

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المعهد الوطني لعلوم البحر و تهئية الساحل

Institut National des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



Mémoire :

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur en sciences de la mer

Option : Aménagement du Littoral

Thème :

*Etude géologique et géotechnique du site côtier « ZERALDA OUEST » en
vue de l'aménagement d'une zone d'extension touristique.*



Présenté par :

Mr. ALEM Karim

Mr. BELBEKKOUCHE Lazhar

Soutenu le 08 juillet 2007 à 10h00

Devant le jury :

- Mr. LARID.M
- Mr. HELLEL.M
- M^{elle}. FEZAA.N
- Mr. MAOUCHE.S
- Mr. LAFION.O

Chargé de cours (ISMAL)
Maître assistant (ISMAL)
Maître assistante (ISMAL)
Chargé de recherche (CRAAG)
Ingénieur (LNHC)

Président
Promoteur
Examinatrice
Examineur
Invité

Promotion 2006-2007

Remerciements

Fut tenue de ce travail, nous tenons vivement à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce précieux mémoire.

Tout d'abord nous tenons à remercier Monsieur **ALBERT M.**, qui a été le promoteur de cette étude. Il a accepté de diriger ce travail dès nos premières discussions en géologie et géotechnique. Il nous a aidé en nous accordant une grande confiance dans la démarche de notre travail, sans oublier son regard porteur et ses critiques constructives. Ce travail n'aurait pas dans son aide et sa bienveillance, nous tenons à lui exprimer nos reconnaissances et nos sincères gratitude.

Nos gratitude vont également aux membres de jury :

Monsieur **ALBERT M.**, dont la patience et la sympathie nous ont fait aimer le domaine de l'aménagement du littoral, nous faisons un grand honneur et plaisir de présenter le jury, et au le remercie.
Monsieur **MAURICE S.**, attaché de recherche au **CRAG** pour son aide et ses précieux conseils et d'avoir accepté d'examiner ce travail.
Monsieur **ALBERT O.**, de nous avoir orienté dans la partie de géotechnique et d'avoir accepter examiner ce travail.
M^{lle} **ESTHER N.**, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous tenons à remercier l'ensemble de personnel du **QPS**, en particulier **Lella, Nabila, Bega** et **Melja** pour le meilleur accueil, pour leurs aides et leurs conseils.

Nos remerciements s'adressent à l'ensemble du personnel du **MRG**, en particulier **Mr.** **ABRIMON.**

Nos remerciements s'adressent aussi au personnel du **LGP**, en particulier **Mr. Ahmed** **SOMBA** le président directeur général, ainsi que l'ingénieur **Mr. Fouad OMAR** et le technicien **Mr. Kamel** **KAH** pour leurs aide et leurs conseils durant notre stage.

Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants de l'**ESMA**.

Et toutes ces personnes, on leur dit « **MERCI BEAUCOUP** »

SOMMAIRE

Liste des organismes
Listes des figures
Liste des tableaux
Liste des photos

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre I. Généralités

I.1. Situation géographique	01
I.1.1. Baie de Zéralda.....	01
I.1.2. Zone d'étude.....	01
I.2. Aperçu hydro-sédimentaire.....	01
I.3. Aperçu météorologique.....	03
I.3.1. Précipitations et température.....	03
I.3.2. Vents.....	03
I.4. Aperçu hydrologique.....	04
I.4.1. Hydrographie.....	04
I.4.2. Nappe phréatique.....	05

Chapitre II. Cadre géologique régional et sismotectonique

II.1. Cadre géomorphologique régional.....	06
II.1.1. Le massif d'Alger.....	06
II.1.2. Le sahel d'Alger.....	06
II.1.3. La plaine littorale orientale.....	06
II.1.4. Le cordon littoral dunaire.....	06
II.1.5. La plaine de la Metidja.....	06
II.2. Cadre géologique régional.....	08
II.2.1. Stratigraphie.....	08
II.2.1.1. Le primaire.....	08
II.2.1.2. Le secondaire.....	08
II.2.1.3. Le tertiaire.....	08
II.2.1.4. Le quaternaire.....	09
II.3. Cadre sismotectonique.....	11
Introduction.....	11
II.3.1. Sismicité historique.....	11
II.3.2. Situation du site par rapport au zonage sismique.....	11

II.3.3. Sismotectonique et tectonique.....	12
II.3.3.1. Faille du sahel.....	12
II.3.3.2. Faille de Tipaza.....	13
II.3.3.3. Faille en mer (méditerranée).....	13
II.3.3.4. Faille de Mahelma.....	13
Conclusion	15

Chapitre III. Cadre géologique local

Introduction.....	16
III.1. Stratigraphie.....	16
III.1.1. Le tertiaire.....	16
III.1.2. Le quaternaire.....	16
III.2. Lithologie.....	16
Conclusion.....	23

Chapitre IV. Cadre géotechnique

Introduction.....	24
IV.1. Caractérisation géotechnique du sous sol du site d'étude.....	24
IV.1.1. Identification géotechnique du sol.....	25
IV.1.1.1 Essais de laboratoire.....	25
IV.1.1.1.1. Unité I : sable.....	25
IV.1.1.1.1.1. Formation 1 : sable jaune.....	25
IV.1.1.1.1.2. Formation 2 : sable argileux à lignites.....	25
IV.1.1.1.2. Unité II : argiles.....	28
IV.1.1.1.2.1. Formation 1 : argiles à lignites.....	28
IV.1.1.1.2.2. Formation 2 : argiles sableuses grises.....	31
IV.1.1.1.3. Unité III : marne.....	33
IV.1.1.1.3.1. Formation 1 : marne compacte.....	33
IV.1.1.1.3.2. Formation 2 : marne vaseuse.....	36
IV.1.1.1.3.3. Formation 3 : marne sableuse.....	38
IV.1.1.2. Essais in situ.....	41
IV.1.1.2.1. Essai de pénétration au carottier SPT.....	41
IV.1.1.2.2. Essais de pénétration dynamique.....	42
IV.1.1.2.2.1. Interprétation des cartes pénétrométriques.....	43
a- Interprétation de chaque horizon.....	43
b- Interprétation en profondeur	43

IV.1.2. Calcul des fondations.....	46
IV.1.2.1. Evaluation de la contrainte admissible du sol.....	46
IV.1.2.2. Evaluation des tassements.....	47
IV.2. Analyse de la stabilité générale du sol.....	47
Introduction.....	47
IV.2.1. Inondabilité du site.....	47
IV.2.2. Vulnérabilité du sol à la liquéfaction.....	48
IV.2.3. Le recul de trait de côte.....	48
Conclusion.....	51

CONCLUSIONS GENERALES

Références bibliographiques

Annexe

Liste des organismes

ANDT : Agence National de Développement Touristique.

ANRH : Agence Nationale de Ressources Hydriques.

CGS : Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique.

CRAAG : Centre de Recherche Appliquée en Astronomie et Géophysique.

INCT : Institut National de Cartographie et de Télédétection.

ISMAL : Institut National des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

LEM : Laboratoire des Etudes Maritimes.

LNHC : Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction.

ONM : Office National de Météorologie.

USTHB : Université des Sciences et Technologie Houari Boumediene.

Liste des figures

- Figure n°1** : Situation géographique de la zone d'étude (Image Landsat).
- Figure n°2** : Estimation du sens dominant du transit sédimentaire à partir de l'orientation de la flèche littoral (photo aérienne INCT ; 1977).
- Figure n°3** : Courbe ombrothermique (station de BOUHAROUN ; 2001-2006).
- Figure n°4** : Les grands ensembles géomorphologiques de la région d'Alger (A.N.R.H ; 2006).
- Figure n°5** : Grands traits géologiques de l'Algérois ; N.Gouskouv et R.Laffite, 1951.
- Figure n°6** : Classification sismique des wilayas d'Algérie (Nouvelle classification, CGS 2004).
- Figure n°7** : Carte des principales failles de l'Algérois ; extrait de la carte sismotectonique de la région d'Alger (CGS ; 1998) ; échelle : 1/200000).
- Figure n°8** : Formations géologiques de la région de Zeralda. Extrait de la carte géologique de Koléa (M.E. Ficheur au 1/50000).
- Figure n°9** : Plan d'implantation des coupes lithologiques et sondages carottés.
- Figure n°10** : coupe lithologique corrélative AA'.
- Figure n°11** : coupe lithologique corrélative BB'.
- Figure n°12** : Fuseau granulométrique des sables jaune (grossier à fin).
- Figure n°13** : Fuseau granulométrique des sables argileux à lignite.
- Figure n°14** : Diagramme de plasticité de Casagrande des sables argileux à lignite.
- Figure n°15** : Fuseau granulométrique des argiles à lignite.
- Figure n°16** : Diagramme de plasticité de Casagrande des argiles à lignite.
- Figure n°17** : Fuseau granulométrique des argiles sableuses grises.
- Figure n°18** : Diagramme de plasticité de Casagrande des argiles sableuses grises.
- Figure n°19** : Fuseau granulométrique des marnes compactes.
- Figure n°20** : Diagramme de plasticité de Casagrande des marnes compactes.
- Figure n°21** : Fuseau granulométrique des marnes vaseuses.
- Figure n°22** : Diagramme de plasticité de Casagrande des marnes vaseuses.
- Figure n°23** : Fuseau granulométrique des marnes sableuses.
- Figure n°24** : Diagramme de plasticité de Casagrande des marnes sableuses.
- Figure n°25** : Carte des résistances à la pénétration dynamique à 2m de profondeur.
- Figure n°26** : Carte des résistances à la pénétration dynamique à 4m de profondeur.
- Figure n°27** : Carte des résistances à la pénétration dynamique à 6m de profondeur.
- Figure n°28** : Carte des résistances à la pénétration dynamique à 8m de profondeur.

Listes des tableaux

Tableau n°1 : Liste des principaux séismes de la région d'Alger durant la période :
1365-2003, (CRAAG ; 2003).

Tableau n°2 : Paramètres géotechniques de sables argileux à lignite.

Tableau n°3 : Paramètres géotechniques des argiles à lignite.

Tableau n°4 : Paramètres géotechniques des argiles sableuses grises.

Tableau n°5 : Paramètres géotechniques des marnes compactes.

Tableau n°6 : Paramètres géotechniques des marnes vaseuses.

Tableau n°7 : Paramètres géotechniques des marnes sableuses.

Tableau n°8 : Résultats des essais SPT

Tableau n°9 : Résultats des contraintes admissibles calculées à partir des essais de
Laboratoire.

Tableau n°10 : Résultats des contraintes admissibles calculées à partir des essais
Pénétrométriques.

Tableau n°11 : Résultats des contraintes admissibles calculées à partir des essais SPT.

Liste des photos

Photo n°1 : Remblai d'argile rouge s'étendant sur une grande largeur de la zone d'étude.

Photo n°2 : Remblai un sable fin à grossier.

Photo n°3 : Sable avec stratification oblique renfermant des petits lits consolidés.

Photo n°4 : Grés consolidés de couleur beige.

Photo n°5 : Sable grésifié assez dur à stratification oblique.

Photo n°6 : Marne de couleur grise extraite à partir de 7m de profondeur lors de forage de pieux.

Photo n°7 : Sol de fondation de nature peu perméable, inondé (hôtel en construction).

Photo n°8 : La topographie plane de terrain d'étude.

Photo n°9 : Le caractère marécageux de la zone d'étude.

Photo n°10 : Système de lagunage naturel.

Photo n°11 : Eaux usées stagnantes.

Introduction générale

Introduction générale

Notre zone d'étude est une portion littorale de la région de Zéralda, servant d'assiette pour un futur projet d'une zone d'extension touristique « ZET ZERALDA OUEST ».

Le travail présenté dans le cadre de ce mémoire a pour but d'étudier le sol de cette portion littorale du point de vue géotechnique et lithologique et d'analyser sa stabilité générale ainsi que sa constructibilité, pour finalement mettre l'accent sur quelques impacts de ce projet sur l'environnement puis de proposer des mesures à entreprendre afin de sauvegarder et protéger le milieu naturel.

Cette étude constitue une base à partir de laquelle peuvent s'informer les projeteurs, les aménageurs, les décideurs et le pouvoir public, sur le comportement du sol de cette portion littorale afin qu'ils puissent définir les solutions techniques les plus appropriées à adopter pour la réalisation du projet. De plus, l'exposé de la vulnérabilité de ce littoral dans notre étude, leur permettra de mesurer les impacts que pourra avoir l'aménagement de la ZET sur le milieu naturel et physique.

Pour arriver à ces résultats, nous avons suivi les trois étapes suivantes :

I. Synthèse bibliographique

Elle a consisté en la récolte et à la synthèse de publications, supports cartographiques, documents et rapports d'études établis dans les domaines de la géologie, de l'hydrogéologie de la géotechnique et de l'aménagement de notre zone d'étude.

II. Travaux de terrain

Des sorties sur le terrain ont été effectuées afin d'étudier les grands traits géomorphologiques, la géologie locale et les instabilités qui touchent notre terrain d'étude.

III. Synthèse et interprétation

La caractérisation géotechnique du sol de notre terrain d'étude s'est basée sur la synthèse et l'interprétation des résultats brutes d'essais géotechnique de laboratoire et in situ, effectués par le Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction (LNHC).

Sur la base de l'interprétation des résultats des essais géotechniques, des données géologiques disponibles, ainsi que nos observations de terrain, nous avons pu mettre la lumière sur quelques impacts que peut engendrer ce projet touristique sur le milieu naturel et dégager une approche d'aménagement, s'intégrant dans une stratégie de développement durable.

CHAPITRE I

GENERALITES

I.1. Situation Géographique

I.1.1. Baie de Zéralda

La baie de Zéralda est comprise entre les parallèles 36°43' de Latitude Nord et 2°49' de longitude Est. Située à 29 km à l'ouest d'Alger, elle possède une superficie de 3146 hectares, Elle est limitée comme suit :

- Au Nord par la mer Méditerranée.
- A l'Est par la commune de Staoueli.
- A l'Ouest par l'oued Mazafran et la commune de Douaouda.
- Au Sud par la commune de Mahelma.

I.1.2. Zone d'étude

La zone d'étude nommée KHLOUFI 1, 2, 3 est une portion littorale située à l'ouest de la commune de Zéralda. Elle fait actuellement l'objet d'un projet d'aménagement d'une zone d'extension touristique (ZET) sur une superficie de 356 hectares (figure n°1).

Elle a pour délimitation :

- Au Nord : La mer Méditerranée.
- A l'Est : Le complexe touristique de Zéralda.
- Au Sud-Est : la route nationale n° 11.
- A l'Ouest : l'Oued Mazafran.

I.2. Aperçu hydro-sédimentaire

La présence sur la haute plage de formes en croissant indique une mobilité des sédiments perpendiculaire au trait de côte. (Guessab et Amari, 2005).

Sur la basse plage, de nombreuses figures dissymétriques, indiquent l'existence de transport important. Des rides plus petites indiquent la migration des sables vers la côte dans le lit du chenal dû aux courants d'entraînement. (Guessab et Amari, 2005).

Une formation d'une flèche littorale au niveau de l'embouchure de l'oued Mazafran, orientée fréquemment Nord –Est vers Sud–Ouest (figure n°2), indique que le sens le plus dominant de la dérive littorale dans le secteur se fait dans le même sens que celui de l'orientation de la flèche. (Guessab et Amari, 2005).

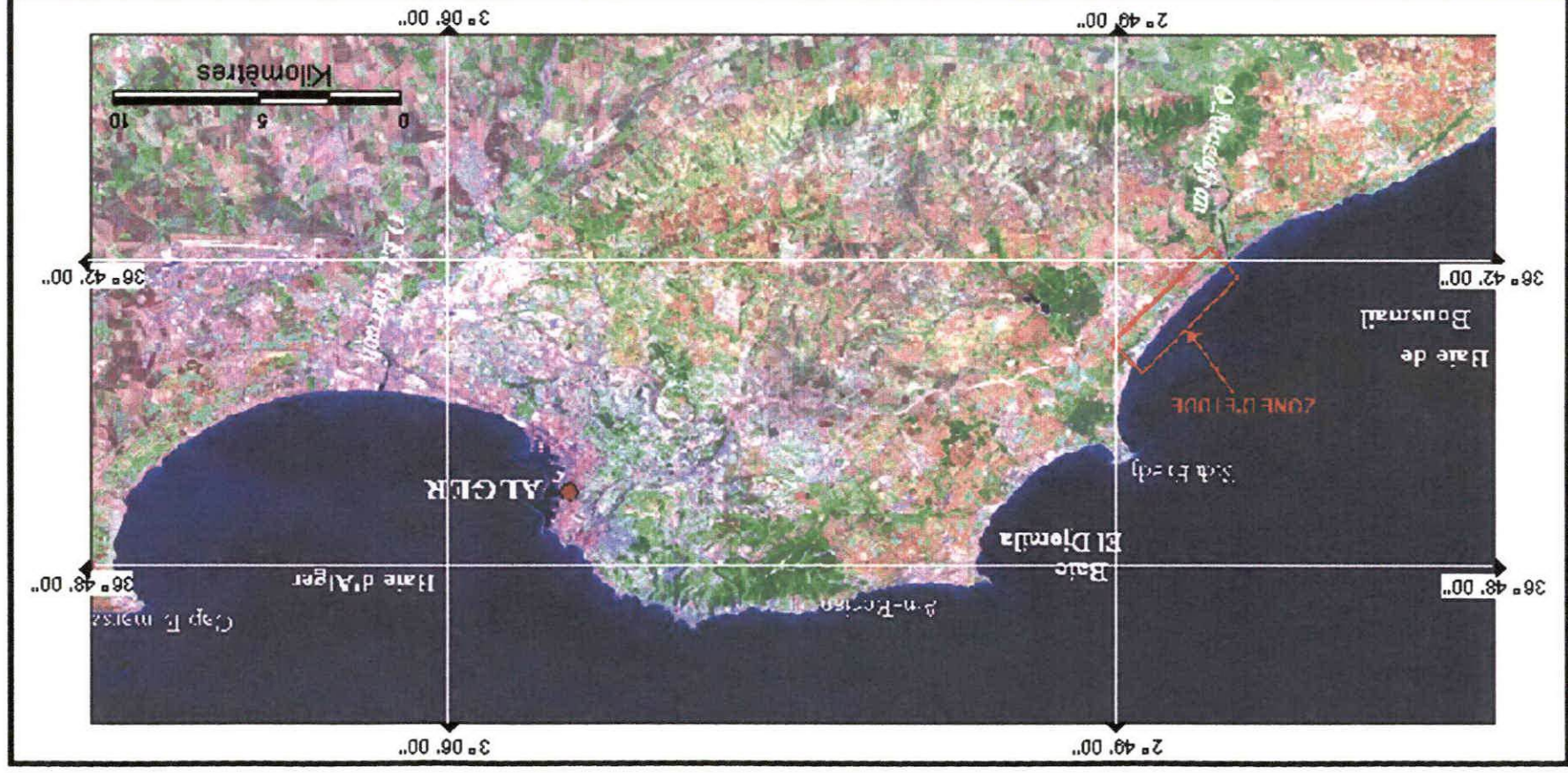


Figure n°1 : Situation géographique de la zone d'étude (image Landsat)

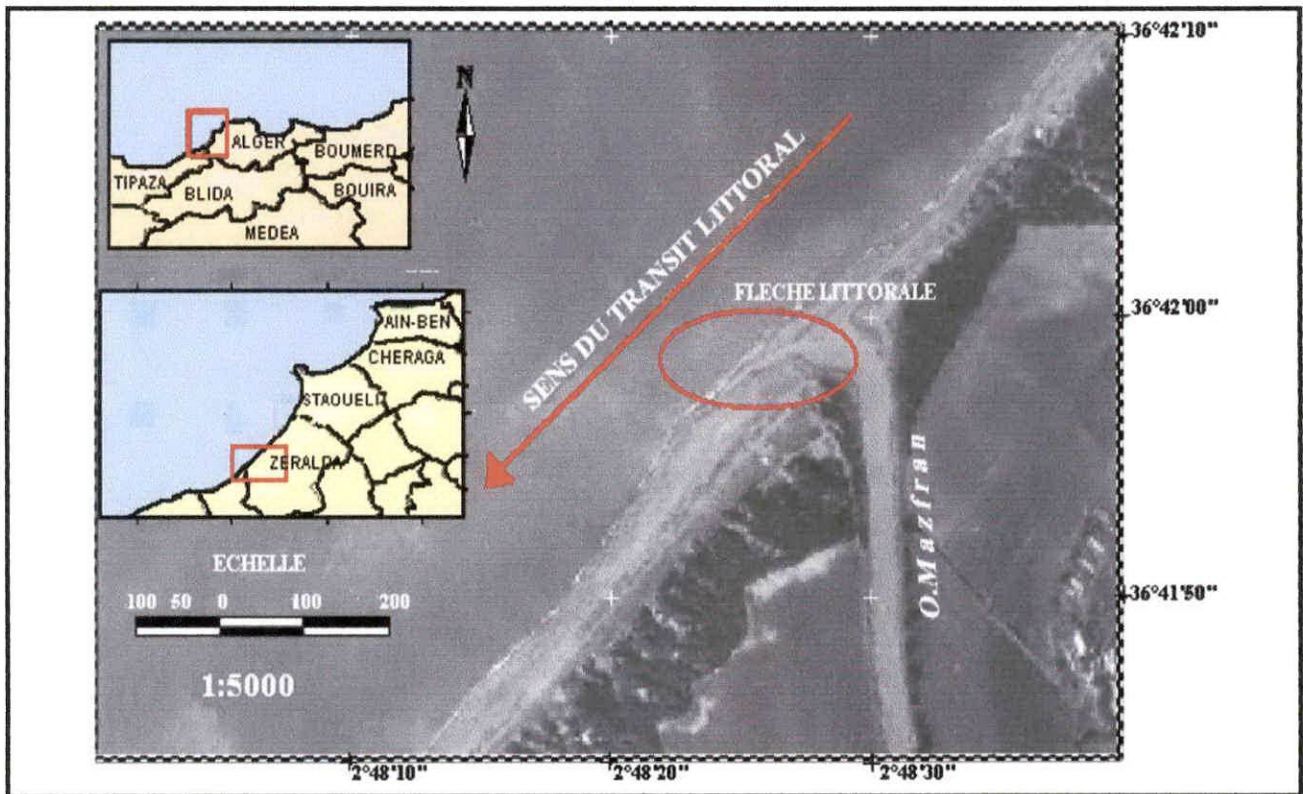


Figure n°2 : Estimation du sens dominant du transit sédimentaire à partir de l'orientation de la flèche littorale (photo aérienne INCT, 1977).

I.3. Aperçu météorologique

I.3.1 Précipitations et températures

La baie de Zéralda, sous un climat méditerranéen humide reçoit des précipitations annuelles de l'ordre de 400 mm à la moyenne. Il se définit par deux saisons différenciées (figure n°3).

- une saison pluvieuse s'étalant de Novembre à Mars avec une quantité de l'ordre de 373.5mm, Ces pluies sont le plus souvent courtes et violentes, les débits liquides sont directement liés à cette pluviosité, induisant un régime hydrographique irrégulier.

- une saison sèche qui s'étale sur le reste de l'année.

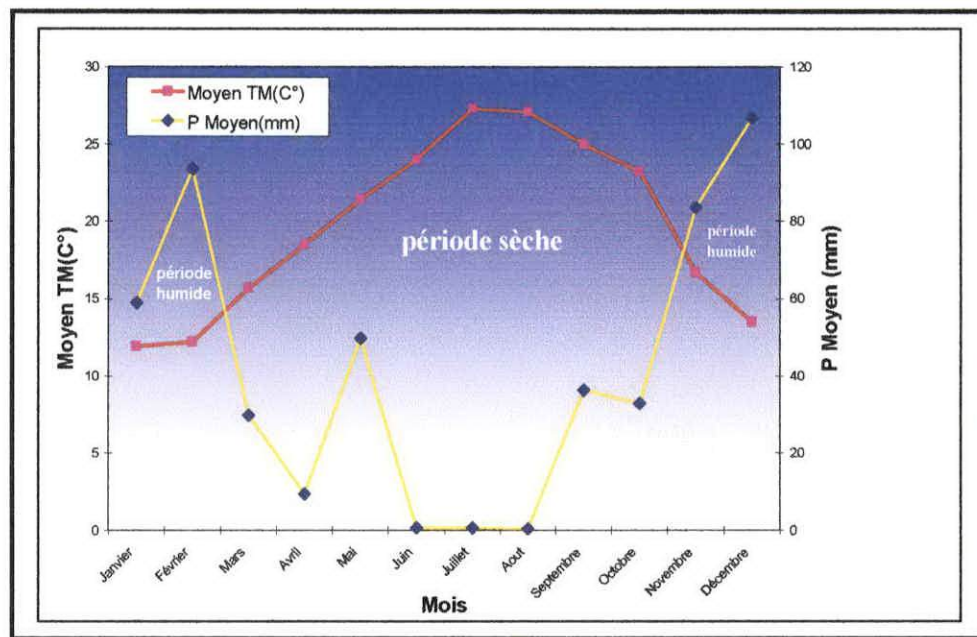


Figure n° 3 : Diagramme ombrothermique (station de BOUHAROUN, 2001-2006)
Source : ONM

I.3.2. Vents

D'après les données de l'ONM, il y'a trois directions de vent qui dominent dans la baie de Zéralda :

- Les vents de secteur Nord-Est, pendant la saison hivernale.
- Les vents de secteur Est, pendant la saison estivale.
- Les vents de secteur Ouest, pendant la saison du printemps.

I.4. Aperçu hydrologique

Une étude géotechnique n'est jamais complète sans la connaissance des paramètres hydrologiques et hydrogéologiques, sachant que l'eau constitue un facteur très influant sur le comportement géotechnique des sols.

Une meilleure connaissance de l'hydrogéologie du site d'étude permet d'établir une meilleure approche pour résoudre les problèmes majeurs qui peuvent se présenter au niveau des fondations lorsqu'il y'a présence d'eau.

I.4.1. Hydrographie

Notre zone d'étude est traversée par deux oueds secondaires Sidi Mennif et Gourbis, et limitée par celui du Mazafran comme le plus important à l'extrême ouest.

L'oued Mazafran est un oued à fort débit avec un débit solide de l'ordre de $5.4 \text{ m}^3/\text{an}$ et un débit liquide de l'ordre de $4000 \text{ m}^3/\text{an}$ (A.N.R.H, 1995).

Le régime hydraulique de cet oued se caractérise par un long étiage de six mois et des crues d'hiver et de printemps soudaines, violentes et courtes (Ait kaci et Pauc, 1982 *in* Ouazar, 2004).

I.4.2. Nappe phréatique

La nappe phréatique de notre zone d'étude est localisée dans les sables quaternaires, elle est alimentée par la pluviométrie d'une part, et par des écoulements de la nappe du plateau d'autre part.

Les relevés piézométriques effectués par le LNHC ont indiqué la présence d'eau en surface et à très faible profondeur (0 à 1.5m). Cette dernière est liée à la nature du sol d'une part, et à l'intrusion des eaux marines dans les formations sableuses, perméables d'autre part, ainsi qu'à l'importance de la zone occupée par les oueds qui traversent le site dans sa partie centrale, et notamment l'embouchure de l'oued Mazafran (LNHC, 2006).

CHAPITRE II

CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL & SISMOTECTONIQUE

II.1. Cadre géomorphologique régional

La région d'Alger comprend cinq grands ensembles géomorphologiques (Figure n°4) :

- le massif d'Alger (ou massif de Bouzaréah) ;
- le Sahel d'Alger ;
- la plaine littorale orientale ;
- le cordon littoral dunaire ;
- la plaine de la Mitidja.

II.1.1 Le Massif d'Alger

Appelé communément massif de Bouzaréah, le massif d'Alger est d'orientation Est-ouest et s'étend sur une longueur de 20 Km et une largeur de 6 Km. Il est boisé et recoupé par un réseau de thalwegs profonds. Il est de topographie accidentée. Son plus haut sommet culmine à 407m d'altitude. Les piémonts Nord et Est du massif forment la côte déchiquetée entre le port d'Alger et Ain-Benian. Ce massif est propice aux écroulements et aux chutes de blocs (Saâdallah, 1981).

II.1.2 Le Sahel d'Alger

Il regroupe tous les reliefs qui s'étendent du massif de Bouzaréah au Nord, de la rive gauche de l'oued El Harrach au Sud et au Sud-Est et enfin, de la rive droite de l'oued Mazafran au Sud-Ouest. On y distingue trois parties principales : le Sahel marneux, le plateau mollassique d'Alger et le piémont sud du Sahel.

II.1.3 La Plaine littorale orientale

Elle est limitée par la mer Méditerranée au Nord-Est, la corniche mollassique du Hamma au Sud-Ouest, la place du 1^{er} Mai au Nord-Ouest et la rive gauche de l'oued El Harrach au Sud-Est. Son altitude varie entre 2 et 15m. Elle est formée d'alluvions récentes constituées essentiellement de sables et graviers.

II.1.4 Le Cordon littoral dunaire

Il se développe :

- Entre la rive droite 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 sablo-gréseuse allongée parallèlement au rivage.
- A l'ouest de Ain-Benian jusqu'à Zéralda où il forme les piémonts du sahel marneux. Dans cette zone la topographie de ce cordon est étagée et recoupée par des oueds de direction Est-Ouest.

II.1.5 La Plaine de la Mitidja

C'est un bassin de comblement de grande superficie (1300 km²), allongé WSW-ENE. Elle est limitée au Nord par l'anticlinal sahélien et au Sud par l'Atlas Blidéen. Cette plaine représente l'assiette dans laquelle viennent se déposer les matériaux charriés des reliefs limitrophes.

Notre terrain d'étude forme la très basse partie du plateau du sahel où elle se présente sous forme de vallées très étendues liées à l'importance des embouchures des oueds avoisinants, certains endroits se présentent sous forme de dépressions immergées, et constituent alors les points de basse altitude.

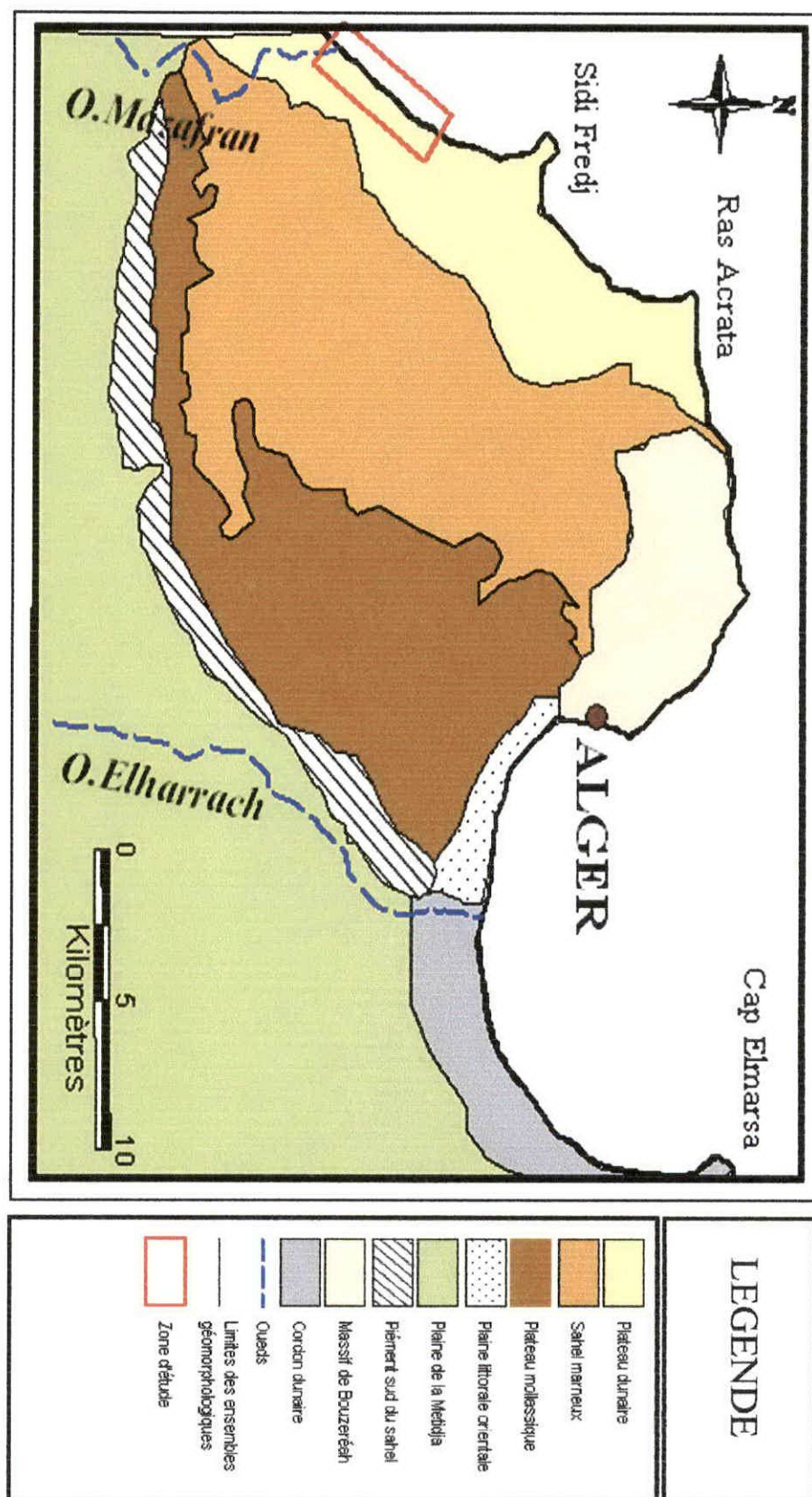


Figure n°4 : Les grands ensembles géomorphologiques de la région d'Alger (A.N.R.H ; 2006).

II.2. Cadre géologique régional

II.2.1. Stratigraphie

La région d'Alger présente une structure géologique complexe. Elle est constituée de terrains métamorphiques d'âge Primaire, recouverts par des terrains sédimentaires d'âge Mio-Plio-Quaternaire (figure n°5).

Les formations sédimentaires qui affleurent à l'ouest d'Alger sont liées à des bassins dont la subsidence débute au Miocène inférieur. De tels bassins se sont ouverts dans un édifice déjà structuré au cours des phases éo-alpines (Crétacé) et alpines (Eocène et Miocène) (Belhai, 1996 *in* Boughendoura et Sahoui, 2006).

II.2.1.1 Le Primaire

Ces terrains forment essentiellement le massif d'Alger, constitués de roches cristallophylliennes, ils réapparaissent à l'Ouest (Sidi Fredj) et à l'Est (Bordj El Bahri). Ces roches sont des : gneiss, schistes et marbres (Glangeaud, 1932).

II.2.1.2 Le Secondaire

Les travaux géologiques (Glangeaud et al., 1952) montrent que les terrains secondaires n'affleurent pas dans la région ouest algéroise.

II.2.1.3 Le Tertiaire

Le tertiaire est marqué par des lacunes de l'Eocène et de l'Oligocène. En somme, les formations tertiaires recouvrent en discordance les faciès métamorphiques algérois.

- Le Miocène post-nappe

Ils s'agit principalement des séries post-nappes suivantes :

- des conglomérats rouges azoïques de 200m d'épaisseur d'âge Tortonien (Leprevier et Magné, 1975).
- Une série marine de 20 à 200m, débute par des massifs calcaires très riches en faune, surmontés par des marnes grises à huîtres dont l'épaisseur est de 100m environ (Bellon, 1976 *in* Boughendoura et Sahoui, 2006).

- Le Pliocène

Dalloni (1939) a établi l'âge Plaisancien des marnes grises du sahel d'Alger. Les travaux de Glangeaud et al (1952) montrent que les faciès astien argilo-sableux terminent l'épisode pliocène. Selon Bonneton (1977), dans la Mitidja, le Pliocène repose sur le Miocène post-nappes, plus plissé.

- le Plaisancien : il est formé par d'importants affleurements de marnes grises qui sont parfois entrecoupées par quelques bancs de grés glauconieux. Son épaisseur a été estimée à 1000 m environ (Glangeaud et al., 1952).

- L'Astien : son épaisseur est de 30m environ. Il est composé de plusieurs faciès et séparé du Plaisancien par un niveau repère glauconieux de 4m à quelques centimètres d'épaisseur. Le faciès marno-sableux jaunâtre à blanchâtre très fossilifère est le plus répandu. Le faciès calcaréo-gréseux est représenté par de larges dalles fossilifères (bivalves et gastéropodes). Les faciès gréseux à sableux terminent le niveau astien.
- Le Villafranchien : ce niveau repose en discordance sur les niveaux gréseux de l'Astien et représente le premier remblaiement dans la plaine de la Mitidja (Glangeaud et al., 1952). Il est formé par une succession de niveaux décimétriques de conglomérats et des sables non consolidés.

II.2.1.4 Le Quaternaire

Le Quaternaire est également représenté par des terrasses marines en gradins localisées sur le flanc nord du sahel. Ces terrasses sont représentées par des dalles calcaires à calcaréo-gréseuses riches en faune, d'âge Tyrrhénien à Calabrien. Leur disposition en gradins correspond vraisemblablement à des soulèvements tectoniques (Saoudi, 1989).

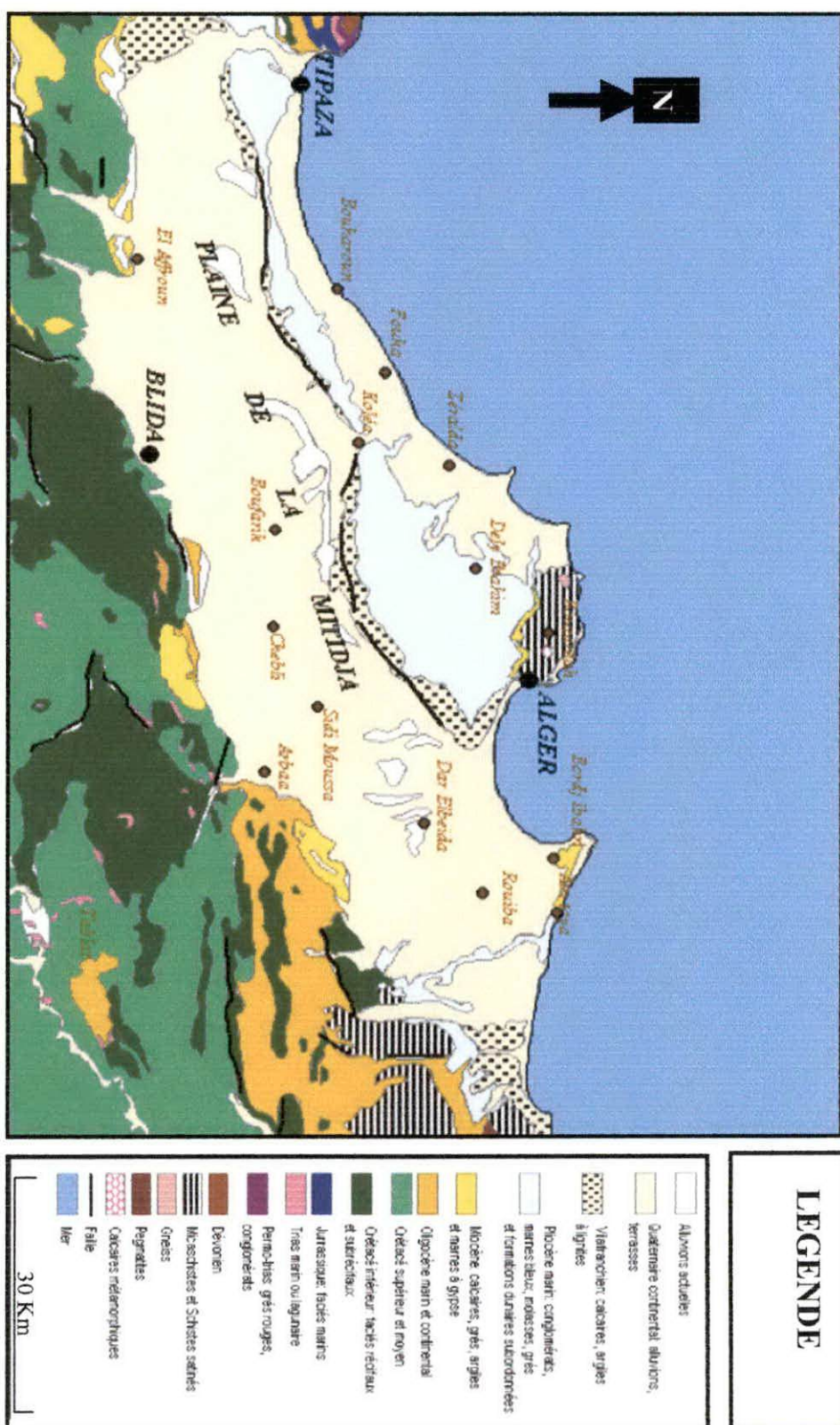


Figure n° 5 : Grands traits géologiques de l'Algérois;
D'après N.Gonskov et R.Laffite ; 1951.

II.3. Cadre sismotectonique

Introduction

L'Algérois représente une des zones les plus sismiques d'Algérie du nord. Il a été le siège d'une sismicité modérée parfois forte. De nouvelles sources sismogènes sont déterminées après ces événements, mettant ainsi l'accent sur le risque que peuvent encourir toutes les villes limitrophes et plus particulièrement la capitale du pays.

II.3.1. Sismicité historique

Durant son histoire, le sahel d'Alger a connu plusieurs séismes importants qui ont souvent occasionnés des dégâts matériels et humains considérables. Nous pouvons citer les séismes d'Alger en 1365, 1673 et 1716, de Blida en 1825, de Tipaza en 1989, d'Alger 1996 et tous récemment celui de Zemmouri en 2003 (tableau n°1).

Tableau n° 1: Liste des principaux séismes de la région d'Alger durant la période 1365-2003 (CRAAG, 2003).

N°	DATE JJ MM AAAA			Hr Min Sc	Lat.	Long	Mi	Mm	I ₀	Localisation
1	03	01	1365	19 00 00	-	-				Alger
2	10	03	1673	21 00 00	36.70°N	3.10°E		5.7	IX	Alger
3	03	02	1716	02 00 00	36.70°N	3.10°E		7.5	X	Alger
4	02	01	1867	07 13 00	36.70°N	2.68°E		7.5	X	Mitidja
5	11	07	1911	01 22 00	36.50°N	2.83°E		4.5	VI	Alger
6	05	11	1924	18 54 34	36.60°N	2.90°E		6.5	VIII	Ben Chaâbane
7	06	06	1981	15 00 00	-				IV	Zéralda Mahelma
8	07	12	1983	21 52 21	36.80°N	2.78°E		4.5	V	Zéralda Mahelma
9	29	10	1989	19 09 29	36.57°N	2.32°E		5.7	VIII	Mont chenoua
10	09	02	1990	09 31 47	36.76°N	2.47°E	4.7	5.0		Tipaza
11	04	09	1996	05 15 00	37.00°N	2.93°E		5.6		Ain benian
12	21	05	2003		-			6.8		Zemmouri

II.3.2. Situation du site par rapport au zonage sismique

L'Algérie a été subdivisée en quatre zones macrosismiques (de 0 à III, de sismicité négligeable voire nulle à fortement sismique). d'après la nouvelle classification du CGS, notre zone d'étude est classée dans la zone III (figure n°6).

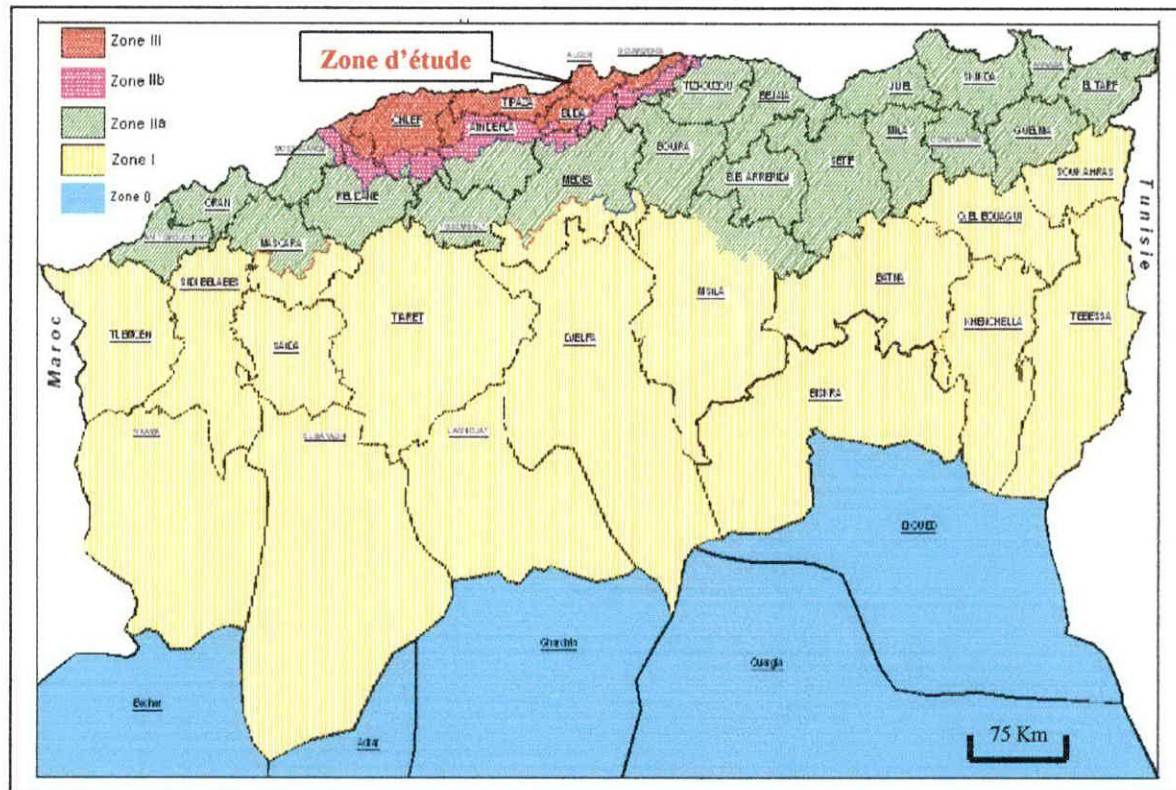


Figure n° 6 : Classification sismique des wilayas d'Algérie (Nouvelle classification, CGS 2004).

II.3.3. Sismotectonique

La structure tectonique de la région d'Alger est constituée par une succession de plis où on observe d'importantes failles (inverses généralement). Les mécanismes focaux montrent que les failles actives de chevauchement avec une composante en décrochement sont celles qui dominent.

Ces failles présentent une orientation préférentielle E-W et NE-SW. Elles semblent être celles qui génèrent le plus de séismes. Parmi ces failles, il y a celles qui sont liées directement soit à la morphostructure de surrection soit à la morphostructure de subsidence.

Le modèle sismotectonique réalisé par le CGS en 1998 montre que la région d'Alger est marquée par la présence d'importantes failles qui peuvent provoquer des événements sismiques importants (figure n°7).

Parmi les sources sismogènes identifiées par le CGS (1998) dans la région figurent :

- la faille du Sahel qui est la plus proche de notre secteur d'étude ($M_w = 6$) ;
- la faille de Tipaza ($M_w = 6.5$) ;
- la zone d'effondrement en mer ($M_w = 7$) ;

Et la faille de mahelma qui elle est bien décrite par Maouche (2002).

II.3.3.1. Faille du Sahel

C'est une faille inverse située sur environ 10 Km au Sud de notre zone d'étude, elle affecte toute la partie nord de la Mitidja et qui se prolonge probablement en mer.

C'est l'accident le plus important dans la région d'Alger, sa longueur pourrait atteindre plus de 60km et générer un séisme d'une magnitude maximale $M_w = 6$.

II.3.3.2. Faille de Tipaza

Elle constitue la limite entre la morpho-structure de surrection du Chenoua et le bassin de subsidence de la Mitidja, cette faille a une orientation N-S, elle peut engendrer un séisme de magnitude maximale de 6,5 (CGS, 1998).

II.3.3.3. Faille en mer (méditerranée)

Orientée WSW-ENE. L'activité tectonique, plio-quaternaire de cette faille est située entre le bassin marin en méditerranée et le bloc continental du sud, elle peut engendrer des séismes d'une magnitude maximale 7,0. Cette source est à l'origine de violents séismes qui secouent cette région jusqu'à l'heure actuelle (Osmani et Ouzerara, 2004 *in* Ben Boudiaf et Hadjarab, 2006).

II.3.3.4. Faille de Mahelma

Sur la rive droite de la cluse de Oued Mazafran, un escarpement de direction ENE-OSO affecte les terrasses marines de Mahelma avec un linéament qui s'étale sur 6 Km de long entre l'oued Mazafran et le village de Souidania. C'est une faille cachée ou aveugle et marquée par les terrasses quaternaires fortement tiltées (Maouche, 2002).

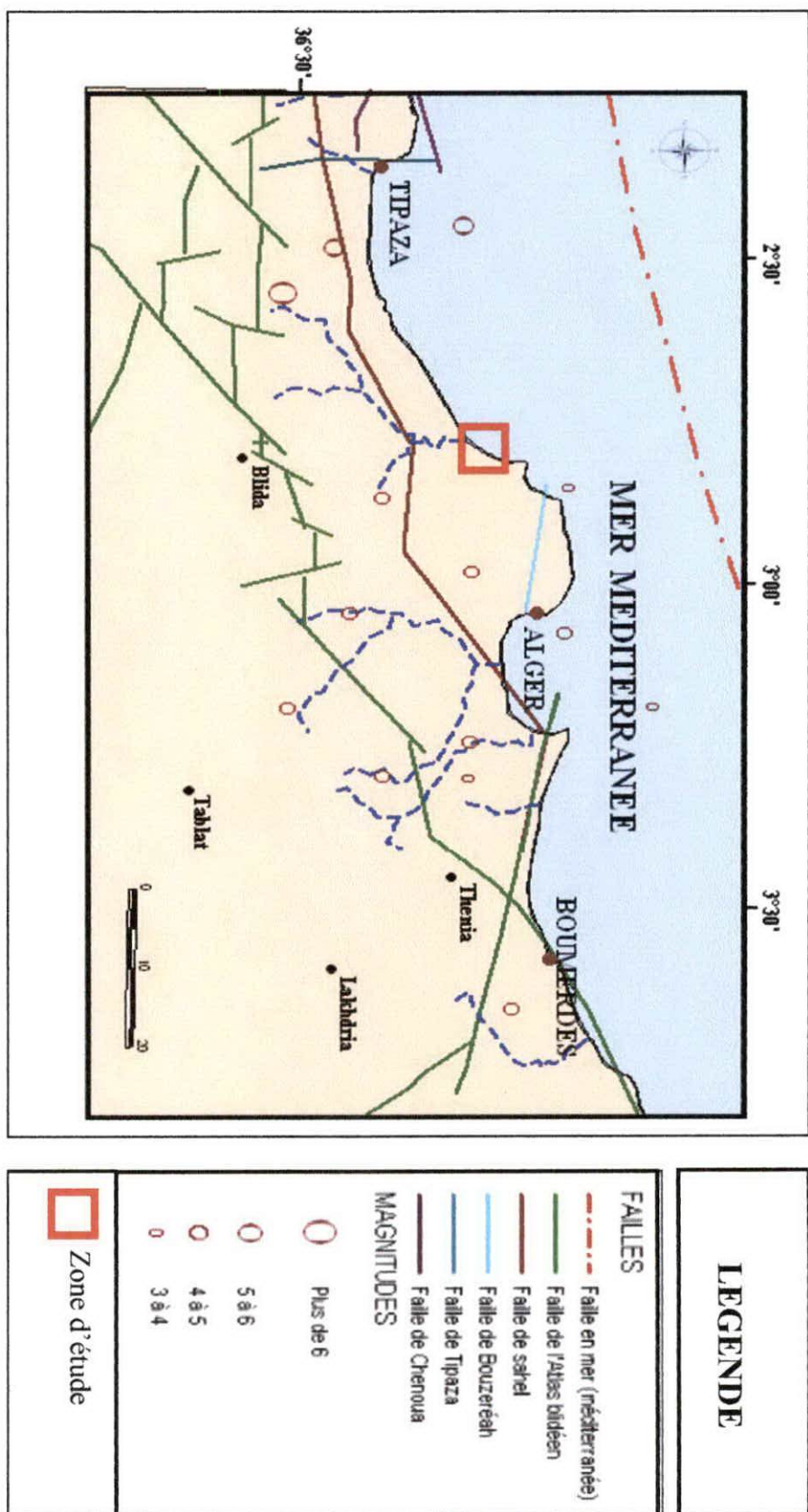


Figure n° 7 : Carte failles actives des principales de l'Algérois ; extrait de la carte sismotectonique de la région d'Alger (CGS ; 1998).

Conclusion

Dans la région d'Alger, on distingue deux grandes morphostructures tectonique d'âge récent (quaternaire) dues au mouvement de compression à la limite des deux plaques Africaine et Eurasienne :

- Une morphostructure de surrection correspondant au Sahel d'Alger, le massif d'Alger et l'Atlas blidéen.
- Une morphostructure de subsidence correspondant à la plaine alluviale de la Mitidja.

Notre secteur d'étude se situe dans une région de forte sismicité, zone III (CGS, 2004), cette menace sismique est due aux nombreuses failles qui l'entourent :

- La faille du sahel au Sud sur une distance de 10 Km.
- La faille de Mahelma au Sud-Est sur une distance de 8Km.
- La faille de Tipaza a l'Ouest sur une distance de 40 Km environ.
- La faille en mer Méditerranée au Nord.

Vu de ce degré de sismicité qui peut causer des séismes de grandes magnitudes, les constructions doivent répondre aux RPA (règles parasismiques algériennes) (CGS, 2004).

CHAPITRE III

CADRE GEOLOGIQUE LOCAL

Introduction

La reconnaissance géologique du site d'étude est basée principalement sur l'étude de la carte géologique de la région (figure n°8), les résultats des neuf (09) sondages carottés effectués par le LNHC (figure n°9), ainsi que nos observations de terrain (affleurements, fouilles...etc.). La synthèse de ces données nous a permis d'établir des coupes géologiques corrélatives des terrains traversés (figures n° 10 et 11), et de déterminer également :

- ✓ la nature lithologique des formations rencontrées ;
- ✓ la géométrie des formations et leurs épaisseurs ;
- ✓ les propriétés physico-mécaniques des formations.

III.1. Stratigraphie

Les reconnaissances réalisées mettent en évidence les formations tertiaires de l'Astien et du Plaisancien, sous une couverture Quaternaire (Dalloni, 1939).

III.1.1. Le Tertiaire

- Le Plaisancien

Dans notre site d'étude, le Plaisancien est représenté par les formations suivantes :

- la marne grise, plus ou moins sableuse ;
- la marne argileuse, compacte ;
- la marne vaseuse.

- L'Astien

L'Astien est caractérisé par une hétérogénéité lithologique latérale et verticale. Il est formé essentiellement par :

- les sables fins, moyens à grossiers, de différents états de consolidation, pulvérulents;
- les argiles sableuses.

III.1.2 Le Quaternaire

Le quaternaire est représenté principalement par des dépôts dunaires ainsi que les alluvions récentes.

III.2 Lithologie

L'ensemble lithologique traversé par le tracé actuel de la zone d'étude a mis en évidence plusieurs formations se manifestant en alternance :

➤ Remblai

Le remblai constitue la couverture presque de l'ensemble des formations, il est représenté principalement par les argiles rouges avec une épaisseur variable (2 à 3m environ) s'étendant sur une grande largeur et occupant principalement la partie centrale vers le sud de la zone d'étude (photo n°1).

➤ Sables fins, moyens à grossiers

Une couche de sables fins, moyens à grossier très peu consolidés à stratification oblique, allant jusqu'à 3m d'épaisseur, de couleur jaunâtre parfois marron clair, renfermant dans quelques endroits des petits lits de quelques mm d'épaisseur plus consolidés (photo n° 2 et 3).

➤ Grés

Une couche de grés de grains fins à moyens de patine beige se manifeste sous différents états de consolidation (sables grésifiés, grés) qui affleure sur une épaisseur de 2m environ, observé à l'extrémité Est du site dans le lit de l'oued El-haddar. (Photos n°4 et 5).

➤ Argiles

Cette formation d'argile de couleur rougeâtre affleure très largement dans le piedmont du sahel, avec une épaisseur importante. Elle a été recoupée par presque la totalité des sondages carottés.

➤ Lignites

Cette formation se manifeste comme un passage lenticulaire traversant les couches de sables et d'argiles.

➤ Marnes

Ces marnes de couleur grisâtre se rencontrent à partir de 7m de profondeur à l'extrême Est de la zone d'étude (photo n°6).



Figure n°8 : Formations géologiques de la région de Zeralda. Extrait de la carte géologique de Koléa (M.E. Ficheur au 1/50000)



Photo n°1 : Remblai d'argile rouge s'étendant sur une grande largeur de la zone d'étude.

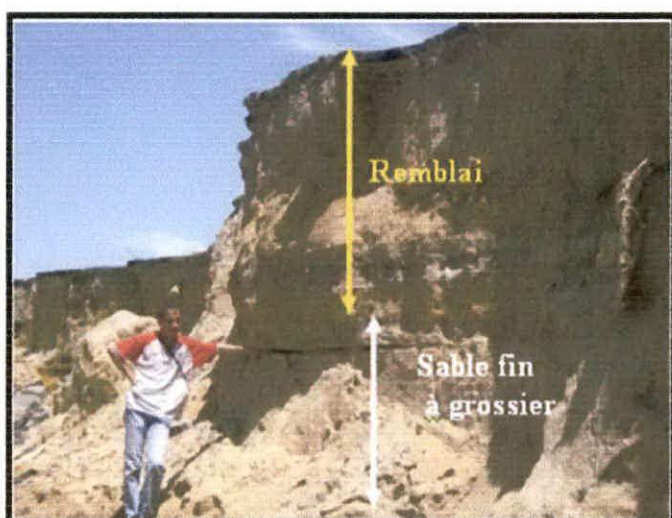


Photo n°2 : Remblai et sable fin à grossier.

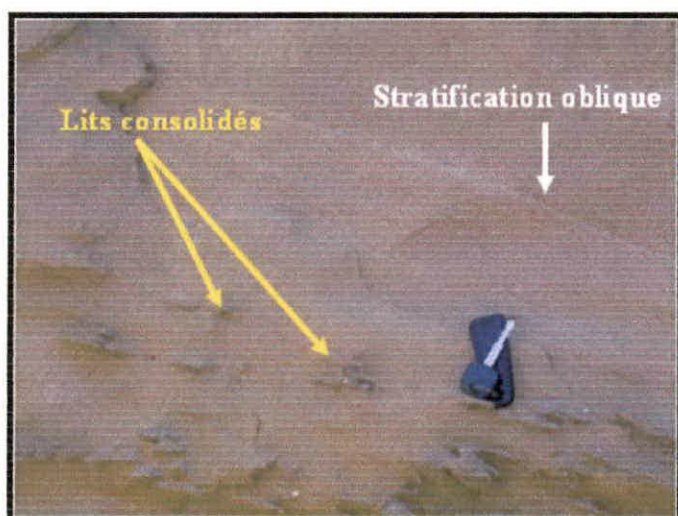


Photo n°3 : Sable avec stratification oblique renfermant des petits lits consolidés.



Photo n°4 : Grés consolidés de couleur beige

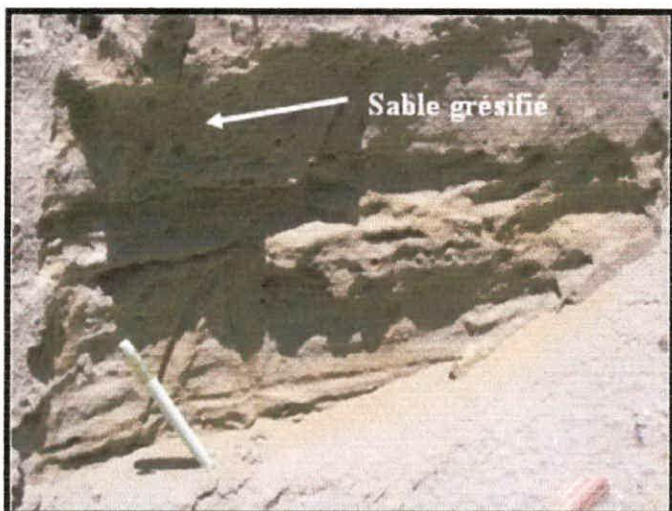


Photo n°5 : Sable grésifié assez dur à stratification oblique.



Photo n°6 : Marne de couleur grise extraite à partir de 7m de profondeur lors de forage de pieux.

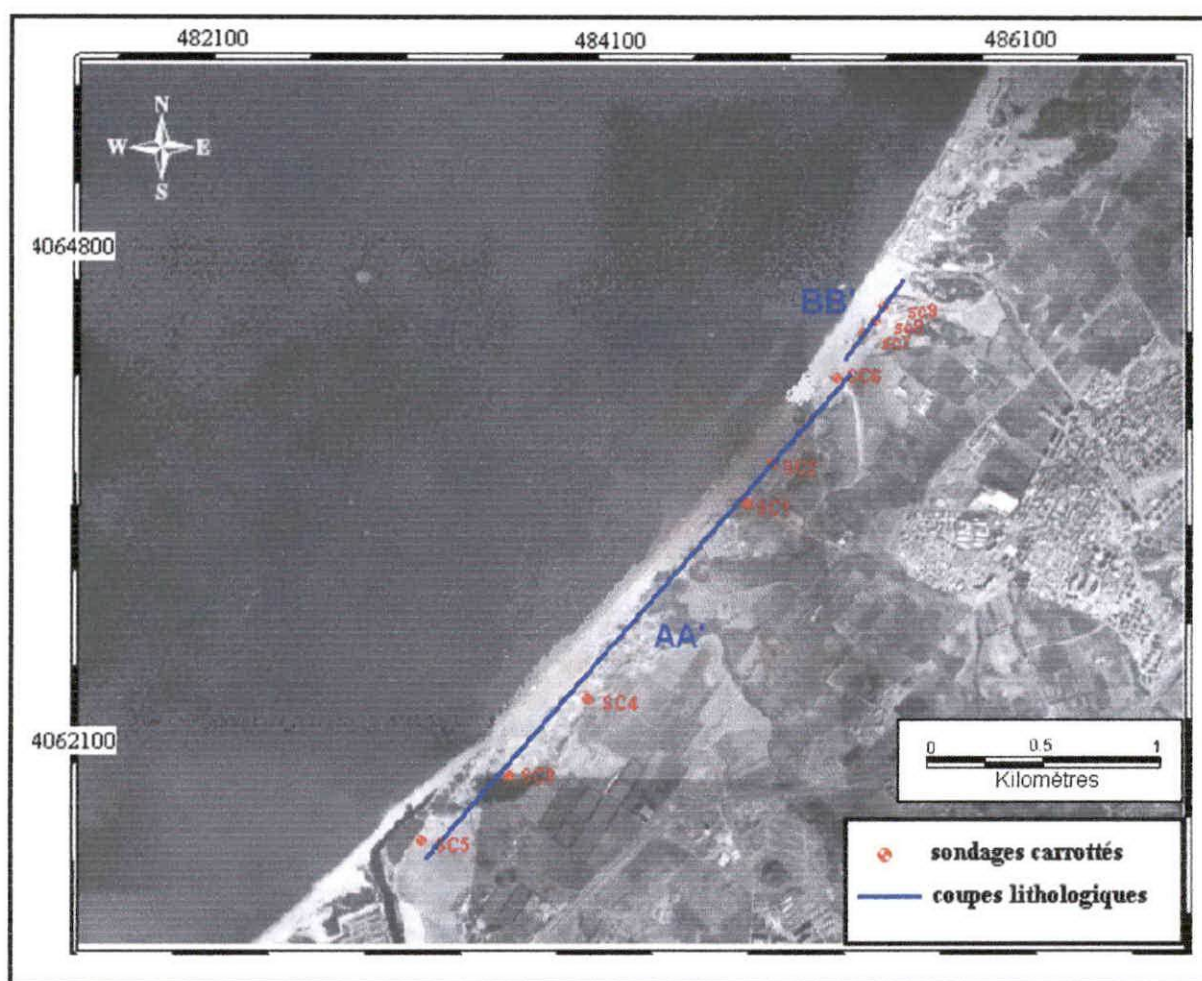


Figure n° 9 : Plan d'implantation des coupes lithologiques et sondages carottés.

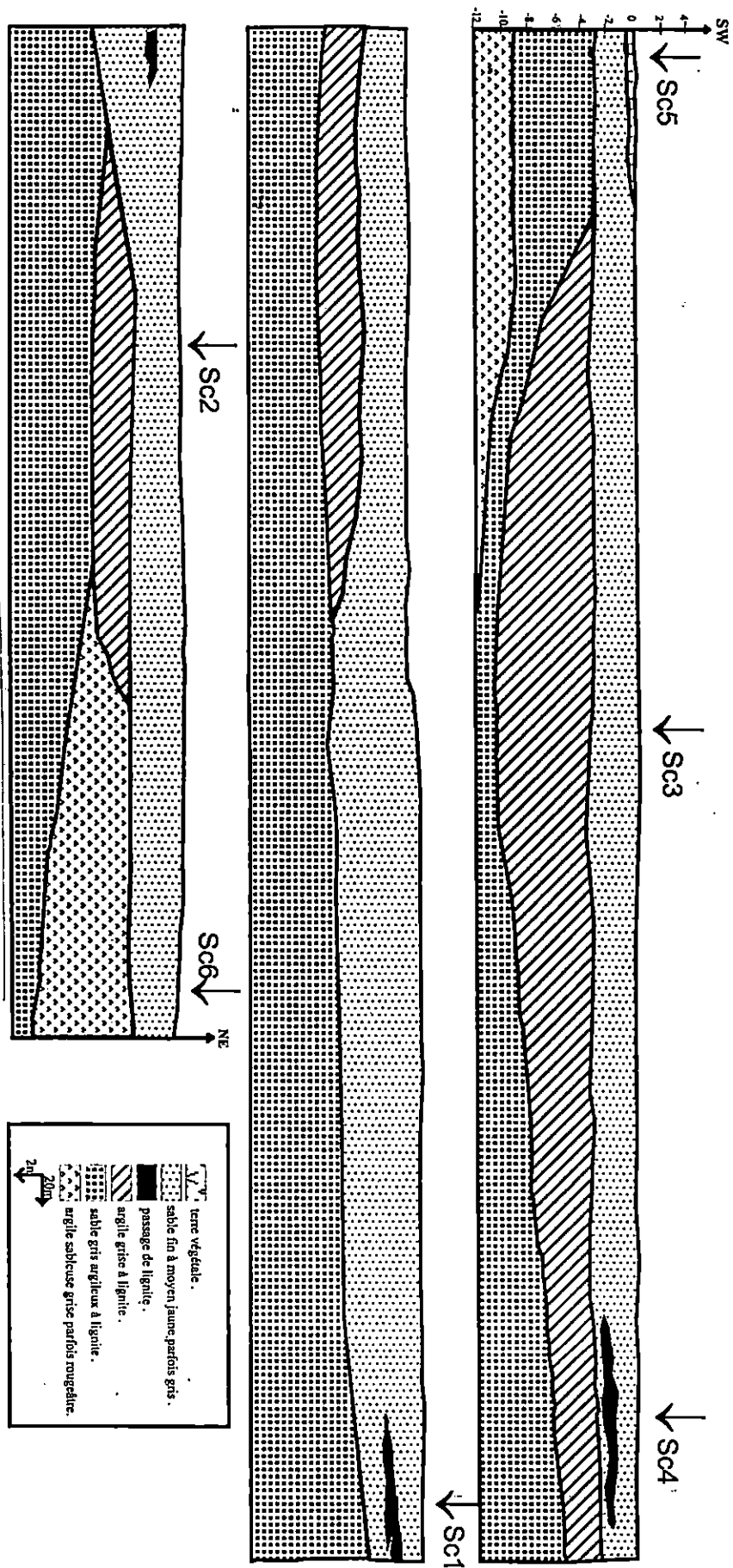


Figure n° 10 : coupe lithologiques corrélatives AA'.

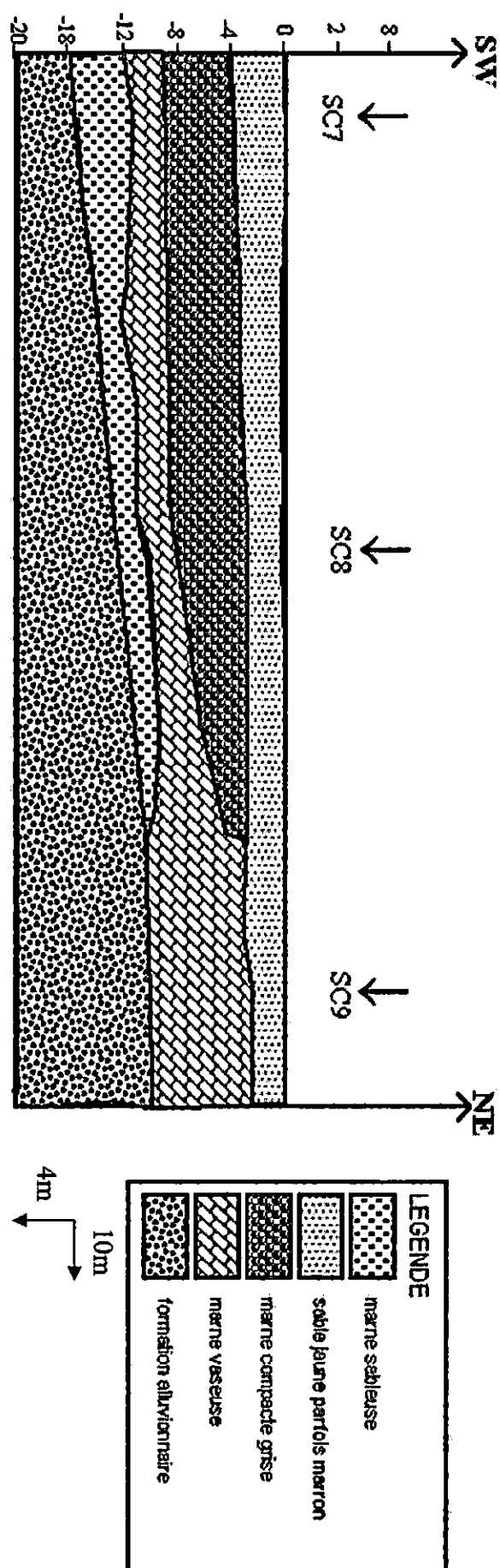


Figure n° 11 : coupe lithologiques corrélatrice BB'.

Conclusion

L'exploitation de toutes les données (sondages et coupes) indique que notre zone d'étude est formée par quatre formations principales :

- Remblai formé principalement d'argiles rouges occupant une superficie importante de la zone d'étude.
- Une formation superficielle de sables fins, moyens à grossiers à différents états de consolidation.
- Une formation d'argiles rencontrée dans la plupart des sondages carottés effectués.
- Une formation marneuse grisâtre renfermant des sables, des argiles et des vases.

CHAPITRE IV

CADRE GEOTECHNIQUE

Introduction

Les résultats de cette partie ont été obtenus à partir de l'interprétation et de la synthèse des essais de laboratoire et in situ menés par le Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction (LNHC) dans notre zone d'étude.

IV.1. Caractérisation géotechnique du sous sol du site

Les différents sondages carottés ont pu mettre en évidence trois unités :

I. Unité de sable avec deux formations :

- a) Formation de sable jaune.
- b) Formation de sable argileux à lignite.

II. Unité d'argile avec deux formations :

- a) Formation d'argile à lignite.
- b) Formation d'argile sableuse grise.

III Unité de marne avec trois formations :

- a) Formation de marne compacte.
- b) Formation de marne vaseuse.
- c) Formation de marne sableuse.

Les paramètres géotechniques analysés ont été déterminés à partir des :

A -Essais de laboratoire

Ces essais ont été réalisés sur des échantillons intacts prélevés dans les différents sondages carottés et à différentes profondeurs.

✓ Essais d'identification physiques.

- Teneur en eau W (%).
- Densité sèche γ_d (t/m^3).
- Degré de saturation S_r (%).
- Analyse granulométrique.
- Limites d'Atterberg, I_p (%), I_c (%), W_L , W_P .

✓ Essais mécaniques.

- Essais de cisaillement rectiligne à la boîte de type CU (consolidé non drainé) et UU (non consolidé et non drainé)
- Essais de compressibilité à l'oedomètre.

B- Essais in situ

- Essais au pénétromètre dynamique
- Essais de pénétration au carottier (SPT)

IV.1.1. Identification géotechnique du sol

IV.1.1.1. Essais de laboratoire

IV.1.1.1.1. Unité I : Sable

IV.1.1.1.1.1. Formation 1 : Sable jaune

Pour cette formation, la récupération des échantillons intacts n'a pas été possible ; pour cela seule l'analyse granulométrique a été effectuée.

➤ Analyse granulométrique

Le fuseau granulométrique révèle le caractère moyen à grossier de ce sol, avec un pourcentage des passants à 80 μ m, inférieur à 50%. Il s'agit donc, selon la classification LCPC, d'un sol pulvérulent contenant 9% à 18% de particules fines (figure n°12).

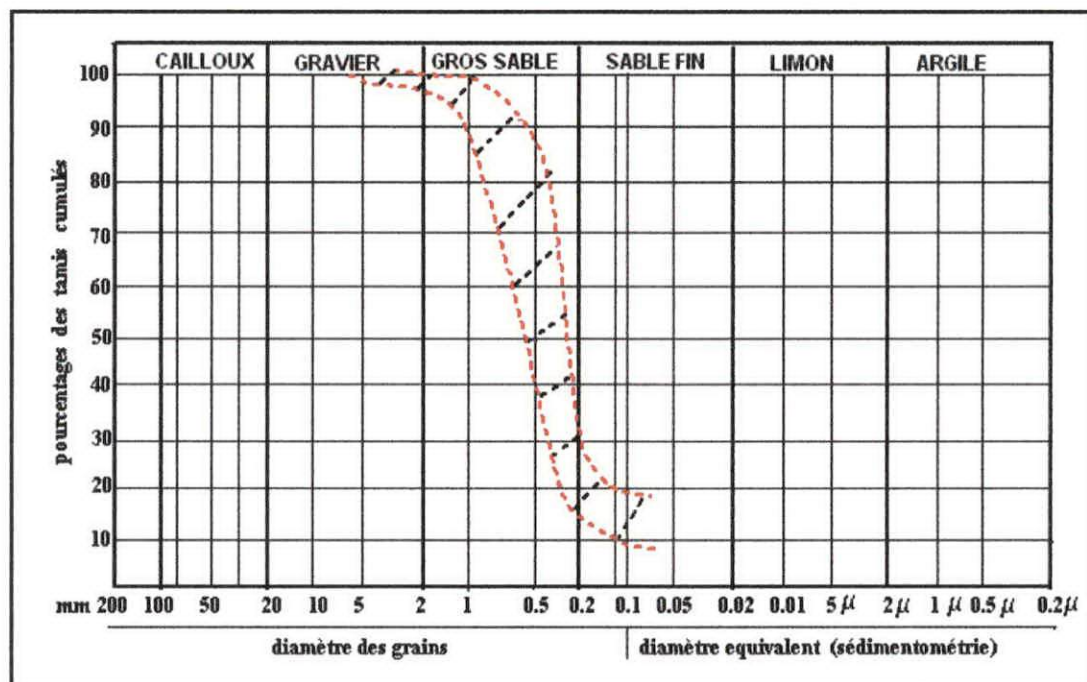


Figure n°12 : Fuseau granulométrique des sables jaunes (grossier à fin).

IV.1.1.1.1.2. Formation 2 : Sable argileux à lignite

a- les paramètres physiques

➤ **Teneur en eau naturelle (W%) et degré de saturation (Sr%)**

Les valeurs extrêmes de la teneur en eau de ces sables argileux varient entre 10.7 et 70.8 % avec une moyenne de la teneur en eau de ces sables argileux est de l'ordre de 19.62 %, les valeurs du degré de saturation comprises entre 88 et 100 % avec une moyenne de 96 %. Ces résultats donnent un sol détrempé, d'après la classification de Terzaghi (tableau n°2).

➤ Poids volumiques

Les résultats portés sur le tableau n°2 indiquent des valeurs comprises entre 0.91 t/m^3 et 2.07 t/m^3 avec une moyenne de 1.74 t/m^3 pour la densité sèche, et entre 1.56 t/m^3 et 2.29 t/m^3 avec une moyenne de 2.08 t/m^3 pour la densité humide. Ces valeurs expriment un état moyennement compact du sol (densité moyenne), d'après Filliat.

➤ Analyse granulométrique

Le fuseau granulométrique de cette formation donne un pourcentage des passant à $80 \mu\text{m}$ qui dépasse les 28%, il s'agit donc d'un sol pulvérulent, d'après la classification LCPC (figure n°13).

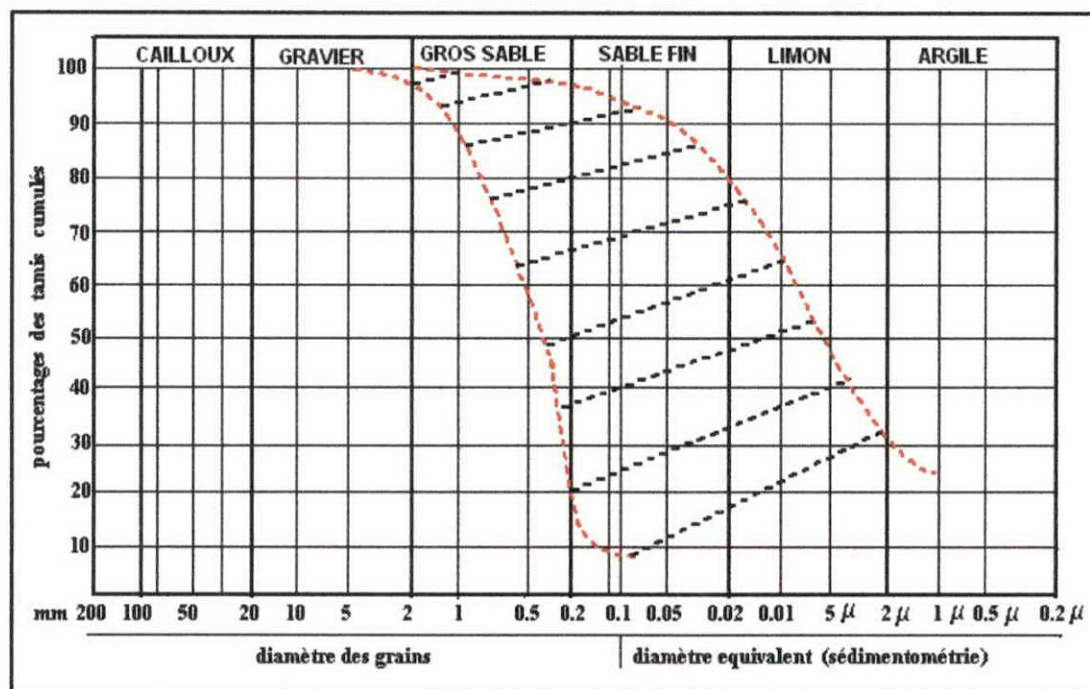


Figure n°13 : Fuseau granulométrique des sables argileux à lignite.

➤ Limites d'Atterberg

Les valeurs moyennes des limites d'Atterberg (W_L , W_P et I_P) sont :

- $W_L = 42.6 \%$;
- $W_P = 20 \%$;
- $I_P = 22.6 \%$.

Le point (W_L , I_P) dans le diagramme de Casagrande est au dessus de la ligne des argiles (A), et W_L inférieur à 50 % (figure n°14), ce qui permet de classer ces sables argileux, d'après la classification d'Atterberg dans le domaine des argiles plastiques (AP).

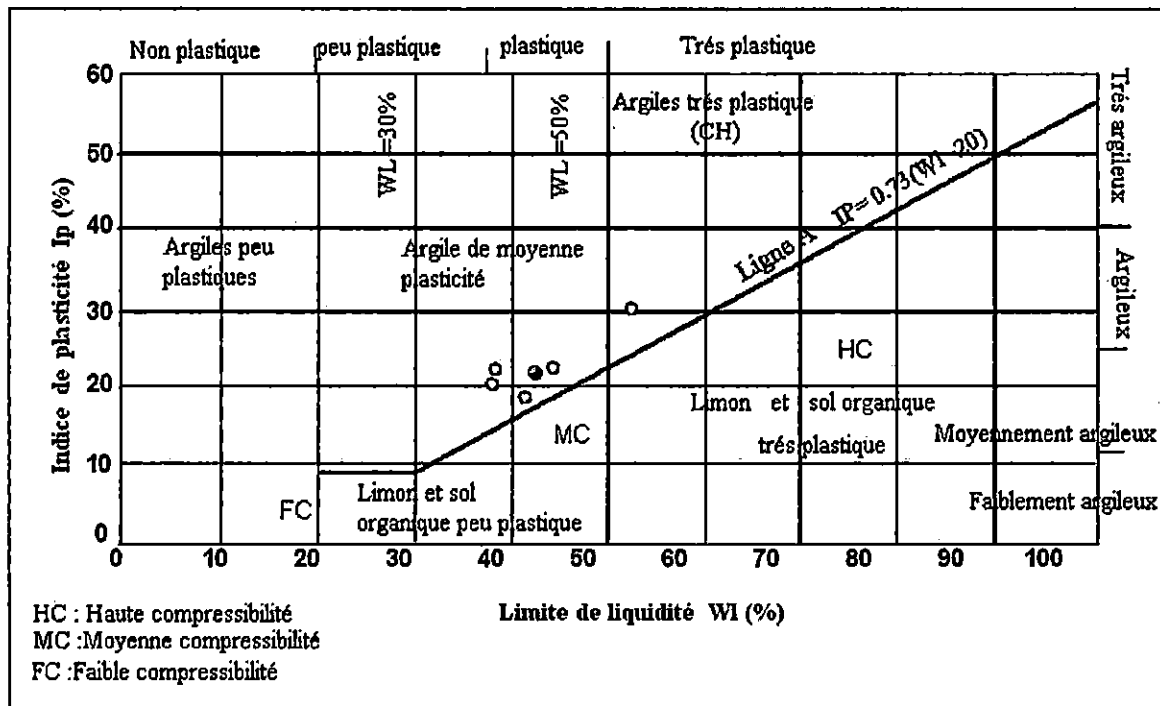


Figure n°14 : Diagramme de plasticité de Casagrande des sables argileux à lignite.

➤ Indice de consistance

La valeur moyenne de l'indice de consistance I_c varie autour de 1.07, caractérisant un sol dur (consistant) d'après la classification d'Atterberg (tableau n°2).

b-Les paramètres mécaniques

➤ Essai de cisaillement (C et ϕ)

Les 5 échantillons de cette formation, qui ont fait l'objet d'essais de cisaillement rectiligne à la boîte de Casagrande dont 4 de type consolidé non drainé (CU), et 1 non consolidé non drainé (UU) ont donné des valeurs moyennes de $C_{cu}=0.36$ bars, $\phi_{cu}=20^\circ$ et $C_{uu}=0.30$ bars, $\phi_{uu}=23^\circ$. Ces résultats indiquent un sol de résistance moyenne, due à la présence de la fraction fine (tableau n°2).

➤ Essai de compressibilité à l'oedomètre (C_t et C_g)

Les résultats des essais oedométriques donnent un coefficient de tassement (compressibilité) $C_t=0.104$ et un coefficient de gonflement $C_g=0.012$. Ces valeurs indiquent un sol moyennement compressible, d'après Terzaghi et peu à non gonflant, d'après SANGLERAT (tableau n°2).

Tableau n°2 : Paramètres géotechniques de sables argileux à lignite.

	Paramètres géotechniques		Nombre d'échantillons	Valeurs		Moyenne	Interprétation	
				Min	Max			
Paramètres physiques	Teneur en eau naturelle : $W\%$		9	10.8	70.8	19.62	Détrempé	
	Degré de saturation : $S_r (\%)$		9	88	100	96.22		
	Poids volumique sec : $\gamma_d (t/m^3)$		9	0.91	2.07	1.74	Moyenne	
	Poids volumique humide : $\gamma_h (t/m^3)$		9	1.56	2.29	2.08		
	Granulométrie	% de passants à 2mm	5				Sol pulvérulent	
		% de passants à 0.080mm		6	94	28.3		
		% de passants à 2μ		-	-	-		
	limites d'Atterberg	$W_L (\%)$	5	38	52	42.6	Plastique	
		$W_P (\%)$		17	22	20		
		$I_P (\%)$		19	30	22.6		
Indice de consistance : $I_C=W_L-W/I_P$		5	0.93	1.15	1.07	Consistant		
Paramètres mécaniques	Cisaillement rectiligne	CU	C (bars)	4	0.11	0.66	0.36	Résistance moyenne
			ϕ (degrés)		7	31		
		UU	C (bars)	1	-	-	0.30	Résistance moyenne
			ϕ (degrés)		-	-	23	
	Compressibilité à l'oedomètre		P_C (bars)	5	1.58	2.77	1.87	Sol de compressibilité moyenne
			C_t		0.096	0.123	0.104	
			C_σ		0.014	0.09	0.012	

IV.1.1.1.2. Unité II : argile**IV.1.1.1.2.1. Formation 1 : argile à lignite****a- Les paramètres physiques****➤ Teneur en eau naturelle ($W\%$) et degré de saturation ($S_r\%$)**

Les valeurs de la teneur en eau varient entre 36.3 % et 70.6 % avec une moyenne de 53.36 %, ainsi qu'une valeur moyenne de degré de saturation de l'ordre de 91.66 %. Ces résultats indiquent un sol détrempe, d'après la classification de Terzaghi.

➤ Poids volumiques

Les résultats obtenus dans le tableau n° 3, indiquent une valeur moyenne du poids volumique sec (γ_d) de 1.04 t/m³ et un poids volumique humide (γ_h) de 1.56 t/m³. Ces valeurs indiquent un sol de densité faible, d'après FILLIAT.

➤ Analyse granulométrique

Le fuseau granulométrique révèle le caractère fin de ce sol avec un pourcentage des passants dont le diamètres est inférieur à 80 μ m est de 93.875 % .Il s'agit donc d'un sol argileux avec passage de lignite, d'après le LCPC (figure n°15).

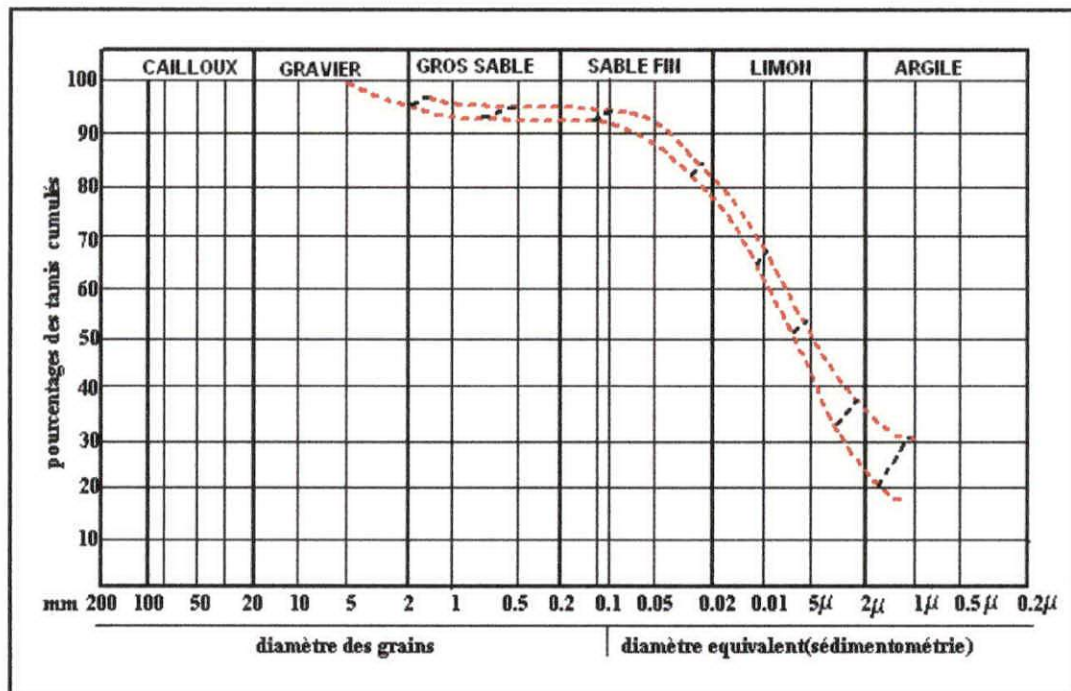


Figure n°15 : Fuseau granulométrique des argiles à lignite.

➤ Limites d'Atterberg

La limite de liquidité (W_L) varie entre 64 % et 79 % avec une moyenne de 73.33%, et un indice de plasticité (I_p) moyen de l'ordre de 31.66%. Le diagramme de Casagrande (figure n°16) classe ce sol dans le domaine des argiles très plastique (At), et d'après la classification d'Atterberg, ce sol a une forte plasticité.

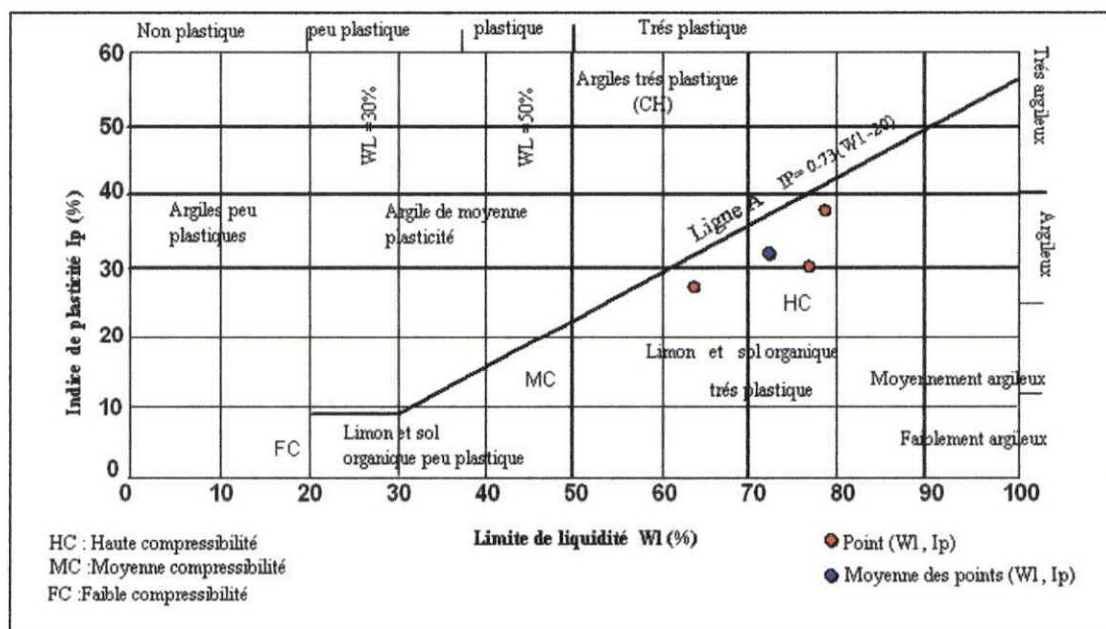


Figure n°16 : Diagramme de plasticité de Casagrande des argiles à lignite.

➤ Indice de consistance

La valeur moyenne de l'indice de consistance $I_c=0.63$, indique un sol ferme, selon la classification d'Atterberg.

b-Les paramètres mécaniques

➤ Essais de cisaillement

Les résultats obtenus par les essais de cisaillement de type consolidé, non drainé (CU) donnent une cohésion moyenne $C_{cu}=0.38$ bars et un angle de frottement $\phi_{cu}=14.5^\circ$, tandis que l'essai non consolidé non drainé (UU) donne une cohésion moyenne de l'ordre de 0.76 bars, et un angle de frottement de l'ordre de 7° , indiquant une résistance et un angle de frottement moyen du sol.

➤ Essais de compressibilité à l'oedomètre

Les valeurs de coefficient de compressibilité (C_t) obtenus varient entre 0.339 et 0.701 avec une moyenne de 0.53, ainsi qu'une moyenne de 0.11 pour le coefficient de gonflement (C_g). Ces résultats indiquent un sol extrêmement compressible et gonflant, d'après la classification de Terzaghi.

Tableau n°3: Paramètres géotechniques des argiles à lignite.

	Paramètres géotechniques		Nombre d'échantillons	Valeurs		Moyenne	Interprétation	
				Min	Max			
Paramètres physiques	Teneur en eau naturelle : W%		3	36.3	70.6	53.36	Détrempé	
	Degré de saturation : Sr (%)		3	83	96	91.66		
	Poids volumique sec : γ_d (t/m ³)		3	0.80	1.34	1.04	Faible	
	Poids volumique humide : γ_h (t/m ³)		3	1.36	1.82	1.56		
	Granulométrie	% de passants à 2mm	4				Sol fin	
		% de passants à 0.080mm		93	95.50	93.875		
		% de passants à 2 μ		-	-	-		
	limites d'Atterberg	W _L (%)	3	64	79	73.33	Hautement plastique	
		W _P (%)		36	47	41.66		
		I _P (%)		28	37	31.66		
Indice de consistance : I _C			3	0.21	0.99	0.63	Ferme	
Paramètres mécaniques	Cisaillement rectiligne	CU	C (bars)	2	0.30	0.47	0.38	Résistance moyenne
			ϕ (degrés)		14	15	14.5	
		UU	C (bars)	1	-	-	0.76	Résistance moyenne
			ϕ (degrés)		-	-	7	
	Compressibilité à l'oedomètre		P _C (bars)	3	1.17	1.95	1.44	
			C _t		0.339	0.701	0.53	Extrêmement compressible
			C _g		0.065	0.140	0.110	Sol gonflant

IV.1.1.1.2.2. Formation 2 : argile sableuse grise

➤ Teneur en eau naturelle (W%) et degré de saturation (Sr%)

Ce sol a des valeurs extrêmes variant entre 15.9 et 57.5 % avec une moyenne de 42.5%, et un degré de saturation ($S_r=97.87\%$) indiquant qu'on est en présence d'un sol détrempe à saturé, d'après la classification de Terzaghi.

➤ Poids volumiques

Les poids volumiques obtenus sur les 8 essais montrent des valeurs de la densité sèche (γ_d) comprises entre 1.03 et 1.91 t/m^3 et une valeur moyenne de 1.32 t/m^3 et celle de la densité humide (γ_h) est de 1.83 t/m^3 . Ces valeurs indiquent, dans l'ensemble, un sol de faible densité, d'après Filliat.

➤ Analyse granulométrique

Le fuseau granulométrique (figure n°17) montre le caractère fin de notre sol contenant 18 à 40% des particules grossières, avec un pourcentage moyen des passants à 80μ de l'ordre de 69.25%, il s'agit donc, d'un sol fin, selon la classification LCPC.

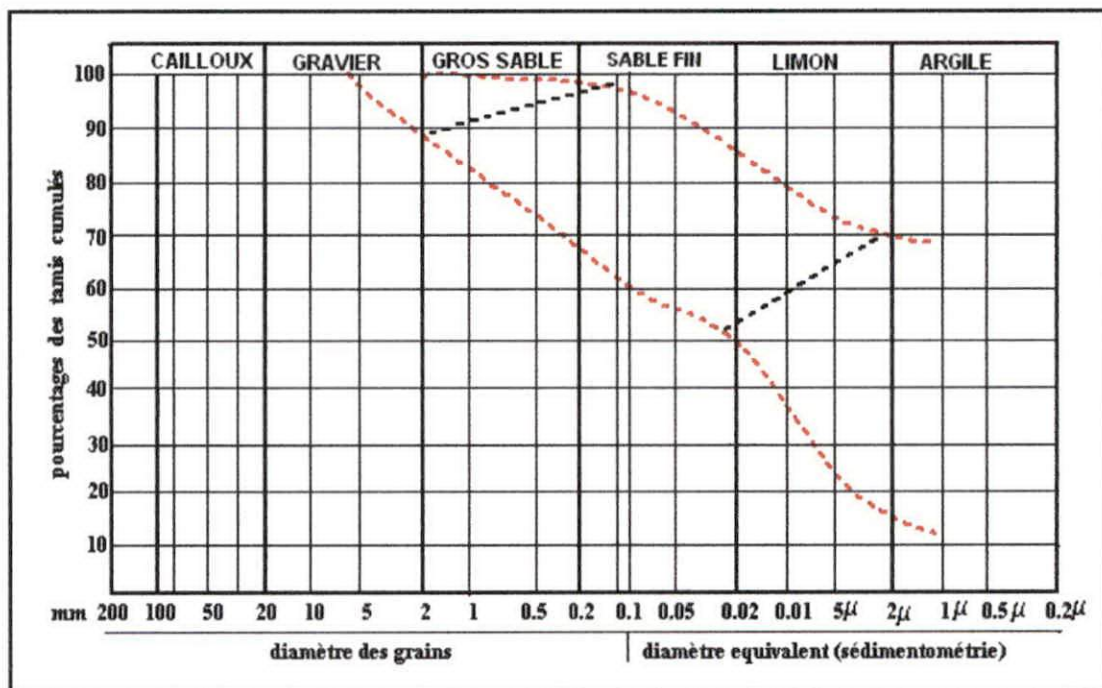


Figure n°17 : Fuseau granulométrique des argiles sableuses grises.

➤ Limites d'Atterberg

Les valeurs moyennes des limites d'Atterberg (W_L , W_P , I_P) sont :

- $W_L = 63.37 \%$;
- $W_P = 33.75 \%$;
- $I_P = 29.62 \%$.

Dans la diagramme de Casagrande (figure n°18), la plus part des points sont au dessous de ligne A (ligne des argiles); domaine de haute plasticité, c'est donc un sol très plastique, d'après la classification d'Atterberg.

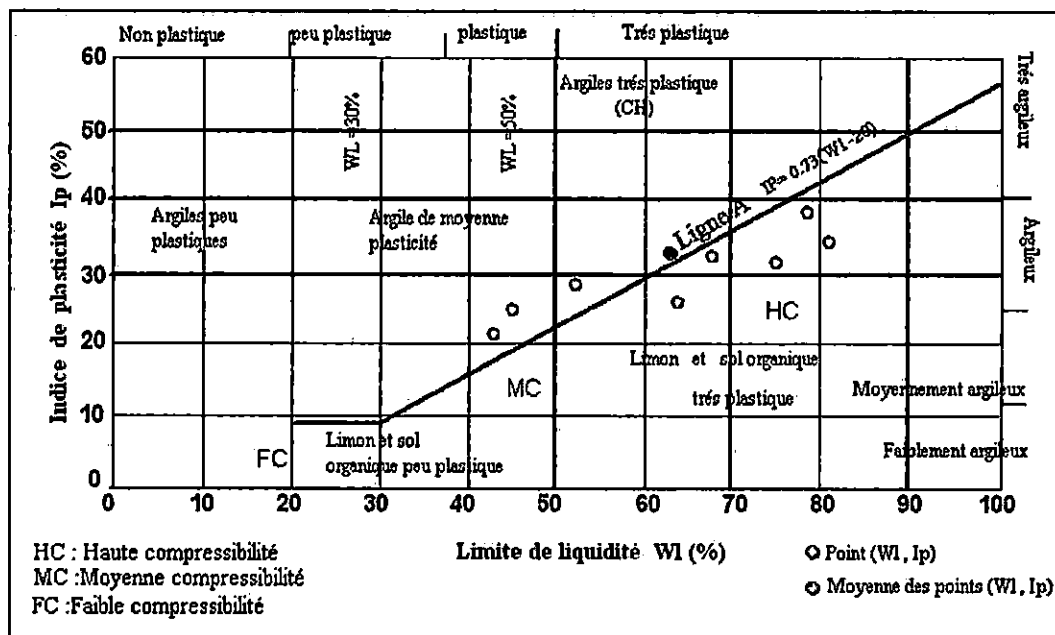


Figure n°18 : Diagramme de plasticité de Casagrande des argiles sableuses grises.

➤ Indice de consistance (I_c)

La valeur moyenne de I_c est de 0.73 indiquant d'après Atterberg un sol ferme (tableau n°4).

b-Les paramètres mécaniques

➤ Essais de cisaillement

Les résultats obtenus par les essais de type consolidé, non drainé (CU) donnent une cohésion moyenne de 0.24 bars, et un angle de frottement de 20° , par contre celles de type non consolidé non drainé (UU) ont donné une cohésion moyenne égale à 0.488 bars et un angle de frottement de 12.5° indiquant toujours une résistance moyenne du sol (tableau n°4).

➤ Essais de compressibilité à l'oedomètre (C_t et C_g)

Les résultats des essais œdométriques montrent une valeur moyenne de coefficient de compressibilité (C_t) de 0.216, et un coefficient de gonflement (C_g) de 0.045. Ces valeurs indiquent un sol assez compressible d'après Terzaghi, et gonflant d'après Sanglerat.

Tableau n°4 : Paramètres géotechniques des argiles sableuses grises.

	Paramètres géotechniques		Nombre d'échantillons	Valeurs		Moyenne	Interprétation	
				Min	Max			
Paramètres physiques	Teneur en eau naturelle : W%		8	15.9	57.5	42.2	Détrempé	
	Degré de saturation : Sr (%)		8	92	100	97.87		
	Poids volumique sec : γ_d (t/m³)		8	1.03	1.91	1.32	faible	
	Poids volumique humide : γ_h (t/m³)		8	1.63	2.21	1.83		
	Granulométrie	% de passants à 2mm	8				Sol fin	
		% de passants à 0.080mm		13	97	69.25		
		% de passants à 2 μ		-	-	-		
	limites d'Atterberg	W _L (%)	8	43	81	63.37	Hautement plastique	
		W _P (%)		20	47	33.75		
		I _p (%)		21	39	29.62		
Indice de consistance : I _C		8	0.36	1.29	0.73	Ferme		
Paramètres mécaniques	Cisaillement rectiligne	CU	C (bars)	3	0.14	0.32	0.24	Résistance moyenne
			ϕ (degrés)		14	25	20	
		UU	C (bars)	5	0.37	0.63	0.488	Résistance moyenne
			ϕ (degrés)		9	19	12.5	
	Compressibilité à l'oedomètre		P _C (bars)	6	1.01	1.96	1.36	Sol assez compressible
			C _t		0.083	0.541	0.216	
			C _r		0.009	0.118	0.045	

IV.1.1.1.3. Unité III : marne

IV.1.1.1.3.1. Formation 1 : marne compacte

a-les paramètres physiques

➤ Teneurs en eau naturelle ($W\%$) et degré de saturation ($S_r\%$)

La valeur moyenne de la teneur en eau est de 46.66%, ainsi que la valeur moyenne du degré de saturation est de 99.66 %. Ces résultats indiquent un sol saturé, d'après la classification de Terzaghi.

➤ Les poids volumiques (γ_d) et (γ_h)

Ce sol a une valeur moyenne de la densité sèche (γ_d) qui est de 1.18 t/m^3 et celle de la densité humide de 1.73 t/m^3 , indiquant un sol de faible densité (tableau n°5).

➤ Analyse granulométrique

L'analyse des résultats des données granulométriques montre que la formation rencontrée est classée comme un sol fin, vu que le pourcentage des passants à 80 μm est très important (96%), indiquant un sol marneux fin, d'après le LCPC (figure n° 19).

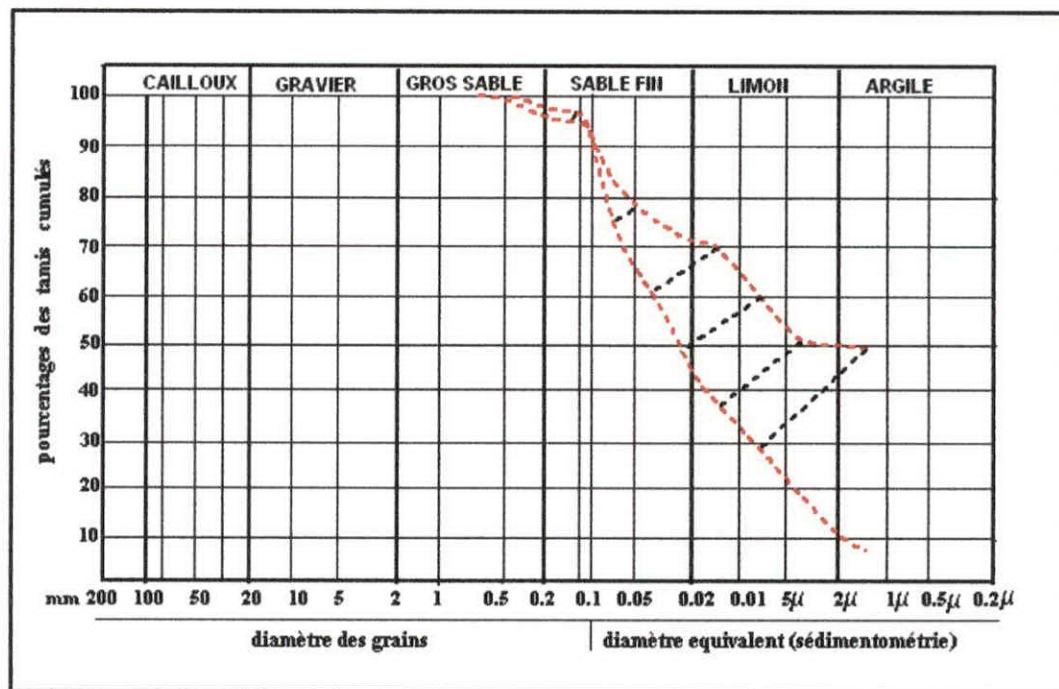


Figure n°19 : Fuseau granulométrique des marnes compactes.

➤ Limites d'Atterberg

Les valeurs moyennes des limites d'Atterberg (W_L , W_P , I_P) sont :

- $W_L = 75.96 \%$;
- $W_P = 36.2 \%$;
- $I_P = 36.76 \%$.

Le diagramme de Casagrande (figure n°20) classe le sol dans le domaine des argiles, c'est donc un sol très plastique, d'après la classification d'Atterberg.

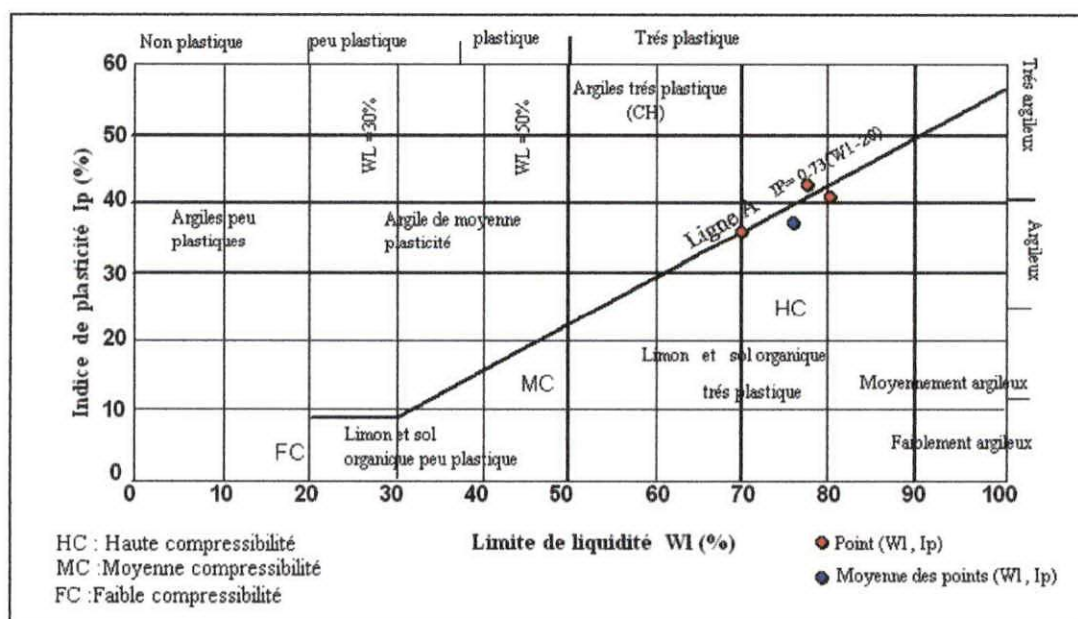


Figure n°20 : Diagramme de plasticité de Casagrande des marnes compactes.

➤ **Indice de consistance**

L a valeur moyenne de l'indice de consistance I_c est de 0.65, indiquant un sol ferme d'après Atterberg.

b—les paramètres mécaniques

➤ **Essais de cisaillement**

Les résultats des essais de cisaillement rectiligne à la boîte de type consolidé, non drainé (CU) donnent une cohésion moyenne de 0.25 bars et un angle de frottement de 11.33° . Ces valeurs mettent en évidence un sol de faible résistance.

➤ **Essais de compressibilité à l'oedomètre**

Cette formation a un coefficient de compressibilité moyen de 0.235, et un coefficient de gonflement moyen de 0.084, ce sol est assez compressible, d'après Terzaghi et gonflant, d'après Sanglerat.

Tableau n°5 : Paramètres géotechniques des marnes compactes.

	Paramètres géotechniques		Nombre d'échantillons	Valeurs		Moyenne	Interprétation	
				Min	Max			
Paramètres physiques	Teneur en eau naturelle : W%		3	33.5	60.1	46.66	Saturé	
	Degré de saturation : Sr (%)		3	99	100	99.66		
	Poids volumique sec : γ_d (t/m ³)		3	1.00	1.37	1.18	Faible	
	Poids volumique humide : γ_h (t/m ³)		3	1.60	1.85	1.73		
	Granulométrie	% de passants à 2mm	3	100	100	100	Sol fin	
		% de passants à 0.080mm		94	98	96		
		% de passants à 2 μ		12	56	40		
	limites d'Atterberg	W _L (%)	3	69.9	80	75.96	Hautement plastique	
		W _P (%)		33.5	39.6	36.2		
		I _P (%)		36.4	42.5	36.76		
Indice de consistance : I _C			3	0.39	1.15	0.65	Ferme	
Paramètres mécaniques	Cisaillement rectiligne	CU	C (bars)	3	0.12	0.33	0.25	Faible résistance
			ϕ (degrés)		5	21	11.33	
		UU	C (bars)	-	-	-		
			ϕ (degrés)	-	-	-		
	Compressibilité à l'oedomètre		P _C (bars)	3	0.55	2.24	1.42	Assez compressible
			C _i		0.182	0.378	0.253	
			C _{α}		0.046	0.148	0.084	

IV.1.1.1.3.2. Formation 2 : marne vaseuse

a- les paramètres physiques

➤ Teneurs en eau naturelle (W) et le degré de saturation (Sr)

La teneur en eau de ces marnes vaseuses varie entre 47.1% et 86.8% avec une moyenne de 63.62 %, et un degré de saturation de l'ordre de 100 %, indiquant un sol saturé, d'après Terzaghi.

➤ Les poids volumiques (γ_d) et (γ_h)

Ce sol a une densité sèche moyenne de 0.955 t/m^3 et une densité humide de 1.59 t/m^3 indiquant un sol peu dense (tableau n°6).

➤ Analyse granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique classent la formation rencontrée comme un sol fin avec un pourcentage des passants à $80\mu\text{m}$ de l'ordre de 86.66%. Le fuseau granulométrique met en évidence le caractère étalé de ces marnes avec un peu de sable fin à grossier, selon LCPC (figure n° 21).

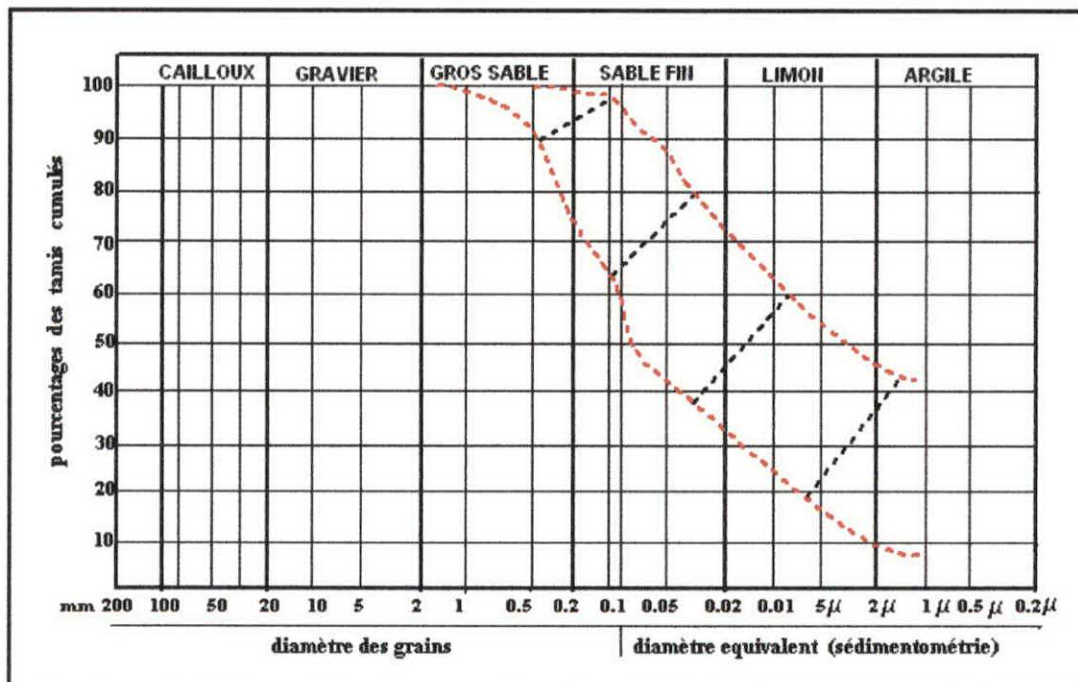


Figure n°21 : Fuseau granulométrique des marnes vaseuses.

➤ Limites d'Atterberg

Cette fraction fine (marneuse vaseuse) présente des limites d'Atterberg dont les valeurs moyennes sont de l'ordre de :

- $W_L = 68.16\%$;
- $W_P = 33.3\%$;
- $I_P = 33.7\%$.

Dans le diagramme de Casagrande (figure n°22), les différents points s'alignent suivant la ligne A dans le domaine des argiles très plastiques.

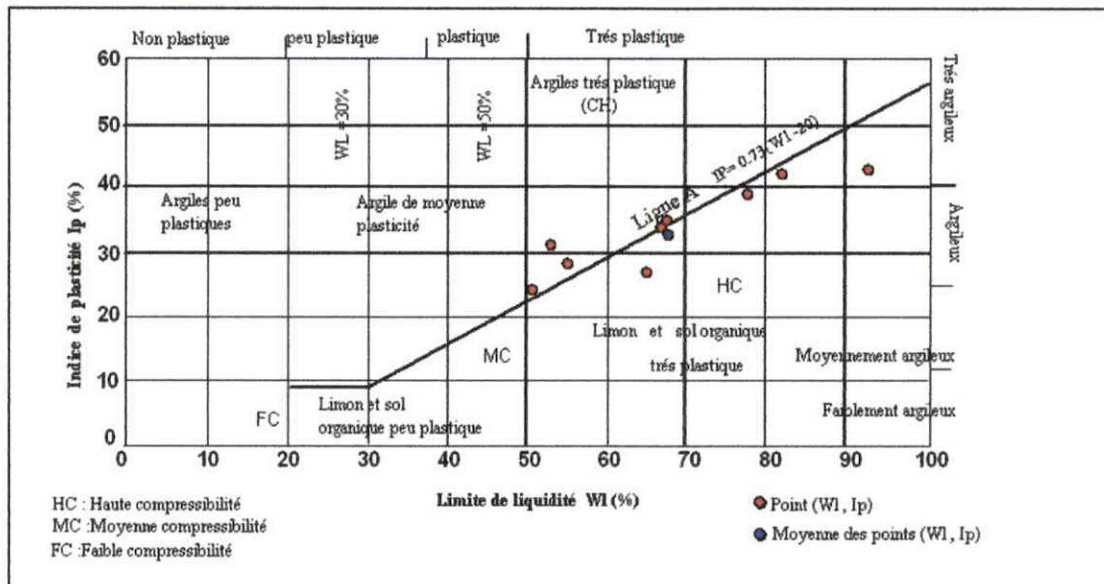


Figure n°22 : Diagramme de plasticité de Casagrande des marnes vaseuses.

➤ Indice de consistance

La valeur moyenne de l'indice de consistance I_C varie autour de 0.528, caractérisant un sol ferme (tableau n°6).

b—les paramètres mécaniques

➤ Essais de cisaillement

Les 4 essais de cisaillement réalisés à la boîte de Casagrande sont de type consolidé non drainé (CU). Les résultats obtenus indiquent une cohésion allant de 0.1 à 0.7 bars avec une moyenne de 0.322 bars et un angle de frottement variant entre 13° et 27° avec une moyenne de 20.75° , indiquant qu'on est en présence d'un sol de résistance moyenne (tableau n°6).

➤ Essais de compressibilité à l'oedomètre

La valeur moyenne du coefficient de tassement (C_1) est de 0.287 avec une valeur moyenne de 0.067 pour le coefficient de gonflement (C_g). Ces résultats indiquent un sol assez compressible d'après Terzaghi et gonflant d'après Sanglerat.

Tableau n°6 : Paramètres géotechniques des marnes vaseuses.

	Paramètres géotechniques			Nombre d'échantillons	Valeurs		Moyenne	Interprétation
					Min	Max		
Paramètres physiques	Teneur en eau naturelle : W%			9	47.1	86.8	63.62	Saturé
	Degré de saturation : Sr (%)			9	100	100	100	
	Poids volumique sec : γ_d (t/m ³)			9	0.79	1.14	0.955	Faible
	Poids volumique humide : γ_h (t/m ³)			9	1.44	1.82	1.59	
	Granulométrie	% de passants à 2mm		9	92	100	99.11	Sol fin
		% de passants à 0.080mm			54	99	86.66	
		% de passants à 2 μ			12	48	24.33	
	limites d'Atterberg	W _L (%)		9	50.7	93	68.16	Hautement plastique
		W _P (%)			21.5	40.5	33.3	
		I _P (%)			24.2	42.6	33.7	
Indice de consistance : I _C			9	0.133	0.77	0.528	Ferme	
Paramètres mécaniques	Cisaillement rectiligne	CU	C (bars)	4	0.1	0.7	0.322	Résistance moyenne
			ϕ (degrés)		13	27	20.75	
		UU	C (bars)	-	-	-	-	
			ϕ (degrés)		-	-	-	
	Compressibilité à l'oedomètre		P _C (bars)	6	0.56	2.4	1.321	Assez compressible
			C _t		0.216	0.346	0.287	
			C _{σ}		0.06	0.075	0.067	

IV.1.1.1.3.3. Formation 3 : marne sableuse

a—les paramètres physiques

➤ Teneurs en eau naturelle ($W\%$) et degré de saturation ($Sr\%$)

Les marnes sableuses étudiées, montrent des valeurs extrêmes de la teneur en eau variant entre 46.4 et 49.1% avec une moyenne de 47.8%, et un degré de saturation de 100%, témoignant de l'état saturé du sol étudié (tableau n°7).

➤ Les poids volumiques (γ_d) et (γ_h)

Ces marnes sableuses présentent une compacité faible à moyenne avec un poids volumique sec de l'ordre de $1.12t/m^3$ et un poids volumique humide de l'ordre de $1.635t/m^3$ (tableau n°7).

➤ Analyse granulométrique

Le fuseau granulométrique étalé qui caractérise cette formation, allant des sables (grossiers et fins) aux limons, montre l'hétérogénéité des échantillons testés. Le pourcentage des passants au tamis 80 μ est de 84%, il s'agit donc d'un sol fin, selon la classification LCPC (figure n°23).

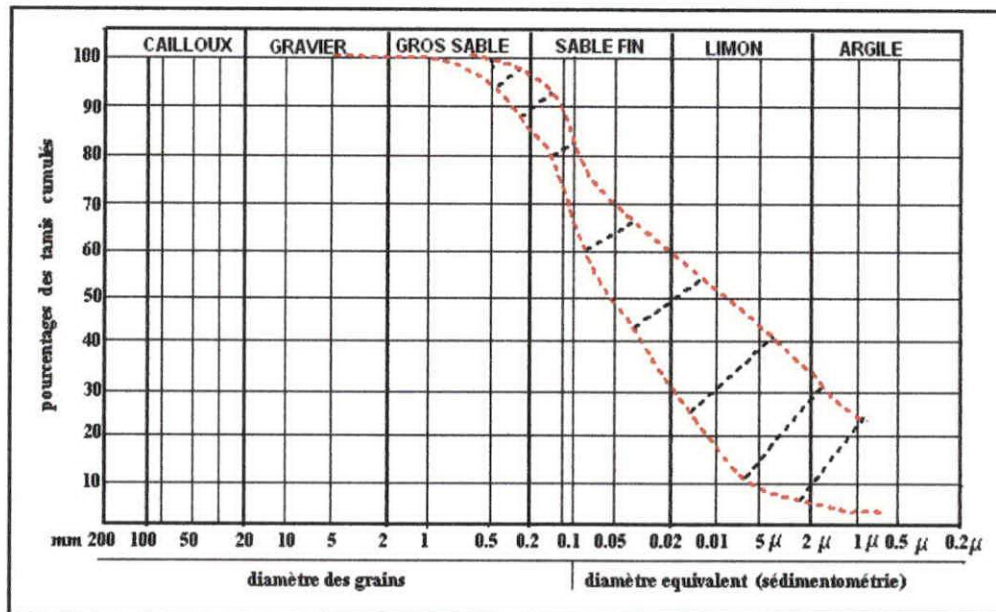


Figure n°23 : Fuseau granulométrique des marnes sableuses.

➤ Limites d'Atterberg

Les valeurs moyennes des limites d'Atterberg (W_L , W_P , I_P) sont :

- $W_L = 61.3 \%$;
- $W_P = 30.15 \%$;
- $I_P = 31.15 \%$.

Le diagramme de plasticité de Casagrande (figure n°24) classe ces marnes dans le domaine des argiles très plastiques, d'après la classification d'Atterberg.

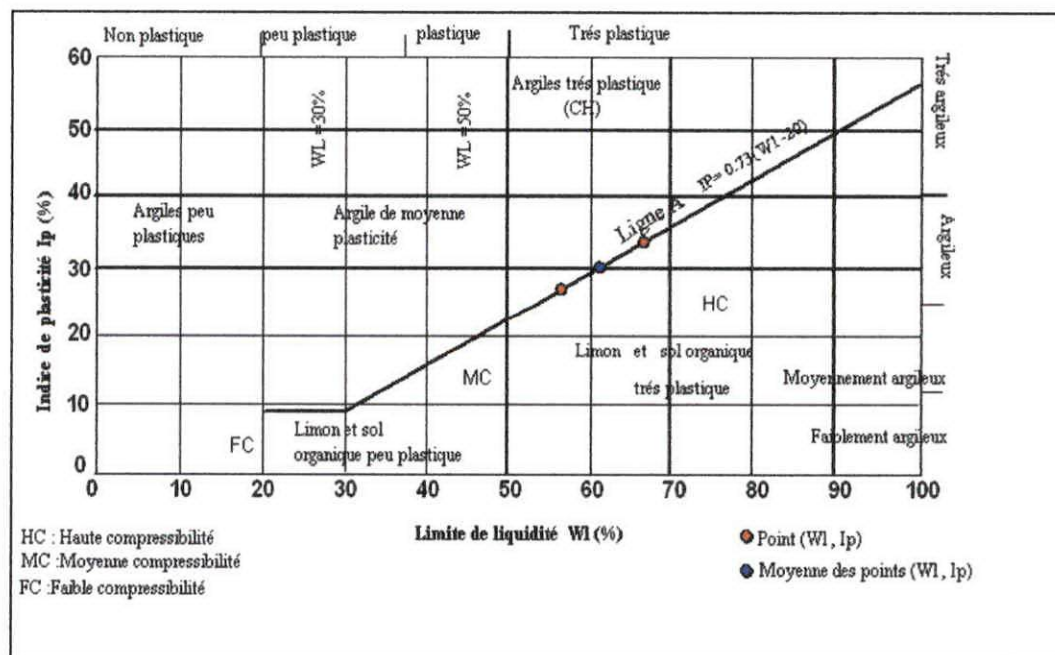


Figure n°24 : Diagramme de plasticité de Casagrande des marnes sableuses.

➤ Indice de consistance

La valeur moyenne de l'indice de consistance I_c varie entre 0.234 et 0.602 avec une moyenne 0.418, il s'agit d'un sol mou (tableau n°7).

b-les paramètres mécaniques

➤ Essais de compressibilité à l'oedomètre

Les résultats obtenus à partir des essais de compressibilité à l'oedomètre, effectués sur les échantillons prélevés à différentes profondeurs de cette formation ont donné un coefficient de compressibilité (C_t) de 0.238, indiquant un sol assez compressible. De même, le coefficient de gonflement (C_g) présente une valeur moyenne de 0.0555 qui caractérise un sol gonflant (tableau n°7).

Tableau n°7 : Paramètres géotechniques des marnes sableuses.

	Paramètres géotechniques		Nombre d'échantillons	Valeurs		Moyenne	Interprétation	
				Min	Max			
Paramètres physiques	Teneur en eau naturelle : $W\%$		2	46.5	49.1	47.8	Saturé	
	Degré de saturation : $S_r (\%)$		2	100	100	100		
	Poids volumique sec : $\gamma_d (t/m^3)$		2	1.10	1.14	1.12	Faible	
	Poids volumique humide : $\gamma_h (t/m^3)$		2	1.61	1.66	1.635		
	Granulométrie	% de passants à 2mm	2	99	99	99	Sol fin	
		% de passants à 0.080mm		78	90	84		
		% de passants à 2μ		4	36	20		
	limites d'Atterberg	$W_L (\%)$	2	55.8	66.8	61.3	Hautement plastique	
		$W_P (\%)$		27.2	33.1	30.15		
		$I_P (\%)$		28.6	33.7	31.15		
Indice de consistance : I_C			2	0.234	0.602	0.418	Mou	
Paramètres mécaniques	Cisaillement rectiligne	CU	C (bars)	-	-	-	-	
			ϕ (degrés)	-	-	-	-	
		UU	C (bars)	-	-	-	-	
			ϕ (degrés)	-	-	-	-	
	Compressibilité à l'oedomètre		P_C (bars)	2	1.6	2.49	2.045	Assez compressible Sol gonflant
			C_t	0.185	0.292	0.238		
			C_g	0.055	0.056	0.0555		

En résumé, l'analyse des résultats des essais de laboratoire nous a permis d'individualiser six (06) formations distinctes :

- Sable argileux à lignite de densité moyenne, détrempée, hautement plastique, moyennement compressible, et peu à non gonflant.
- Argile à lignite de densité faible, détrempée, hautement plastique, extrêmement compressible et gonflant.
- Argile sableuse grise de densité faible, détrempée, hautement plastique, assez compressible et gonflant.

- Marne compacte de faible densité, saturé, hautement plastique assez compressible et gonflant.
- Marne vaseuse de densité faible, saturé, hautement plastique, assez compressible et gonflant.
- Marne sableuse de densité faible, saturé, hautement plastique, assez compressible et gonflant

IV.1.1.2. Essais in situ

IV.1.1.2.1. Essai de pénétration au carottier SPT (Standard Penetration Test)

L'essai consiste à déterminer la résistance à la pénétration dynamique d'un carottier normalisé battu au fond d'un forage préalable.

L'essai est exécuté en deux phases, à chaque trois mètre de profondeur, à savoir :

- ✓ Enfoncement d'amorçage ; on note le nombre de coups de mouton pour enfoncer le carottier de 15cm.
- ✓ Enfoncement d'essai ; on note le nombre « N » de coups de mouton pour enfoncer le carottier de 30cm supplémentaires, le nombre « N », caractérise la résistance à la pénétration.

Les valeurs « N » de l'essai SPT, ont fait objet d'une correction ; correction de la nappe selon la formule suivante, donnée par Terzaghi et Peck :

$$N' = 15 + [(N - 15) / 2], \text{ pour } N > 15$$

Huit essais SPT ont été réalisés dans 7 sondages carottés sur un linéaire Est-ouest balayant toute la zone d'étude.

Selon les résultats obtenus (tableau n°8), notre sol est de compacité moyenne dans l'ensemble (N' varie entre 9 et 30) avec des sables de forte à très forte compacité (N' varie entre 36 et 76) à l'extrême Est de la zone d'étude selon Terzaghi et Peck.

Tableau n°8 : Résultats des essais SPT.

SONDAGE N°	PROFONDEUR (m)	NBRE DE COUPS N	NBRE DE COUPS CORRIGE N'	INTERPRETATION
Sc01	3	13	11	Moyennement compact
	6	26	20	Moyennement compact
	9	43	29	Moyennement compact
Sc02	3	10	10	Moyennement compact
	6	24	19	Moyennement compact
	9	33	31	Moyennement compact
Sc03	3	12	11	Moyennement compact
	6	23	19	Moyennement compact
	9	39	27	Moyennement compact
	12	50	32	Moyennement compact
Sc04	3	22	18	Moyennement compact
	6	9	9	Moyennement compact
	9	20	17	Moyennement compact
	12	33	16	Moyennement compact
Sc05	3	20	17	Moyennement compact
	6	12	12	Moyennement compact
	9	31	23	Moyennement compact
Sc06	3	26	20	Moyennement compact
	6	15	15	Moyennement compact
	9	19	17	Moyennement compact
Sc07	1.5	75	76	Très compact
	3	36	36	Compact

IV.1.1.2.2. Essais de pénétration dynamique

La pénétration dynamique consiste à enfoncer dans le sol, par battage, un train de tige muni à son extrémité d'une pointe débordante. Le nombre de coups correspondant à un enfoncement donné est noté au fur et à mesure de la pénétration de la pointe dans le sol. Les résultats sont repris sous forme de graphes dits «pénétrogrammes».

130 essais au pénétromètre dynamique ont été réalisés jusqu'à 12m de profondeur, distant de 150m parfois même de 15m chacun, afin de nous permettre de :

- ✓ Avoir un point de vue général sur la résistance du sol en fonction de la profondeur.
- ✓ Détecter d'éventuels horizons faibles.
- ✓ Déterminer le niveau susceptible à l'ancrage des fondations.

Avec un tel nombre d'essais, la réalisation des cartes de résistances à la pénétration (R_p) est recommandée dans le but de suivre de la meilleure façon l'évolution verticale et horizontale de R_p du sol. Ces cartes ont été réalisées jusqu'à 8m de profondeur avec un intervalle de 2m chacune à l'aide du logiciel *Surfer 8.0*.

IV.1.1.2.2.1. Interprétation des cartes pénétrométriques

a- Interprétation de chaque horizon

La carte d'isovaleurs de R_p à 2m de profondeur (figure n°25) montre des valeurs de résistance à la pénétration allant de 20 à 380 bars, dont les valeurs les plus élevées se manifestent dans la partie centrale de la zone d'étude ; ces fortes valeurs correspondent à l'unité sableuse essentiellement des sables jaunes à différents états de consolidation. Tandis que les faibles valeurs se manifestent principalement à l'extrême ouest, dues à la présence de terre végétale ainsi qu'à l'extrême Est, dues à la présence des sables argileux.

La carte de distribution des résistances à la pénétration à 4m de profondeur (figure n°26) montre des valeurs de R_p comprises entre 30 et 270 bars. Dont les fortes valeurs se manifestent dans la partie centrale correspondant à la formation sableuse ($80 < R_p < 270$ bars). Cependant, dans le reste de la zone d'étude $R_p < 80$ bars, là où les argiles et les marnes commencent à apparaître.

La carte pénétrométriques à 6m de profondeur (figure n°27) montre des valeurs élevées R_p dont $80 < R_p > 180$ bars dans la partie Est de la zone d'étude qui coïncident avec la continuité de la formation sableuse. Par ailleurs, dans le reste du site les valeurs sont inférieures à 80 bars là où les argiles se manifestent largement.

Dans la carte des résistances à la pénétration à 8m (figure n°28), on note des valeurs de R_p qui ne dépassent pas les 140 bars dans la partie Est du site d'étude, ainsi qu'à la partie ouest avec des valeurs plus faibles qui correspondent à la formation argileuse, et atteignant les 190 bars dans la partie centrale, où on a pu constater des refus, dus à la réapparition des sables beaucoup plus consolidés.

b- Interprétation en profondeur

À 2m de profondeur, on observe des valeurs de R_p qui varient entre 20 et 380 bars, tandis qu'elle ne dépasse pas les 270 bars dans les 4m et diminue progressivement en allant vers les 6m de profondeur et avec un maximum de 190 bars, et après on a enregistré une faible évolution vers les 8m où les valeurs de R_p atteignent les 290 bars dans une petite portion au centre où on constate le refus pour quelques pénétromètres.

Cette évolution de la résistance en pointe est due à plusieurs causes :

- la formation sableuse (sable jaune) dans les premiers mètres de profondeur où elle présente une bonne compacité à la pénétration dynamique.
- l'apparition des argiles et des marnes au delà de 2 mètres de profondeur montrant une compacité moyenne.

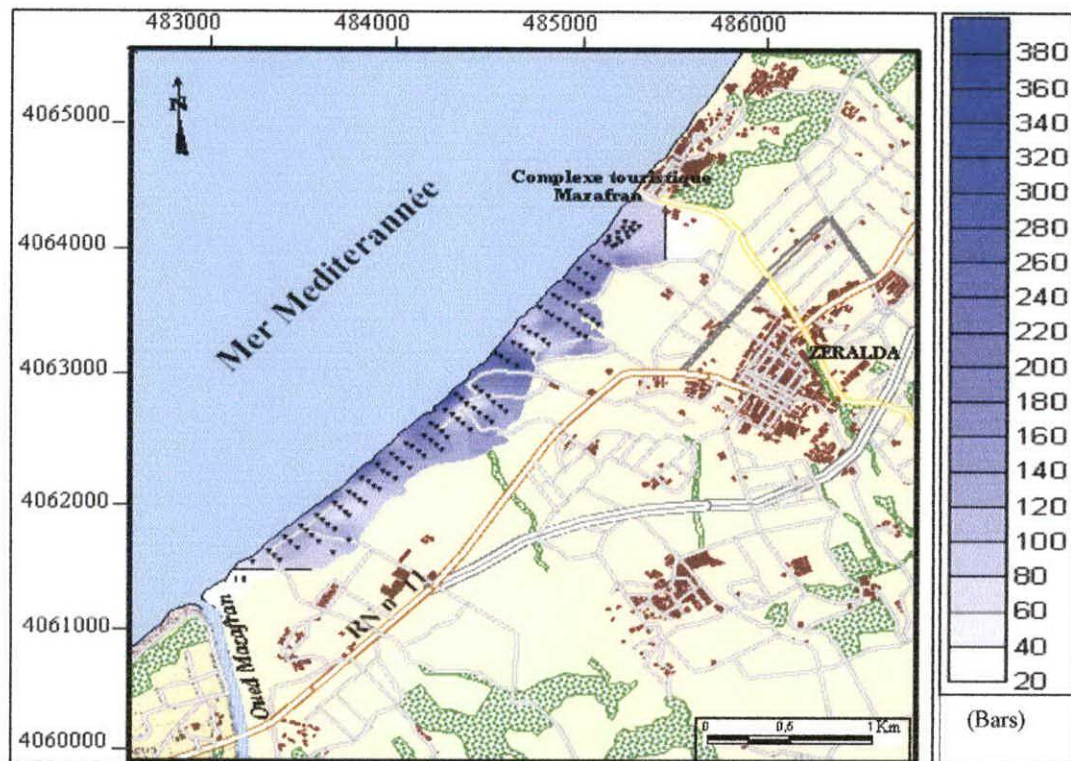


Figure n°25 : Carte des résistances à la pénétration dynamique à 2m de profondeur.

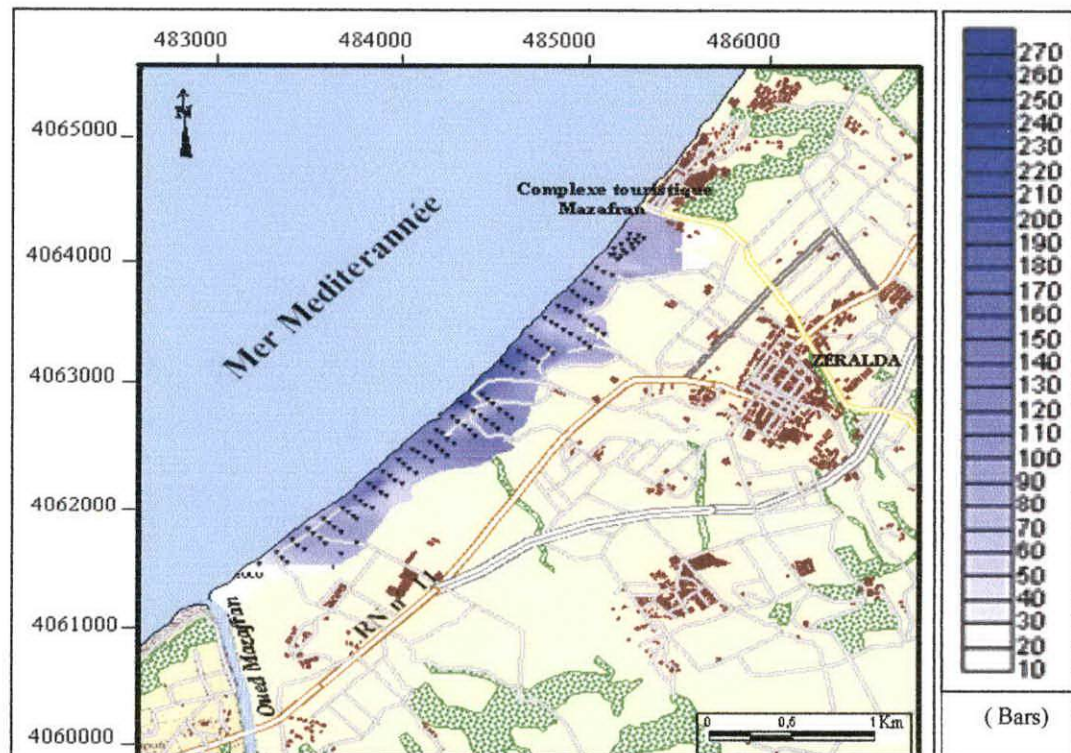


Figure n°26 : Carte des résistances à la pénétration dynamique à 4m de profondeur.

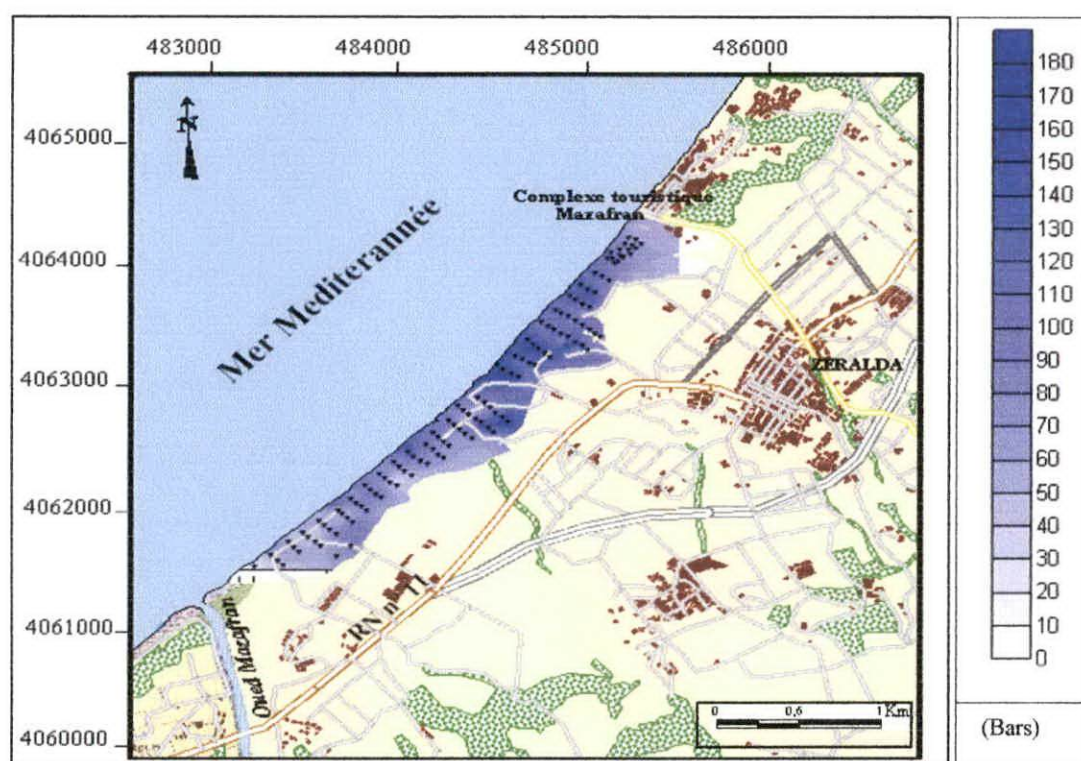


Figure n°27 : Carte des résistances à la pénétration dynamique à 6m de profondeur.

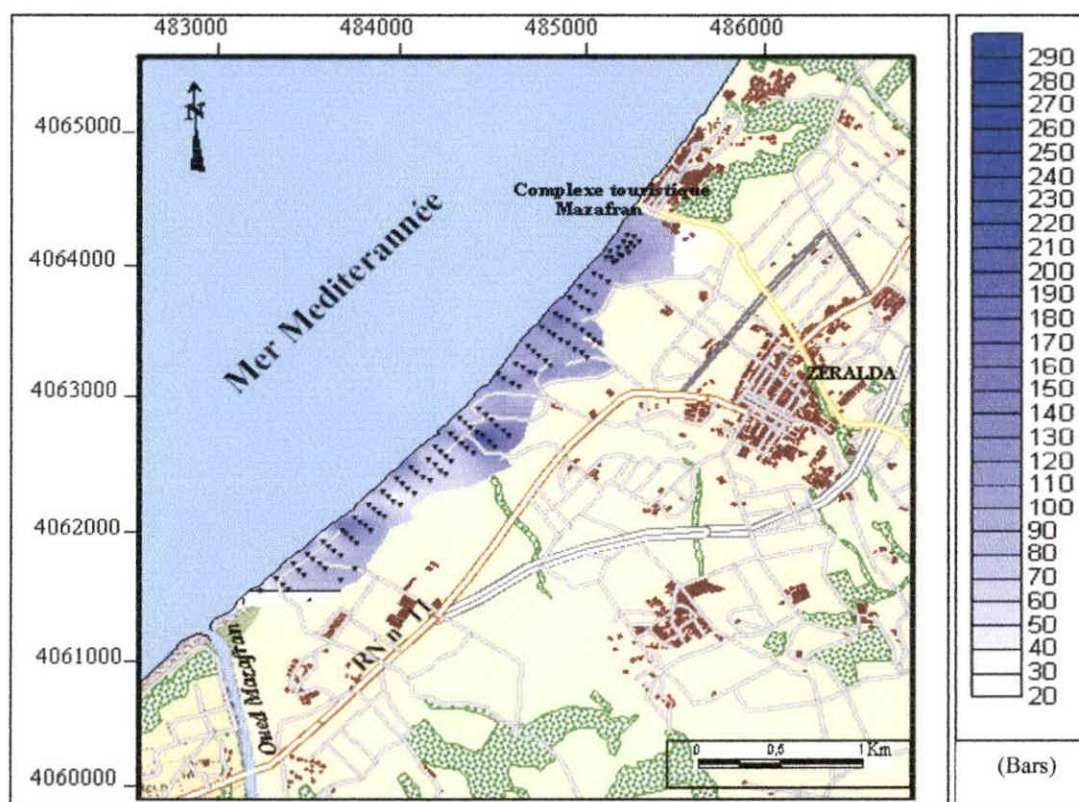


Figure n°28 : Carte des résistances à la pénétration dynamique à 8m de profondeur.

IV.1.2. Calcul des fondations

Ces calculs ont pour but d'arriver aux choix d'un mode de fondation adapté à la capacité portante du sol, et à l'importance de l'ouvrage à réaliser.

IV.1.2.1. Evaluation de la contrainte admissible du sol

La contrainte admissible a été calculée à partir des essais de laboratoire, des essais de pénétration dynamique ainsi qu'à travers des essais SPT.

✓ A partir des essais de laboratoire

Pour une bonne estimation de la capacité portante de notre sol, ainsi que le refoulement du sol sous les fondations ne puisse se produire, nous allons effectués les calculs en considérant des caractéristiques mécaniques effectives $C'=2/3C$ et $\phi'=2/3\phi$ pour une fondation de type semelle filante, selon la formule de TERZAGHI, les résultats de calcul sont reportés dans le tableau n°9 :

$$Q_{adm} = \delta D + \frac{[0.5\delta B N_{\delta} + \delta D(N_q - 1) + C N_c]}{F}$$

Avec :

δ : Poids volumique du sol ;

D: Profondeur d'ancrage ;

B: largeur de la semelle (semelle filante avec B=1.5m);

C: Cohésion du sol ;

N_{δ} N_q N_c : Facteurs de portance ;

F: Coefficient de sécurité.

Tableau n°9 : Résultats des contraintes admissibles calculées à partir des essais de laboratoire.

Ancrage D (m)	1.5	4.5
Contrainte admissible Q_{adm} (bars)	0.76	0.9

Ces résultats indiquent un sol de faible portance

✓ A partir des essais de pénétration dynamique

Pour les essais pénétrométriques, la contrainte admissible du sol à une profondeur donnée est calculée à partir de la résistance minimale enregistrée par la formule empirique des HOLLANDAIS, les résultats de calcul sont reportés dans le tableau n°10 :

$$Q_{adm} = R_p \min / \alpha$$

Avec :

Q_{adm} : la contrainte admissible du sol ;

$R_p \min$: résistance dynamique en pointe minimale ;

α : Coefficient réducteur en fonction de la nature du sol et l'appareillage utilisé.

Tableau n°10 : Résultats des contraintes admissibles calculées à partir des essais pénétrométriques.

Ancrage D (m)	1.5	4.5
Contrainte admissible Q_{adm} (bars)	0.9	1.5

Ces résultats indiquent un sol de faible à moyenne portance.

✓ **A partir des essais SPT (Standard Penetration Test)**

Le calcul de la contrainte admissible est établi sur la base de la formule de Meyerhoff, les résultats sont reportés dans le tableau n°11 :

$$Q_{adm} = NB(1 + D/B) * 1/30$$

Avec :

N : nombre de coups corrigés ;

D : ancrage du terrain naturel ;

B : largeur de la semelle (semelle filante avec $B=1.5m$).

Tableau n°11 : Résultats des contraintes admissibles calculées à partir des essais SPT

Ancrage D (m)	1.5	4.5
Contrainte admissible Q_{adm} (bars)	1.0	2.0

Ces résultats indiquent un sol de moyenne à bonne portance.

IV.1.2.2. Evaluation des tassements

D'après les résultats des essais oedométriques effectués sur des échantillons argileux, on note un tassement moyen de 3cm pour un ancrage de 1.5m et un tassement de 4.2cm pour un ancrage de 4.5m (cas d'une semelle filante), indiquant des valeurs admissibles dans l'ensemble.

IV.2. Analyse de la stabilité générale du sol

Introduction

D'après l'étude géologique et géotechnique décrite précédemment ainsi que nos observations de terrain, plusieurs problèmes d'instabilité se manifestent sous l'effet conjugué de la nature et de l'homme comme agent aggravant.

IV.2.1. Inondabilité du site

Le terrain d'étude extrêmement long est traversé par l'embouchure de deux oueds et est limitée à l'ouest par celui du Mazafran ; entre lesquels se trouvent de grandes zones inondées.

L'aptitude du terrain à l'inondation est favorisée par l'effet conjoint du climat, de la nature du sol et la topographie de la zone.

✓ Causes climatiques

La pluviométrie reste un facteur déterminant du risque d'inondabilité, elle s'exprime par des averses courtes et violentes plus particulièrement en hiver.

✓ Causes liées à la nature du sol

La structure géologique reconnue par les sondages carottés, montre la prédominance des terrains peu à non perméables de nature argileuse (photo n° 7).

✓ Causes liées à la topographie

Notre zone d'étude est caractérisé par une topographie plane dont la pente ne dépasse pas 0.1% (photo n° 8).

Le phénomène se manifeste par :

-Une zone de vases marécageuses (photo n° 9) et de décantation des eaux usées, d'où sort une conduite qui se jette directement en mer ce qui aggrave beaucoup plus le problème et conduit à une pollution, mais les autorités locales de la commune de Zéralda ont procédé à la construction d'une station de lagunage naturel afin de réduire le taux de pollution engendrée par ces eaux avant de se jettent en mer (photo n°10).

-Une grande zone d'eaux usées stagnantes qui bordent la limite Sud-Ouest de la ZET (photo n°11).

IV.2.2. Vulnérabilité du sol à la liquéfaction

On définit la liquéfaction comme étant un processus de transformation d'une substance, de l'état solide à l'état liquide. Le terme de liquéfaction traduit ici, une similitude d'un comportement fluide d'un sable soumis à une augmentation brusque de la pression interstitielle de l'eau qu'il renferme. Cette augmentation est le résultat, soit d'un chargement statique monotone, soit d'un chargement cyclique comme celui produit par un séisme. Elle a pour conséquent une diminution des contraintes effectives régnaient dans le sol, et donc une diminution de sa résistance au cisaillement (Boumessaoud H, 2006)

D'après les propriétés géotechniques de notre sol estimées par les essais de laboratoire d'une part et les essais in-situ d'autre part, et vu le caractère sismique et inondable de la zone, les sables formant notre terrain d'étude présentent une grande aptitude à la liquéfaction, ce qui constitue un danger majeur pour le futur projet de la ZET si les fondations venaient à être posées sur ce sol.

IV.2.3. Le recul de trait de côte

La région de Zéralda connaît un recul de trait de côte généralisé remarquable avec une vitesse moyenne de l'ordre 0.80m/an durant l'intervalle 1972-1999 (Guessab et Amari, 2005), ce qui implique la nécessité de prendre en compte ce phénomène dans l'aménagement de la future ZET.



Photo n°7 : Sol de fondation de nature peu perméable, inondé (hôtel en construction).

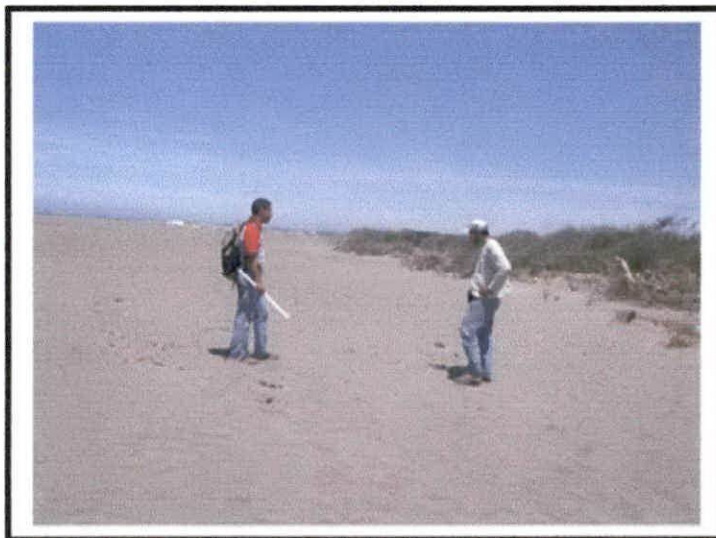


Photo n°8 : La topographie plane
De terrain d'étude



Photo n° 9 : Le caractère marécageux de la zone d'étude



Photo n°10: *Système de lagunage naturel.*

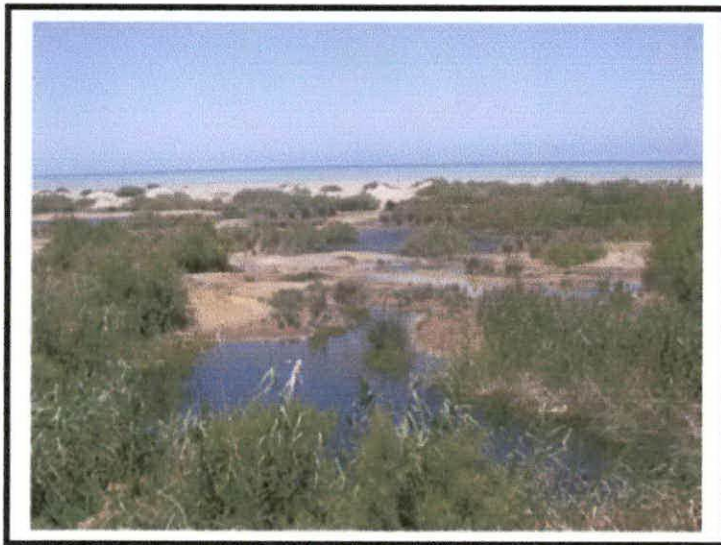


Photo n°11: *Eaux usées stagnantes*

Conclusion

Les résultats de l'investigation géotechnique réalisée in-situ et au laboratoire dans le cadre de l'étude de sol pour la réalisation de la ZET (zéralda Ouest), nous ont permis de conclure que les 09 sondages carottés réalisés sur 12m de profondeur, ont mis en évidence la présence d'un sol hétérogène constitué par trois unités lithologiques :

- Unité de sable ;
- Unité d'argile ;
- Unité de marne.

Ces formations indiquent dans l'ensemble des propriétés géotechniques moyennes à bonnes.

D'après les résultats de la capacité portante de notre sol, estimés à partir des essais in-situ et de laboratoire (0.7 à 2bars), le mode de fondation superficielle est inadapté, alors des fondations de type radier semi profond ou pieux profonds sont plus appropriées. De plus, les sables de plage sont sujets à des problèmes de liquéfaction.

Le terrain d'étude est marqué par problèmes d'inondabilité sous l'effet conjugué de la nature et des facteurs anthropiques. Ce qui nécessite une prise en compte réelle de cet aléa, afin de minimiser les risques.

Conclusions générales

Conclusions générales

Au terme de ce travail, nous pouvons dresser un bilan des points importants que l'on peut résumer comme suit :

Du point de vue géologique, La nature lithologique de l'ensemble du site, est hétérogène latéralement et en profondeur. Le sous sol du site est constitué de plusieurs formations, d'épaisseur et d'étendue différente :

- ✓ **Remblai** : couverture superficielle de l'ensemble des formations, avec une épaisseur variable (2 à 3m environ).
- ✓ **Sables fins, moyens à grossiers** : de couleur jaunâtre, allant jusqu'à 3m d'épaisseur.
- ✓ **Grés** : avec des grains fins à moyens, de patine beige sous différents états de consolidation.
- ✓ **Argiles** : de couleur rougeâtre, elle a été recoupé par l'ensemble des sondages carottés.
- ✓ **Lignites** : cette formation se manifeste par un passage lenticulaire, traversant les couches de sables et d'argiles.
- ✓ **Marnes** : ces marnes de couleur grisâtre commencent à apparaître à partir de 7m de profondeur.

Du point de vue hydrogéologique, la nature lithologique du sol, ainsi que la situation du site (mer au nord, oueds au centre et à l'ouest), rend le site propice à une présence d'eau permanente, à savoir par l'infiltration d'eau (pluie, mer) à travers les sols perméables (sable, sable de plage, sable argileux), ou par la remonté de la nappe (saturation des lits des oueds). Le niveau d'eau étant superficiel, fluctuant d'un sondage à un autre (0m à 1.5m de profondeur).

Du point de vue sismique, Le site d'étude se trouve au Sahel ouest d'Alger, de sismicité très élevée (zone III), résultat d'une activité tectonique récente, localisée principalement dans la région de Mahelma, Zeralda et Ben Chaabane.

Du point de vue géotechnique, trois unités ont pu être analysées, à savoir :

- I. Unité de sable.
- II. Unité d'argile.
- III. Unité de marne.

L'analyse des paramètres physico-mécaniques, obtenus à partir des essais de laboratoire et in-situ, révèle des caractéristiques géotechniques moyennes à bonnes dans l'ensemble.

La capacité portante du sol obtenue à partir des essais de laboratoire montre une compacité faible, tandis que celle obtenue à partir des essais in-situ (pénétromètre dynamique, SPT), montre une compacité moyenne à bonne.

Les résultats des tassements obtenus à partir des essais oedométriques effectués sur des échantillons intacts de nature argileuse indiquent des tassements admissibles.

Vu la valeur de la capacité portante de notre sol estimée (1 à 2 bars au maximum), nous recommandons des fondations de type radier semi profond ou des pieux profonds (4.5m d'ancrage et plus).

Vu le caractère inondable de la zone d'étude due à la topographie plane du site, au niveau superficielle de la nappe (1.5m) ainsi qu'aux nombreux rejets sauvages d'eaux usées, nous recommandons un système de drainage périphérique et un système de cuvelage adéquat au site et aux différentes composantes de la ZET

Vu l'importance de l'activité sismique dans la région, il est indispensable de respecter les règles parasismiques algériennes (RPA 2004, CGS).

D'après le plan d'aménagement de la ZET «ZERALDA OUEST » fourni par l'ANDT, nous avons constaté que l'ensemble de ses composantes se situe dans le domaine de servitudes de non aedificandi (la bande de 300m) ce que interdit la loi littorale, conformément à l'article 18 de la loi n°02-02 du 05-02-2002.

L'emplacement de la ZET sur le domaine strictement côtier, sur l'avant dune (micros dunes) voir sur le haut de plage va perturber l'équilibre sédimentaire de cette dernière car les diverses parties qui la composent sont solidaires avec un rôle essentiel de l'avant dune comme réserve de sable, ce qui peut conduire à terme à la disparition de la plage, si rien n'est fait.

De plus, la fréquentation touristique que va engendrer ce projet ainsi que la construction de marinas va exposer la plage et la vie écologique marine à risque de pollution accrue, déjà avancé du fait du rejet sauvage d'eau usées.

Dans le but de préserver le milieu naturel et de développer une activité touristique intégrée, on propose certaines mesures d'aménagement qui s'inscrivent dans une démarche de développement durable par l'évaluation globale et l'identification des solutions aux problèmes de l'environnement en donnant la priorité à la protection et la mise en valeur du milieu côtier naturel:

- Essayer de refaire un plan d'aménagement conforme à l'article n°18 de la loi littorale afin de laisser à la plage son caractère solidaire (plage active).
- L'implantation d'un système adéquat et dense de collecte et de traitement des eaux usées avant leurs rejets en mer (stations d'épuration).
- Sensibilisation du public afin d'acquiescer une participation active des gens à la préservation de l'environnement.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

ANRH. (1995). Notice de la carte hydrogéologique de la région d'Alger.

ANRH. (2006). Carte des ensembles géomorphologique de la région d'Alger.

Aymé A. (1952). Le quaternaire littoral des environs d'Alger. Act. Congr. Panat. De préhistoire, Session II, Alger.

Ben boudiaf Y, Hadjarab R. (2006). Caractérisation géotechnique d'une portion littorale d'El Djamila; conséquences sur l'aménagement, mémoire d'ingénieur ISMAL.

Bonneton J. (1977). Géologie de la zone de contact entre Mitidja et Atlas de Blida au sud d'Alger, thèse de doctorat 3^{ème} cycle. Univ Pierre et Marie Curie, Paris.

Boughendoura A., Sahoui R. (2006). Etude structurale du sahel compris entre Bousmail et Souidania ; cartographie géologique et analyse sismotectonique, mémoire d'ingénieur, IST/USTHB.

Boumessaoud H ; 2006 – Etude géologique et géotechnique d'un projet de 1000 logements à Zéralda, mémoire d'ingénieur IST/USTHB.

CGS. (1998). Rapport de microzonage sismique de la région d'Alger.

CGS. (2004). Règles parasismiques algériennes.

CRAAG. (2003). Annuaire des principaux séismes survenus dans la région d'Alger durant la période 1365-2003.

Dalloni M. (1939). Géologie appliquée de l'Algérie ; métallogénèse – hydrogéologie- agro-géologie, Edition Masson, 888pages.

Glangeaud et al., (1952). Histoire géologique de la province d'Alger. Pub XIX^{ème} GGI. Alger 1952, Monographie. Région, 1^{ère} série. Algérie n°25.

Glangeaud L. (1932). Etude géologique de la région littorale de la province d'Alger. Bull. série. Carte géologique. Algérie, Alger 1932. 2^{ème} série n°8, 608p.

Guessab, Amari. (2005). Travaux de protection du complexe touristique de Zéralda, mémoire d'ingénieur ISMAL.

LEM. (2003). Etude de protection de la plage de Zéralda ; avant projet sommaire, mission 1, collecte des données de base et réfraction de la houle.

Leprevier C., Magné J. (1975). Le néogène a post-nappes du tell septentrional de l'ouest d'Alger (Algérie). Bull. France XVII, n°4 ; p 612-613.

LNHC. (2004). Rapport d'étude du sol d'un hôtel « DJNANE EL TEKKAF » à Zéralda.

LNHC. (2006). Rapport d'étude du sol d'un village touristique à Zéralda.

Maouche S. (2002). Etude sismotectonique de l'algérois et des zones limitrophes de Cherchell – gouraya, thèse de magister IST/USTHB.

Ouazar L. (2004). Contribution à l'analyse systémique d'un littoral sableux : le cas de la plage de Mazafran (Ouest Alger), mémoire d'ingénieur ISMAL.

Saadallah A. (1981). Le massif cristallophyllien d'Alger ; évolution d'un charriage à vergence Nord dans les internides des Maghrébides, thèse de doctorat 3^{ème} USTHB.

Saoudi N. (1989). Pliocène et pléistocène inférieur et moyen du sahel occidental d'Alger, Thèse de doctorat de 2^{ème} cycle, université d'Aix Marseille II, faculté des sciences et techniques de luminy. Vol I. III. 202 pages.

ANNEXE

Tableaux de classification des sols suivant les paramètres géotechniques.

Essais d'identification physique

Tableau relatif à la densité sèche :

Densité sèche (δ_d)	Appréciation
$\delta_d < 1,60/1,50$	Faible
$1,50/1,60 < \delta_d < 1,80/1,75$	Moyenne
$\delta_d > 1,80/1,75$	Dense

Tableau relatif au degré de saturation du sol (d'après Terzaghi) :

Degré de saturation ($S_r\%$)	Appréciation
$= 100 \%$	Saturé
$76 < S_r < 99\%$	Détrempé
$51 < S_r < 75\%$	Mouillé
$26 < S_r < 50\%$	Humide
$01 < S_r < 25\%$	Légèrement humide
$S_r = 0 \%$	

Tableau relatif à la plasticité (d'après Atterberg) :

Indice de plasticité (I_p)	Appréciation
$I_p = 0$	Plasticité nulle
$I_p < 07 \%$	Peu Plastique
$07 < I_p < 17 \%$	Moyennement plastique
$I_p > 17 \%$	Hautement plastique

Classification du taux de gonflement suivant la limite de liquidité (W_L)
(D'après Snetchen et al., 1977) :

Limite de liquidité W_L (%)	Potentiel de gonflement
0-20	Non gonflant
20-35	Faible
35-50	Moyen
50-70	Elevée
70-90	Très élevée
>90	Extrêmement élevée

Tableau de consistance (d'après Atterberg) :

Indice de consistance (Ic)	Etat de sol
$I_c > 0,00$	Pâteux
$0,25 < I_c < 0,50$	Mou
$0,50 < I_c < 0,75$	Ferme
$0,75 < I_c < 1,00$	Mi- dur
$I_c > 1,00$	Consistant

Tableau relatif au pourcentage des passants à 80 µm (d'après LCPC) :

Pourcentage des passants à 80 µm	Classification
$> 50 \%$	Sol fin
$< 50 \%$	Sol pulvérulent

Essais mécaniques

Tableau relatif à la compressibilité du sol (d'après Terzaghi):

Indice de compressibilité (C_c)	Appréciation
$C_c < 0,02$	Sol incompressible
$0,02 < C_c < 0,05$	Sol très peu compressible
$0,05 < C_c < 0,10$	Sol peu compressible
$0,10 < C_c < 0,20$	Sol de compressibilité moyenne
$0,20 < C_c < 0,30$	Sol assez compressible
$0,30 < C_c < 0,50$	Sol très compressible
$C_c > 0.50$	Sol extrêmement compressible

Tableau au gonflement du sol (d'après Sanglerat) :

Coefficient de gonflement (C_g)	Appréciation
$0,04 < C_g < 0,25$	Sol gonflant
$0,04 < C_g < 0,02$	Sol peu gonflant

Tableau relatif à l'état de consolidation des sols (d'après G. Filliat) :

Type de sol			
Etat de sol	Argile	Limon	Sable
Sur consolidé	$E/P_l > 15$	$E/P_l > 14$	$E/P_l > 12$
Normalement consolidé	$8 < E/P_l < 15$	$8 < E/P_l < 14$	$7 < E/P_l < 12$
Sous consolidé	$5 < E/P_l < 8$	$5 < E/P_l < 8$	$4 < E/P_l < 7$