 58" Est.



Fig. II.12. : Situation géographique de la région d'Ouled Fayet (Source Google Earth).

I.4.2 Situation géographique du P.O.S sud de Ouled Fayet :

Le P.O.S Sud occupe la partie Sud de la commune de Ouled Fayet. Il est limité au Nord par des habitations, à l'Est par le chemin de wilaya 133 (CW133), au Sud par la deuxième rocade d'Alger et à l'Ouest par un oued (Fig.II. 13).

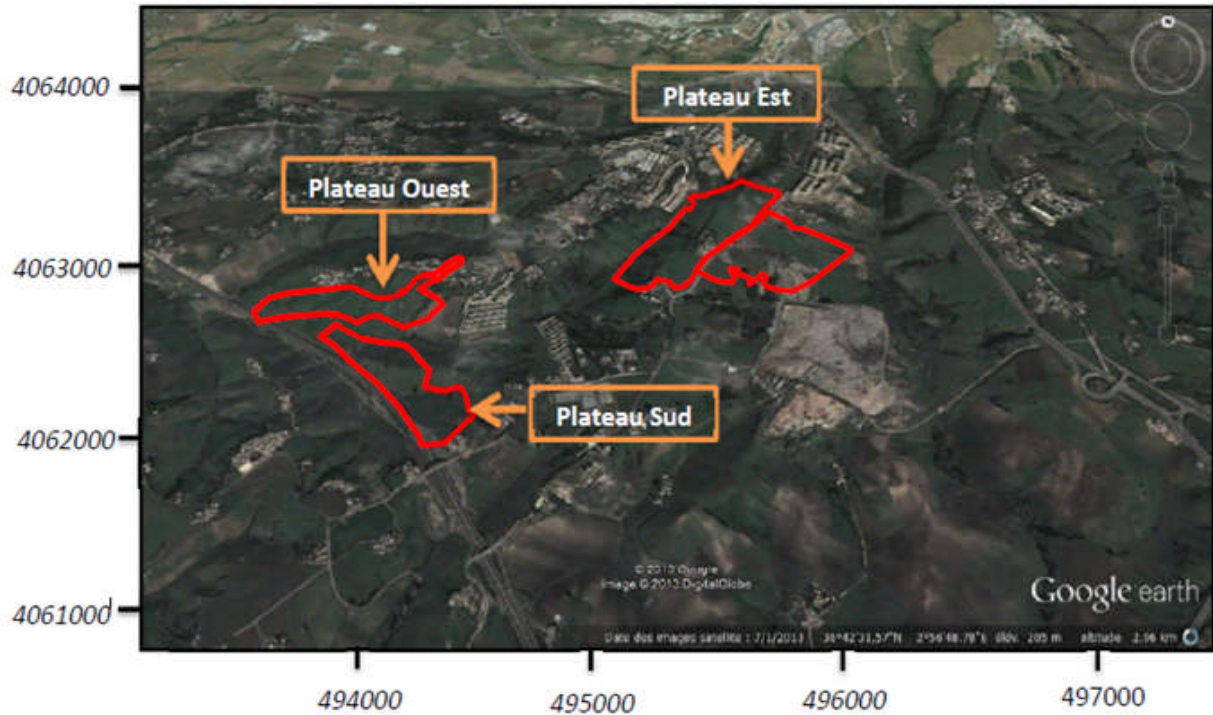


Fig. II.13. Situation géographique des sites Sud, Est et Ouest de Ouled Fayet (Source Google Earth).



Fig. II.14. plan de masse du plateau Sud de Ouled Fayet.

II.4.3. Géologie de la région de OuledFayet :

La géologie locale est caractéristique de l'ensemble du bourrelet du Sahel d'Alger. Du point de vue stratigraphique, on reconnaît dans la zone de Ouled Fayet la série du Plaisancien (Pliocène moyen). Cette série présente une forte épaisseur de marnes grises à bleuâtres, parfois sableuses. Ces marnes présentent une épaisseur que Glangeaud et al. (1952) l'estiment à 1000 m environ (Fig. II.15).

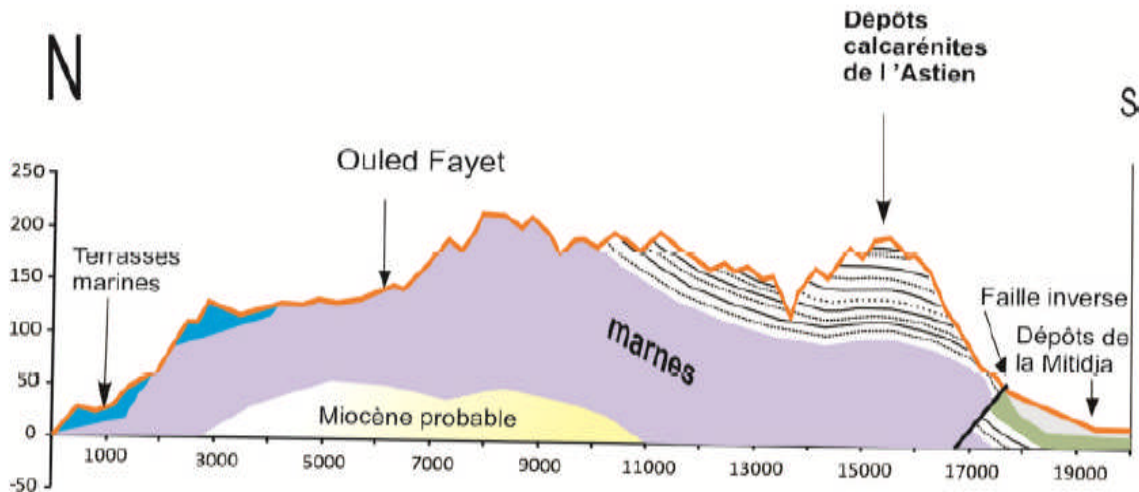


Fig.II.15. Coupe schématique montre le faciès marneux présent dans la région d'Ouled Fayet (MAOUCHE.S).

La géologie de la région de Ouled Fayet, extraite de la carte géologique de Koléa (feuille N°41 à l'échelle 1/50 000 données ci-contre), comprend une bonne partie des collines tertiaires, le Sahel et presque toute la région centrale de la plaine de la Mitidja.

Les principales formations géologiques du site de Ouled Fayet de plus anciennes au plus récentes sont les suivantes :

1-Les argiles grisâtres sahéniennes :

Cartographiées « m4 » (argiles et marnes sahéniennes) correspondant à "P1" (nouvelle nomenclature) : formations du Pliocène inférieur. Ce faciès géologique est généralement marno-argileux; de couleur bleuâtre ou verdâtre, ce dépôt marin riche en micro-, fossiles assez homogène, constitue le faciès le plus caractéristique de la couverture sédimentaire tertiaire qui se développe dans la région.

2-Les marnes jaunes de Maison Carrée :

C'est des marnes argileuses, jaunâtre dont la base, gris- bleuâtre dans la région de maison carré, elles sont d'âge Pléistocène.

3- Dépôt caillouteux de plateau de Ouled Fayet :

Proviennent d'une nappe étendue d'alluvions anciennes, formées de grès crétacé mélangés à une argile rougeâtre et constituant la couverture du plateau qui s'étend de Saint Amélie à Saint Ferdinand et Ouled Fayet de l'altitude 180 à 250 m.

4- Poudingues, grès et calcaires de Saint Ferdinand :

Ils sont représentés par des bancs horizontaux de grès grossiers et poudingues, accompagnés de calcaire grossier. Ces bancs se trouvent au-dessus des argiles sahéliennes.

5- Grès et sables du plateau de Fouka :

Des grès jaunes à grain fin, en bancs assez irréguliers des environs de Fouka et de Douaouda occupent les versants des ravins ; ces grès renferment en grande abondance des coquilles de bivalves.

6- Dépôts caillouteux du plateau de Saint Ferdinand :

Alluvions anciennes formées d'une accumulation de grès crétacés qui recouvre les argiles sahéliennes en s'étalant sur une largeur moyenne de 2km sur le plateau situé entre Zéralda et Mhelma et sur les terrasses de Saint Ferdinand.

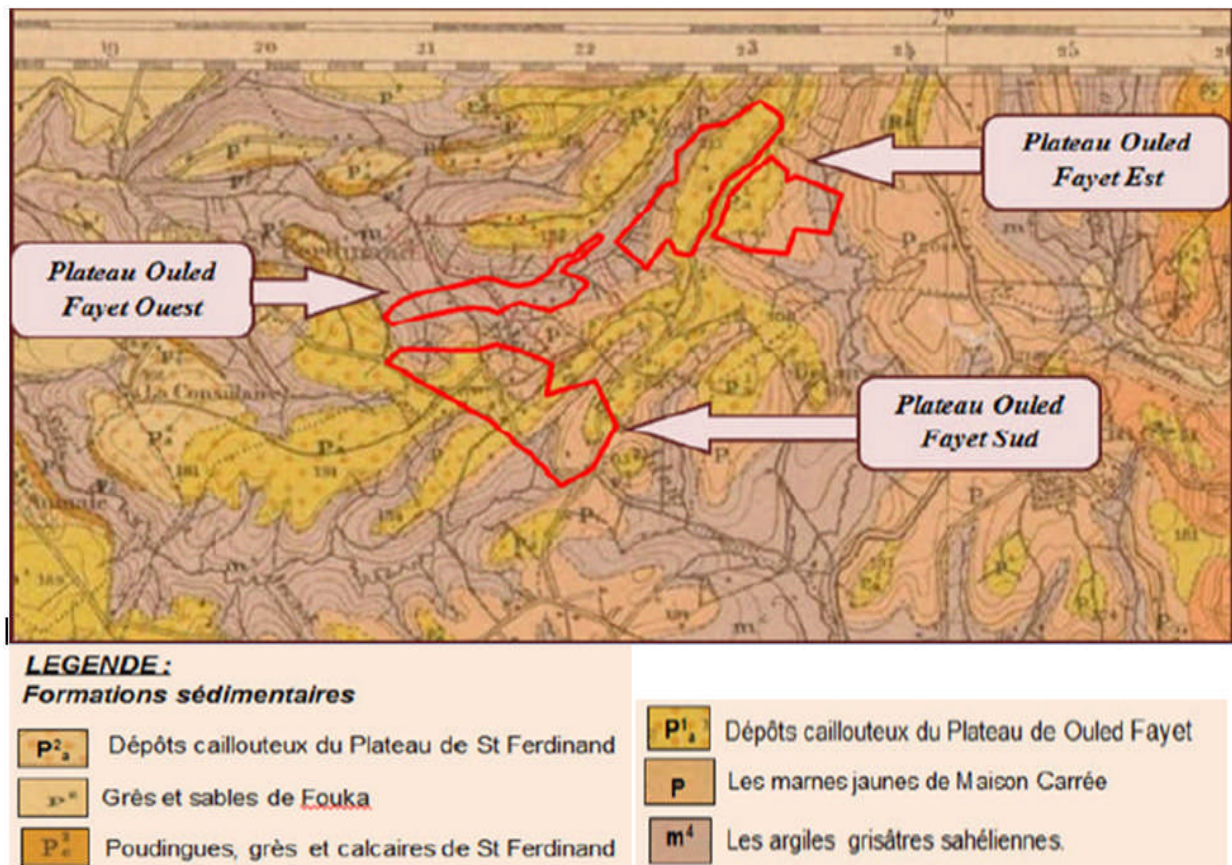


Fig.II.16- Carte géologique de plateau Ouled Fayet (Extrait de la carte géologique de Koléa, feuille 41- Echelle 1/50 000).1901.

II.4.4. Topographie et morphologie:

Le plateau sud d'Ouled Fayet présente un relief très faible, sa topographie mamelonnée est caractérisée par des pentes assez abruptes et des collines à pentes relativement douces, elle est parcourue par un réseau hydrographique chevelu, typique des terrains très peu perméables.

❖ Plateau Sud:

Le plateau Sud d'Ouled Fayet est caractérisé par des pentes assez abruptes dans la partie Sud-Est et des pentes relativement douces dans la partie Nord-Ouest, tandis que la partie centrale du site est traversée par un oued, qui se dirige du Nord Est vers le Sud-Ouest. les variation des pentes du Plateau sud de Ouled Fayet est décrit par la (Fig. II.18).

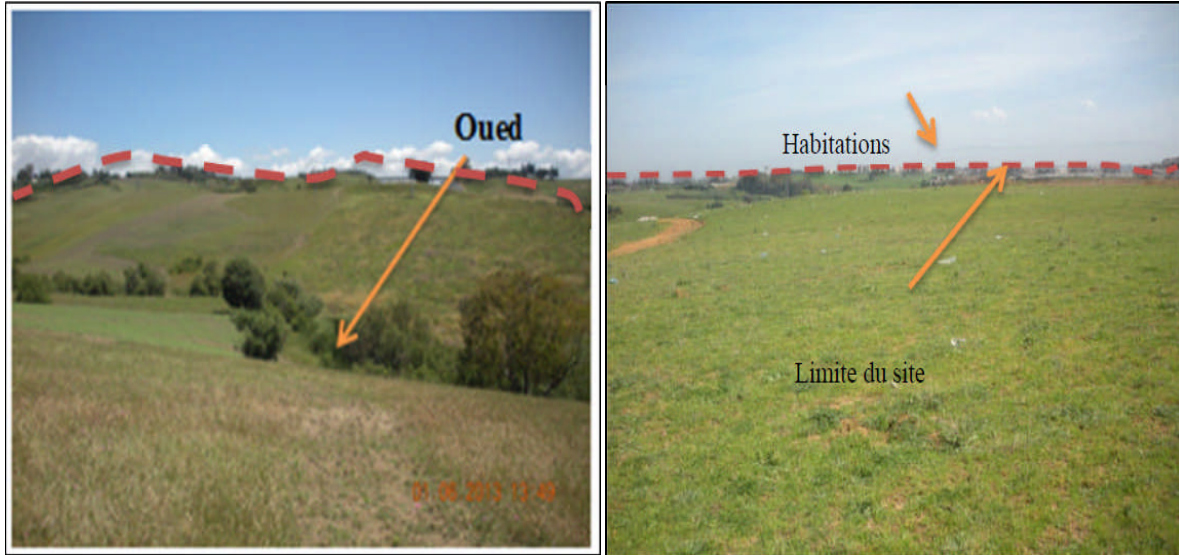


Fig.II.17 : Photos du plateau Ouled Fayet Sud.

Un cours d'eau coupe le site en deux zone : zone Est et zone Ouest (Fig. II. 17). son cheminement est représenté aussi sur la (Fig. II.18).



Fig. II.18. Carte des pentes du plateau sud Ouled Fayet.

Tableau. II.2 : Classification des pentes.

Pentes	Classe	L'influence de la pente
0 - 15%	Favorable à l'urbanisation	L'influence de la pente est mineur sur la conception de zone urbaine
15 - 20%	Moyennement favorable à l'urbanisation	L'influence de la pente devient sensible sur le cout et la conception
20 - 25%	Peu favorable à urbanisation	L'influence de la pente devient très importante sur le cout et la conception
> 25%	Très Peu favorable à urbaniser	Terrain à déconseiller pour l'urbanisation vue l'influence de la pente sur le cout et conception des zones.

II.4.5.Lithologie de la zone d'étude :

La géologie du site a été établie sur la base d'investigation sur le terrain et l'exploitation des données des sondages et des essais au pressiomètre réalisés par le laboratoire de l'habitat et de la construction du centre (LHCC) dans le cadre d'une étude du P.O.S du plateau Sud de Ouled Fayet.

L'analyse des coupes lithologiques des sondages carottés et pressiométrique (Fig. II.19) a base de quoi nous avons réalisé des coupes lithologiques, suivant la (Fig. II. 20), interprétatives qui permettent de distinguer les différentes formations lithologiques des profils tracés (Fig. II.21, Fig. II.22, et Fig. II.23, Fig. II.24).

Plateau Sud :

On distingue deux faciès dans le site Sud, qui se sont de haut en bas :

Faciès (A) :

Il est représenté par des argiles marneuses brunâtres à beige, peu graveleuses et caillouteuses parendroits (Sc05, Sp06, Sc02 et Sp06). Ce faciès est observé dans la partie NW (coupe (DD'),(BB') et (CC') ; Fig. II.20, Fig. II.21 et Fig. II.23) et dont l'épaisseur moyenne est de 6m.Ces argiles sont caractérisées par une résistance au pénétromètre dynamique de (Rd =40bars).

Faciès (B) :

Il est représenté par des marnes souvent bariolées et parfois fissurées de couleur beige à grise par endroits, se développant sur tout le site (coupe (AA'), (BB') et (CC') (DD') (Fig. II.21, Fig. II.22, Fig. II.23 et Fig. II.24). L'épaisseur de ces marnes dépasse 10 m.Ce faciès présente une bonne avec (Rd = 70 bars). Ces deux faciès sont recouverts par une couche de terre végétale, remplacée par un remblai de 0,4 m d'épaisseur (Sc08).

On peut distinguer en générale les formations lithologiques les plus dominantes de tous les sondages avec des épaisseurs variables ;

Tableau. II.3. Principales formations lithologiques du P.O.S sud.

Formation lithologique
Terre végétale
Argile limoneuse ou marneuse peu graveleuse
Marne peu limoneuse bariolée
Marne grise fissurée

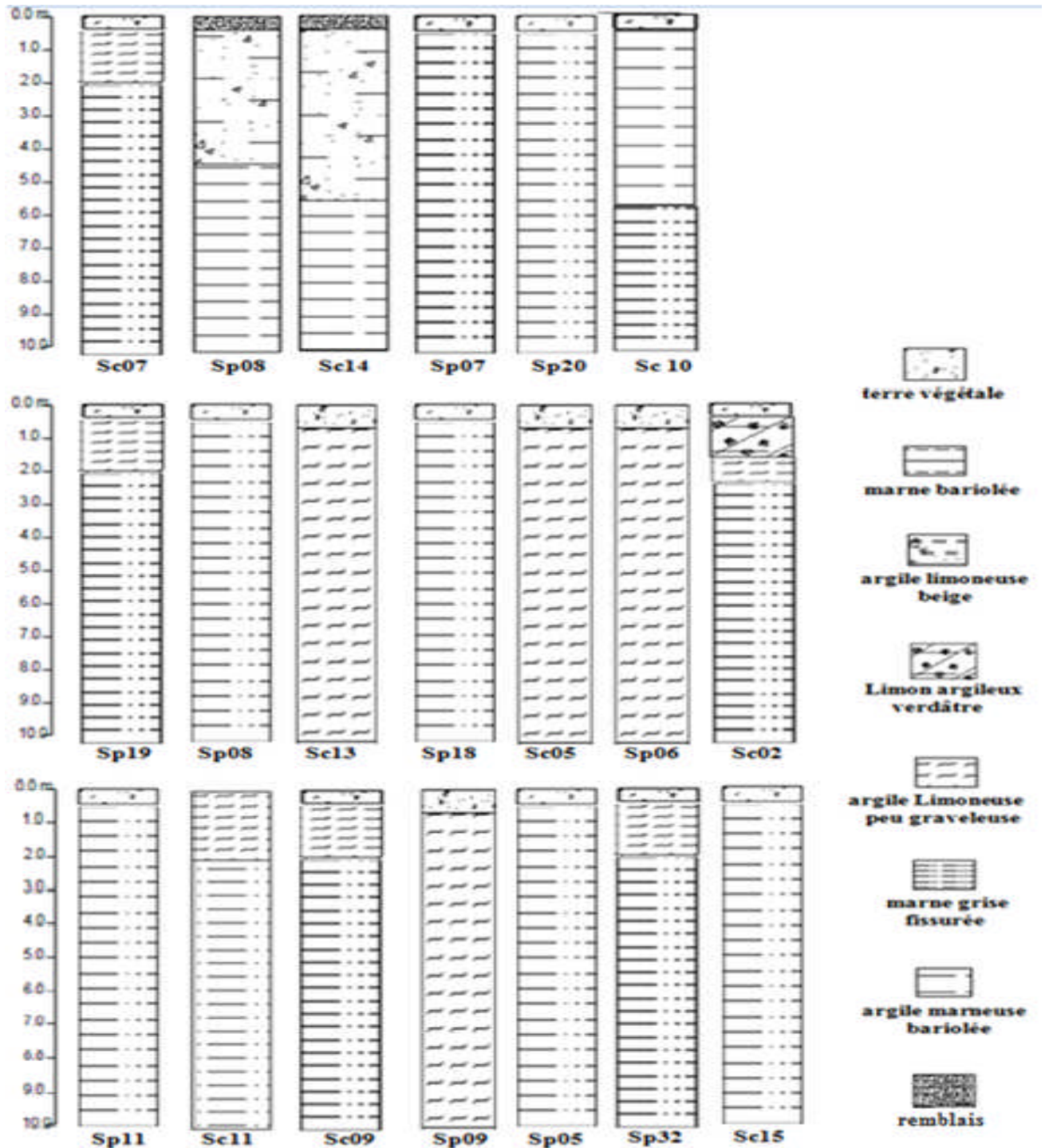


Fig. II.19. Coupes de sondages du plateau Ouled Fayet sud.

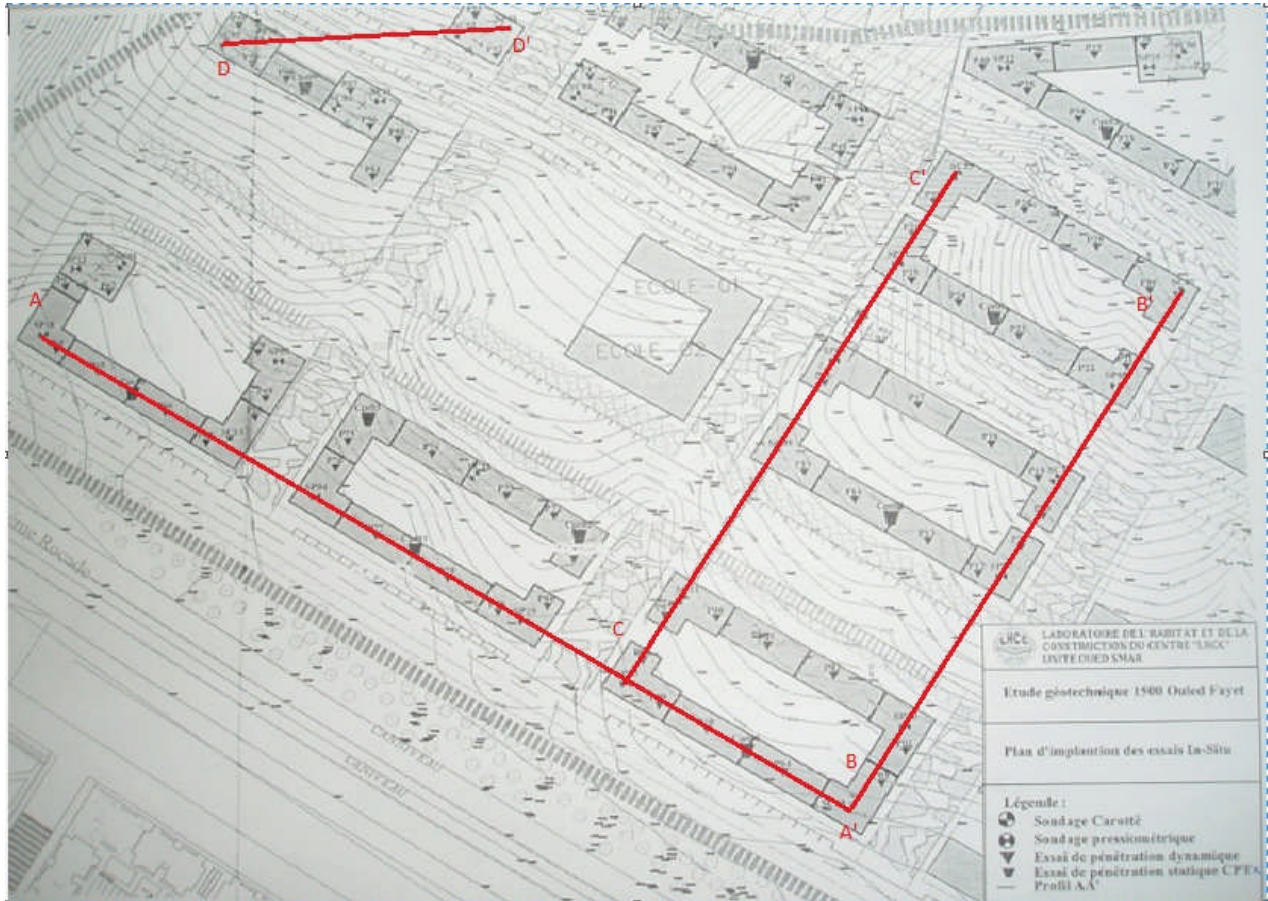


Fig. II.20. Plan De Coupes Des Profils Lithologiques.

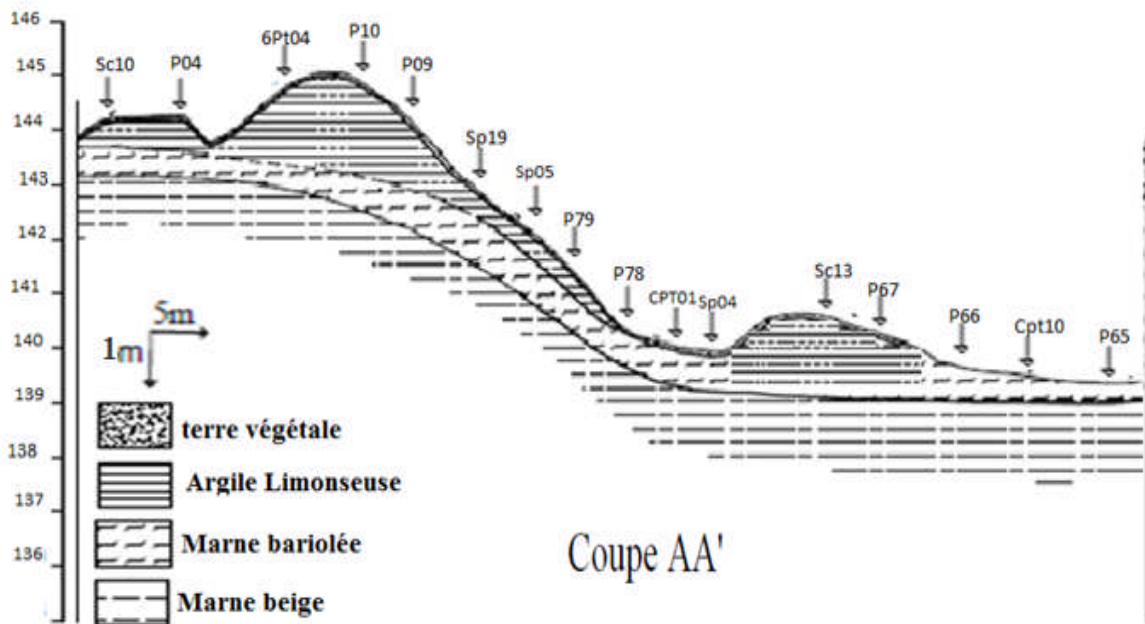


FIG II.21. Profil Lithologique AA'

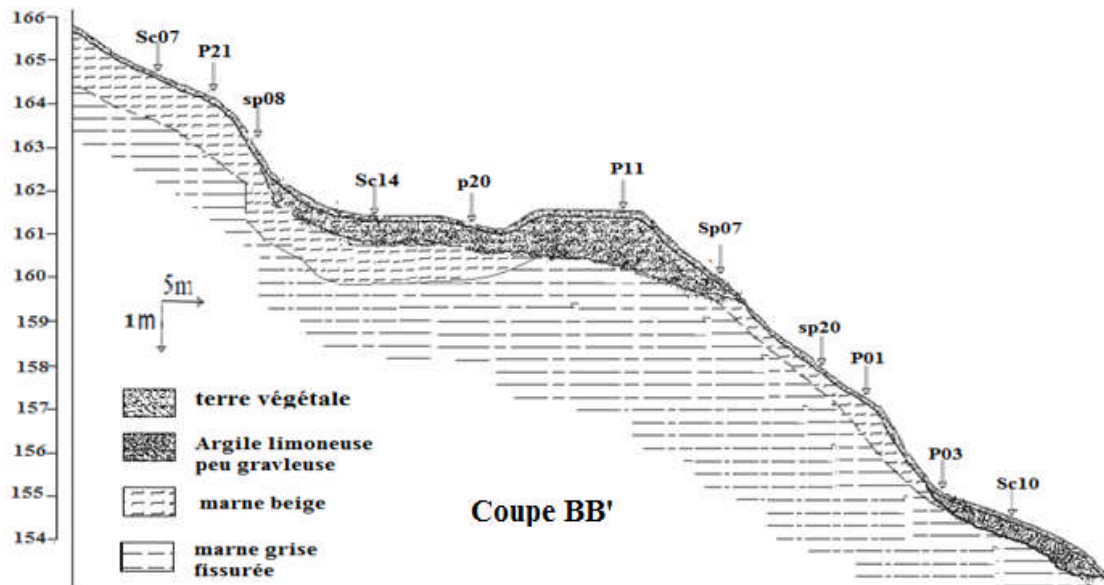


FIG II.22. Profil Lithologique BB'

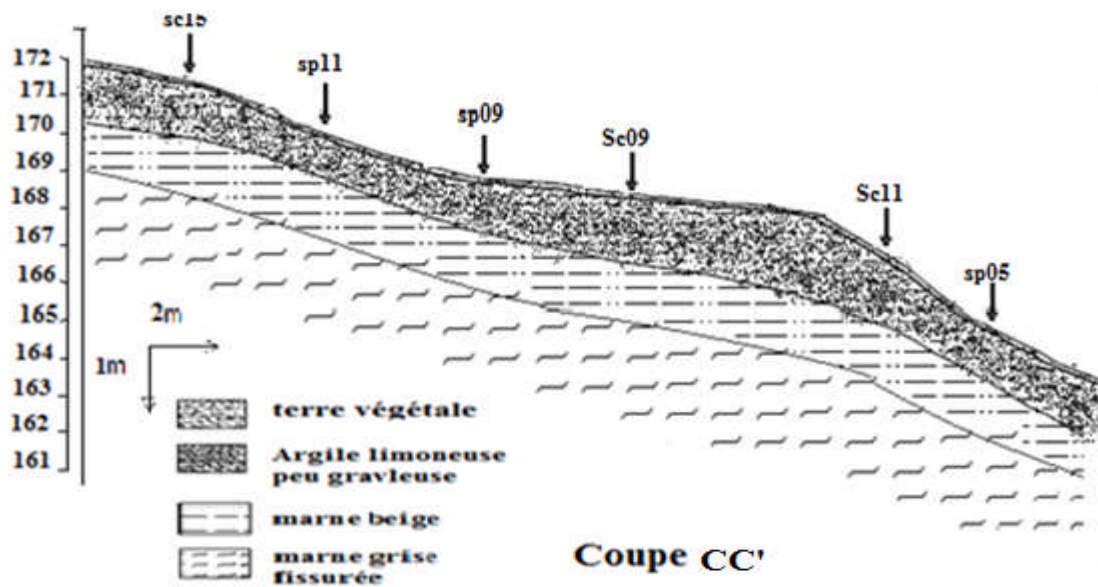


FIG II.23. Profil Lithologique CC'.

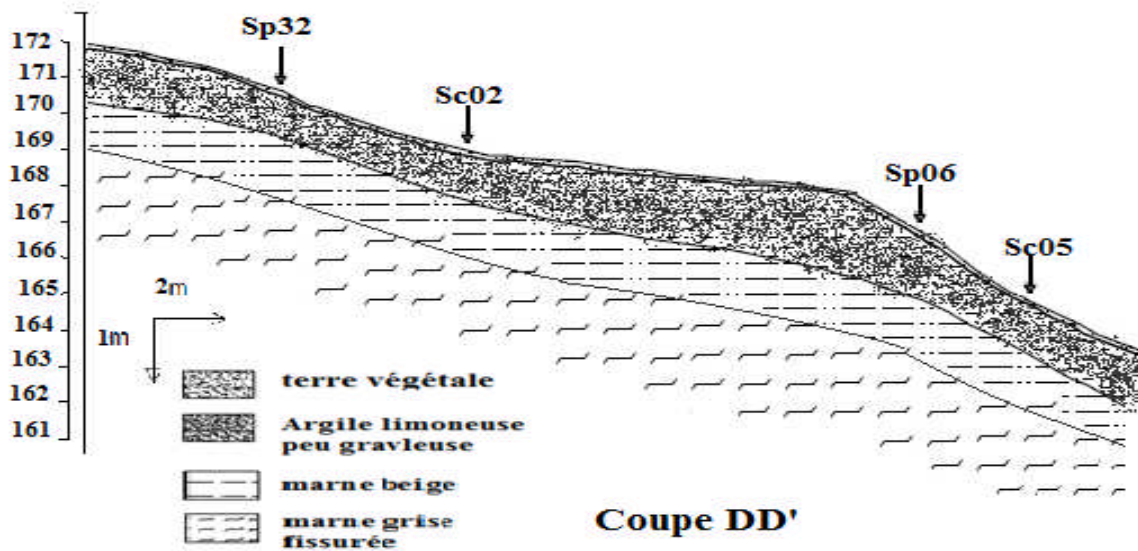


FIG II.24. Profil Lithologique DD'.

Conclusion :

L'objectif de ce chapitre été de présenter la région d'étude (P.O.S sud de Ouled Fayet), de déterminer les différentes couches constituant son sol, leurs transformation dans le temps ainsi les conditions hydrogéologiques et hydrologiques qui y régissent en ce même sol.

La région d'étude est classée comme une zone de forte sismicité par rapport à la réponse dynamique de ce sol et l'historique sismologique de la région.

Au niveau du site d'étude P.O.S sud de Ouled Fayet, l'étude géologique a révélé l'existence de trois formations essentielles, à savoir :

- Une formation récente correspond aux argiles marneuses parfois limoneuses.
- Une formation Astienne présentée par des marnes bariolée.
- Une formation Plaisancienne présentée par des marnes grise fissurée.

Introduction :

Pendant des millénaires, les règles de construction furent essentiellement empiriques et basées sur l'expérience des constructeurs, transmises de générations en générations. Il a fallu attendre le XVIII^e siècle, mais surtout le XIX^e siècle avec la naissance de la résistance des matériaux et de l'élasticité, issues elles-mêmes d'un ensemble d'observations et d'expérimentations séculaires, pour que des théories logiques permettent d'aborder, sur des bases rationnelles, les différents problèmes posés sur la stabilité des constructions.

Mais si l'Homme demeure maître des matériaux qu'il utilise pour l'édification de superstructures, il doit, par contre, appuyer sa construction sur un élément naturel, auquel il ne pouvait rien, le sol, et s'accommoder de ce qu'il lui offre une nature souvent agressive et trompeuse. Les problèmes causés par le comportement du sol sous les constructions étaient traités de façon purement pragmatique. En réalité, on s'arrangeait surtout pour choisir des emplacements qui de toute évidence ne devaient poser aucun problème. Si le hasard voulait que le choix fût mauvais, il en résultait des ennuis, dans l'exemple le plus fameux est la tour de Pise, ou des catastrophes dont on se garde bien de parler.

Or de nos jours, il n'est plus possible de procéder ainsi et dans nos sociétés modernes, il importe d'édifier très vite, avec une haute productivité, des constructions de plus en plus hardies sur des sites très divers dont certains, fort inhospitaliers, avaient été prudemment évités au cours des âges. Il en résulte donc que des problèmes d'exécutions très délicats se posent de plus en plus fréquemment et que ces problèmes ne peuvent plus être résolus à partir de simples considérations qualitatives et empiriques.

C'est ainsi qu'à pris naissance et que s'est développée une nouvelle science "la **mécanique des sols**" dont le but est d'essayer de prévoir de façon rationnelle le comportement du sol sous ce que l'on pourrait appeler "les agressions" de l'Homme: application de charges importantes, ouverture de fouilles, percement de grands tranchées ou de tunnels, etc.

La mécanique des sols, que l'on appelle souvent " la géotechnique " peuvent apparaître, pour certains comme une branche de la géologie appliquée, alors qu'en réalité, elle est une adaptation d'un ensemble de théories de la mécanique rationnelle ; élasticité, plasticité, rhéologie, hydraulique, pour ne citer que les principales.

Pour appliquer les méthodes de la mécanique des sols, l'ingénieur a besoin de connaître de la façon la plus complète possible, et dont les moindres détails, le milieu sur lequel il travaille et de se livrer pour cela à toute une série d'opérations qui constitue ce qu'on appelle "**la reconnaissance des sols**".

Cette notion de reconnaissance du sol, implique tout d'abord une idée de description physique de la matière proprement dite, avec toutes les subtilités que cela comporte : aspect visuel, couleur, consistance, structure.

Cette description purement physique doit être complétée par la détermination, de la répartition spatiale des différentes catégories de terrains : épaisseurs des couches, inclinaison, stratifications, etc. sans oublier la présence éventuelle d'eau. De plus, ces opérations doivent obligatoirement être complétées par des informations quantitatives qui permettront l'utilisation des théories que nous avons déjà évoquées.

III.1. La reconnaissance géotechnique :

Dans le cadre de l'étude géotechnique du projet 1500 Logements du P.O.S sidd'Ouled Fayet sis à Eucalyptus, une campagne de reconnaissance géotechnique et géophysique a été établie par le LNHC. Pour cela deux techniques ont été utilisées :

- Les essais **in situ** proprement dits.
- Le prélèvement d'échantillons en vue de leurs analyses au **laboratoire**.

La reconnaissance géotechnique in situ est basée sur des sondages carottés et des essais au pénétromètre statiques CPT et dynamiques SPT et aussi des essais préssiométriques, la campagne de reconnaissance géophysique est basée à son tour sur des essais Downhole ; les sondages carottés ont permis de connaître la nature des formations géologiques en place en fonction de la profondeur et de réaliser des essais SPT et des essais Downhole.

III.2. Choix de la méthode et de l'appareillage:

Comme nous venons de le voir, les méthodes de reconnaissance du sol sont très nombreuses et il est rare qu'on les utilise toutes sur un même chantier.

Devant un problème donné, il s'agit donc de faire le choix d'une méthode d'étude et d'établir un programme de reconnaissance. Ce sont évidemment des options très délicates à prendre, car d'une part elles dépendent d'un grand nombre de facteurs connus ou parfois hypothétiques, et d'autre part toute erreur ou toute insuffisance peut avoir des conséquences très graves.

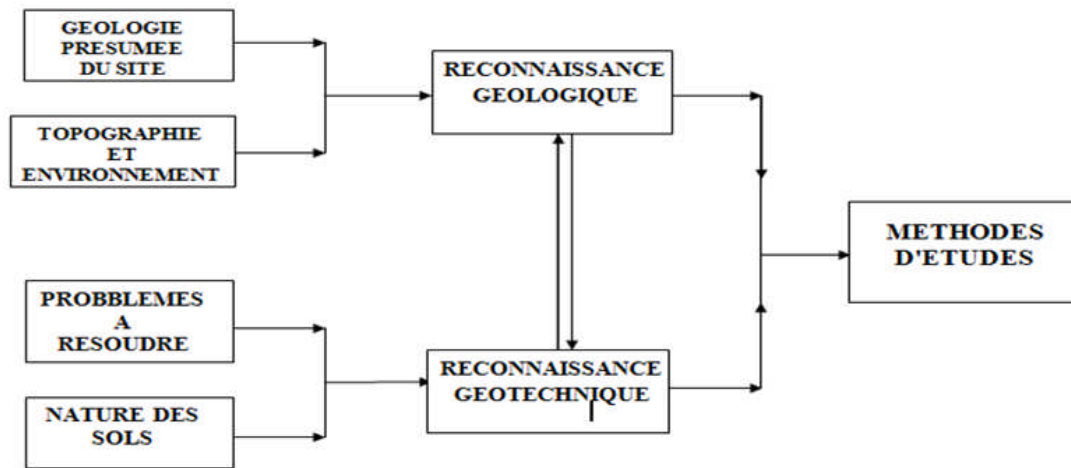


Fig.III.1. Méthodologie générale d'une étude.

Le choix de la méthode dépendra donc, dans une large mesure de la nature du problème à résoudre, mais également de la structure géologique du site à étudier et aussi de la nature du sol et de sa topographie, ces éléments conditionnant à eux seuls, le type d'essais géotechnique et la nature des forages.

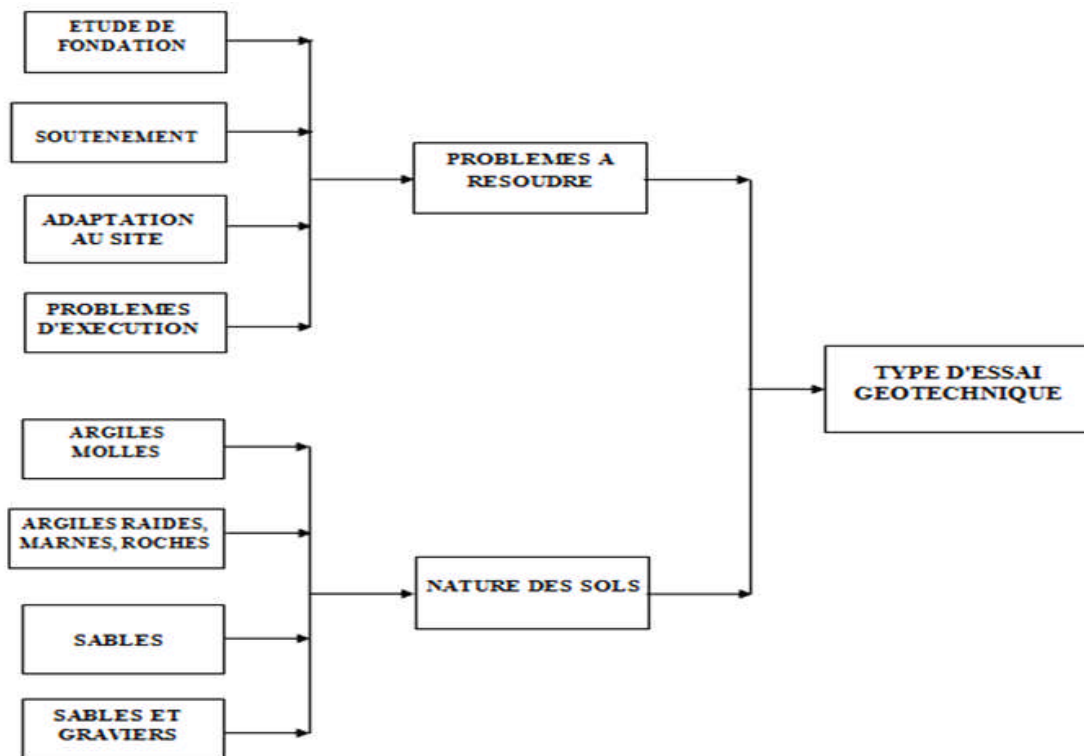


Fig.III.2. Méthodologie pour le choix des essais géotechniques.

III.3. Campagne de reconnaissance géotechnique :

Les travaux de reconnaissance du site P.O.S sud de Ouled Fayet ont été effectués par le LNHC oued Smar, répartis de manière à couvrir toutes la superficie du site en vue de mettre en évidence la nature géologique et les caractéristiques géotechniques du sous-sol tant en plan qu'en profondeur, selon le programme exposé dans le tableau (Tableau III.1).

Tableau III.1 -Récapitulatif de la campagne de reconnaissance.

Site	Superficie (hectare)	Campagne de reconnaissances
Plateau Sud	57	Vingt-trois (23) sondages carottés Sc; Quatre-vingt (80) essais de pénétration dynamique SPT Dix (10) essais de pénétration statique CPT Huit (8) fouilles de reconnaissance ; Trois (06) essais Downhole ; Essais physique, mécaniques, chimiques en laboratoire.

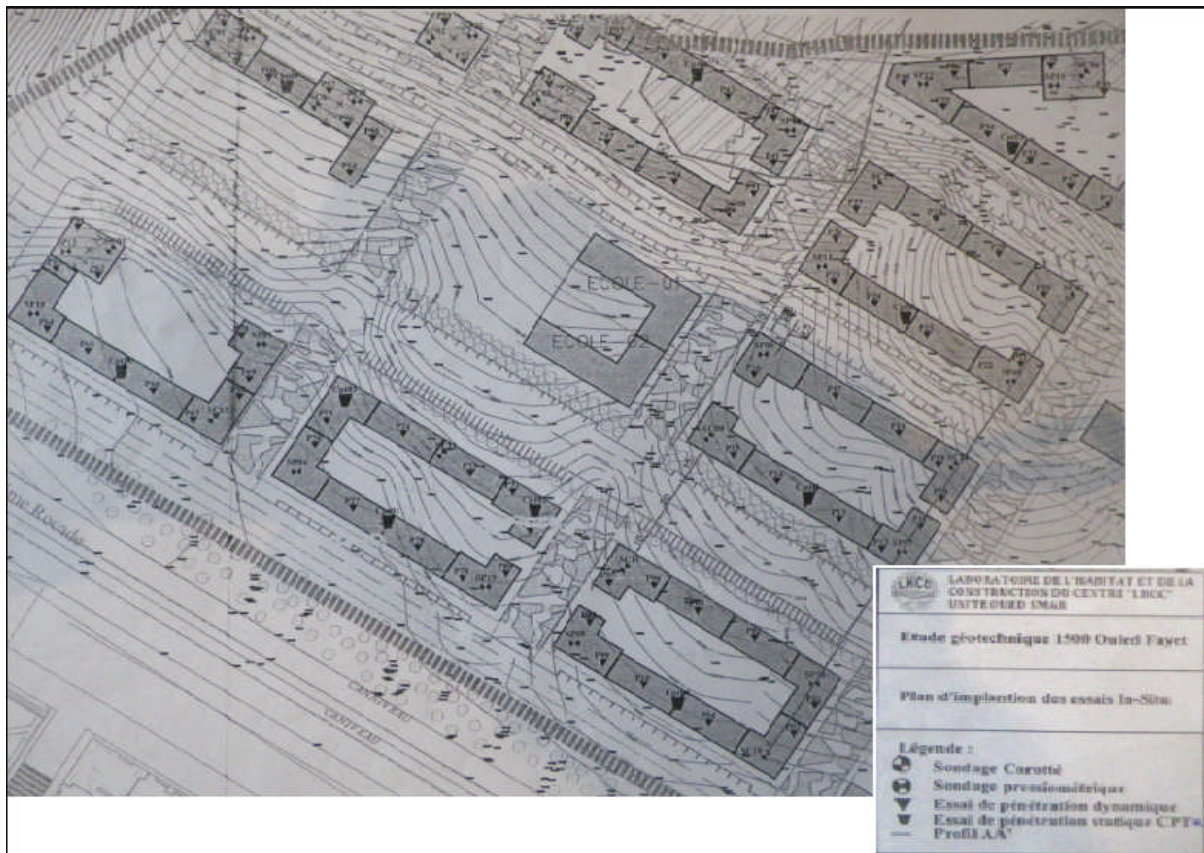


Fig III.3 -Plan d'implantation des essais géotechnique.

III.4. ESSAIS IN SITU:

Les essais " in situ" sont de plus en plus utilisés puisque ils testent directement le sol, ne nécessitent pas de prise d'échantillons et fournissent un sondage presque continu, donne les caractéristiques réelle du terrain étudié; de plus, ils sont moins chers que les essais de laboratoire. Les essais sur site sont à court terme.

Les essais géotechniques in situ peuvent être classés en fonction des types de résultats qu'ils permettent d'obtenir :

- **caractérisation des sols à la limite de la rupture mécanique.**
- **caractérisation des sols entre le comportement au repos et la rupture mécanique(relation contrainte-déformation).**

Les pénétromètres statiques et dynamiques permettent d'obtenir le premier type de résultat. Le sol sous la pointe de mesure est constamment en état limite puisqu'il est perforé par cette dernière. De ce fait, il n'est pas possible de déterminer les caractéristiques de déformation des sols (sauf par corrélation empirique).

Le deuxième type de résultat peut être obtenu avec le pressiomètre qui sollicite le sol des petites aux grandes déformations sans atteindre la rupture.

III.4.1. Essai pressiométrique Menard:

Introduction

L'idée de profiter d'un forage pour étudier sur place le comportement mécanique du sol est déjà relativement ancienne puisque ce n'est que vers les années 1930 que les premiers essais connus de mesure de la déformation du sol sur les parois d'un forage sollicité en pression eurent lieu par l'ingénieur allemand Kogler [KOG33] avec des sondes cylindriques, soit munies de deux demi-coquilles métalliques galbées rigides soit, soit constituées d'une enveloppe en caoutchouc.

Mais c'est Louis Menard [MEN55] qui fut le véritable pionnier de cette technique, ayant déposé un brevet en 1957, tant dis qu'il était encore élève ingénieur à l'Ecole National des ponts et chaussées. L'historique de la mise au point du pressiomètre Menard et de son développement a déjà été donné ailleurs [GAM90].

Ayant vite observé que l'obtention de ce qu'on appelle les paramètres intrinsèques du sol était possible avec les outils de calcul de l'époque, Louis Menard s'orienta vers l'utilisation des résultats primaires (module Pressiométrique, pression limite Pressiométrique) dans les schémas de modélisation du comportement du sol visà vis fondations comparé de l'expansion de la sonde Pressiométrique [MEN62b, MEN63].

Depuis, différents types de pressiomètre utilisés dans les sols et leurs usages ont connu un développement; au Japon depuis les années 1950 décrit [MOR 95] et en Europe en 1990 par la commission technique régionale Européenne n°4 de la société internationale de la mécanique des sols et travaux de fondations [AMA 91].



Fig.III.4. Photo réelle du pressiomètre Menard.

III.4.1.1. Domaine d'utilisation du pressiomètre Menard :

Le pressiomètre Ménard peut être utilisé pour caractériser la plus part des sols (de l'argile molle à la marne raide) et les roches tendres. Des essais à plus de cent mètres de profondeur sont couramment exécutés puisqu'il n'ya pas risque de refus. Les essais peuvent être exécutés à terre ou en site marin ou aquatique, à partir d'une plateforme flottante. La conception du pressiomètre Ménard permet de mesurer des modules de déformation compris entre 2 et 500Mpa (pour des déformations relatives comprises entre 10^{-3} et 10^{-2}) et des pressions limites entre 300Kpa et 100Mpa.

III.4.1.2. Description de l'appareillage :

Depuis la mise en service des premiers pressiomètre, plusieurs générations d'appareils ont vu le jour. Les principes en sont restés immuables, mais de nombreuses perfectionnements et améliorations ont été portés dans l'objectif de facilité d'avantage sa mise en œuvre et la précision de ses mesures. Le pressiomètre Ménard [NF P95] comprend essentiellement (voir la **Fig III.5**);

- **La sonde cylindrique**
- **Le contrôleur de pression volume(CVP)**
- **La tubulure de liaison.**

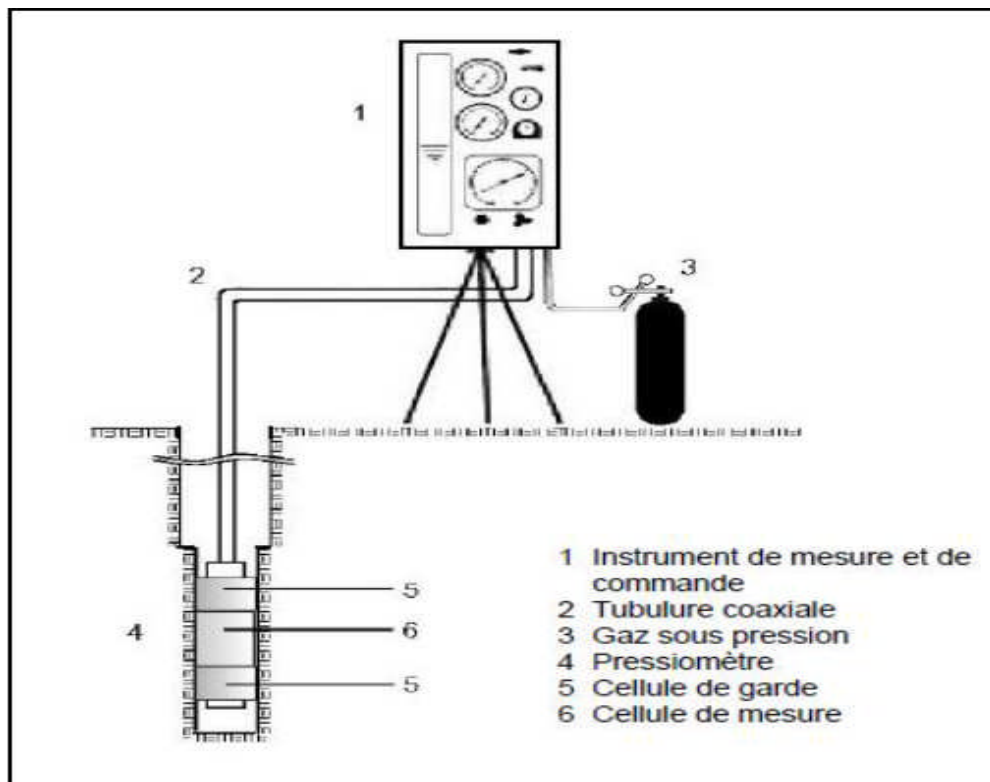


Fig. III.5. Schéma de principe du pressiomètre Menard.

-La sonde cylindrique:

De trois diamètres différents, elle est conçue pour être descendue dans des forages de diamètre 44,60 et 76mm. Le rapport de la longueur de la portion déformable de la sonde à son diamètre est de l'ordre de 7 à 10 pour les sondes du pressiomètre Menard. la sonde est constituée de trois cellules : une cellule centrale remplie d'eau et deux cellules de garde gonflées au gaz. Cette disposition permet de faire les mesures d'expansion dans un champ de contraintes strictement radial, d'éliminer les effets de bords et d'éviter aussi de trop grandes variations de volume à mesurer.

Selon le type de la sonde les enveloppes de chaque cellule sous le nom de membrane et enveloppe de la sonde sous le nom de la gaine. Membranes et gaines sont en caoutchouc synthétique ; les gaines de sondages **G** peuvent recevoir un renforcement en fibres textiles ou métalliques, ou bien encore une protection complémentaire en bandes métalliques en souples qui se superposent partiellement. si nécessaire, la sonde est protégée par un tube lanterné en métal épais fondu selon au moins six génératrices ou quatre hélices. Les sondes **E** permettent à l'essai que jusqu'à 2.5Mpa [MEL 71] par contre les sondes **G** permettent d'atteindre 10Mpa.

-Le contrôleur pression volume (CPV):

Cet appareil permet de réguler la pression dans les trois cellules et de mesurer les variations de volume de liquide dans la cellule centrale au niveau de la tête de forrage grâce à un cylindre métallique servant de capacité graduées. Le CPV est relié à l'amont à une source de gaz comprimé (Azote généralement, Oxygène étant à proscrire) et à l'aval à la tubulure de liaison avec la sonde.

Les mesures de pressions dans la cellule centrale et dans les cellules de garde se font à l'aide du manomètre traditionnel ou de capteurs de pressions électronique plus précis qui peuvent couvrir toute la gamme des pressions utilisées (10Kpa à 10Mpa) des manomètres supplémentaires peuvent être installés pour assurer une précision suffisante des résultats.

Les variations de pression sont réglées par un détendeur principale (éventuellement << à fuite >> pour assurer une meilleure stabilité de la pression pendant chaque palier) et un clapet de régulation destiné à assurer la différence de pression indispensable entre la cellule centrale et les cellules de garde pour tenir compte entre autres, de l'existence d'une pression hydrostatique complémentaire dans la cellule centrale. Cette disposition peut être remplacée par un jeu d'électrovannes pilotées automatiquement.

Les mesures de volume se font soit à l'aide d'un voyant le long du volumètre soit, dans le cas de saisie numérique, à l'aide d'un système physique dans le volumètre.

-La tubulure de liaison:

Celle-ci comprend soit trois tubes plastiques (sondes E) soit deux tubes plastiques plus rigides, éventuellement coaxiaux (sondes G). Ces tubes doivent avoir un coefficient d'expansion faible qui permettent d'obtenir une bonne précision sur les résultats.

Sur la (figure III.6) on a représenté un CPV avec manomètre traditionnel et voyant de lectures. Cet appareil est souvent accompagné d'un enregistreur automatique des lectures obtenues à l'aide d'un capteur de pressions et de volume.



Fig. III.6. Photo des principaux composants du pressiomètre Menard.

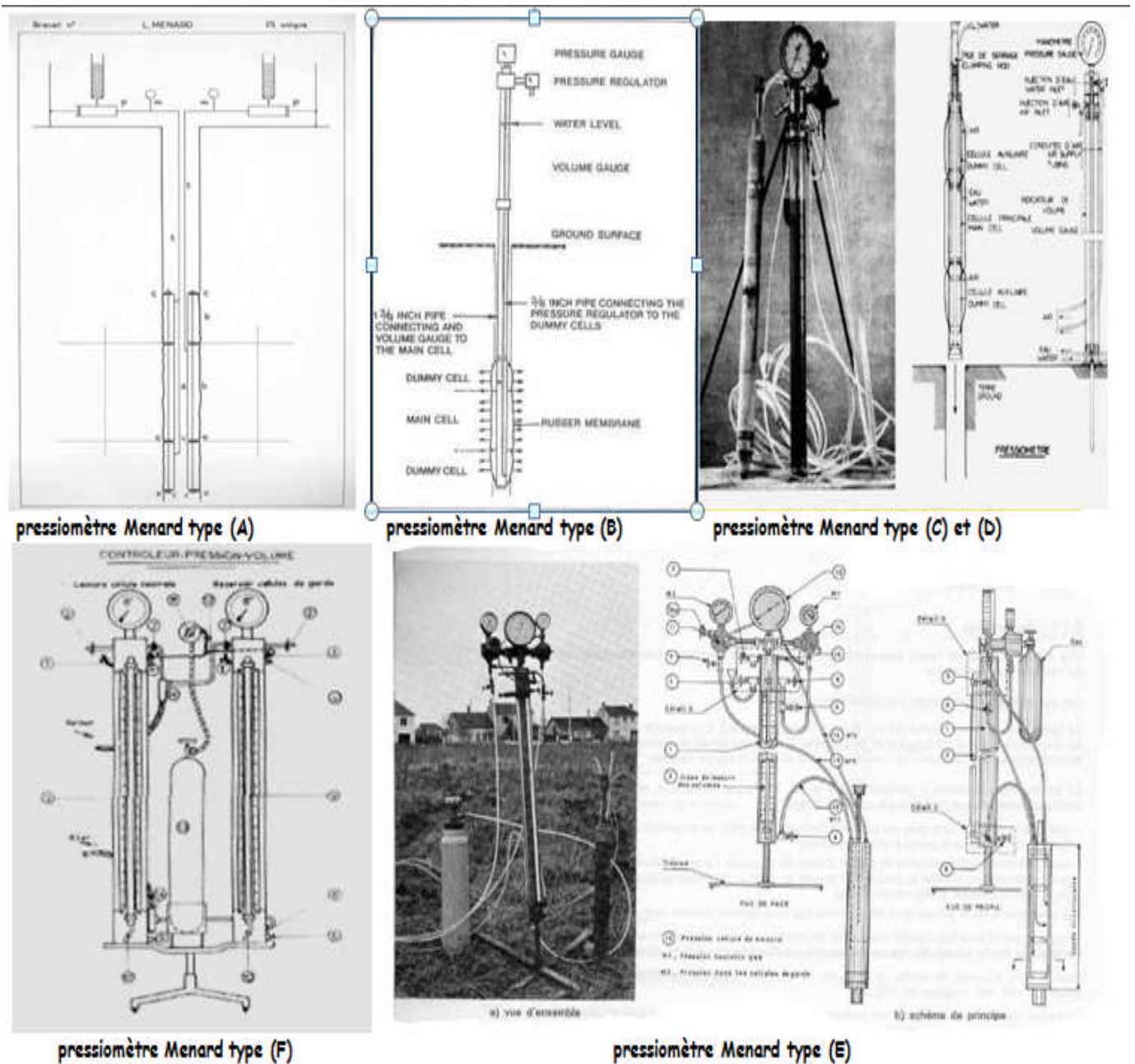


FIG III.7. Différent type de pressiomètre Menard.

III.4.1.3. Les autres conceptions :

Le Pressiomètre Autoforeur PAF du LCPC procède une sonde à une seule cellule précédée d'un module de forrage. Le boîtier de régulations et de mesures est activé par le déplacement d'un piston dans le volumètre rempli d'eau [BAG 78].

Le pressiomètre de Gombridge (SBP) est constitué lui aussi d'une sonde à une seule cellule doté d'un système de préforage. Les déformations radiales de la membrane sont mesurées à l'aide de palpeurs métalliques. Le programme de mise en pression est asservi sur l'expansion de la sonde mesurée radialement [BEN 86].

Les dilatomètres en forage ont une sonde à manchette dilatante par un gaz ou un liquide. Les déformations radiales de la manchette sont mesurées à l'aide de trois capteurs en partie centrale [AFN 02].

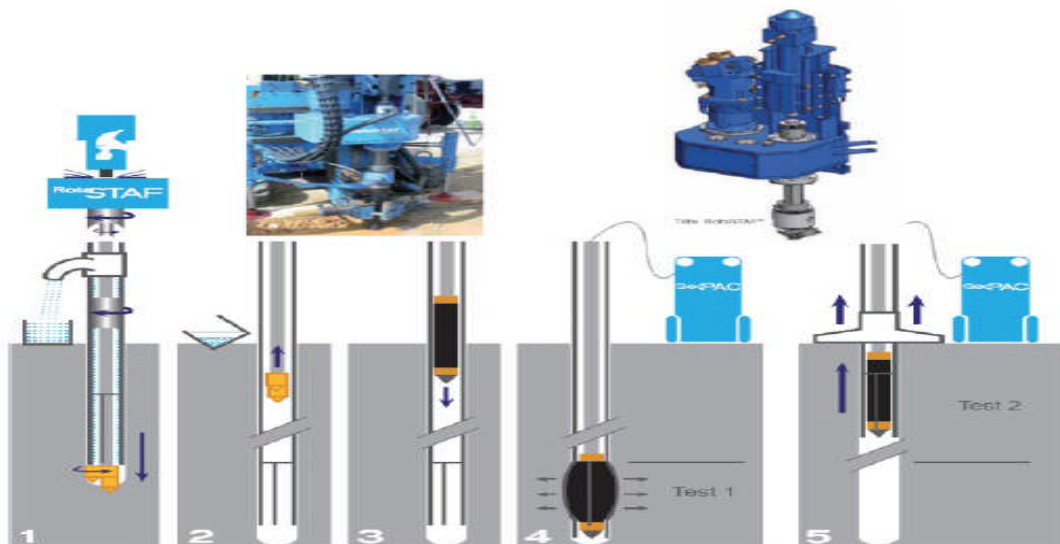


FIG.III.8. Essais pressiométrique avec le système rotostaf.

III.4.1.4. Mode opératoire :

Les essais à l'aide d'un pressiomètre Menard sont du type statique à contraintes imposées, tandis que les essais au pressiomètre auto-foreur étaient, initialement à déformation imposée ; ils sont actuellement exécutés de manière mixte.

Avant toute nouvelle série d'essais, il est nécessaire de procéder à un double étalonnage relativement à la résistance propre des enveloppes (membrane + gaine) de la sonde et à l'expansion propre de l'ensemble de l'appareillage (contrôleur + tubulure + sonde). Dans le cas où les palpeurs sont utilisés, une mesure de l'amincissement de l'enveloppe de la sonde en fonction de l'expansion peut être nécessaire. La courbe de repense brute du sol devra être corrigée des valeurs parasite ci-dessus comme indiqué [AFN 00].

III.4.1.5. Résistance propre de la sonde de Menard :

La détermination de la résistance propre de la sonde Menard s'effectue avec la sonde placée au niveau du CPV et consiste à effectuer une expansion à l'air libre. Pour chaque pression P appliquée par paliers jusqu'à la résistance limite propre de la sonde (voir Fig. IV.9) on mesure le volume V que prend la cellule centrale à stabilisation. On peut ainsi tracer la courbe de la résistance propre de la sonde en fonction du volume introduit $P = P_e(V)$.

III.4.1.6. Expansion propre du pressiomètre Menard :

L'expansion propre de l'appareillage se mesure sur la sonde montée avec la tubulure et le CPV qui doivent être utilisés lors des essais envisagés. La sonde est placée dans un tube métallique épais d'un diamètre légèrement plus grand que cette sonde et qui réputé de délitation négligeables jusqu'à 10Mpa. Pour chaque pression P appliquée, on mesure le volume V de la sonde (voir Fig. III.10). On peut ainsi déterminer le volume à vide conventionnel V_s de la sonde qui intervient dans le calcul des paramètres pressiométriques et le coefficient d'expansion volumétrique $\ll a \gg$ de tout l'appareillage en cm^3/MPa .

III.4.1.7. Mise en place de la sonde du pressiomètre Menard :

La sonde du pressiomètre Menard est généralement mise en place dans un forage d'un diamètre légèrement plus grand que celui de la sonde au repos. Dans le but de réduire au minimum le remaniement des parois du forage, et ainsi de réaliser l'essai sur un terrain aussi proche que possible de son état initial, des techniques de forage sont recommandées en fonction du type de sol étudié [AFN 00].

Tableau.III.2. Diamètres des forages pour le pressiomètre.

Code	Diamètre de la sonde (mm)	Diamètre du forage (mm)	
		min.	max.
EX	32	34	38
AX	44	46	52
BX	58	60	66
NX	70	74	80
	95	100	110
	115	125	140

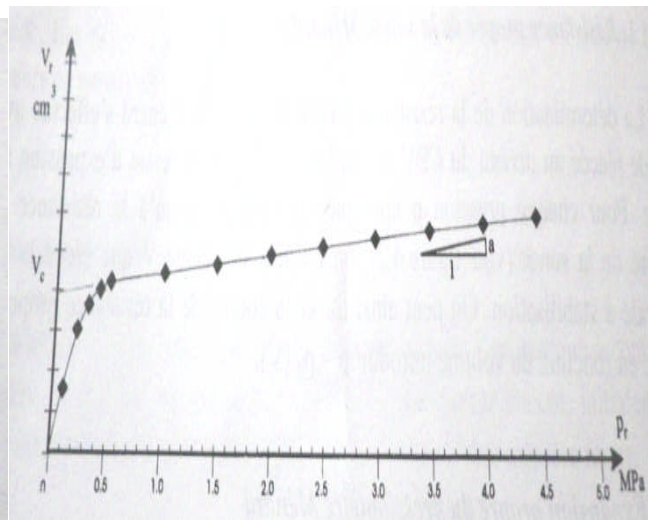
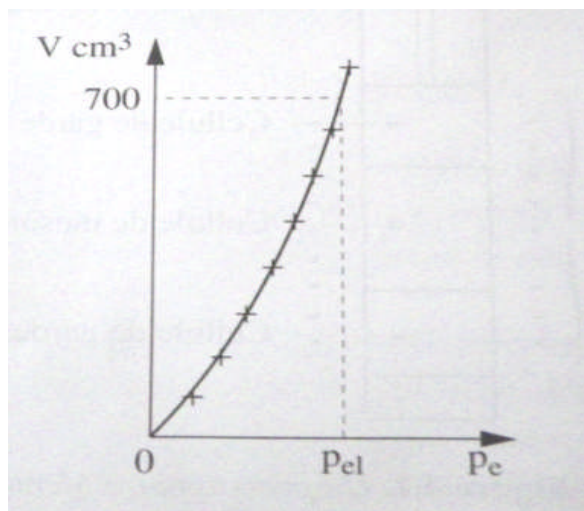


Fig.

III.9. Courbe de résistance propre Ménéard Fig. III.10. Courbe d'expansion propre d'une sonde d'une sonde Ménard.

Le volume de la sonde à vide est $V_s = 0.25 \pi D^2 - V_c$ où D le diamètre du tube d'étalonnage et V_c l'ordonnée à l'origine de la droite d'ajustement pour $P > 500 \text{ Kpa}$.

III.4.1.8. Exécution de l'essai proprement dit :

Une fois la sonde la sonde descend et bloquée à la profondeur désirée, on ouvre les robinets d'la sonde descend et bloquée à la profondeur désirée, on ouvre les robinets d'admissions et le niveau d'eau dans le voyant s'abaisse alors et donne une lecture correspondant à une pression égale à celle de la colonne d'eau au niveau de la sonde.

La mise en pression s'effectue ensuite par palier, on tournant la clé du détendeur. On obtient sur le manomètre 8 (Fig. III.11) la pression de l'eau dans le CPV et sur manomètre 20. La pression du gaz dans les cellules de garde, ces deux pressions doivent être différentes.

En effet, le contact entre la membrane de la cellule centrale et la protection extérieure, c'est à dire finalement le contact avec le sol, ne pourra se faire que si la pression d'eau dans la cellule centrale est supérieure à la pression de l'air des cellules de garde. Cette dépression se règle à l'aide du régulateur 19, et elle ne doit pas être trop importante si l'en veut que le champ de déformation reste sensiblement cylindrique.

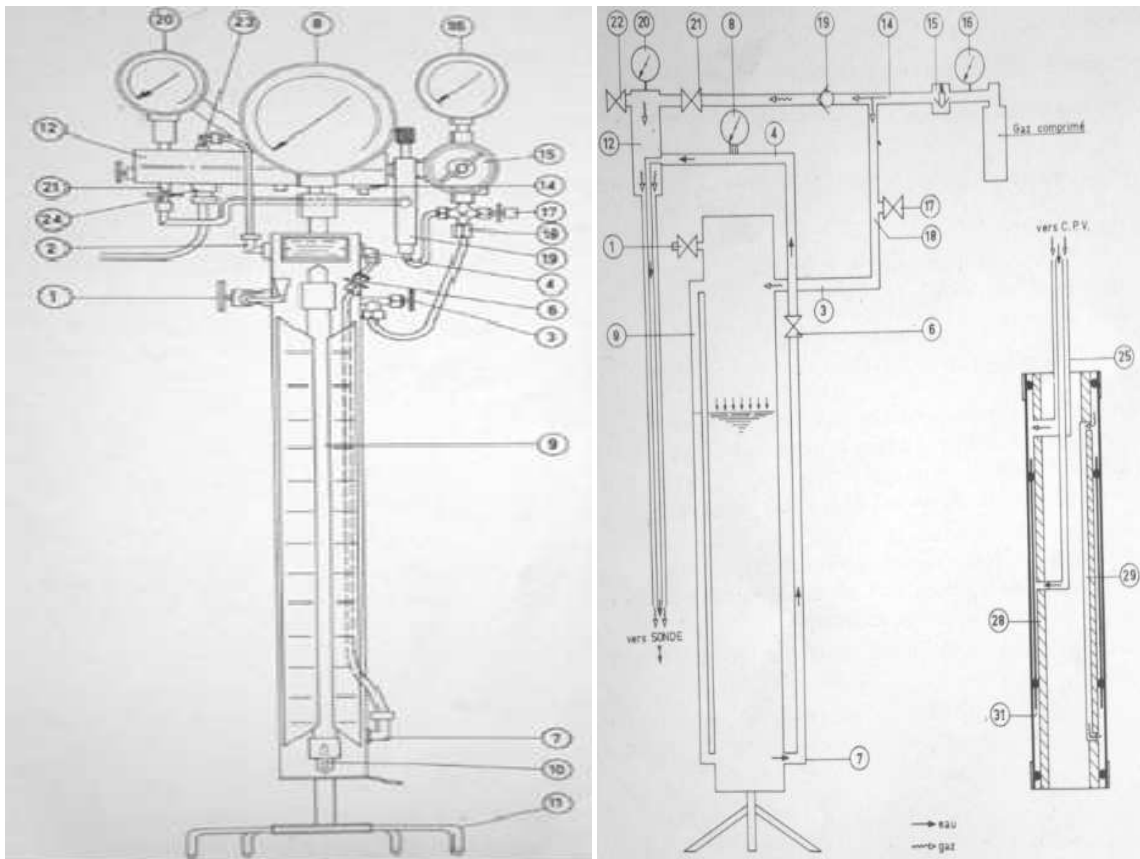


Fig. III.11. Schéma du CPV Louis Menard Fig. III.12. Circuit de fluide.

On est donc conduit à faire varier la dépression lue sur les manomètres de la profondeur et à partir d'une certaine profondeur il faudra mettre les cellules de garde en surpression .pour ce faire, il suffira de brancher la sortie du régulateur de pression sur l'admission de gaz dans le CPV, c'est à dire intervertir les arrivées des flexible en 21 et 3. (Fig. III.11 et Fig.III.12).

La valeur réelle de la dépression doit rester voisine de 0.1 à 0.15 MPA, on est donc conduit à faire décroître de 0.01 MPA /M de profondeur la dépression lue est cela jusqu'à 11 m de profondeur. à partir de 12m, on intervertira les branchement comme précédemment indiqué et on augmentera la dépression de 0.01Mpa/m de profondeur.

Il faut bien noter que si la mise en pression de la cellule de garde se fait instantanément, il n'en a pas de même de la cellule centrale dans laquelle la transmission de la pression par l'eau se fait plus lentement.

L'amplitude des paliers de pression est en fonction du terrain étudié. Dans les terrains faibles (argile molle, sable lâche) on a intérêt à procéder par paliers de 25Kpa au plus. Certains terrains très faibles, comme les vases littorales nécessitent même des paliers de 5Kpa.Dans les terrains les plus résistants, on pourra augmenter cette amplitude jusqu'à 1Mpa ou même 2Mpa pour les marnes raides, par exemple.

En règle générale, un essai pressiométrique doit comporter en moins 10 paliers de pression. À chaque palier de pression correspond une déformation volumétrique du sol qui se traduit par un abaissement du niveau de l'eau dans le voyant de lecture 9 (Fig. III.11 et Fig. III.12).le volume total injecté est repéré sur la règle de mesure gradué en cm^3 .

Dans les terrains résistants, où les déformations sont faibles, il faut utiliser, pour améliorer la précision, le dispositif dit à "haute sensibilité". Il suffit pour cela de fermer le robinet 10 (Fig. IV.11) situé à la base du C.P.V qui isole le corps du C.P.V et qui ne laisse dans les circuits d'eau que le voyant de lecture. C'est donc l'eau contenu dans le voyant de lecture qui est injectée dans la sonde. Le rapport des sections intérieures du voyant de lecture et du C.P.V étant de 1/100, les lectures effectuées sur la règle graduée correspondant donc à centième de cm^3 .

C'est ainsi que dans le <<mode opératoire de l'essai pressiométrique normal >> du LCPC, les incréments de temps sont fixés à une minute quel que soit le type du terrain, à l'exception toutefois du terrain particulièrement faible (vases par exemple) où l'on pourra opérer avec des paliers de 2mn .ce document fixe en outre à 14 le nombre maximal de palier .

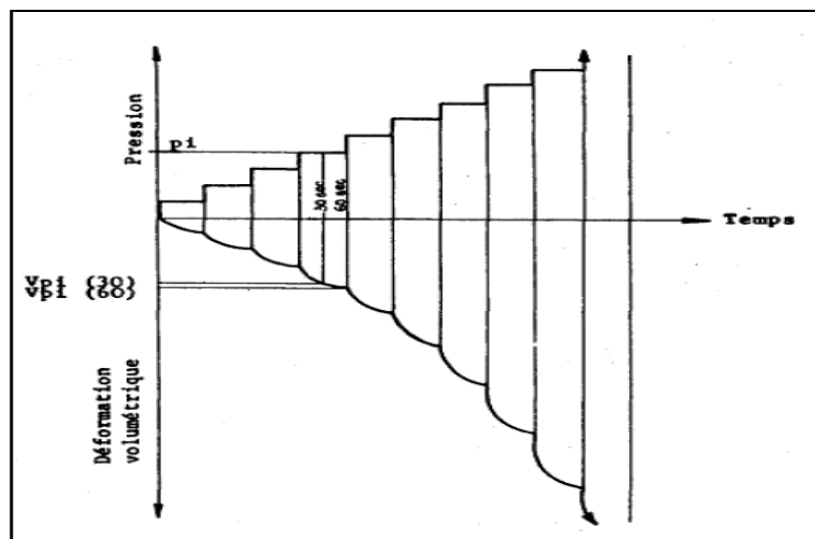


Fig III.13. Chargement par paliers en fonction du temps.

III.4.1.9. Interprétation de la courbe pression volume $\Delta V=f(P)$:

L'essai étant rapide, donc en conditions non drainées, il s'interprète en contraintes totales. Une courbe d'expansion type, représentée sur la (figure-III.13), permet d'obtenir le module pressiométrique E_M , la pression limite pressiométrique P_I , la pression de fluage P_f et la pression de contact avec le terrain P_0 . Se décompose habituellement en trois phases ;

1- Une première phase de **recompactage** du sol autour de la sonde pressiométrique : ($0 \leq P \leq P_0$; $0 \leq V \leq V_0$) elle résulte de l'expansion de la membrane jusqu'au moment où celle-ci vient épouser le contour du trou foré préalablement. D'après Fawaz (1993), Baguelin et al (1978) définissent P_0 , la pression lue sur la courbe pressiométrique qui correspond au volume V_0 comme le début de la partie linéaire sur cette courbe. La pression p_0 dans la sonde est alors la pression naturelle de terre au repos.

2- Une deuxième phase dite **pseudo-élastique** : ($P_0 \leq P \leq P_f$; $V_0 \leq V \leq V_f$), caractérisée par une réponse approximativement linéaire du sol. La pression atteinte à la fin de cette phase est la pression de fluage P_f . Cette partie de la courbe permet de définir le module pressiométrique Ménard E_M donné par l'expression (I.3).

L'essai étant rapide, donc en conditions non drainées, il s'interprète en contraintes totales. Une courbe d'expansion type, représentée sur la (fig. III. 14), permet d'obtenir le module pressiométrique E_M , la pression limite pressiométrique P_l , la pression de fluage P_f et la pression de contact avec le terrain P_0 . Se décompose habituellement en trois phases.

Un module pressiométrique G_M est également déduit à partir de E_M ;

$$= \frac{E_M}{(1 + \mu)} \quad (I.1)$$

3- Une troisième phase de **déformation plastique**: ($P_f \leq P$; $V_f \leq V$), correspond à l'apparition d'une forte non-linéarité de la courbe d'expansion due à la mise en plasticité du sol. Pour les très grandes déformations, la pression tend vers une valeur limite. C'est la pression limite, définie comme l'asymptote de la courbe pressiométrique quand le volume tend vers l'infini. En pratique il est impossible d'accéder à cette valeur de la pression ; la pression limite est alors définie comme la pression provoquant le doublement du volume initial de la sonde $V_{lc} = 2V_0$: c'est la pression limite conventionnelle, notée P_{LC} .

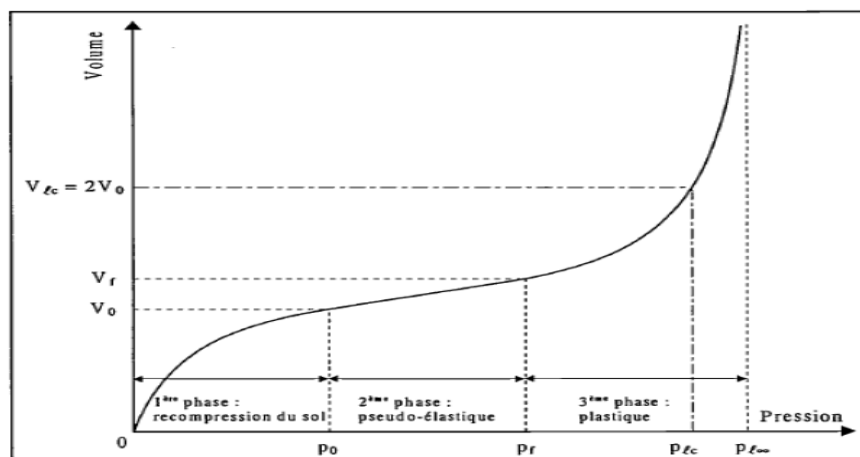


Fig. III.14. Courbe pressiométrique (forage préalable).

III.4.1.10. Expression des résultats :

I. Détermination du module pressiométrique Ménard EM :

Partant de la formule fondamentale de l'expansion Δr d'une cavité cylindrique de diamètre r sous l'action d'un accroissement de pression ΔP , on a :

$$\Delta r/r = \Delta P (1+\nu)/E \quad (I.2)$$

A partir de pente de la droite pseudo-élastique voire (Figure I-3).

On calcule le module pressiométrique, noté E_M comme suit :

$$E_M = \frac{K \cdot \Delta}{\Delta r/r} \quad (I.3)$$

Avec ν : coefficient de Poisson.

V_s : volume de la cellule centrale (de l'ordre de 535 cm³ pour les cellules standard) selon les normes françaises NF P94-110-1.

(P_0 , V_0) et (P_f , V_f) : sont respectivement les points du début et la fin de la phase pseudo élastique. La fin de cette phase correspond à une pression de fluage P_f .

La détermination du module EM est l'opération la plus délicate dans l'essai pressiométrique. Du fait du remaniement du trou de forage, le module pressiométrique EM sera toujours plus faible que le module réel du sol.

L'expression (I.3) est obtenue à partir de l'analyse théorique de l'expansion d'une cavité cylindrique dans un milieu élastique isotrope et homogène.

II. Détermination de la pression de fluage P_f :

- La pression de fluage P_f est obtenue par exploitation graphique du diagramme (P , $\Delta V_{60/30}$), voir (Figure III.15).

- $\Delta V_{60/30}$: est la variation de volume du liquide injecté dans la cellule centrale de mesure entre les temps $t = 30$ s et $t = 60$ s après le début du palier de pression P .

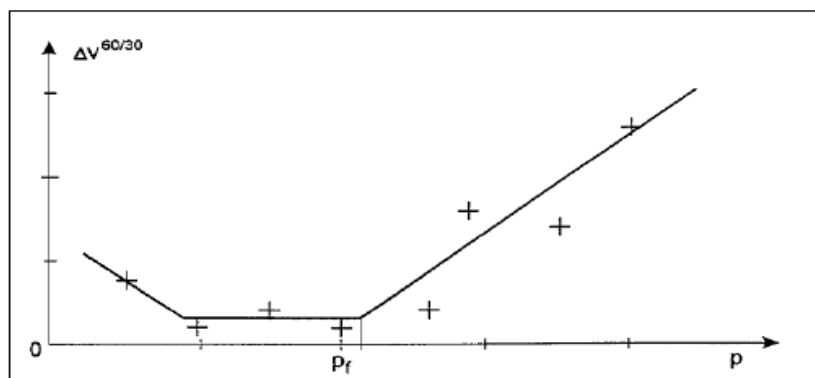


Fig. III.15 : Courbe de fluage pressiométrique.

III. Détermination de la pression limite Pl :

Lorsque la pression appliquée sur les parois du forage par la sonde dépasse la pression de fluage Pf le sol entre en plastification et par convention, la pression limite est la pression qui entraîne le doublement de la cellule centrale de mesure après la pression P₀. Elle correspond à un volume injecté.

$$V_L = V_s + 2V_0 \quad (I.4)$$

La pression limite est la pression qui correspond à la plastification de toute la surface latérale des parois. Dans la pratique, cette pression est difficile à atteindre, c'est pourquoi on adopte la pression limite conventionnelle correspondant au doublement du volume de la sonde.

IV. Profile pressiométrique :

Les valeurs du module pressiométrique, de la pression de fluage, et de la pression limite obtenues au pressiomètre sont systématiquement représentées en fonction de la profondeur sur des tableaux synoptiques, en parallèle avec les résultats géologique, les courbes d'avancement de l'outil et les courbes de battage, le niveau de la nappe, etc.

V. Courbepressiométrique corrigée :

Les valeurs de pression P_m lues au manomètre et de volume V_r lues au CPV sont corrigées et permettent de tracer la courbe pressiométrique corrigée (Figure III.16) Pour les pressions, la pression réelle P appliquée par la cellule centrale au sol est:

$$P = P_m + Ph - Pc \quad (I.5)$$

Ph : la pression hydrostatique au niveau de la cellule centrale.

$$Ph = \gamma_w \cdot (h_1 + h_2)$$

h₁:profondeur de la sonde / sol et h₂=hauteur du réservoir / sol.

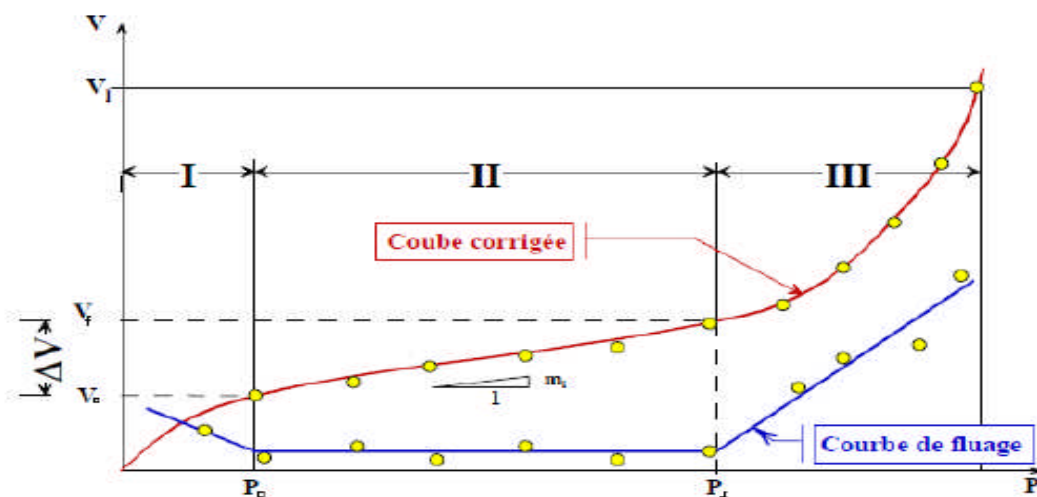


Fig. III.16. Courbe pressiométrique corrigée.

P_c : résistance propre de l'ensemble membrane-gaine et éventuellement du tube lanterné.

pour un volume donné (le volume V_m peut être corrigé de la dilatation propre des tubulures pour les pressions importantes $> 2,5$ MPa).

La présentation simultanée de ces divers résultats de courbes corrigées permet de définir le profil géotechnique comme par exemple celui représenté sur la (Fig. III.17).

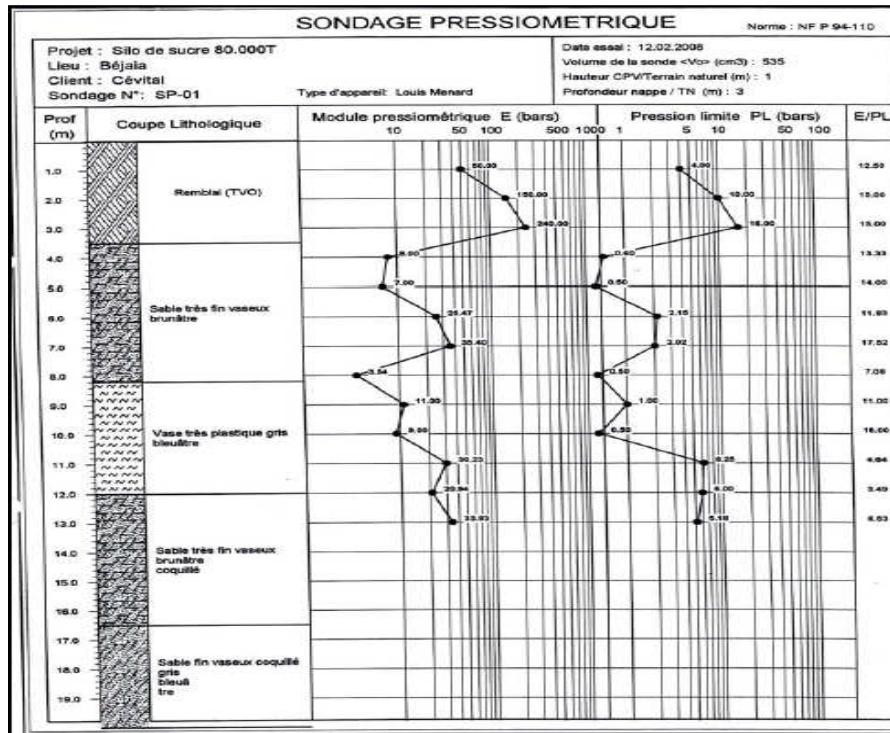


Fig. III.17. Profil Pressiométrique de Menard.

VI-Relation entre P_I et E_M :

Le rapport (E_M/ P_I) bien qu'il regroupe deux caractéristiques très différentes, du fait que l'une correspond aux petits déplacements du forage et l'autre aux grands, l'expérience a montré que celui-ci peut être un critère pratique pour apprécier et classer la raideur des matériaux étudiés.

On admet selon Ménard la classification suivante :

Tableau III.3. Classification selon le rapport (E_m/ p_I) .

• Argiles	$(E_M/P_I) < 5$	Argiles remaniées ou triturées
	$5 < (E_M/P_I) < 8$	Argiles sous-consolidées
	$8 < (E_M/P_I) < 12$	Argiles normalement consolidées
	$12 < (E_M/P_I) < 15$	Argiles légèrement surconsolidées
	$(E_M/P_I) > 15$	Argiles fortement surconsolidées
• Sables	$(E_M/P_I) < 5$	Sables remaniés
	$6 < (E_M/P_I) < 8$	Sables et graviers immergés
	$(E_M/P_I) > 10$	Sables, sables et graviers secs et serrés

VII-Ordre de grandeur des pressions limites P_1 :

Le tableau suivant donne une classification des sols en fonction P_1 de en vue du dimensionnement des fondations d'ouvrages de génie civil.

Tableau. III.4 : Classification Des Sols Suivant P_1

CLASSE DE SOL		DESCRIPTION	PRESSIOMETRE P_1 (MPa)
ARGILES, LIMONS	A	Argiles et limons mous	< 0,7
	B	Argiles et limons fermes	1,2 – 2,0
	C	Argiles très fermes à dures	> 2,5
SABLES, GRAVES	A	lâches	< 0,5
	B	Moyennement compacts	1,0-2,0
	C	compacts	> 2,5
CRAIES	A	Molles	< 0,7
	B	Altérées	1,0 - 2,5
	C	Compacte	> 3,0
MARNES MARNO-CALCAIRES	A	Tendres	1,5 - 4,0
	B	compacts	> 4,5

VIII-Détermination de la résistance au cisaillement à l'aide du pressiomètre :

L'interprétation de l'essai pressiométrique en termes de résistance au cisaillement implique que plusieurs conditions soient satisfaites :

- le sol doit être intact autour de la sonde ;
- le champ de déformation doit être plan et connu.

Dans l'essai de Ménard, le sol autour de la sonde n'est pas intact : il est décomprimé au bord du trou et perturbé par l'opération de forage (trituration par l'outil et par le fluide d'injection). Quant au champ de déformation, il n'est connu que dans les sols cohérents : la déformation (pour la géométrie donnée de la sonde Ménard) est sensiblement plane et le champ de déformation est connu à chaque instant en raison de l'invariance du volume élémentaire si la sollicitation est non drainée.

Dans un sable, aucune de ces deux hypothèses n'est satisfaite : la déformation est non plane et la dilatance entraîne une variation non connue du volume élémentaire. Il s'ensuit que l'essai Ménard ne peut être interprété de manière analytique en terme de résistance au cisaillement.

La seule approche réaliste, confirmée par l'expérience, consiste à déduire la cohésion non drainée C_u de la pression limite conventionnelle à partir de Menard (1963), propose la relation empirique suivant telles que :

- **pour $P_1 \leq 0.05 \text{ MPa}$: $C_u = \text{---} (1.6)$**

- **pour $P_1 \leq 0.05 \text{ MPa}$: $C_u = \text{---} + \text{---} (1.7)$**

CONCLUSION :

Depuis sa mise au point par Louis Ménard en 1957, l'essai pressiométrique connaît un essor considérable. Ce succès est dû à de nombreux avantages, comme la simplicité relative d'exécution, la rapidité des mesures et la polyvalence de l'essai (essai praticable dans tous les types de sols).

Le pressiomètre est le seul appareil d'essai in situ qui mesure à la fois une caractéristique de déformabilité, et une caractéristique de résistance du sol.

Le pressiomètre C'est un essai rapide ne permettant pas d'aborder les problèmes de consolidation ou de stabilité à long terme.

Le domaine privilégié d'utilisation du pressiomètre est le dimensionnement des fondations dans les sols (superficielles profonde et radier).il peut en outre être utilisé pour le calcul des tassements dans les sols.

III.4.2.Essais pénétrométriques :**Introduction :**

Auscouter le sol en y enfonçant un pieu est probablement l'une des plus anciennes techniques permettant d'estimer sa résistance. Utilisée massivement depuis le début du XXème siècle, cette méthode porte le nom d'essai pénétrométrique et son utilisation tient une place importante parmi les essais in-situ disponibles. Il existe deux grands types de pénétromètres : les statiques ou CPT et les dynamiques y compris le carottier SPT ; ces derniers sont les plus couramment utilisés dans le monde. Le principe du pénétromètre dynamique consiste à faire pénétrer dans le sol, par battage, un train de tiges muni d'une pointe conique (ou d'un carottier pour le SPT).

Lors du sondage on enregistre le nombre de coups N nécessaires pour enfoncer le cône dans le sol. Il est possible, par le biais des formules de battage, d'établir une relation entre la résistance à la pénétration du sol et l'énergie de battage.

Bien que pour la plupart des ingénieurs, le caractère dynamique de ces pénétromètres soit considéré comme un désavantage. Il s'agit d'un outil très intéressant pour l'étude du comportement dynamique des sols comme par exemple l'évaluation du risque de liquéfaction.

III.4.2.1. Essai Standard Penetration Test (SPT):

Cet appareil, dont l'origine remonte vers 1925 aux Etats-Unis, défini par un Standard Pénétration Test (ASTM D-1586). Il s'agit d'enfoncer dans le sol un carottier

cylindrique de hauteur et de diamètre calibrés : les masses de battage et les tiges ont des dimensions bien précises. La valeur de N, éventuellement corrigée (présence d'eau, sols compressibles, etc. a fait l'objet de très nombreuses corrélations. l'essai SPT et l'essai de référence dans le monde. sa simplicité et surtout le fait qu'aujourd'hui de très nombreux essais ont été menés dans le monde sur tout type de sols.

III.4.2.2. Objectif de l'essai :

Le pénétromètre dynamique est un moyen simple, rapide et économique d'investigation des sols in situ. Il permet :

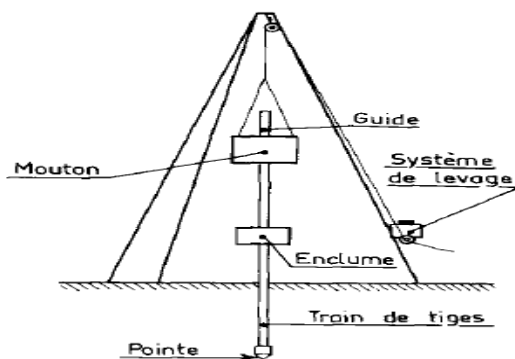
- d'apprécier de façon qualitative la résistance des terrains traversés, et de prévoir la réaction du sol à l'enfoncement de pieux.
- de déterminer l'épaisseur et la profondeur des différentes couches de sol.
- d'effectuer des contrôles de compactage
- d'estimer une caractéristique de portance, la « résistance dynamique de pointe ».

III.4.2.3. Description schématique du pénétromètre dynamique :

La schématisation d'un pénétromètre dynamique permet d'en distinguer quatre éléments importants (Fig. III.18) :

- le mouton, source d'énergie, est généralement à chute libre, d'une hauteur plus ou moins constante et avec plus ou moins de frottement ;
- l'enclume comporte parfois un amortisseur et sa liaison avec le train de tiges peut être rigide ou par frottement ;
- les tiges présentent un poids et une géométrie très variables ;
- la pointe est la partie de l'appareil la plus sophistiquée.

Les particularités portent sur l'angle au sommet, la géométrie et le diamètre de la pointe par rapport à celui des tiges.



Conception schématique d'un pénétromètre dynamique.

Fig. III.18. Schéma d'un pénétromètre dynamique.

III.4.2.4. Principe de l'essai :

L'essai Standard Pénétration Test est un essai de pénétration dynamique réalisé à l'intérieur d'un sondage ; il s'applique aux sols fins et aux sols grenus dont la

dimension maximale des éléments ne dépasse pas 20 mm et il est limité, généralement, à une profondeur de 50 m. L'essai SPT consiste à battre dans le sol en fond de trou un carottier muni d'une trosse coupante et à compter le nombre de coups N nécessaires pour enfoncer le carottier de 45 cm à raison de trois passes de 15 cm (Fig. III.19) carottier de essai SPT et (Fig. III.20) dispositif du carottier de essai SPT).

C'est un essai très indiqué dans les sols pulvérulents (où il est souvent impossible de récupérer des échantillons intacts pour les essais en laboratoire), car il permet à partir du nombre de coups mesurés et grâce à des corrélations d'estimer l'angle de frottement, la compacité et la force portante des sables et, en l'occurrence, l'appliquer pour l'étude de corrélation entre la vitesse de cisaillement V_s et N. Les principales caractéristiques du matériel pour exécuter l'essai sont :

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • masse enclume + guidage Mouton (m') : 10 Kg • masse du mouton (m) : 63.5kg • hauteur de chute (H) 76.2 cm • Aire de la section droite de la pointe (A) : 15 cm² | <ul style="list-style-type: none"> longueur des tiges : 1m Masse d'une tige (m') : 6.4kg enfoncement (e) : 30 cm |
|---|---|



Fig. III.19. Carottier pour essai SPT



Fig. III.20. Dispositif de battage de l'essai SPT.

III.4.2.5. Détermination de la résistance dynamique de pointe:

Les résultats obtenus au pénétromètre dynamique à cône sont généralement présentés de trois façons différentes en fonction de la profondeur :

- soit par le nombre de coups, N , pour un enfoncement donné,
- soit par la résistance dynamique unitaire q_d , calculée à partir d'une des nombreuses formules de battage,
- soit par la résistance dynamique de pointe, q_d déduite de la formule des Hollandais :

$$= \frac{M}{A} \cdot \frac{H}{e} + \dots$$

Avec :

M : Masse du mouton;

M' : Somme des masses du train de tiges,
L'enclume et de la tige guide;

H : Hauteur de chute.

e : Pénétration moyenne par coup;

A : Section droite de la pointe;

g : Accélération de la pesanteur.

III.4.2.6. Choix du types de l'essais :

Pour les sables moyens et les graviers propres, denses, situés hors d'eau ou sous l'eau, les résistances dynamiques unitaires de pointe ne sont pas influencées par la conception de la pointe.

Cela explique qu'il est habituellement admis que l'essai au pénétromètre dynamique ne doit être pratiqué que dans les sols pulvérulents. Cette particularité est due au fait que, lors d'un choc, le déplacement relatif tige-sol est très faible et que l'ébranlement qui se propage le long du train de tiges met en vibration les grains de sable.

Pour tous les autres sols tels que : vase, limon, argile, craie molle, marne, sable argileux, sable limoneux, etc., les résistances dynamiques sont fonction de la conception de la pointe et de la mobilisation du frottement latéral, tant hors d'eau que dans l'eau. Dans ces cas, les valeurs les plus élevées sont mesurées avec une pointe de même diamètre que les tiges (fig III.21).

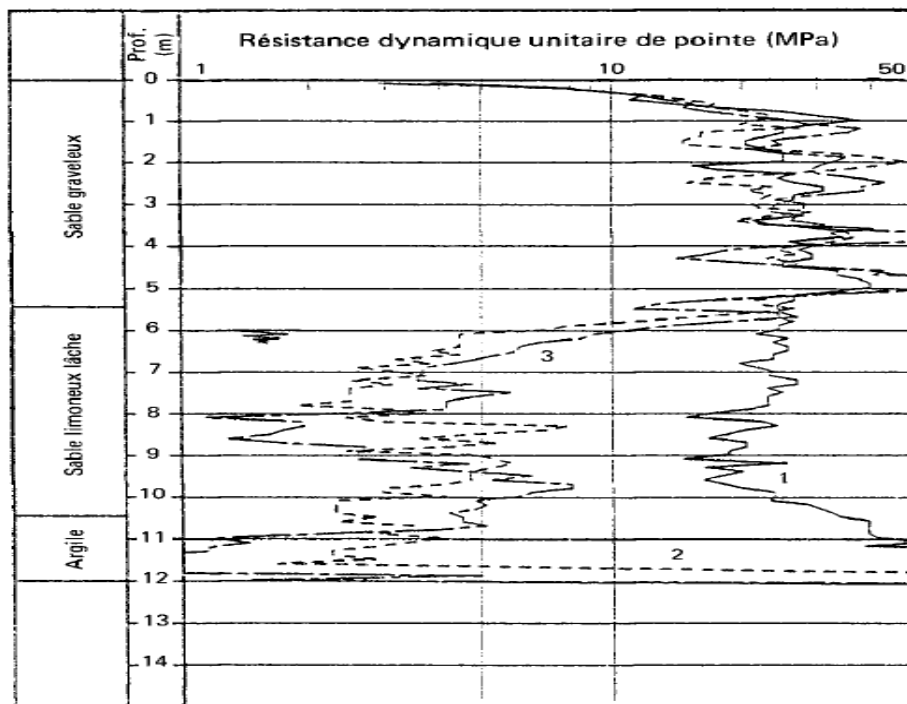


Fig. III.21. Mode d'interaction entre le pénétromètre dynamique et les sols :
(1) pointe de même diamètre que les tiges,
(2) pointe débordante,
(3) pointe débordante et injection de boue.

Toutes fois de nombreuses critiques ont été émises sur cet appareil :

- le frottement latéral interne et externe (qualité du tube) engendre des réactions parasites variables.
- l'énergie importante mise en œuvre engendre, pour les sols mou des erreurs parfois considérables ;
- la précision sur cette énergie ;
- la qualité du fond du trou avant le sondage.
- influence de la pression interstitielle, notamment dans les sols fins
- pour $N < 4$ le sol est lâche, mais N n'est pas significatif;
- pour $N > 30$, le sol est raide, mais dans ce cas encore, N n'est pas significatif (l'élasticité du système n'est pas négligeable).

Tableau III.5. Compacité du sable à l'aide de l'essai SPT (Terzaghi et Peck).

Nbre. De coups	Densité relative
0 à 4	Très inconsistant
4 à 10	Inconsistant
10 à 30	Moyen
30 à 50	Compact
Au-dessus de 50	Très compact

III.4.2.7. Mesure de La résistance dynamique de pointe :

Dans le cadre d'une reconnaissance de sols, l'objectif des essais au pénétromètre dynamique est de déterminer des résistances dynamiques unitaires de pointe caractérisant parfaitement une couche de sol, quelle que soit son épaisseur, sa position, sa nature, sa compacité ou sa consistance.

Pour obtenir de telles mesures, il faut que l'essai au pénétromètre dynamique soit exécuté avec un matériel ayant un fonctionnement régulier et les spécifications suivantes;

— mouton à chute libre, avec des frottements très faibles, une hauteur de chute constante et une cadence d'environ 30 coups par minute. Une réduction de l'énergie de frappe conduit à une surestimation de la résistance dynamique unitaire de pointe ;

— une enclume parfaitement solidaire du train de tiges pour transmettre au mieux l'énergie reçue ;

— des tiges de longueur identique, bien droites, autorisant un serrage convenable afin de faciliter la propagation de l'énergie incidente ;

— une pointe débordante de préférence perdue, parfaitement emmanchée à l'extrémité du train de tige, avec un guidage efficace. L'expérience a montré que l'utilisation d'une pointe fixée au train de tige où une pointe emmanchée donne des résultats peu différents (fig.III.22).

— des tiges creuses permettant une injection de boue dans l'espace annulaire entre le train de tiges et la paroi du sondage, pour éviter le frottement latéral parasite (fig-III.23).

Pour le calcul de la résistance dynamique unitaire de pointe, nous conseillons, au stade actuel de nos recherches, d'utiliser la formule (1) des Hollandais qui fournit des valeurs comparables à celles du pénétromètre statique.

L'allure des courbes expérimentales sont toutes comparables à celles de (Fig. IV.22) ou de la (Fig. IV.23), sachant que toutes les valeurs ont été calculées avec la formule (1).

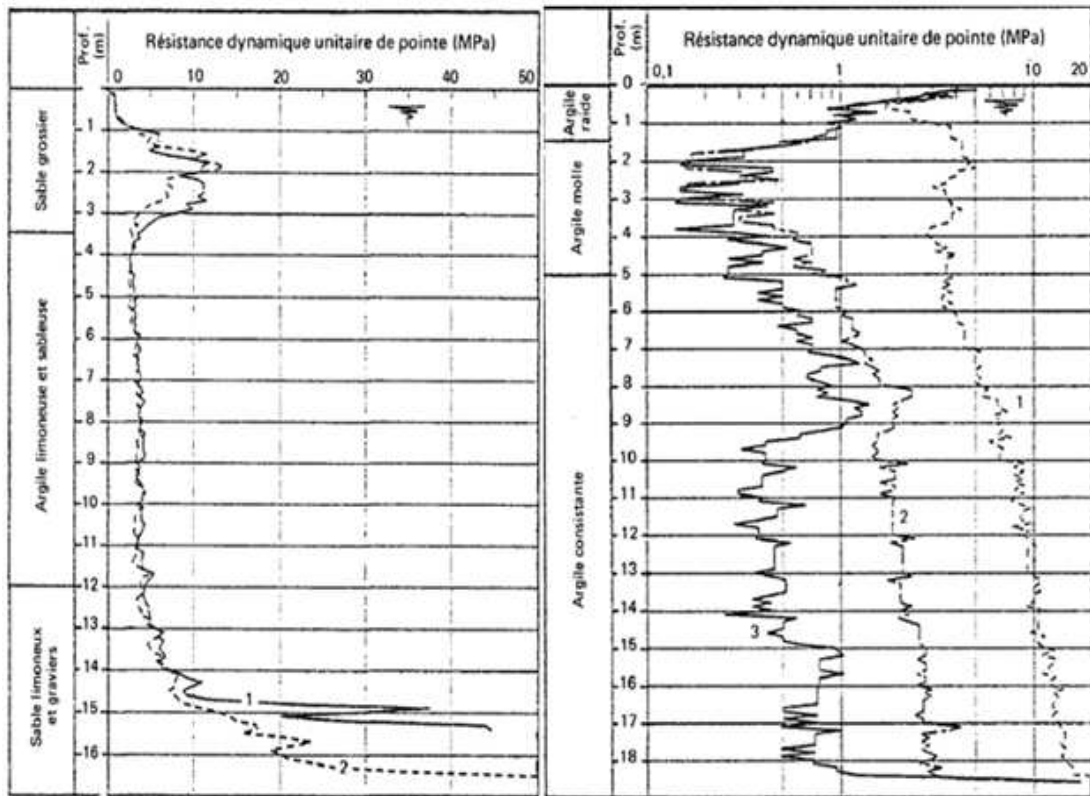


Fig. III.22 — Diagrammes de pénétration dynamique avec pointe débordante perdue (1) ou fixe (2) et une injection de boue (courbes moyennes de trois essais).

Fig. III.23 — Diagrammes de pénétration dynamique dans des sols cohérents.

Ce sont les essais avec injection de bentonite qui donnent les résultats les plus faibles et du même ordre de grandeur que ceux obtenus au pénétromètre statique. Les résultats obtenus de l'essai au pénétromètre dynamique, correspondent aux tableaux de classification suivant les plages de résistance dynamique unitaire de pointe pour chaque type de sols (Tableau. III.7).

Tableau. III.7. Résistances dynamique de pointe pour différents natures de sols.

Nature du sol	q_d (MPa)
vase	0,1 à 1
limon	0,6 à 1,5
argile molle	0,1 à 1,5
argile consistante	1,5 à 3
argile raide	3 à 5
argile raide caillouteuse	3 à 7
sable lâche	0,2 à 4
sable dense	5 à 30
sable argileux	4 à 7
sable et graviers lâches	0,5 à 4
sable et graviers denses	7 à 35
craie molle	0,7 à 4
craie indurée	10 à 50
marne	6 à 15
marne raide ou indurée	20 à 100

Conclusion :

En conclusion, on ne peut pas faire abstraction d'une technique considérablement développée dans le monde, même si de nombreuses critiques ont été émises à son sujet;

- possibilité d'avoir de faux refus lors du battage si l'appareil rencontre un élément dur.
- augmentation brutale de la résistance en pointe si le fonçage s'effectue, à cadence rapide, dans un sol argileux saturé (surpression due à l'eau).
- impossibilité de définir le frottement parasite sur la surface latérale de l'appareil.

En effet, malgré les nombreux inconvénients de cette technique, le couplage de l'indication fournie par N et les caractéristiques mesurées au laboratoire sur les échantillons prélevés permettent une approche assez fine du comportement du sol dans de très nombreux cas.

III.4.3. Essai cône Pénétration Test (CPT):**Introduction :**

Le CPT, de l'anglais Cône Pénétration Test, est un essai de pénétration à cône, très répandu dans le monde, il est généralement bien connu dans le domaine de génie civil et souvent utilisé dans les reconnaissances géotechniques. On peut en effet remonter son origine en 1929 aux U.S.A, mais surtout mis au point à partir de 1932 par Buisman et Barentsen [BAR 36] du laboratoire de Delft (pays bas), les pénétromètres statiques se sont surtout développés à partir de 1948 où eut lieu le deuxième congrès international de mécanique des sols [ICS 48].

Pendant la phase préliminaire de la reconnaissance, les essais de pénétration sont généralement les plus aisés à mettre en œuvre et les plus économiques. L'essai de pénétration statique (CPT) est le seul essai in situ courant qui fournit un profil précis et continu de la stratification du sol, le CPT est un dispositif qui fournit indirectement des informations sur le type de sol, les paramètres géotechniques comme la résistance au cisaillement, la densité, le module élastique, le taux de consolidation et les propriétés environnementales. De plus, comme il peut être vu comme un pieu à échelle réduite, c'est le meilleur et le plus rentable dispositif pour concevoir les fondations profondes. Depuis le développement du pénétromètre électrique, la standardisation de l'essai, et par conséquent sa répétitivité excellente, Le CPT est de plus en plus utilisé dans les reconnaissances du terrain.

III.4.3.1. Objectif de l'Essai de pénétration statique CPT :

L'essai de pénétration statique (CPT pour CônePénétration Test) consiste à mesurer la résistance (résistance en pointe et résistance latérale) à la pénétration d'une sonde conique instrumentée (Sanglerat *et al.* 1969 ; Lunne *et al.*, 1986 ; Robertson et Campanella, 1983). Le résultat de l'essai de pénétration aide à la classification des sols, à apprécier la succession des différentes couches de terrain, l'homogénéité d'une couche ou la présence d'anomalies. Le module de déformation peut être déterminé à partir de l'essai CPT par une corrélation avec la résistance en pointe (Sanglerat *et al.* 1969 ; Barata, 1995).

III.4.3.2. Description schématique du pénétromètre statique CPT:

L'appareil d'essai se compose d'une structure de réaction, de tiges, d'un système de fonçage, de guidage et d'une pointe servant à mesurer la résistance à la pénétration qc. La structure de réaction permet de transmettre au train de tiges l'effort de fonçage. Elle doit être stabilisée de telle sorte qu'elle ne puisse se déplacer de manière sensible, par rapport du sol, lors du fonçage. La pointe est la partie la plus importante. Elle se compose d'un tube de garde, d'un manchon de frottement et d'un cône en pointe. Le cône standard possède un angle au sommet de 60 degrés et d'une section de 10 cm². Le manchon se situe au-dessus du cône, avec une superficie latérale de 150 cm². Entre le tube de garde et le manchon se situe un dispositif de protection et d'étanchéité (figure III.24).

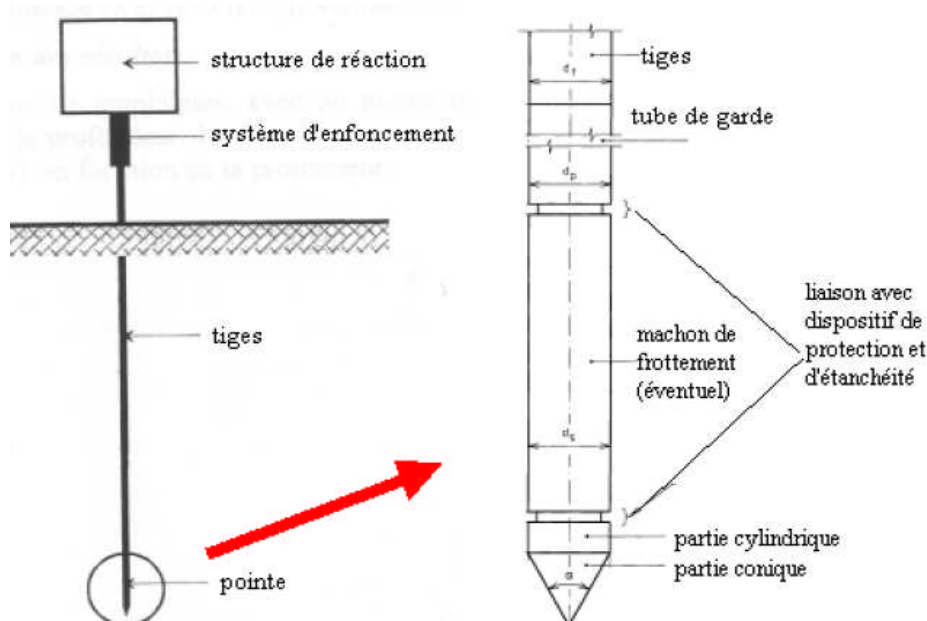


Fig. III.24. Schéma d'un pénétromètre statique CPT.

III.4.3.3. Principe de l'Essai de pénétration statique CPT :

La sonde est insérée dans le sol à une vitesse constante standardisée de 2 cm/s. Pendant la pénétration, la résistance en pointe et le frottement latéral sont mesurés et éventuellement la pression interstitielle u (piézocône). En effet, le pénétromètre statique CPT devient piézocône ou CPT+ u si l'on y intègre un ou plusieurs capteurs de pression interstitielle à l'arrière du cône. L'effort total Q_t est la force nécessaire pour enfoncer le train de tiges muni à sa base d'une pointe conique ; Q_c est l'effort apparent total sur le cône, Q_s est l'effort total de frottement latéral.

$$Q_t = Q_c + Q_s$$

$$Q_t = q_c \cdot A_c + f_s \cdot A_s$$

$$R_f = \frac{f_s}{q_c}$$

Avec :

q_s : résistance de la pointe,

A_c : surface de la base du cône,

f_s : frottement latéral unitaire,

A_s : surface latérale du train de tiges.

R_f : rapport de frottement. il s'agit du rapport entre le frottement latéral unitaire et la résistance à la pénétration aux cônes à la même profondeur.

Les corrélations entre terme de pointe et frottement permettent une classification des sols en fonctions du rapport f_s/q_c appelé <<Friction Ratio>>, cette classification se traduit sous forme de graphe (Fig. III.25);

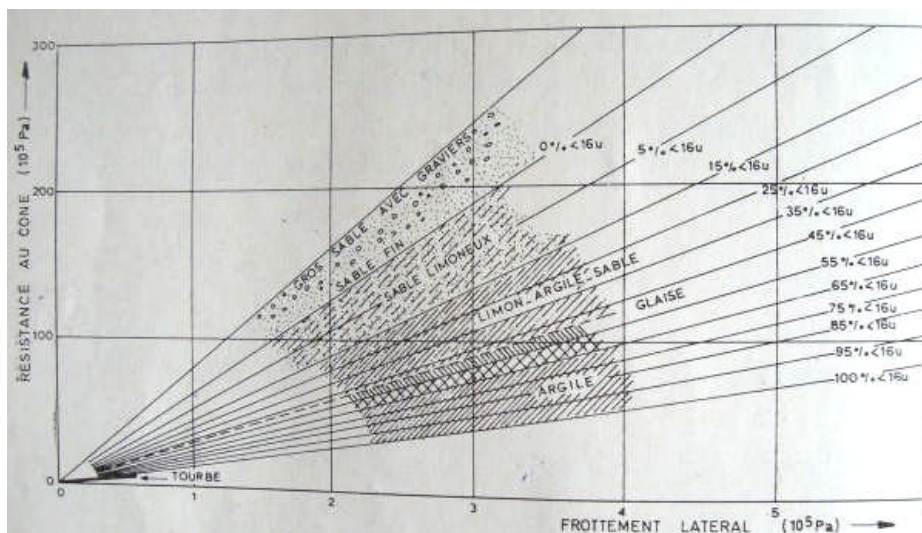


Fig. IV.25. Relation entre q_c et f_c d'après Bergman.

III.4.3.4. Profile du pénétrométrique CPT:

Les essais au pénétromètre statique ont permis d'obtenir des graphes ou pénétrogrammes qui montrent la variation de la résistance de pointe q_c (bars), du frottement latéral et de l'effort total en fonction de la profondeur (voir Fig. III.26) pénétrogrammes obtenu à partir d'un essai au pénétromètre statique).

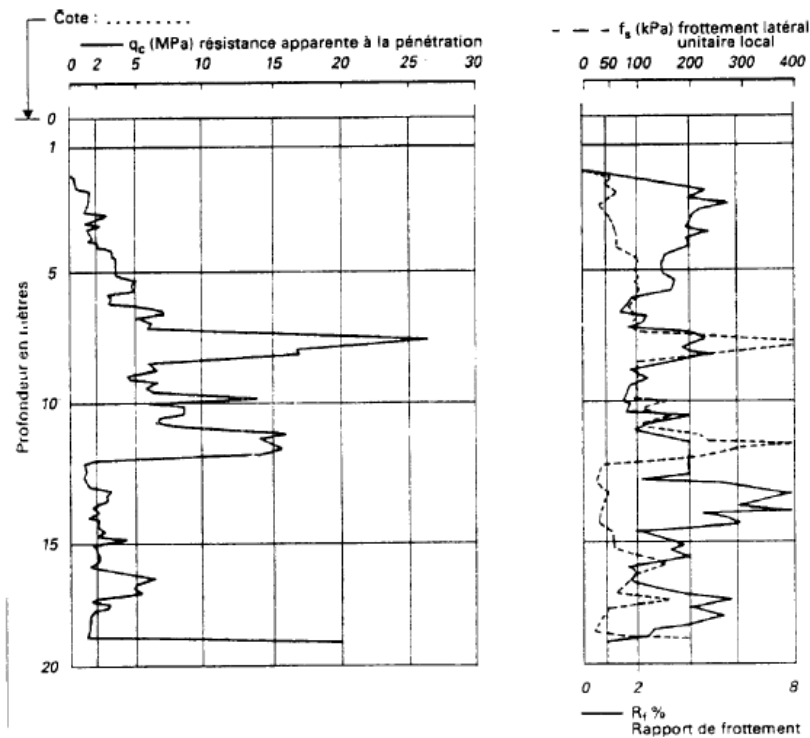


Fig. III.26. Pénétrogrammes obtenus à partir d'un essai CPT.

III.4.3.5. Identification des sols :

Certains auteurs ont proposé des abaques de classification des sols développés à partir des mesures effectuées au pénétromètre statique, q_c et R_f .

Cette approche nécessite une bonne connaissance de la géologie du site ou l'exécution préalable d'un sondage carotté proche des essais de pénétration statique. Un des abaques souvent utilisé est celui de Robertson et Campanella (1983).

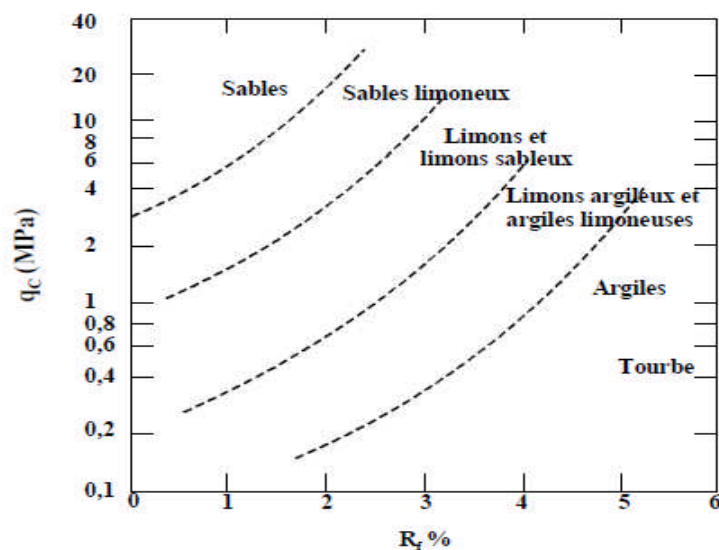


Fig. III.27. Abaque d'identification des sols d'après Robertson et Campanella

III.4.3.6. Ordre de grandeur des résistances de pointe q_c :

Le tableau 4 donne un classement des sols en fonction de q_c en vue du dimensionnement des fondations d'ouvrages de génie civil.

Tableau. III.7. Classification des sols suivant q_c

CLASSE DE SOL		DESCRIPTION	PENETROMETRE q_c (MPa)
ARGILES LIMONS	A	Argiles et limons mous	< 3
	C	Argiles et limons fermes	3,0 - 6,0
	C	Argiles très fermes à dures	> 6,0
SABLES, GRAVES	A	Lâches	< 5
	B	Moyennement compacts	8,5 - 15,0
	C	Compacts	> 20,0
CRAIES	A	Molles	< 5
	B	Altérées	> 5,0
	C	Compactes	-
MARNES	A	Tendres	-
MARNO-CALCAIRES	B	Compacts	-

Conclusion :

Il existe aujourd'hui trois grands types de pénétromètres : les statiques avec une vitesse de fonçage généralement égale à 2cm/s, les dynamiques pour lesquels le choc est provoqué par la chute d'un marteau calibré, et enfin les carottiers battus qui permettent de prélever des échantillons. Ces appareils ont des tailles très différentes et varient suivant leur usage, depuis les appareils à main jusqu'à des systèmes capables de sondages en grande profondeur.

La valeur la plus significative enregistrée s'appelle résistance de pointe (q_c) pour les pénétromètres statique et (q_d) pour les dynamiques. Cette résistance n'est pas une valeur mécanique intrinsèque du sol. Elle dépend de nombreux facteurs tels que la profondeur, la vitesse de chargement ou encore la forme de la pointe. De ce fait, il est impératif de maîtriser tous ces facteurs.

De plus, la seule connaissance de cette résistance de pointe n'est pas suffisante pour accéder à la plupart des valeurs utiles en mécanique des sols. C'est pour cette raison que les appareils sont souvent équipés de technique de mesure de paramètres complémentaire, obtenus parallèlement ou conjointement à l'essai.

Le grand intérêt des pénétromètres est leur capacité à enregistrer pratiquement en continu la résistance du sol. Le pénétromètre ainsi obtenu est riche d'informations sur la stratigraphie et sur les différentes propriétés du sol. Leur utilisation est de longue date a conduit à l'élaboration de banques de données et à des corrélations variées permettant de traiter divers problèmes en mécanique des sols.

CONCLUSION :

Les mécaniciens du sol utilisent couramment les essais in situ pour l'étude des fondations, car il n'est plus possible de construire sans procéder à une étude sérieuse du sol.

- Réalisation de grands projets à configurations complexes.
- Le poids élevé des immeubles (tours).
- La fragilité de certaines structures (réservoirs d'eau en pendule).
- La recherche de la sécurité des bâtisses.
- L'importance des sommes engagées dans les projets.
- Les délais limités de conception et de réalisation.
- Terrains de mauvaise qualité destinées à être construits.

Tous ces facteurs impose de procéder à une investigation complète et sure faisant largement appel aux essais in situ, car ils sont relativement simple, rapide, facile à réaliser et d'une exploitation quasi-immédiate et demeure souvent empirique, il sollicite le sol son état naturel .dans la plus part des cas il constitue une approche suffisante permettant de dimensionner les fondations.

Reste certains problèmes particuliers comme la consolidation, les tassements et les gonflements retraits, alors il est nécessaire de recourir aux essais laboratoire.

Introduction:

La géophysique est une vaste discipline qui a été longtemps réservée aux recherches pétrolières, ainsi porte un grand intérêt au domaine du génie civil.

Les méthodes de la géophysique, qui sont d'un apport considérable pour l'étude de la nature et des caractéristiques des sols, destinés à recevoir les futures grands projets (édifices, barrages, ouvrages d'arts...), ont l'avantage d'être non destructive et de bon marché. Elles peuvent être pratiquées sur des airs de grandes dimensions et donnent des réponses claires à un certain nombre de problèmes, en donnant des profils continus des terrains et une bonne vue d'ensemble des sites étudiés.

Le principe de base des essais géophysiques est que les vitesses de propagation des ondes dans le milieu dépendent de ses propriétés mécaniques. Lors d'un essai géophysique, l'application d'une sollicitation au milieu génère des ondes sismiques qui sont ensuite captées par un ou plusieurs récepteurs situés à des positions connues. La distance entre émetteur et récepteur étant connue, il suffit de mesurer le temps de propagation pour calculer la vitesse d'onde. Puisque la réponse du milieu reste dans le domaine de petites déformations, les vitesses de propagation sont reliées aux paramètres élastiques du milieu (souvent appelés "paramètres dynamiques") et permettent de calculer le module de Young, E_{max} , le module de cisaillement, G_{max} et le coefficient de poisson, ν , ou simplement identifier le sol.

En outre les valeurs de ces paramètres sont de nature globale, parce qu'elles sont déterminées à partir des vitesses mesurées le long du parcours de propagation. La reconnaissance des sols destinés aux projets de grande importance, où le parcours de propagation peut être grand, la géophysique permet donc de couvrir une grande distance rapidement et d'obtenir les valeurs des paramètres élastiques du terrain.

IV.1. Objectif :

Dans notre travail, nous avons fait appel à la technique : prospection sismique par l'essai Downhole, et ce à fin de mettre en évidence les différentes couches constituant le sol ainsi que ses caractéristiques et le classer suivant des tableaux de classification usuels. Surtout corrélérer mettre en relation les paramètres de cette technique géophysique (downhole) d'une part et ceux des deux techniques géotechniques à savoir pénétromètre statique (CPT) et pénétromètre dynamique (SPT).

Pour cette étude, les paramètres étudiés proviennent des résultats d'essais réalisés sur le P.O.S sud d'Ouled Fayet.

IV.2. Ondes sismiques :

Lorsqu'un milieu isotrope et homogène est soumis à une sollicitation sismique, plusieurs types d'ondes élastiques sont créés. D'une manière générale, on distingue deux familles d'ondes: les ondes de volumes qui se propagent au sein du milieu et les ondes de surfaces qui comme leur nom l'indique se propagent à la surface du milieu, leur amplitude diminuant fortement avec la profondeur.

A) Les ondes de volume :

Les ondes qui se propagent au sein du sol se divisent essentiellement en deux types: des ondes de compression, appelées aussi ondes longitudinales ou ondes primaires (ondes-P), et des ondes de cisaillement, appelées aussi ondes transversales ou ondes secondaires (ondes S). Dans le cas des ondes P, le mouvement des particules est celui de compression et de dilatation.

Les particules subissent un changement de volume avec le passage de l'onde, qui se propage dans une direction parallèle au mouvement des particules. Les ondes sonores, le mouvement des particules se fait dans une direction perpendiculaire à la direction de propagation et les particules subissent des déformations sans changer de volume. Le milieu doit donc être capable de reprendre des efforts de cisaillement pour qu'une onde-S puisse s'y propager et, de ce fait les ondes-S ne peuvent pas se propager dans un fluide.

Les vitesses de propagations des ondes de volume, V_p et V_s varient selon la rigidité du milieu. Dans les géo-matériaux, les ondes-P se propagent plus vite que les ondes-s et, de règle générale, les valeurs de V_p s'étendent de 250 m/s dans les sols aérés ou argileux à 6000 m/s dans les massifs rocheux compacts tandis que les valeurs V_s sont de l'ordre de 1.6 à 3 fois plus petites.

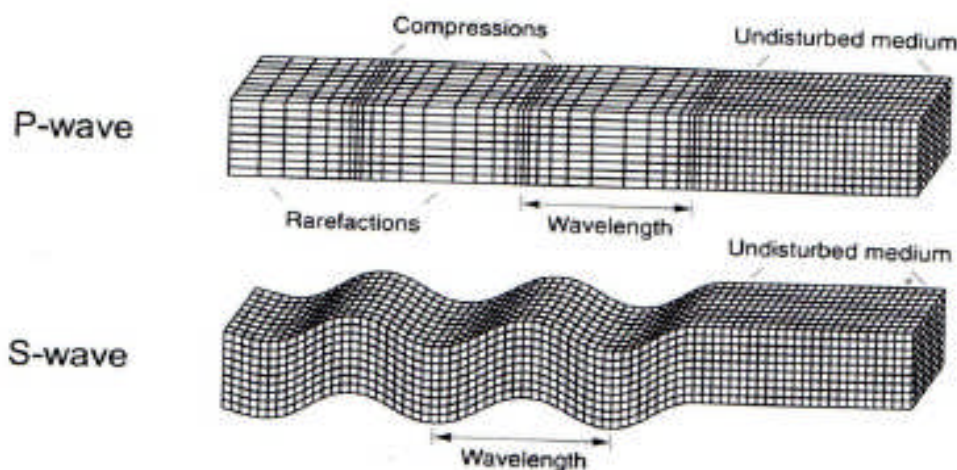


Fig. IV.1. Déformation produite par des ondes de volume.

B) Les ondes de surface:

Les ondes de surface proviennent de l'interaction entre les ondes de volume et la couche de sol proche de la surface, dans laquelle elles se propagent avec des amplitudes qui diminuent fortement avec la profondeur.

L'onde de surface la plus souvent utilisée dans les reconnaissances des sols est l'onde de Rayleigh, qui est une onde de très énergétique composée de mouvements verticaux et horizontaux combinés. Les particules suivent un parcours d'une forme ellipsoïdale dont le mouvement, au point culminant, est dans le sens opposé à la propagation. La vitesse de propagation des ondes de Rayleigh est toujours légèrement inférieure à celle de des ondes de cisaillement et, selon le coefficient de poisson, elle varie d'environ $0.90V_s$ (dans les milieux rigides) à $0.95 V_s$ (dans les milieux mou) voir (Fig. IV.2).

Dans un milieu semi-homogène et élastique, il ne peut y avoir que des ondes-P, des ondes de Love peuvent exister aussi. Les ondes de Love sont essentiellement les ondes de cisaillement avec un mouvement des particules parallèles à la surface du milieu semi-infini et perpendiculaire à la direction de propagation. Selon la fréquence, leur vitesse de propagation est comprise entre la vitesse des ondes-S dans le milieu semi-infini (à basse fréquence) et la vitesse des ondes -s dans la couche supérieure (à la haute fréquence).

Il existe d'autres types d'ondes de surface, mais les ondes de Rayleigh et de love sont les plus importantes d'un point de vue génie sismique et géophysique.

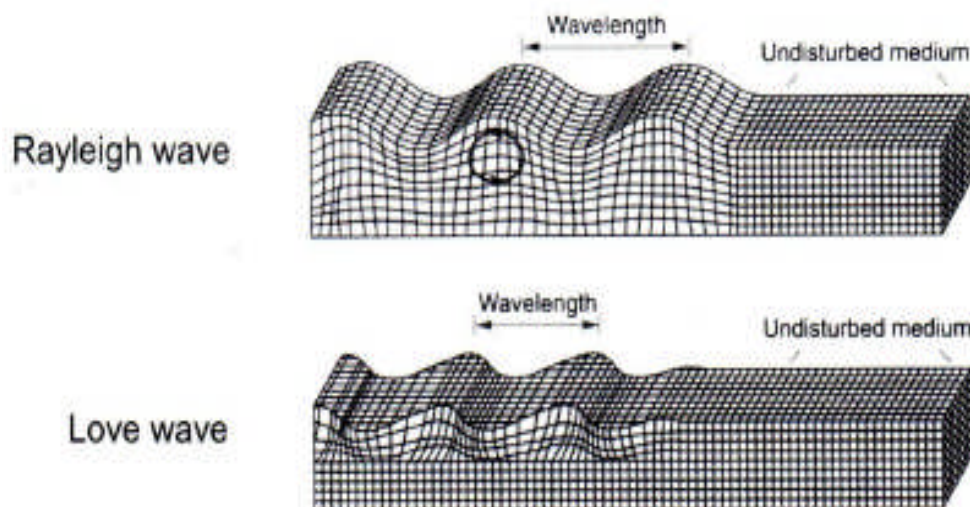


Fig. IV.2. Déformations produites par des ondes de surfaces.

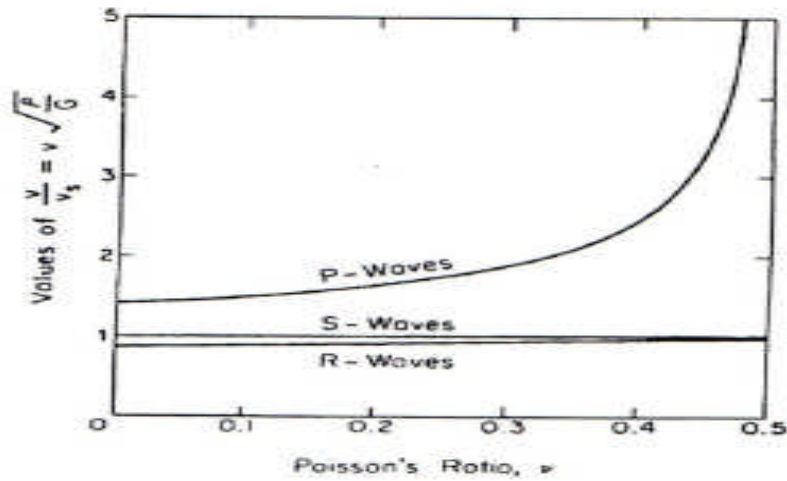


Fig. IV.3. vitesse de propagation des ondes sismique en fonction du coefficient de poisson.

IV.3.propagation dans un milieu monphasique:

Considérant que le sol est un milieu élastique, homogène et isotrope.La propagation des ondes sismique dépend des caractéristiques mécaniques du milieu ; Le module de Young (E), le coefficient d poisson (ν), le coefficient de Lamé (λ, μ) ainsi que de sa masse volumique(ρ) que conformément à la loi de Hooke.

Les relations contraintes déformations peuvent s'écrire sous la forme suivante :

$$\sigma_x = \lambda \epsilon_x + 2\mu \epsilon_x \quad [IV1]$$

où λ et μ sont les paramètres de Lamé définis par :

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad [IV2] \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad [IV3]$$

Les déformations sont reliées aux déplacements par la relation suivante :

$$\epsilon_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad [IV4]$$

On a aussi la seconde loi de Newton, ou le principe fondamentale de la dynamique, qui pour un milieu continu sans forces volumiques s'écrit :

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \dots \quad [IV5]$$

En manipulant les trois équations [IV 1] [IV 4] [IV5], on aboutit à l'expression suivant :

$$\left(\lambda + \mu \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad [IV 6]$$

Si maintenant on se place dans les axes cartésiens et on considère le cas d'une onde de compression se propageant parallèlement à Ox (i.e. avec un déplacement U_y , dépendant uniquement de X, et avec U_x et $U_z=0$), l'expression devient :

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \right) \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad [IV 7]$$

De la même manière, si l'on considère le cas d'une onde de cisaillement plane se propageant parallèlement à O_y avec une oscillation dans le sens O_x (avec un déplacement, U_x , indépendant de y et Z , et avec U_y et $U_z=0$), l'expression devient :

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} = \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad [IV 8]$$

Ces deux équations sont de la même forme :

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} = \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad [IV 9]$$

Dont une solution, appelée la solution d'Alembert, est :

$$u = f(x-ct) + g(x+ct) \quad [IV 10]$$

Dans cette solution, c est la vitesse d'onde et, ainsi, pour les ondes-P on obtient :

$$v_p = \frac{\lambda}{T} = \frac{\lambda}{\frac{2\pi}{\omega}} = \frac{\omega \lambda}{2\pi} \quad [IV 11]$$

De même, on obtient pour les ondes-S :

$$v_s = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega \lambda}{2\pi} \quad [IV 12]$$

A partir de ces équations, on parvient donc à exprimer les modules dynamiques du milieu en fonction des vitesses de propagation et la masse volumique du milieu :

Le coefficient de Poisson Le module de Young Le module de cisaillement

$$\left| \begin{aligned} &= \frac{\lambda + 2\mu}{2} \mathbf{E} = \rho v_p^2 \\ &= \mu \mathbf{G} = \rho v_s^2 \end{aligned} \right|$$

Pour un déplacement sismique déduit des mesures u la déformation e est donnée par:

$$e = 2\pi u / \lambda \text{ (avec } \lambda \text{ longueur d'onde).}$$

IV.4.ESSAI DOWNHOLE

IV.4.1. Principe de l'essai :

Dans la technique de diagraphie sismique **Downhole**, la déformation est produite en surface et les ondes se propagent en ligne droite entre le point d'impact et un capteur situé dans le trou de forage.

L'essai Down-Hole consiste à mesurer les temps de propagation des ondes sismiques de compression (ondes P) et de cisaillement (ondes S) entre plusieurs sondages afin de déterminer, en fonction de la profondeur, leurs vitesses sismiques à l'aide de géophones, le signal perçu est transformé en une onde électrique laquelle est enregistrée au moyen d'un sismographe numérique à plusieurs canaux, donnant ainsi des informations sur les variations lithologiques du terrain étudié, et sur les paramètres géodynamiques.

Selon les règles parasismiques algériennes (RPA 1999 version 2003), les vitesses des ondes de cisaillement peuvent être utilisées pour la classification du site, en utilisant l'expression suivante :

$$= \frac{\sum}{\sum (-)}$$

Avec :

V_{si}: Vitesse d'onde de cisaillement à travers la couche (i) d'épaisseur (h_i).

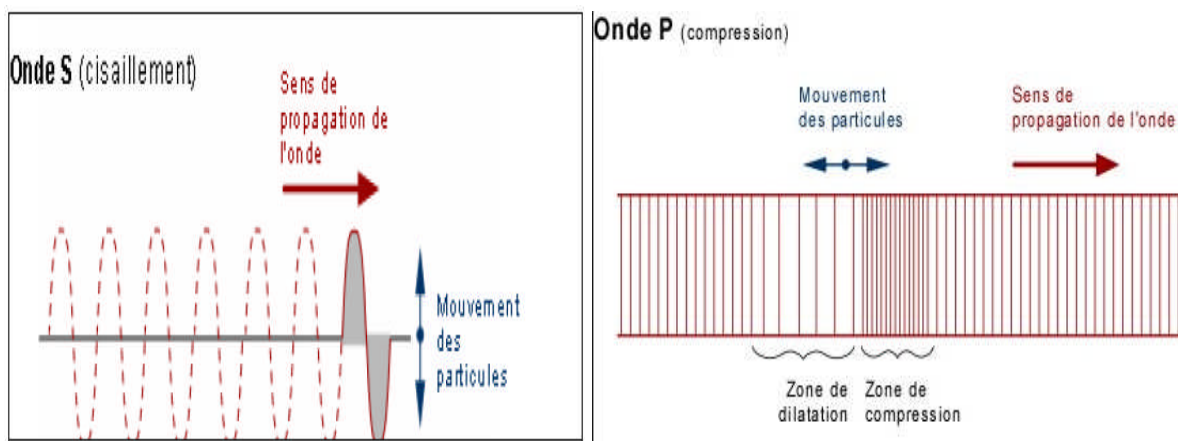


Fig. IV.4 : Allure de l'onde de cisaillement V_s et de compression V_p.

Sur la (Fig. IV.5) une illustration du dispositif de mesure utilisé pour diagraphie Downhole et son fonctionnement.

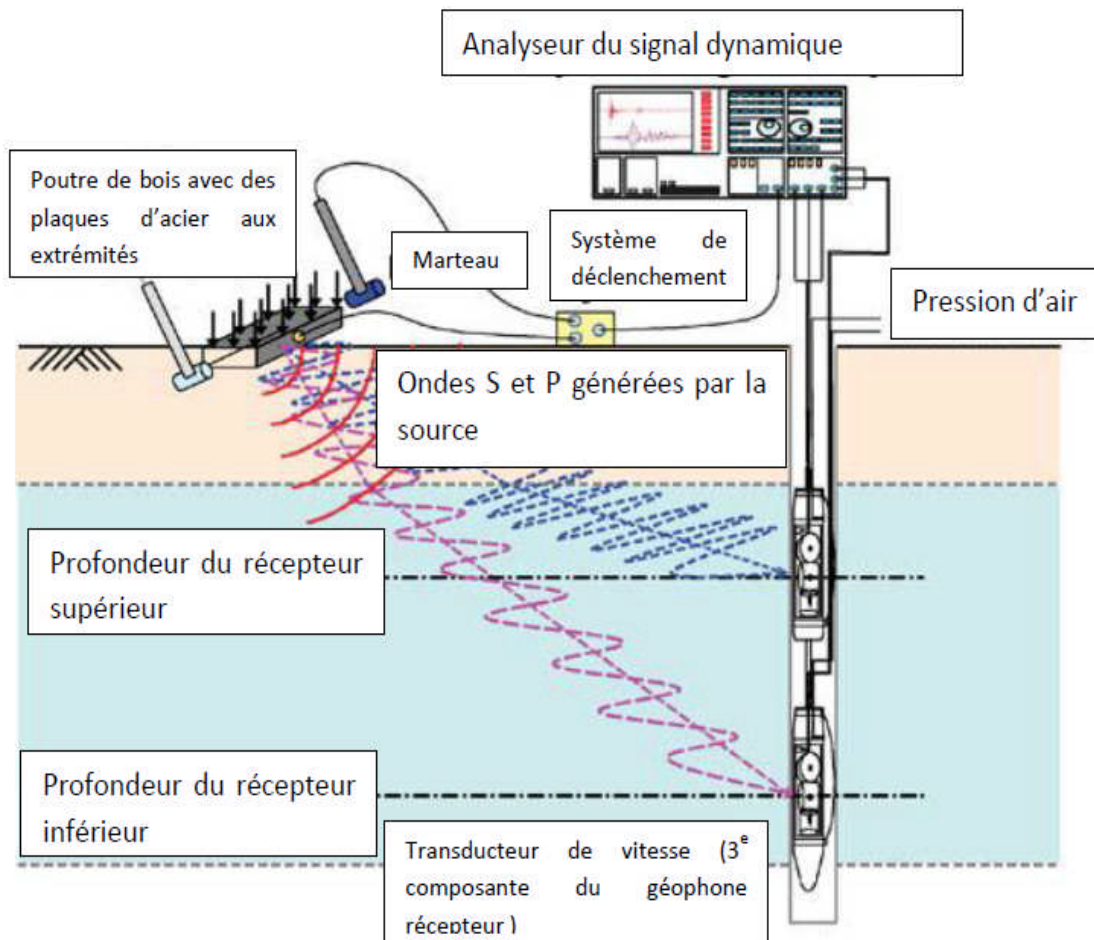


Fig. IV.5. Diagramme schématique du dispositif pour l'essai Downhole.

IV.4.2. Enregistrement des résultats :

Suite à l'essai, nous obtenons un enregistrement qui montre la forme des ondes perçues par chacun des 3 géophones. En déplaçant le capteur selon une séquence régulière une série de mesures pour la longueur totale des trous est obtenue. Pour procéder à l'analyse de la vitesse de propagation, il faut d'abord reconstruire un enregistrement composite pour toute la longueur du trou, comme s'il s'agissait d'un seul enregistrement à plusieurs canaux. En lisant le signal obtenu pour chaque canal, et pour chaque enregistrement, et en construisant un enregistrement composite qui montre l'ensemble des enregistrements d'un même canal en fonction de la profondeur de mesure, il est alors possible de procéder à la réduction des données.

La (Fig. IV.6) montre un modèle d'enregistrement composite typique (un enregistrement d'un essai Downhole enregistré dans la région d'Alger est présenté Ci-dessous).

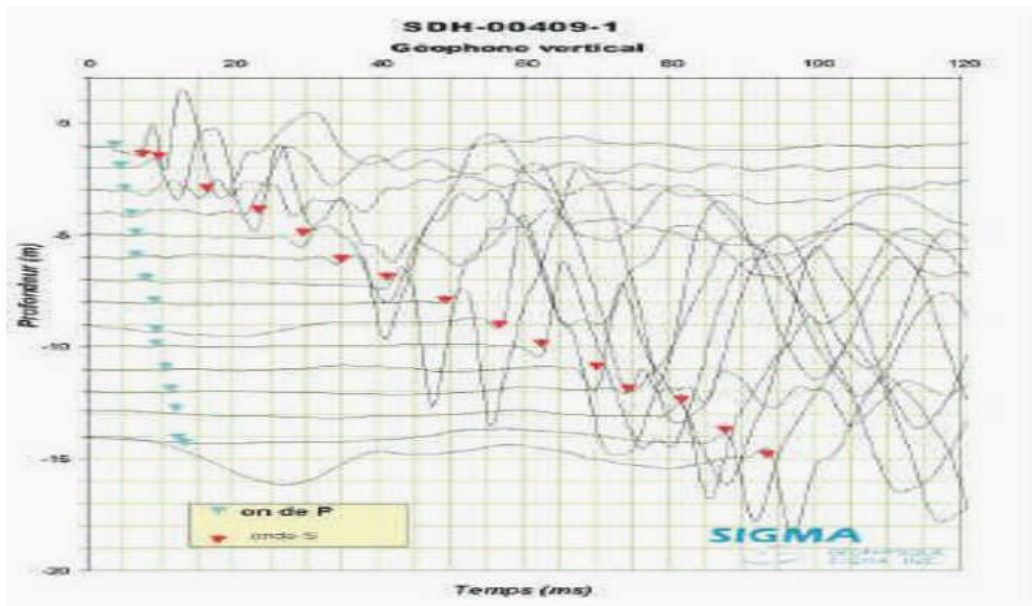


Fig. IV.6. Enregistrement composite typique.

Pour obtenir la vitesse de propagation des ondes P et S, on détermine pour chaque trace, le temps d'arrivée de ces deux types d'onde. Puisque que l'émetteur des ondes sismiques est placée généralement entre 0.5 à 3m du sondage où le géophone est placé à différentes profondeurs, le rapport du temps d'arrivée mis par les ondes S et P sur la distance verticale (profondeur), de chaque mesure, donne les vitesses de propagations P et S, qui sont des vitesses non corrigées.

Une correction doit être portée à chaque fois en calculant l'angle entre la verticale qui passe par le sondage et la droite qui passe par le géophone et la source de l'onde sismique. Ainsi calculer les temps d'arrivées des ondes S et P suivant la verticale, ensuite calculer les vitesses d'ondes S et P corrigées.

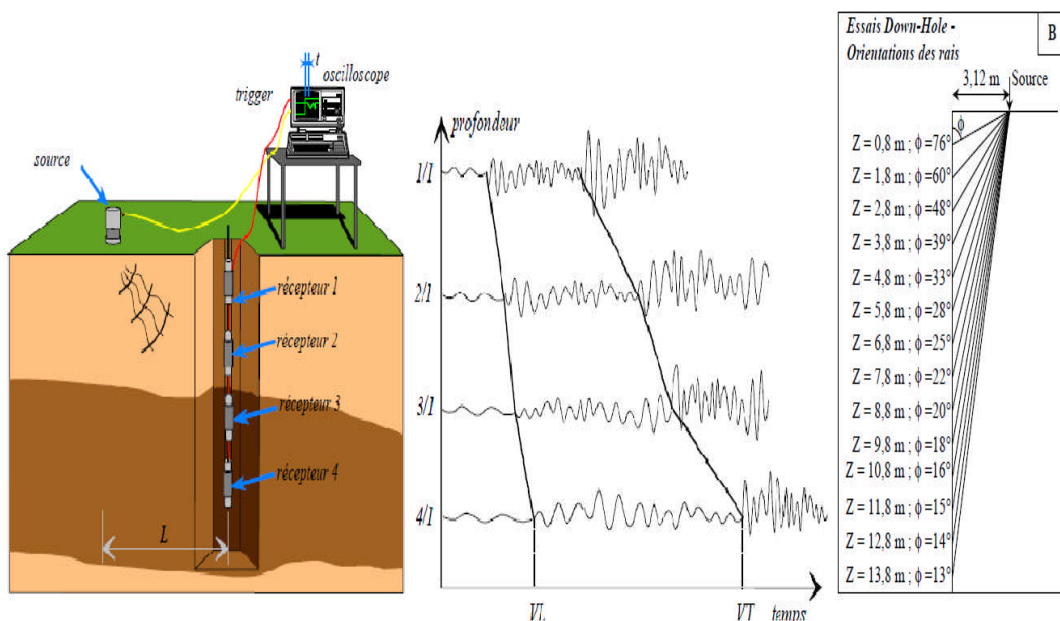


Fig. IV.7. Enregistrement et correction des vitesses d'ondes-S et P.

A partir de ces mesures, on construit une Dromochronique (graphique du temps de parcours en fonction de la distance) pour l'onde P et pour l'onde S. La vitesse de propagation est ensuite obtenue en mesurant l'inverse de la pente de chacun des segments de droite de la Dromochronique.

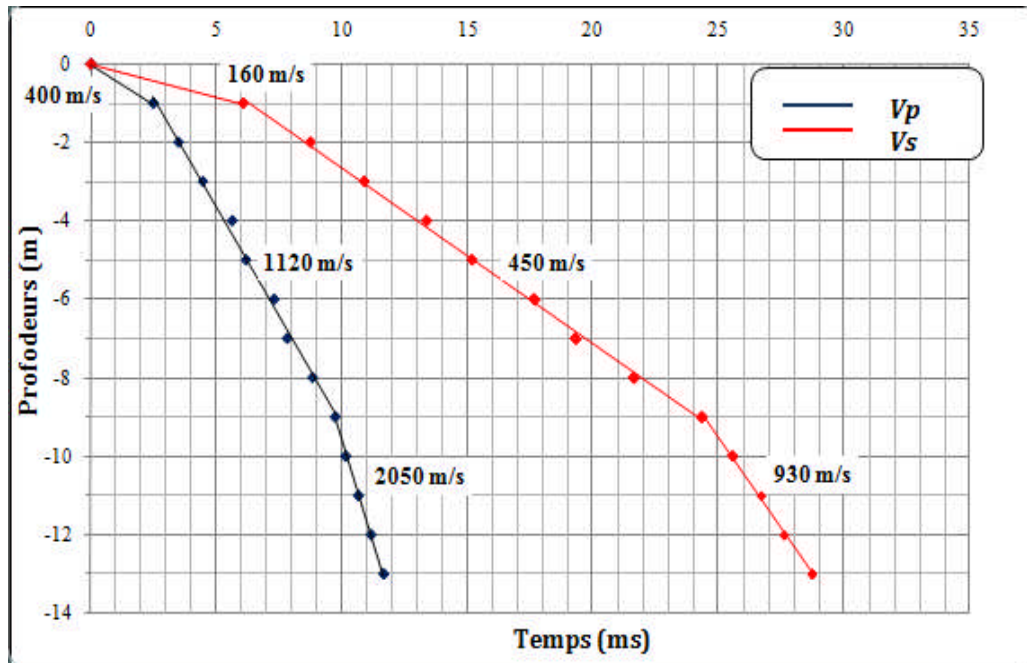


Fig.IV.8. Courbe des vitesses d'ondes S et P.

IV.4.2. Précision des résultats :

La précision des résultats des paramètres dynamiques de l'essai downhole en utilisant la méthode de diaggraphie sismique dépend principalement de la précision des mesures de vitesse et de celle de la mesure de la densité.

La précision sur la mesure de la vitesse est proportionnelle à la précision sur la mesure du temps et de la précision.

Dans le cas de la diaggraphie surface à trou, la précision est difficile à évaluer. En prenant pour acquis que les ondes se propagent en ligne droite entre la source et le capteur, et que les conditions de bruit et d'atténuations propres au site permettent d'obtenir un signal de grande qualité (riche en haute fréquence et exempt de bruit parasite qui viendrait masquer le signal).

Cependant, dans certains cas difficiles, (bruit de fond très intense, atténuation très forte du signal dans le sol), le signal de haute fréquence nécessaire à une bonne précision est inexistant. Conséquemment, dans ces cas comme le signal utilisable est de basse fréquence, la précision quant à la détermination du temps d'arrivée des ondes est donc diminuée. Compte tenu de l'ordre de grandeur des vitesses, la précision sur la détermination des vitesses et des modules en sera réduite d'autant.

IV.4.3. Catégories et Critères de classification :

Les sites sont classés en quatre (04) catégories en fonction des propriétés mécaniques des sols qui les constituent.

Catégorie S1 (site rocheux) :

- Roche ou autre formation géologique caractérisée par une vitesse moyenne d'onde de Cisaillement (V_s) ³ à 800m/s.

Catégorie S2 (site ferme) :

- Dépôts de sables et de graviers très denses et/ou d'argile surconsolidée sur 10 à 20 m d'épaisseur avec V_s ³ 400 m/s à partir de 10 m de profondeur.

Catégorie S3 (site meuble) :

- Dépôts épais de sables et graviers moyennement denses ou d'argile moyennement raide avec V_s ³ 200 m/s à partir de 10 m de profondeur.

Catégorie S4 (site très meuble) :

- Dépôts de sables lâches avec ou sans présence de couches d'argile molle avec $V_s < 200$ m/s dans les 20 premiers mètres.

- Dépôts d'argile molle à moyennement raide avec $V_s < 200$ m/s dans les 20 premiers mètres.

Par ailleurs, outre les valeurs des vitesses d'ondes de cisaillement, les valeurs moyennes harmoniques d'autres résultats d'essais (pénétromètre statique, SPT, pressiomètre...) peuvent être utilisées pour classer un site selon le tableau suivant :

Tableau IV.1. Classification des sols selon RPA 99 modifié 2003.

Catégorie	Description	q_c (MPa) (c)	N (d)	p_l (MPa) (e)	E_p (MPa) (e)	q_u (MPa) (f)	V_s (m/s) (g)
S ₁	Rocheux (a)	-	-	>5	>100-	>10	≥800
S ₂	Ferme	>15	>50	>2	>20	>0.4	≥400 - < 800
S ₃	Meuble	1.5 ~ 15	10 ~ 50	1 ~ 2	5 ~ 20	0.1 ~ 0.4	≥200 - < 400
S ₄	Très Meuble ou Présence de 3m au moins d'argile molle (b)	<1.5	<10	<1	<5	< 0.1	≥100 <200

Conclusion :

Les moyennes géophysiques à la disposition du géotechnicien sont très variées. En l'absence de référence normative, des recommandations pour leur mise en œuvre ont été rédigées par la profession [AGA96].

Deux types principaux d'objectifs peuvent être poursuivis de manière parallèle ou disjointe : le zonage des matériaux ou leur caractérisation mécanique en place.

Les méthodes sismiques s'adaptent à l'un comme à l'autre. En règle générale, les méthodes les plus simples décrivent un milieu supposé à une dimension. Des techniques plus sophistiquées donnent accès à des descriptions à 2D. De fortes hétérogénéités à trois dimensions sont donc dans ces conditions difficilement interprétables.

Introduction :

Dans ce présent chapitre, nous procédons à la présentation et l'interprétation des résultats des essais in situ, des essais de laboratoire à prendre en considération dans cette étude, et aussi les résultats de l'essai géophysique Downhole, réalisés au P.O.S sud de Ouled Fayet et fournissablement par le LNHC.

Les résultats présentés seront l'objet de l'étude des corrélations entre les paramètres des essais reconnaissances géotechniques in situ et ceux de l'essai Downhole réalisé sur la région d'étude, et une base de données avec laquelle on jugera le sol suivant différents tableaux de classifications.

V.1. Interprétation des essais géotechnique :

V.1.1. Interprétation des résultats et des essais IN SITU:

V.1.1.1 Sondages carottés :

L'ensemble des résultats des 23 sondages réalisés sur le plateau Sud d'Ouled Fayet ont permis de mettre en évidence la présence d'une couche de terre végétale variant entre (0.2 à 0.6)m d'épaisseur rencontrée au niveau de tous les sondages à l'exception du sondage Sc08 qui présente une couche de remblais de 0.4m. Les profondeurs d'investigation des sondages carottés, étalés sur la surface du projet, varient de 12 à 30m.

Chaque sondage, permis aussi d'identifier la nature des formations géologiques avec leurs épaisseurs respectives ainsi déterminer les niveaux piézométriques. Selon la description visuelle faite à partir des sondages carottés et des forages à la tarière. Le sol est constitué essentiellement par une formation de marne beige à grise. A cette formation succède une formation marneuse bariolée parfois grise fissurée suivie par une formation d'argile limoneuse ou marneuse parfois caillouteuse beige à marron, l'ensemble est recouvert par une couche de terre végétale.

V.1.1.2. Essais au Pénétromètre dynamique :

L'analyse des pénétrogrammes corrélés aux sondages carottés a mis en évidence une couche de terre végétale d'épaisseur variant de 0,4 à 1 m. Elle présente une résistance dynamique de pointe moyenne variant de 15 à 50 bars, suivie d'une couche argileuse généralement peu marneuse d'une épaisseur variant de 1 à 5 m caractérisée par la résistance dynamique de pointe moyenne allant de 50 à 80 bars. À partir de 5m de profondeur on constate la présence d'une couche marneuse bariolée et parfois grise fissurée qui peut atteindre 250 bars.

Dans la couche argileuse on a enregistré des valeurs de résistance dynamique qui touchent parfois 150 bars sans atteindre le refus, Ce qui explique la probabilité de présence d'une couche argileuse caillouteuse.

V.1.1.3. Essais pénétromètre statique:

L'analyse des pénétrogrammes obtenus lors de la campagne de reconnaissance géotechnique a permis de noter que les valeurs de la résistance de pointe varient en fonction de la compacité du sol en place et en fonction de la profondeur et qu'elles se présentent en dents de scie ; le refus est atteint à des profondeurs variables.

Tableau. V.1. Résultats de l'essai au pénétromètre statique(CPT).

Essai	Profondeur (m)	Résistance en pointe(MPa)	Frottement total (KN)
01	1	4,09	4,94
	2	4,03	14,6
	3	4,34	27,5
	4	4,49	39,6
	5	4,47	47,8
	6	4,82	54,2
	7	4,67	60,6
	8	5,16	65,6
	9	5,64	71,8
	10	4,48	76,1
	11	4,09	80,7
	12	4,03	86,3
Essai	Profondeur (m)	Résistance en pointe(MPa)	Frottement total (KN)
02	1	2,21	6,13
	2	3,11	10,72
	3	3,39	15,21
	4	4,85	23,47
	5	3,77	31,44
	6	3,85	39,94
	7	4,45	46,92
	8	3,95	53,86
	9	4,29	59,17
	10	3,98	63,02
	11	5,73	69,86
	12	6,65	73,52

V.1.1.4. Essais préssiométriques :

Les valeurs du module pressiométrique « E_p » et de la pression limite « PI » ainsi que celle du rapport « E_p/PI » et « α » sont reportées sur le tableau suivant :

Tableau. V.2. Résultats de l'essai préssiométrique Menard.

Sp (i)	E (Bar)	PI (Bar)	E/PI	α	Etat de consolidation
SP01	53.12-174.31	5.98-14.72	9.78	2/3	Normalement consolidé
SP03	61.01-311.86	6.31-17.05	11.70	2/3	Normalement consolidé
SP04	7.09-163.31	0.98-14.86	10.23	2/3	Normalement consolidé
SP05	63.58-359.09	5.21-18.65	13.73	2/3	Normalement consolidé
SP07	33.83-303.49	3.98-22.16	12.46	2/3	Normalement consolidé
SP09	106.68-395.80	13.60-21.19	13.56	2/3	Normalement consolidé
SP11	73.72-261.90	6.19-14.59	11.52	2/3	Normalement consolidé
SP13	84.40-534.34	7.33-395.80	11.67	2/3	Normalement consolidé
SP17	53.73-416.76	7.25-16.06	14.05	2/3	Normalement consolidé
SP18	10.32-355.06	1.20-21.31	11.00	2/3	Normalement consolidé
SP19	59.66-404.83	4.39-19.19	14.21	2/3	Normalement consolidé
SP20	47.53-969.21	4.23-39.82	16.19	2/3	Normalement consolidé

L'interprétation des résultats obtenus révèle que le terrain et suivant sa lithologie est caractérisé par un rapport E_p/PI qui varie entre 9 et 16, ce qui correspond à un sol normalement consolidé.

Classification du site :

Le tableau suivant résume des valeurs calculées des moyennes harmoniques du module pressiométrique (E_p) et de la pression limite (PI) pour chaque pressiomètre, ainsi que la classification de site d'après le RPA 99 version 2003.

Tableau V.3. Classification du site suivant les résultats préssiométriques (RPA 99 version 2003).

	E (moyen)(Bar)	PI (moyenne)(Bar)	Classe selon le RPA
SP01	111.56	11.34	(S ₃) Site meuble
SP03	150.91	12.89	(S ₃) Site meuble
SP04	67.59	7.16	(S ₂) Site ferme
SP05	167.17	11.98	(S ₃) Site meuble
SP07	137.25	11.11	(S ₃) Site meuble
SP09	216.98	15.76	(S ₃) Site meuble
SP11	125.14	10.82	(S ₃) Site meuble
SP13	250.64	21.02	(S ₂) Site ferme
SP17	180.24	12.55	(S ₃) Site meuble
SP18	129.36	11.37	(S ₃) Site meuble
SP19	207.25	14.38	(S ₃) Site meuble
SP20	338.70	18.71	(S ₃) Site meuble

Selon la classification du RPA 99 modifié 2003, le site est classé dans la catégorie **(S₃) Site meuble.**

V.1.1.5. Niveau piézométrique :

Le piézomètre est formé par de simples tubes en PVC, qui permettent depuis la surface d'accéder à l'eau d'une **nappe phréatique**. Ils permettent d'en relever le **niveau piézométrique** à l'aide d'une sonde électrique.

Ils sont aussi utilisés afin de réaliser des prélèvements d'eau de la nappe (ou d'un cours d'eau...) dans le but d'en analyser les composants.

Le principe est de réaliser un sondage carotté à une profondeur donnée, puis enfonce le tube en PVC (munie par des trous dans son extrémité inférieure) à la même profondeur.

Les parois de contact entre le tube et le sol foré sont colmatées par un matériau drainant (sable). En surface le tube est fermé par un bouchant afin de le préserver.

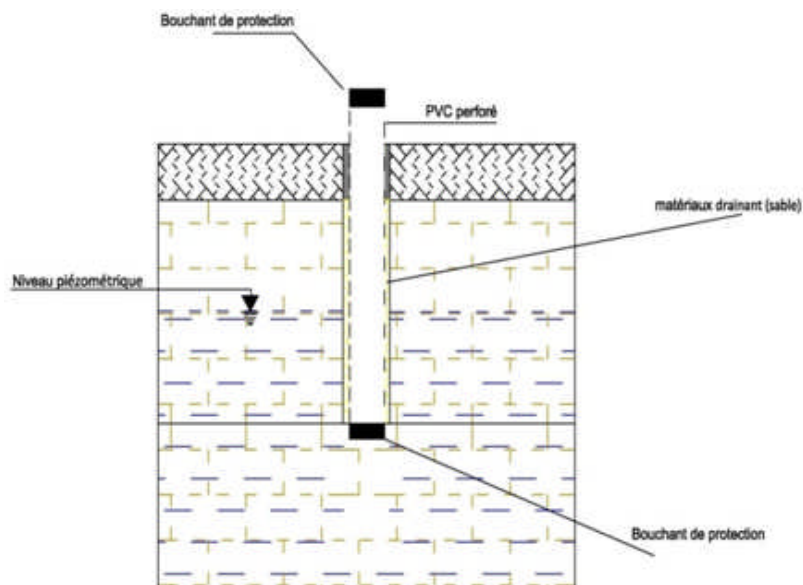


Fig. V.1. Schéma d'installation du tube piézométrique.

Le niveau d'eau relevé par le piézomètre placé au niveau du sondage SC04, ainsi qu'au niveau de certains essais pénétrométriques est donné comme suit :

Tableau. V.4. niveau piézométrique dans les sondages.

Date et n° essai	Niveau d'eau relevé (m)
SC02 08/07/2013	2
SC04 15/07/2013	3

V.1.2. Résultats et interprétations des essais de laboratoire:

V.1.2.1. Essais d'identification physique :

- **L'analyse granulométrique :**

Permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un matériau, elle est réalisée par tamisage mécanique pour les grains supérieurs à 80 μm et par sédimentation pour les particules inférieurs à 80 μm .

- **Les limites d'Atterberg :**

Sont des teneurs en eau particulières qui permettent de quantifier la plasticité du sol.

✓ La limite de liquidité (W_L) entre l'état liquide et l'état plastique ;

✓ L'indice de plasticité (I_p) est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité, il permet de définir le degré de plasticité du sol.

Les paramètres se résument dans le tableau ci-dessous :

Tableau. V.5. Résultats des essais physiques de laboratoire (1)

Ilots	Sondages	Profondeur de prélèvement (m)	Densité sèche $\gamma_d(\text{t/m}^3)$	Degré de saturation Sr (%)	Teneur en eau W(%)	Densité humide $\gamma_h(\text{t/m}^3)$
01	SC01	3.6 – 4.0	1.49	97	29.2	1.93
		5.0 – 5.4	1.41	94	32.6	1.85
		7.6 – 8.0	1.49	100	30.2	1.93
	SC013	6.2–6.6	1.58	96	25.2	1.97
04	SC12	2.2 – 2.7	1.58	90	23.7	1.95
		4.0 – 4.7	1.69	92	20.4	2.04
		7.4 – 7.8	1.54	94	26.4	1.94
05	SC10	4.0 – 4.7	1.64	100	24.3	2.04
		7.6 – 8.0	1.66	95	22	2.03
		14.6 – 15.0	1.69	95	21.1	2.05
	SC11	3.1 – 3.9	-	-	-	-
06	SC14	2.0 – 2.7	-	-	-	-
		4.4 – 5.0	-	-	-	--

Tableau. V.6. Résultats des essais physiques de laboratoire (2)

Ilots	Sc (i)	Profondeur (m)	Nature du sol	Pourcentage $e < 80$	WL%	IP%	Classification des sols fins
01	SC01	3.6 – 4.0	Argile limoneuse	93	53	27	Argile très plastique
		5.0 – 5.4		95	54	27	
		7.6 – 8.0	Marne bariolée	99	56	28	
01	SC13	6.2 – 6.60	Argile limoneuse sableuse à graveleuse	96	51	26	Argile très plastique
04	SC12	2.2 – 2.7	Argile limoneuse	86	48	24	Argile très plastique
		4.0 – 4.7	Argile limoneuse	88	49	24	Argile très plastique
05	SC10	4.0 – 4.7	Argile marneuse peu limoneuse	98	55	28	Argile très plastique
		7.6 – 8.0	Marne peu limoneuse	99	29	30	
		14.6 - 15.0	Marne peu limoneuse	98	55	28	
	SC11	-	-	-	-	-	-
06	SC14	2.0 – 2.7	Argile limoneuse beige	91	50	25	Argile très plastique
		4.4 – 2.0		92	52	26	
	SC20	-	-	-	-	-	-

V.2. Interprétation des essais géophysiques :

V.2.1. Interprétation des résultats de l'essai Downhole :

Les mesures des essais Downhole ont été effectuées au niveau des sondages carottés Sc 03, Sc05, Sc 06, Sc 04, Sc 09, et Sc 11 et nous ont permis d'obtenir des valeurs de la vitesse de compression V_p et de la vitesse de cisaillement V_s et les résultats obtenus sont présentés sous la forme V_s en fonction de la profondeur, ou $V_s = f(P)$ ou $V_p = f(P)$.

Les valeurs de V_s sont inférieures à celles de V_p et sont présentées comme suit sur la (Fig. V.2), (Fig. V.3) et (Fig. V.4): résultats des vitesses V_s et V_p (m/s) en fonction de la profondeur.

Sondage SC 03:

L'interprétation de l'essai downhole a permis de mettre en évidence trois terrains, la stratigraphie des couches reconnues du site se présente comme suit :

- ✓ Le terrain superficiel, allant jusqu'à 1m de profondeur présente une vitesse d'onde de compression V_p d'ordre de 760m/s et une vitesse de cisaillement V_s de 290m/s.
- ✓ Le terrain sous adjacent, avec une épaisseur de 3m, présente une vitesse d'onde de compression V_p d'ordre de 1240m/s et une vitesse de cisaillement V_s de 540m/s.
- ✓ Un troisième terrain qui présente une vitesse d'onde de compression V_p d'ordre de 2500m/s et une vitesse de cisaillement V_s de 1130m/s, avec une profondeur allant jusqu'à 18m.

Tableau. V.7 Récapitulatif des résultats de l'essai Downhole Sc03.

Profondeur (m)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (g/cm ³)	ν	G (Mpa)	E (Mpa)	K (Mpa)
0.00 - 1.00	760	295	1,64	0,414792	137,924	390,268	763,365
1.00 - 4.00	1400	520	1,66	0,393308	448,864	1250,812	1953,931
4.00 - 11.00	2460	1130	1,69	0,371619	2157,961	5919,802	7685,219

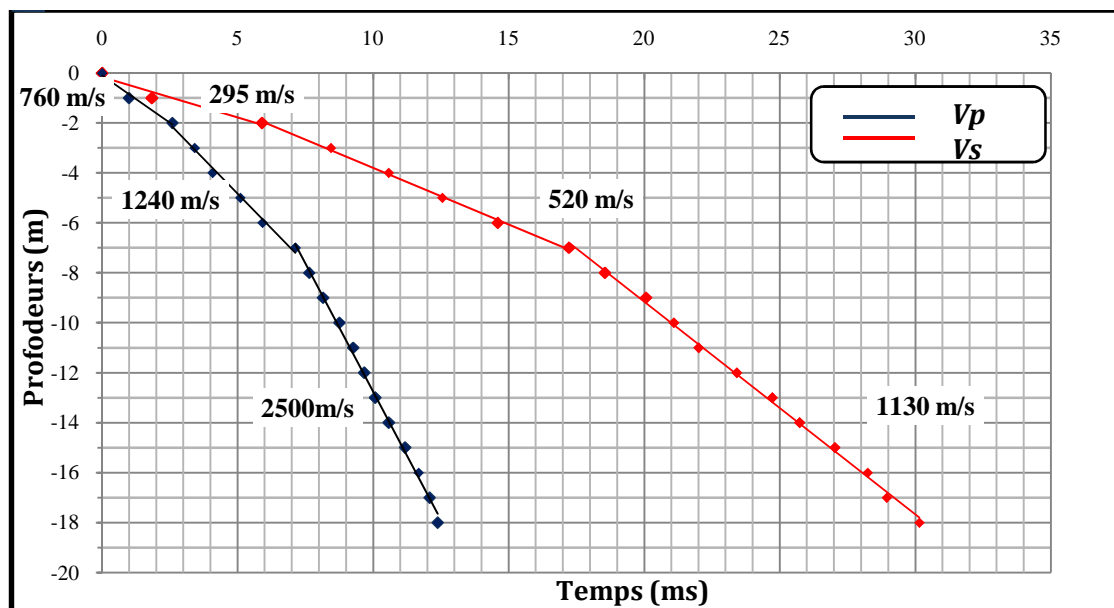


Fig. V.2. Courbe des vitesses V_s et V_p pour le sondage Sc03.

Sondage SC 05:

L'interprétation de l'essai downhole a permis de mettre en évidence trois terrains, la stratigraphie des couches reconnues du site se présente comme suit :

- ✓ Le terrain superficiel, allant jusqu'à 1m de profondeur présente une vitesse d'onde de compression V_p d'ordre de 710m/s et une vitesse de cisaillement V_s de 230m/s.

- ✓ Le terrain sous adjacent, avec une épaisseur de 9m, présente une vitesse d'onde de compression V_p d'ordre de 1450m/s et une vitesse de cisaillement V_s de 650m/s.
- ✓ Un troisième terrain qui présente une vitesse d'onde de compression V_p d'ordre de 2400m/s et une vitesse de cisaillement V_s de 1180m/s, avec une profondeur allant jusqu'à 12m.

Tableau. V.8. Récapitulatif des paramètres de l'essai Downhole Sc05.

Profondeur (m)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (g/cm ³)	V	G (Mpa)	E (Mpa)	K (Mpa)
0.00 - 1.00	670	230	1,64	0,433207	86,756	248,679	620,521
1.00 - 10.00	1470	650	1,66	0,374256	701,350	1927,669	2555,017
10.00 - 12.00	2700	1180	1,72	0,340599	2394,928	6421,276	6713,963

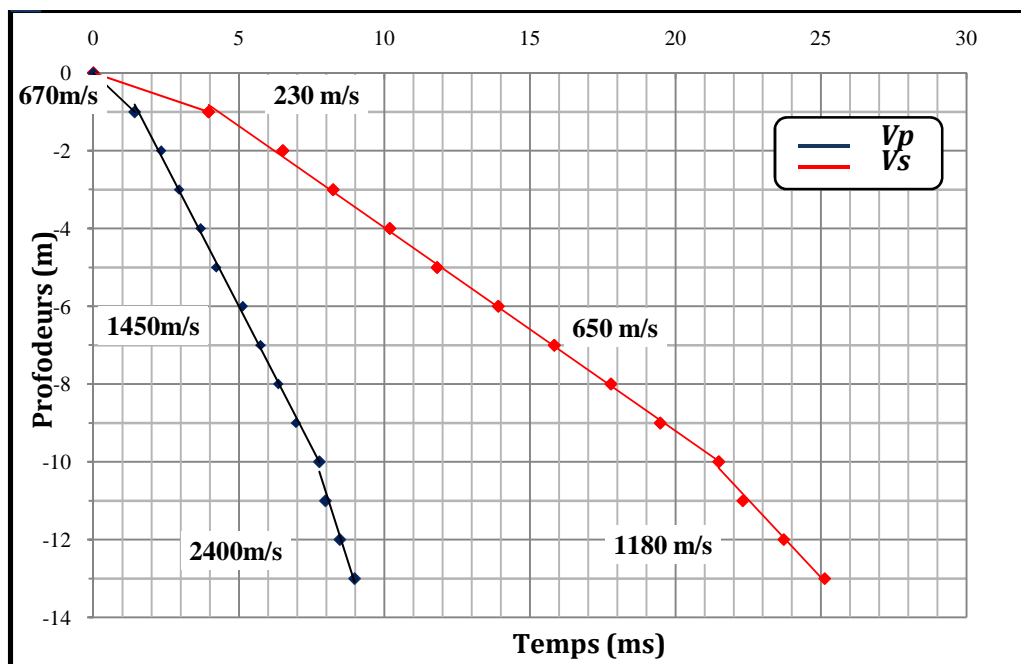


Fig. V.3. Courbe des vitesses V_s et V_p pour Sc05.

Sondage SC 06:

L'interprétation de l'essai downhole a permis de mettre en évidence trois terrains, la stratigraphie des couches se présente comme suit :

- ✓ le terrain superficiel, allant jusqu'à 1m de profondeur présente une vitesse d'onde de compression V_p d'ordre de 860m/s et une vitesse de cisaillement V_s de 350m/s.

- ✓ Le terrain sous adjacent, avec une épaisseur de 4m, présente une vitesse d'onde de compression V_p d'ordre de 1230m/s et une vitesse de cisaillement V_s de 540m/s.
- ✓ un troisième terrain qui présente une vitesse d'onde de compression V_p d'ordre de 2650m/s et une vitesse de cisaillement V_s de 1220m/s, avec une profondeur allant jusqu'à 17m.

Tableau. V.9 Récapitulatif des paramètres de l'essai Downhole Sc06.

Profondeur (m)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (g/cm ³)	ν	G (Mpa)	E (Mpa)	K (Mpa)
0.00 - 1.00	860	350	1,64	0,400745	200,900	562,820	945,077
1.00 - 5.00	1230	540	1,66	0,380619	484,056	1336,594	1866,006
5.00 - 11.00	2650	1220	1,69	0,365525	2515,396	6869,671	8514,164

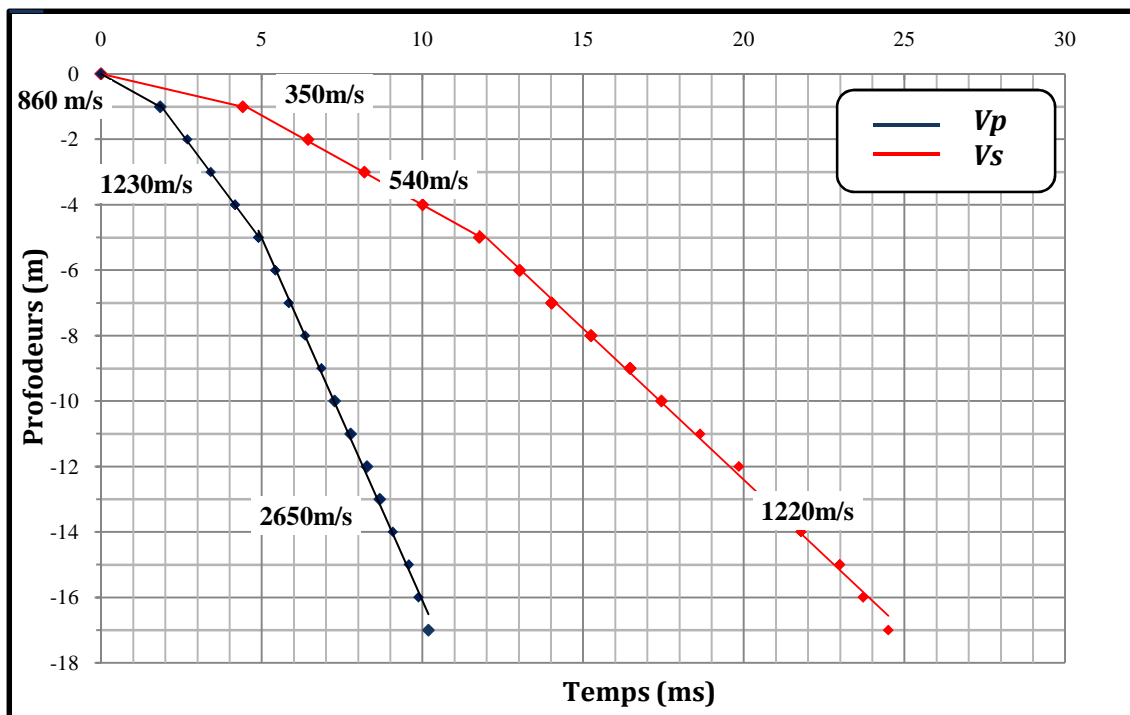


Fig. V.4. Courbe des vitesses V_s et V_p pour Sc06.

V.2.2. Discussion des résultats :

L'analyse des résultats de Sc03, Sc05 et Sc06 permet de montrer que les paramètres géophysiques présentent les mêmes tendances de variations avec la profondeur. Ce résultat est tout à fait prévisible puisque ces paramètres sont très liés les uns aux autres. Nous constatons, également, la présence de 3 couches distinctes qui sont mises en évidence par les sondages carottés (Sc03, Sc05 et Sc08).

Les vitesses des ondes de cisaillement peuvent être utilisées pour la classification du site en utilisant l'expression suivante :

$$\dot{V}_S = \frac{\sum_j^n h_i}{\sum_j^n \frac{h_i}{V_{si}}} = m / s$$

Où :

- V_{si} : Vitesse d'onde de cisaillement à travers la couche N°i.

- h_i : L'épaisseur de la couche i.

$\dot{V}_S = 766 \text{ m/s}$ Pour le Sondage SC03 → S2.

$\dot{V}_S = 757 \text{ m/s}$ Pour le Sondage SC05 → S2.

$\dot{V}_S = 804 \text{ m/s}$ Pour le Sondage SC08 → S2.

Le calcul précédent nous a permis de classer le sol selon les règles parasismiques Algérienne (RPA 1999 version 2003) en catégorie **S2 (Sol Ferme)**.

Conclusion :

Etablir une étude de corrélation entres les paramètres demande de recueillir toutes les données à utiliser dans les équations de corrélations ainsi celles qui influencent sur la variation des paramètres de ces équations.

Dans ce chapitre nous avons résumé et interprété les résultats des 04 essais in situ (sondage carotté, essai au pénétromètre statique CPT, essai au pénétromètre dynamique SPT, essai pressiométrique Menard, essais de laboratoire (essais physique) et essai géophysique Downhole.

De point de vue global, les essais réalisés ont permis de mettre en évidence les différentes couches de sol de la région d'étude, ainsi leurs profondeurs et leurs caractéristiques mécaniques. Les résultats obtenus se confirment entre eux et classent le sol dans la même catégorie.

Introduction :

Dans l'hypothèse que soit étalée l'existence d'une loi de variation liant deux paramètres, il suffit alors de connaître la valeur d'un des paramètres pour en déduire celle du second. L'existence d'une telle loi de variation amène à comprendre certains aspects du comportement géotechnique du sol. Le cas contraire est tout aussi constructif.

De nombreux travaux ont été consacré à établir des corrélations entre les différents essais in situ et leurs paramètres. Ces corrélations présentent principalement trois intérêts :

- Croiser les résultats des campagnes d'essais sur le même site, ce qui permet de contrôler la qualité des essais réalisés et d'éliminer les essais douteux ou coûteux.
- Fabrication de nouvelles valeurs complémentaire de paramètres non identifiés à partir d'autres paramètres connus.
- Réduction du coût et du temps de campagnes de reconnaissances.

Cependant l'utilisation des corrélations requiert des précautions particulières .En effet, il faut bien cerner le domaine de validité des corrélations utilisées, notamment la nature du sol ainsi que ses caractéristiques physico-mécanique et les conditions de chargements, degrés de consolidation, de compacité et de saturations...etc. Il faut également éviter d'utiliser les corrélations dans des sols hétérogènes; Par ailleurs, il faudra utiliser des corrélations entre des paramètres ayant des liens physiques et encore mieux sur le même sol.

Ce chapitre est consacré à établir des corrélations proposées entre les essais in situ. Il est composé de deux parties :

- **La première partie** : présente principalement les corrélations entre la vitesse de l'onde de cisaillement V_s et les paramètres géotechniques N de l'essai au Standard Pénétration Test et de la résistance en pointe q_c de l'essai au pénétromètre statique ou CPT. D'autres corrélations, visant à lier les paramètres géophysiques tels que V_p , G , E et K avec les mêmes paramètres géotechniques N et q_c , ont été établies.

Pour l'étude des corrélations des paramètres géophysique G , E , K , V_p et V_s et les paramètres géotechniques N et la résistance de pointe q_c , il est nécessaire de déterminer l'ensemble des mesures valides obtenues à partir des essais in situ tels que l'essai Downhole, SPT et CPT.

Pour cela, nous avons :

- 1 – Sélectionné les sondages au niveau desquels les paramètres géophysiques de Downhole et N du pénétromètre SPT et qc du pénétromètre statique CPT ont été mesurés;
- 2 – Choisi un critère tel que la nature des formations géologiques de la région étudiée pour établir l'équation $V_s = f(N)$, c'est-à-dire considérer les mesures effectuées au niveau de chaque formations;
- 3 - Déterminé des équations de corrélations en appliquant le programme de calcul Excel, suivant deux approches (corrélations par progression linéaire et corrélations par progression puissance).

➤ **La seconde partie :**

Présente les corrélations entre les paramètres préssiométriques et pénétrométriques (qc, Pl, Ep). Pour l'étude des corrélations en l'occurrence qc-Pl, qc-Ep et Ep-Pl, il est nécessaire de déterminer l'ensemble des mesures valides obtenues à partir de deux essais; pressiomètre de Menard et le pénétromètre CPT.

1) Première partie :

VI.1. Traitement de Données :

Les essais in situ réalisés ont permis d'obtenir les données ou les informations suivantes :

- La stratigraphie des sols en place à partir des sondages carottés ;
- Les valeurs des paramètres géotechniques : N (SPT) et qc (CPT) ;
- Les valeurs des paramètres géophysiques V_s (vitesse de cisaillement) et V_p (vitesse de compression) et autres paramètres.

Dans l'optique d'établir des corrélations entre les paramètres géophysiques de l'essai Downhole et les paramètres géotechniques N et qc, et dans le respect des conditions de base des corrélations suscités nous avons choisi de recueillir les données des essais suivants :

- Pénétromètre dynamique P58, pénétromètre statique CPT09 et de Downhole Sc05.
- Pénétromètre dynamique P48, pénétromètre statique CPT08 et de Downhole Sc03.

Remarque : Habituellement, dans le domaine du génie civil, la couche de terre végétale ne présente pas d'intérêts d'être partie de l'étude, mais voir l'étendu du domaine d'utilisation des corrélations, nous jugeons nécessaire de l'inclure en cette étude.

Les mesures enregistrées des paramètres sont présentés comme suit :

Tableau VI.1. Données N (moy), Vs (moy) et Vp(moy) du Sc03.

Lithologie Sc03	Profondeur(m)	N moyen	V _s (m/s)	V _p (m/s)	q _c
terre végétale	0 - 1	32	295	760	0.36
Argile Limoneuse	1 - 4	62	520	1240	2.5
Marne beige à grise	4 - 11	96	1130	2500	2.48

Tableau VI.2. Données N (moy), Vs (moy) et Vp (moy) du Sc05.

Lithologie Sc05	Profondeur(m)	N moyen	V _s (m/s)	V _p (m/s)	q _c
Terre végétale	0 - 1	21	230	670	0.25
Argile marneuse	1 - 10	78	650	1450	1.93
Marne bariolée	10 - 13	140	1180	2400	3.42

Nous rappelons que pour la partie principale des corrélations entre les paramètres géophysiques et géotechniques, seules les valeurs de N, q_c et V_s ont été prises en considération ; le rapport V_p / V_s permet de classer le sol selon le RPA99 modifié 2003.

Les mesures retenues dans cette étude au niveau des 06 sondages et le rapport V_p / V_s varie aussi de 2 à 3. Le traitement des données nous a permis d'établir deux bases de données :

1 - Une base de données dans laquelle sont consignées les valeurs moyennes de N et les vitesses de cisaillement V_s en tenant compte de la nature géologique des formations et de la variation de V_s,

2 - Une base de données dans laquelle sont consignées les valeurs de la résistance de pointe q_c et la vitesse de cisaillement V_s. A la base de ces données, nous devons établir un modèle de corrélation, ce qui permettra ensuite de généraliser l'utilisation de cette corrélation dans des sols de configuration analogue.

VI.2. Analyse de données :

Couples de données Vs – N :

Les données utilisées pour l'étude de la corrélation Vs – N proviennent des sondages carottés sélectionnés (**Fig VI.1**), qui ont permis de mettre en évidence les différentes formations du sol : Les Argiles et marnes sahéliennes cartographiées « **m4** » correspondant à "**P1**" dans la nouvelle nomenclature :

Ce faciès géologique est généralement marno-argileux; de couleur bleuâtre ou verdâtre.



Fig. VI.1 Plan d'implantation des essais utilisés dans l'étude des corrélations

- Les valeurs de **N** moyenne varient entre ;
 - 20 à 40 une couche superficielle (terre végétale) à 1m de profondeur.
 - 40 à 80 une couche argileuse ayant entre 2 à 4 m d'épaisseur.
 - 90 à 140 une couche marneuse bariolée parfois fissurée.
- Les valeurs de **Vs** moyenne varient entre ;
 - 230 à 350 m/s. une couche de terre végétale à 1m de profondeur.
 - 450 à 650 m/s une couche argileuse ayant entre 2 à 4 m d'épaisseur.
 - 1030 à 1220 m/s une couche marneuse bariolée parfois fissurée.

Couples de données Vs - qc:

Les données utilisées pour l'étude de la corrélation Vs- q_c proviennent du P.O.S sud Ouled Fayet, projet 1500 Logements, avec 23 sondages carottés, essais Downhole, des essais au pénétromètre dynamique et statique; les sondages carottés ont mis en évidence :

Une couche fine de terre végétale, des argiles Limoneuse et parfois marneuse, des marnes beiges à bariolées, des marnes grises fissurée.

- Les valeurs de Vs varient entre 230 et 1220 m/s.
- Les valeurs de q_c varient entre 1 bar et 50 bars au maximum.

VI.3.Phasage pour l'étude des équations des corrélations :

La démarche à suivre pour l'étude des corrélations s'effectuera, dans un premier temps, par l'étude des corrélations entre Vs – N, Vs – q_c , principalement et entre N, q_c et les autres paramètres géophysique de l'essai Downhole.

Dans un deuxième temps, par l'étude des corrélations entre les paramètres pressiométrique (E_p , P_I) et la résistance de pointe q_c .

La littérature scientifique permet de constater que divers auteurs dont Imai (1975), Imai et Yoshimura (1970) et Yokota et al. (1982), Fujiwara (1972), Ohsaki et Iwasaki (1973) et Seed et Idriss (1981) ont tenté de relier la vitesse des ondes de cisaillement V_s aux valeurs non corrigées de l'indice de pénétration standard N ou à la résistance en pointe q_c par une équation qui prend la forme suivante :

$$V_s = A N^B$$

Pour montrer comment une variable V_s est liée à facteur N , on peut également ajuster par une droite de régression linéaire de la forme :

$$V_s = A.N+B$$

A et B sont des coefficients empiriques.

Les valeurs de A et de B peuvent être obtenues à l'aide de formules simples, en utilisant le critère des moindres carrés.

Pour l'approche en puissance, l'échelle utilisée est logarithmique, elle permet d'approcher la relation par une droite (cette approche permettant de mieux apprécier les différences de progressions des données).

$$Y = b x^a$$

$$\ln y = \ln b \cdot x^a$$

$$\ln y = \ln b + \ln x^a$$

$$\ln y = \ln b + a \ln x$$

$$\text{Soit } \ln y = Y \text{ et } \ln b = B, a = A, \ln x = X.$$

L'équation reprend la forme linéaire: " $Y = AX+B$ "

On notera évidemment que tel que nous l'avons précisé, on peut obtenir un modèle linéaire à partir d'un modèle puissance si les valeurs de X et de Y sont remplacées par le logarithme de celles-ci.

L'accroissement de V_s qui accompagne la variation de N , pourrait provenir non seulement de l'effet de N , mais aussi de l'effet de toute autres variables susceptible de varier en même temps que N .

Un coefficient de corrélation linéaire R est déterminé à partir de ces équations, il permet de donner un aperçu sur la relation entre les deux paramètres analysés. Pour mesurer l'intensité de la liaison linéaire entre deux variables.

Le coefficient de corrélation R est égale à :

$$R = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{var}(X) \text{var}(Y)}} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y}$$

L'interprétation des valeurs du coefficient de corrélation est donnée comme suit :

Si R = 0 : corrélation nulle

Si - 0,4 < R < +0,4 : corrélation très faible

Si ± 0,4 < R < ± 0,6 : corrélation faible

Si ± 0,6 < R < ± 0,75 : corrélation moyenne

Si ± 0,75 < R < ± 1 : corrélation forte.

Le coefficient de détermination (R^2) détermine à quel point l'équation de régression est adaptée pour décrire la distribution des points. il se calcul comme suit :

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right)^2$$

Les valeurs du coefficient de détermination sont comprises entre : $0 \leq R^2 \leq 1$.

La répartition des sondages carottés, des essais géotechniques et géophysiques dispersés permet d'avoir des données concernant toute la surface du projet (Fig.III.3). À fin d'établir la relation Vs-N, nous avons choisi les sondages pénétrométriques SPT et les sondages Downhole les plus proches tout en prenant en considération les formations lithologiques observées dans les sondages carottés.

Les données obtenues ont été exploitées pour étudier la relation entre Vs et N (SPT).

Le dépouillement des résultats des essais SPT(N) et Vs nous a permis de :

- Déterminer les mesures binaires (N- Vs) au niveau de chaque formation géologique de chaque sondage.
- Calculer la moyenne des valeurs de N pour une vitesse de cisaillement constante au niveau de chaque formation (le nombre de valeurs moyennes de N est fonction du nombre de valeurs de Vs dans une même couche) (Tableau VI.3):

Valeurs des mesures de N et de Vs au niveau des sondages de Ouled Fayet).

- Obtenir une base de données constituée par les valeurs moyennes de N et de Vs.

Tableau. VI.3. Les mesures de N et Vs de Sc 03 et Sc 05.

SONDAGE Sc03				SONDAGE Sc05			
prof	Nature du sol	N	Vs(moy)	prof	Nature du sol	N	Vs(moy)
0.2	Terre végétale	24	295	0.2	Terre végétale	10	230
0.4	Terre végétale	20	295	0.4	Terre végétale	17	230
0.6	Terre végétale	37	295	0.6	Terre végétale	18	230
0.8	Argile Limoneuse	37	295	0.8	Argile marneuse	27	230
1	Argile Limoneuse	44	295	1	Argile marneuse	34	230
1.2	Argile Limoneuse	50	520	1.2	Argile marneuse	42	650
1.4	Argile Limoneuse	59	520	1.4	Argile marneuse	50	650
1.6	Argile Limoneuse	52	520	1.6	Argile marneuse	59	650
1.8	Argile Limoneuse	59	520	1.8	Argile marneuse	67	650
2	Argile Limoneuse	75	520	2	Argile marneuse	59	650
2.2	Argile Limoneuse	63	520	2.2	Argile marneuse	69	650
2.4	Argile Limoneuse	56	520	2.4	Argile marneuse	85	650
2.6	Argile Limoneuse	46	520	2.6	Argile marneuse	93	650
2.8	Argile Limoneuse	57	520	2.8	Argile marneuse	100	650
3	Argile Limoneuse	62	520	3	Argile marneuse	108	650
3.2	Argile Limoneuse	54	520	3.2	Argile marneuse	85	650
3.4	Argile Limoneuse	65	520	3.4	Argile marneuse	72	650
3.6	Argile Limoneuse	72	520	3.6	Argile marneuse	79	650
3.8	Argile Limoneuse	81	520	3.8	Argile marneuse	86	650
4	Argile Limoneuse	81	520	4	Argile marneuse	72	650
4.2	Marne sableuse	65	1130	4.2	Argile marneuse	54	650
4.4	Marne sableuse	53	1130	4.4	Argile marneuse	60	650
4.6	Marne sableuse	51	1130	4.6	Argile marneuse	74	650
4.8	Marne sableuse	64	1130	4.8	Argile marneuse	80	650
5	Marne sableuse	86	1130	5	Argile marneuse	87	650
5.2	Marne sableuse	86	1130	5.2	Argile marneuse	76	650
5.4	Marne sableuse	93	1130	5.4	Argile marneuse	79	650
5.6	Marne sableuse	78	1130	5.6	Argile marneuse	79	650
5.8	Marne sableuse	65	1130	5.8	Argile marneuse	79	650
6	Marne beige bariolée	75	1130	6	Argile marneuse	113	650
6.2	Marne beige bariolée	75	1130	6.2	Argile marneuse	124	650
6.4	Marne beige bariolée	71	1130	6.4	Argile marneuse	118	650
6.6	Marne beige bariolée	67	1130	6.6	Argile marneuse	106	650
6.8	Marne beige bariolée	73	1130	6.8	Argile marneuse	165	650
7	Marne beige bariolée	64	1130	7	Argile marneuse	142	650
7.2	Marne beige bariolée	48	1130	7.2	Argile marneuse	100	650
7.4	Marne beige bariolée	54	1130	7.4	Argile marneuse	83	650
7.6	Marne beige bariolée	64	1130	7.6	Argile marneuse	78	650
7.8	Marne beige bariolée	72	1130	7.8	Argile marneuse	100	650
8	Marne beige bariolée	77	1130	8	Argile marneuse	95	650
8.2	Marne beige bariolée	76	1130	8.2	Argile marneuse	90	650
8.4	Marne beige bariolée	86	1130	8.4	Argile marneuse	100	650
8.6	Marne beige bariolée	91	1130	8.6	Argile marneuse	105	650
8.8	Marne beige bariolée	96	1130	8.8	Argile marneuse	122	650
9	Marne beige bariolée	105	1130	9	Argile marneuse	127	650
9.2	Marne beige bariolée	107	1130	9.2	Argile marneuse	126	650
9.4	Marne beige bariolée	123	1130	9.4	Argile marneuse	115	650
9.6	Marne beige bariolée	139	1130	9.6	Argile marneuse	120	650
9.8	Marne beige bariolée	145	1130	9.8	Argile marneuse	120	650
10	Marne beige bariolée	158	1130	10	Argile marneuse	120	650
10.2	Marne beige bariolée	156	1130	10.2	Marne beige bariolée	126	1180
10.4	Marne beige bariolée	158	1130	10.4	Marne beige bariolée	134	1180
10.6	Marne beige bariolée	160	1130	10.6	Marne beige bariolée	133	1180
10.8	Marne beige bariolée	176	1130	10.8	Marne beige bariolée	138	1180
11	Marne beige bariolée	194	1130	11	Marne beige bariolée	136	1180
				11.2	Marne beige bariolée	145	1180
				11.4	Marne beige bariolée	143	1180
				11.6	Marne beige bariolée	152	1180
				11.8	Marne beige bariolée	191	1180

VI.4. Elaboration des équations de corrélations :

Sur la base de ces données, nous avons appliqué, dans un système de coordonnées cartésiennes d'axes perpendiculaires des paramètres X et Y, avec une échelle logarithmique, grâce au tableur du programme Excel, l'équation de la forme $Y = AX^B$ ou plus précisément $Vs = A N^B$. Cette approche est appelée ; corrélation par progression puissance. De plus une autre approche ; corrélation par progression linéaire sous l'équation $Vs = AN + B$ a été appliquée sur les différentes couches déjà définies.

Les données utilisées pour l'étude de cette corrélation sont obtenues à partir des sondages carottés, des essais au pénétromètre statique et essais Downhole. Les mesures de vitesse de cisaillement Vs ont été réalisées par palier de 1 m au niveau de chaque sondage de même que celles de la résistance en pointe qc. Le dépouillement des résultats des essais qc et des Vs nous a permis de :

- Déterminer les mesures binaires (qc- Vs) au niveau de chaque formation géologique de chaque sondage.
- Calculer la moyenne des valeurs de qc pour une vitesse de cisaillement constante au niveau de chaque formation (le nombre de valeurs moyennes de qc est fonction du nombre de valeurs de Vs).
- Fournir une base de données (qc -Vs).

Le critère de sélection pour établir les équations de corrélation est celui de la nature géologique des formations en place ; c'est dire que nous avons tenu compte de toutes les valeurs des paramètres N, qc et Vs mesurées.

Nous retrouvons les formations suivantes : Terre superficielle végétale, Argiles Limoneuse parfois marneuse, marnes sableuse, marnes bariolées et marne grise fissurée, en considérant les valeurs non corrigées de N (valeurs brutes obtenues à partir des essais in situ) ou les valeurs qc(bars). De nombreux auteurs tel Imai, Sykora, Stokoe, Lee, et Tonouchi...etc ont établi des équations de corrélations en prenant en considération la nature des formations géologiques tel le montre le tableau en dessous(Tableau VI.4).

C'est sur cette base, et en référence aux nombreux travaux d'auteurs qui ont étudiés ces corrélations que nous avons établi des équations en tenant compte des données disponibles au niveau du projet en question.

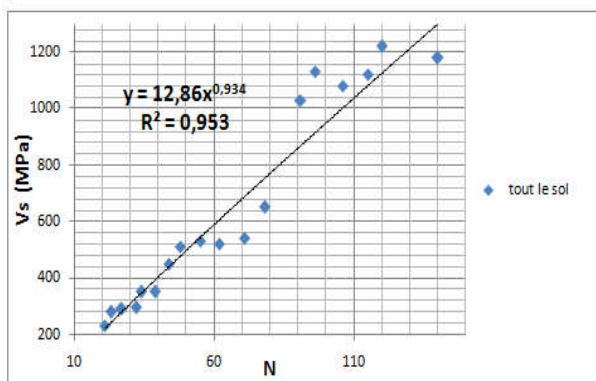
Tableau VI.4. Equations de corrélations proposées par différents auteurs.

Author(s)	All Soils	Sand	Clays
Kanai (1966)	$V_s=19N^{0.6}$	---	---
Ohba and Toriumi (1970)	$V_s=84N^{0.31}$	---	---
Shibata (1970)	---	$V_s=32N^{0.5}$	---
Imai and Yoshimura (1970)	$V_s=76N^{0.33}$	---	---
Fujiwara (1972)	$V_s=92.1N^{0.337}$	---	---
Ohta et al. (1972)	---	$V_s=87N^{0.36}$	---
Ohsaki and Iwasaki (1973)	$V_s=82N^{0.39}$	---	---
Imai and Yoshimura (1975)	$V_s=92N^{0.329}$	---	---
Imai (1977)	$V_s=91N^{0.337}$	$V_s=80.6N^{0.331}$	$V_s=80.2N^{0.292}$
Ohta and Goto (1978)	$V_s=85.35N^{0.348}$	$V_s=88N^{0.34}$	---
JRA(1980)	---	$V_s=80N^{0.33}$	$V_s=100N^{0.33}$
Seed and Idriss (1981)	$V_s=61N^{0.5}$	---	---
Imai and Tonouchi (1982)	$V_s=97N^{0.314}$	---	---
Sykora and Stokoe (1983)	---	$V_s=100.5N^{0.29}$	---
Jinan (1987)	$V_s=116.1(N+0.3185)^{0.202}$	---	---
Okamoto et al. (1989)	---	$V_s=125N^{0.3}$	---
Lee (1990)	---	$V_s=57.4N^{0.49}$	$V_s=114.43N^{0.31}$
Sisman (1995)	$V_s=32.8N^{0.51}$	---	---
Athanasopoulos (1995)	$V_s=107.6N^{0.36}$	---	$V_s=76.55N^{0.445}$
Iyisan (1996)	$V_s=51.5N^{0.516}$	---	---
Jafari et al. (1997)	$V_s=22N^{0.85}$	---	---
Kiku et al. (2001)	$V_s=68.3N^{0.292}$	---	---
Jafari et al. (2002)	---	---	$V_s=27N^{0.73}$
Hasancebi and Ulusay (2007)	$V_s=90N^{0.308}$	$V_s=90.82N^{0.319}$	$V_s=97.89N^{0.269}$
Maheshwari et al. (2010)	$V_s=95.64N^{0.301}$	$V_s=100.53N^{0.265}$	$V_s=89.30N^{0.358}$

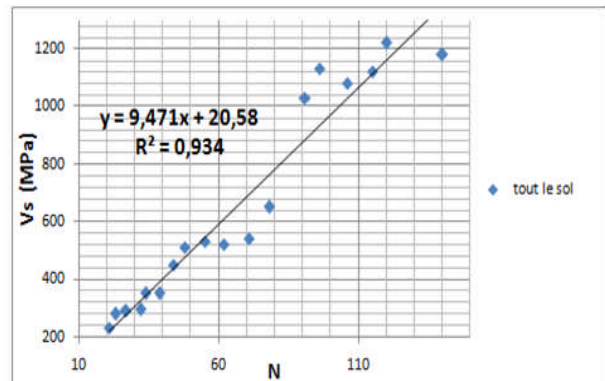
VI.4.1.Corrélation Vs-N :

Nous considérons dans ce cas-là l'ensemble des valeurs Vs-N déterminées à partir des mesures des essais SPT et des essais Downhole au niveau du secteur d'étude sans différenciation de la nature du sol en place.

A) Tous le sol :



L'équation obtenue est $V_s = 12,86N^{0,93}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,95$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,97$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



L'équation obtenue est $V_s = 9,47N - 20,58$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,93$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,96$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).

Fig VI.2.Courbes de corrélation Vs-N pour Tout le sol.

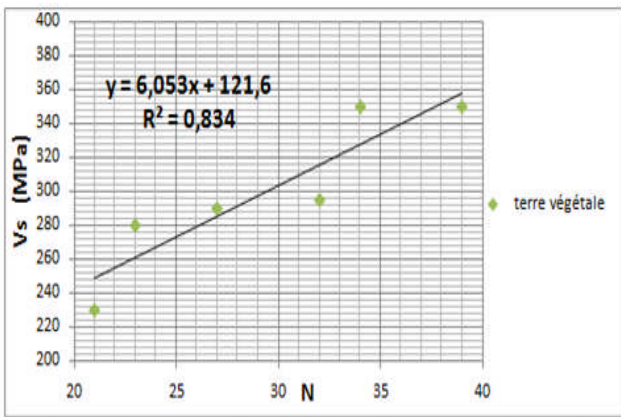
L'équation obtenue est $V_s = 12,86 N^{0,934}$, le coefficient de détermination $R^2 = 0,953$ et le coefficient de corrélation $R=0,976$ (en comparaison avec la formule de Jafari et Al (1997) : $V_s = 22 N^{0,85}$) La corrélation entre les deux paramètres est forte. ($\pm 0,75 < R < \pm 1$).

1) La Terre végétale :

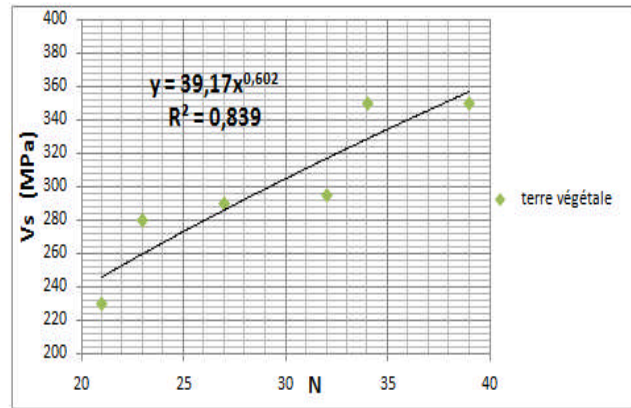
Les sondages carottés ont permis de mettre en évidence une couche de terre végétale de 0.3à 0.6m qui recouvre tout le terrain et dont les valeurs de N et Vs présentées dans le **Tableau VI.5**.

Tableau VI.5 : Résultats de Vs- N de la couche terre végétale.

Nature du sol	Vs	N
Terre végétale	295	32
Terre végétale	230	21
Terre végétale	350	34
Terre végétale	280	23
Terre végétale	350	39
Terre végétale	290	27



L'équation obtenue est $Vs = 6.053N + 121.6$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.83$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,91$
La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



L'équation obtenue est $Vs = 39.17N^{0.6}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.84$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,92$
La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).

Fig VI.3. Courbe de corrélation Vs-N pour couche "terre végétale".

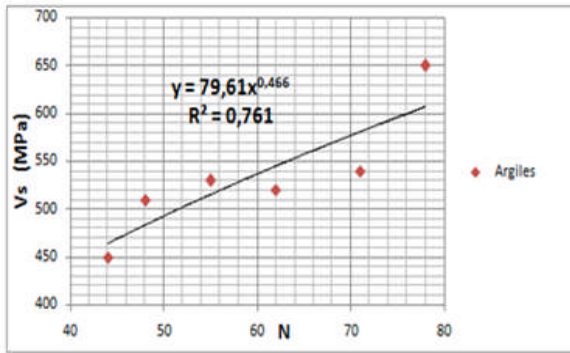
L'équation obtenue est $Vs = 39,17 N^{0.602}$, le coefficient de Détermination $R^2 = 0.839$ et le coefficient de corrélation $R = 0,91$ (en comparaison avec la formule de Sisman (1995) : $Vs = 97 N^{0.314}$) La corrélation entre les deux paramètres est forte ($\pm 0,75 < R < \pm 1$).

2 - La couche Argileuse :

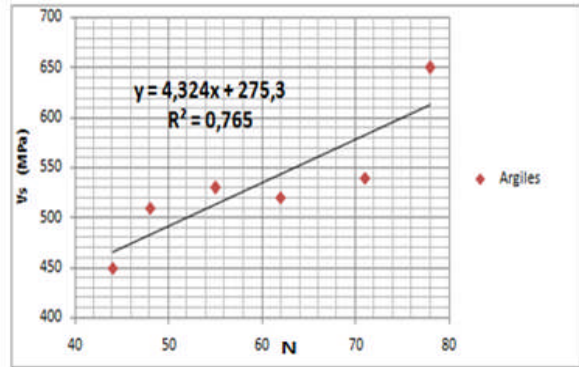
Les sondages carottés répartis sur la surface du projet d'étude ont permis de mettre en évidence la présence des argiles sahéliennes, ces argiles sont peu marneuse limoneuse et parfois caillouteuse d'une profondeur variant de 2 à 9m, les valeurs de valeurs de N et Vs présentées dans le **Tableau VI.6**:

Tableau. VI.6 : Résultats de Vs- N de la couche argileuse.

Nature du sol	Vs	N
Argiles marneuse peu limoneuse	520	62
Argiles marneuse peu limoneuse	650	78
Argiles marneuse peu limoneuse	540	71
Argiles marneuse peu limoneuse	530	55
Argiles marneuse peu limoneuse	510	48
Argiles marneuse peu limoneuse	450	44



L'équation obtenue est $V_s = 79,61N^{0,466}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,76$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,87$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



L'équation obtenue est $V_s = 4,324N + 275,3$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,76$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,87$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).

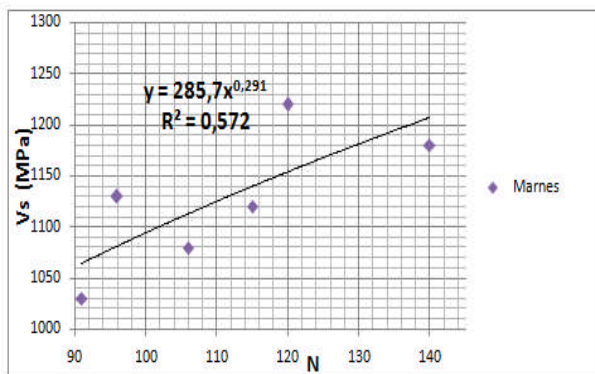
L'équation obtenue est $V_s = 79,61 N^{0,466}$, le coefficient de Détermination $R^2 = 0,761$ et le coefficient de corrélation $R = 0,87$ (en comparaison avec la formule Athanasopoulos (1995): $V_s = 76,55N^{0,445}$) La corrélation est forte ($\pm 0,75 < R < \pm 1$).

3 - La couche marneuse :

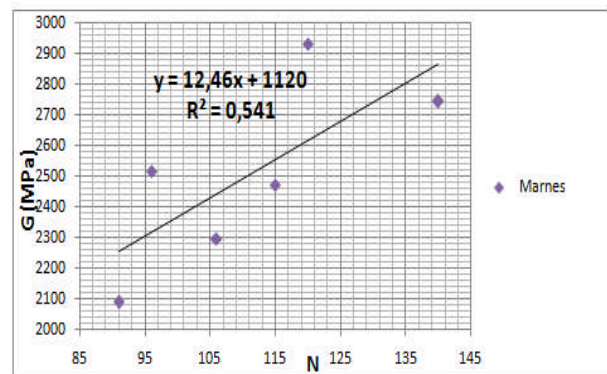
Pour ce qui est des marnes Sahéliennes, La campagne géotechnique a permis de mettre en évidence la présence de marnes dites Plaisanciennes. Le toit du substratum marneux a été déterminé dans toute la surface du projet à différentes profondeurs. Les valeurs de valeurs de N et Vs présentées dans le **Tableau VI.6**

Tableau VI.7 : Résultats de Vs- N de la couche marneuse.

Nature du sol	Vs	N
Marnes bariolées	1130	96
Marnes bariolées	1200	140
Marnes bariolées	1220	120
Marnes bariolées	1120	115
Marnes bariolées	1080	106
Marnes bariolées	1030	91



L'équation obtenue est $V_s = 285,7N^{0,291}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,572$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,76$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



L'équation obtenue est $V_s = 12,46N + 1120$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,54$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,73$. La corrélation entre les deux paramètres est moyenne ($0,6 < R < 0,75$).

Fig VI.5. Courbe de corrélation Vs-N pour couche "marnes de Ouled Fayet".

L'équation obtenue est $V_s = 285,7 N^{0,291}$, le coefficient de Détermination $R^2 = 0,572$ et le coefficient de corrélation $R = 0,756$ (en comparaison avec la formule de Athanasopoulos (1995): $V_s = 107,6N^{0,36}$) La corrélation est forte ($\pm 0,75 < R < \pm 1$).

Commentaire :

Les données obtenues à partir des essais Downhole et SPT du projet en question de la région de Ouled Fayet sont réparties sur l'ensemble géologique argileux grisâtres sahéliennes, ce qui montre que pour les valeurs de R supérieures à 0,75 la corrélation est forte entre les paramètres Vs-N. Sur la base de ces résultats, nous pouvons dire que le paramètre Nature géologique du sol joue un rôle important dans l'établissement des corrélations.

En résumé, les équations obtenues de la forme $V_s = f(N)$ en tenant compte des différentes catégories de sols mises en évidence par les sondages carottés, nous ont permis d'obtenir les valeurs de coefficients de corrélation consignées dans le Tableau.VI.9.

Tableau VI.8. Coefficients de corrélations Vs-N.

Nature	R
Tout type de sols	0.97
Terre végétale	0.92
Argiles Ouled Fayet	0.87
Marne de Ouled Fayet	0.76

VI.4.1.1.Détermination de (vs) à partir de l'équation de corrélation :**Application :**

Sur la base des résultats déjà obtenus ci-dessus, nous allons, déterminer la valeur de Vs à partir de deux méthodes :

1ère méthode :

A partir de l'équation établie, pour la couche de surface de Ouled Fayet, dont l'expression est : $V_s = 39,17 N^{0.602}$: (A)

A) Terre végétale: Une couche de profondeur de 1m

Sondage	Piézo (m)	N	Vs m (m/s)	Vs ce (m/s)	Erreur
Sc 03	/	32	295	315	6,78%
Sc 05	/	21	230	248	7,82%
Sc 06	/	34	350	327	6,57%
Sc 04	/	23	280	258	7,86%
Sc 09	/	39	350	349	0,28%
Sc 11	/	27	290	284	2,07%

* Erreur e = $((V_s \text{ mesurée} - V_s \text{ calculée}) / V_s \text{ mesurée}) * 100$;

Ces résultats nous permettent de constater que l'erreur varie de 0.3 à 8 %. La marge tolérable étant de $\pm 20\%$, nous pouvons dire que cette équation nous permet de calculer des valeurs de Vs qui peuvent être exploitables.

B) Couche Argileuse :

A partir de l'équation établie, pour tous les sols du sol de Ouled Fayet, dont l'expression est : $V_s = 79,61 N^{0.466}$.

Sc (i)	Prof (m)	Piézo (m)	N	Vs m (m/s)	Vs ce (m/s)	Erreur
Sc 03	1 - 4	/	62	520	550	5.7%
Sc 05	1 - 10	/	78	650	610	6.1%
Sc 06	1 - 5	/	71	540	580	7.4%
Sc 04	1 - 4	3	55	530	520	1.8%
Sc 09	1 - 3	/	48	510	480	5.8%
Sc 11	1 - 3	/	44	450	465	3.3%

Ces résultats nous permettent de constater que l'erreur varie de 1.9 à 7.4 %. La marge tolérable étant de $\pm 20\%$, nous pouvons dire que cette équation nous permet de calculer des valeurs de Vs qui peuvent être exploitables.

C) Marnes :

A partir de l'équation établie, pour tous les sols du sol de Ouled Fayet, dont l'expression est $V_s = 285.7 N^{0.291}$.

Sc (i)	Profondeur (m)	Piézo (m)	N	Vs m (m/s)	Vs ce (m/s)	Erreur
Sc 03	4 - 11	/	96	1130	1078	4.60%
Sc 05	10 - 12	/	140	1180	1203	1.95%
Sc 06	5 - 11	/	120	1220	1151	5.65%
Sc 04	4 - 12	3	115	1120	1136	1.43%
Sc 09	3 - 10	/	106	1080	1110	2.78%
Sc 11	3 - 10	/	91	1030	1062	3.11%

Ces résultats nous permettent de constater que l'erreur varie de 1.4 à 5.7 %. La marge tolérable étant de $\pm 20\%$, nous pouvons dire que cette équation nous permet de calculer des valeurs de Vs qui peuvent être exploitables.

VI.4.1.2.Détermination de (vs) à partir de :

A partir de la formule suivante :

$$= (V_p^2 - 2V_s^2) / 2[(V_p^2 - V_s^2)] \rightarrow V_{s\ ce} = \frac{\quad}{\quad} \quad (B)$$

A) Terre végétale :

Sc (i)		N	Vp m (m/s)	Vs m (m/s)	Vs cf (m/s)	Erreur
Sc 03	0.4	32	760	295	310	5.08%
Sc 05		21	670	230	275	19.56%
Sc 06		34	860	350	350	2.85%
Sc 04		23	740	280	305	8.93%
Sc 09		39	840	350	345	1.43%
Sc 11		27	780	290	320	10.35%

Ces résultats nous permettent de montrer que l'erreur varie de 1.43 à 19.56 %.

Légende :

- : coefficient de Poisson (en général il varie de 0,35 à 0,4).
- Vp et Vs : vitesses de compression et de cisaillement ; avec
- m : mesurée
- ce : calculée à partir de l'équation [A],
- cf: calculée à partir de la formule [B].

B) couche Argileuse :

Sc(i)	Vp m (m/s)		N	Vs m (m/s)	Vs cf (m/s)	Erreur
Sc 03	1400	0.4	62	520	505	2.88%
Sc 05	1470		78	650	590	9.23%
Sc 06	1580		71	540	500	7.40%
Sc 04	1360		55	530	520	1.88%
Sc 09	1290		48	510	515	1%
Sc 11	1240		44	450	457	1.56%

Ces résultats nous permettent de montrer que l'erreur varie de 1 à 9.23%.

C) Marnes :

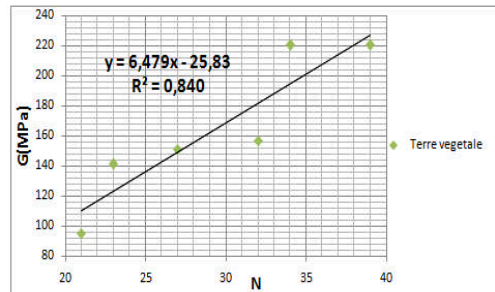
sondage	Vp m (m/s)		N	Vs m (m/s)	Vs cf (m/s)	Erreur
Sc 03	2460	0.4	96	1130	1200	6.20%
Sc 05	2700		140	1180	1150	2.50%
Sc 06	2610		120	1220	1270	4.10%
Sc 04	2670		115	1120	1185	5.80%
Sc 09	2540		106	1080	1090	0.96%
Sc 11	1800		91	1030	1080	4.85%

Ces résultats nous permettent de montrer que l'erreur varie de 0.96 à 5.80.

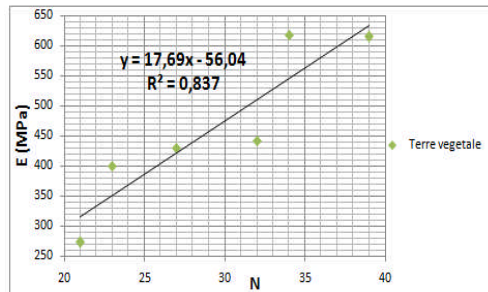
VI.4.2 Corrélations entre les paramètres géodynamiques et N:

VI.4.2.1. Corrélation par progression linéaire :

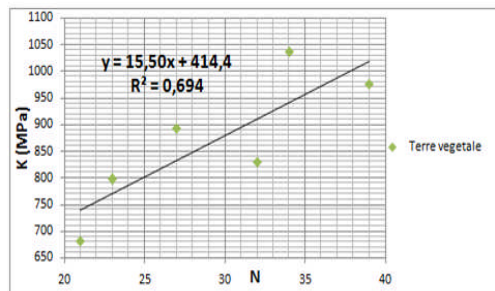
A) Terre végétale :



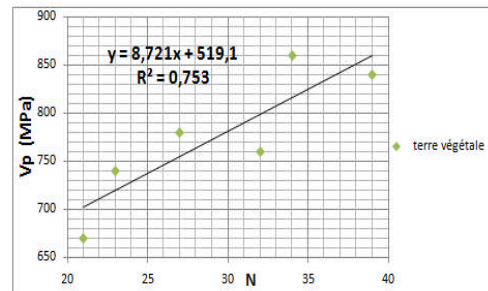
L'équation obtenue est $V_s = 6.48N - 25.83$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.84$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,92$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



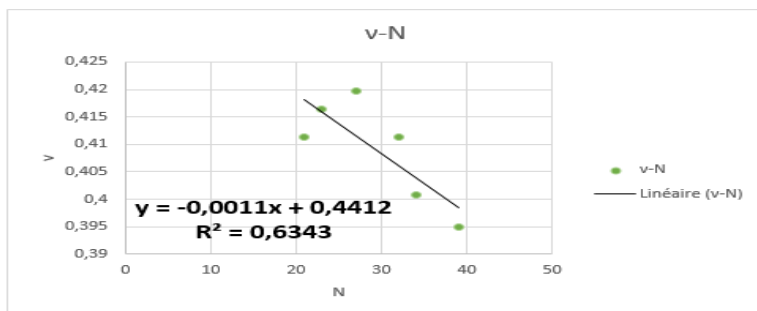
L'équation obtenue est $V_s = 17.69N - 56.04$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.84$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,92$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



L'équation obtenue est $V_s = 15.50N + 414.4$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.69$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,83$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



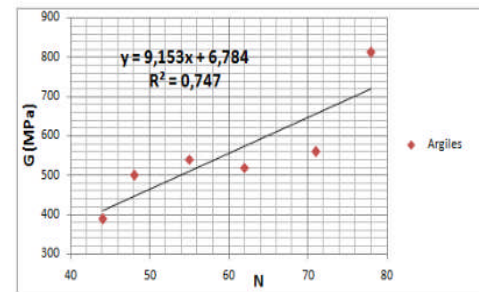
L'équation obtenue est $V_s = 8.72N + 519.1$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.75$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,87$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



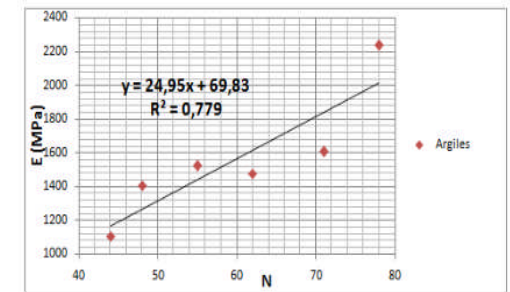
L'équation obtenue est $v = 0.0011N + 0.4412$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.63$ et un coefficient de corrélation $R = 0,79$.

Fig.VI.6. Courbes de corrélation par progression linéaire (terre végétale).

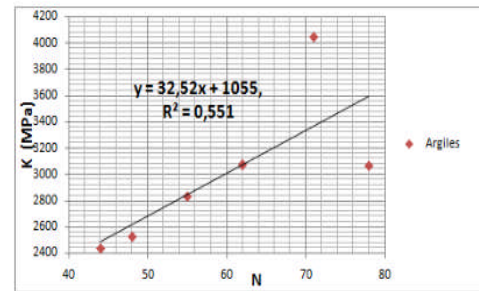
B) Argiles :



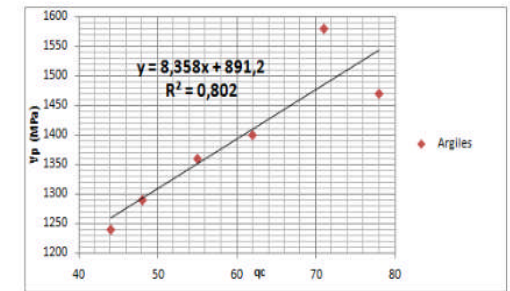
L'équation obtenue est $V_s = 9.15N + 6.78$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.75$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,87$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



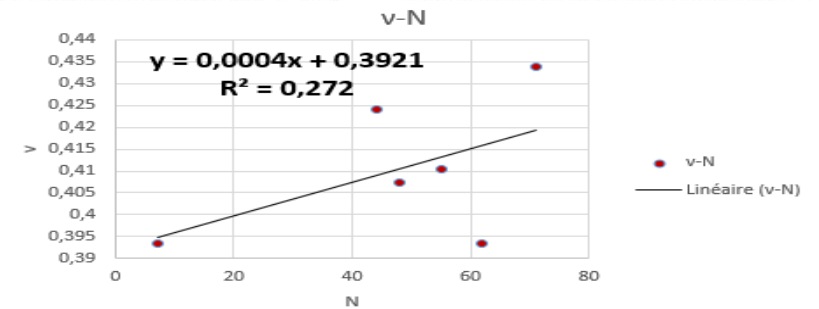
L'équation obtenue est $V_s = 24.95N + 69.83$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.78$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,88$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



L'équation obtenue est $V_s = 32.52N + 1055$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.55$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,74$. La corrélation entre les deux paramètres est moyenne ($0,6 < R < 0,75$).



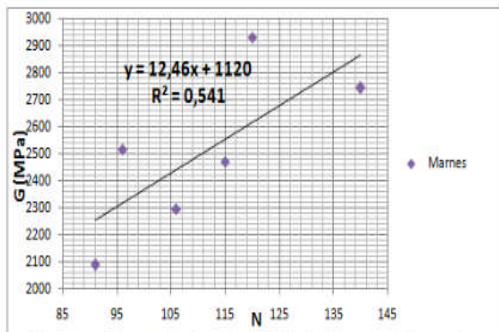
L'équation obtenue est $V_s = 1278.358N + 891.2$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.80$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,89$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



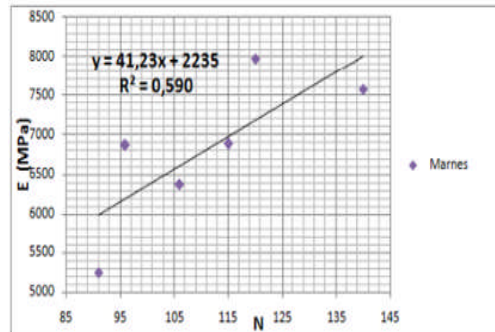
L'équation obtenue est $v = 0.0004N + 0.3921$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.27$ et un coefficient de corrélation $R = 0.52$.

Fig.VI.7. Courbes de corrélation par progression linéaire (Argiles).

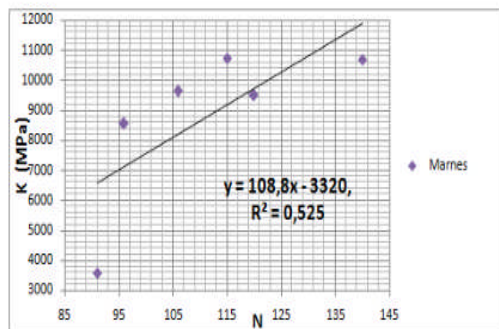
C) Marnes :



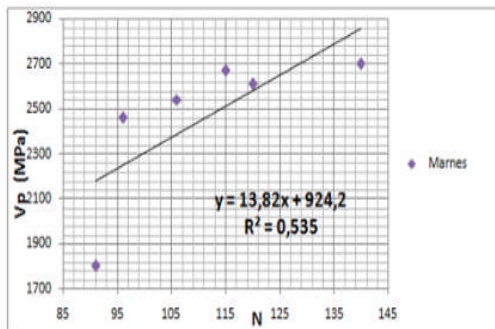
L'équation obtenue est $V_s = 12,46N + 1120$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,54$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,73$. La corrélation entre les deux paramètres est moyenne ($0,6 < R < 0,75$).



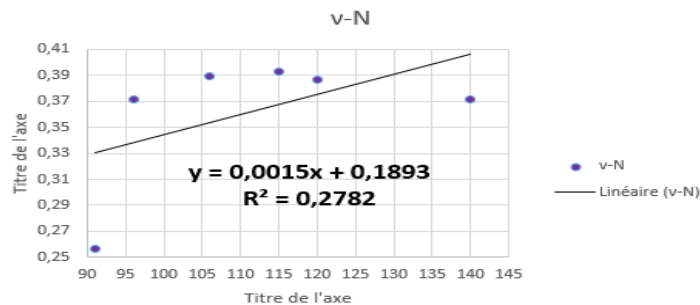
L'équation obtenue est $V_s = 41,23N + 2235$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,59$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,7,68$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



L'équation obtenue est $V_s = 108,8N - 3320$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,52$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,72$. La corrélation entre les deux paramètres est moyenne ($0,6 < R < 0,75$).



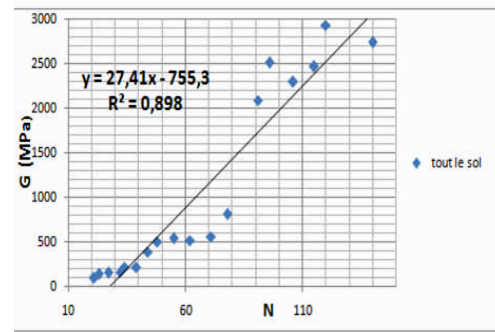
L'équation obtenue est $V_s = 13,82N + 924,2$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,53$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,73$. La corrélation entre les deux paramètres est moyenne ($0,6 < R < 0,75$).



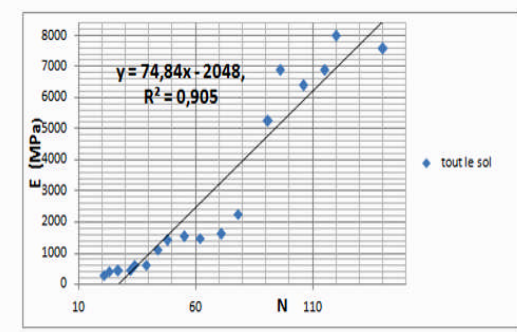
L'équation obtenue est $v = 0,0015N + 0,19$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,27$ et un coefficient de corrélation $R = 0,53$.

Fig.VI.8. Courbes de corrélation par progression linéaire (Marnes).

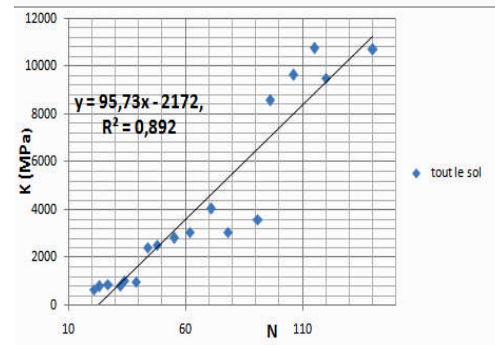
D) Tout le sol :



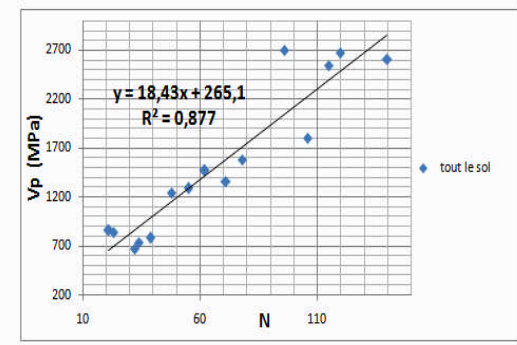
L'équation obtenue est $V_s = 27,41N - 755,3$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,898$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,95$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



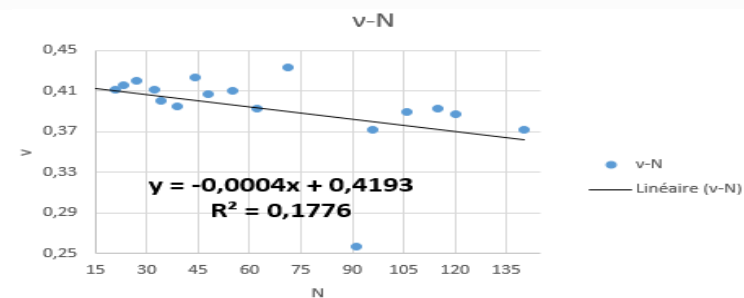
L'équation obtenue est $V_s = 74,84N - 2048$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,905$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,95$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



L'équation obtenue est $V_s = 95,73N - 2172$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,89$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,94$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



L'équation obtenue est $V_s = 18,43N + 265,1$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,898$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,95$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).

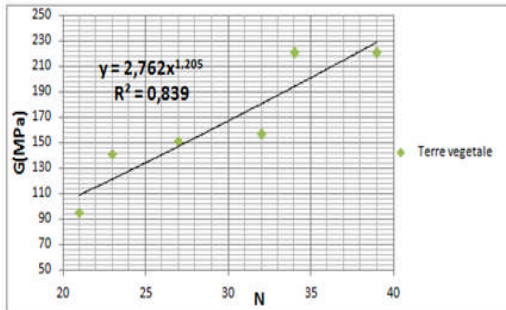


L'équation obtenue est $v = 0,0004N + 0,42$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,17$ et un coefficient de corrélation $R = 0,41$.

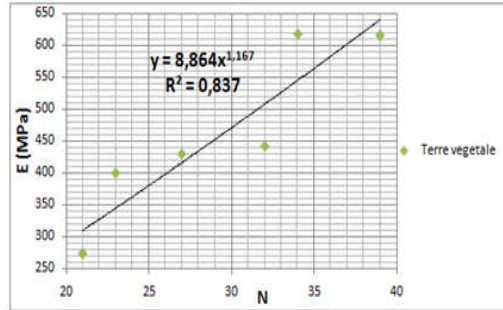
Fig.VI.9. courbes de corrélation par progression linéaire (tout le sol).

VI.4.2.2. Corrélation par progression puissance :

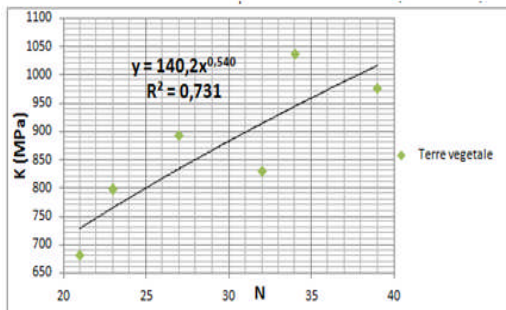
A) Terre végétale :



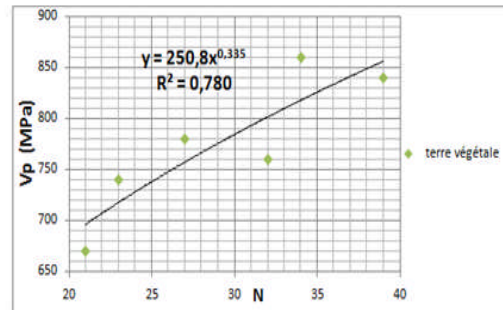
L'équation obtenue est $G = 2,76N^{1,205}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,839$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,92$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



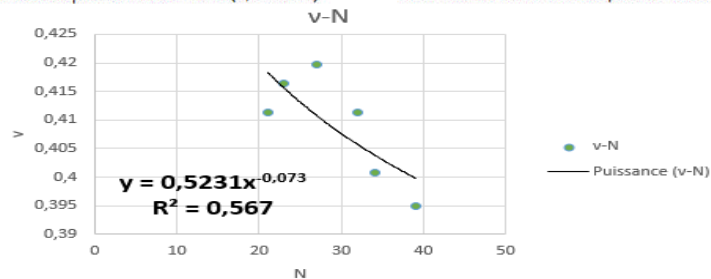
L'équation obtenue est $E = 8,864N^{1,167}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,84$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,92$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



L'équation obtenue est $K = 140,2N^{0,54}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,731$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,85$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



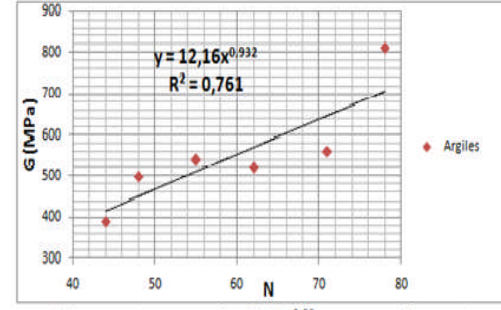
L'équation obtenue est $V_p = 250,8N^{0,335}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,78$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,88$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



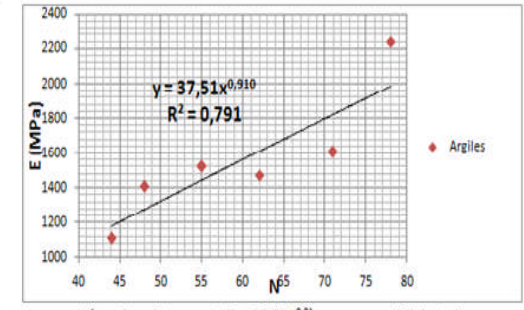
L'équation obtenue est $v = 0,52N^{0,07}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,56$ et un coefficient de corrélation $R = 0,75$.

Fig.VI.10. Courbes de corrélation par progression en puissance (Terre végétale).

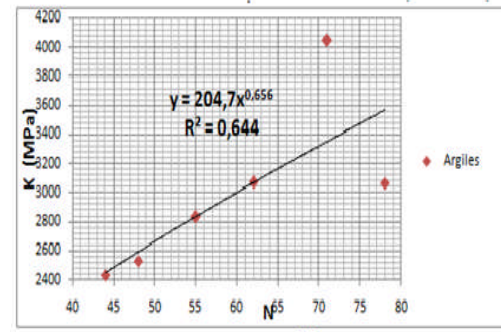
B) Argiles :



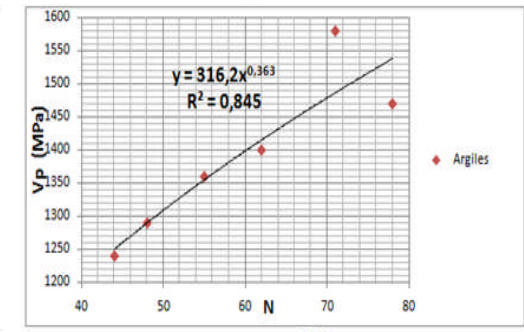
L'équation obtenue est $G = 12,16N^{0,93}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,76$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,87$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



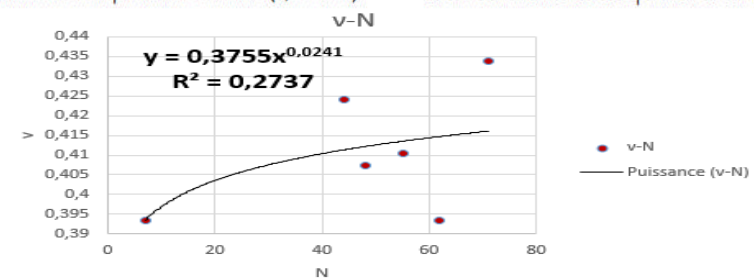
L'équation obtenue est $E = 37,51N^{0,91}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,791$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,89$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



L'équation obtenue est $K = 204,7N^{0,656}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,64$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,80$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



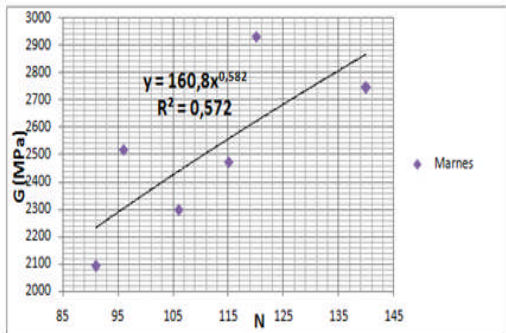
L'équation obtenue est $V_p = 316,2N^{0,363}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,845$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,91$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



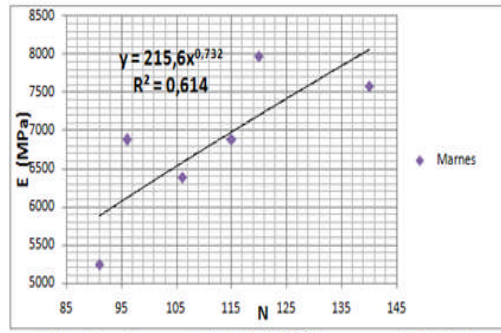
L'équation obtenue est $v = 0,37N^{0,024}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,27$ et un coefficient de corrélation $R = 0,52$.

Fig.VI.11. Courbes de corrélation par progression en puissance (Argiles).

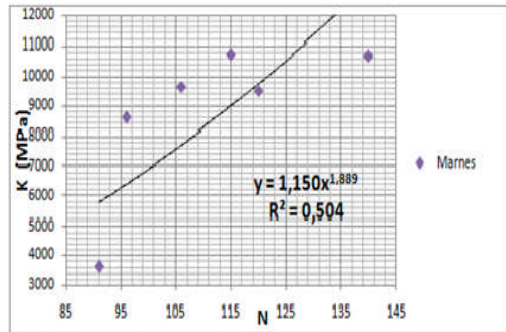
C) Les Marnes :



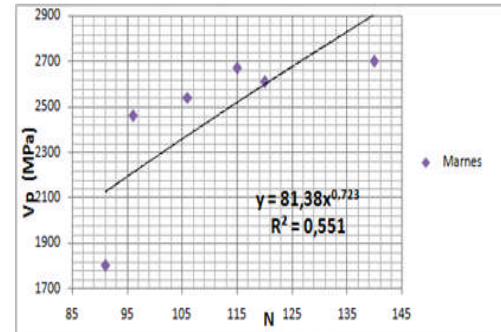
L'équation obtenue est $G = 160,8N^{0,582}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,57$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,76$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



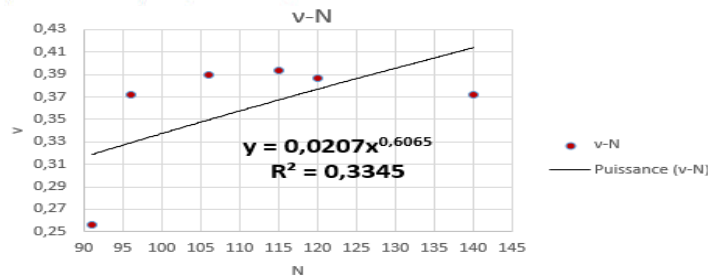
L'équation obtenue est $E = 215,6N^{0,732}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,614$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,78$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



L'équation obtenue est $K = 1,150N^{1,889}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,504$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,71$. La corrélation entre les deux paramètres est moyenne ($0,6 < R < 0,75$).



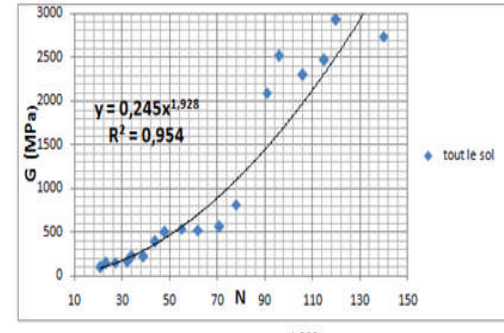
L'équation obtenue est $V_p = 81,38N^{0,723}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,551$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,74$. La corrélation entre les deux paramètres est moyenne ($0,6 < R < 0,75$).



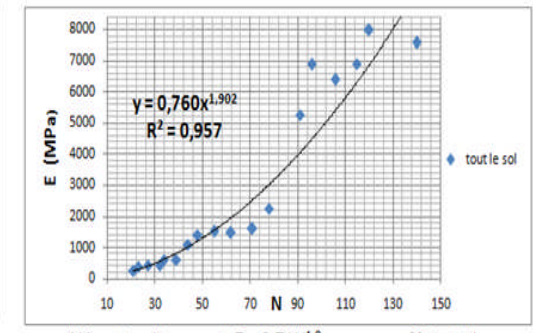
L'équation obtenue est $\nu = 0,027N^{0,60}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,33$ et un coefficient de corrélation $R = 0,57$.

Fig.VI.12. Courbes de corrélation par progression en puissance (Marnes).

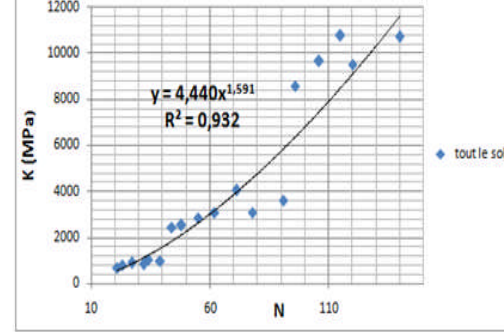
D) Tout le sol :



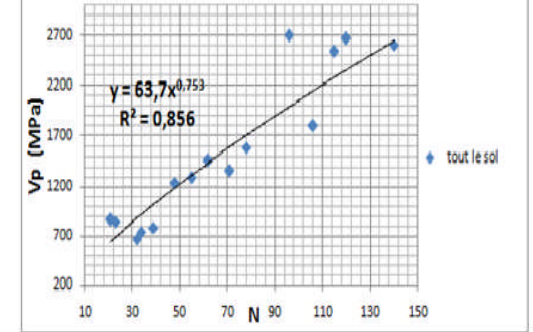
L'équation obtenue est $G = 0,245N^{1,928}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,95$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,97$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



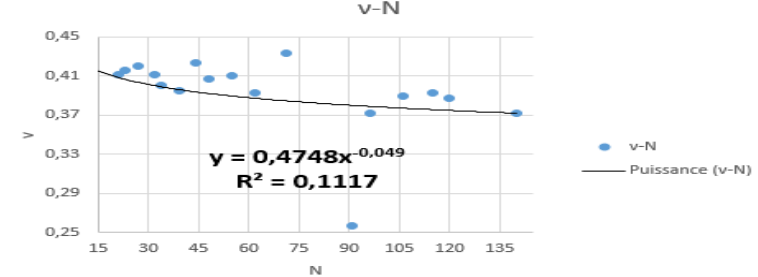
L'équation obtenue est $E = 0,76N^{1,9}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,957$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,98$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



L'équation obtenue est $K = 4,440N^{1,59}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,93$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,96$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



L'équation obtenue est $V_p = 63,7N^{0,75}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,856$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,92$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



L'équation obtenue est $\nu = 0,47N^{0,049}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,11$ et un coefficient de corrélation $R = 0,33$.

Fig.VI.13. courbes de corrélation par progression en puissance (Tout le sol).

VI.4.3. Corrélations entre Vs- q_c :

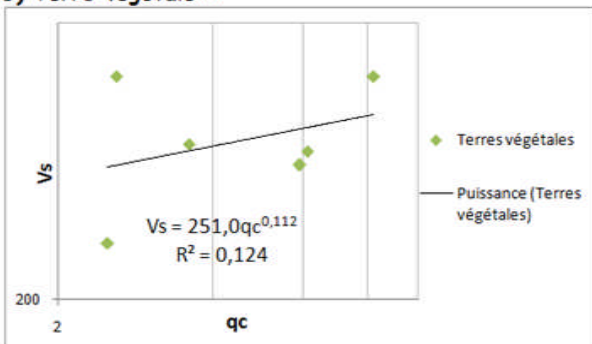
VI.4.3.1. Analyse des résultats :

L'analyse des sondages carottés, des pénétrogrammes et des vitesses de cisaillement Vs obtenus ont permis de constater ce qui suit :

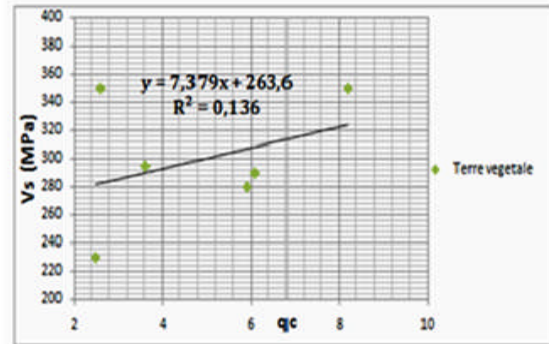
1 – Les valeurs de la résistance de pointe q_c varient de 2 à 9 bars dans la couche superficielle (terre végétale), de 10 à 40 bars dans la couche argileuse argiles intercalant la couche superficielle et la couche marneuse bariolée parfois fissurée dont la résistance de pointe à la pénétration à l'essai CPT peut atteindre 50 bars.

2 - Quant aux valeurs de Vs, elles se propagent à une vitesse de 230 à 350 m/s dans la couche de terre végétale et à une vitesse de 450 à 650 m/s dans la couche argileuse et varie entre 1000 à 1200 m/s dans les marnes. Dans l'ensemble, sur la base des résultats obtenus, nous proposons une équation déduite du graphe suivant :

B) Terre végétale :



L'équation obtenue est $V_s = 251,0q_c^{0,112}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,124$. Le coefficient de corrélation $R = 0,35$. La corrélation entre les deux paramètres est très faible $-0,4 < R < +0,4$.

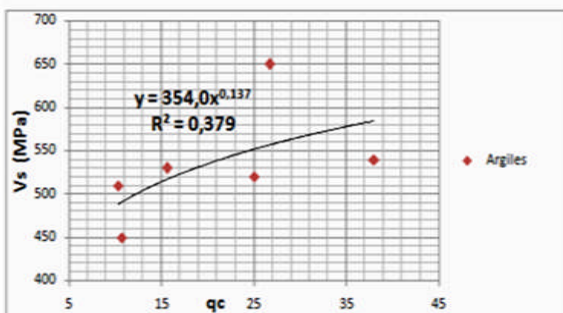


L'équation obtenue est $V_s = 7.379q_c + 263.6$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,136$. Le coefficient de corrélation $R = 0,37$. La corrélation entre les deux paramètres est très faible $-0,4 < R < +0,4$.

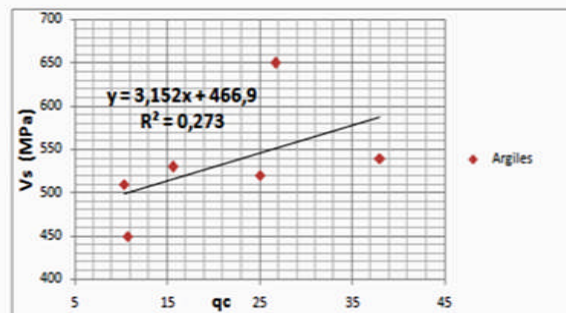
Fig.VI.14.courbes de corrélation Vs- q_c pour la terre végétale.

Nous allons adopter l'équation de corrélation de forme $V_s = 7.379q_c + 263.6$, pour la couche terre végétale, correspondante au coefficient de corrélation le plus élevé $R = 37\%$.

C) Couche argileuse :



L'équation obtenue est $V_s = 354q_c^{0,137}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,379$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,61$. La corrélation entre les deux paramètres est moyen $(-0,6 < R < +0,75)$.

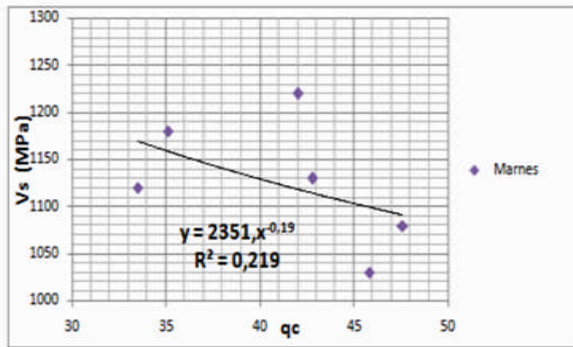


L'équation obtenue est $V_s = 3.152q_c + 466.9$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,27$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,52$. La corrélation entre les deux paramètres est faible $(-0,4 < R < +0,6)$.

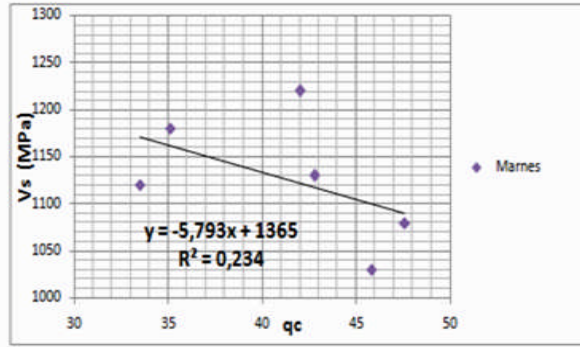
Fig.VI.15.courbes de corrélation Vs- q_c pour la couche argileuse.

Nous allons adopter l'équation de corrélation de forme $V_s=354qc^{0.137}$, pour la couche Argileuse, correspondant au coefficient de corrélation le plus élevé $R=61\%$.

D) Couche marneuse :



L'équation obtenue est $V_s = 2351qc^{-0.19}$ avec un coefficient de détermination $R^2= 0.219$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,47$. La corrélation entre les deux paramètres est faible ($-0.4 < R < +0.6$).

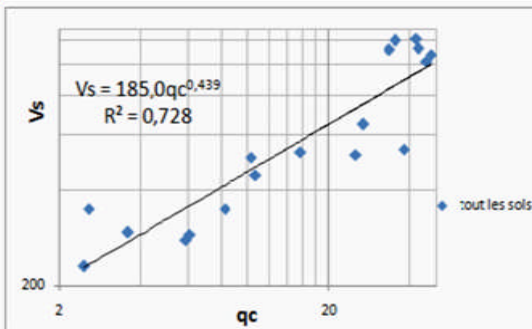


L'équation obtenue est $V_s = 5.783qc+1365$ avec un coefficient de détermination $R^2= 0.23$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,48$. La corrélation entre les deux paramètres est faible ($-0.4 < R < +0.6$).

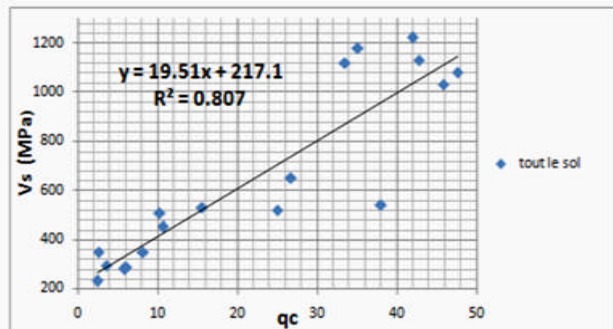
Fig.VI.16.courbes de corrélation Vs-qc pour la couche marneuse.

Nous allons adopter l'équation de corrélation de forme $V_s=-5.783qc+1365$, pour la couche Argileuse, correspondant au coefficient de corrélation le plus élevé $R=48\%$.

A) Tout le sol :



L'équation obtenue est $V_s = 185qc^{0.439}$ avec un coefficient de détermination $R^2= 0.728$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,85$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



L'équation obtenue est $V_s = 19.51qc+217.1$ avec un coefficient de détermination $R^2= 0.81$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,9$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).

Fig.VI.17.courbes de corrélation Vs-qc pour Tout le sol.

Nous allons adopter l'équation corrélation de forme $V_s=19.51qc+217.1$, pour tout le sol, correspondant au coefficient de corrélation le plus élevé $R=90\%$.

Application :

Sur la base des résultats déjà obtenus ci-dessus, nous allons, déterminer la valeur de V_s à partir de l'équation proposée pour la corrélation V_s-qc pour les différentes couches du sol.

A) Terre végétale :

A partir de l'équation établie, pour la couche de terre végétale de Ouled Fayet, dont l'expression est : $V_s = 7.379qc+263.6$ avec $R=37\%$.

sondages	Piézo(m)	qc	Vs m (m/s)	Vs ce (m/s)	Erreur
Sc 03	/	3.6	295	290	1.64%
Sc 05	/	2.5	230	282	22.63%
Sc 06	/	8.2	350	324	7.40%
Sc 04	/	5.9	280	307	9.69%
Sc 09	/	2.6	350	283	19.20%
Sc 11	/	6.1	290	309	6.42%

Ces résultats nous permettent de montrer que l'erreur varie de 1.7 à 22.6%.

B) couche argileuse :

A partir de l'équation établie, pour la couche argileuse de Ouled Fayet, dont l'expression est : $Vs = 354qc^{0.137}$ avec R = 61 %.

Sc (i)	Profondeur (m)	Piézo (m)	qc	Vs m (m/s)	Vs ce (m/s)	Erreur
Sc 03	1 - 4	/	25	520	550	5.81%
Sc 05	1 - 10	/	26.7	650	555	14.5%
Sc 06	1 - 5	/	38	540	583	7.91%
Sc 04	1 - 4	3	15.6	530	516	2.68%
Sc 09	1 - 3	/	10.3	510	487	4.46%
Sc 11	1 - 3	/	10.7	450	490	8.85%

Ces résultats nous permettent de montrer que l'erreur varie de 1 à 14.5%.

C) marnes :

A partir de l'équation établie, pour la couche de terre végétale de Ouled Fayet, dont l'expression est : $Vs = -5.793qc+1365$ avec R = 48%.

Sondage	Profondeur (m)	Piézo (m)	qc	Vs m (m/s)	Vs ce (m/s)	Erreur
Sc 03	4 - 11	/	42.8	1130	1117	1.15%
Sc 05	10 - 12	/	35.1	1180	1162	1.53%
Sc 06	5 - 11	/	42	1220	1122	8.03%
Sc 04	4 - 12	3	33.5	1120	1171	4.55%
Sc 09	3 - 10	/	47.6	1080	1089	0.83%
Sc 11	3 - 10	/	45.8	1030	1100	6.8%

Ces résultats nous permettent de montrer que l'erreur varie de 1.4 à 8.03%.

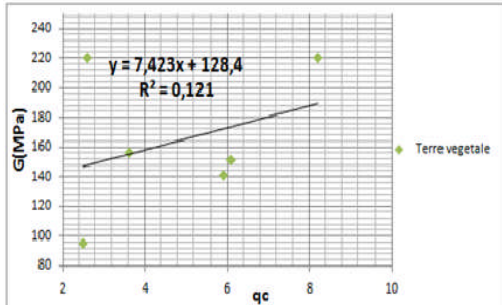
Commentaire :

L'équation de corrélation dont l'erreur relative avoisine ou dépasse 20% ne sera pas prise en compte, il faut dans ce cas faire recours à d'autres approches. Dans les sondages Sc05 et Sc09 pour la couche de sol « terre végétale » l'erreur relative est considérable donc l'équation de corrélation établie donc n'est pas adéquate.

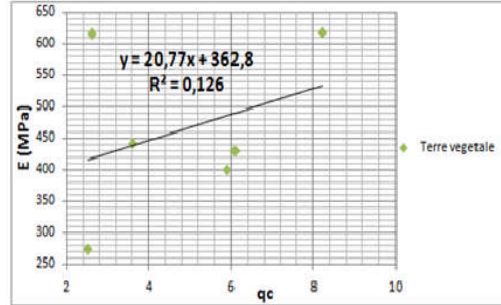
VI.4.4. Corrélation entre les paramètres géodynamiques et qc:

VI.4.4.1. Corrélation par progression linéaire :

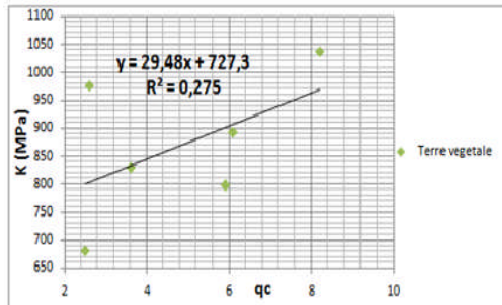
A) Terre végétale :



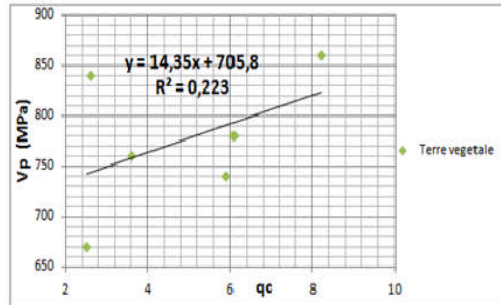
L'équation obtenue est $V_s = 7.42qc + 128.4$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.12$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,35$. La corrélation entre les deux paramètres est très faible ($-0.4 < R < +0.4$).



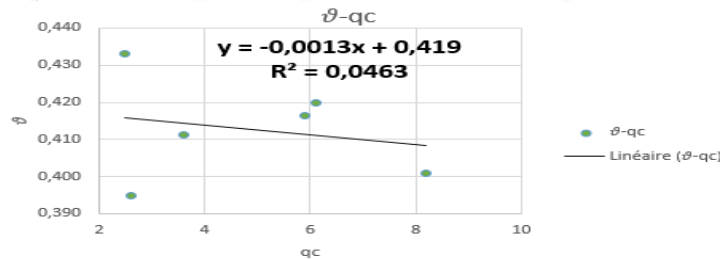
L'équation obtenue est $V_s = 20.77qc + 362.8$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.13$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,36$. La corrélation entre les deux paramètres est très faible ($-0.4 < R < +0.4$).



L'équation obtenue est $V_s = 29.48qc + 727.3$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.27$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,52$. La corrélation entre les deux paramètres est faible ($+0.4 < R < +0.6$).



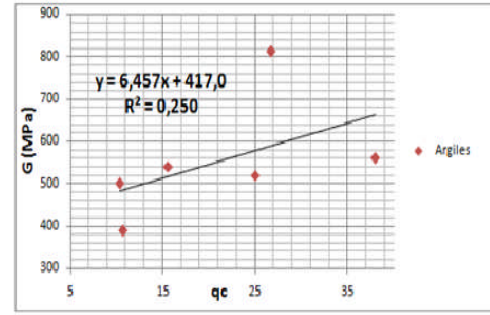
L'équation obtenue est $V_s = 14.35qc + 705.8$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.22$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,47$. La corrélation entre les deux paramètres est faible ($-0.4 < R < +0.6$).



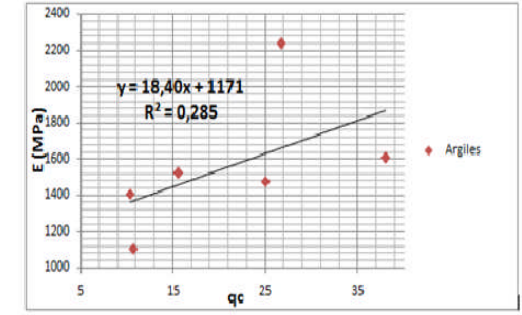
L'équation obtenue est $\vartheta = -0.0013qc + 0.419$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.046$ et un coefficient de corrélation $R = 0.21$.

Fig.VI.18. Courbes de corrélation par progression linéaire (Terre végétale).

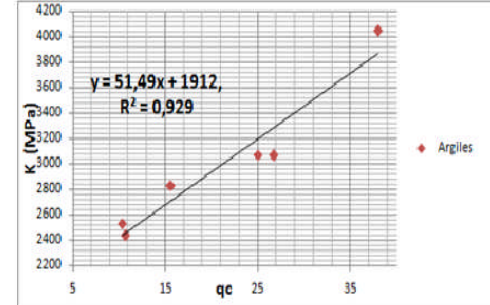
B) Argiles :



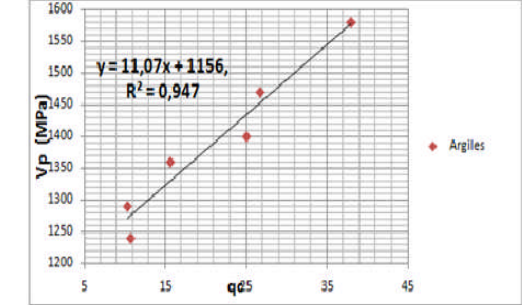
L'équation obtenue est $V_s = 6.46qc + 417$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.25$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,5$. La corrélation entre les deux paramètres est faible ($-0.4 < R < +0.6$).



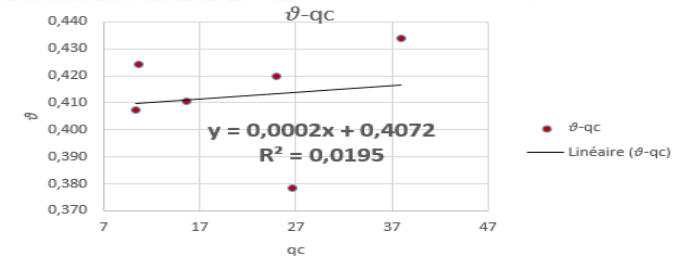
L'équation obtenue est $V_s = 18.4qc + 1171$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.28$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,53$. La corrélation entre les deux paramètres est faible ($-0.4 < R < +0.6$).



L'équation obtenue est $V_s = 51.49qc + 1912$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.93$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,96$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($-0.75 < R < +1$).



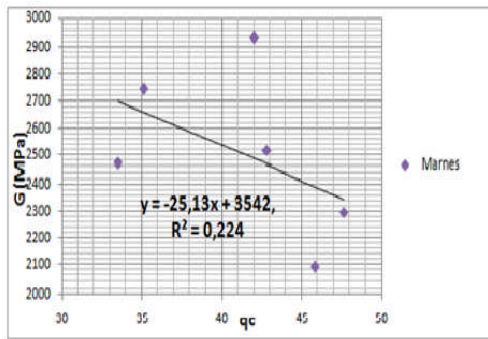
L'équation obtenue est $V_s = 11.07qc + 1156$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.95$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,97$. La corrélation entre les deux paramètres est très faible ($-0.75 < R < +1$).



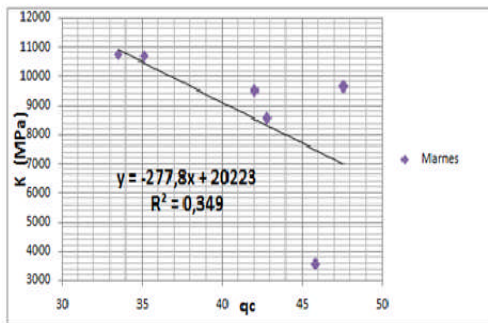
L'équation obtenue est $\vartheta = 0.0002qc + 0.40$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.019$ et un coefficient de corrélation $R = 0.14$.

Fig.VI.19. Courbes de corrélation par progression linéaire (Argiles).

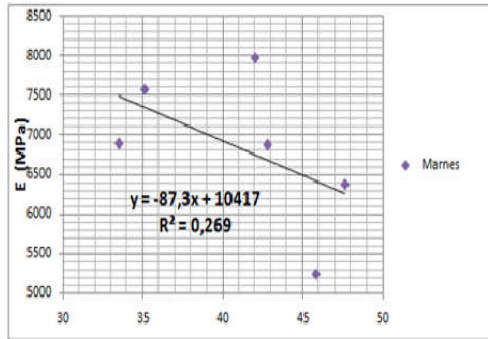
C) Marnes :



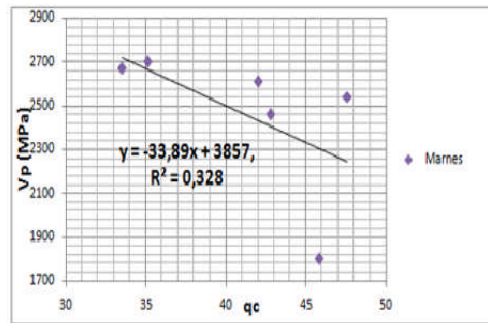
L'équation obtenue est $V_s = -25,13qc + 3542$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,22$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,47$. La corrélation entre les deux paramètres est faible ($-0,4 < R < +0,6$).



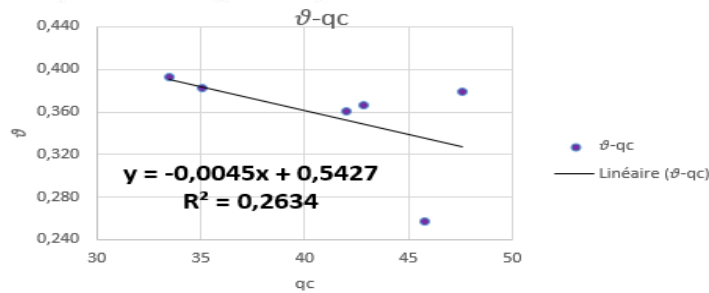
L'équation obtenue est $V_s = -277,8qc + 20223$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,35$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,59$. La corrélation entre les deux paramètres est faible ($-0,4 < R < +0,6$).



L'équation obtenue est $V_s = -87,3qc + 10417$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,27$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,52$. La corrélation entre les deux paramètres est faible ($-0,4 < R < +0,6$).



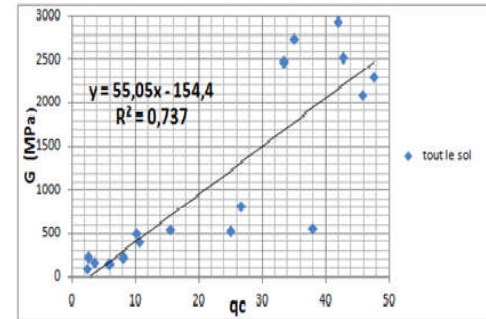
L'équation obtenue est $V_s = -3,89qc + 3857$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,33$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,57$. La corrélation entre les deux paramètres est faible ($-0,4 < R < +0,6$).



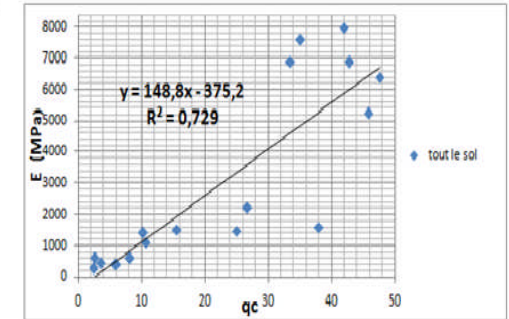
L'équation obtenue est $\vartheta = 0,0045qc + 0,54$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,26$ et un coefficient de corrélation $R = 0,53$.

Fig.VI.20. Courbes de corrélation par progression linéaire (Marnes).

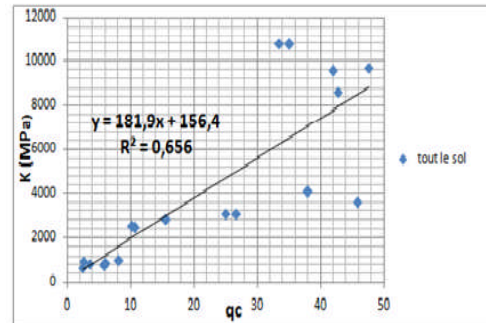
D) Tout le sol :



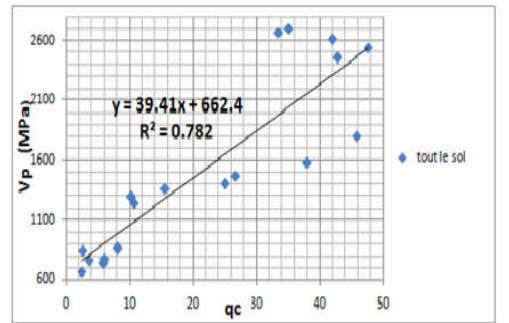
L'équation obtenue est $V_s = 55,05qc - 154,4$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,74$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,86$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



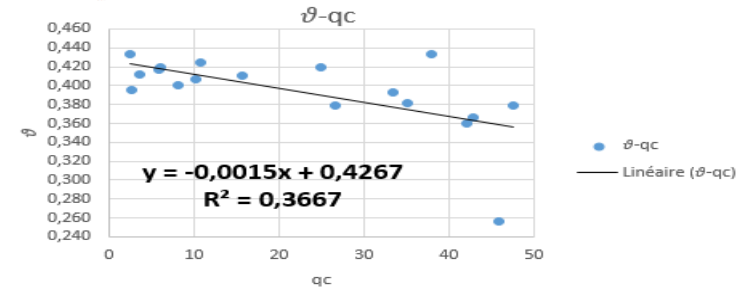
L'équation obtenue est $V_s = 148,8qc - 375,2$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,73$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,85$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



L'équation obtenue est $V_s = 181,9qc + 156,4$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,66$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,81$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).



L'équation obtenue est $V_s = 39,41qc + 662,4$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,78$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,88$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0,75 < R < 1$).

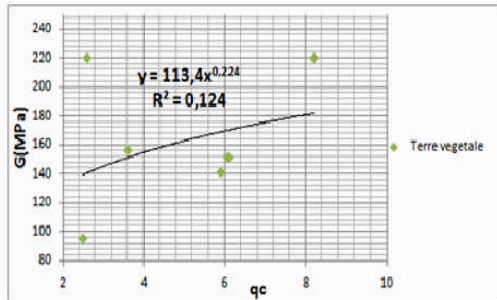


L'équation obtenue est $\vartheta = 0,0015qc + 0,42$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,37$ et un coefficient de corrélation $R = 0,61$.

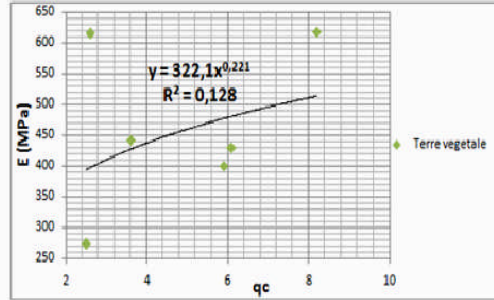
Fig.VI.21. Courbes de corrélation par progression linéaire (Tout le sol).

VI.4.4.2. Corrélation par progression puissance :

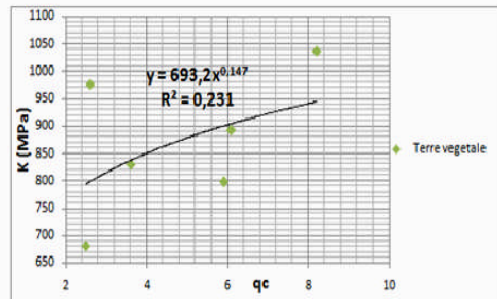
A) Terre végétal :



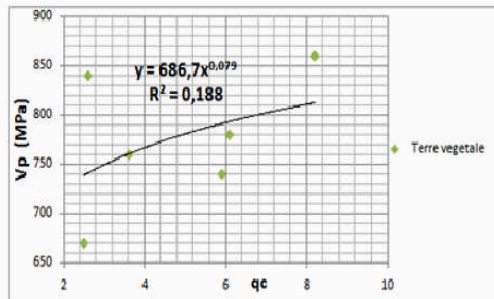
L'équation obtenue est $G = 113,4qc^{0,224}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,124$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,35$. La corrélation entre les deux paramètres est très faible ($-0,4 < R < +0,4$).



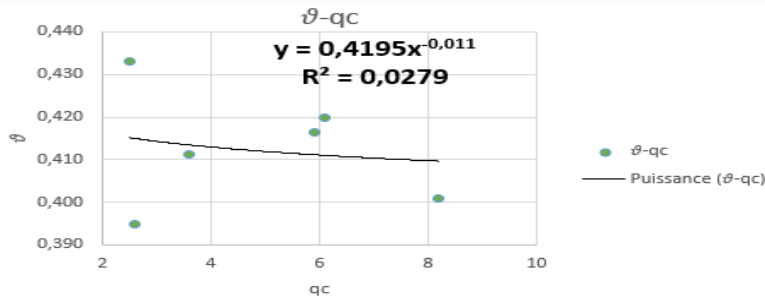
L'équation obtenue est $E = 322,1qc^{0,221}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,128$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,35$. La corrélation entre les deux paramètres est très faible ($-0,4 < R < +0,4$).



L'équation obtenue est $K = 693,2qc^{0,147}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,231$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,48$. La corrélation entre les deux paramètres est faible ($+0,4 < R < +0,6$).



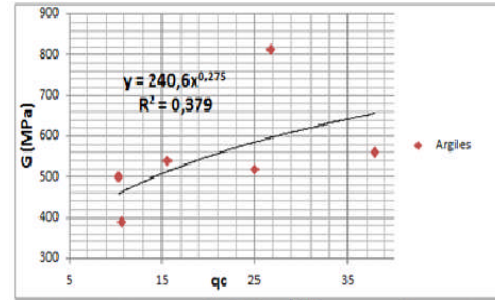
L'équation obtenue est $V_p = 686,7qc^{0,079}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,188$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,43$. La corrélation entre les deux paramètres est faible ($-0,4 < R < +0,6$).



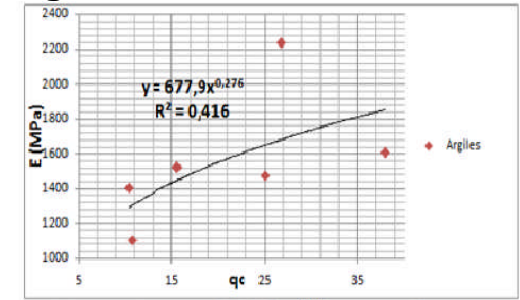
L'équation obtenue est $\varphi = 0,42qc^{-0,011}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,028$ et un coefficient de corrélation $R = 0,17$.

Fig.VI.22. Courbes de corrélation par progression en puissance (Terre végétale).

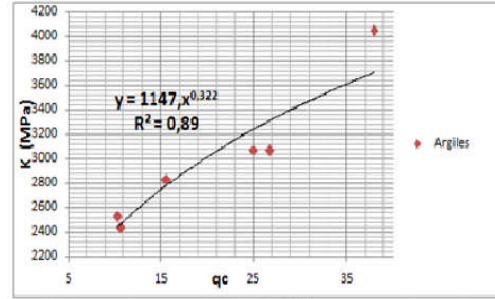
B) Argiles :



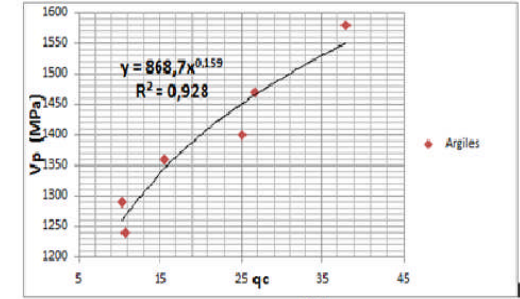
L'équation obtenue est $G = 240,6qc^{0,275}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,379$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,61$. La corrélation entre les deux paramètres est moyen ($-0,6 < R < +0,75$).



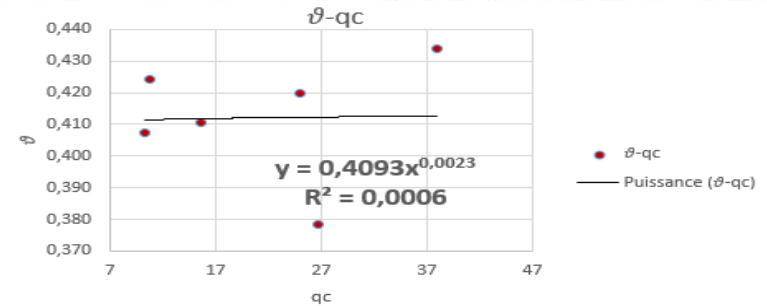
L'équation obtenue est $E = 677,9qc^{0,276}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,416$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,64$. La corrélation entre les deux paramètres est moyen ($-0,6 < R < +0,75$).



L'équation obtenue est $K = 1147qc^{0,322}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,89$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,94$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($-0,75 < R < +1$).



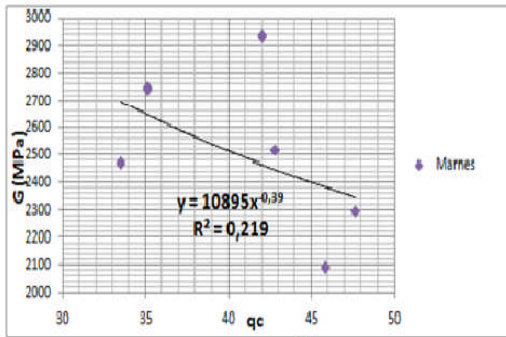
L'équation obtenue est $V_p = 868,7qc^{0,159}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,928$ et le coefficient de corrélation est $R = 0,96$. La corrélation entre les deux paramètres est très faible ($-0,75 < R < +1$).



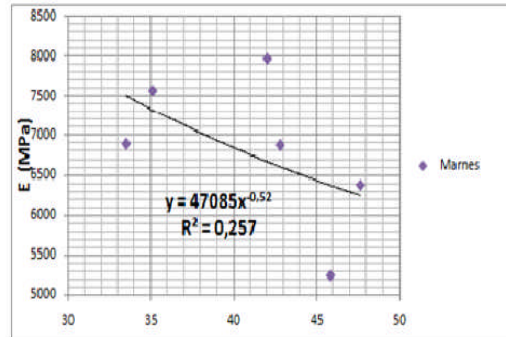
L'équation obtenue est $\varphi = 0,41qc^{0,002}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,0006$ et un coefficient de corrélation $R = 0,024$.

Fig.VI.23. Courbes de corrélation par progression en puissance (Argiles).

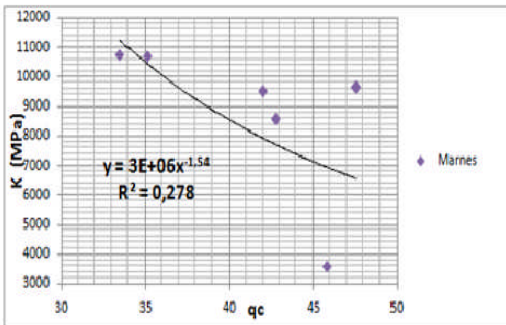
C) Marnes :



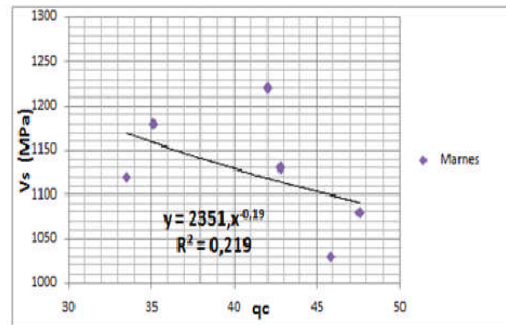
L'équation obtenue est $G = 10895qc^{-0.39}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.219$ et le coefficient de corrélation est $R = 0.46$. La corrélation entre les deux paramètres est faible ($-0.4 < R < +0.6$).



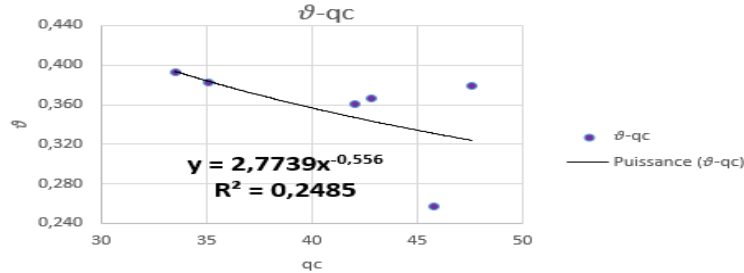
L'équation obtenue est $E = 47085qc^{-0.52}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.257$ et le coefficient de corrélation est $R = 0.51$. La corrélation entre les deux paramètres est faible ($-0.4 < R < +0.6$).



L'équation obtenue est $K = 3E+06qc^{-1.54}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.278$ et le coefficient de corrélation est $R = 0.53$. La corrélation entre les deux paramètres est faible ($-0.4 < R < +0.6$).



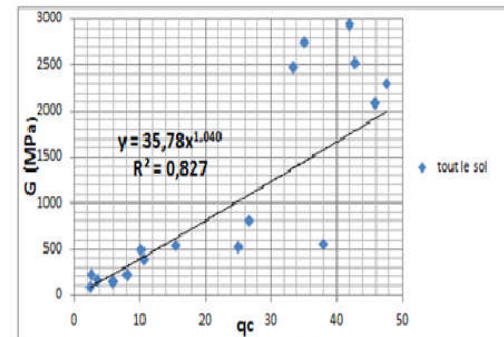
L'équation obtenue est $V_s = 2351qc^{-0.19}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.219$ et le coefficient de corrélation est $R = 0.47$. La corrélation entre les deux paramètres est faible ($-0.4 < R < +0.6$).



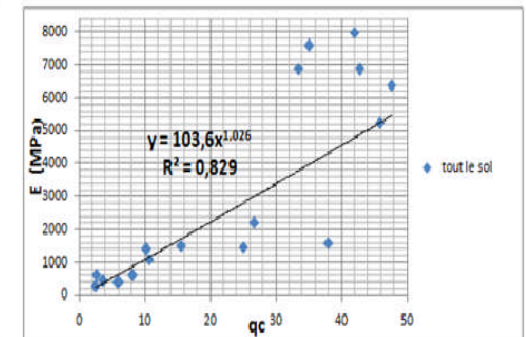
L'équation obtenue est $\varphi = 2.77Nqc^{-0.55}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.25$ et un coefficient de corrélation $R = 0.49$.

Fig.VI.24. Courbes de corrélation par progression en puissance (Marnes).

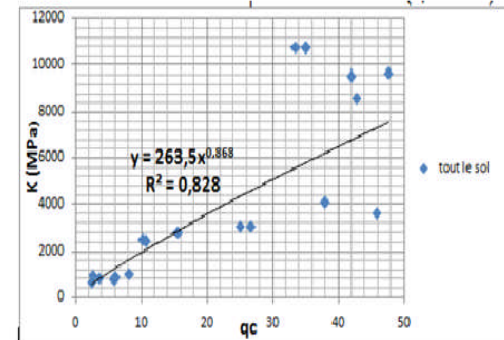
D) Tout sol :



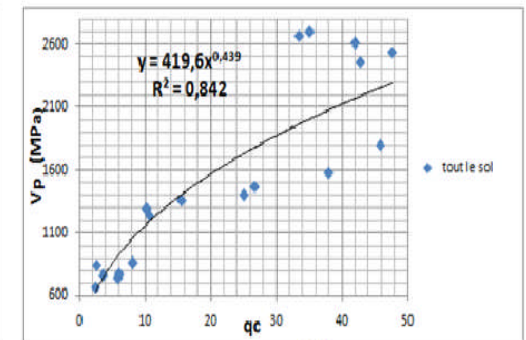
L'équation obtenue est $G = 35.78qc^{1.04}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.827$ et le coefficient de corrélation est $R = 0.91$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0.75 < R < 1$).



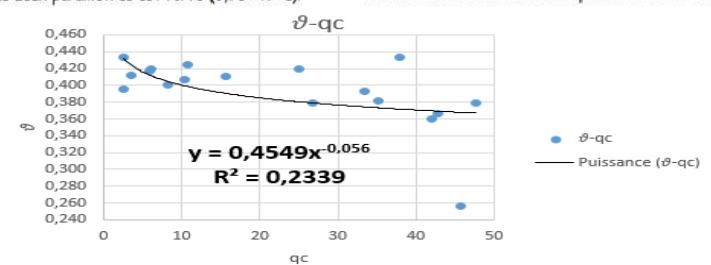
L'équation obtenue est $E = 103.6qc^{1.026}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.829$ et le coefficient de corrélation est $R = 0.91$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0.75 < R < 1$).



L'équation obtenue est $K = 263.5qc^{0.868}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.828$ et le coefficient de corrélation est $R = 0.90$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0.75 < R < 1$).



L'équation obtenue est $V_p = 419.6qc^{0.439}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.842$ et le coefficient de corrélation est $R = 0.91$. La corrélation entre les deux paramètres est forte ($0.75 < R < 1$).



L'équation obtenue est $\nu = 0.45qc^{-0.056}$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.23$ et un coefficient de corrélation $R = 0.48$.

Fig.VI.25. Courbes de corrélation par progression en puissance (Tout le sol).

Tableau VI.9. Récapitulatif des coefficients de corrélations

	Nature du sol	Vs (M/s)		Vp (M/s)		K (MPa)		E (MPa)		G (MPa)		θ		
		R ²	R	R ²	R	R ²	R	R ²	R	R ²	R	R ²	R	
Corrélation par régression linéaire	N	Tout sol	0.934	0.96	0.877	0.94	0.89	0.94	0.905	0.95	0.898	0.95	0.17	0.41
		Terre végétale	0.834	0.91	0.75	0.87	0.69	0.83	0.84	0.92	0.84	0.92	0.63	0.79
		argiles	0.765	0.87	0.802	0.89	0.551	0.74	0.779	0.88	0.747	0.87	0.27	0.52
		marnes	0.543	0.73	0.535	0.73	0.525	0.72	0.590	0.77	0.541	0.73	0.28	0.53
Corrélation par régression linéaire	qc	Tout sol	0.807	0.90	0.782	0.88	0.656	0.81	0.729	0.85	0.737	0.86	0.37	0.61
		Terre végétale	0.136	0.37	0.223	0.47	0.275	0.52	0.126	0.36	0.121	0.35	0.46	0.21
		argiles	0.273	0.52	0.947	0.97	0.929	0.96	0.285	0.53	0.250	0.50	0.019	0.14
		marnes	0.234	0.48	0.328	0.57	0.349	0.59	0.269	0.52	0.224	0.47	0.26	0.53
Corrélation par régression puissance	N	Tout sol	0.955	0.97	0.856	0.92	0.932	0.96	0.957	0.98	0.954	0.97	0.11	0.33
		Terre végétale	0.839	0.91	0.780	0.88	0.731	0.85	0.837	0.92	0.839	0.92	0.56	0.75
		argiles	0.761	0.87	0.845	0.91	0.644	0.80	0.791	0.89	0.761	0.87	0.27	0.52
		marnes	0.572	0.76	0.551	0.74	0.504	0.71	0.614	0.78	0.572	0.76	0.33	0.57
Corrélation par régression puissance	qc	Tout sol	0.728	0.85	0.842	0.91	0.828	0.90	0.829	0.91	0.827	0.91	0.23	0.48
		Terre végétale	0.124	0.35	0.188	0.43	0.231	0.48	0.128	0.35	0.124	0.35	0.028	0.17
		argiles	0.379	0.61	0.928	0.96	0.890	0.94	0.416	0.64	0.379	0.61	0.006	0.024
		marnes	0.219	0.47	0.298	0.55	0.278	0.53	0.257	0.51	0.219	0.46	0.25	0.49

Conclusion partielle:

Les travaux de corrélations des paramètres géotechniques N et qc des essais pénétrométriques dynamique SPT et statique CPT avec les paramètres géophysiques de l'essai Downhole à savoir Vs, Vp, G, E et K, du site de Ouled Fayet P.O.S sud, ont permis, par les deux méthodes de corrélations (progression linéaire et progression en puissance), d'établir une équation de corrélation pour chaque formation du sol avec un coefficient R le plus élevé.

L'équation de corrélation adoptée, pour chaque formation du sol, entre Vs-N et Vs-qc ont permis de calculer Vs_{calculé} avec une erreur variable inférieur à 20%.

Une autre méthode pour le calcul de Vs_{calculé} a été envisagé, $Vs_{calculé} = \frac{Vs_{calculé}^2}{Vs_{calculé}^2}$ exprime les valeurs de Vs_{calculé} avec une erreur variable inférieur à 20%.

Il existe une convergence entre les résultats de $V_{s\text{calculé}}$ obtenu à partir des deux méthodes suscités et ceux obtenus à partir des mesures sur place à l'essai Downhole. Ceci correspond à l'étude statistique des corrélations présentées dans le tableau récapitulatif des coefficients de corrélations R (Tableau.VI.10).

Sur la base de ces résultats, nous pouvons constater que le paramètre nature géologique du sol joue un rôle important dans l'établissement des corrélations, c'est pourquoi il est primordiale, avant de lancer n'importe quelle corrélation de tenir en compte la nature géologique du sol ainsi caractéristiques physiques. Pour une corrélation plus représentative, il est recommandé d'avoir le plus grand nombre de données à corrélérer.

Le tableau présenté ci-après nous permet de récapituler éventuellement les différentes valeurs des vitesses de cisaillement V_s obtenues, et ce, en appliquant trois méthodes :

- A partir des mesures effectuées sur le site.
- A partir des calculs déduits des équations de corrélation $V_s=f(N)$ et $V_s= f(q_c)$.
- A partir de la vitesse de compression V_p .

Tableau VI.10. Récapitulatif des valeurs q_c , N et V_s .

sondage	Lithologie	Profondeur (m)	Piézo (m)	N	V_s m (m/s)	V_s ce (m/s)	V_s cf (m/s)	q_c	V_s ce (m/s)	V_p m (m/s)
Sc 03	Terre végétale	0 - 1	/	32	295	315	310	3.6	290	760
Sc 05	Terre végétale	0 - 1	/	21	230	248	275	2.5	282	670
Sc 06	Terre végétale	0 - 1	/	34	350	327	350	8.2	324	860
Sc 04	Terre végétale	0 - 1	/	23	280	258	305	5.9	307	740
Sc 09	Terre végétale	0 - 1	/	39	350	349	345	2.6	283	840
Sc 11	Terre végétale	0 - 1	/	27	290	284	320	6.1	309	780
Sc 03	Argiles marneuse peu limoneuse	1 - 4	/	62	520	550	505	25	505	1400
Sc 05	Argiles marneuse peu limoneuse	1 - 10	/	78	650	610	590	26.7	590	1470
Sc 06	Argiles marneuse peu limoneuse	1 - 5	/	71	540	580	500	38	500	1580
Sc 04	Argiles marneuse peu limoneuse	1 - 4	3	55	530	520	520	15.6	520	1360
Sc 09	Argiles marneuse peu limoneuse	1 - 3	/	48	510	480	515	10.3	515	1290
Sc 11	Argiles marneuse peu limoneuse	1 - 3	/	44	450	465	457	10.7	457	1240
Sc 03	Marne bariolée	4 - 11	/	96	1130	1078	1200	42.8	1117	2460
Sc 05	Marne bariolée	10 - 12	/	140	1180	1203	1150	35.1	1162	2700
Sc 06	Marne bariolée	5 - 11	/	120	1220	1151	1270	42	1122	2610
Sc 04	Marne bariolée	4 - 12	3	115	1120	1136	1185	33.5	1171	2670
Sc 09	Marne bariolée	3 - 10	/	106	1080	1110	1090	47.6	1089	2540
Sc 11	Marne bariolée	3 - 10	/	91	1030	1062	1080	45.8	1100	1800

V_p et V_s : vitesses de compression et de cisaillement ; avec **m** : mesurée

ce : calculée à partir de l'équation [A] et **cf** : calculée à partir de la formule [B]

Vs q_c : calculée à partir de q_c à partir de l'équation [A].

2) Deuxième partie des corrélations :

VI.5. Corrélation entre les paramètres pressiométriques et pénétrométriques :

Les essais in situ en mécanique des sols (M.D.S), permettent de déterminer les paramètres mécaniques caractérisant les résistances du sol. Il serait donc intéressant de savoir s'il existe des relations fonctionnelles entre ces différents paramètres.

Le problème principal pour la construction d'un modèle de corrélation est la définition, d'un type de fonction analytique ou empirique qui représente les mécanismes de relation entre les variables.

Pour une corrélation entre deux paramètres mécaniques, il faut s'assurer qu'ils appartiennent à la même classe et faire très attention aux conditions expérimentales qui peuvent avoir une influence importante sur les valeurs des paramètres mesurés.

Travaillant sur des argiles de Chalon sur Saône. M. CASSAN (1978) a obtenu une corrélation entre les résultats pénétrométriques et préssiométriques qui est donnée par la (Fig. VI.26):

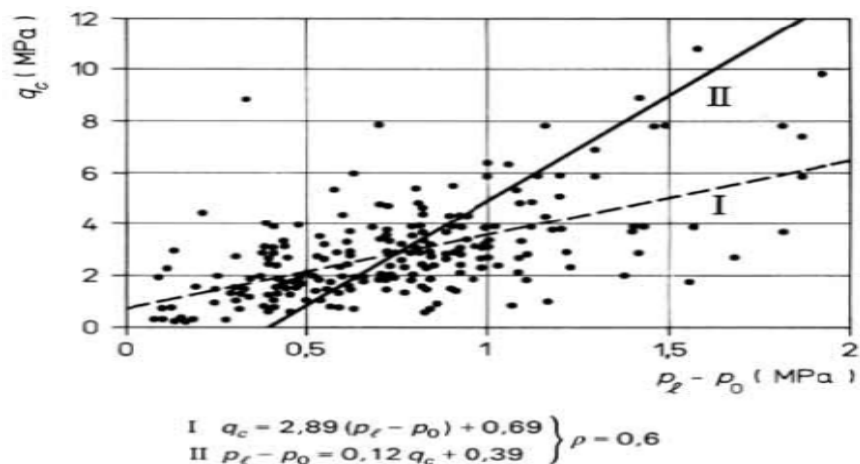


Fig. VI.26. Courbe de corrélation $q_c - (p_l - p_0)$ CASSAN (1978).

Le but de ce chapitre est de faire quelques corrélations entre les caractéristiques mécaniques des sols tel que la résistance de pointes q_c obtenues du pénétromètre statiques CPT et les caractéristiques préssiométriques tel (la pression limite (p_l), le module préssiométriques (E_p) ...etc. Le sol qui fait objet de cette étude, est un sol du P.O.S sud de Ouled Fayet normalement consolidées.

VI.5.1. Analyse de données :

Les méthodes de calcul pénétrométriques sont essentiellement empiriques, et en raison de la complexité de l'interprétation théorique du problème de pénétration d'un cône dans un massif. Par contre l'essai pressiométrique est plus facile à interpréter sur le plan théorique et fournis alors des approches semi-empiriques pour le calcul de la portance des fondations.

Contrairement à l'essai pressiométrique, qui permet d'étudier la loi contrainte-déformation. La pénétration d'un cône dans le sol ne permet de mesurer que la résistance du sol, et cela explique en partie, pourquoi l'essai pénétrométrique est moins utilisé dans la pratique courante que l'essai pressiométrique.

Trois types de corrélations ont été systématiquement étudiés :

- Corrélation entre résistance de pointe du CPT et pression limite (q_c - p_l).
- Corrélation entre résistance de pointe du CPT et module pressiométrique (q_c - E_p).
- Corrélation entre pression limite de Menard et le module pressiométrique (P_l - E_p).

Le tableau suivant regroupe toutes les données recueillies et utilisées pour établir les corrélations entre les paramètres pressiométriques et pénétrométriques :

Tableau. VI.11. Base de données q_c , p_l et E_p .

CPT	SP	profondeur	Nature du sol	q_c	P_l	E_p
09	06	1-10	ARGILES	26.7	6.8	78.67
		10-30	MARNES	35.7	9.7	182.64
09	01	1-8	ARGILES	25.6	8.6	88.15
		9-30	MARNES	34.5	11.1	167.2
08	14	1-5	ARGILES	28	8.2	77.24
		5-12	MARNES	44.2	11.9	182.03
07	12	1-12	ARGILES	36	10.2	106.3
		12-30	MARNES	43.4	13.8	198.3
06	11	1-12	MARNES	31.4	8.9	128.14
05	07	1-12	MARNES	36.7	10.7	137.25
04	05	1-4	ARGILES	23.7	6.9	78.58
		4-12	MARNES	33.2	10.6	161.43
01	04	1-8	ARGILES	33.1	8.3	91.51
		8-12	MARNES SATUREE	38.2	11.7	155.76
03	03	1-12	MARNES	46.1	13.4	194.54
10	18	1-6	ARGILES	20.8	6.1	67.05
		6-20	MARNES BEIGE SATUREE	42.3	12.8	166.13
02	19	1-4	ARGILES	30.2	7.4	98.22
		4-20	MARNES	38.6	10.4	177.97

VI.5.2.1. Corrélation entre $q_c - P_1$:

Dans une étude réalisée en Belgique, le professeur Van Wambecke (1969) a trouvé que le rapport (q_c/P_1) est égal à 3,5. Par la suite, il a énoncé les valeurs de 3,6 et 9 pour les argiles, les limons et les sables respectivement. Sur les argiles peu plastiques de Chalon sur Saône, CASSAN (1978) a trouvé que : $3 < (q_c/P_1) < 4$, avec une valeur moyenne ajustée de 3,8.

Bouafia (1998) a trouvé que ce rapport était en moyenne de 3.7 avec un coefficient de variation de 27%.

Dans ce cadre, une étude de corrélation a été réalisée sur le site P.O.S sud de Ouled Fayet caractérisée par **Les argiles et marnes sahéliennes** normalement consolidées.

La corrélation entre $(q_c - P_1)$ pour le sol de Ouled Fayet est illustrée dans les (Fig.VI.26). L'ensemble de ces figures marquent une fluctuation des points autour d'une droite et dénote ainsi le rapport (q_c/P_1) qui est constant.

Les valeurs du rapport (q_c/P_1) est de 3.59 pour les argiles. L'équation de corrélation par progression linéaire: $PI=0.28q_c$ avec $R= +0.77$. L'équation de corrélation par progression puissance : $PI=0.66q_c^{0.74}$ avec $R= 0.81$.

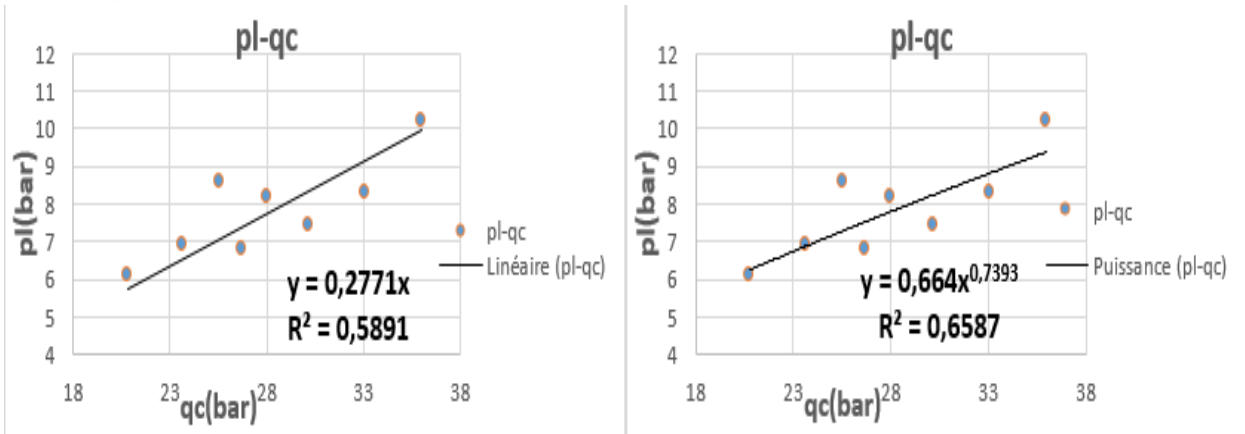


Fig. VI.27. Corrélation entre $(q_c - pl)$ pour les marnes de Ouled Fayet.

Les valeurs du rapport (q_c/P_1) est de 3.41 pour les marnes avec $R= +0.83$ pour l'équation de corrélation par progression linéaire $PI=0.3q_c$ et $R=0.84$ pour l'équation de corrélation par progression puissance $PI=0.39q_c^{0.92}$

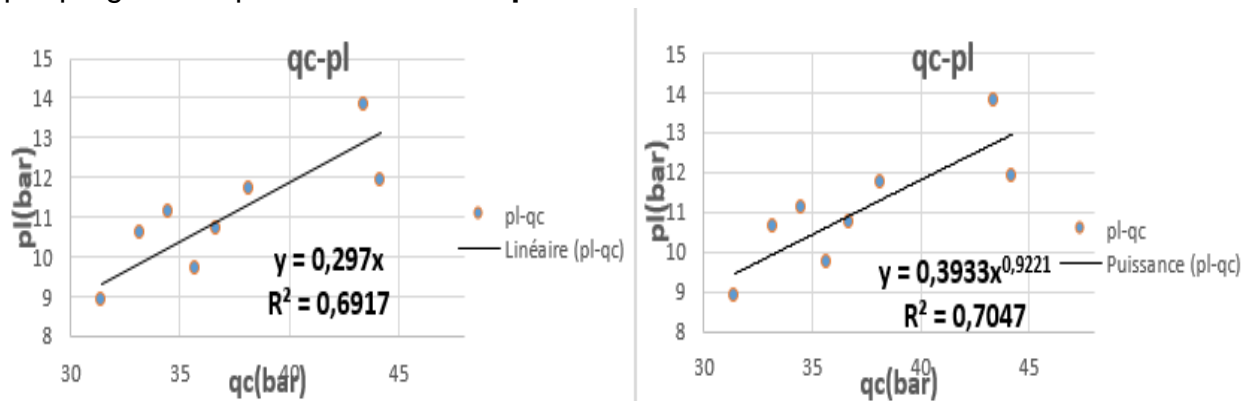


Fig. VI.28. Corrélation entre $(q_c - pl)$ pour les Argiles de Ouled Fayet.

Cependant pour la corrélation générale regroupant les différentes nature de sol, le rapport (q_c/P_i) est de 3.49 avec un $R = +0.93$ pour $PI = 0.29q_c$ et pour $PI = 0.28q_c^{1.01}$.

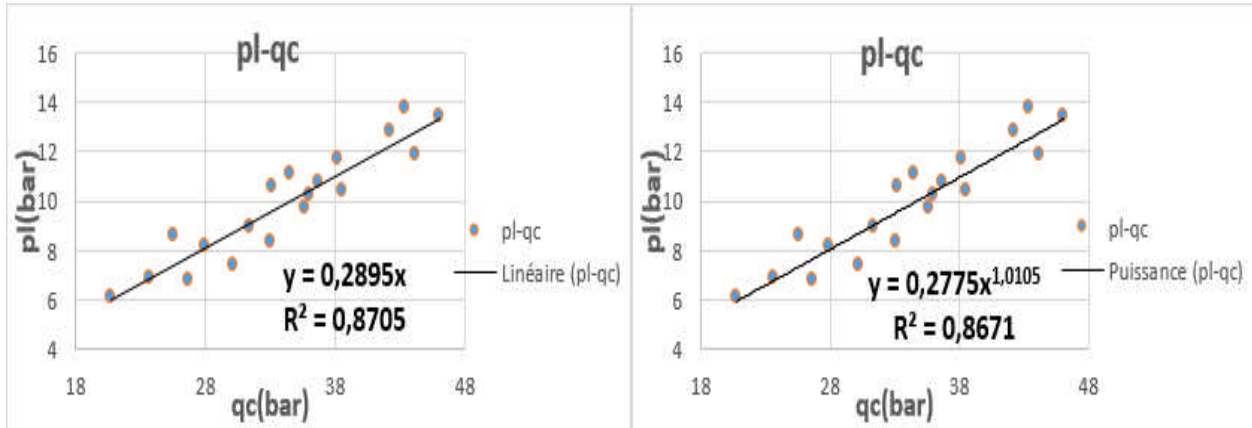


Fig. VI.29. Corrélation entre (qc-PI) pour le sol de Ouled Fayet.

Commentaire:

Pour l'ensemble des corrélations étudiées à travers les différentes couches du sol, on peut retenir une valeur moyenne ajustée du rapport (q_c/P_i) comprise entre 3 et 4. L'équation de corrélation (pl-qc) obtenue pour tout le sol est $PI = 0.29q_c$ avec un $R = 0.93$.

Les résultats obtenus pour les corrélations entre qc-PI se situent dans les mêmes plages que ceux obtenus par d'autres auteurs. Pour le sol du P.O.S sud de Ouled Fayet la corrélation est forte entre les paramètres qc- P_i ($0.75 < R < 1$) pour les deux approches.

VI.5.2.2. Corrélation entre qc - Ep :

En analysant les 165 essais comparatifs du site Chalon sur Saône, CASSAN a déduit que le rapport (E_p/q_c) est en moyenne de 2.6. Van Wamecke (1969) a noté que ce rapport dépend de l'état de consolidation du sol. Ce même auteur a trouvé que ce rapport est de 4.5 pour les argiles normalement consolidées et tourne dans la plage de 5 à 7 pour les argiles surconsolidées. De même, en analysant une base de données relative à l'Algérois, Bouafia en 1998, à montrer que ce même rapport dépend peu de la plasticité de l'argile avec une valeur moyenne de 3.9 avec $R = 0.28$. Sur la même base de donnée déjà évoquée, une étude de corrélation a été effectuée à base des résultats obtenus des essais préssiométriques et pénétrométriques cpt.

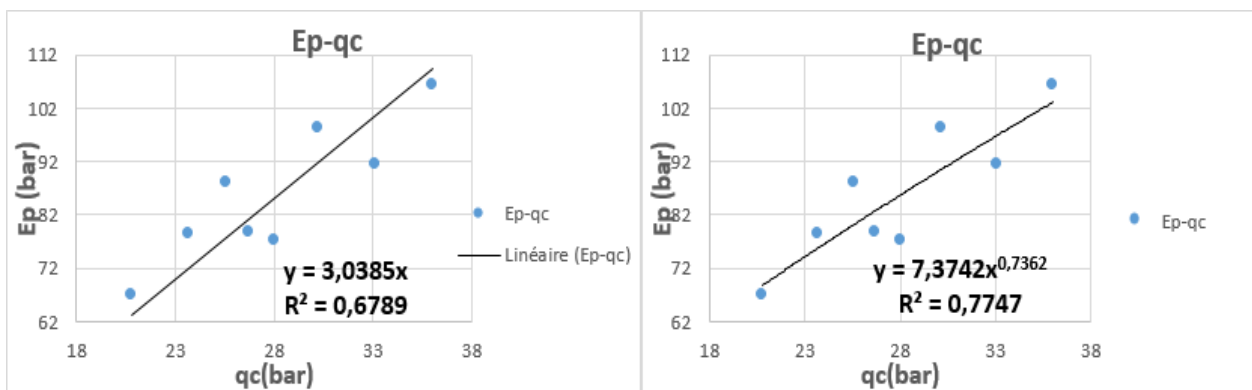


Fig VI.30. Corrélation entre (qc-Ep) pour les argiles de Ouled Fayet.

L'analyse des résultats a donné un rapport moyen de $E_p/q_c = 3.1$ pour la couche argileuse, avec $R=0.82$ l'équation de corrélation par progression linéaire $E_p=3.04q_c$ et un $R= 0.87$ pour l'équation de corrélation par progression puissance $E_p=7.37q_c^{0.74}$.

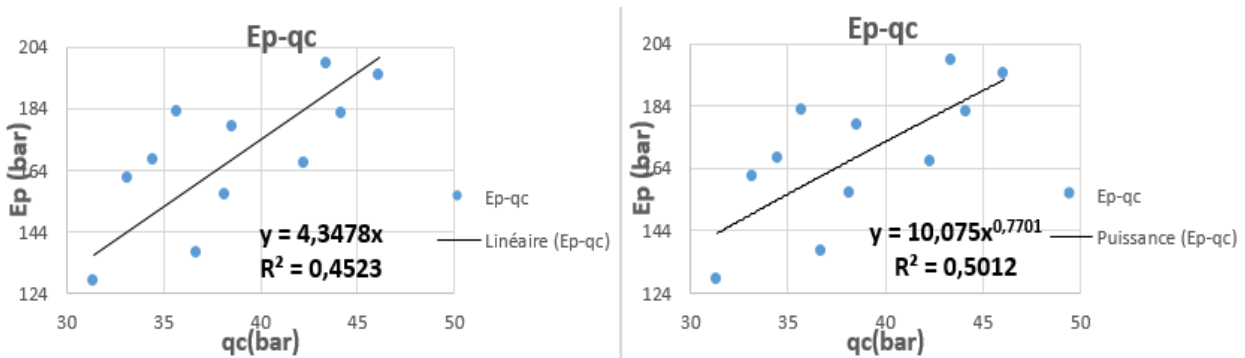


Fig. VI.31. Corrélation entre (qc-Ep) pour les marnes de Ouled Fayet.

L'analyse des résultats a donné un rapport $E_p/q_c = 4.48$ pour la couche marneuse. L'équation de corrélation par progression linéaire est $PI=4.35q_c$ Avec $R=0.67$ et $PI=10.07q_c^{0.77}$ avec un coefficient de corrélation $R= 0.71$.

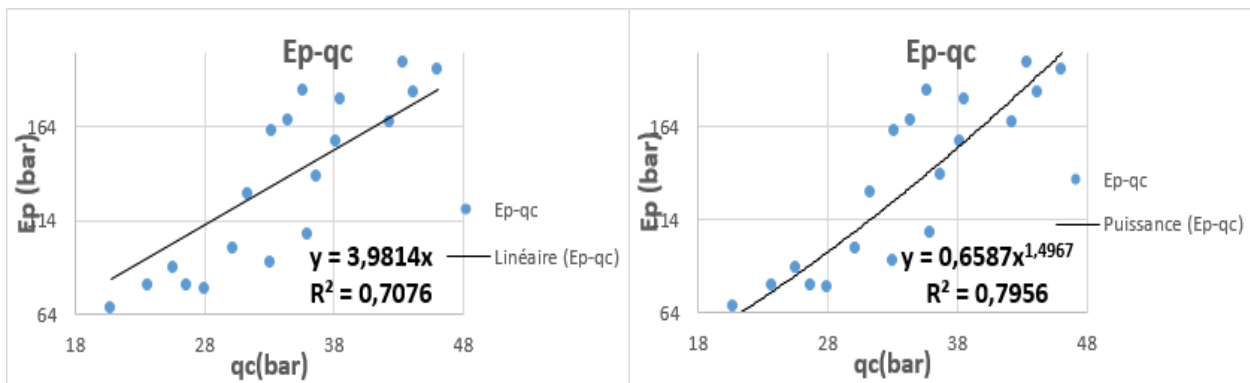


Fig. VI.32. Corrélation entre (qc-Ep) pour le sol de Ouled Fayet.

L'équation de corrélation par progression linéaire obtenue pour tout le sol est $PI=3.98q_c$ avec $R= 84\%$ inférieur au coefficient de corrélation $R=0.89$ obtenu de l'équation de tendance en puissance $PI=0.66q_c^{1.49}$.

Commentaire:

Nous constatons que la valeur du rapport E_p/q_c pour le site P.O.S sud de ouled Fayet tourne autour de 3 à 5 .ces valeurs convergent avec les résultats de l'étude de Bouafia (1998) sur le sol Algérois. La valeur moyenne pour tout le sol donne une valeur de 3.48. Une forte corrélation avec $R = 89\%$ est obtenu de l'approche par progression en puissance $PI=0.66q_c^{1.49}$.

VI.5.2.3. Corrélation entre Ep-PI :

L'analyse des résultats des 11 sondages préssiométriques ont permis d'établir des corrélations entre le module pressiométrique et la pression limite (Ep-PI),les valeurs moyennes du rapport E_p/PI ont permis de classer le sol suivant l'état de consolidation (**Tableau. V.2**), ainsi contrôler les résultats des essais de laboratoire.

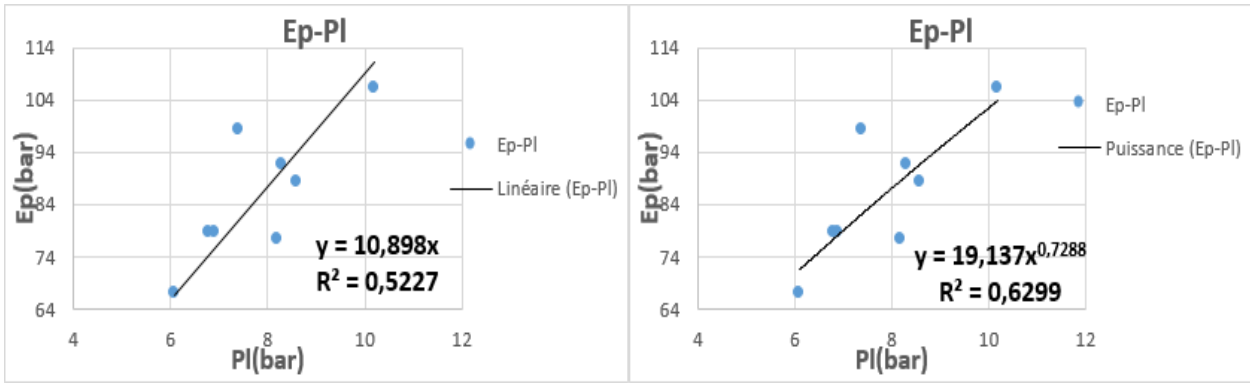


Fig. VI.33. Corrélation entre (Ep-Pl) pour les argiles de Ouled Fayet.

Les résultats donnés le par rapport moyen $Ep/qc=11.05$ pour les argiles de ouled Fayet avec un coefficient de corrélation $R= 0.72$ del'équation $PI=10.89qc$ et un $R=0.79$ pour l'équation de corrélation par progression en puissance $PI=19.13qc^{0.73}$.

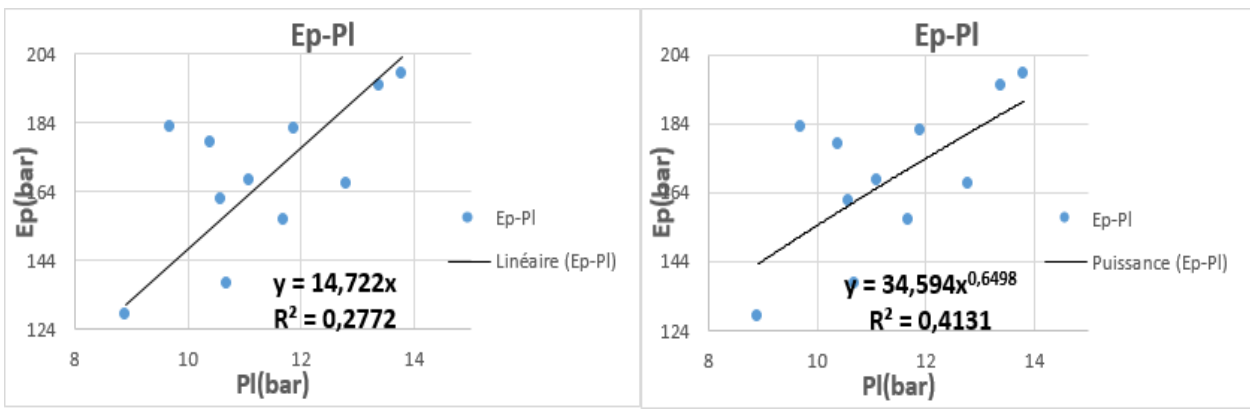


Fig. VI.34. Corrélation entre (Ep-Pl) pour les marnes de Ouled Fayet.

Le rapport moyen $Ep/qc = 14.9$ Pour les marnes de Ouled Fayet. L'équation de corrélation obtenu par progression linéaire: $PI=4.35qc$ avec un coefficient de corrélation $R= 0.52\%$ et par progression en puissance $PI=34.59qc^{0.65}$ avec un $R= 0.64$.

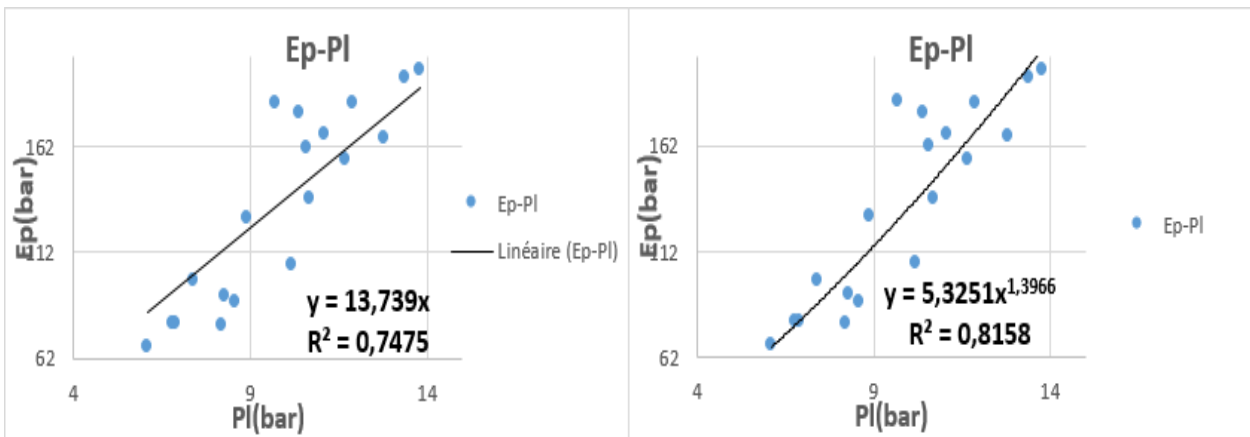


Fig. VI.35. Corrélation entre (Ep-Pl) pour les marnes de Ouled Fayet.

Les résultats donnés par le rapport moyen $Ep/qc=14.9$. Le coefficient de corrélation $R= 86\%$ obtenu L'équation $Ep=13.73pl$ est inférieur à $R=90\%$ issu de l'approche par progression en puissance obtenu de l'équation $Ep= 5.32pl^{1.4}$.

Commentaire:

L'interprétation des résultats obtenus révèle que le terrain, tenant compte de sa lithologie, est caractérisé par un rapport E_p / P_I qui varie entre 9 et 16, ce qui correspondant à un sol normalement consolidé et qui met en évidence, parallèlement, les résultats du rapport des essais de laboratoire relatif à l'état de consolidation du même sol. Les résultats des essais de laboratoire classe le sol comme étant très plastique.

Conclusion :

Cette présente étude, dont les résultats sont récapitulés dans le tableau VI.13 ci-dessous, a été menée dans l'objectif de présenter quelques corrélations reliant les paramètres préssiométriques et pénétrométriques du le sol du projet de 1500logements de Ouled Fayet POS sud qui présente des argiles et marne très plastique et normalement consolidées.

Pour le sol de ouled Fayet, les corrélations sont assez proches de celles données par Bouafia (1998) sur le sol de l'algérois et par d'autres auteurs pour les argiles normalement consolidées et surconsolidées (Briaud 1992).

Par contre, différemment de l'approche adoptée par Bouafia (1998) (approche par progression linéaire), nous pouvons constater à partir des résultats obtenus que les équations de corrélations par progression en puissance présentent des coefficients de corrélations plus importants que ceux des équations de corrélations par progression linéaire.

Cette étude reste donc une ébauche qui pourrait être étendue ultérieurement à un nombre de couple de donnes plus considérable de résultats non encore exploités et qui doit impérativement se faire sur des types de sols dont la lithologie est définie et identifiée suivant les systèmes de classification les plus usuels(état de compacité, état de plasticité, état de consolidation).

Tableau VI.12. Récapitulatif des corrélations (q_c , P_I , E_p).

Nature du sol	Etat de consolidation	Etat de plasticité	q_c / P_I	R_L	R_P	E_p/q_c	R_L	R_P	E_p/p_I	R_L	R_P
Argiles	Normalement consolidées	Très plastiques	3.59	0.77	0.81	3.1	0.82	0.87	11.05	0.72	0.79
Marnes	Normalement consolidées	Très plastiques	3.41	0.83	0.84	4.48	0.67	0.71	14.9	0.52	0.64
Tout sol	/	/	3.5	0.93	0.93	3.48	0.84	0.89	13.28	0.86	0.90

R_L : corrélation par progression linéaire

R_P : corrélation par progression en puissance

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce présent travail s'inscrit dans le cadre de l'étude de corrélations entre les paramètres géophysiques de l'essai Downhole et les paramètres géotechnique des essais auxpénétrromètres. Les travaux de ce chapitre portent, en première phase, sur la corrélation entre les paramètres dynamique telle que la vitesse de cisaillement V_s et des paramètres géotechniques tels que N (SPT) et q_c (CPT), d'autres corrélations entre les paramètres géophysiques à savoir G , E , K , V_p ont été établis aussi avec les même paramètres géotechniques N de l'essai (SPT) et q_c de l'essai (CPT).

La deuxième phase, est consacrée à la corrélation entre les paramètres préssiométriques E_p et P_l et la résistance de pointe q_c du pénétromètre statique(CPT). L'ensemble de ces corrélations sont construite à base des résultats des applications dans le P.O.S sud d'Ouled Fayet.

En référence aux travaux de certains auteurs tels que Imai(1977),Imai et Tonouchi (1982)...etc. nous avons introduit cette étude prenant en compte les paramètres V_s , N et q_c et l'expression des corrélations est : $V_s=f(N)$ et $V_s=f(q_c)$.de même pour les corrélations entre les paramètres préssiométriques; E_p , P_l et la résistance de pointe q_c (CPT), basées sur les travaux de nombreux auteur tel Van Wamecke (1969), CASSAN, et Bouafia en (1998)...

Les travaux de cette étude ont été réalisés au nord-ouest d'Alger, dans la région de Ouled Fayet et se sont axés sur les données géologiques;la région de Ouled Fayet fait partie du sahel d'Alger, caractérisée par deux formations géologiques distinctes:les argiles grisâtres sahélienne et le Plaisancienmarneux. Une étude géotechnique et géophysique a été également réalisée ce qui nous a donné accès à exploiter les résultats obtenus des essais in-situ, ce qui a permis de réaliser ces corrélations.

Les corrélations entre les paramètres étudiés tels que V_s - N et V_s - q_c déterminés à partir d'essais géotechniques pour N (SPT) et q_c (CPT) et géophysiques pour V_s qui ont permis d'obtenir des mesures que nous avons exploitées. Ces mesures ont été triées suivant la même lithologie et nous ont permis d'établir deux bases de données l'une pour la relation $V_s= f(N)$ et l'autre pour $V_s= f(q_c)$ à partir desquelles nous avons, en utilisant le programme Excel, développé des équations de corrélation par progression linéaire de la forme $Y= AX +B$ et des équation de corrélation par progression puissance de la forme $Y= A X^B$ (avec A , B des constantes) et R^2 est le coefficient de détermination et R le coefficient de corrélation où nous avons pris en considération l'équation de corrélation dont le coefficient de corrélation R le plus élevé.

Deux méthodes de calcul de V_s calculé ont été proposées, la première est faite à partir de l'équation de corrélation adoptée et la seconde est en fonction de la vitesse de compression mesurée sur le site à l'essai Downhole $V_{s\text{calculé}} = \frac{V_{s\text{mesurée}}}{\sqrt{\frac{V_{s\text{calculé}}}{V_{s\text{mesurée}}}}}$. ce qui a permis d'évaluer l'erreur entre les mesures calculées et mesurées dans les différentes couches des sondages.

Les résultats obtenus dans l'étude de la corrélation entre Vs-N ont permis de constater que la corrélation est forte pour les mesures effectuées, en comparaison avec les formules établies, entre autres, par Imai(1977),Imai, et Tonouchi (1982),Sisman (1995), Athanasopoulos (1995)et Jafari et Al (1997), en tenant compte du critère nature géologique de la formation dans laquelle les mesures ont été faites),qui ont abouti à des coefficients de corrélation R supérieurs à 0,75 .

Le rapport V_p/V_s varie de 1 à 3 (présentes données de l'étude) ce qui induit des mesures de V_s représentatives ou ;

Les valeurs de V_s calculé obtenues à partir des deux méthodes suscités, présentent une erreur inférieure à 20% (l'erreur tolérable) ce qui explique le coefficient de corrélation obtenu $R > 0,75$ qui dénote une forte corrélation.

Il y a une forte analogie entre les résultats des deux approches (corrélation par régressions linéaire et puissance) effectuées en vue de corréler les paramètres géophysique de l'essai Downhole et les deux paramètres géotechniques N (SPT) et q_c (CPT).

Pour la seconde partie des corrélations qui regroupe les paramètres préssiométriques(E_p , PI) avec la résistance de pointe q_c du pénétromètre statique (CPT) pour le sol de Ouled Fayet, les corrélations sont assez proches de celles données par Bouafia (1998) sur le sol de l'algérois et par d'autres auteurs pour les argiles normalement consolidées et surconsolidées (Briaud 1992).

Nous recommandons d'appliquer cette méthode de détermination avec, cependant, certaines conditions que nous pourrions présenter comme suit :

- ✓ Faire un bon choix de l'essai et de l'appareillage en fonction de la nature du terrain et des conditions qui y régissent ;
- ✓ Veiller sur l'étalonnage de l'appareil de mesure avant l'utilisation.
- ✓ Veiller sur la fiabilité des données des essais utilisés pour l'étude des corrélations.
- ✓ Etablir son étude à base d'un nombre considérable de couples de données représentatives.

Ces recommandations émanent du constat que certaines mesures relèvent des anomalies et ne reflètent pas la réalité du terrain et que leur application stricte et rigoureuse nous permettra de chercher les véritables causes pouvant ne pas permettre d'établir de bonnes corrélations.

Au-delà des avantages économiques qui peuvent être tirés sur un plan pratique des corrélations établies entre les paramètres géotechniques et géophysiques d'un sol, l'étude des corrélations joue le rôle du contrôleur de données et permis ainsi de définir la représentativité et la fiabilité de données prises lors des campagnes de reconnaissances .

En conclusion ce modeste travail a permis de mettre en évidence la complémentarité entre l'étude géologique, l'étude géophysique et géotechnique. Les paramètres tirés par l'une ou l'autre des techniques se complètent et permettent de cerner la configuration du terrain sans faire recours à l'exploration, ce qui fait réduire le coût et les délais la campagne de reconnaissance.

Cette étude est une ébauche qui pourrait être étendue ultérieurement et pour inscrire ce travail dans un contexte de références, il est recommandé d'établir les corrélations sur un nombre considérable de couples paramétriques non encore exploités et qui doivent impérativement se faire sur des sols dont la lithologie est bien définie et de configuration identifiée suivant les systèmes de classification les plus usuels (état compacité, état plasticité, état de consolidation).

Bibliographie

- **7ème Colloque National AFPS 2007** – Ecole Centrale Paris 5, *ENPC*, Corrélations entre la résistance à la pénétration des essais in situ et la vitesse de l'onde de cisaillement. Application aux loëss rencontrés sur la LGV Nord.
- **ABDOUNE Soraya, BENABDERRAHMANE Nadia**; analyse des corrélations et interprétation des résultats préssiométriques et pénétrométriques (2000), mémoire de fin d'études d'ingénieur en géologie, USTHB.
- **BARÇA Ouahiba**, (2011) USTHB, Corrélations Entre Les Vitesses Des Ondes De Cisaillement (V_s), Les Essais De Pénétration Standard (SPT) Et Les Essais De Pénétration Statique (CPT) Applications Dans La Région D'Alger.
- **BENALLAL K., OURABIA K.** (1989) : Monographie géologique et géotechnique de la région d'Alger (recueil de notes).
- **BOUALIA Ghania, ZAKI Safia**; Corrélation entre les reconnaissances géotechniques, géologiques et géotechniques dans l'étude des marnes du Plaisancien (Cheraga, Daly Ibrahim et El Achour), mémoire d'ingénieur d'état en géologie (2002) USTHB.
- **C.G.S**, Etude du micro-zonage sismique d'Alger, (2006) – Rapport géotechnique et hydrogéologique.
- **C.G.S**, Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique : Règles Parasismiques Algériennes RPA 99/ version 2003 - DTR- B.C2.48.
- **CHEIKH LOUNIS G** (2011) : Thèse de Doctorat – Analyse et cartographie des risques naturels dans l'algérois.
- **FLANDRIN** (1951) – Carte géologique au 1/500 000e de l'Algérie.
- **GLANGEAUD L., MURAOUR P., AYME A.**: Histoire géologique de la province d'Alger. Publi XIX CGI Alger 52. Monogr. Région 1. Série Algérie n°25 in 8.
- **Imai. T** (1977) P-and S-wave velocities of the ground in Japan. Proceedings of the IXth international conference on soil mechanics and foundation engineering, Japan, vol 2, pp 127–132.

- **Imai T, Tonouchi K** (1982): Correlation of N-value with S-wave velocity and shear modulus. In: Proceedings of the 2nd European symposium of penetration testing, Amsterdam, pp 57–72.

- **Imai T, Yoshimura Y** (1970) Elastic wave velocity and soil properties in soft soil (in Japanese). Tsuchi-to-Kiso 18(1):17–22.

-**IsamShahrour, Roland Gourvès** ; Reconnaissance des terrains in situ, édition Hermes Science (2005).

-**KENANE Amina, MERZOUGUI Souaad**, (2013), mémoire de fin d'étude MASTER. Etude géologique et géotechnique des plans d'occupation des sols (Est, Ouest et Sud) de Ouled Fayet.

- **Mark EMERSON**, thèse de doctorat (2005), INPG, Corrélations entre données géotechniques et géophysiques à faible profondeur dans des sables.

-**Maurice CASSAN** ingénieur E.T.P ; Les essais in en mécanique des sols, Tome I, Editions EYROLLES (1978).

-**MELBOUCI Bachir** ; Méthodes de calcul de stabilité des fondations, des talus et des ouvrages de soutènement, Editions Elamel.

-**Michel Dysli & Walter Steiner**; Corrélations en mécanique des sols, Presses Polytechniques et Universités Romandes.

-**MOBAREK Houria**; Interprétation d'essai in situ et analyse statistique- UMMTO, mémoire de fin d'études d'ingénieur en génie civil 1998.

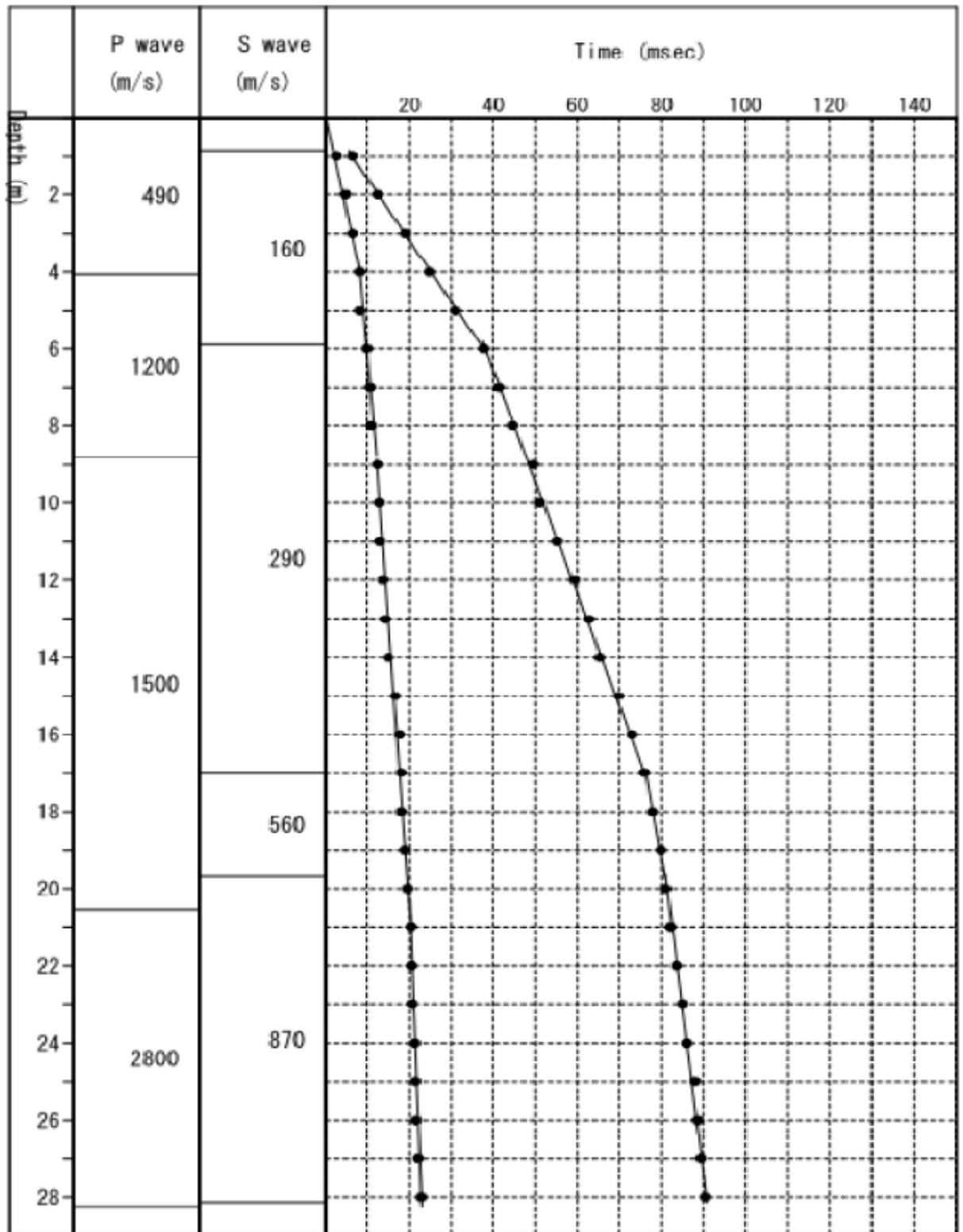
Rapport de l'étude du POS (plateau Sud, Est et Ouest) de Ouled Fayet (LNHC)
Oued Smar.

- **Seed, H.B et I. M. Idriss**. (1970). 'Seismic Response of Soil Deposits'. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, A.S.C.E, Vol. 96, n° SM2, March, pp. 631- 637.

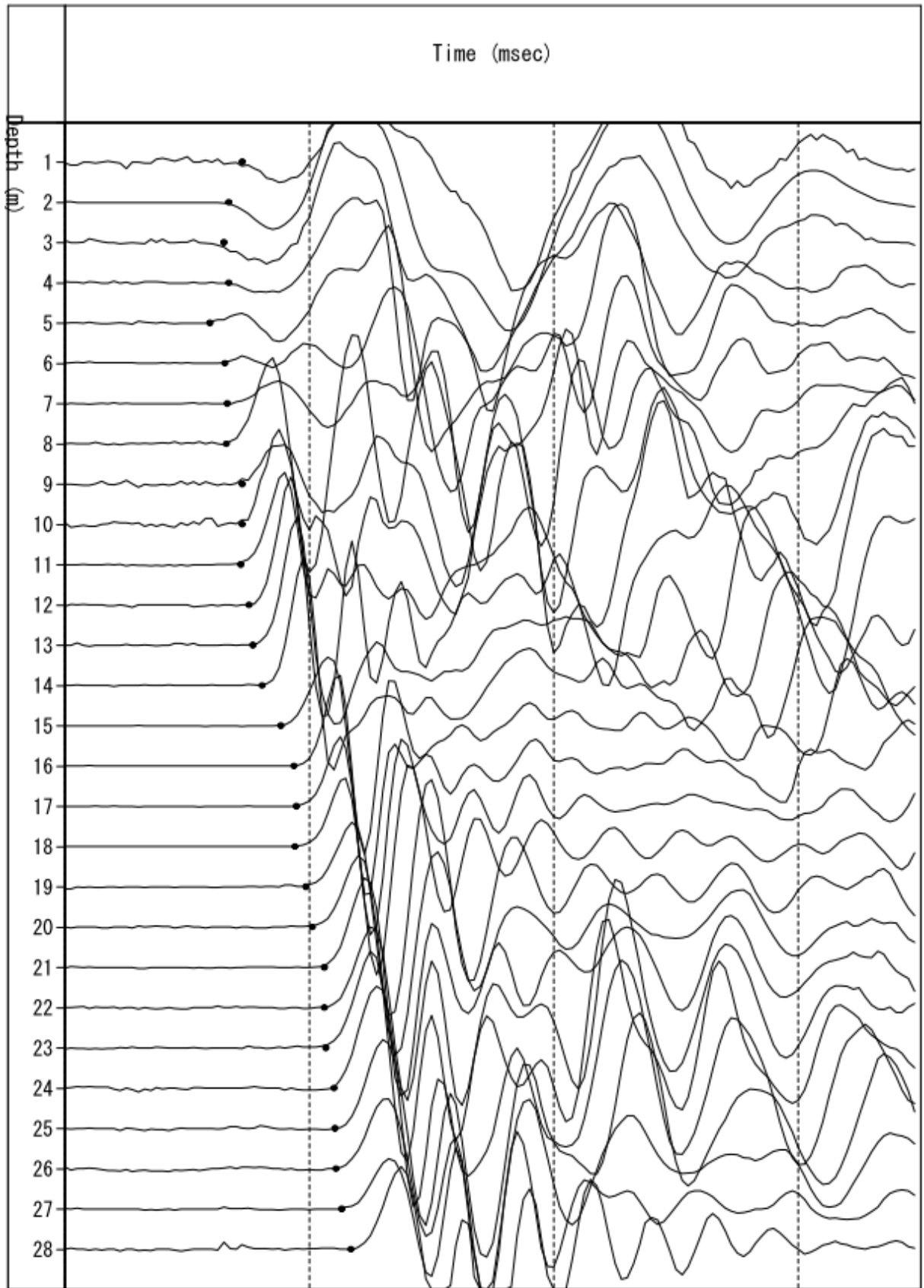
- **TSIAMBAOS G. • N. SABATAKAKIS** (2002) Empirical estimation of shear wave velocity from in situ tests on soil formations in Greece.

- **YASSINI I.** (1973) : Nouvelles données stratigraphiques, micro faunistiques sur la limite Pliocène inférieur- Pliocène moyen (Plaisancien – Astien) dans la région d'Alger : Revue de micropaléontologie Paris.

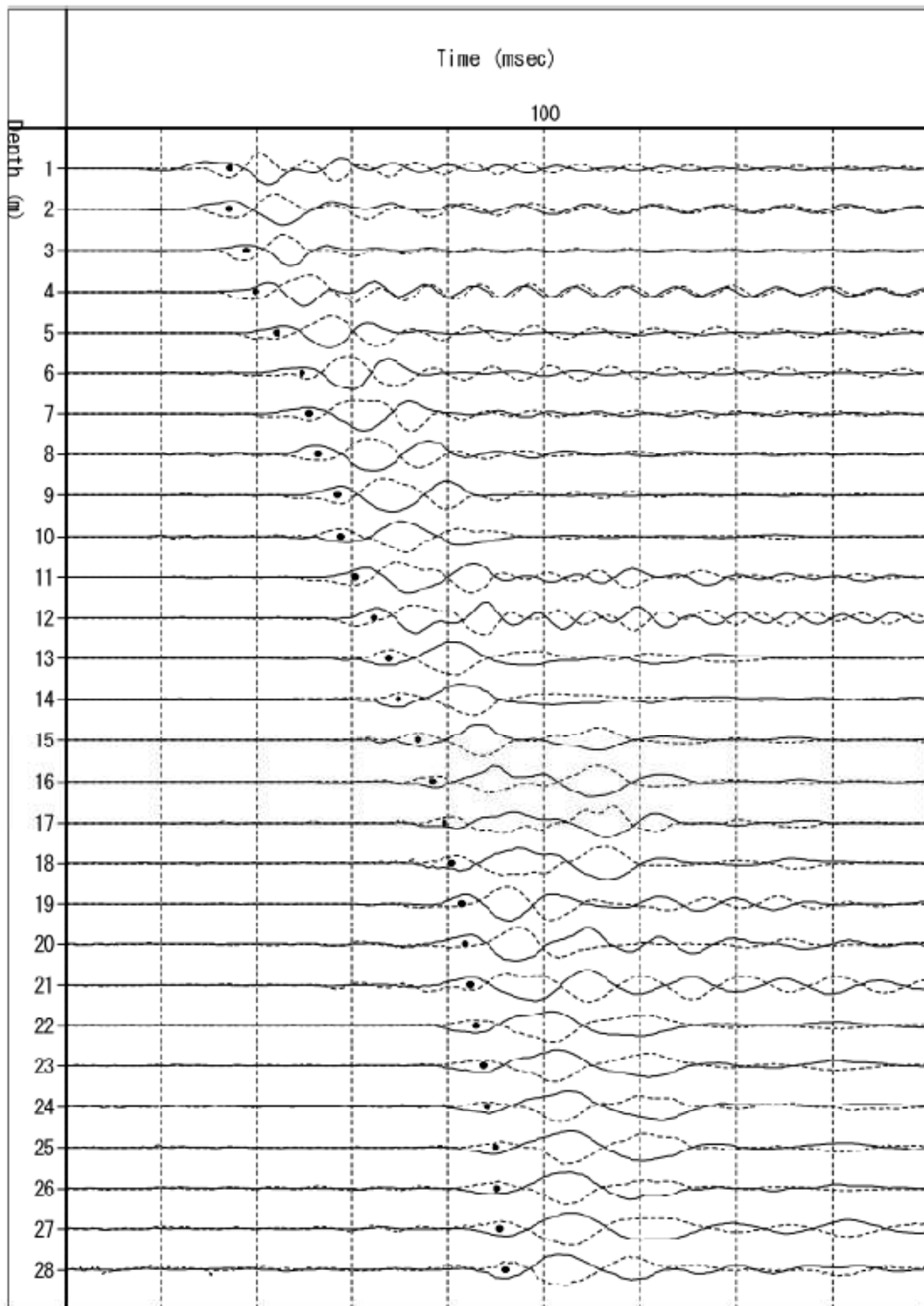
Présentation des enregistrements typiques des essais géophysiques (Down-hole)



Les ondes "P" et "S" en fonction de la profondeur



Formede l'ondedecompression "P"



Forme de l'onde de cisaillement "S"

Tableau.1 : Relative aux pourcentages des passants à 80µm (D'après LCPC)

Pourcentage des passants à 80µm	Classification
>50 %	Sol fin
<50 %	Sol

Tableau.2 : Relative à l'état du degré de saturation d'un matériau (D'après TERZAGHI)

Valeur du degré de saturation S_r (%)	Classification
100 %	Satur
76-99	Détrempe
51-75	Mouillé
26-50	Humide
1-25	Légèrement humide
0	Sec

Tableau.3 : Relative à la plasticité (D'après BURMESTER)

Indice de plasticité I_p (%)	Qualificatif
5-10	Non
10-20	Peu
20-40	Plastique
>40	Très plastique

Tableau.4 : Relative à la consistance (D'après ATTERBERG)

Valeur de l'indice de consistance (I_c)	Etat du sol
$I_c < 0$	Sol
$0 < I_c < 0.25$	Très molle, pâteux
$0.25 < I_c < 0.5$	Molle
$0.5 < I_c < 0.75$	Mi- raide, (mi-ferme)
$0.75 < I_c < 1$	Raide (ferme)
> 1	Très raide (très ferme)

Tableau.5 : Relatif au gonflement des sols (D'après TERZAGHI)

Valeurs des coefficients de gonflements C_g	Appréciation
$4 < C_g < 25$	Sol gonflant
$2 < C_g < 4$	Sol peu gonflant

Tableau.6 : Relatif à la compacité

Densité sèche γ_d (t/m^3)	Appréciation
$\gamma_d < 1.5$	Faible
$1.5 < \gamma_d < 1.7$	Moyenne
$\gamma_d > 1.80$	Elevée

Tableau.7 :Relatif à la compressibilité des sols.

Valeurs de coefficients de compressibilité	Appréciation
$C_c < 0,0$	Sol incompressible
$0,02 < C_c < 0,0$	Sol très peu compressible
$0,05 < C_c < 0,1$	Sol peu compressible
$0,1 < C_c < 0,2$	Sol moyennement compressible
$0,2 < C_c < 0,3$	Sol assez compressible
$0,3 < C_c < 0,5$	Sol très compressible
$C_c > 0,5$	Sol extrêmement compressible

Tableau.8 :Classification des sols en fonction des paramètres de cisaillement
(G.PHILIPPONNAT, édition 2003)

$\Phi(^{\circ})$	C (Kpa)	Classification
≤ 15	< 20	Argile molle
	≥ 20	Argile moyenne à raide
> 15 et ≤ 30	< 20	Autres sols lâches
	≥ 20	Limons, complexe argilo-sableux Marnes argileuses
> 30	< 10	Sols granulaires
	≥ 10	Sols granulaires et cohérent sauf roches
(> 25)	/	Roches tendres

Tableau.9 :Relatif à la matière organique

La teneur en matière organique %	Désignati
0 – 3	Sol inorganique
3 – 10	Sol faiblement organique
10 –	Sol moyennement organique
> 30	Sol très organique