

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de JIJEL  
Faculté des Sciences  
Département de Géologie



Geoz 107

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du **diplôme** :  
D'ingénieur d'état en géologie  
Option : Géologie de l'ingénieur

*Thème*

*L'effet de l'ajout de sable dunaire de  
oued Zhour sur le potentiel de  
gonflement des argiles de Harraten*

Jury :

Mr. BOUFATOUHA. Y  
Mr. ZENIR. A. M  
M<sup>me</sup>. ZEROUAL. F. Z

Président  
Examineur  
Encadreur

Présenté par :

KROUMA REDOUANE  
CHENINBA NOURA

Présenté par : 2007

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Remerciements

*Nos plus grands remerciements vont avant tout à dieu le tout puissant et miséricordieux qui nous a toujours guidé vers le bon chemin.*

*Nos promoteurs : M<sup>me</sup> Zaroual.F. qui ont bien voulu diriger notre travail.*

*Nous tenons à remercier aussi tous les enseignants du département chimie-électronique à leur tête monsieur Abbassi et monsieur Athamnia qui nous a consacré un temps précieux pour l'interprétation des résultats de l'essai de diffraction en rayon x*

*Les personnels du labo de L'ENAVA, L'ANRH, L'ANHC.  
Les personnels du labo de génie civil  
Les personnels du labo de génie géologie.*

*Nous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire,*

*Nos vifs remerciements :  
-A tous mes enseignants  
-A tous mes collègues de la promotion 2006-2007*

# Dédicaces,

*Je dédie ce travail*

*A ma mère la plus chère à mes yeux, pour avoir fait de  
moi ce que je suis.*

*A mon père pour son soutien durant mes années d'études.*

*A mes frères qui n'ont pas cessé de  
m'encourager.*

*A mes sœurs : Saida et Bouchera*

*A toute ma famille*

*A mon binôme et sa famille*

*A*

*tous mes amis de 5<sup>ème</sup> année et toutes les promotions de géologie*

*A Tout mes amis particulièrement Fouaz*

*Aux gens que j'aime..... ;*

*Redouane*



# Dédicace

*J'É dédié ce modeste travail à:*

*Ma mère et mon père :*

*Yamina et Mouloud.*

*En témoignage de ma reconnaissance et ma profond affection et  
qui ont dû tracer ma voie et m'en guidé vers le bon chemin.*

*Mes sœurs :*

*Salih, Siham et son mari et sa petite fille Souha*

*Mes frères :*

*Mohammed, Nouar, Abdel Baki.*

*A toutes mes amies et mes collègue de la promotion 2006-  
2007.*



**NOURA**

# resumé

Ce travail traite l'une des méthodes de stabilisation des sols à problèmes (sols gonflants), à savoir l'argile de Harraten de la wilaya de Jijel, par l'ajout de sable dunaire de Oued Zhour de la même wilaya. Sa stabilisation veut dire l'amélioration de ses performances techniques. En premier lieu on a montré le caractère expansif du sol argileux tout en mettant le point sur les facteurs climatologiques qui le favorisent par l'estimation et la mesure du gonflement par des méthodes directes et indirectes, la seconde étape porte sur l'étude du mélange Argile- sable c'est-à-dire la détermination des nouveaux paramètres de gonflement en ajoutant différents pourcentages de sable. Ce qui a conduit effectivement à une nette diminution du potentiel de gonflement proportionnelle à la quantité de sable additionné

Mots clés = sable de dune de oued Zhour, sol expansifs, potentiel de gonflement, stabilisation, argile Harraten.

# ABSTRACT

This work treats one of the methods of stabilization of the grounds with problems (inflating grounds), namely clay of Harraten of the wilaya of Jijel, by the dune sand addition of Zhour Wadi of very the wilaya. Its stabilization wants to say the improvement of its technical performances. Initially one showed the expansive character of the clay soil while putting the point on the climatological factors which support it by the estimate and the measurement of swelling by direct and indirect methods, the second stage relates to the mix design Argile-sands i.e. the determination of the new parameters of swelling by adding various percentages of sand. What led indeed to a clear reduction in the potential of swelling proportional to the quantity of added sand

Key words = sand of dune of Zhour wadi, soil high-expansion, potential of swelling, stabilization, Harraten clay.

# NOTATIONS ET DEFINITIONS

Nous donnons ci-dessous les principales notations utilisées dans ce mémoire.

A	.....	Activité.
Cu	.....	Coefficient d'uniformité
C <sub>c</sub>	.....	Coefficient de courbure
C <sub>C</sub>	.....	Indice de compression
Cg	.....	Coefficient de gonflement
Cs	.....	Indice de gonflement
Di	.....	Densité.
Dh	.....	Densité humide.
Dd	.....	Densité sèche.
D	.....	Diamètre des particules
D <sub>60</sub>	.....	Diamètre des grains passants de 60%
D <sub>10</sub>	.....	Diamètre des grains passants de 10%
D <sub>30</sub>	.....	Diamètre des grains passants de 30%
e	.....	Indice des vides.
e <sub>o</sub>	.....	Indice des vides initiales.
e <sub>f</sub>	.....	Indice des vides final.
ES	.....	Equivalent de sable
ES <sub>P</sub>	.....	Equivalent de sable de piston
ES <sub>V</sub>	.....	Equivalent de sable visuel
F	.....	Poids sec des fines
G	.....	Densité relatif du sol.
h <sub>1</sub>	.....	Hauteur du niveau supérieur de flocculant
h <sub>2</sub>	.....	Hauteur de la partie sédimentée en utilisant du piston
h <sub>2</sub>	.....	Hauteur de la partie sédimentée sans utilisé le piston par apport à la base.
hp	.....	Hauteur de l'éprouvette
H <sub>i</sub>	.....	Hauteur initial
H <sub>f</sub>	.....	Hauteur final après stabilisation
Ip	.....	Indice de plasticité.
Ic	.....	Indice de consistance.
IL	.....	Indice de liquidité.
n	.....	Porosité.
N	.....	Nombre de chocs à la teneur en eau.
S <sub>r</sub>	.....	Degrés de saturation
S.S.T	.....	Surface spécifique total
V	.....	Volume final de solution de bleu.
v	.....	Vitesse de décantation
VBS	.....	Valeur de bleu de méthylène.
V <sub>V</sub>	.....	Volume des vides
V <sub>S</sub>	.....	Volume des grains solides
Vt	.....	Volume l'échantillon du sol
W	.....	Teneur en eau naturelle
WL	.....	Limite de liquidité
Wp	.....	Limite de plasticité

$W_s$ .....	Limite de retrait
$\sigma_C'$ .....	Contrainte de préconsolidation
$\sigma_{V0}'$ .....	Contrainte effective du sol
$\sigma_{SW}$ .....	Pression de gonflement
$\gamma_d$ .....	Poids volumique sec
$\gamma_h$ .....	Poids volumique humide
$\gamma_s$ .....	Poids volumique des grains
$\gamma_i$ .....	Poids volumique
$\gamma_W$ .....	Poids volumique de l'eau
$\gamma_s$ .....	Poids volumique des grains solide
$\gamma_{Sat}$ .....	Poids volumique saturé
$\gamma^-$ .....	Poids volumique déjaugé
$\varepsilon_{SW}$ .....	Gonflement libre

# SOMMAIRE

# Sommaire

## RESUME

## ABSTRACT

## NOTATION ET DEFINITION

## INTRODUCTION GENERALE.....1

## CHAPITRE I : PRESENTATION DU SUJET ET DEFINITIONS

I-1-INTRODUCTION.....	3
I-1-1- Définitions.....	3
I-2- PRESENTATION DU SUJET.....	3
I-2-1- Caractéristiques régionales du site Harraten.....	4
I-2-1-1- Situation géographique.....	4
I-2-1-2- Topographie de site.....	4
I-2-1-3- Le climat.....	5
I-2-1-4- Chevelu hydrographique.....	5
I-2-2- Caractéristiques régionales d'oued Zhouar.....	5
I-3-FACTEURS INTERVENANT DANS LE RETRAIT-GONFLEMENT.....	6
I-3-1-Facteurs de prédisposition.....	6
I-3-2-Facteurs de déclenchement .....	7
I-4-CONSEQUENCES DU GONFLEMENT.....	8
I-4-1-Cas des bâtiments.....	8
I-4-2-Cas des chaussées.....	9
I-5-TECHNIQUES DE CONSTRUCTION EN TERRAIN GONFLANT.....	10
I-5-1-Techniques simples de construction des fondations.....	10
I-5-2-Les techniques de stabilisation utilisées.....	11

## CHAPITRE II : ETUDE GEOLOGIQUE ET HYDROCLIMATOLOGIQUE

II-1- ETUDE GEOLOGIQUE.....	14
II-1-1- CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL.....	14
II-1-1-1- Introduction.....	14
II-1-1-1-1- Les zones internes.....	14
II-1-1-1-2- Les zones externes.....	15
II-1-1-2- Les grands traits géologiques de la petite Kabylie.....	15
II-1-1-2-1- Le socle Kabyle.....	15
II-1-1-2-2- La dorsale Kabyle.....	15
II-1-1-2-3- L'Oligo Miocène Kabyle et les Olistostromes.....	15
II-1-1-2-4- Les séries à caractères des Flyschs.....	16
II-1-1-2-5- Le flysch Numidien.....	16
II-1-1-2-6- Les séries telliennes.....	16
II-1-1-2-7- Le miocène post nappes.....	17
II-1-1-2-8- Les roches magmatiques.....	17
II-1-2- CADRE GEOLOGIQUE LOCAL.....	18
II-1-2-1- Les formations Quaternaires.....	18
II-1-2-2- Les formations Tertiaires.....	18
II-1-2-2-1- Le Néogène.....	18

II-1-2-2-2- Le numidien.....	18
II-1-2-2-3- Les flyschs maurétaniens.....	19
II-1-2-2-4- Les flyschs massyliens.....	19
II-1-2-3- L'Oligo-Miocène Kabyle et les Olistostromes.....	20
II-1-2-3-1- L'Oligo- Miocène Kabyle.....	20
II-1-2-3-2- Les Olistostromes.....	20
II-1-2-4- Les formations cristallophylliennes du socle Kabyle.....	21
II-1-2-4-1- L'ensemble peu métamorphique.....	21
II-1-2-4-2- L'ensemble métamorphique.....	21
II-1-3- LA LITHOLOGIE DES AFFLEUREMENTS AU NIVEAU DU SITE	
ETUDIE.....	21
II-2-ETUDE HYDRO-CLIMATOLOGIQUE.....	23
II-2-1-INTRODUCTION.....	23
II-2-2- CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES.....	23
II-2-2-1 - Les précipitations.....	23
II-2-2-2- Températures.....	25
II-2-2-3- Relation température – précipitation.....	26
II-2-2-4- Autres paramètres.....	27
II-3- CONCLUSION.....	29
<b>CHAPITRE III : EDENTIFICATION DES SOLS</b>	
III-1- INTRODUCTION.....	30
III-2- DETERMINATION DES PARAMETRES D'IDENTIFICATION DES SOLS AU	
LABORATOIRE .....	30
III-2-1/ PARAMETRES PHYSIQUES.....	30
III-2-1-1- Indice des vides ( $e$ ).....	30
III-2-1-2- La porosité ( $n$ ).....	30
III-2-1-3- Le degré de saturation ( $S_r$ ).....	31
III-2-1-4- La teneur en eau naturelle ( $W$ ) (Norme NF P 94-050).....	31
III-2-1-5- Le poids volumique sec ( $\gamma_d$ ).....	32
III-2-1-6- Le poids volumique humide ( $\gamma_h$ ).....	32
III-2-1-7- Le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ).....	32
III-2-1-8- Le poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ).....	32
III-2-1-9- Le Poids volumique des sols saturés ( $\gamma_{sat}$ ).....	33
III-2-1-10- Le Poids volumique déjaugé ( $\gamma'$ ).....	33
III-2-1-11- La densité ( $D_i$ ).....	33
III-2-2- ESSAIS PROPRES AUX SOLS GRENUS ET AUX SOLS FINS.....	34
III-2-2-1- L'Analyse Granulométrique.....	34
III-2-2-2- Equivalent de Sable (ES) (norme NF P18-598).....	36
III-2-2-3- Les Limites d'Atterberg.....	36
III-2-2-4- Essai au bleu de méthylène.....	40
III-2-3- CLASSIFICATION DES SOLS.....	40
III-2-4-ETUDE MINERALOGIQUE.....	44
III-2-4-1-L'étude par diffraction des rayons X.....	44
III-2-5- ESSAIS MECANIQUES.....	46
III-2-5-1- Essai de compressibilité à l'oedomètre.....	48
III-3- CONCLUSION.....	51

**CHAPITRE IV : QUANTIFICATION DES SOLS GONFLANTS**

IV-1-INTRODUCTION.....	52
IV-2-NATURE ET STRUCTURE DES ARGILES.....	52
IV-2-1-Minéralogie des argiles.....	52
IV-2-2-Structure moléculaire microscopique des argiles.....	53
IV-2-3-Le gonflement des argiles.....	55
IV-2-4-Evolution de la texture au cours du gonflement.....	56
IV-3-CARACTERISATION EN LABORATOIRE DU PHENOMENE DE GONFLEMENT.....	57
IV-3-1-Définition des paramètres de gonflement.....	57
IV-3-2-Méthodes indirectes de caractérisation.....	57
IV-3-3-Prévision du gonflement des sols argileux .....	65
IV-3-4-Les méthodes directes (essais de gonflement en laboratoire).....	66
IV-3-4-1- Essai de gonflement libre à l'oedomètre.....	66
IV-4-CONCLUSION.....	67

**CHAPITRE V : ETUDES EXPERIMENTALES**

V-1-INTRODUCTION.....	68
V-2-CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES.....	68
V-2-1-Le sable d'Oued Zhour.....	68
V-2-1-1-Essais d'identification.....	68
V-2-1-2-Analyse chimique.....	69
V-2-2-L'argile de Harraten.....	70
V-2-2-1-Analyse chimique.....	70
V-2-2-2-Analyse minéralogique.....	71
V-2-2-3- Propriétés physiques.....	71
V-2-2-4-Analyse sédimentométrique et activité.....	73
V-2-2-5-Essai au bleu de méthylène.....	74
V-2-2-6-Essais de compressibilité à l'oedomètre.....	75
V-3- ETUDE DE GONFLEMENT DU SOL DE HARRATEN.....	76
V-3-1- Estimation indirecte du potentiel de gonflement de l'argile de Harraten.....	76
V-3-2- Mesure directe des paramètres de gonflement (essai de gonflement libre sur l'argile de Harraten en laboratoire).....	78
V-4- STABILISATION DE L'ARGILE DE HARRATEN PAR AJOUT DU SABLE DUNAIRES DE OUED ZHOUR.....	79
V-4-1- L'effet de l'ajout du sable sur la compressibilité du sol.....	79
V-4-1- L'effet de l'ajout du sable sur le gonflement du sol.....	80
V-4-2- Synthèse des résultats.....	81

<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>82</b>
---------------------------------	-----------

**REFERANCE BIBLIOGRAPHIQUE****LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES****ANNEXES**

# INTRODUCTION GENERALE

Le caractère gonflant de certaines argiles est lié en premier lieu à leur structure minéralogique. D'autres facteurs, tels que la structure du sol, sa densité, sa teneur en eau initiale peuvent affecter de manière significative la pression de gonflement ou la déformation de ces argiles. Ces phénomènes sont plus marqués lorsqu'ils ont lieu dans des régions où d'importantes variations climatiques existent, en particulier de forts gradients d'évaporation et des déficits saisonniers d'humidité. Ces le cas dans les pays du Maghreb. Aussi, les massifs argileux de quelques régions de l'Algérie sont constitués quasi-totalement de sols gonflants. Plusieurs cas de désordres très préjudiciables, liés au gonflement, ont été signalés dans plusieurs régions : la raffinerie de pétrole de Ain-Amenas ; à l'hôpital de N'Gaous (Batna) ; sur la ligne de chemin de fer Ramdane Djamel (Jijel) ; l'hôpital de Sidi Chahmi et la briqueterie de Mers El Kébir (Oran) ; l'université de Laghouat ; et l'hôpital de Sidi-Aissa dans la wilaya de M'Sila.

La grande présence des sols gonflants dans le Nord algérien a engendré des dégradations sur les superstructures suite à la variation de la teneur en eau. Construire sur ce genre de formation consiste soit à concevoir un ouvrage dont l'infrastructure résiste aux mouvements du sol soit traiter ce sol pour que ce dernier soit moins sensible à la variation de la teneur en eau. Dans la pratique, de nombreux procédés de stabilisation sont disponibles mais la technique de stabilisation par les sables est récemment utilisée.

### ***Objectif du mémoire***

Le traitement des sols est souvent opéré pour augmenter leur résistance, pour réduire ou augmenter leur perméabilité ainsi que pour diminuer leur compressibilité. Il est, aussi utilisé pour minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau comme dans le cas des sols expansifs.

Les techniques de stabilisation les plus utilisées sont :

- La stabilisation mécanique.
- La stabilisation par ajout des matériaux.
- La stabilisation chimique.

Le choix de l'une de ces méthodes dépend de plusieurs paramètres tels que; les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement.

Ce travail concerne la technique de stabilisation par ajout de sable additionné à une argile gonflante de l'Est Algérien.

Ce travail présente l'influence du sable dunaire de oued Zhour sur le gonflement libre des argiles de Harraten dans la wilaya de Jijel. Afin de mettre en évidence l'influence de ce sable sur l'amplitude, l'étude a été effectuée sur des échantillons d'argiles naturelles et artificielles en utilisant trois pourcentages différents du sable additionné.

### ***Organisation du mémoire***

Le présent rapport comporte cinq chapitres principaux.

- Le premier chapitre présente une aperçue générale concernant les sites de provenance du sol à étudié et le sable stabilisant avec quelques définitions et quelques techniques utilisée pour la stabilisation de problème retrait-gonflement.
- Le deuxième chapitre a été réservé à l'étude géologique où nous avons traité les caractéristiques lithologiques et structurales des différentes unités rencontrées à l'échelle régionale et locale. Celle-ci est complétée par une analyse hydro climatologique de la région afin de trouver des relations qui peuvent être intervenir dans le retrait-gonflement.

- Le troisième chapitre montre d'une façon théorique les différents paramètres et les essais, physiques et mécaniques ainsi que chimiques et minéralogiques peuvent identifier les sols.
- Le quatrième chapitre présente une synthèse bibliographique consacrée à l'étude phénoménologique du gonflement, ainsi les différentes méthodes de quantification des sols expansifs (méthodes directes qui relient les paramètres géotechniques avec le gonflement et méthodes directes ou essai de gonflement libre en laboratoire).
- Le cinquième chapitre présente le travail d'analyse d'essais effectués pour identifier le sable de oued Zhour et recommandés pour l'identification et la caractérisation des sols gonflants de Harraten par la suite, on a procédé aux essais mécaniques: essai de compressibilité oedométrique et essai de gonflement. Le premier a pour but de déterminer les paramètres de compressibilité à partir desquels on peut caractériser les sols gonflants, le deuxième c'est un essai de gonflement dans le but d'évaluer la pression et l'amplitude de gonflement et d'obtenir à partir de corrélations proposées dans la littérature "modèles" des estimations approximatives de ces paramètres de gonflement de cette argile de Harraten (Jijel).

A la fin de ce chapitre, le problème de gonflement sera traité par des proportions de sable additionné aux argiles gonflantes de la région.

# CHAPITRE I

# PRESENTATION DU SUJET

ET

# DEFINITIONS

**I-1-INTRODUCTION :****I-1-1- Définitions :**

Les sols sont le résultat d'une altération naturelle physique ou chimique des roches. Ils sont des matériaux meubles poreux, hétérogène est souvent anisotropes. Les Matériaux, minéraux ou organiques, sont généralement à l'état de grains ou de particule dont les formes et les dimensions sont essentiellement variables, et par conséquent le géologue appelle un sol tous les matériaux qui se trouvent à la surface de l'écorce terrestre, le terme d'un bon sol est donné par le géotechnicien aux sols qui peuvent être reçoit les ouvrages de construction sans faire détruire ces derniers. Dans certain cas, les sols présentent un problème qui le faut traiter avant la construction, parmi ces problèmes rencontrés est le retrait-gonflement.

Comme les matériaux "gonflants" les plus fréquemment sont les argiles, le gonflement de ces sols est un phénomène qui se développe, en présence d'eau, à l'échelle microscopique au niveau des particules argileuses, et se traduit souvent, malheureusement, à l'échelle macroscopique par des dommages importants sur les ouvrages.

**I-2- PRESENTATION DU SUJET :**

Cette étude est consacrée à la stabilisation du sol expansif, provenant de Harraten, wilaya de Jijel qui située au Nord de l'Algérie, par l'ajout de sable des dunes de oued Zhour (Jijel). Stabiliser un sol gonflant, c'est modifier certaines de ses propriétés afin d'améliorer sa performance mécanique. En premier lieu, on doit montrer le caractère expansif de ce sol argileux, soit par des mesures directes des paramètres de gonflement, ou par l'estimation du Opotentiel de gonflement à l'aide des méthodes indirectes. Pour la seconde étape, elle est portée sur l'étude de l'effet de l'ajout du sable dunaire sur le potentiel de gonflement. L'ajout du sable des dunes change certaines propriétés du sol, qui conduit à une réduction du potentiel de gonflement proportionnel à la quantité de sable additionné.

Les sols utilisés dans notre étude sont, des argiles de Harraten et le sable dunaire de oued Zhour (Figure I-1).

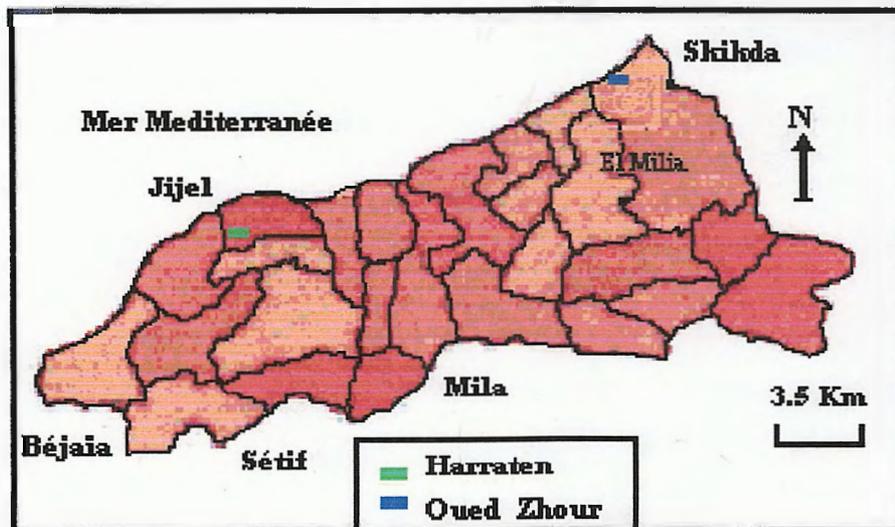


Figure I-1 : Localisation des zones (Argile de Harratene, sable dunaire de oued Zhour) dans la Wilaya de Jijel.

### I-2-1- Caractéristiques régionales du site Harraten :

#### I-2-1-1- Situation géographique :

Le sol étudié provenant de la région de « Harraten » située au Sud-Est de la Ville de Jijel. Ce secteur est limité par des terrains vagues au Nord, au Sud et à l'Ouest et par une zone militaire et la route menant vers Texenna à l'Est. (Figure I-2)

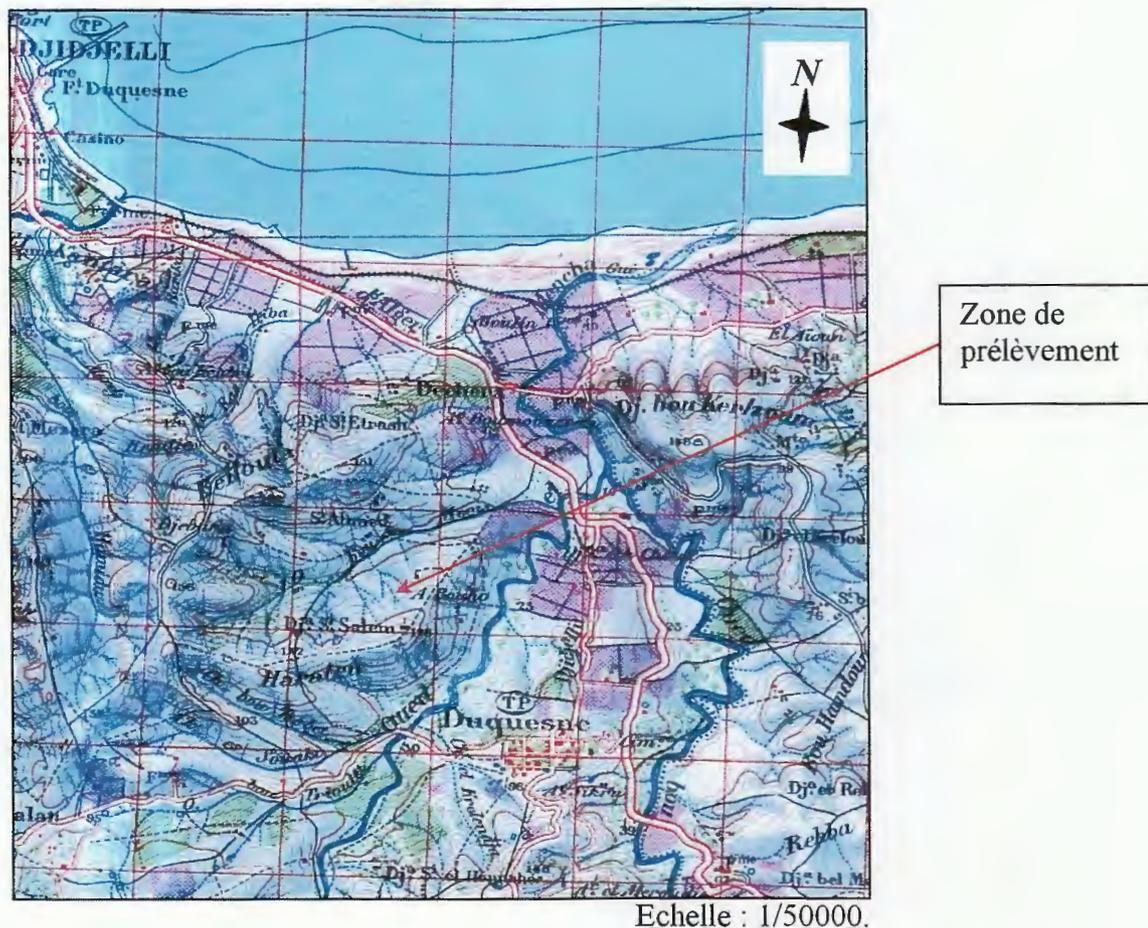


Figure I-2 : Situation géographique du site de Harratene  
Extrait de la carte de Djidjelli (dépôt de Constantine) Feuille N° 28, selon I.G.N (1959).

#### I-2-1-2- Topographie de site :

Le terrain présente un relief topographique faiblement accidenté, avec une pente d'orientation générale Ouest-Est.

L'établissement de la carte des pentes nous a permis de définir trois classes de pentes à savoir:

Classe I 0-10 %

Classe II 10-20 %

Classe III 20-30 %

Notons que la deuxième classe (10-20 %) est la plus dominante ; elle caractérise la partie centrale du terrain.

Nous signalons que le site est urbanisé à 20% en moyenne, il s'agit de constructions en RDC, R+1 et R+2 niveaux en général.

**I-2-1-3- Le climat :**

La région de Jijel, comme toutes les régions du littoral algérien, qui constituent une étroite ceinture parallèle à la mer, est soumise à un climat méditerranéen (tempéré), caractérisé par des hivers doux. La pluviométrie moyenne annuelle dépasse les 1000 mm/an. Les vents dominants soufflent généralement de la mer vers le continent (NNW-SSE).

**I-2-1-4- Chevelu hydrographique :**

Le réseau hydrographie de la Wilaya de Jijel est très dense, il est constitué essentiellement de plusieurs oueds principaux tel que oued Nil, oued Mencha, oued DjenDjen, oued el Kébir, oued Zhou et leurs affleurants (oued Bou-Radjah, El Agrem, Bou Bara, oued Bouhou, oued El Agir, et oued Tazoult).

**I-2-2- Caractéristiques régionales d'oued Zhou :**

La plage d'oued Zhou est située dans la daïra d'El Milia à l'extrémité orientale de la wilaya de Jijel (Figure I-1). Elles sont limitées au Nord par la mer méditerranéenne au Sud par douar Béni Bélaïd et douar Béni Férguén, à l'Est par oued Zhou et à l'ouest par oued El kébir (Figure I-3).

Cette plage possède des accumulations sableuses importantes qui s'allongent selon une direction NE-SW.

La plage d'oued Zhou présente une longueur d'environ 6,5 Km et une largeur qui varie entre 350 m et 1,5 Km.



Figure I-3 : Photo satellite (plage d'oued Zhou)  
Extrait de Google Earth 2007

### I-3-FACTEURS INTERVENANT DANS LE RETRAIT-GONFLEMENT :

L'aléa retrait-gonflement est la probabilité d'occurrence spatiale et temporelle des conditions nécessaires à la réalisation d'un tel phénomène. Parmi les facteurs intervenant dans la réalisation de ce phénomène, on distingue classiquement des facteurs de prédisposition et des facteurs de déclenchement.

#### I-3-1-Facteurs de prédisposition :

Ces facteurs sont ceux dont la présence induit le phénomène de retrait-gonflement, mais ne suffit pas à elle seule à le déclencher. Ces facteurs sont fixes ou évoluent très lentement avec le temps. On distingue [14]:

##### ➤ Nature du sol :

Concernant la nature des formations géologiques, les éléments qui influent sur la susceptibilité au retrait-gonflement sont en premier lieu la proportion de matériaux argileux, autrement dit d'éléments fins inférieurs à 2 mm qui contient une forte proportion de minéraux argileux dits « gonflants ».

##### ➤ Contexte hydrogéologique :

Parmi les facteurs de prédisposition, les conditions hydrogéologiques constituent des facteurs environnementaux régissant les conditions hydrauliques in situ. Or, la présence d'une nappe phréatique rend plus complexe le phénomène de retrait-gonflement. En effet, les conditions hydrauliques in situ (teneur en eau et degré de saturation) varient dans le temps, non seulement en fonction de l'évapotranspiration (dont l'action est prépondérante sur une tranche très superficielle de l'ordre de 1 à 2 m d'épaisseur), mais aussi en fonction des fluctuations de la nappe éventuelle (dont l'action devient prépondérante en profondeur). Ces variations hydriques des sols se traduisent, pour des formations argileuses sensibles, par des variations de leurs caractéristiques mécaniques.

##### ➤ Contexte géomorphologique :

La topographie de surface constitue un facteur permanent de prédisposition et d'environnement qui peut conditionner la répartition spatiale du phénomène de retrait-gonflement. La présence d'une pente favorise le ruissellement et donc le drainage, tandis qu'une morphologie plate sera d'avantage susceptible de recueillir des eaux stagnantes qui ralentiront la dessiccation du sol. Par ailleurs, un terrain en pente exposé au sud sera plus sensible à l'évaporation du fait de l'ensoleillement, qu'un terrain plat ou exposé différemment.

##### ➤ Végétation :

Il est désormais avéré que la présence de végétation arborée à proximité d'une maison peut constituer un facteur déclenchant du phénomène de retrait-gonflement, même s'il n'est souvent qu'un facteur aggravant de prédisposition. En effet, les racines soutirent par succion (mécanisme d'osmose) l'eau du sol. Cette succion crée un gradient de la teneur en eau du sol qui peut se traduire par une dépression locale autour du système racinaire. Ce phénomène de succion peut donc provoquer un tassement localisé du sol autour de l'arbre. Si la distance au bâtiment n'est pas suffisante, cela entraînera des désordres dans les

fondations. On considère en général que l'influence d'un arbre adulte se fait sentir jusqu'à une distance égale à une fois et demi sa hauteur.

➤ **Défauts de construction :**

Ce facteur de prédisposition, dont l'existence peut être révélée à l'occasion d'une sécheresse exceptionnelle, se traduit par une aggravation des désordres. L'examen de nombreux dossiers d'expertises, réalisées confirme qu'une forte proportion des maisons déclarées sinistrées présente des défauts de conception ou de réalisation des fondations (souvent trop superficielles, hétérogènes ou fondées dans des niveaux différents). Il n'est pas exclu que des phénomènes de retrait-gonflement aient pu se produire dans le sol d'assise et contribuer à l'apparition des désordres constatés. Toutefois, il est probable que des fondations réalisées dans les règles de l'art auraient pu, dans de tels cas, suffire à limiter fortement, voire à éviter l'apparition de ces désordres.

**I-3-2-Facteurs de déclenchement :**

Les facteurs de déclenchement sont ceux dont la présence provoque le phénomène de retrait-gonflement, mais qui n'ont d'effet significatif que s'il existe des facteurs de prédisposition préalables. La connaissance des facteurs déclenchants permet de déterminer l'occurrence du phénomène (autrement dit l'aléa et non plus seulement la susceptibilité). [14]

➤ **Phénomènes climatiques :**

Les phénomènes météorologiques exceptionnels constituent le principal facteur de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement. Les variations de teneur en eau du sol sont dues à des variations climatiques saisonnières. Les deux paramètres importants sont les précipitations et l'évapotranspiration. Ces deux paramètres contrôlent en effet les variations de teneur en eau dans la tranche superficielle des sols.

➤ **Facteurs anthropiques :**

Il s'agit d'autres facteurs de déclenchement, qui ne sont pas liés à un phénomène climatique, par nature imprévisible, mais à une action humaine. En effet, les travaux d'aménagement, en modifiant la répartition des écoulements superficiels et souterrains, ainsi que les possibilités d'évaporation naturelle, sont susceptibles d'entraîner des modifications dans l'évolution des teneurs en eau de la tranche superficielle de sol.

Pour que le gonflement d'un sol se produise, il faut que des «minéraux expansifs» puissent entrer en contact avec de l'eau. Cela conduit à l'équation de base :

$$\text{« Minéraux expansifs + eau = gonflement »}$$

Mais la nocivité de cette équation n'apparaît dès qu'il y a les facteurs suivants [17] :

- L'ouvrage est construit dans une région à saisons contrastées (saison sèche- saison humide, en région tropicale par exemple).
- Des canalisations sont rompues ce qui fait que l'eau s'infiltré dans les terrains gonflant.
- La construction d'un ouvrage proche perturbe l'écoulement des eaux souterraines.
- Des travaux de drainage contribuent au retrait des sols gonflants.
- Etc. ....

**I-4-CONSEQUENCES DU GONFLEMENT :**

Les désordres provoqués par le gonflement affectent généralement les constructions apportant de faible contrainte sur le sol support. La pathologie dépend du type d'ouvrage. Nous ne traiterons ici que le cas des bâtiments légers et des chaussées.

Dans certain cas, le problème provoque aussi les ouvrages d'art comme les barrages et les tunnels.

**I-4-1-Cas des bâtiments :**

Les bâtiments et particulièrement les maisons individuelles construits sans précautions sur sols gonflants présentent souvent des figures de dégradation. La figure I-4 illustre les différents types de dégâts causés à un bâtiment qui repose sur un sol sujet au gonflement ou au retrait. Ces dégâts sont les différentes formes des fissures.

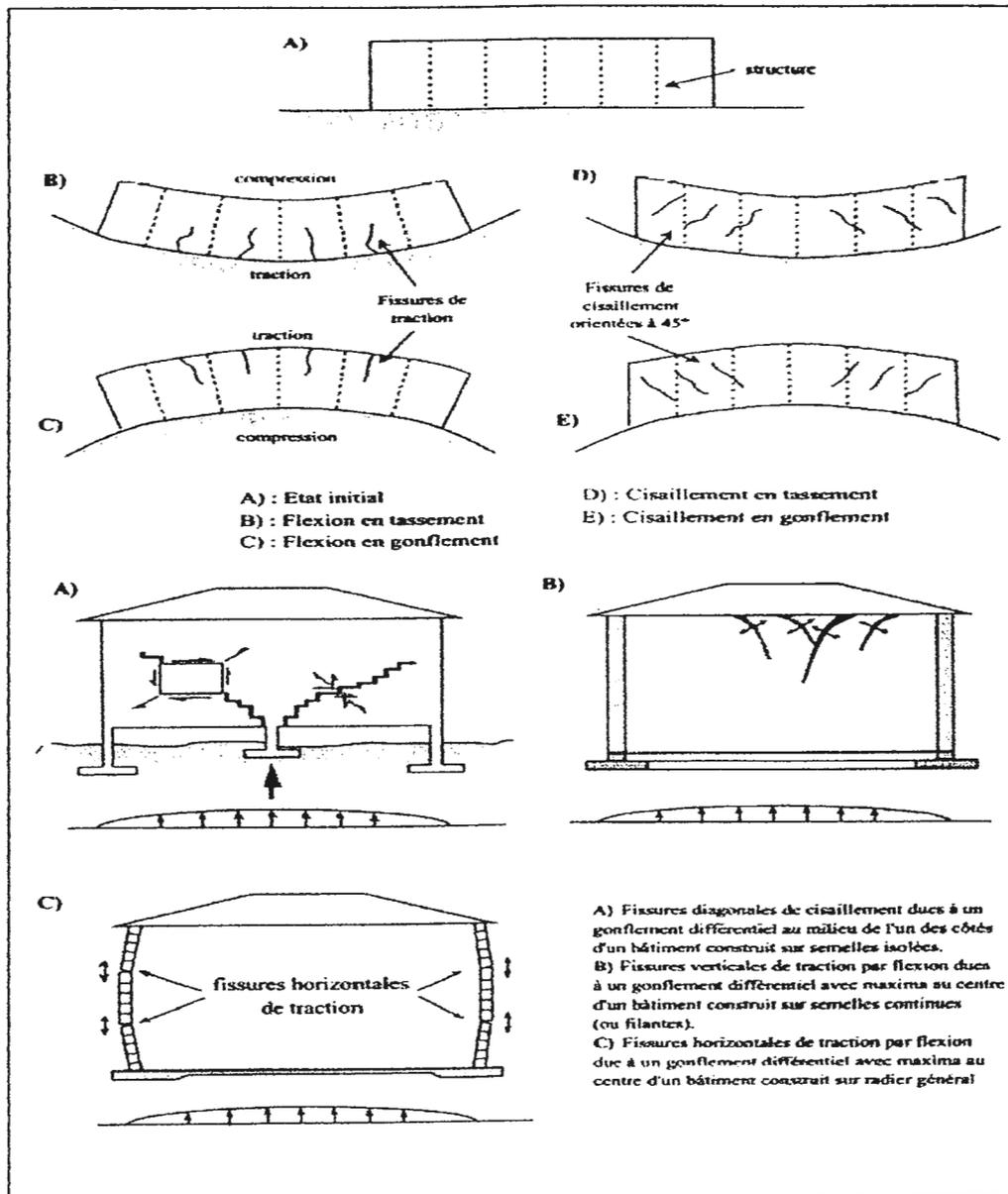


Figure I-4 : Formes de dégâts sur des bâtiments reposant sur des terrains gonflants, (Mouroux et al. 1987) [17]

**I-4-2-Cas des chaussées :**

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée .Ce phénomène est causé par des variations de teneur en eau du sous sol. Il peut être attribue au climat et à la surcharge.

Les désordres subits par la chaussée se résument dans la figure I-5 :

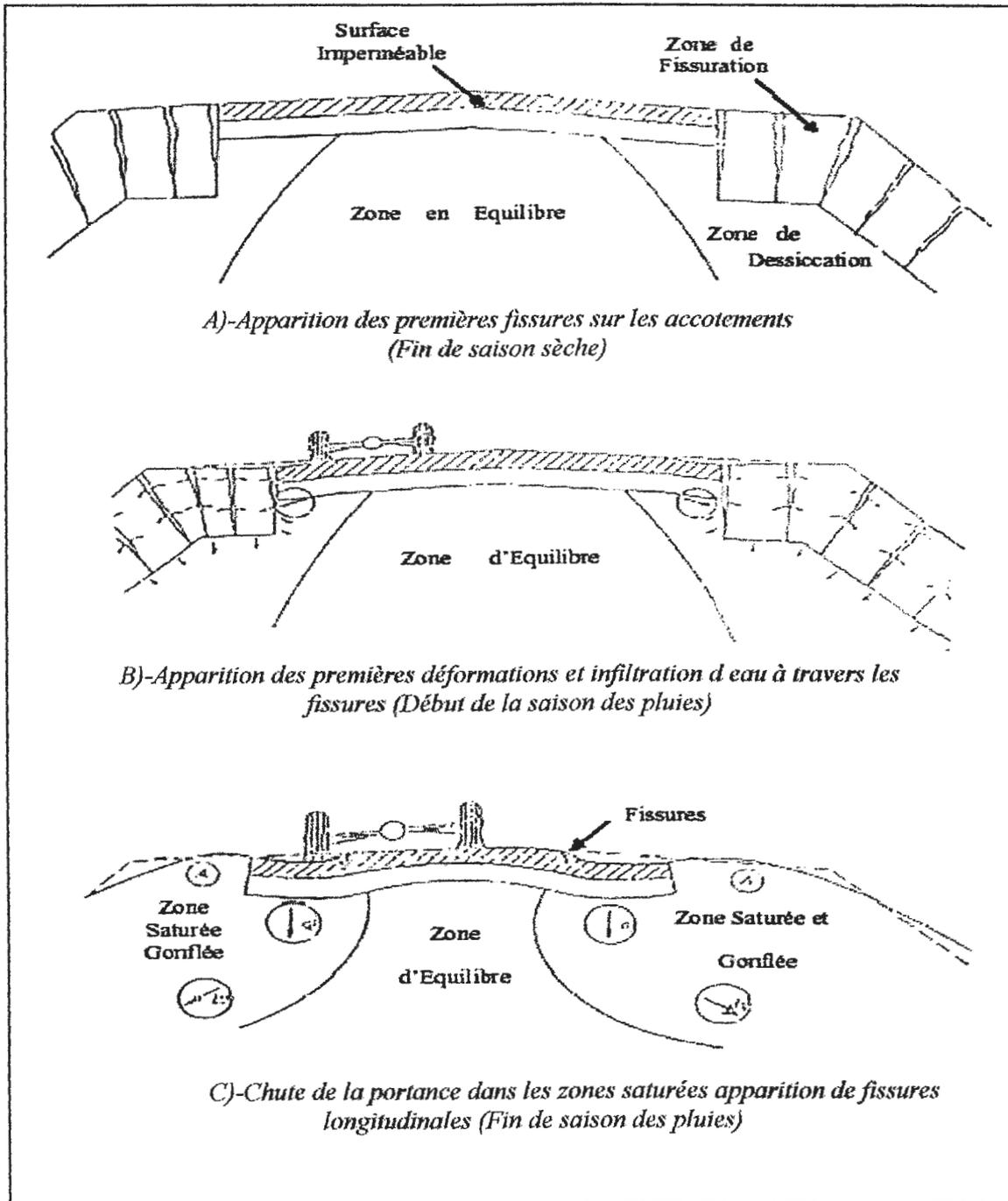


Figure I-5 : Forme des désordres subits par la chaussée [17]

### I-5-TECHNIQUES DE CONSTRUCTION EN TERRAIN GONFLANT :

Lorsque la construction d'un ouvrage traverse une zone de terrain gonflant, le dimensionnement doit absolument prendre en compte le risque de gonflement pendant ou après l'excavation, afin d'assurer la stabilité de l'ouvrage au cours de son existence. Les descriptions suivantes illustrent les deux techniques utiliser pour construire en terrain gonflant :

#### I-5-1-Techniques simples de construction des fondations :

##### ➤ Semelles superficielles sur remblai (Figure I-6):

- Décapage partiel des sols gonflants, avec débords de 2 m par rapport aux murs extérieurs.
- Pose d'une membrane imperméable sur la plate-forme.
- Réalisation d'un remblai compacté de 1,3 à 1,64 yards d'épaisseur (peu perméable et inerte à l'eau, donc peu argileux).
- Les constructions seront fondées très superficiellement avec une semelle de fondation armée et chaînage linteau continu courant au sommet des baies.
- Réalisation d'un trottoir et d'une couverture anti-érosion.

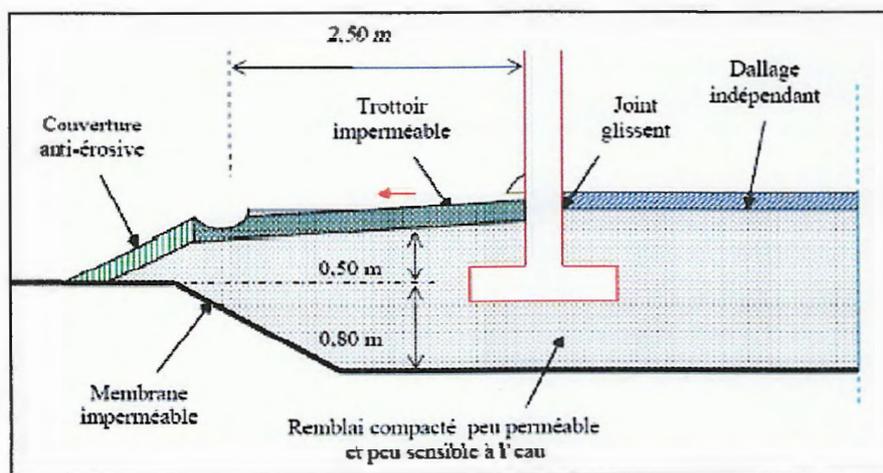


Figure I-6 : Semelle superficielle sur remblai [21]

##### ➤ Semelles superficielles sur remblai partiel + vide sanitaire (Figure I-7):

- Le remblai partiel situé sous la semelle devra être composé d'un sol permettant d'amortir le plus possible le gonflement.
- Une bonne imperméabilité du trottoir.
- Les semelles et la dalle portée sur vide sanitaire devront être particulièrement bien armées.
- La structure devra être flexible avec renforcement des angles.

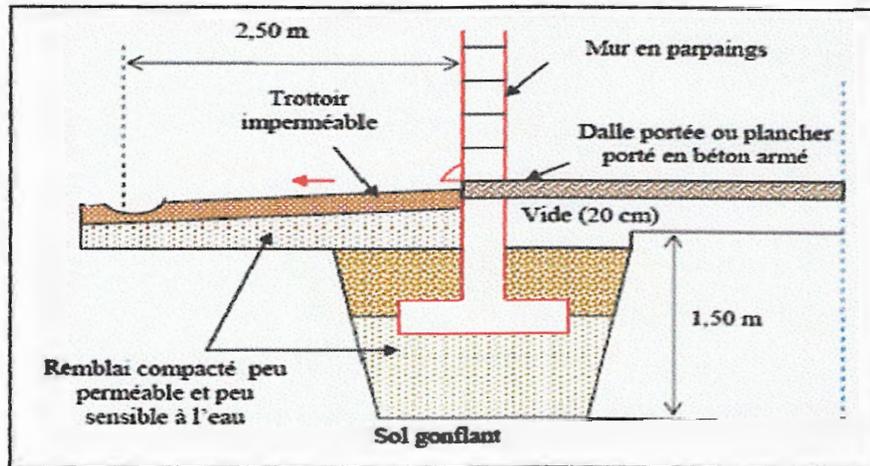


Figure I-7 : Semelle superficielle sur remblai partiel + vide sanitaire [21]

➤ Fondation profonde (puits ou pieux) (Figure I-8):

- Eviter l'adhésion entre terrain et fut des colonnes pour empêcher tout soulèvement par adhérence.
- Dégager impérativement les poutres longrines liant les têtes de puits ou de pieux par un vide inférieur d'une vingtaine de centimètres.
- Le plancher porté avec vide sanitaire.

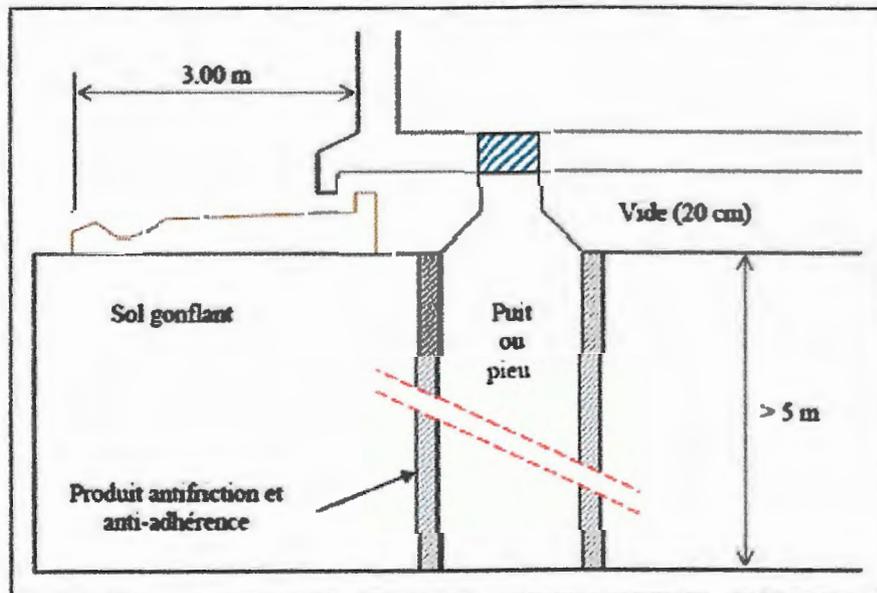


Figure I-8 : Fondation profonde (puits ou pieux) [21]

**I-5-2-Les techniques de stabilisation utilisées :**

Le traitement des sols est souvent opéré pour augmenter leur résistance, pour réduire ou augmenter leur perméabilité ainsi que pour diminuer leur compressibilité. Il est, aussi utilisé pour minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau comme dans le cas des sols expansifs.

Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées [4], on distingue :

- La stabilisation mécanique.
- La stabilisation thermique.
- La stabilisation chimique (par additifs).

Dans le tableau IV-2 suivant, on donne les principaux avantages et inconvénients de chaque procédé.

Techniques	Procédés	Avantages	Inconvénients
Stabilisation mécanique	Compactage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le compactage est le plus économique</li> <li>• Réduire le potentiel expansif</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Il faut une grande quantité d'eau. (compacter au-dessus de l'optimum avec une <math>w_n</math> élevée).</li> </ul>
	Substitution		<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'épaisseur de la couche.</li> <li>• Disponibilité du matériau.</li> </ul>
	Préhumidification		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le temps de l'opération.</li> <li>• La distribution uniforme de <math>w_n</math>.</li> </ul>
Amélioration par congélation	Circulation d'un fluide froid (azote liquide) dans des tubes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lorsqu' aucune solution n'est possible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La réalisée le plus rapidement possible.</li> <li>• Il faut tenir compte de la déstabilisation du massif de sol au dégel.</li> </ul>
Stabilisation thermique	Augmenter la température	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduire la répulsion électrique entre les particules.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Très coûteuse.</li> </ul>
Stabilisation chimique (Par ajout de matériaux)	Les sels	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmenter la concentration ionique de l'eau libre.</li> <li>• Réduire le phénomène d'échange.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le choix d'un type, de dosage et de la méthode d'addition d'un produit. (Valence et rayon du cation).</li> </ul>
	Ciment	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmenter la résistance.</li> <li>• Diminuer la plasticité.</li> <li>• Réduire le potentiel de variation de volume.</li> <li>• Augmenter la limite de retrait.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilisation d'un dosage important.</li> </ul>
	La chaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diminuer la plasticité, la densité sèche</li> <li>• et la pression du gonflement.</li> <li>• Augmenter la résistance et <math>w_{opt}</math>.</li> <li>• Utilisation d'un faible dosage.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carbonatation de la chaux.</li> </ul>

Tableau I-1 : Avantages et inconvénients des techniques de stabilisation couramment utilisées [17]

Récemment, la stabilisation par ajout du sable est une technique semble donner des résultats encourageants telles que la diminution des limites de consistances et la réduction de potentielle de gonflement proportionnellement à la quantité de sable additionné [18]

# CHAPITRE II

## ETUDE GEOLOGIQUE

## ET HYDROCLIMATOLOGIQUE

## II-1- ETUDE GEOLOGIQUE :

### II-1-1- CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL :

#### II-1-1-1- Introduction :

La zone mobile du système alpin, constitue, en Algérie, les reliefs de la chaîne tellienne, équivalents géologiques des reliefs alpin d'Europe, qui s'étendent depuis les monts des Taras, à l'Ouest d'Oran, jusqu'au massif de l'Edough, à l'Est d'Annaba. Ces reliefs sont l'expression de l'écrasement des ensembles géologiques initialement entreposés entre les plaques africaine et européenne dont le rapprochement a débuté il y a de cela 65 millions d'années. Du point de vue structural, les Magrébides algériens sont constituées de plusieurs nappes charriées sur la plate-forme africaine. (Figure II-1).

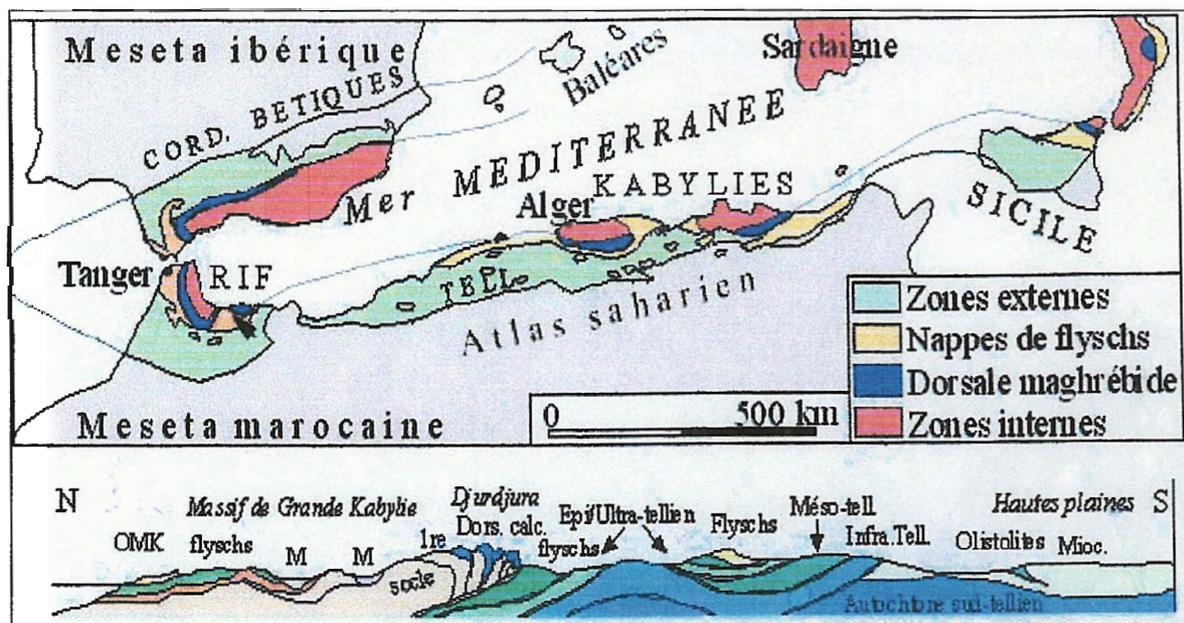


Figure II-1 : Esquisse structurale du nord- Est Algérien [28]

On peut distinguer, transversalement :

#### II-1-1-1-1- Les zones internes :

Qui situées au Nord, elles comprennent (figure II-1) :

► Un socle antétriasique recouvert d'une série sédimentaire écaillée (antérieur à -200 millions d'années).

► Des terrains cambriens à carbonifères modérément métamorphisés et leur couverture Mésozoïque et tertiaire formant la dorsale calcaire (entre -200 et -65 millions d'années).

Ces zones internes sont surtout développées à l'Est d'Alger où elles constituent les massifs de Grande et Petite Kabylie. A l'Ouest d'Alger, le massif du Chenaoua et le Cap Ténès en sont des témoins, réduits aux unités de la dorsale calcaire. Les zones internes chevauchent le domaine des flyschs et le domaine tellien. En Petite Kabylie, les chevauchements sont très plats (In Maradja, 2003).

### II-1-1-2- Les zones externes :

Ces zones situées plus au sud, elles regroupent (Figure II-1) :

- ▶ Des nappes de flysch, caractérisées par des formations détritiques argilo- gréseuses d'âge Crétacé / Eocène,
- ▶ Des nappes telliennes composées essentiellement des séries marno-carbonatées d'âge Crétacé/ Eocène.

Ces domaines apparaissent actuellement sous forme d'unités tectoniques anormalement superposées les unes aux autres et charriées sur l'avant pays Hodnéen plus au Sud. Ils sont recouverts par un ensemble détritique, allochtone, le Numidien, dont la position est discutée, et par des formations post-nappes du Néogène.

### II-1-1-2- Les grands traits géologiques de la petite Kabylie :

En Petite Kabylie, les grands traits géologiques peuvent être résumés selon les travaux de [12] [13]. Classiquement on distingue (Figure II-2) :

- Le socle Kabyle,
- Les séries de la chaîne calcaire (ou dorsale Kabyle),
- L'Oligo miocène Kabyle et les Olistostromes,
- Les séries à caractères des flyschs,
- Les séries telliennes.

#### II.1-1-2-1- Le socle Kabyle :

Les formations cristallophylliennes du socle Kabyle sont largement représentées en Petite Kabylie (Figure II-2), elles comportent deux grands ensembles [6]:

Un ensemble inférieur constitué de gneiss fins ou oeillés, à intercalation de marbres et d'amphibolites.

Un ensemble supérieur constitué des schistes satinés où s'intercalent localement des grés et des porphyroïdes oeillés, cet ensemble est surmonté en discordance par des formations siluriennes [12].

#### II.1-1-2-2- La dorsale Kabyle :

Elle est nommée « chaîne liasique », « chaîne calcaire » et enfin « dorsal Kabyle » [13]. Elle marque, grâce à ses reliefs carbonatés, la limite entre le socle Kabyle au Nord et les zones telliennes au Sud (Figure II-2).

#### II.1-1-2-3- L'Oligo Miocène Kabyle et les Olistostromes :

##### \* L'Oligo Miocène Kabyle (OMK) :

C'est une formation détritique qui comporte trois termes lithologiques [6]:

- Un conglomérat discordant sur le socle à la base,
- Des grés micacés à débris de socle associés à des pélites micacées,
- Des sillexites au sommet.

### \* Les Olistostromes :

Ces formations tectonosédimentaires, constituées de flyschs massyliens et maurétaniens, reposent sur l'Oligo-Miocène Kabyle. Des passées de grés micacés semblables à ceux de l'OMK peuvent se trouver intercalées entre les flyschs.

#### II.1-1-2-4- Les séries à caractères des Flyschs :

Caractérisées par des formations détritiques argilo-gréseuses d'âge Crétacé/ Eocène (Figure II-2), elle sont subdivisées en deux types principaux :

#### \* Le flysch maurétanien :

Comporte de bas en haut [6] :

- Un pré flysch calcaire du Tithonique-Néocomien.
- Un ensemble de grés homométriques à cassure verte (flysch de Guerrouch) attribué à l'Albo- Aptien.
- Des phtanites rouges et blancs du Cénomaniens supérieur.
- Un Sénonien microbréchiq.
- Au sommet, des conglomérats puis des grés micacés tertiaires.

#### \* Le Flysch Massylien :

Il présente une série allant du Néocomien au Lutétien terminal et regroupe trois ensembles [6]:

- A la base, le flysch Albo-Aptien composé d'argiles et de grés quartzitiques.
- En suite, un ensemble comprenant des marnes et calcaires fins.
- Au sommet, un flysch à marnes microbréchiq du Turonien-Maestrichien.

#### II-1-1-2-5- Le flysch Numidien :

Il faut signaler la présence du flysch Numidien qui affleure dans la région (figure II-2). Ce dernier comprend de bas en haut [6] [27] :

- Des argiles sous- numidiennes, de teinte verte, rouge ou violacée,
- Des grés numidiens à quartz roulés,
- Des marnes avec des silexites qui atteignent le Burdigalien basal. Le flysch Numidien constitue structurellement la nappe la plus haute de l'édifice alpin. Il est attribué en partie à l'Aquitano-Burdigalien.

#### II-1-1-2-6- Les séries telliennes :

Composés essentiellement de séries marno-carbonatées d'âge Crétacé /Eocène. Du point de vue structurale, elles sont constituées par un empilement de trois grandes nappes, ce sont du Nord vers le Sud [27] :

► **Les nappes épi-telliennes** : Constituées de terrains marneux allant de l'Albien au Lutétien Supérieur.

► **Les nappes méso-telliennes** : Qui montrent un dispositif de cinq écailles, formées de Sédiments allant du Senonien au Miocène.

► **Les nappes infra-telliennes** : caractérisées par une structure chaotique : le Trias gypsifère, le Jurassique, le Crétacé ont glissé sur les sédiments, en cours de dépôt, du Miocène inférieur, et ont été remis en mouvement avec celui-ci. Ces glissements ont commencé dès l'Eocène supérieur et se sont poursuivis au cours de l'Oligocène et surtout au Burdigalien [27].

#### II-1-1-2-7- Le miocène post nappes :

Il est caractérisé par deux cycles sédimentaires :

- Un premier cycle, constitué des marnes grises ou bleues, transgressives sur les terrains précédents,
- Un deuxième cycle, comprenant essentiellement des grès provenant de la destruction du Numidien.

#### II-1-1-2-8- Les roches magmatiques :

Des phénomènes magmatiques d'âge Miocène se sont développés en Petite Kabyle, où des massifs de roches éruptives de type calco-alcalin sont mis en place (figure II-2). Il comprennent :

- Des granites qui occupent des surfaces importantes et qui sont répartis en deux massifs principaux (le massif du Cap Bougaroun au Nord, et le massif des Beni Touffout au Sud) [27]
- Des microgranites qui forment généralement des petits massifs éruptifs, localisés aux environs de Collo et d'El Milia,
- Des rhyolites,
- Des roches mésocrates à mélanocrates (Diorites et Gabbros) de moindre extension.

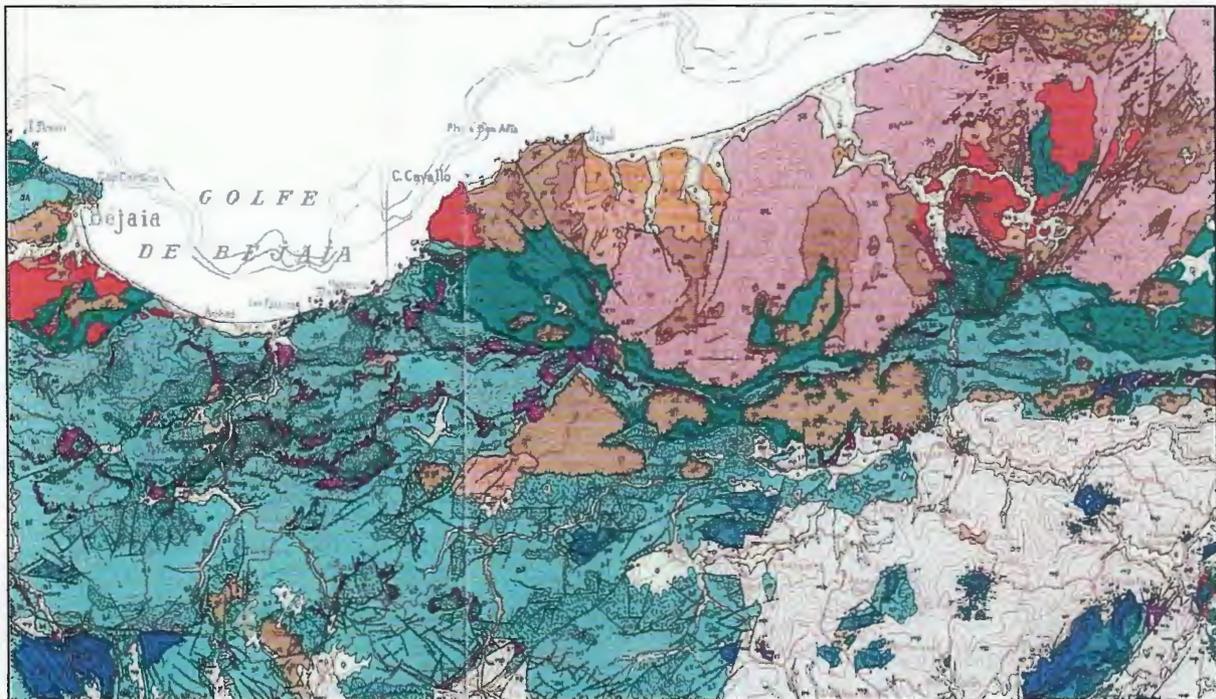


Figure II-2 : Extrait de la carte structurale du Nord-Est de l'Algérie et des confins Algéro-Tunisiennes [27]

**ROCHES ERUPTIVES RÉCENTES**

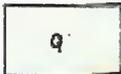


Granites, grano-diorites, microgranites, dolérites et rhyolites.



⊕: Complexe stratifié de Yaddène et roches effusives de la région d'Hammam Meskoutine(⊕).

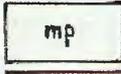
**ROCHES RÉCENTES ET CYCLES POSTÉRIEURS AU BURDIGALIEN INFÉRIEUR**



Quaternaire indifférencié (Villafranchien à actuel).



Pliocène marin des zones côtières.



Mio-Pliocène continental.



Burdigalien supérieur-Langhien de la marge littorale.



Miocène marin transgressif indifférencié des nappes telliennes et de leur avant-pays allochtone, parautochtone ou autochtone.

**SOCLE KABYLE, CHAÎNE CALCAIRE**



Oligo-Miocène kabyle, olistostromes à Flyschs résédimentés (y compris le Numidien) et flyschs en position nord-kabyle (F').



Olistostromes superposés à l'Oligo-Miocène kabyle: OI- Olistolites telliens de la région d'El Milia.



CHAÎNE CALCAIRE: Paléozoïque à Lutétien supérieur des zones interne, médiane et externe.



Socle kabyle: SBA- Paléozoïque des Béné-Afeur  
SK- Socle métamorphique de Petite kabylie et du Bou Hâtem (phyllades micaschistes, porphyroïdes, gneiss et marbres.  
SB- Socle basique du Cap Bougaroun (péridotites et "kinzigites" rétro-morphosées).

**NAPPE NUMIDIENNE**



Formation de Babouche (Aquitano-Burdigalien).



Grès numidiens et séries mixtes.



Principaux affleurements d'argiles de base à Tubotomaculum.

**NAPPES DE FLYSCHS KABYLES**

**FLYSCHS MAURÉTANIENS**



Séries internes d'Aïn Naceur, de Sidi Rhiat, de Sidi Ahmed, de Settiter, de Bou TâTeb, de la Robertsau (Souk es Sebt) et de La Marsa.  
Séries médianes de Guerrouch, d'El Karn, de Khorchef, de Ghezala et du Sud d'Aïn Berda (Penthièvre)  
Séries externes (ex-"Medjanien") et séries atypiques de Tamalous, du Kef Mez-zouch et de Ziane.



Cas de la série des Achaïches (série médiane).  
1- Crétacé  
2- Jurassique  
3- Permo-Trias et Carbonifère.



Unité Sendouah-Tabellout à substratum basique.

**FLYSCHS MASSYLIENS**



Séries typiques à phanites ou à brèches vertes et rouges.



Cas de la série du Djebel Filfila  
1- Crétacé  
2- Jurassique.



Unités de type Adissa et Sénonien marneux à microbrèches ou à blocs.  
A- Eocène  
F- Sénonien marneux à microbrèches ou à blocs.

### II-1-2- CADRE GEOLOGIQUE LOCAL :

De point de vue morphologique, la région de Jijel apparaît sous forme d'une dépression entourée par des massifs montagneux. Cette dépression est comblée par des dépôts Néogènes, et les massifs montagneux sont composés pour l'essentiel de formations cristallophylliennes du socle Kabyle (figure II-3 et figure II-4).

Les différentes formations géologiques de cette région peuvent être résumé aux travaux du [11] qui détermineras :

#### II-1-2-1- Les formations Quaternaires :

Elles sont bien représentées dans le bassin néogène de Jijel, elles comportent les formations suivantes :

##### ► Les dunes de sable :

Elles forment le cordon littoral et comportent :

- Des dunes actuelles : constituées de sables fins parfois consolidés.
- Des dunes anciens : constituées également de sables fins limoneux parfois consolidés.

##### ► Les Alluvions :

Elles sont représentées par des alluvions actuelles et des alluvions récentes.

Les alluvions actuelles sont composées des éboulis et des brèches non consolidées, la taille des éléments peut aller jusqu'à 50 mm de diamètre.

#### II-1-2-2- Les formations Tertiaires :

##### II-1-2-2-1- Le Néogène :

Toutes les formations Néogènes accusent un léger plongement vers le Nord [12]  
Elle sont représentées de haut en bas par :

##### ► Le miocène marin terminal (sahélien) :

L'affleurement du sahélien est local. Il est connu à l'Est de Jijel (région de chekfa, au Sud du POS de Faza), constitué essentiellement de marnes de couleur bleues.

##### ► Le miocène supérieur (Pontien) :

Epais de 30 à 50 m, il est composé de dépôts détritiques cailloutis, galets, poudingues et argiles d'origine continentale.

##### ► Le miocène inférieur (Burdigalien) :

Epais de 200 à 300 m, il est caractérisé par des dépôts marins de grandes profondeurs. Le Burdigalien est constitué de marnes grises, parfois sableuses, de faciès très constant avec des intercalations de niveaux détritiques.

##### II-1-2-2-2- Le numidien :

Il comprend de bas en haut :

- Des argiles colorées dites : argiles sous numédiennes, de teinte verte, rouge ou violacée à Tubotomaculum.
- Des grés à grains hétérométriques et à dragées de quartz.

-Le sommet se termine par des silexites dont la partie supérieure atteint le Burdigalien basal. [6]

**II -1-2-2-3- Les flyschs maurétaniens :**

Dans la région de Jijel, le flysch maurétanien est représenté par l'unité de Guerrouch.

Cette unité comporte des séries variées : pélites calcaires, microbrèches calcaires, conglomérats et argiles du Néocomien au Lutétien.

L'unité de Guerrouch affleure sur une grande étendue, entre El Aouana et Texenna.

**II-1-2-2-4- Les flyschs massyliens :**

Ils sont représentés par une alternance schisto-quartzitique. Ces flyschs affleurent largement au Sud de Taxana.

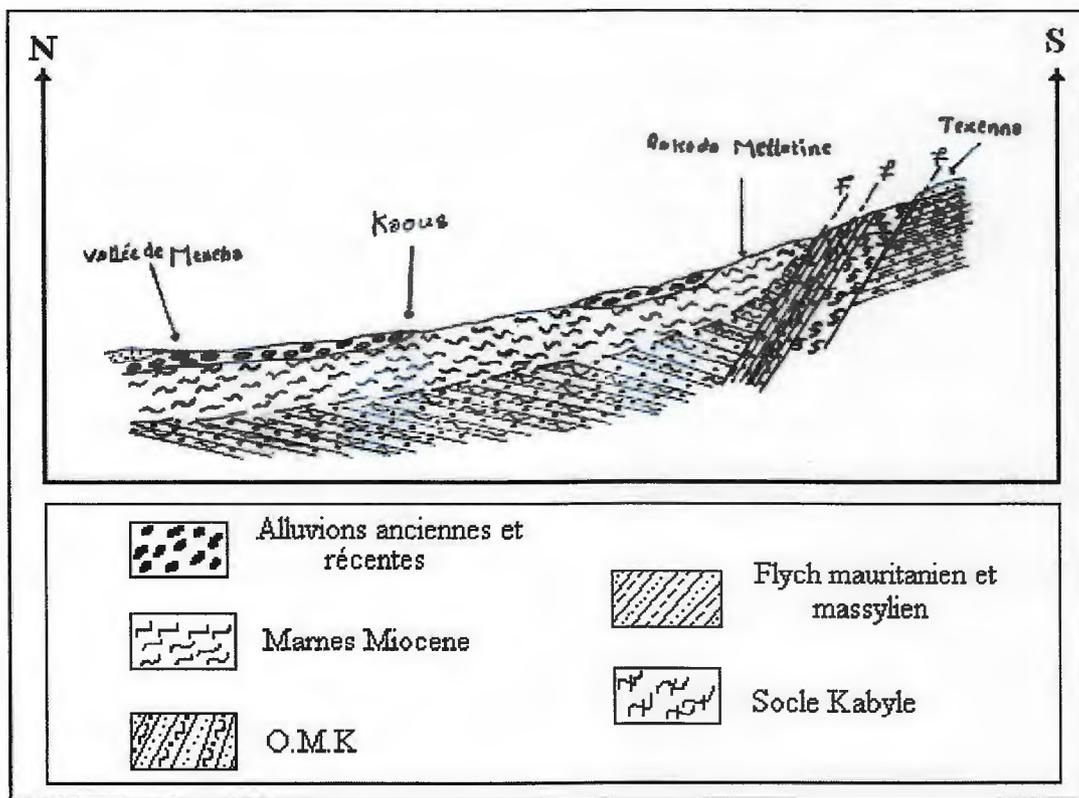


Figure II-3 : Coupe géologique Nord-sud, parallèle à la route Jijel-Texenna, illustrant le schéma du bassin néogène de Jijel (Boufatouha.Y.2005)

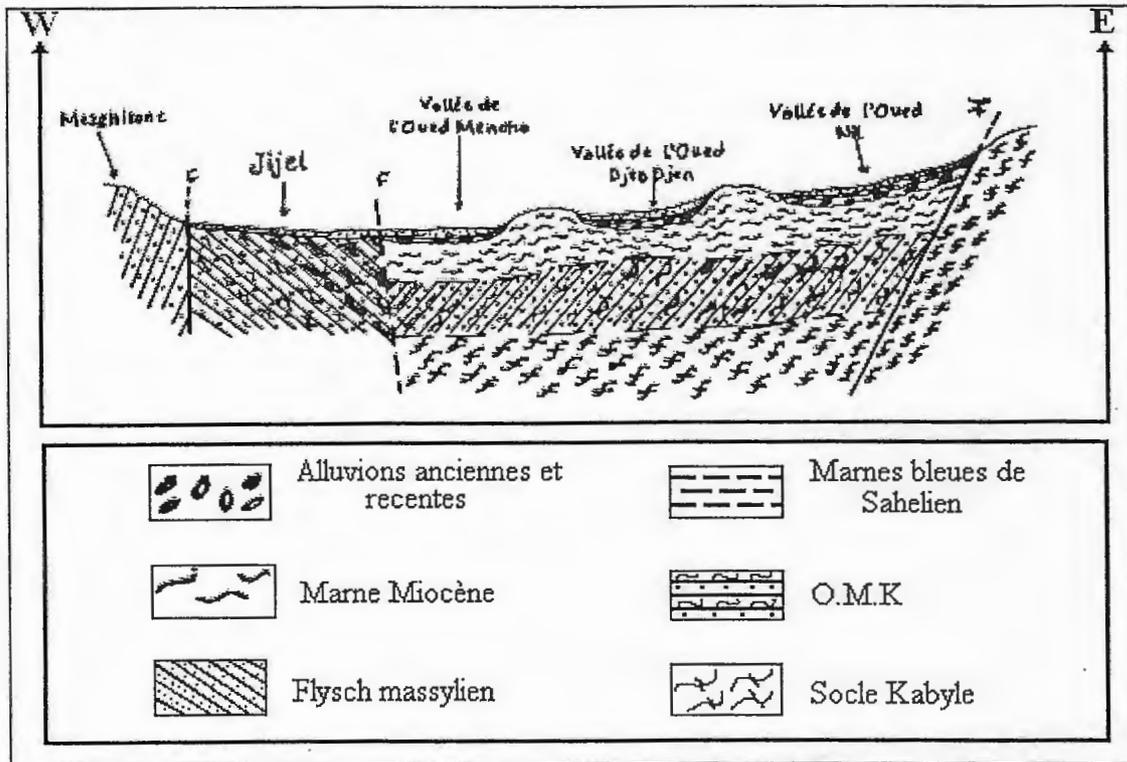


Figure II-4 : Coupe géologique Est-Ouest, parallèle au trait de coté illustrant le schéma structural du bassin néogène de Jijel (Boufatouha, Y.2005)

### II-1-2-3- L'Oligo-Miocène Kabyle et les Olistostromes :

#### II-1-2-3-1- L'Oligo- Miocène Kabyle :

Constitue la couverture sédimentaire, transgressive et discordante du socle Kabyle. Il occupe une grande partie de la région de la ville de Jijel.

Les formations de l'Oligo-Miocène Kabyle débutant à l'Oligocène supérieure, sont constituées de trois principaux termes lithologiques [6] [23]

Un terme de base :

Comportant des conglomérats reposant en discordance sur le socle Kabyle.

- Un terme médian :

Formé de grès lithique, micacé à débris provenant du socle Kabyle associés à des petites micacées.

- Un terme supérieur :

Pélitique et siliceux à radiolaires et diatomées.

#### II-1-2-3-2- Les Olistostromes :

Sont des formations tectono-sédimentaires à débris de flyschs mauritanien et massylien reposant sur les formations de l'Oligo-Miocène kabyle.

Ces formations ont été décrites pour la première fois par [12], puis par [6] [24] en Petite kabyle.

L'âge de ces formations est suppose Aquitaniien à Burdigalien inférieur probable.

Les formations Olistostromiques s'observent au Nord de Taxana au niveau d'El ghariana

### II-1-2-4- Les formations cristallophylliennes du socle Kabyle :

Les formations cristallophylliennes du socle Kabyle bordant le bassin néogène de Jijel sont représentées par deux grands ensembles :

- Un ensemble supérieur peu métamorphique.
- Un ensemble inférieur métamorphique.

#### II-1-2-4-1- L'ensemble peu métamorphique :

Il comporte deux séries :

- Une série pélitique, gréseuse, carbonatée et grésos-conglomératique, la formation grésos-conglomératique a été datée par des Acritarches (Bandelot 1981) et a été attribué à l'Ordovicien inférieur (Trémadoc).
- Une série siluro-dévonien [12], constituée de schiste à graptolite, de psammite Tentaculites et de calcaire à Orthocères, algues et Ainoïdes.

Le contact de base de cet ensemble sur les séries sous-jacentes de l'ensemble métamorphique est interprété comme étant une discordance stratigraphique [12] [6].

Il est également interprété comme étant une faille de détachement hercynienne, mettant en contact l'ensemble peu métamorphique sur l'ensemble métamorphique on dôme gneissique (Mahdjoub 1991):

#### II-1-2-4-2- L'ensemble métamorphique :

Il est représenté par un complexe de gneiss admettant des intercalations de marbre, d'amphibolite et de Leptynites de marbre et d'amphibolite par des micaschistes et des schistes à intercalation de marbre et d'amphibolites.

### II-1-3- LA LITHOLOGIE DES AFFLEUREMENTS AU NIVEAU DU SITE ETUDIE :

Les différentes formations lithologiques qui on peut rencontrer dans le secteur étudié est selon les données de terrain et les données des sondages carottés réalisés par le laboratoire national de l'habitat et de la construction (LNHC 2004, unité de Rouïba) au niveau du site étudié montrent que les formations géologiques qui forment ce dernier sont peu variées. Elles sont constituées essentiellement par les dépôts du Mio-Plio-Quaternaire.

On peut ainsi rencontrer de haut en bas les formations suivantes:

- **Terre végétale** : est couvrent toutes les formations sous jacentes mais à faible épaisseur généralement de 0.30 m à 1 m.
- **Des formations argilo - sableuses** : elles sont parfois graveleuses, à galets, de couleurs variées jaunâtre, brunâtre foncée, et ocre, avec par endroits des concrétions calcaires. L'épaisseur de ces formations allant jusqu'à 7m. L'âge de ces formations est attribué à la base du Quaternaire [11].
- **Des marnes argilo - sableuses** : elles sont parfois graveleuses avec des blocs beiges, très caillouteuses à la base, de couleur grisâtre. L'épaisseur de ces formations varie entre 2 à 7m.

Ces marnes sont surmontées parfois par des horizons de sables fins rougeâtres avec cailloux, parfois épais (jusqu'à 7 m). Ces horizons sont rencontrés dans la partie Nord Ouest du site.

L'âge de ces formations est le sommet du Burdigalien [12].

- **Des marnes schisteuses grisâtres** : Très épaisses allant jusqu'à 200 à 300 m, surmontées parfois par des marnes grisâtres caillouteuses à la base. Ces marnes représentent les formations Burdigaliennes [12].



Figure II-5 : Les différentes formations lithologiques du site de Harraten.

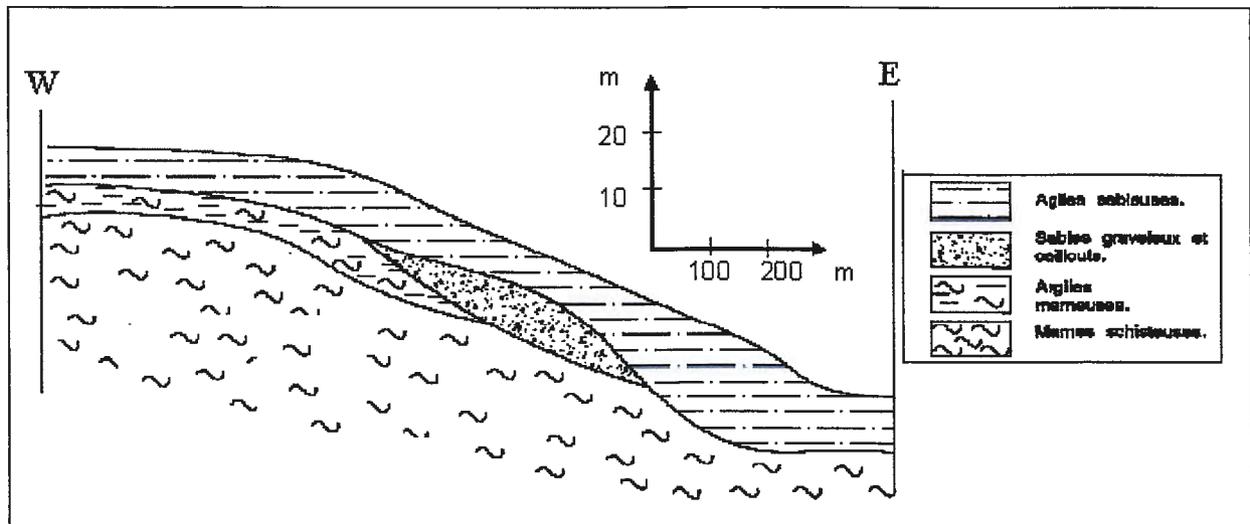


Figure II-6 : Coupe géologique illustrant les différentes formations lithologiques du site de Harraten (D'après L.N.H.C).

## II-2-ETUDE HYDRO-CLIMATOLOGIQUE :

### II-2-1-INTRODUCTION:

Cette étude fait l'objet d'une analyse des différents facteurs climatique qui influence sur des argiles de notre région. En se basant donc sur les données de précipitation, les degrés d'humidité, et de température afin d'avoir le comportement des argiles, et de quantifier le taux de l'infiltration et le renouvellement des aquifères. Pour la réalisation de cette étude on s'est référé au donnée climatique baser sur la pluviométrie des séries ancienne P.SELTZER (1913-1938), et séries récente (1995-2005), pour les stations Jijel (ANRH-Port), Achouat et l'Agrem.

### II-2-2- CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES:

Selon la codification de l'A.N.R.H ; la région de Jijel appartient au grand bassin versant des côtiers constantinois Ouest (bassin versant n° 3). Ce bassin couvre une superficie totale de l'ordre de 2724 km<sup>2</sup>.

La zone de Harraten, appartient au bassin versant de Oued Mencha, qui couvre une superficie totale de l'ordre de 123.7 km<sup>2</sup>.

Pour notre étude hydroclimatique, nous avons utilisé les données des stations de Jijel (Station A.N.R.H), Achouat et Jijel (port).

station	Coordonnées LAMBERT		altitude
	X	Y	
Jijel (port)	774.10	396.15	2
Jijel (A.N.R.H)	774.10	369.15	5
Achouat	785.6	390.5	56

Tableau II-1: Cordonnées des stations météorologiques de la région de Jijel.

#### II-2-2-1 - Les précipitations :

##### ➤ Précipitations moyennes annuelles :

L'étude des précipitations moyennes annuelles s'est effectuée à partir des données des séries récentes qui s'étend de 1995 à 2005 pour les stations de Jijel (ANRH) et celle d'Achouat et la série ancienne P. SELTZER (1913-1938) de la station d'Achouat.

station	Série ancienne. P. SELTZER (1913-1938).	Série récente ANRH (1995-2005)
Jijel (ANRH)	/	935.41 mm
Achouat		985.50 mm

Tableau II-2 : précipitations moyennes annuelles des station : Jijel (ANRH) et d'Achouat en (mm).

➤ Précipitations moyennes mensuelles et saisonnières :

• Série ancienne P. SELTZER (1913-1938) :

STATION	MOIS												TOTAL
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	
Achouat	86	125	192	212	193	143	107	82	57	27	03	7	1234
	403			548			246			37			

Tableau II-3 : Précipitations moyennes mensuelles et saisonnières (Série ancienne P.SELTZER (1913-1938) de la station d'Achouat, en (mm).

• Série récente :

Le tableau II-4, montre la répartition mensuelle et saisonnière de la série récente concernant les précipitations de trois stations : Jijel (ANRH) (1995-2005), Achouat (1995-2005), barrage El Agrem (1995-2004).

Ce tableau met en évidence que la saison la plus humide est l'hiver avec des valeurs de (46.69 %) des précipitations saisonnières pour la station de Jijel (ANRH), (46.19 %) pour celle de la station d'Achouat, et (48.57 %) pour la station du barrage El Agrem.

Par contre la saison la plus sèche est l'été avec des valeurs de (2.71 %), (3.40 %) et (3.13 %) pour les mêmes stations respectivement.

mois stations	automne			hiver			printemps			été			ANNUELLE
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	
Jijel (ANRH)	50,31	62,85	188,77	171,41	154,47	110,90	53,59	77,89	39,89	10,96	1,98	12,36	935,41
	301,95			436,78			171,37			25,31			
	32,28 %			46,69 %			18,32 %			2,71 %			
Achouat	66,5	71,72	172,54	182,3	156,72	116,20	55,62	80,42	50,01	15,38	3,17	14,93	985,50
	310,75			455,22			186,05			33,48			
	31,53 %			46,19 %			18,88 %			3,40 %			
Barrage El Agrem	56	71	184	192	197	139	61	100	53	12	08	14	1087
	311			528			214			34			
	28.62 %			48.57 %			19.68 %			3.13 %			

Tableau II-4 : Précipitations moyennes mensuelles et saisonnières des stations jijel (ANRH), Achouat, et barrage El Agrem en (mm) :

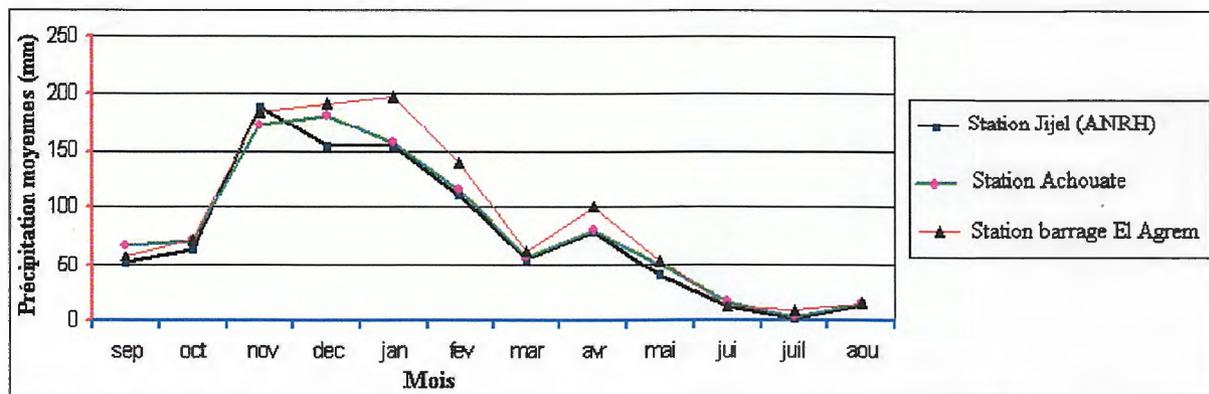


Figure II-7 : courbes des précipitations moyennes mensuelles et saisonnières des stations : Jijel (ANRH), Achouat, et barrage El Agrem.

La figure II-7, schématisant la répartition mensuelle et saisonnière des précipitations pour les trois stations précédentes, montre que les trois courbes présentent approximativement une même allure avec des minima observés au mois de Juillet, (8,09 mm) pour la station du Barrage El Agram et (3,77 mm) pour la station d’Achouat, et des maxima enregistrés au mois de janvier pour la station de Barrage ElAgram (197,49 mm) et au mois de novembre pour celle de la station d’Achouat (175,7 mm).

**II-2-2-2- Températures :**

Nous avons utilisé deux séries : une ancienne et l’autre récente, à partir des données enregistrées dans les stations : Jijel (port), et d’Achouat respectivement.

➤ Série ancienne (1978-1989) :

Station	Températures en (°C)												année
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	
Jijel (port).	23,62	21,03	17,27	13,42	12,37	12,58	13,45	15,84	18,22	22,57	25,95	25,92	18,52
	20,64			12,79			15,83			24,81			

Tableau II-5 : Températures moyennes mensuelles de la station Jijel (port) pour la période (1978-1989).

➤ Série récente (1996- 2005):

Station	Températures en (°C)												Année
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	
ACHOUAT	23	20	15	12	12	11	13	16	18	21	25	26	17.66
	19.33			11.66			15.66			24			

Tableau II-6: Températures moyennes mensuelles de la station d'Achouat pour la période (1996-2005).

Les deux tableaux II-5 et II-6 révèlent que la saison la plus froide est l'hiver, avec une valeur de température moyenne saisonnière proche de (12 °C) et la saison la plus chaude est l'été avec une température moyenne de l'ordre de (24 °C).

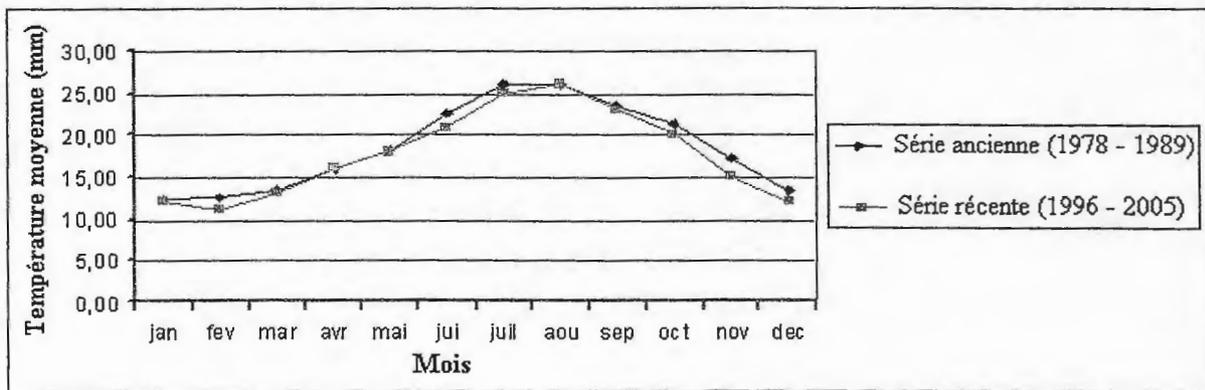


Figure II-8 : Températures moyennes mensuelles des séries ancienne (1978-1989) et récente (1996-2005).

Les deux courbes de la figure II-8 montrent que le maximum des températures moyennes mensuelles est atteint au mois d'août avec une valeur de l'ordre de (26 °C) et le minimum est obtenu au mois du février avec une valeur de l'ordre (11°C).

**II-2-2-3- Relation température - précipitation :**

➤ Diagramme ombrothermique :

La combinaison des températures et des précipitations est intéressante dans la mesure où elle permet de déterminer les mois véritablement secs qui correspondent au moins où le total des précipitations est égale ou inférieur au double de la température moyenne mensuelle, soit  $P \text{ en (mm)} \leq 2 T \text{ en (° C)}$ .

Il est possible donc d'élaborer un Diagramme ombrothermique dans lequel les températures sont portées à l'échelle double des précipitations.

Lorsque la courbe des précipitations passe au dessus de celle des températures, la période correspondante est excédentaire. Par contre, si la courbe des températures passe au dessous de celle des précipitations, la période correspondante est déficitaire.

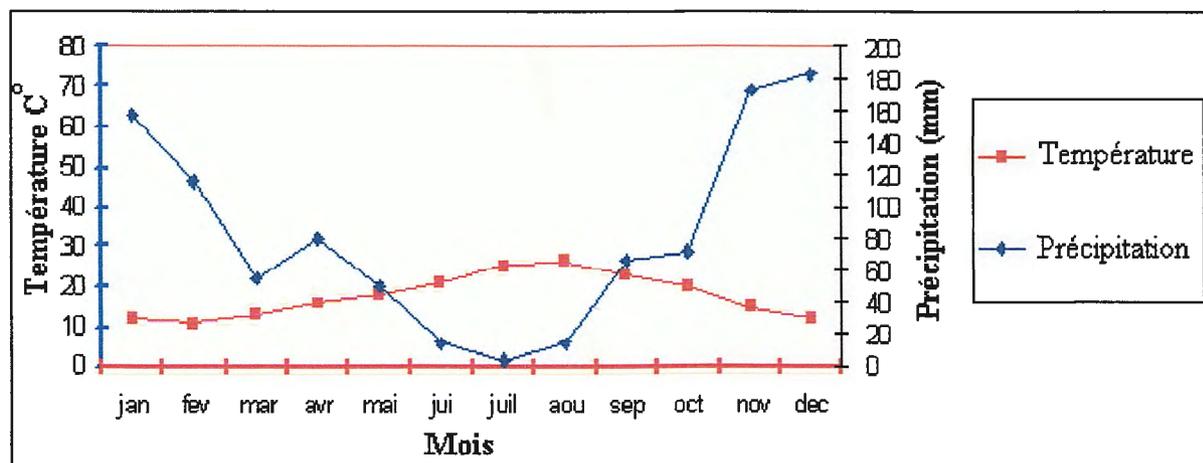


Figure II-9 : Diagramme ombrothermique

Comme le montre le diagramme ombrothermique, la période sèche débute au mois de juin et s'étale jusqu'au mois d'août, et la période humide commence à la fin d'août et dure jusqu'à la fin d'avril.

#### II-2-2-4- Autres paramètres :

##### ➤ Le vent :

Dans la région de Jijel, le vent souffle souvent de direction NNW-SSE. Le tableau II-7, résume les valeurs moyennes mensuelles des vents de la station d'Achouat.

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Moy
Valeurs moyennes	2.19	2.04	2.24	2.54	2.45	2.52	2.58	2.3	1.89	2.43	2.04	1.89	2.25

Tableau II-7 : Valeurs moyennes mensuelles des vents, (en m/s).

On remarque que la valeur maximale du vent est enregistrée au mois de mars (2.58 m/s) et la valeur minimale au mois d'août (1.89 m/s). La valeur moyenne annuelle est de l'ordre de (2.25 m/s).

##### ➤ L'humidité relative :

Le tableau II-8, résume les valeurs moyennes mensuelles de l'humidité de la station d'Achouat.

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Moy
Valeurs moyennes (%)	79.6	75.3	77.5	77.6	78.2	79.1	76.7	75.3	80.54	69.5	72.7	71.5	76.13

Tableau II-8 : Valeurs moyennes mensuelles de l'humidité de la station d'Achouat en

D'après le tableau II-8, la valeur maximale est de l'ordre de (80.54 %) au mois de mai et la valeur minimale est de l'ordre de (69.45 %) pendant le mois de juin.

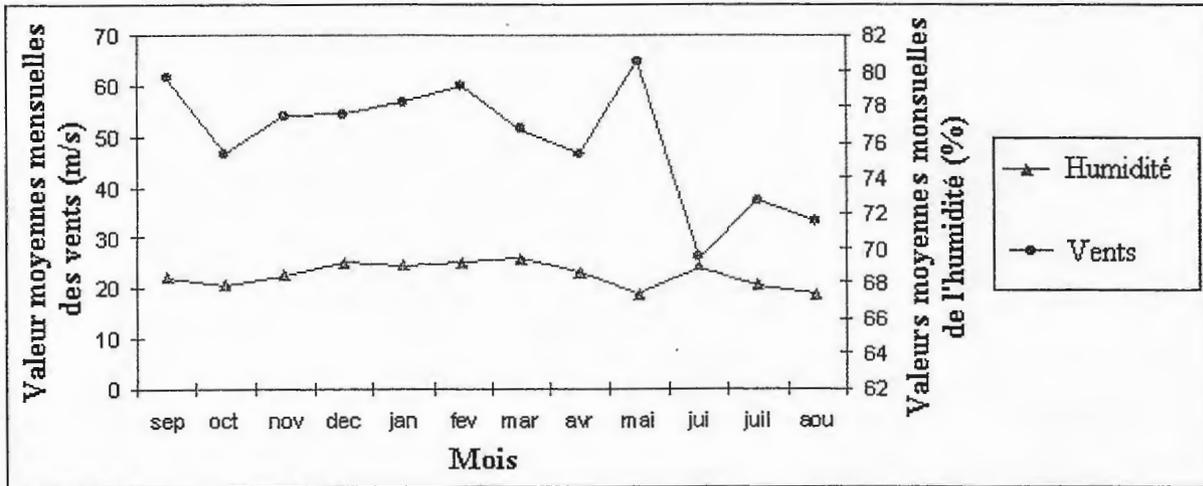


Figure II-10 : Valeurs moyennes mensuelles de l'humidité et du vent (en m/s).

➤ L'évaporation :

Le tableau II-9, résume les valeurs moyennes mensuelles de l'évaporation de la station d'Achouat.

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Moy
Valeurs moyennes	98.4	81.2	61.2	55.9	57.6	53.8	65.6	70.1	68.1	91.6	112.1	119.72	77.9

Tableau II-9 : Valeurs moyennes mensuelles de l'évaporation de la station d'Achouat. (en mm)

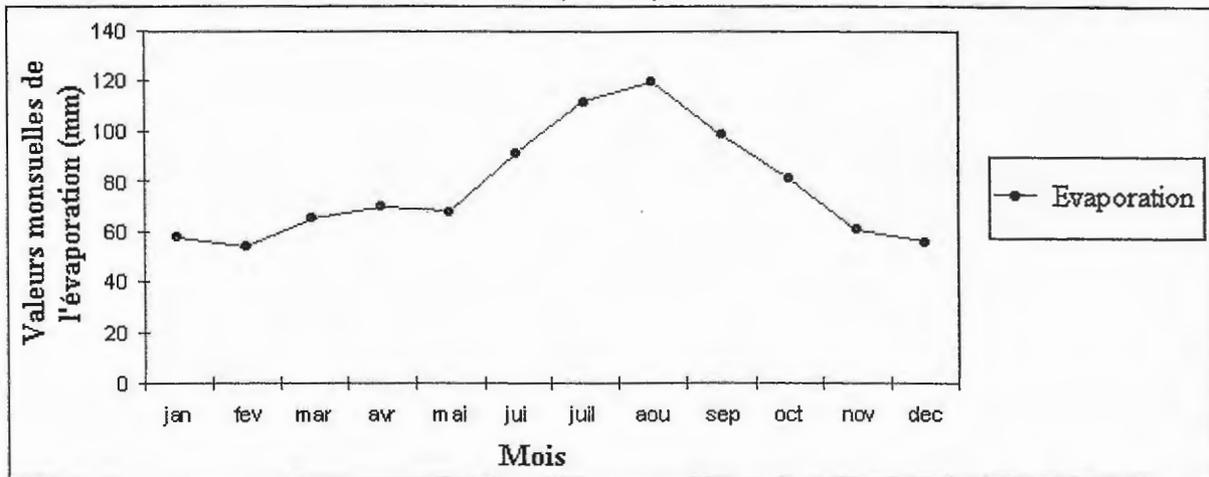


Figure II-11 : Valeurs moyennes mensuelles d'évaporation de la station d'Achouat (en mm).

Le maximum de l'évaporation est enregistré au mois d'août (119.72 mm) et le minimum au mois de février (53.8 mm).

### **II-3- CONCLUSION :**

Concernant la nature lithologique du sol de la région étudiée, on a vu que la majorité des affleurements géologiques couvrant le site sont généralement des argiles, des argiles marneuses ou des marnes, ce qui constitue un facteur de prédisposition prédominant dans le mécanisme de retrait-gonflement car il est spécifié à ce genre de sols.

Le traitement des données climatiques de la région de Harraten, surtout la précipitation, la température moyenne et mensuelle permettent de dire que leur climat est parmi les facteurs de déclenchement du risque retrait-gonflement car elle se caractérise par deux périodes différentes, l'une sèche à partir du mois de Juin jusqu'au mois de septembre, l'autre tempérée commençant à la fin du mois d'août et dure jusqu'à la fin d'avril.

Toutes ces caractéristiques peuvent influencer sur l'état des contraintes en présence d'eau. Ces variations peuvent s'exprimer soit par un gonflement (augmentation de volume), soit par un retrait (réduction de volume). Elles sont spécifiques de certains matériaux argileux, en particulier ceux appartenant au groupe des smectites (dont fait partie la montmorillonite).

Tout ceci est de la théorie donnée par la littérature spécialisée, notre but est de prouver ces informations grâce à la réalisation d'essais physiques, mécaniques et chimiques dans les laboratoires concernés afin de déterminer avec des valeurs chiffrées le potentiel de gonflement ainsi que les autres paramètres ayant une relation directe avec ce phénomène.

# CHAPITRE III

# IDENTIFICATION

# DES SOLS

**III-1- INTRODUCTION :**

Les paramètres qui provoquent le retrait-gonflement des argiles sont nombreux et ils se rapportent surtout à la minéralogie de ces sols. Il est donc possible d'identifier les sols expansifs en étudiant leur structure minéralogique. Seulement cette identification n'informe pas sur les paramètres quantitatifs le caractérisant. Par contre, il est possible d'identifier ce type de sols en déterminant un certain nombre de paramètres géotechniques simples qui sont en relation avec le caractère expansif des sols et qui sont déterminés, pour la plupart, lors de la phase de reconnaissance préliminaire.

**III-2- DETERMINATION DES PARAMETRES D'IDENTIFICATION DES SOLS AU LABORATOIRE :**

Les essais de laboratoire ont un rôle très important pour la détermination de plusieurs paramètres physiques et mécaniques indispensables pour l'étude géotechniques des sols, mesurés sur les échantillons intacts, remaniés ou reconstitués au laboratoire.

**III-2-1/ PARAMETRES PHYSIQUES :**

Ces paramètres nous permettant de déterminer la nature du sols, son état et ces propriétés physiques avec précision. Ces paramètres sont :

**III-2-1-1- Indice des vides (e) :**

Les vides des sols ne sont pas obligatoirement remplis d'eau de sorte qu'il est nécessaire de fixer l'état de serrage de squelette granulaire par des paramètres commodes.

L'indice des vides "e" est le rapport du volume des vides au volume des grains solides.

Il s'exprime par la relation suivante :

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Avec  $V_v$  : Volume des vides

$V_s$  : Volume des grains solides

Sable	0.5 à 1
Limon	0.4 à 1
Argile compactée	0.3 à 0.5
Argile moyenne	0.5 à 1
Argile molle, vase	1 à 4

Tableau III-1 : Valeurs de l'indice des vides en fonction de la nature lithologique du sol

**III-2-1-2- La porosité (n) :**

La porosité "n" est le rapport du volume des vides au volumes total.

$$n = \frac{V_v}{V_t}$$

Avec  $V_v$  : volume des vides

$V_t$  : Volume de l'échantillon du sol

Les valeurs de "n" sont comprises entre 0% et 100%. [29]

### III-2-1-3- Le degré de saturation ( $S_r$ ) :

S'exprime par la relation suivante :

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

Le degré de saturation indique le pourcentage du volume des vides occupé par l'eau dans un échantillon de sol déterminé. [29]

- Si le sol est complètement sec  $S_r = 0 \%$ .
- Si les pores sont complètement remplis d'eau le sol en est saturé  $S_r = 100 \%$ .

### III-2-1-4- La teneur en eau naturelle ( $W$ ) (Norme NF P 94-050):

C'est la caractéristique la plus facile à déterminer. La teneur en eau se détermine par deux pesées, une première pesée de l'échantillon à l'état initial donne le poids total " $W_t$ " de l'échantillon humide et une deuxième pesée après passage à l'étuve à 60°C pour les sols organique et à 105°C pour les sols inorganiques pendant 24 à 48 heures (évaporation de l'eau libre et de l'eau capillaire), donne la masse sèche de l'échantillon " $W_s$ ". La teneur en eau naturelle  $W \%$  est donc défini par la relation suivante [19] :

$$W = \frac{W_w}{W_s} = \frac{\text{Poids total} - \text{Poids des grains solides}}{\text{Poids des grains solides}} = \frac{W_t - W_s}{W_s} (\%)$$

La teneur en eau des sols est très variable, à titre d'exemple on a cette classification citée par [16]

W(%)	Etat du sol
0.1 à 25 %	Légèrement humide
25 à 50 %	Humide
50 à 75 %	mouillé
75 à 90 %	Détrompé
90 à 100%	saturé

Tableau III-2 : Classification du sol en fonction de la teneur en eau.

On peut avoir la nature du sol connaissant la valeur de la teneur en eau tableau III-3 :

Sable	2 à 15%
Limon	10 à 30%
Argile moyenne à raide	20 à 50 %
argile molle	50 à 100 %
Vases, et tourbe	80 à 300 %

Tableau III-3 : La nature lithologique du sol en fonction de la teneur en eau.

### III-2-1-5- Le poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) :

C'est le poids du sol sec par unité de volume, il s'exprime par la relation suivante :

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t}$$

On a généralement [20] :

$$\begin{aligned} \text{Sable} &= 14 \text{ à } 18 \text{ kN/m}^3, \\ \text{Argile} &= 10 \text{ à } 20 \text{ kN/m}^3. \end{aligned}$$

### III-2-1-6- Le poids volumique humide ( $\gamma_h$ ) :

Correspond à la masse volumique apparente, il s'exprime par la relation suivante [10]

$$\gamma_h = \frac{W_t}{V_t}$$

Avec  $W_t$  : Poids total

$V_t$  : Volume total

On a généralement [20] :

$$\begin{aligned} \text{Sable} &= 17 \text{ à } 20 \text{ kN/m}^3, \\ \text{Argile} &= 16 \text{ à } 22 \text{ kN/m}^3 \end{aligned}$$

### III-2-1-7- Le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

On note " $\gamma_w$ " le poids volumique de l'eau, qui sera toujours pris égal à  $10 \text{ KN/m}^3$  ce qui constitue une approximation tout à fait suffisante.[9]

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w}$$

Avec  $W_w$  : Poids d'eau.

$V_w$  : Volume d'eau

### III-2-1-8- Le poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) :

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad [25]$$

On a généralement [20] :

$$\text{Sable et argile} = 26 \text{ à } 27 \text{ kN/m}^3$$

**III-2-1-9- Le Poids volumique des sols saturés ( $\gamma_{sat}$ ) :**

Lorsque tous les vides sont remplis d'eau. [20]

$$\gamma_{Sat} = \frac{W_t}{V_t}$$

On a généralement [20] :

Sable et Argile = 19 à 22 kN/m<sup>3</sup>

**III-2-1-10- Le Poids volumique déjaugé ( $\gamma'$ ) :**

Il est pris en compte lorsque le sol est entièrement immergé. Il tient compte de la présence de l'eau qui remplit tous les vides et de la poussée d'Archimède [20] :

$$\gamma' = \gamma_{Sat} - \gamma_w$$

Sable et Argile = 9 à 12 kN/m<sup>3</sup>

**III-2-1-11- La densité ( $D_i$ ) :**

$$D_i = \frac{\gamma_i}{\gamma_w}$$

Par exemple : Densité humide  $D_h = \frac{\gamma_h}{\gamma_w}$

Densité sèche  $D_d = \frac{\gamma_d}{\gamma_w}$

On observe que le vocabulaire courant utilisé dans le milieu professionnel du B.T.P\* confond assez facilement poids volumique, masse volumique et densité [20].

B.T.P\* : Bâtiment Travaux Publics.

**► Relation entre les paramètres pondéraux utilisés pour les paramètres restants:**

Le petit schéma de la figure III-1 permet de retrouver facilement les relations suivantes (en considérant que le poids de l'air est nul). [11]

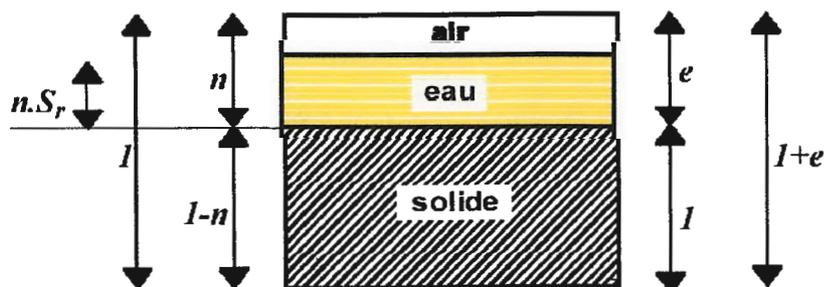


Figure III-1 : Schéma simplifié des trois phases du sol

$$n = \frac{e}{1+e}$$

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

$$e = W_{sat} \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad \text{donc } e = 2,7 \cdot W_{sat}$$

$$\gamma_s = \gamma_d (1 + e)$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + W_{sat} \frac{\gamma_s}{\gamma_w}}$$

$$\gamma_h = (1 - n) \gamma_s + n \cdot S_r \cdot \gamma_w$$

$$\gamma_{Sat} = (1 - n) \gamma_s + n \cdot \gamma_w \quad (\text{à saturation})$$

$$\gamma_{Sat} = \gamma_d + \left\{ 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \right\} \gamma_w$$

$$\gamma_d = (1 - n) \gamma_s$$

$$\gamma' = \gamma_{Sat} - \gamma_w = (1 + e)(\gamma_s - \gamma_w) = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1 + e}$$

### III-2-2- ESSAIS PROPRES AUX SOLS GRENUS ET AUX SOLS FINS :

#### III-2-2-1- L'Analyse Granulométrique :

L'Analyse granulométrique a pour but de déterminer les pourcentages des grains de différentes tailles dans les sols.

Elle s'effectue par :

- Tamisage (norme NF P94-056) pour les grains d'un diamètre  $\geq 80 \mu\text{m}$ .
- Sédimentation (norme NF P94-055) pour les grains les plus fins (proportion inférieure à 0.1mm) L'essai consiste à laisser une suspension de sol s'imbiber dans une éprouvette pleine d'une solution défloculante d'eau distillée plus 5% d'héxamétaphosphate de sodium. Plus les grains sont fins, plus la vitesse de décantation est plus lente conformément à la loi de **N. Stokes** sur la vitesse de chute de billes sphériques dans l'eau d'après la formule suivante : [22]

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\mu} D^2$$

Avec :

v : la vitesse de décantation

D : le diamètre des particules.

$\mu$  : la viscosité du liquide.

La mesure de la densité de la suspension à des intervalles de temps permet de calculer la proportion de chaque diamètre.

Les résultats obtenus sont exprimés sous forme de courbes appelées *courbes granulométriques* qui donnent le pourcentage cumulé d'éléments de dimensions inférieures à chaque diamètre.

La figure ci-après présente quelques courbes caractéristiques (figure III-2) : [22]

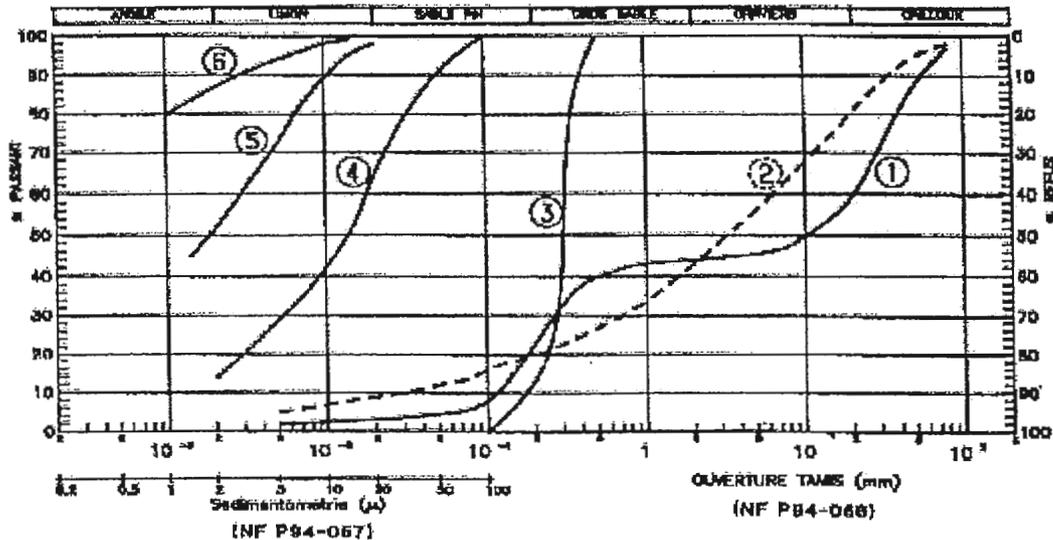


Figure III-2 : Exemples des courbes granulométriques [22]

- Courbe 1 : Granulométrie étalée et discontinue (Alluvions, Sables, Gravier...).
- Courbe 2 : Granulométrie étalée et continue.
- Courbe 3 : Granulométrie serrée.
- Courbe 4 : Limon argileux.
- Courbe 5 : Argile limoneuse.
- Courbe 6 : Argile pratiquement pure (bentonite...), les sols comportant 87% d'argile inférieure à 2 mm

Les courbes granulométriques contribuent à l'identification du matériau, et permet de prévoir certaines de ces propriétés. Elles sont notamment utilisées pour la classification des sols grenus qui nécessitent le calcul de deux indices de forme. [25]

➤ **Le Coefficient d'uniformité ( $C_u$ ) :**

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \begin{cases} - \text{ si } C_u > 2 : \text{ Matériau à granulométrie étalée} \\ - \text{ si } C_u < 2 : \text{ Matériau granulométrie serrée ou uniforme} \end{cases}$$

➤ **Coefficient de courbure ( $C_c$ ):**

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$$

Avec :

$D_{10}$  : diamètre des garnis en (mm) correspondant à 10 % des passants.

$D_{30}$  : diamètre des garnis correspondant à 30 % des passants.

$D_{60}$  : diamètre des garnis correspondant à 60 % des passants.

Ces paramètres sont utilisés dans les différentes classifications telle que la classification LCPC

### III-2-2-2- Equivalent de Sable (ES) (norme NF P18-598) :

L'essai d'équivalent de sable désigné par le symbole ES, a pour but d'évaluer la proportion de sable vrai contenu dans un sol plus ou moins mélangé avec des fines et dont la présence en quantité notable peut modifier le comportement mécanique.

C'est un essai empirique, simple, rapide et nécessitant un appareillage très élémentaire, il permet de contrôler sur place la constance de certaines qualités de matériaux mis en oeuvre sur chantier à une cadence rapide. Il est très largement utilisé, en particulier en technique routière.

L'équivalent de sable désigné par "ES<sub>p</sub>" et "ES<sub>v</sub>" selon la méthode de mesure (mesure au piston ou visuelle). On a toujours ES<sub>p</sub> < ES<sub>v</sub>, et on prend en compte la valeur moyenne entre eux.

A l'aide du piston :

$$ES_p = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

Et visuelle :

$$ES_v = \frac{h_2'}{h_1} \times 100$$

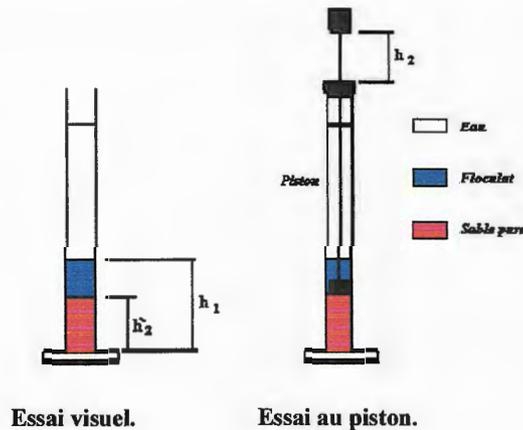


Figure III-3 : Essai d'équivalent de sable.

Avec :

$h_1$  : hauteur du niveau supérieur du flocculats par apport à la base.

$h_2$  : hauteur de la partie sédimentée avec utilisation du piston par apport à la base.

$h_2'$  : hauteur de la partie sédimentée sans utilisé le piston par apport à la base.

La valeur de l'équivalent de sable chute très rapidement dès qu'il y a un faible pourcentage de limon ou d'argile dans le sol pulvérulent. [20]

ES	Nature et qualité du sable
< 60	"Sable argileux" risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité
60 ≤ ES < 70	"Sable légèrement argileux" de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
70 ≤ ES < 80	"Sable propre" à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ES > 80	"Sable très propre" l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Tableau III-4 : Quelques valeurs d'équivalent de sable.

### III-2-2-3- Les Limites d'Atterberg :

Compte tenue de leur structure, les argiles ont la propriété d'absorber une quantité d'eau très importante a long terme, ou au contraire, de se dessécher, ceux-ci est en fonction des conditions aux qu'elles soumises. Quelque soit la nature des argiles, celles-ci malaxées avec

une quantité d'eau, se transforment en boue (argile à un état liquide). Au contraire, si les argiles sont suffisamment desséchées, les grains sont très serrés, et les liaisons deviennent très intenses (les argiles dans un état solide). Entre ces deux états extrêmes, l'argile est malléable (les argiles dans un état plastique). (Figure III-4)

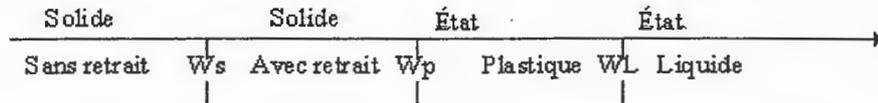


Figure III-4 : Etats des sols.

La consistance d'un sol varie en fonction de la teneur en eau. On définit des limites pour qualifier ces différents états, celles-ci sont pour des teneurs en eau croissante :

- La limite de la plasticité  $W_p$  qui sépare l'état solide de l'état plastique.
- La limite de liquidité  $W_L$  qui sépare l'état plastique de l'état liquide.
- La limite de retrait  $W_s$  entre un état solide sans retrait et d'un état solide avec retrait. [25]

➤ *La limite de liquidité ( $W_L$ ) :*

Méthode de Casagrande (**détermination à la coupelle –norme NF P 94-051**).

Pour déterminer la limite de liquidité, on étend sur une coupelle une couche du matériau dans laquelle on trace une rainure, au moyen d'un outil en forme de V (figure III-5). On réalise à la coupelle des chocs semblables en comptant le nombre de chocs nécessaires pour fermer la rainure sur 1 cm, on mesure alors la teneur en eau de la pâte. [20]

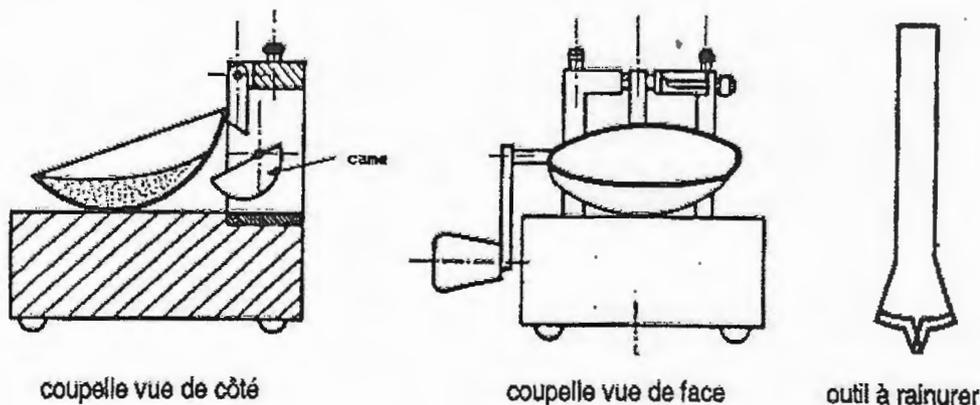


Figure III-5 : Appareillage pour la détermination de la limite de liquidité. [20]

Par définition la, limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à une fermeture en 25 chocs. Si on étudie la relation qui lie le nombre de chocs  $N$  à la teneur en eau  $W$ , on constate que la courbe représentative de cette relation est une droite en coordonnées semi-logarithmiques, lorsque le nombre de chocs est compris entre 15 et 35. On réalise cinq essais. La droite la plus représentative est en suite tracée à partir des points expérimentaux (Figure III-5) [20]

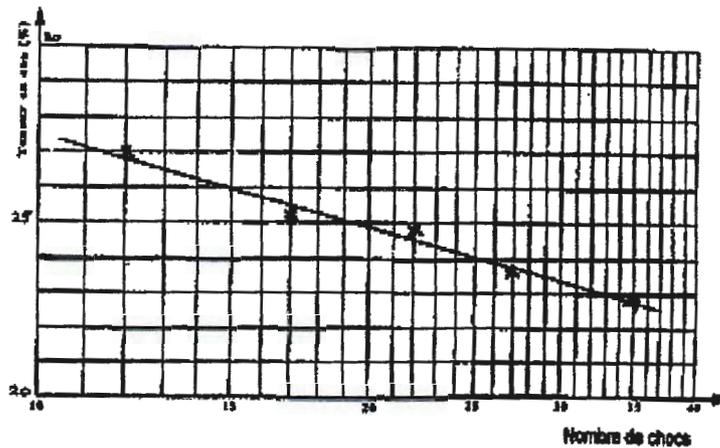


Figure III-6 : Limite de liquidité

Pour le même intervalle des valeurs de N, on a :

$$W_L = W \left( \frac{N}{25} \right)^{0,121}$$

Cette formule représente également assez bien les résultats expérimentaux. On peut donc employer avec prudence cette relation qui permet de déterminer la limite de liquidité à l'aide d'une ou deux mesures seulement.

➤ **La limite de plasticité (Wp) (norme NF P 94-051) :**

A partir d'une boulette d'échantillon qu'on roule sur marbre à la main, ou avec une plaque en forme un rouleau qu'on amincie progressivement jusqu'à obtenir un bâton de 3 mm de diamètre de 10 à 15 cm de longueur. Par convention la limite de plasticité est atteinte lorsque le rouleau soulever par son milieu et se fissure ou se casse en parties de 1 à 2 cm. On exécute en général deux essais pour déterminer cette limite.

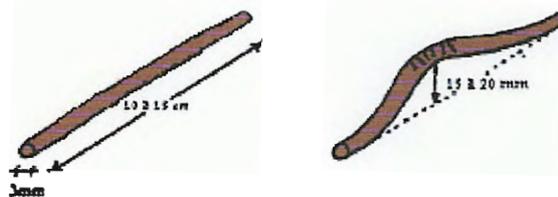


Figure III-7 : Détermination de la limite de plasticité [20]

➤ **Indice de plasticité (Ip) (norme NF P 94-051) :**

L'indice de plasticité noté Ip est le paramètre le plus couramment utilisé pour caractériser l'argilosité des sols. Il s'exprime par la relation:

$$I_p = W_L - W_p$$

Il mesure l'étendue du domaine de plasticité, domaine pendant lequel on peut travailler le sol. Il a une grande importance dans tous les problèmes de, géotechnique routière ; il est préférable qu'il soit le plus grand possible.

Le GTR 92 (guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme septembre 1992) retient pour Ip les seuils d'argilosité suivants :

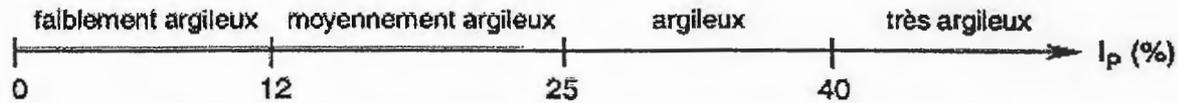


Figure III-8 : Seuils d'argilosité des sols cité par le GTR 92 [20]

L'indice de plasticité permet de définir le degré de plasticité d'un sol (tableau III-5) [25]

Indice de plasticité	Degré de plasticité
0 - 5	Non plastique
5 - 15	Peu plastique
15 - 40	Plastique
>40	Très plastique

Tableau III-5 : Degré de plasticité.

➤ **Indice de consistance (Ic) :**

L'indice de consistance ou teneur en eau relative par rapport aux limites de liquidité et la plasticité, il donne une idée de la structure des argiles du sol [25]

$$Ic = \frac{WL - W}{WL - Wp} \quad \text{ou} \quad Ic = \frac{WL - W}{Ip}$$

➤ **Indice de liquidité (IL) :**

$$IL = \frac{Wp - W}{Ip}$$

➤ **Coefficient d'activité (A) :**

$$A = \frac{Ip}{\text{fraction argileuse} < \text{à } 2\mu\text{m}} \quad [17]$$

Où la fraction argileuse désigne le pourcentage en masse des particules inférieures à 2  $\mu\text{m}$ . [29]

Pour les argiles normales, le coefficient d'activité est de 0,75 à 1,25 ; pour les argiles actives, il est supérieur à 1,25 et atteint 2 pour les montmorillonites ; pour les argiles inactives (kaolinites), il est un peu inférieur à 0,75. [8]

➤ **La limite de retrait (Ws) :**

Noté "Ws" qui sépare l'état solide avec retrait de l'état solide sans retrait. [20]

C'est la teneur en eau à partir de laquelle la diminution de teneur ne s'accompagne plus de diminution de volume de l'argile. En de ça de cette teneur en eau, il y a donc fissuration par dessiccation. [21]

C'est une valeur très importante, car elle représente donc dans un processus d'évaporation et de dessiccation.

La détermination de cette limite en laboratoire est assez difficile, car leur procédure d'essai demande un matériel et des produits coûteux (Mercure).

Vue la non disponibilité du mercure et du matériel accompagnant, nous avons choisi la méthode de la variation de teneur en eau et du volume d'argile, la limite de retrait prise étant celle obtenue après dessiccation de l'échantillon et apparition des fissures très nettes.

➤ **Indice de retrait (Is) :**

L'indice de retrait est obtenu par la relation suivante :

$$I_s = W_L - W_s$$

La limite de retrait et l'indice de retrait apparaissent aussi comme des éléments fondamentaux pour l'étude des variations de volume des sols. [17]

**III-2-2-4- Essai au bleu de méthylène :**

**Valeur de bleu de méthylène VBS (norme NF P 94-068)**

Il s'agit aussi d'un paramètre permettant de caractériser l'argilosité d'un sol. Son application est récente. Ce paramètre noté VBS (valeur de bleu du sol), représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules argileuses contenues dans la fraction du sol considéré c'est donc une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol. [20]

L'essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène dans une suspension de sol maintenue en agitation. On prélève périodiquement une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier chromatographique. Dès qu'une auréole bleutée se développe autour de la tache ainsi formée on peut considérer que l'adsorption du bleu de méthylène sur les particules d'argile est terminée. En effet, c'est l'excès de bleu de méthylène qui apparaît dans l'auréole. La VBS traduit globalement la quantité et la qualité (activité) de la fraction argileuse du sol. [21]

Elle s'exprime en grammes de bleu pour 100g de sol par la formule :

$$VBS = \frac{V}{F}$$

Avec V : étant le volume final de solution injectée en centimètres cubes.

F : Poids sec de fines en grammes de la prise d'essai

**Ordre de grandeur :**

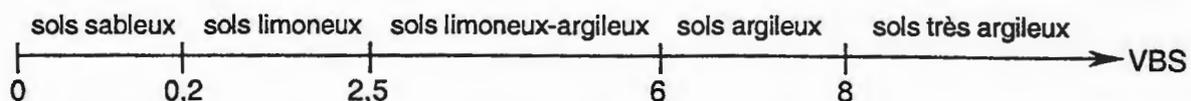


Figure III-9 : Valeurs de bleu des sols. [20]

**III-2-3- CLASSIFICATION DES SOLS :**

Classer un sol consiste à l'identifier grâce à des mesures quantitatives et à lui donner un nom afin de le rattacher à un groupe de sols de caractéristiques semblables.

Apparentée à la classification américaine U.S.C.S (Unified Soil Classification System) la Classification des Laboratoires des Ponts et Chaussées (L.P.C) utilisée en France s'appuie essentiellement sur l'analyse granulométrique et sur les caractéristiques de plasticité de la fraction fine, complétée par des essais très simples (couleur, odeur, effets de l'eau, etc.). [20]

On distingue trois grands types de sols :

- Les sols grenus : plus de 50 % des éléments en poids > 80 µm,
- Les sols fins : plus de 50 % des éléments en poids < 80 µm,
- Les sols organiques dont la teneur en matière organique est > à 10%

➤ **Sols grenus :**

La classification des sols grenus se fait par la granulométrie et les limites d'Atterberg. Elle est précisée dans le tableau ci-après (Tableau III-6) [20]

Définitions		Symboles	Conditions	Désignations géotechniques
<b>GRAVES</b>	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	<b>Gb</b> $c_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ et $c_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} D_{60}}$ compris entre 1 et 3	grave propre bien graduée
			<b>Gm</b> Une des conditions de Gb non satisfaite	grave propre mal graduée
	plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	<b>GL</b> Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A	grave limoneuse	
		<b>GA</b> Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A	grave argileuse	
<b>SABLES</b>	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	<b>Sb</b> $c_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $c_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} D_{60}}$ compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué
			<b>Sm</b> Une des conditions de Sb non satisfaite	sable propre mal gradué
	plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	<b>SL</b> Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A	sable limoneux	
		<b>SA</b> Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A	sable argileux	
<p>Lorsque <math>5\% &lt; \% \text{ inférieur à } 0,08 \text{ mm} &lt; 12\%</math>, on utilise un double symbole</p> <p>- pour les graves : Gb-GL Gb-GA Gm-GL Gm-GA</p> <p>- pour les sables : Sb-SL Sb-SA Sm-SL Sm-SA</p> <p>La ligne A du diagramme de plasticité – voir figure III-9</p>				

Tableau III-6 : Classification L.P.C des sols grenus.

➤ **Sols fins :**

La classification des sols fins utilise les critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg. Elle est précisée dans le diagramme de plasticité ci-après (Figure III-9). [20]

Selon la position dans le diagramme deux points représentatifs ayant pour abscisse la limite de liquidité et pour ordonnée l'indice de plasticité, on définit cinq grandes catégories principales :

- Les limons très plastiques : Lt
- Les limons peu plastiques : Lp
- Les argiles très plastiques : At
- Les argiles peu plastiques : Ap
- Les sols organiques très plastiques : Ot

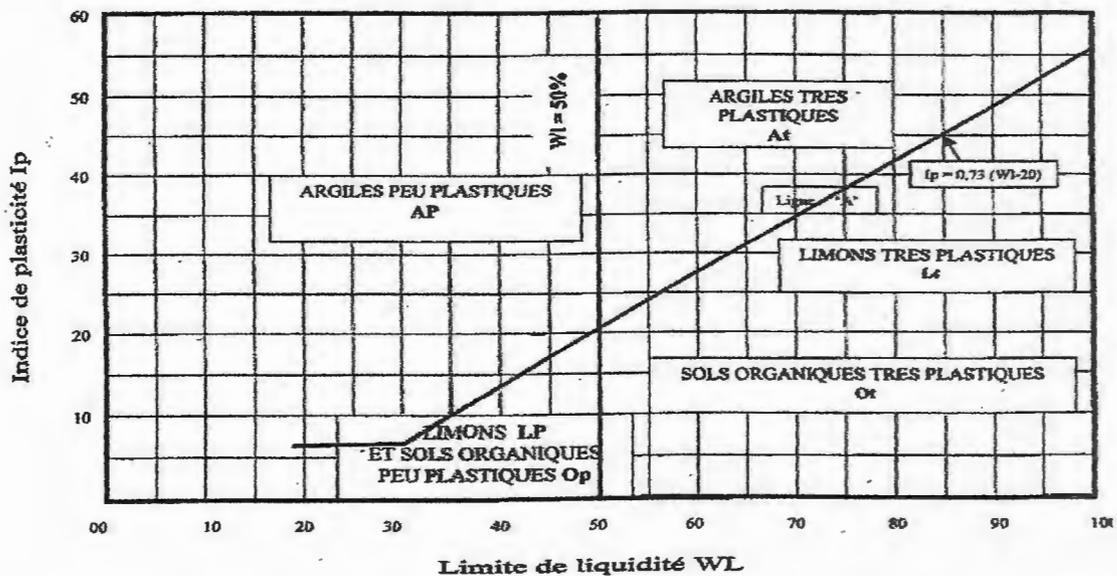


Figure III-10 : Diagramme de plasticité de Casagrande [22]

➤ *Sols organiques :*

Teneur en matière organique (%)	Désignation géotechnique		
0 - 3	Sol inorganique		
3 - 10	Sol faiblement organique	fO	Vase
10 - 30	Sol moyenne organique	mO	Sol tourbeux
> 30	Sol très organique	tO	Tourbe

Tableau III-7 : Classification des sols organiques selon L.P.C [20]

\* La classification normalisée NFP 11.300 de septembre 1992 (tableau III-8) qui remplace l'ancienne classification dite RTR (Recommandations pour les Terrassements Routiers) réalisée par le LCPC et le SETRA, très utilisée en géotechnique routière et qui donne des renseignements pratiques sur l'aptitude des sols à être utilisés en remblai. Les sols d'indice faible (par exemple A1) sont les plus sensibles à l'eau. [11]

<b>Sols FINS</b>  <b>A</b>  $d_{max} \leq 50$ mm et $d_{35} < 0,08$ mm	$VBS \leq 2,5$ * ou $IP \leq 12$	<b>A<sub>1</sub></b> : limons peu plastiques, siltés alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...
	$12 < IP \leq 25$ * ou $2,5 < VBS \leq 6$	<b>A<sub>2</sub></b> : sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arènes...
	$25 < IP \leq 40$ * ou $6 < VBS \leq 8$	<b>A<sub>3</sub></b> : argiles et argiles mameuses, limons très plastiques...
	$IP > 40$ * ou $VBS > 8$	<b>A<sub>4</sub></b> : argiles et argiles mameuses très plastiques
<b>Sols sableux</b> ou <b>graveleux avec fines</b>  <b>B</b>  $d_{max} \leq 50$ mm et $d_{35} \geq 0,08$ mm	$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} < 2$ mm $0,1 \leq VBS \leq 0,2$	<b>B<sub>1</sub></b> : sables silteux...
	$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} < 2$ mm $VBS > 0,2$	<b>B<sub>2</sub></b> : sables argileux (peu argileux)...
	$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} \geq 2$ mm $0,1 \leq VBS \leq 0,2$	<b>B<sub>3</sub></b> : graves silteuses...
	$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} \geq 2$ mm $VBS > 0,2$	<b>B<sub>4</sub></b> : graves argileuses (peu argileuses)...
	$d_{12} < 0,08$ mm $\leq d_{35}$ , $VBS \leq 1,5$ * ou $IP \leq 12$	<b>B<sub>5</sub></b> : sables et graves très silteux...
	$d_{12} < 0,08$ mm $\leq d_{35}$ , $VBS > 1,5$ * ou $IP > 12$	<b>B<sub>6</sub></b> : sables et graves argileux à très argileux.
<b>Sols comportant des fines et des gros éléments</b>  <b>C</b>  $d_{max} > 50$ mm	$d_{12} < 0,08$ mm ou $d_{12} > 0,08$ mm et $VBS > 0,1$	<b>C</b> : Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, moraines, alluvions grossières.
<b>Sols insensibles</b>  à l'eau  <b>D</b>  $VBS \leq 0,1$ $d_{12} \geq 0,08$ mm	$d_{max} \leq 50$ mm $d_{70} < 2$ mm	<b>D<sub>1</sub></b> : sables alluvionnaires propres, sables de dune...
	$d_{max} \leq 50$ mm $d_{70} \geq 2$ mm	<b>D<sub>2</sub></b> : graves alluvionnaires propres, sables...
	$d_{max} > 50$ mm	<b>D<sub>3</sub></b> : graves alluvionnaires grossières propres, dépôts glaciaires...
* paramètre dont le choix est à privilégier.		

Tableau III-8 : classification des sols (NFP 11-300) - Tableau simplifié

### III-2-4-ETUDE MINERALOGIQUE :

L'analyse minéralogique fait appel à l'observation au microscope électronique à, l'étude par diffraction des rayons X, à l'analyse chimique qui a porté sur la détermination de la nature chimique du sols par une analyse quantitative réalisée par fluorescence X, ou avec d'autres méthodes gravimétriques et volumétriques pour la détermination des différentes phases minéralogiques constituant le sol.

L'analyse minéralogique d'un sol est généralement un essai qui apporte beaucoup d'informations car le comportement des sols fins est fonction de leur composition minéralogique. Par exemple une forte teneur en montmorillonite indiquera un sol très sensible à l'eau pouvant donner lieu à des gonflements ou des retraites importants. [20]

#### III-2-4-1-L'étude par diffraction des rayons X :

Cette étude a pour but de déterminer les différents minéraux argileux constituant le sol étudié. En faisant traverser une couche mince du sol en poudre par un faisceau de rayons X qui arrive sous une incidence variable, on enregistre les angles de diffractions qui correspondent aux espaces inter-réticulaires, c'est-à-dire à la dimension de la maille moléculaire. Chaque type d'argile est ainsi défini par la présence de pics sur les enregistrements, à des positions bien déterminées, par exemple  $10.5 \text{ \AA}$  pour l'Attapulgite,  $7 \text{ \AA}$  pour la Kaolinite,  $10 \text{ \AA}$  pour l'Illite,  $12 \text{ \AA}$  pour la Sépiolite. La plupart du temps, les différentes variétés ne se trouvent pas pures dans la nature, mais en mélange entre elles, contaminées par du sable, du calcaire, de la dolomie, des éléments trace, des matières organiques, etc. [2]

Le schéma ci-dessous montre le principe de diffractomètre de rayon X :

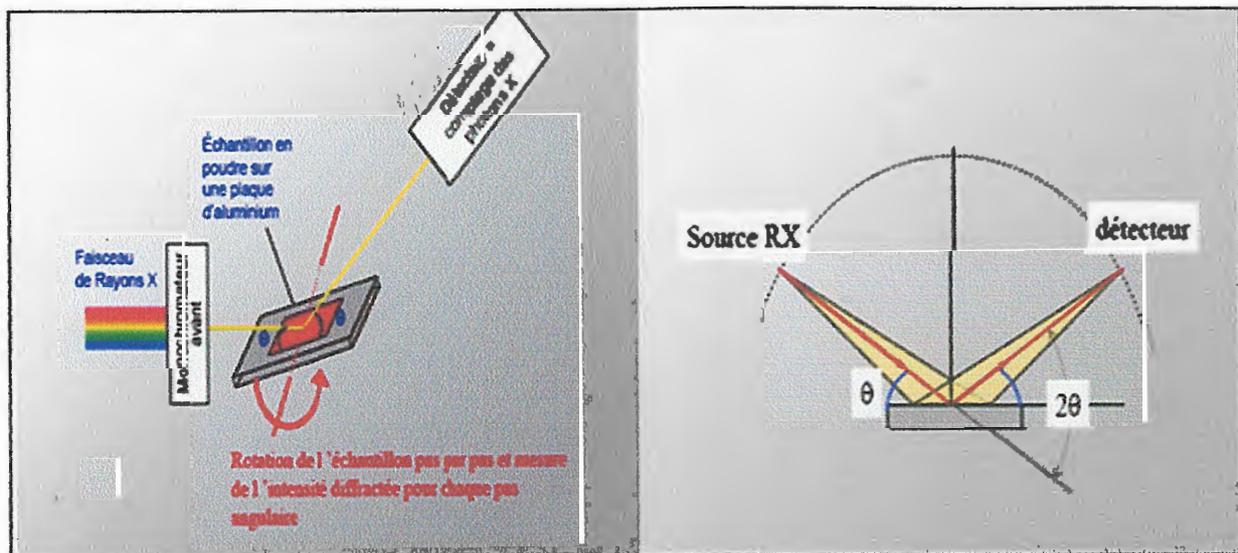


Figure III-11 : Schéma de principe de diffractomètre de rayon X. [2]

Le résultat de cette expérience est obtenu sous forme d'un graphe appelé « Le diffractogramme » (Figure ci-après).

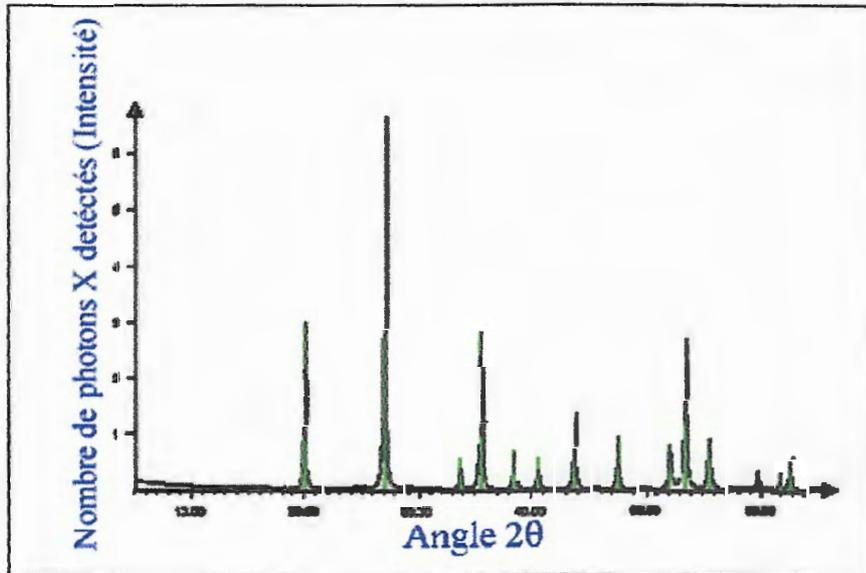


Figure III-12 : Résultat d'une expérience de diffraction des rayons X

L'explication des différents pics se fait à l'aide de leurs positions et de leurs intensités relatives qui permettent de remonter à la nature du minéral grâce à des bases de données Appelées « Les fiches A.S.T.M », exemple sur ces fiches voir figure III-12.

PDF # 461045, Wavelength = 1.540598 (Å)

46-1045 Quality *	SiO2
CAS Number:	Silicon Oxide
Molecular Weight: 60.08	Ref: Kern, A., Eysel, W., Mineralogisch-Petrograph. Inst., Univ. Heidelberg, Germany, ICDD Grant-in-Aid, (1993)
Volume[CD]: 113.01	
Dx: 2.649 Dnc: 2.660	
S.G.: P3221 (154)	
Cell Parameters:	
a 4.913 b c 5.405	
α β γ	
SS./FOM: F30=539(0018, 31)	
I/ICor: 3.41	
Ract: CuKα1	
Lambda: 1.5405981	
Filter: Ge	
d-spx: diffractometer	
Mineral Name:	
Quartz, syn	

d(Å)	int-f	h	k	l	d(Å)	int-f	h	k	l	d(Å)	int-f	h	k	l
4.2549	16	1	0	0	1.2283	1	2	2	0	.91815	<1	3	2	2
3.3434	100	1	0	1	1.1998	2	2	1	3	.91606	2	4	0	3
2.4568	9	1	1	0	1.1977	<1	2	2	1	.91517	2	4	1	1
2.2814	8	1	0	2	1.1839	2	1	1	4	.90889	<1	2	2	4
2.2361	4	1	1	1	1.1801	2	3	1	0	.90085	<1	0	0	6
2.1277	6	2	0	0	1.1529	1	3	1	1	.89718	<1	2	1	5
1.9798	4	2	0	1	1.1406	<1	2	0	4	.88891	1	3	1	4
1.8179	13	1	1	2	1.1145	<1	3	0	3	.88135	<1	1	0	6
1.8017	<1	0	0	3	1.0815	2	3	1	2	.87816	<1	4	1	2
1.6717	4	2	0	2	1.0638	<1	4	0	0	.85979	<1	3	0	5
1.6591	2	1	0	3	1.0477	1	1	0	5	.84583	<1	1	1	6
1.6082	<1	2	1	0	1.0438	<1	4	0	1	.84074	<1	5	0	1
1.5415	9	2	1	1	1.0346	1	2	1	4	.83591	<1	4	0	4
1.4528	2	1	1	3	1.0149	1	2	2	3	.82956	1	2	0	6
1.4184	<1	3	0	0	.98957	<1	1	1	5	.82539	2	4	1	3
1.3821	6	2	1	2	.98724	<1	3	1	3	.81891	<1	3	3	0
1.3749	7	2	0	3	.97834	<1	3	0	4	.81168	3	5	0	2
1.3718	5	3	0	1	.97617	<1	3	2	0	.80966	<1	3	3	1
1.2879	2	1	0	4	.96078	<1	3	2	1					
1.2559	3	3	0	2	.92852	<1	4	1	0					

Figure III-13 : Exemple de fiche ASTM

► **Autres analyses :**

➤ **Teneur en carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>) :**

La teneur en CaCO<sub>3</sub> d'un sol fin est un bon indice de sa résistance mécanique et de sa Sensibilité à l'eau. Suivant la valeur de cette teneur, le comportement du sol évolue depuis celui d'une argile jusqu'à celui d'une roche, la valeur de transition étant aux alentours de 60-70 %. [20]

Teneur en CaCO <sub>3</sub> (%)	Désignation géotechnique
0 - 10	Argile
10 - 30	Argile marnéuse
30 - 70	Marné
70 - 90	Calcaire marnéux
90 - 100	Calcaire
	} Sols
	} Roches

Tableau III-9 : Teneur en CaCO<sub>3</sub> en fonction de la nature lithologique.

➤ **Teneur en matière organique :**

Les matières organiques sont très variées et il est de ce fait quasiment impossible de déterminer par des essais simples chacune des variétés. [20]

**III-2-5- ESSAIS MECANIQUES :**

Pour notre étude sur sols gonflants, les essais mécaniques jouent un rôle très important dans la caractérisation de ces derniers. En toute rigueur, les paramètres mécaniques à déterminer pour caractériser les terrains gonflants sont résumés dans deux essais essentiels qui sont, l'essai de compressibilité à l'oedomètre et l'essai de gonflement libre. L'application de ces deux essais en laboratoire se fait à l'aide d'un appareil appelé « l'oedomètre », qui contient une cellule permet de mesurer le potentiel de gonflement (Figure III-13).



Bâti de consolidation

Levier

Surcharge

Photo d'exemple de bâtis oedométriques.



Comparteur

Capteur de déplacement

Embase

Cellule de mesure de la pression gonflement.



Liquide d'imbibition

Bague qui contient l'éprouvette

Pierre poreuse

Anneau

Photo de détail Cellule de mesure de la pression gonflement

Figure III-14 : Différents parties d'un appareil oedométrique.

### III-2-5-1- Essai de compressibilité à l'oedomètre :

L'essai de compressibilité à l'oedomètre, ou l'essai fondamental, est une application directe de la théorie de consolidation. Il permet d'évaluer l'amplitude des tassements ainsi que leur évolution.

- L'essai de compressibilité à l'oedomètre (norme NF P94-090) a pour but d'étudier la consolidation d'un échantillon de sols intacts ou remaniés soumis à des charges verticales, drainés suivant cette direction et maintenus latéralement par une paroi rigide. [26]

L'établissement de la courbe de compressibilité se fait de la façon suivante : des contraintes normales sont appliquées à l'échantillon par paliers successifs en présence d'eau, le tassement (ou le gonflement au déchargement) est mesuré sous chaque palier de chargement jusqu'à ce qu'une stabilisation soit pratiquement atteinte. La durée d'application de chaque charge est généralement de 24 heures. [10]

Deux procédures différentes de chargement sont utilisées selon le comportement du sol sous la première charge appliquée (chargement faible  $\leq 10\text{Kpa}$ ) :

- sols non gonflants à la mise en eau (Figure III-14.a)
- sols gonflants à la mise en eau (Figure III-14.b)
- Si le sol est non gonflant, deux cycles de chargement / déchargements sont réalisés.
- Si le sol a tendance à gonfler sous les faibles charges. La contrainte appliquée est immédiatement augmentée jusqu'à ce qu'une amorce de tassement apparaisse, ceci afin d'empêcher le gonflement de se produire.

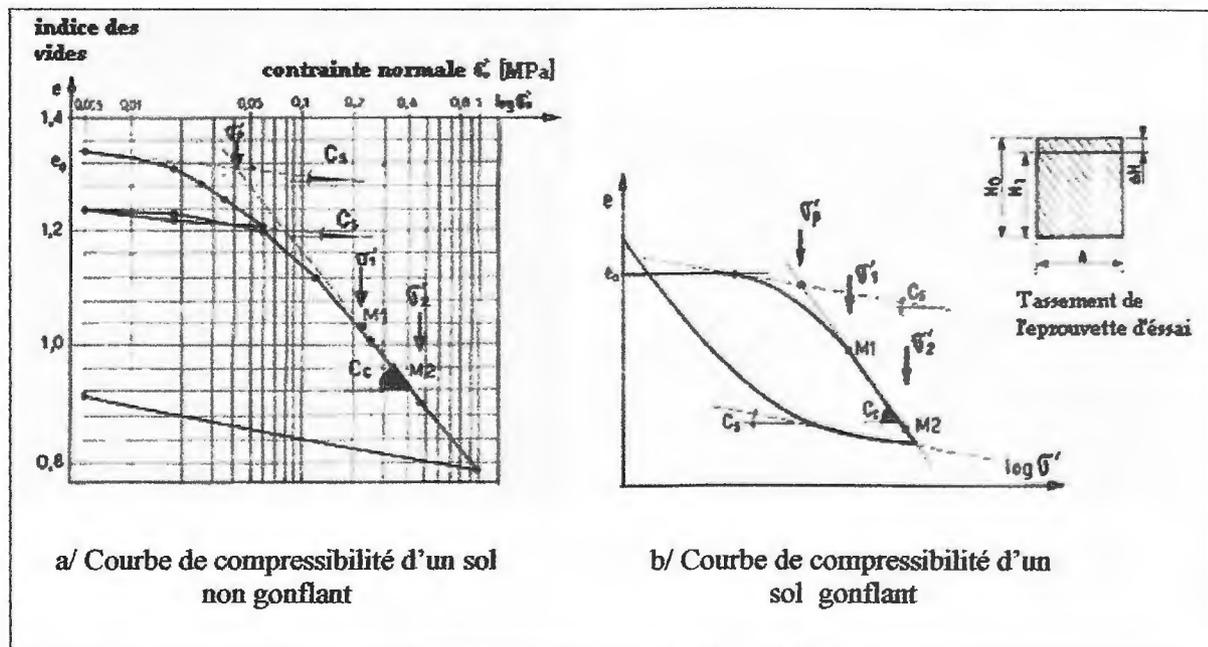


Figure III-15 : Exemple des courbes de compressibilité pour les sols

Les résultats sont présentés sous forme de variations de l'indice des vides du sol "e" en fonction de  $\text{Log } \sigma'$ . Pour tracer ce graphe, il faut suivre les différents calculs qui consistent à examiner la feuille de résultats jointe à ce mode opératoire. Quelques indications seulement seront données ici.

La hauteur de solide équivalente ou hauteur des pleins ( $h_p$ ) est la quantité, constante au cours de l'essai, [15]

$$h_p = \frac{W_s}{G.S.\gamma_w}$$

Où :

$W_s$  : est le poids sec du solide, obtenu par pesée de l'éprouvette après passage à l'étuve.

$G$  : densité relative du solide est prise égale à  $(2,65 \text{ g/cm}^3)$  ou mesurée expérimentalement dans les cas particuliers.

$\gamma_w$  :  $1 \text{ g/cm}^3$  ( $10 \text{ dyn/cm}^3$ ) poids spécifique de l'eau.

$S$  : Surface du moule.

Soit ( $h$ ), la hauteur de l'éprouvette à un moment donné.

L'indice des vides est alors [15] :

$$e = \frac{h - h_p}{h_p}$$

La courbe de compressibilité est la courbe ( $e, \log \sigma'$ ) ;  $e$  est l'indice des vides de l'échantillon correspondant à la pression effective  $\sigma'$  (figure III-15) [15]

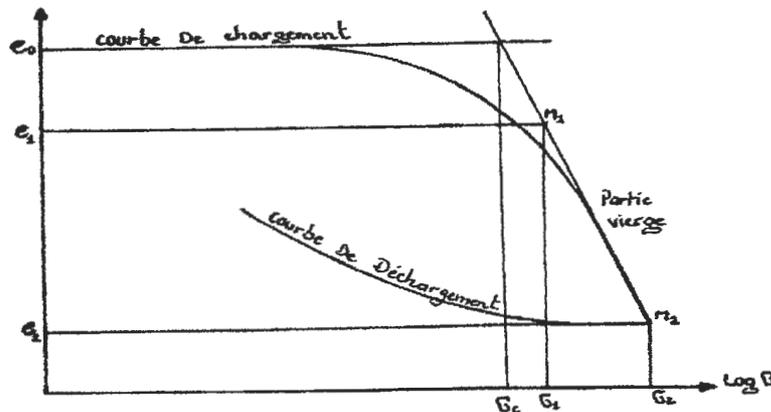


Figure III-16 : Courbe oedométrique en coordonnées semi logarithmique.

#### ► Caractéristiques de compressibilité :

L'allure des courbes de compressibilité donne des indications précieuses sur le remaniement éventuel de l'éprouvette d'essai, l'histoire du sol et son comportement sous charge. Plusieurs caractéristiques du sol sont définies à partir de ces courbes tel que : la contrainte effective de préconsolidation, l'indice de compression, l'indice de gonflement, les modules oedométriques sécants. [10]

- **Indice de compression ( $C_c$ ) :** La courbe ( $e, \log \sigma'$ ) présente le plus souvent une partie droite horizontale suivie d'une partie courbe, puis à nouveau d'une partie généralement droite et inclinée.

Par définition l'indice de compression  $C_c$  et la pente de cette droite inclinée. [15]

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta(\log \sigma')}$$

$C_c$  ; est déterminé par la différence des valeurs de l'indice des vides  $e$  correspondant à un cycle logarithmique.

On peut classer la compressibilité d'un sol, en fonction de  $C_c / (1 + e_0)$  comme suit :

$C_c / (1 + e_0)$	Etat du sol
< 0,015	sol incompressible.
0,015 - 0,05	sol peu compressible.
0,05 - 0,20	sol moyennement compressible.
> 0,20	sol très compressible.

Tableau III-10 : Classification des sols suivant leur indice de compression. [22]

Comme, on peu classer la compressibilité d'un sol, en fonction de  $C_c$  :

$C_c$	Etat du sol
< 0,020	sol incompressible.
0,020 - 0,050	sol très peu compressible.
0,050 - 0,100	sol peu compressible.
0,100 - 0,200	sol moyennement compressible.
0,200 - 0,300	sol assez fortement compressible.
0,300 - 0,500	sol très compressible.
> 0,500	sol extrêmement compressible.

Tableau III-11 : Classification des sols en fonction de  $C_c$  [22]

- **Indice de gonflement ( $C_s$ )** : Cet indice traduit la déformabilité d'un échantillon non gonflant en deçà de la contrainte de consolidation auquel il a été soumis.
- **Coefficient de gonflement ( $C_g$ )** : C'est la pente de la courbe de déchargement (à ne pas confondre ce coefficient avec l'indice de gonflement ( $C_s$ )). [10]

On peut également classer le sol vis-à-vis le gonflement en fonction de ( $C_g$ ) comme suit [10] :

- $C_g < 0,005$  : sol non gonflant.
- $C_g > 0,005$  : sol pouvant gonfler.

- **La contrainte de préconsolidation ( $\sigma'_c$ )** : La pression de préconsolidation ( $\sigma'_c$ ) est la plus grande pression effective à laquelle a été soumis l'échantillon de sol au cours de son histoire. Si ( $\sigma'_c$ ) correspond à la pression effective ( $\sigma'_{v0}$ ) supportée par le sol en place, le sol est normalement consolidé. Un sol est surconsolidé si ( $\sigma'_c$ ) est supérieur à ( $\sigma'_{v0}$ ) et sous-consolidé si ( $\sigma'_c$ ) est inférieur à ( $\sigma'_{v0}$ ). [15]

La figure ci après (Figure III-16) montre la méthode de Casagrande pour l'estimation de ( $\sigma'_c$ ), cette méthode est la suivante :

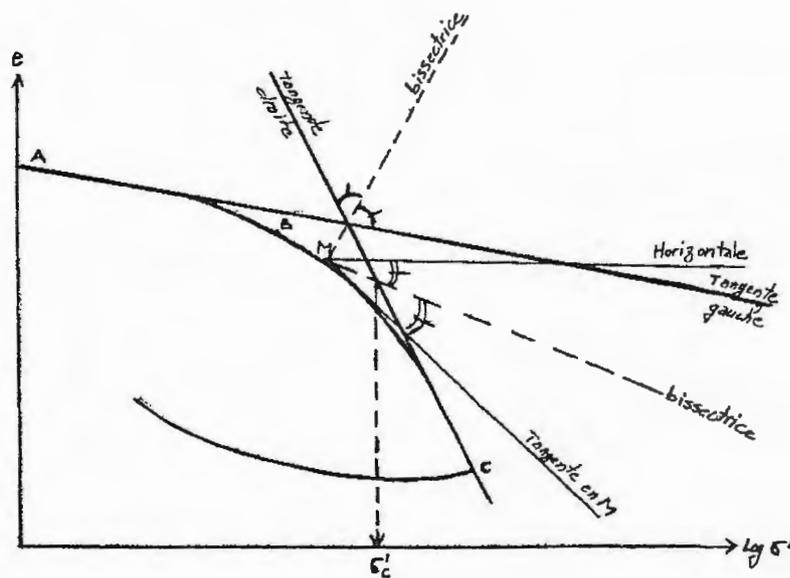


Figure III-17 : Détermination graphique de pression de consolidation ( $\sigma'_c$ ).

- On trace sur la courbe de consolidation les deux tangentes des deux parties linéaires de la courbe (AB) et (BC).
- On trace la bissectrice de l'angle formée par les deux tangentes. Cette bissectrice coupe la courbe en un point (M)
- De (M), on trace la tangente de la courbe et on mène une droite horizontale, finalement on trace la bissectrice de l'angle formé par cette tangente et l'horizontale.
- La pression de préconsolidation est l'abscisse du point d'intersection de la bissectrice avec la tangente de la partie droite de la courbe [5].

### III-3- CONCLUSION :

Dans ce chapitre, la quantification du phénomène de gonflement par des paramètres macroscopiques est essentielle du point de vue du dimensionnement des ouvrages de génie civil. Dans la suite, on récapitulera l'ensemble des informations obtenues dans la littérature sur la caractérisation du phénomène de gonflement.

Les méthodes indirectes reliant le gonflement aux paramètres géotechniques permettent d'identifier les terrains gonflants alors que les essais de gonflement caractérisent plus précisément le comportement gonflant d'un échantillon. Accompagnées de précautions expérimentales, les différentes procédures d'essais en laboratoire permettent de déterminer des paramètres du gonflement à appliquer dans le dimensionnement d'ouvrage et d'analyser certains aspects du gonflement comme la cinétique ou l'anisotropie. [17]

CHAPITRE IV

QUANTIFICATION

DES SOLS

GONFLANTS

## IV-1-INTRODUCTION :

L'identification des sols gonflants peut s'effectuer à l'échelle microscopique, les formes et les assemblages de la structure de ces matériaux étant très particuliers. Seulement, cette reconnaissance est très coûteuse et n'informe pas sur les paramètres mécaniques du retrait-gonflement. Une identification primaire, à partir des résultats d'essais simples, peut présenter un intérêt considérable puisqu'elle permettra de gagner en temps et en coût. En effet, le fait de soupçonner qu'un sol puisse être gonflant dès la campagne de reconnaissance préliminaire permet d'anticiper sur les campagnes de reconnaissance de confirmation en les adaptant à la nature du site.

## IV-2-NATURE ET STRUCTURE DES ARGILES :

Avant d'analyser le phénomène de gonflement proprement dit, il est essentiel de rappeler certaines notions minéralogiques et physico-chimiques relatives aux interactions entre l'eau et les particules argileuses (Grim, 1962 ; Mitchell, 1976). [7]

## IV-2-1-Minéralogie des argiles :

Les argiles sont les produits de décomposition des roches siliceuses, par désagrégation physique et mécanique, puis par altération chimique. La famille des minéraux argileux regroupe tous les silicates hydratés appartenant au groupe des phyllosilicates. Les minéraux argileux ont une structure ionique telle qu'ils interagissent fortement avec les molécules polaires de l'eau. Une particule d'argile est formée d'un empilement de feuillets élémentaires constitués par l'association de deux unités structurales de base [7]:

- Le tétraèdre de silice  $\text{SiO}_4$  (Te) : atomes d'oxygène disposés au sommet d'un tétraèdre régulier enserrant un atome de silicium. Les tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches planes dites couches tétraédriques (Figure IV-1).

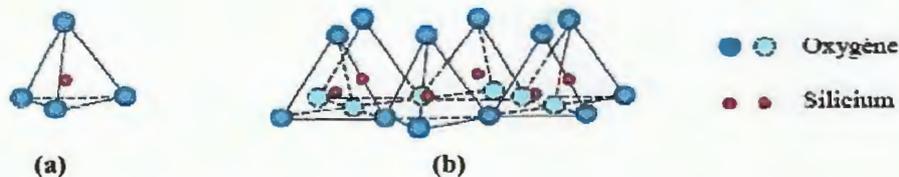


Figure IV-1 : a) Unité tétraédrique à cœur de silicium; b) Schéma d'une couche de tétraèdre avec arrangement hexagonal [7][17]

- L'octaèdre d'alumine  $\text{Al}_2(\text{OH})_6$  et éventuellement de magnésium  $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$  (OC) : 6 ions hydroxydes enserrant un atome d'aluminium ou de magnésium. Les octaèdres se combinent également pour former des couches planes dites couches octaédriques (Figure IV-2).

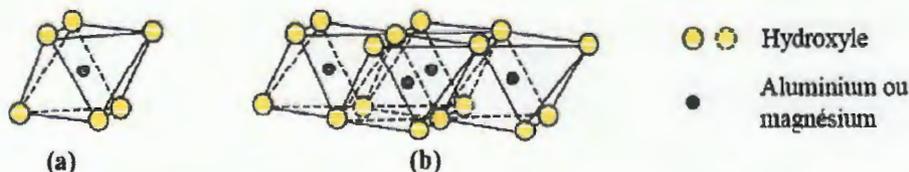


Figure IV-2 : a) Unité octaédrique b) Structure en couche à base d'octaèdre de Brucite  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  ou de Gibbsite  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [7][17]

➤ **Les chlorites**  $(OH)_4 (Si,Al)_8 (Mg,Fe)_6 O_{20}$  [7] :

Il est nécessaire de citer les chlorites du fait que leurs propriétés se rapprochent de celles des argiles. Leur structure est cependant plus complexe, et se compose de deux feuillets de mica entre lesquels s'insère un feuillet de brucite. En fait, le déficit du feuillet de mica est rarement comblé par le feuillet de brucite et des cations interchangeables se logent dans les espaces créés au sein du feuillet de mica. De l'eau peut alors pénétrer entre les feuillets, provoquant ainsi un accroissement de l'interdistance et donc un gonflement. Cependant, les édifices de brucite tendent à coller les feuillets les uns aux autres et donnent ainsi aux chlorites une certaine cohésion, contrairement aux feuillets des minéraux argileux, qui sont libres de glisser les uns par rapport aux autres (Figure IV-5).

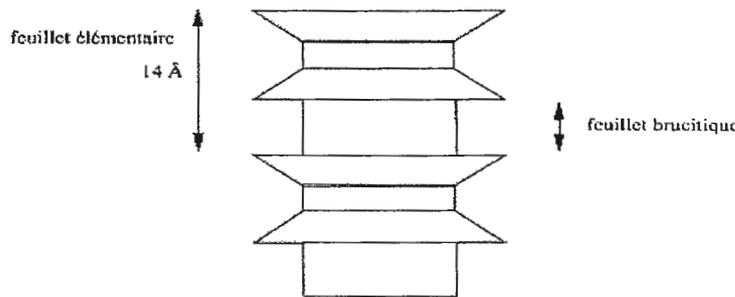


Figure IV-5: Structure particulière de la chlorite, (Mouroux et al. 1987) [7][17]

➤ **La montmorillonite**  $(OH)_4 Si_8 (Al^{3+}_{10/3}, Mg_{2/3}) O_{20}, n H_2O$  [7] :

Le feuillet élémentaire est composé comme pour l'illite, d'une couche d'alumine comprise entre deux couches de silice. Un ion  $Al^{3+}$  est remplacé par un ion  $Mg^{2+}$  dans les couches d'alumine (Figure IV-6). Le déficit de charge qui en résulte est compensé par des ions  $Ca^{2+}$  (montmorillonite calcique) ou par des ions  $Na^+$  (montmorillonite sodique). Liaisons entre feuillets étant très faibles, *ces argiles sont très sensibles à la teneur en eau et ont un fort potentiel de gonflement*. L'épaisseur d'une particule de montmorillonite peut-être très faible puisque, contrairement aux autres argiles, on peut isoler un feuillet élémentaire. La montmorillonite fait partie de la famille plus générale des *smectites définies comme les argiles gonflantes*.

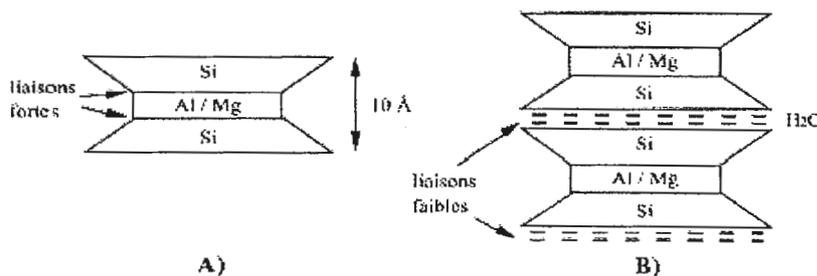
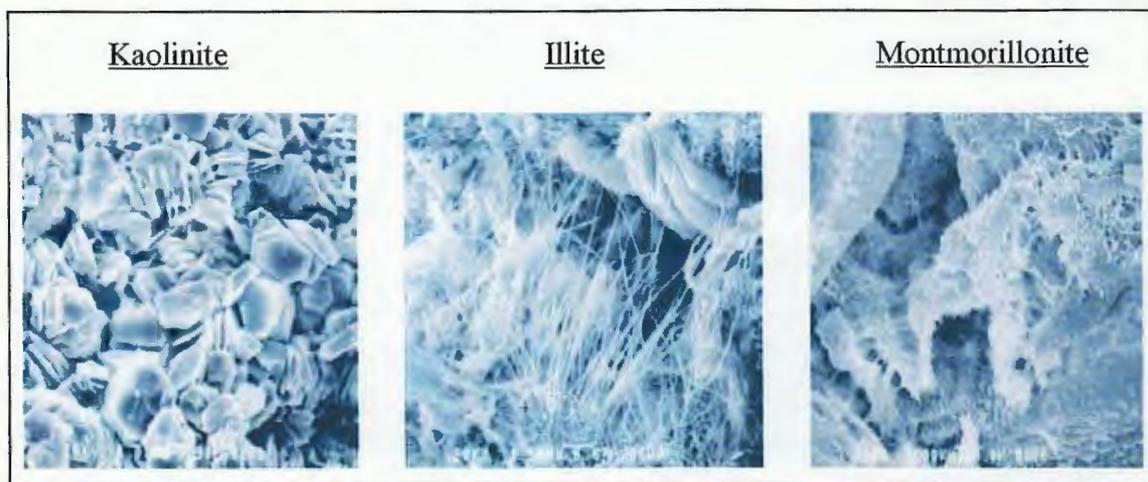


Figure IV-6 : Structure particulière de la montmorillonite, (Mouroux et al. 1987) [7][17]

Les caractéristiques de ces argiles sont résumées dans le tableau IV-1. La figure IV-7 présente des images de ces argiles prises au microscope électronique à balayage.

Nom	Type	Nombre de feuillets par particule	Diamètre d'une particule ( $\mu\text{m}$ )	Epaisseur d'une particule ( $\mu\text{m}$ )	Surface Spécifique en $\text{m}^2/\text{g}$	C.E.C. en $\text{meq}/100\text{g}$
Kaolinite	1:1	100-200	0,1-4	1-10	10-20	3-15
Illite	2:1	1-10	0,1-1	0,003-0,01	65-100	10-40
Montmorillonite (smectite)	2:1	1	0,1	0,001	700-840	80-150
Chlorite	2:1:1	1	0,1	0,005	800	10-40

Tableau IV-1: Caractéristiques des argiles [17]

Figure IV-7: Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles, (Source : <http://www.interp3.com/PetroTech/prod01.htm>)

### ➤ Les interstratifiés :

Les interstratifiés sont formés par l'alternance plus ou moins régulière de feuillets de natures différentes (par exemple illite-smectite, illite-chlorite, ...). [17]

Lorsque l'un des feuillets est de type Smectite, le comportement peut s'avérer gonflant.

### IV-2-3-Le gonflement des argiles :

L'analyse minéralogique précédente montre que certaines argiles, pour lesquelles les liaisons interfeuillets sont très faibles, ont la propriété de fixer les molécules d'eau entre deux feuillets voisins (c'est le cas de smectites telles que la montmorillonite, et de certaines chlorites). L'eau pénètre à l'intérieur des particules et s'organise en couches monomoléculaires, il s'agit alors d'un *gonflement intraparticulaire ou interfoliaire* (Didier, 1972). Il intervient à l'échelle la plus petite de la structure argileuse mais peut présenter une ampleur très importante. En dehors de ce cas particulier, qui définit les argiles dites "gonflantes", le *gonflement est interparticulaire*, c'est-à-dire que l'eau ne pénètre pas à l'intérieur des particules d'argiles. Ce gonflement interparticulaire, contrairement au gonflement interfoliaire, a une ampleur assez limitée, mais affecte toutes les argiles. [7]

Le gonflement interparticulaire produit des soulèvements des structures plus modérées que le gonflement interfoliaire.

Les matériaux susceptibles de gonfler sous l'action de l'eau sont les sols argileux naturels, les marnes, les roches argileuses et les roches composées d'anhydrite. [17]

#### IV-2-4-Evolution de la texture au cours du gonflement :

La variation de texture des sols au cours du gonflement peut être étudiée à l'aide de deux techniques complémentaires, la porosimétrie par injection de mercure (Figure IV-8).

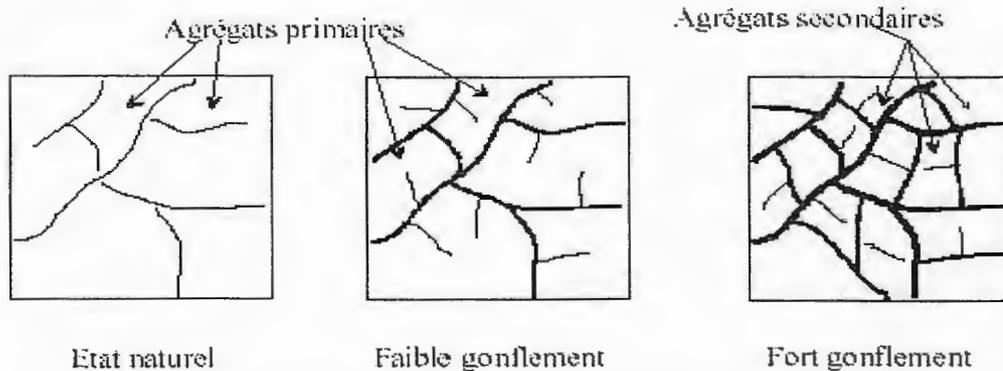


Figure IV-8 : Evolution de texture des sols au cours du gonflement [7]

Et la microscopie électronique à balayage (M.E.B.) (Figure IV-9).

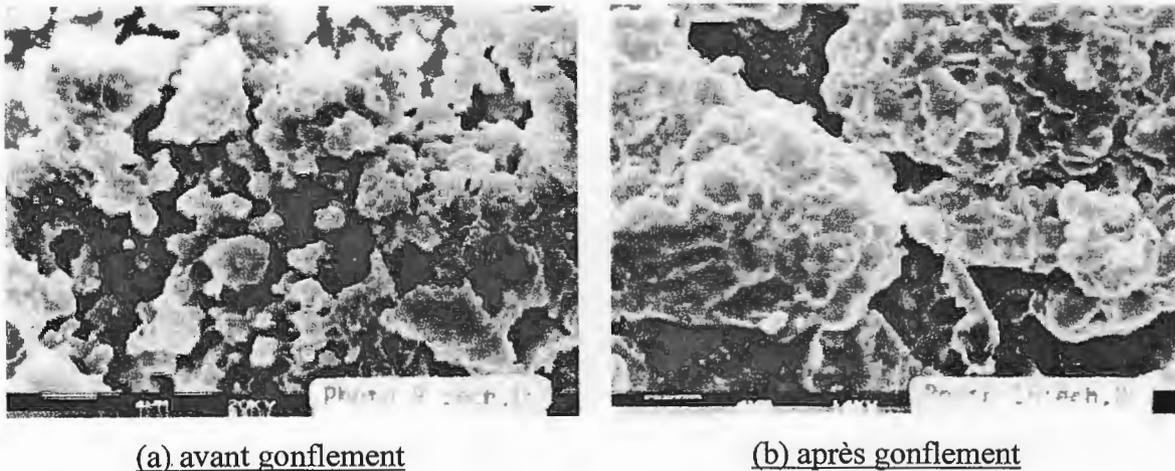


Figure IV-9: Observation au MEB d'une texture argileuse (Troalen et al. 1984) [7]

La microscopie électronique à balayage permet de visualiser la texture des sols, donc d'obtenir des informations générales (arrangement des particules, estimation de rayons de pores, de tailles de particules, détermination de certains minéraux...). La porosimétrie par injection de mercure permet de quantifier le réseau poreux par la mesure des rayons de pores. L'étude du réseau poreux est fondamentale puisque c'est la dilatation volumique qui cause le gonflement macroscopique [7]

### IV-3-CARACTERISATION EN LABORATOIRE DU PHENOMENE DE GONFLEMENT :

La quantification du phénomène de gonflement baser sur deux méthodes essentielles ; l'une de ces deux dite indirecte et qui reliant le gonflement aux paramètres géotechniques permettent d'identifier les terrains gonflants, et l'autre appelée méthode directe caractérise plus précisément le comportement gonflant d'un échantillon à partir des essais en laboratoire permettent de déterminer des paramètres du gonflement tel que la pression, le taux du gonflement,....etc.

#### IV-3-1-Définition des paramètres de gonflement :

En toute rigueur, les paramètres mécaniques à déterminer pour caractériser les terrains gonflants sont : la pression de gonflement, le gonflement libre et l'indice de gonflement.

- **La pression de gonflement** ( $\sigma_{sw}$ ) : D'un élément de sol, dont l'état physique initial est connu, peut être définie comme l'état de contraintes à exercer pour maintenir son volume constant pendant l'imbibition sans distorsion.
- **Le gonflement libre** ( $\varepsilon_{sw}$ ) : D'un élément de sol, dont l'état physique initial est connu, est la déformation maximale que provoque l'imbibition de cet élément soumis à un état de contraintes nulles ou quasi-nulles.
- **L'indice de gonflement** ( $C_g$ ) : Traduit l'importance de la déformation de gonflement induit par un déchargement par rapport à un état de contraintes donné. La déformation de gonflement est obtenue au bout d'un temps infini, déduction faite des déformations instantanées dues aux variations de charge.

#### IV-3-2-Méthodes indirectes de caractérisation :

Les méthodes indirectes consistent à déterminer une corrélation entre le gonflement libre ou la pression de gonflement et quelques paramètres géotechniques comme les limites d'Atterberg, la limite de retrait, la teneur en eau, la densité sèche qui semble être les facteurs influant sur le gonflement des argiles.

##### ► **Limites d'Atterberg :**

Sur un plan macroscopique, ce phénomène est à rapprocher de la notion des limites d'Atterberg. Car elles sont des paramètres importantes dans les propriétés de rétention d'eau du terrain et donc de gonflement. C'est la raison pour laquelle un certain nombre de corrélations ont rapidement été recherchées entre les limites d'Atterberg et les propriétés de gonflement des sols.

- **Seed et al. (1962) [21]** : Ont proposé une méthode d'estimation du taux de gonflement sur des sols compactés en se référant à la teneur en argile du sol % ( $d < 2 \mu m$ ), et à l'activité du matériau (A) (Figure IV-19).

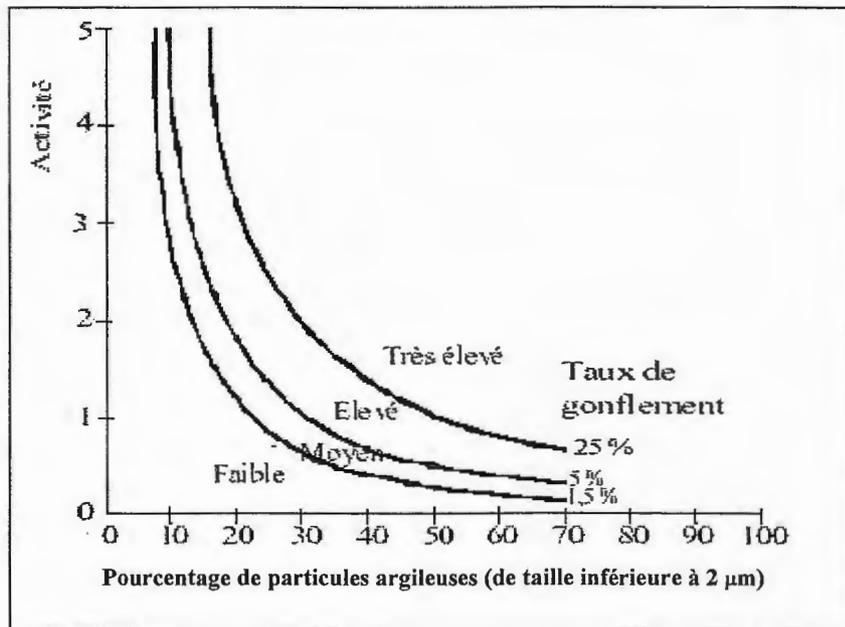


Figure IV-10 : Diagramme de classification du potentiel de gonflement (Seed et al.1962)

Le gonflement libre  $\epsilon_{sw}$  d'un échantillon confiné latéralement en présence d'eau sous une surcharge de 7 kPa, peut être relié à l'indice de plasticité par l'expression :

$$\epsilon_{sw} = 21,6 \cdot 10^{-5} (I_p)^{2,44}$$

Cette relation, obtenue par une étude statistique des résultats expérimentaux, s'applique aux matériaux contenant entre 8% et 65% d'argile. La comparaison de cette formule avec les résultats expérimentaux a abouti à une fourchette d'erreur d'environ 33% sur le gonflement libre. Le tableau IV-3 donne la relation entre le taux de gonflement et l'indice de plasticité.

$I_p$	$\epsilon_{sw}$ (%)	Potentiel de gonflement
0 - 10	0 - 1,5	Faible
10 - 20	1,5 - 5	Moyen
20 - 35	5 - 25	Élevé
> 35	> 25	Très élevé

Tableau IV-2 : Relation entre le gonflement libre et l'indice de plasticité (Seed et al.1962)

- **Williams et Donaldson (1980) [17]** : Considèrent que le caractère expansif des argiles est fortement lié à l'activité. Ainsi, un abaque est proposé, il donne le potentiel expansif en fonction de l'indice de plasticité et en fonction de la teneur en argile.

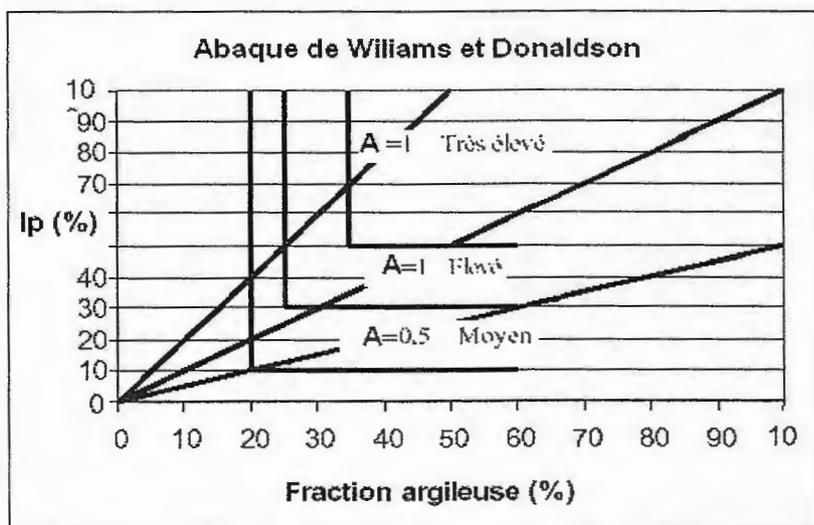


Figure IV-11 : Abaque de Williams et Donaldson pour l'identification des sols gonflants.

- **Komornik et David (1969) [7]** : Ont travaillé plus particulièrement sur des sols non remaniés provenant d'Israël, car la méthode de compactage, est un facteur très influent sur les paramètres de gonflement. Les nombreux essais ont montré qu'une simple corrélation linéaire était possible entre le gonflement libre et l'indice de plasticité :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{SW} &= 6,7 + 2,4 (Ip) && \text{pour les marnes ;} \\ \varepsilon_{SW} &= 0,9 + 2,1 (Ip) && \text{pour les argiles.} \end{aligned}$$

La fourchette d'erreur obtenue était d'environ 25 %.

- **Vijayvergiya et Ghazzaly (1973) [7]** : Tout comme Komornik et David (1969), ont constaté que, la ligne "A", définie par Casagrande (1948) dans le diagramme de plasticité et d'équation  $Ip = 0,73(WL - 20)$ , sépare les sols gonflants (au-dessus) des sols non gonflants (en dessous de la ligne A) comme indiqué sur la figure IV-20. Cependant une argile se situant au dessus de la ligne "A" n'est pas nécessairement gonflante, puisque des sols mous peuvent parfois y être classés.

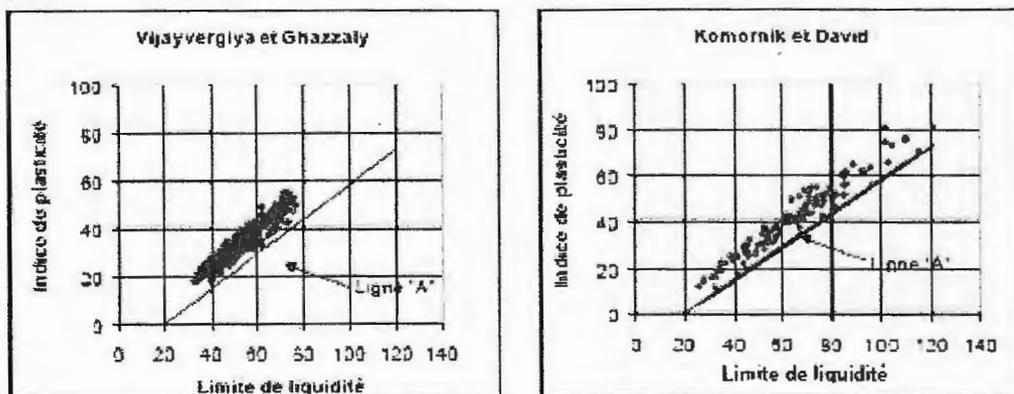


Figure IV-12 : Caractérisation des sols gonflants.

- **Dakshanamurthy et Raman (1973) [7]** : Se sont aussi inspirés du diagramme de Plasticité proposé par Casagrande (1948) pour fournir une classification du niveau de gonflement. Le diagramme, qui comprend la ligne A de séparation des sols gonflants, est divisé en 6 zones le long de l'axe des abscisses comme suit (Tableau IV-3).

Limite de liquidité $w_L$	Classification
0 - 20	non gonflant
20 - 35	gonflement faible
35 - 50	gonflement moyen
50 - 70	gonflement élevé
70 - 90	gonflement très élevé
> 90	gonflement critique

Tableau IV-3 : Classification proposée par Dakshanamurthy et Raman (1973)

- **BRE (1980) [3]** : Relie le potentiel de gonflement à deux paramètres, l'indice de plasticité et le pourcentage de la fraction argileuse (particules dont le diamètre est inférieur à  $2 \mu m$ ) (Tableau IV-4).

$I_p$	% < $2 \mu m$	Potentiel de gonflement
< 18	< 30	Faible
18 - 22	30 - 60	Moyen
22 - 35	60 - 95	Elevé
> 35	> 95	Très élevé

Tableau IV-4 : Relation entre l'indice de plasticité et le pourcentage des particules <  $2 \mu m$  (BRE, 1980)

- **Chen (1988) [3]** : Relie le potentiel de gonflement à deux paramètres, La limite de liquidité et le pourcentage des particules dont le diamètre est inférieur à  $74 \mu m$  (Tableau IV-5).

% < $74 \mu m$	$w_L$ (%)	Pression de gonflement (6 ans) (MPa)	Potentiel de gonflement
< 30	< 30	< 0.05	Faible
30 - 60	30 - 40	0.15 - 0.25	Moyen
60 - 95	40 - 60	0.25 - 0.5	Elevé
> 95	> 60	1	Très élevé

Tableau IV-5 : Relation entre La limite de liquidité et la pression de gonflement (Chen, 1988)

- **Sneath (1980) [3]** : Relie le potentiel de gonflement à un seul paramètre, l'indice de plasticité ainsi comme montre le tableau IV-6.

$I_p$	Potentiel de gonflement
18	Faible
22 - 32	Moyen
22 - 48	Elevé
>35	Très élevé

Tableau IV-6 : Relation entre le gonflement libre et l'indice de plasticité  
(Seed et al. 1962)

► **Retrait linéaire :**

Les sols argileux présentent un retrait volumique lors de l'évaporation de l'eau interstitielle. Le retrait volumique évolue de manière linéaire en fonction de la teneur en eau  $W$ , jusqu'à une teneur en eau  $W_s$  définie comme la limite de retrait. A partir de cette limite  $W_s$ , le sol perd de l'eau sans grande variation de volume, il se désature. La limite de retrait et l'indice de retrait:  $I_s = W_L - W_s$ , apparaissent aussi comme des éléments fondamentaux pour l'étude des variations de volume des sols.

- **Altemeyer (1955) [7] :** A proposé une classification des sols en fonction de la limite de retrait (Tableau IV-7).

$w_s$	Potentiel de gonflement
< 10	Fort
10 - 12	Critique
> 12	Faible

Tableau IV-7 : Relation entre potentiel de gonflement et limite de retrait  
(Altemeyer, 1955)

- **Ranganatham et Satyanarayana (1965) [7] :** Ont déterminé une relation entre l'indice de retrait  $I_s$  le gonflement libre  $\varepsilon_{SW}$  pour des sols naturels compactés à l'optimum Proctor et sous une surcharge de 7 kPa en s'inspirant des travaux réalisés par Seed et al. (1962).

$$\varepsilon_{SW} = 41,1 \cdot 10^{-5} (I_s)^{2,67}$$

Cette relation leur a permis de classer le potentiel de gonflement d'un sol en fonction de son indice de retrait (Tableau IV-8).

$I_s$	Potentiel de gonflement
0 - 20	Faible
20 - 30	Moyen
30 - 60	Fort
> 60	Très fort

Tableau IV-8 : Relation entre potentiel de gonflement et indice de retrait  
(Ranganatham et Satyanarayana, 1965)

- **Holtz et Gibbs (1956) [3]** : Pensent qu'au moins trois paramètres sont indispensables pour pouvoir apprécier le potentiel de retrait des sols, le tableau donne le potentiel de retrait en fonction du pourcentage de la fraction argileuse, de l'indice de plasticité et la limite de retrait (Tableau IV-9).

% < 2 $\mu m$	I <sub>p</sub> (%)	w <sub>x</sub> (%)	U <sup>a</sup> (%)	Potentiel de retrait
> 28	> 35	< 10	> 30	Très élevé
20 – 13	25 – 40	7 – 10	20 – 30	Elevé
13 – 23	15 – 30	10 – 15	10 – 30	Moyen

U<sup>a</sup> : Pourcentage de retrait

Tableau IV-9 : Potentiel de Retrait (Holtz et Gibbs, 1956)

- **Holtz, Dakshanamurthy et Raman (1973) [3]** : Pensent aussi qu'au moins trois paramètres sont indispensables pour pouvoir apprécier le potentiel de gonflement des sols, le tableau donne le potentiel de gonflement en fonction de l'indice de plasticité, de la limite de liquidité et la limite de retrait (Tableau IV-10).

Potentiel de gonflement	I <sub>p</sub> (%)	w <sub>x</sub> (%)	w <sub>L</sub> (%)
Faible	< 18	> 15	20 – 35
Moyen	15 – 25	10 – 15	35 – 50
Fort	25 – 35	7 – 12	50 – 70

Tableau IV-10 : Potentiel de gonflement (Holtz, Dakshanamurthy et Rama, 1973)

► **Influence de la teneur en eau et de la densité sèche :**

Deux paramètres définissant l'état initial d'un sol paraissent intéressants à analyser : la teneur en eau  $w$  et les densités sèches  $\gamma_d$ . Sans être reliées directement au potentiel du gonflement, ces deux facteurs renseignent directement sur l'état initial du réseau poreux, facteur influant sur l'état de gonflement (Figure IV-21).

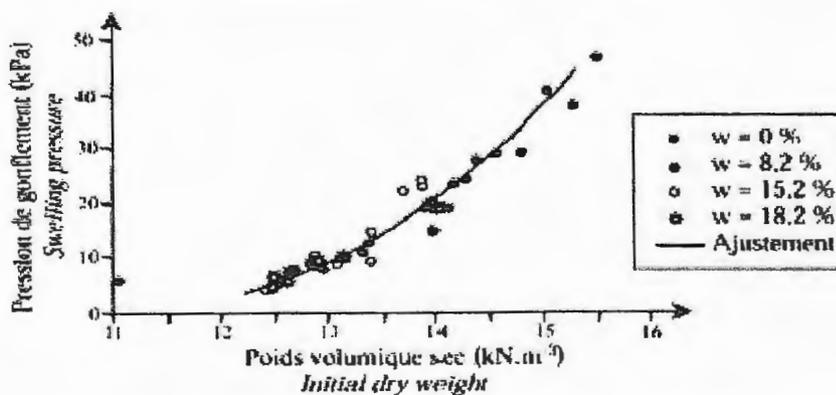


Figure IV-13: Influence de la densité sèche sur le gonflement (Sridharan et al. 1986) [17]

- **David et Komornik (1969) [3]** : A partir d'une étude statistique sur 200 échantillons, David et Komornik ont déduit une relation qui permet d'estimer la pression de gonflement (en  $kPa$ ) tenant compte à la fois de la masse volumique sèche  $\gamma_d$  (en  $kN/m^3$ ) de la teneur en eau  $W$  (en %) et de la limite de liquidité  $WL$  (en %) :

$$\text{Log } \sigma_{sw} = 0,0208 WL + 0,000665 \gamma_d - 0,0269 W + 0,132$$

- **Vijayvergiya et Ghazzaly (1973) [3]** : En se basant sur les résultats de 270 essais de gonflement réalisés sur divers sols, Vijayvergiya et Ghazzaly ont proposé deux modèles qui permettent de montrer que, pour des sols remaniés, le gonflement libre  $\varepsilon_{sw}$  (en%) et la pression de gonflement  $\sigma_{sw}$  (en  $kPa$ ) d'un sol sont des fonctions semi-logarithmiques linéaires décroissantes de la teneur en eau  $W$  (en %) et linéaires croissantes de la masse volumique sèche  $\gamma_d$  (en  $kg/m^3$ ), pour une limite de liquidité  $WL$  (en %) donnée :

$$\begin{cases} \text{Log } \varepsilon_{sw} = 0,033WL - 0,083 W + 0,458 \\ \text{Log } \sigma_{sw} = 0,033WL - 0,083 W - 1,697 \end{cases}$$

Et

$$\begin{cases} \text{Log } \varepsilon_{sw} = 0,033WL + 0,0321 \gamma_d - 6,692 \\ \text{Log } \sigma_{sw} = 0,033WL + 0,0321 \gamma_d - 5,154 \end{cases}$$

- **Brackley (1983) [7]** : A déterminé une relation générale entre la déformation de gonflement  $\varepsilon_{sw}$  (en %) et les principales caractéristiques des sols compactés :

$$\varepsilon_{sw} = \left[ 5,3 - \frac{147e}{Ip} - \text{Log } \sigma \right] (0,525 Ip + 4,1 - 0,85 W)$$

Où  $e$  désigne l'indice des vides,  $W$  la teneur en eau (en %) et  $\sigma$  la surcharge appliquée (en  $kPa$ ). L'état initial du sol est ainsi pris en compte, par l'intermédiaire de  $e$  et  $W$ , ainsi que la pression appliquée. La pression de gonflement  $\sigma_{sw}$  est alors définie, pour une déformation de gonflement nulle par :

$$\text{Log } \sigma_{sw} = 5,3 - \frac{147e}{Ip}$$

- **Williams et Donaldson [3]** : Ce modèle proposé ne tient pas compte de l'indice des vides comme celui de Brackley et s'écrit par la relation :

$$\varepsilon_{sw} = \left[ 7,3 - \frac{399,6}{Ip} - \text{Log } \sigma \right] (0,525 Ip + 4,1 - 0,85 W)$$

Ainsi, pour une déformation de gonflement nulle ( $\varepsilon_{sw} = 0$ ), La pression de gonflement  $\sigma_{sw}$  sera donnée par :

$$\text{Log } \sigma_{sw} = 7,3 - \frac{399,6}{Ip}$$

Dans les deux relations précédentes, l'indice de plasticité  $Ip$  et teneur en eau naturelle  $W$  sont (en %) alors que la pression de gonflement  $\sigma_{sw}$  est exprimée (en  $kPa$ ).

- **Neil et Ghazzaly [3]** : Ont déduit une relation qui permet d'estimer la déformation de gonflement, cette relation s'écrit :

$$\varepsilon_{SW} = 2,77 + 0,131 WL - 0,27 W$$

Où  $\varepsilon_{SW}$  est la déformation de gonflement (en %) ; WL et W s'expriment en chiffre décimal.

- **Johnson et Snethen [3]** : Ont déduit une relation qui permet d'estimer la déformation de gonflement, cette relation s'écrit :

$$\text{Log}\varepsilon_{SW} = 0,0361 WL - 0,0833 W + 0,458$$

Où  $\varepsilon_{SW}$  est la déformation de gonflement (en %) ; WL et W s'expriment en chiffre décimal.

#### ● Comparaison entre les différents potentiels d'expansion :

Afin de voir si ces différentes méthodes permettraient d'obtenir des résultats compatibles entre eux et surtout avec les observations du terrain, Johnson et Snethen (1978) ont testé, sur 20 sols différents et gonflants, plusieurs méthodes présentées ci-dessus, avec leurs paramètres de définition (Tableau IV-11) [17]. Les résultats obtenus sont alors classés en trois grandes catégories :

- Les résultats où les prévisions coïncident avec les résultats observés,
- Ceux où ils ne coïncident pas mais où cela vont dans le sens de la sécurité,
- Ceux où ils ne coïncident pas avec des divergences non sécurisantes.

On s'aperçoit très vite que la fiabilité des méthodes présentées varie beaucoup mais qu'aucune ne donne de coïncidence générale avec l'ensemble des sites testés.

Paramètres utilisés	Methode	Nombre de cas		
		qui coïncident	divergents mais favorables	totalemment défavorables
$I_p$	Seed et al. (1962)	3	13	4
$W_L, I_p$	Dakshnamurthy & Raman (1973)	5	13	2
$W_s$	Altemeyer (1955)	9	7	4
$I_s$	Ranganathan & Satyanarayana(1965)	5	13	2
$W, W_L$	Vijayvergiya & Ghazzaly (1973)	9	8	3
$W, W_L, \gamma_d$	Komornik & David	2	3	15

Tableau IV-11 : Comparaison entre les différentes de méthodes de classification (Johnson et Snethen, 1978) et (Josa, 1988)

#### ► *Influence de la surface spécifique de l'argile :*

La mesure de la surface spécifique des particules présentes dans un sol offre une caractérisation meilleure de l'argilosité du sol, puisque cette surface varie de façon très importante avec la nature des particules.

On notera qu'il existe deux surfaces spécifiques [7] :

- la surface spécifique externe, que l'on peut associer au niveau interparticulaire ; elle vaut  $80 \text{ m}^2/\text{g}$ , pour une montmorillonite et entre 70 et  $140 \text{ m}^2/\text{g}$  pour une illite,
- la surface spécifique interne, associée au niveau interfoliaire ; elle atteint  $800 \text{ m}^2/\text{g}$  pour une montmorillonite alors qu'elle est quasi nulle pour l'illite.

Afin de calculer et d'appréhender la surface spécifique d'un sol argileux, différentes techniques ont été présentées. La plus simple, et maintenant la plus usitée, est certainement la technique de l'essai au bleu de méthylène. Comme les molécules de la solution de bleu de méthylène adhèrent aussi bien sur la surface interne que sur la surface externe des argiles, l'ajout progressif de bleu à une masse déterminée de sol jusqu'à saturation complète, permet de déterminer le potentiel d'adsorption de ce sol (Tran Ngoc Lan, 1977) [7]. Ainsi un sol adsorbiera proportionnellement d'autant plus de bleu de méthylène que :

- La quantité d'argile qu'il contient est importante,
- cette argile est active, c'est-à-dire développe une surface spécifique, interne et externe, élevée et qu'elle est abondamment chargée.

On considère généralement (Chassagneux et al. 1996) [14], que la sensibilité d'un matériau argileux varie de la manière suivante (tableau IV-12) en fonction de la valeur de bleu (VBS):

Valeur au bleu	Susceptibilité
VBS < 2,5	Faible
$2,5 \leq \text{VBS} < 6$	Moyenne
$6 \leq \text{VBS} < 8$	Forte
VBS $\geq 8$	Très forte

Tableau IV-12 : Evaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de la valeur au bleu (VBS)

Il apparaît donc une relation directe entre la quantité de bleu adsorbée et la phase argileuse du sol. Une relation entre la surface spécifique totale (S.S.T) et la valeur de bleu de la phase argileuse VBS ( $0/2 \mu\text{m}$ ) a été mise en évidence par Gaillabaud et Cinot (1982) [7] :

$$\text{S.S.T} = 21 \text{ VBS } (0/2 \mu\text{m})$$

Les essais réalisés ont donné une surface spécifique totale de  $54 \text{ m}^2/\text{g}$  pour la kaolinite et de  $795 \text{ m}^2/\text{g}$  pour la montmorillonite.

Finalement, on constate que l'essai au bleu de méthylène, en mesurant la surface hydrophile des argiles, représente un très bon indicateur du potentiel de gonflement d'un sol. De plus, l'essai est facile et rapide à réaliser.

#### IV-3-3-Prévision du gonflement des sols argileux :

Compte tenu de l'écart constaté entre les valeurs des paramètres de gonflement directement mesurées et celles fournies par les modèles précédents, une première idée a consisté à ajuster ces modèles (Bekkouche et al. 2000c) [4]. Une analyse statistique a été réalisée. L'examen des résultats de cet ajustement regroupés dans le tableau IV-12.

N°	Modèle	Expression mathématique
1	Seed et al. 1	$\varepsilon_{sw} = 0,1670877.A.C + 0,8221577$
2	Seed et al. 2	$\varepsilon_{sw} = 0,1823723.I_p + 0,4559623$
3	Vijayvergiya et Ghazzaly 1	$\lg \varepsilon_{sw} = 1/19,5(28,742805.\gamma_d + 0,22238775.W_L - 48,4704675)$
4	Vijayvergiya et Ghazzaly 2	$\lg \sigma_{sw} = 1/12(0,0964896.W_L - 0,08028.W + 3,0697752)$
5	Johnson	$\varepsilon_{sw} = -0,0215153.I_p - 2,671464.Z - 0,8565674.W + 0,0023009.W.I_p + 0,056402.Z.I_p + 28,49721$
6	Nayak et Christensen	$\varepsilon_{sw} = 0,0761548.I_p.C/W - 0,222854$
7	David et komomik	$\lg \sigma_{sw} = 0,0079182.W_L + 0,6432451.\gamma_d - 0,00161536.W + 1,1328183$
8	Vijayvergiya et Ghazzaly 1	$\lg \sigma_{sw} = 1/12(0,0651096.W_L - 0,1512264.W + 26,8704696)$
9	Vijayvergiya et Ghazzaly 2	$\lg \sigma_{sw} = 1/19,5(23,283378.\gamma_d + 0,15710565.W_L - 3,5600565)$

Tableau IV-13: Résultats d'ajustement des modèles de gonflement

Dans les relations ci-dessus, A, C, Z, W, WL,  $\gamma_d$  et  $I_p$  représentent respectivement l'activité, la teneur en argile (en pourcent), la profondeur (en m), la teneur en eau naturelle (en pourcent), la limite de liquidité (en pourcent), le poids volumique sec (en  $\text{kN/m}^3$ ) et l'indice de plasticité.

#### IV-3-4-Les méthodes directes (essais de gonflement en laboratoire) :

Il existe un grand nombre de procédures d'essais de gonflement, L'oedomètre est le seul appareillage préconisé pour la réalisation des essais de gonflement.

La méthode de gonflement libre est la plus simple, L'essai consiste à laisser gonfler librement l'échantillon lors de l'humidification. Une fois le gonflement maximal atteint, la pression de gonflement sera la contrainte normale à appliquer sur l'échantillon pour le remettre aux dimensions initiales.

##### IV-3-4-1- Essai de gonflement libre à l'oedomètre :

L'objectif de cet essai est de déterminer le taux de gonflement ( $\varepsilon_{sw}$ ) et ainsi la pression de gonflement ( $\sigma_{sw}$ ) du sol étudié.

Les essais de gonflement libre sont effectués dans un oedomètre comme décrit dans la figure précédente (Figure III-13)

En premier temps, on procède à la préparation de l'échantillon pour mettre le sol à l'état naturelle (la teneur en eau et la densité sèche).

##### ➤ Préparation de l'échantillon :

La préparation de l'échantillon se fait pour le mélange du sable et de l'argile soumis à l'essai de gonflement libre, ces derniers sont menés par certaines opérations préparatifs

comme le broyage, le tamisage et le compactage. Le compactage avec une teneur en eau naturelle est l'essentiel pour obtenir une densité proche de densité naturelle.

➤ **Mesure de taux de gonflement :**

L'échantillon est placé dans une cellule cylindrique entre deux pierres poreuses. Puis suite à l'inondation, il est autorisé à gonfler verticalement sous la pression du piston durant plusieurs jours jusqu'à la stabilisation. Le gonflement total est déterminé d'après la formule suivante [18]

$$\varepsilon_{sw} (\%) = \frac{H_f - H_i}{H_i} \times 100 \quad \text{Où } H_i : \text{Hauteur initial.}$$

$H_f$ : Hauteur final après stabilisation.

➤ **Mesure de la pression de gonflement ( $\sigma_{sw}$ ):**

Il existe une multitude de méthodes pour mesurer la pression de gonflement à l'œdomètre, la méthode du gonflement libre est la plus simple.

La pression de gonflement est mesurée après la phase de gonflement libre sous faible charge (poids du piston), l'échantillon quasi saturé suit un chemin de chargement jusqu'à sa valeur initiale. La contrainte correspondante est la pression de gonflement (Jenning et Knight, 1957 ; Chen, 1988) [18].

#### IV-4-CONCLUSION :

Ce chapitre a permis de mettre en évidence la complexité du phénomène de gonflement, qui fait intervenir plusieurs mécanismes physiques, chimiques et mécaniques d'interaction du matériau et de l'eau, à différentes échelles.

L'exposé précédent, qui n'est pas exhaustif, montre le grand nombre de méthodes et de lois différentes mises au point pour estimer le gonflement des sols de façon indirecte, c'est-à-dire sans effectuer d'essai de gonflement. Mais en aucun cas ne peuvent remplacer les essais directs de gonflement du point de vue de la caractérisation mécanique de ce phénomène.

CHAPITRE V

ETUDES

EXPERIMENTALES

**V-1-INTRODUCTION :**

Notre étude de stabilisation est réalisée sur une argile par l’ajout de sable dunaire, le sol est ramené de la région de Harraten wilaya de Jijel dont plusieurs entreprises de construction et d’urbanisation déclarent la probabilité d’avoir le risque de retrait-gonflement, le sable issu des sablières qui se trouvent dans la région de oued Zhour département d’Elmilia. Maintenant, on commence de décrit toutes les caractéristiques de ces deux sols et on passant aux résultats de la stabilisation.

**V-2-CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES :**

**V-2-1-Le sable d’Oued Zhour :**

Les différents essais ce qu’on a fait sur ce sable sont ; une analyse granulométrique selon la norme NF P94-056, essai d’équivalent de sable (NF P18-598) et une analyse chimique.

**V-2-1-1-Essais d’identification :**

Les résultats des essais d’identification du sable sont enregistrés dans le tableau V-1. La courbe granulometrique est représentée dans la figure V-1

Analyse granulométrique		Equivalent de sable (%)		
$C_u$	$C_c$	$ES_v$	$ES_p$	ES (moyen)
1.38	1.15	92.38	90.47	91.425

Tableau V-1 : Paramètres d’identification de sable de oued Zhour.

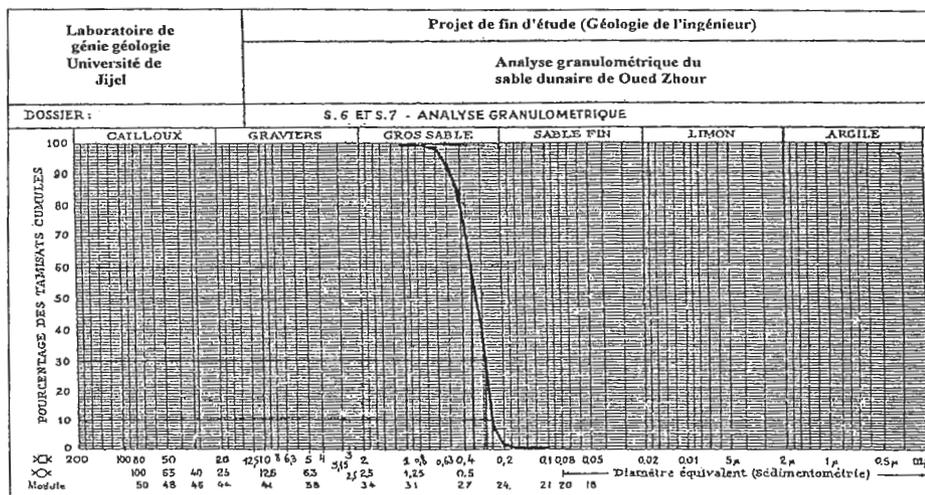


Figure V-1 : Courbe granulométrique du sable dunaire de oued Zhour.

➤ **Classification :**

D’après la classification cité par Caquot et Kérisel ( $C_u < 2$ ) et la classification L.P.C des sols grenus (Tableau III-6), le sable de oued Zhour se classe parmi les sables propres mal gradués symbolisés par les lettres (Sm), avec une granulométrie uniforme. La valeur d’équivalent de sable ES est supérieur à 80% se qui indique un sable très propre (absence presque totale de fines argileuses.)

## V-2-1-2-Analyse chimique :

L'analyse chimique du sable par fluorescence X au laboratoire de l'ENAVA montre que l'élément le plus fréquent est la silice (plus de 90%) sous forme des grains de Quartz comme montrer l'analyse minéralogique , et par conséquent le sable de oued Zhour est un sable siliceux tableau V-2.

Composants chimiques	Pourcentage
SiO <sub>2</sub>	95,52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,68
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,209
TiO <sub>2</sub>	0,05
CaO	0,02
MgO	0,01
Na <sub>2</sub> O	0,01
K <sub>2</sub> O	0,21
Perte au feu (PAF) 1000°C	2,73
TOTAL = 99,44 %	

Tableau V-2 : Résultat d'analyse chimique de sable d'oued Zhour.

Concernant l'analyse minéralogique (microscopique), en été fait au laboratoire de recherche de génie géologie université de Jijel, cette analyse montre que le sable contient de (Figure V-2) :

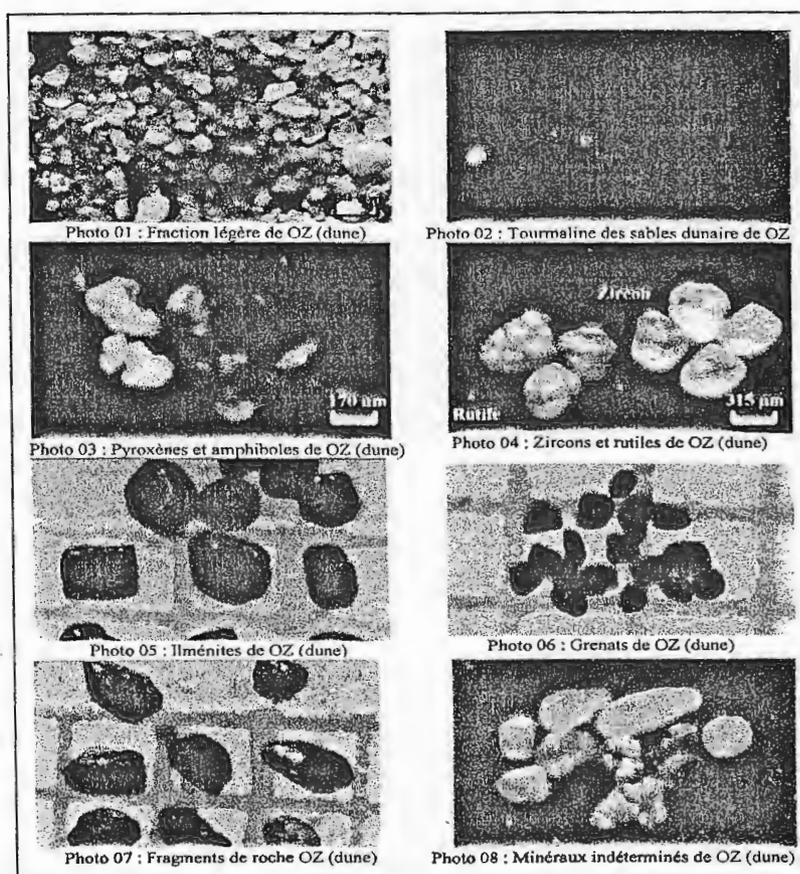


Figure V-2 : Composition minéralogique du sable dunaire de oued Zhour [1].

### V-2-2-L'argile de Harraten :

Quel que soient les objectifs recherchés dans une étude géotechnique, il est de règle d'effectuer initialement l'identification des sols concernés. Cette procédure permet d'orienter les analyses géotechniques ultérieures et surtout d'effectuer une classification des matériaux rencontrés. Les paramètres nécessaires pour cette classification sont aussi bien de nature physico-chimique que granulométrique.

Concernant le sol de la région de Harraten, les premières observations notées au moment d'extraction par une tarière creuse à une profondeur atteinte 1,5 m sont :

- Le sol de couleur verdâtre présente des passages jaunâtres.
- La présence des cailloux anguleux de couleur grisâtres et d'autres arrondis de couleurs blanchâtres à jaunâtres, l'ensemble de diamètre de 1 à 3 cm.

#### V-2-2-1-Analyse chimique :

Cette analyse a porté sur la détermination de la nature chimique du sol de Harraten à étudier.

Dans ce cadre, une analyse chimique quantitative réalisée par des méthodes gravimétriques et volumétriques dans le laboratoire de l'ENAVA a été déterminée, les résultats sont résumés dans le tableau V-3.

Composants chimiques	Pourcentage
SiO <sub>2</sub>	45,78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,840
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,600
TiO <sub>2</sub>	0,410
CaO	16,97
MgO	0,970
Na <sub>2</sub> O	0,610
K <sub>2</sub> O	1,530
SO <sub>3</sub>	0,072
Perte au feu (PAF)	18,78
TOTAL = 99,562 %	

Tableau V-3 : Résultat d'analyse chimique du sol de Harraten.

Ainsi, l'analyse chimique quantitative révèle que :

- L'échantillon renferme une proportion de 45,78% de silice (SiO<sub>2</sub>) largement inférieure à 80% qui est la frontière des sols gonflants et non gonflants ( cité par Tas, 1992 ; Hachichi et al, 2003) ce qui permet de dire que ce sol a une tendance de gonflement [3].
- Le taux de (CaO) est de 16,97%, ce qui relève que le taux de carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>) compris entre 10 et 30 intervalles des sols argileux marneux (tableau III-9).
- Le taux de l'anhydride sulfurique (SO<sub>3</sub>) est de 0,072 %, ce qui fait que le sol à étudier n'est pas en réalité agressif.

### V-2-2-2-Analyse minéralogique :

Afin de compléter les analyses chimiques, des analyses minéralogiques ont été effectuées par la diffraction aux rayons X pour déterminer les différentes proportions de minéraux constituant le sol étudié (figure V-3) :

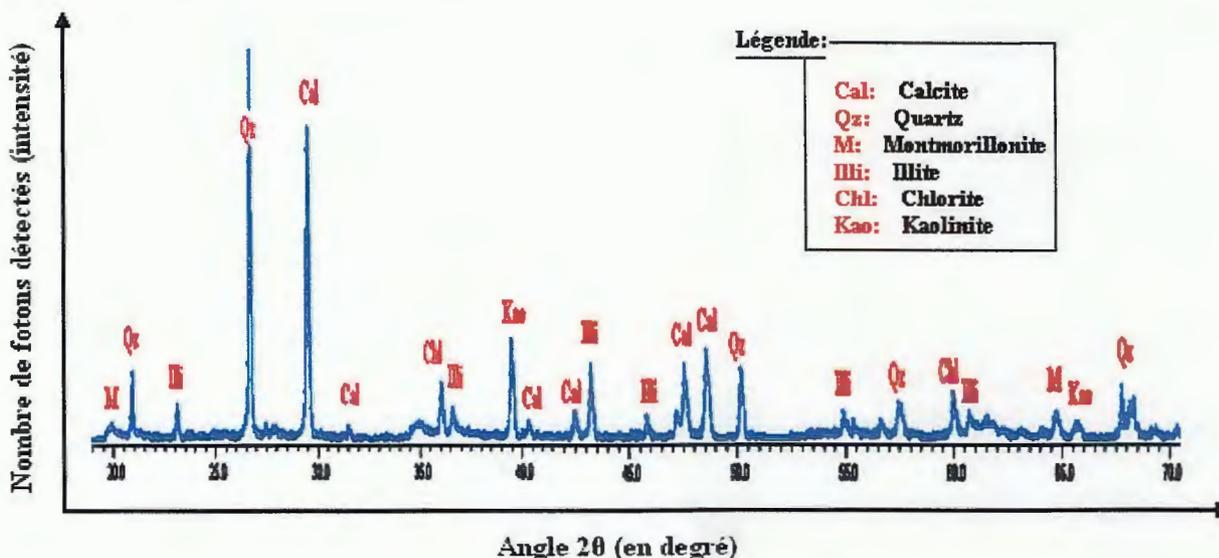


Figure V-3 : Résultat de diffraction des rayons X, sol de Harraten.

Le diffractogramme de la figure V-3 montre les pics correspondant au quartz, calcite, illite, chlorite, kaolinite, et peut être à la présence d'argile gonflante comme la montmorillonite. Une procédure d'étude plus fine demande l'élimination des carbonates, sels et matière organique pour obtenir une analyse représentative à découvrir les minéraux argileux gonflantes telles les smectites.

### V-2-2-3- Propriétés physiques :

Les caractéristiques physiques mesurées sont récapitulées dans le tableau V-4. Il est à noter que plusieurs essais sont effectués sur les échantillons prélevés dans l'argile et on a toujours pris la valeur moyenne entre eux.

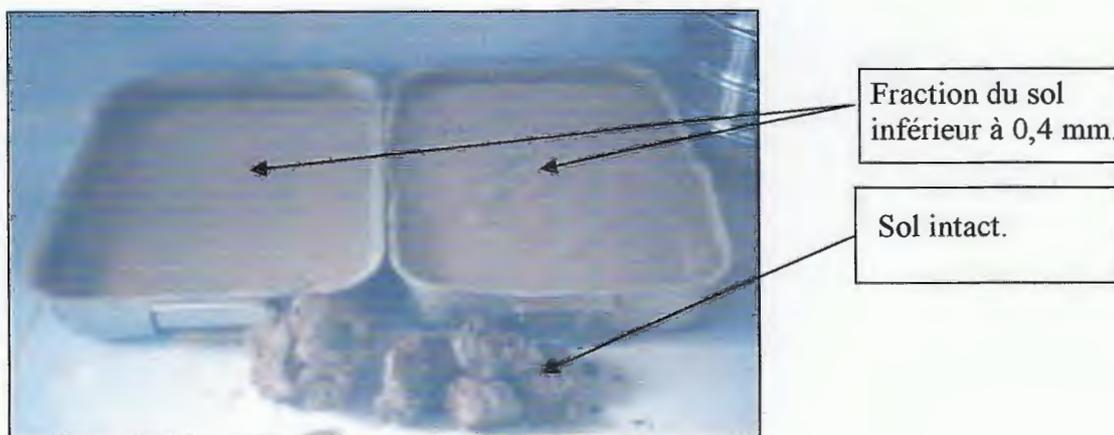


Figure V-4 : Exemple d'échantillon du sol de Harraten.

Paramètres	Valeur obtenue
Teneur en eau naturelle $W$ (%)	21,5
Teneur en eau de saturation $W_{sat}$ (%)	27,92
Degré de saturation $S_r$ (%)	76,98
Poids volumique sec $\gamma_d$ (KN/m <sup>3</sup> )	15,4
Poids volumique humide $\gamma_h$ (KN/m <sup>3</sup> )	19,7
Poids volumique des grains $\gamma_s$ (KN/m <sup>3</sup> )	27
Poids volumique de saturation $\gamma_{sat}$ (KN/m <sup>3</sup> )	19,69
Poids volumique déjaugé $\gamma^-$ (KN/m <sup>3</sup> )	9,69
Limite de liquidité $WL$ (%)	48,8
Limite de plasticité $Wp$ (%)	20,54
La limite de retrait $Ws$ (%)	11.13
Indice de plasticité $Ip$ (%)	28,26
Indice de consistance $Ic$	0,966
Indice de liquidité $IL$	0,034
Indice de retrait $Is$	37,67
Indice des vides $e_0$	0.754
La porosité $n$	0,42

Tableau V-4: Caractéristiques physiques des argiles de Harraten.

➤ **Classification :**

A la lecture de ces valeurs, et surtout de la limite de liquidité, la limite de plasticité et de l'indice de plasticité on peut dire :

- Le sol de Harraten est une argile peu plastique symbolisé par (Ap) (figure V-4)

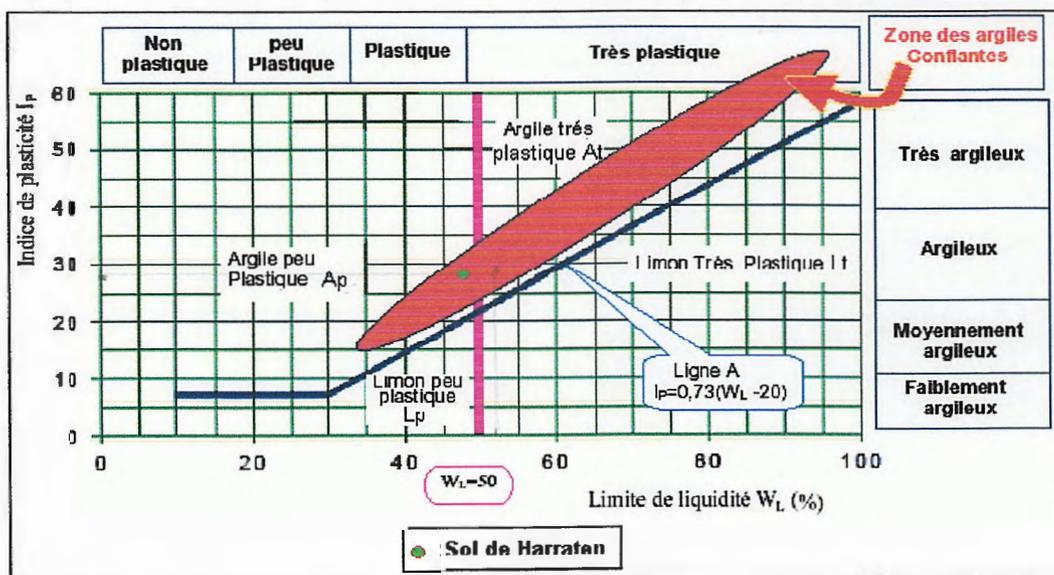


Figure V-5 : Diagramme de Casagrande de classification des sols fins.

- Les valeurs de la limite de liquidité et la limite de plasticité sont très proches respectivement des intervalles de 37 à 72 et 19 à 27 de la montmorillonite (variété de la famille des smectite), qui est une argile gonflante. (figure V-6)

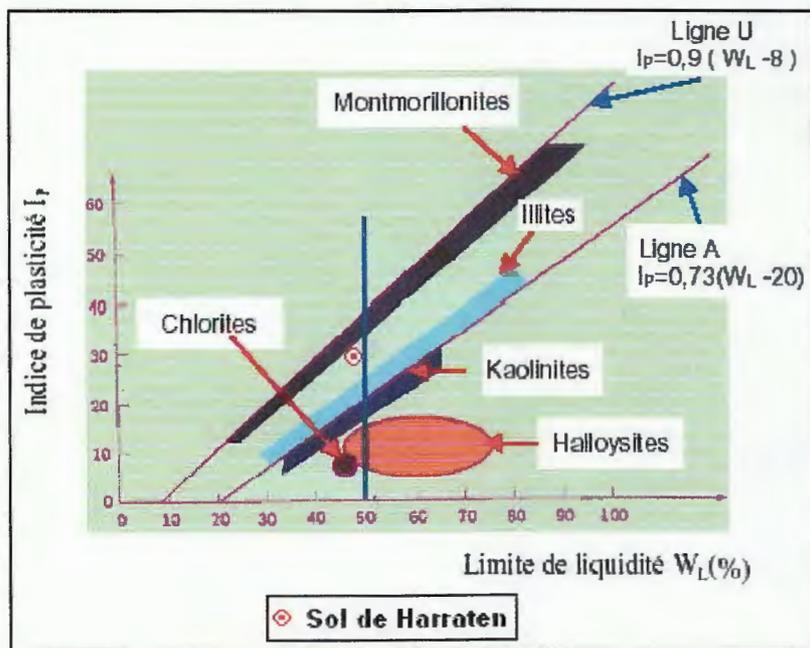


Figure V-6: Position des minéraux argileux les plus communs sur l'abaque de plasticité de Casagrande [17]

**V-2-2-4-Analyse sédimentométrique et activité :**

Les résultats des analyses sédimentométrique, synthétisés dans le tableau V-5, ont montré que notre sol est constitué de plus de 50% d'éléments inférieurs à 2 µm, et que se sol est une argile.

Echantillon	Profondeur (m)	Argile (%)	Limon (%)	Sable fin (%)	% [d<80 µm]	% [d<2 µm]	Activité (A)
Argile de Harraten	0-1,5	55	25	10	85	55	0,513

Tableau V-5 : Résultats de l'analyse sédimentométrique de l'argile de Harraten.

D'après le diagramme de classification du potentiel de gonflement de Seed et al. (1962) (figure V-7) et l'abaque proposer par Williams et Donaldson (1980) (figure V-8), notre argile à un potentiel de gonflement élevé.

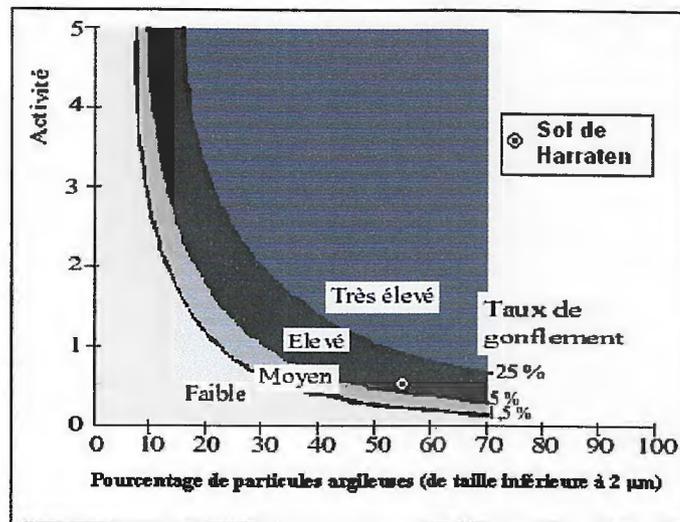


Figure V-7 : Position du sol de Harraten dans le diagramme de classification du potentiel de gonflement (Seed et al.1962)

Le sol examiné est positionné dans l'abaque de Williams et Donaldson (figure V-7) qui est à nos yeux la classification la plus fiable, notre argile à un potentiel de gonflement élevé.

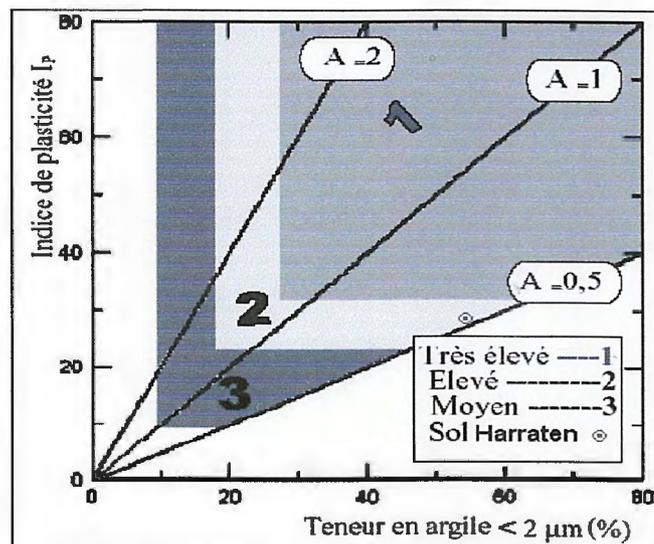


Figure V-8 : Présentation de l'argile de Harraten dans l'abaque de Williams et Donaldson.

**V-2-2-5-Essai au bleu de méthylène :**

L'essai permet de mesurer la valeur du bleu des échantillons, et par la suite leur surface spécifique, qui sont récapitulés dans le tableau V-6.

Echantillon	VBS [cm <sup>3</sup> /g]	S.S.T. [m <sup>2</sup> /g]
Argile de Harraten	7,28	152,88

Tableau V-6 : Résultats de l'essai au bleu de méthylène.

Les données regroupées dans le tableau ci-dessus plus les limites d'Atterbergue laissent clairement apparaître que :

- Le sol de Harraten admet la classification adoptée par la norme NFP 11-300 (tableau III-8) et qui donne le symbole ( $A_3$ ) au argiles, argiles marneuses et au limons très plastiques à condition de ( $25 < I_p \leq 40$  ou  $6 < VBS \leq 8$ ).
- D'après les résultats obtenus, on voit bien que l'argile de Harraten a une valeur de bleu dépassant 6, indiquant un sol à potentiel de gonflement fort (Chassagneux et *al.* 1996) tableau IV-12.
- La surface spécifique totale S.S.T de cette argile rentre dans l'intervalle de 150 à 800 m<sup>2</sup>/g, ce qui implique que notre argile est constituée essentiellement de minéraux de type de la famille des montmorillonites, qui est une argile à potentiel de gonflement élevé (Mouroux et *al.*, 1988) [17]

#### V-2-2-6-Essais de compressibilité à l'oedomètre :

L'objectif de cet essai est de déterminer les paramètres de compressibilité d'un sol gonflant saturé soumis à des charges verticales par palier. L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol intact placée dans une enceinte cylindrique rigide. Un dispositif applique sur cette éprouvette un effort axial vertical, l'éprouvette étant drainée en haut et en bas et maintenue saturée pendant l'essai oedométrique. La charge est appliquée par paliers maintenus constants successivement croissants et décroissants suivant un programme défini. Les variations de hauteur de l'éprouvette sont mesurées pendant l'essai en fonction de la durée d'application de la charge.

L'essai effectué sur le sol de Harraten montre l'aspect de la figure V-9.

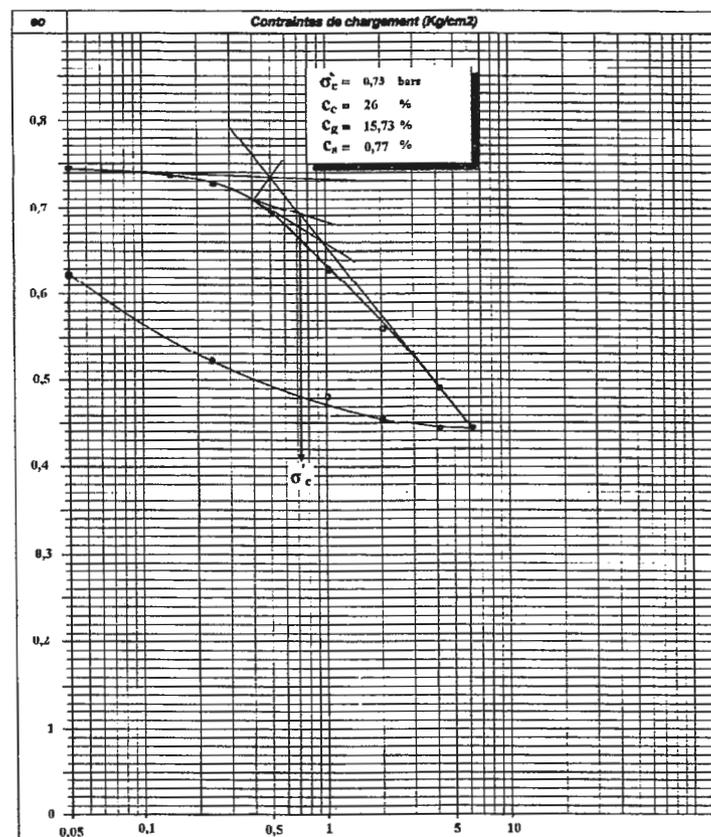


Figure V-9 : La courbe de compressibilité.

Le traitement du diagramme œdométrique permet de découvrir les valeurs des caractéristiques de compressibilité déterminées sur un échantillon prélevée à une profondeur de 1,5m

Echantillon	Profondeur (m)	$\sigma'_{v0}$ (bars)	$\sigma'_c$ (bars)	$C_c$ (%)	$C_g$ (%)	$C_s$ (%)	$e_0$	$e_f$
Argile de Harraten	1,5	0,295	0,73	26	15,73	0,77	0,754	0,622

Tableau V-7 : Caractéristiques de compressibilité

On peu dire que :

- La courbe de déchargement est caractérisée par des pentes très accentuées auxquelles correspondent à une valeur élevée du coefficient de gonflement ( $C_g \geq 0,005$ ) se qui caractérise un sol pouvant gonfler.
- On remarque une concordance entre les différents résultats. Le potentiel de gonflement de ce sol est fort et notre argile est surconsolidée. ( $\sigma'_c \geq \sigma'_{v0}$ ).
- A partir de la valeur de  $C_c$ , le sol est moyennement à assez fortement compressible ( $0,05 < C_c / (1 + e_0) < 0,20$  et  $0,200 < C_c < 0,300$ ).

### V-3 : ETUDE DE GONFLEMENT DU SOL DE HARRATEN :

#### V-3-1: Estimation indirecte du potentiel de gonflement de l'argile de Harraten :

Un nombre considérable d'approches empiriques introduites par différents auteurs sont présenté au chapitre IV, ces relations basées sur des caractéristiques du sol, qui sont faciles à déterminer en laboratoire, sont utilisées pour l'évaluation du potentiel de gonflement. Le sol considéré dans cette étude est classé comme suit :

Les auteurs	Paramètres	Potentiel de gonflement
Classification selon un seul paramètre		
Seed et al (1962)	$I_p$	Elevé
Dakshanamurthy et Raman (1973)	WL	Moyen
Snethen (1980)	$I_p$	Elevé
Altemeyer (1955)	Ws	Critique
Ranganatham et Satyanarayana (1965)	Is	Fort
Chassagneux et al (1996)	VBS	Fort
Classification selon deux paramètres		
Seed et al (1962)	% ( $d < 2 \mu m$ ) et A	Elevé
Williams et Donaldson (1980)	% ( $d < 2 \mu m$ ) et $I_p$	Elevé
BRE (1980)	% ( $d < 2 \mu m$ ) et $I_p$	Moyen à élevé
Chen (1988)	% ( $d < 75 \mu m$ ) et WL	Elevé
Classification selon trois paramètres		
Holtz, Dakshanamurthy et Raman (1973)	$I_p$ , Ws et WL	Fort
Classification selon quatre paramètres		
Holtz et Gibbs (1956)	% ( $d < 2 \mu m$ ), $I_p$ , Ws et Is	Très élevé

Tableau V-8: Estimation indirecte du potentiel de gonflement du sol de Harraten.

En générale, toutes les classification montrent que notre sol étudié possède un potentiel de gonflement élevé à très élevé, dans cette phase de reconnaissance primaire et une fois le sol expansif soupçonné, il est possible d'obtenir une estimation des paramètres de gonflement (amplitude et pression) à partir de nombreuses corrélations proposées dans la littérature (chapitre IV). Ces relations empiriques permettent à mesurer les paramètres de gonflement du sol de Harraten comme suit :

➤ **Pression de gonflement** ( $\sigma_{sw}$ ) :

Modèle	Expression mathématique	Valeurs de $\sigma_{sw}$ en bars
Vijayvergiya et Ghazzaly2	$\text{Log } \sigma_{sw} = 1/12(0,09648969WL - 0,08028W + 3,0697752)$	3.194
David et Komornik	$\text{Log } \sigma_{sw} = 0,0079182WL + 0,6432451\gamma_d - 0,00161536W + 1,1328183$	2.457
Vijayvergiya et Ghazzaly1	$\text{Log } \sigma_{sw} = 1/12(0,0651096WL - 0,1512264W + 26,8704696)$	171,016
Vijayvergiya et Ghazzaly2	$\text{Log } \sigma_{sw} = 1/19,5(23,28378\gamma_d + 0,15710565WL - 3,5600565)$	3,970

Tableau V-9 : Résultats de la pression de gonflement proposer pour l'argile de Harraten

➤ **Amplitude de gonflement (gonflement libre)** ( $\varepsilon_{sw}$ ) :

Modèle	Expression mathématique	Valeurs de ( $\varepsilon_{sw}$ ) en %
Seed et al 1	$\varepsilon_{sw} = 0,1670877A.C + 0,8221577$	5.536
Seed et al 2	$\varepsilon_{sw} = 0,1823723Ip + 0,4559623$	5.609
Vijayvergiya et Ghazzaly1	$\log \varepsilon_{sw} = 1/19,5(28,742805 \gamma_d + 0,22238775WL - 48,4704675)$	5.892
Johnson	$\varepsilon_{sw} = -0,0215153Ip - 2,671464.Z - 0,8565674W + 0,0023009W.Ip + 0,056402.Z.Ip + 28,49721$	10.470
Nayak et Christensen	$\varepsilon_{sw} = 0,0761548Ip \cdot \frac{C}{W} - 0,222854$	5.282

Tableau V-10 : Résultats de l'amplitude de gonflement proposer pour l'argile de Harraten

Compte tenu de l'écart constaté entre les valeurs des paramètres de gonflement directement mesurées et celles fournies par les modèles précédents, on peut conclure, que cette écart montre bien que ces modèles ne sont applicables qu'aux sols pour lesquels ils ont été établis et qu'ils ne se basent pas sur les mêmes paramètres ce qui les conduit à donner le plus souvent des résultats différents voir même contradictoires.

Seul le modèle de Vijayvergiya et Ghazzaly<sup>2</sup> semble être applicable au sol de Harraten, car son résultat a donné une valeur de 3.194 bars pour la pression de gonflement qui est proche que celle mesurée expérimentalement (dans la suite) de l'argile de Harraten ( $\sigma_{sw} = 3,54$ ).

### V-3-2: Mesure directe des paramètres de gonflement (essai de gonflement libre sur l'argile de Harraten en laboratoire) :

En ce qui concerne les mesures directes des paramètres de gonflement du sol étudié, le résultat de la méthode de gonflement libre appliquée sur les échantillons du sol donne l'aspect de la figure V-9.

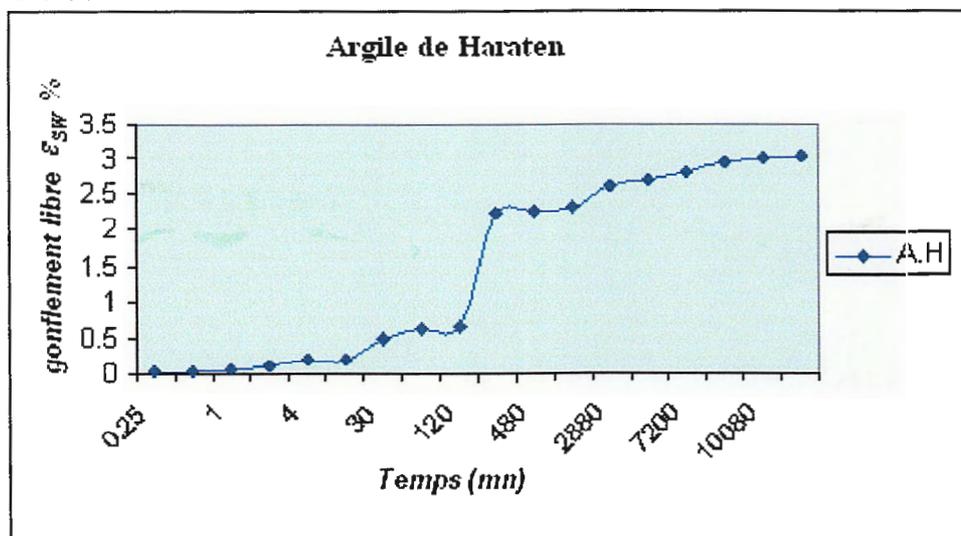


Figure V-10 : Evolution du gonflement libre en fonction du temps

En premier temps, on constate qu'au début de l'inondation le sol gonfle de manière rapide, et on observe à la suite une évolution lente, puis une stabilisation. Après 5 heures le taux de gonflement est presque 1%. À la stabilisation après 7 jours, le taux atteint la valeur de 3% Ce qui montre le caractère gonflant du sol de Harraten et qui confirme les constatations obtenues à l'aide des méthodes indirectes.

Concernant la pression de gonflement, leur valeur est mesurée après la phase du gonflement par la méthode de gonflement libre (la charge qui conduit à la diminution de volume jusqu'à leur valeur initiale). Cette valeur égale à 3,54 bars.

D'après ces résultats, et en se basant sur les classifications qualitatives et quantitatives citées dans la littérature internationale, il est remarquable que l'argile intacte de Harraten est une argile peu plastique moyennement active, qu'elle a un potentiel de gonflement élevé à très élevé et qu'elle serait de la famille des montmorillonites variété des smectites. Donc on peut dire que cette argile a besoin de la traiter afin d'augmenter leur résistance, augmenter leur perméabilité ainsi que pour minimiser leur sensibilité aux variations de la teneur en eau. Parmi les techniques de stabilisation utilisées est l'ajout de sable des dunes. Qui est notre cas d'étude.

**V-4- STABILISATION DE L'ARGILE DE HARRATEN PAR AJOUT DU SABLE DUNAIRE DE OUED ZHOUR :**

L'emploi du sable comme matériau traitant est une technique relativement récent elle consiste à compenser une quantité d'argile par une même quantité de sable de dune. Afin d'étudier l'effet du sable sur ces argiles, les échantillons sont mélangés et reconstitués avec différents proportions du sable (15%, 25% et 45%). Une comparaison entre les gonflements finaux a été établie et la réduction du gonflement par le sable est exprimée en pourcentage. Les conditions des essais utilisés pour mesurer le taux et le potentiel de gonflement sont les mêmes que celle utilisés au paravent ( $W\%=20\%$ ,  $\gamma_d = 18 \text{ KN/m}^3$ ).

**V-4-1- L'effet de l'ajout du sable sur la compressibilité du sol :**

L'essai de compressibilité à l'oedomètre sur le mélange d'argile plus 15% du sable de oued Zhou donne d'une manière générale l'effet de ce dernier sur les caractéristiques de compressibilité, le diagramme oedométrique ci après présente le résultat obtenu de cet essai.

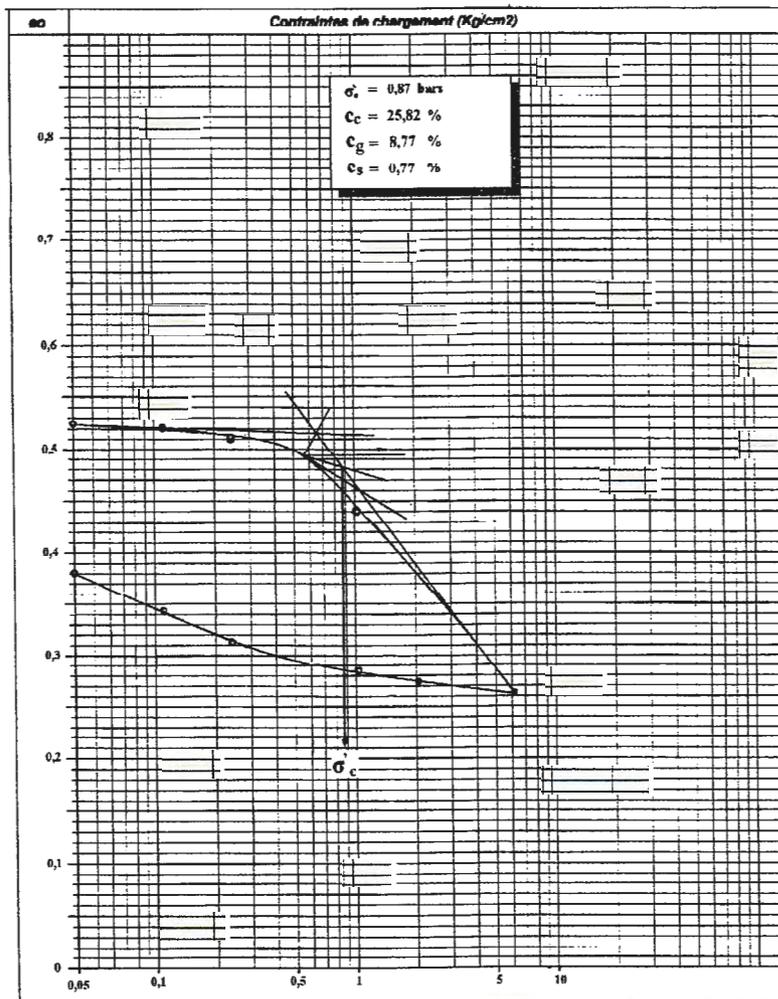


Figure V-11 : Diagramme œdométrie du mélange argile + 15% du sable

Les nouvelles caractéristiques de compressibilité de l'argile sont enregistrées au tableau V-11.

Paramètre	$\sigma'_c$ (bars)	$C_c$ (%)	$C_g$ (%)	$C_s$ (%)	$e_0$	$e_f$
Valeur	0,87	25,82	8,77	0,77	0,535	0,38

Tableau V-11 : Caractéristiques de compressibilité du mélange argile + 15% du sable

D'après ces résultats, il est clair que une proportion de 15% du sable fait intervenir sur les variations suivantes :

- Diminution de l'indice de gonflement par une valeur de 44.25% ( $\frac{\Delta C_g}{C_g}$ ) par rapport au valeur initiale de l'argile intact ( $C_g = 15,73\%$ ).
- Diminution considérable de l'indice de compression  $C_c$
- Augmentation considérable de contrainte de consolidation  $\sigma'_c$

**V-4-1- L'effet de l'ajout du sable sur le gonflement du sol :**

La méthode utilisée pour la mesure de la pression de gonflement des différents mélanges sable plus argile est la même que celle précédemment et qui est la méthode du gonflement libre. Les échantillons sont préparés avec prudence afin de les mettre en même condition pendant les essais.

La figure ci après représente les variations du taux de gonflement libre de l'argile en fonction du temps à différents proportions du sable additionner.

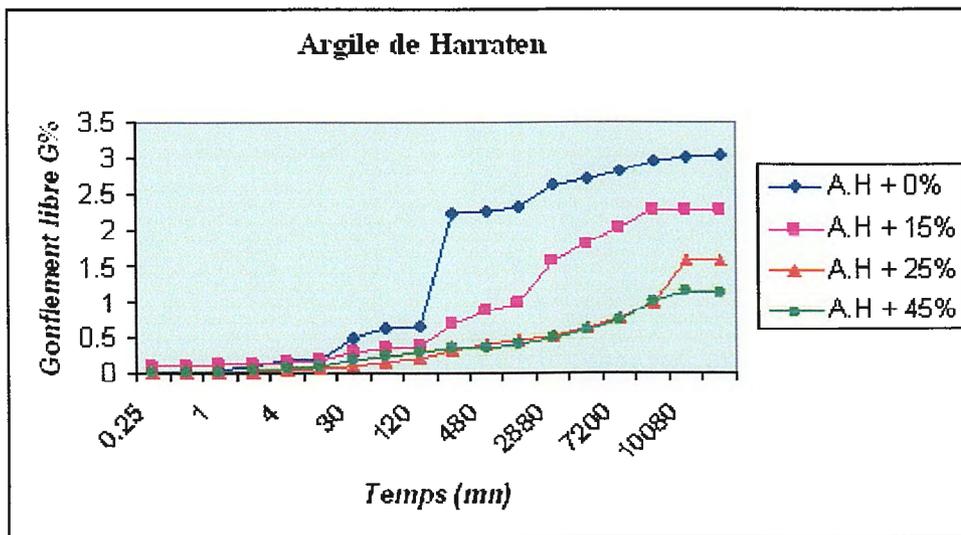


Figure V-12 : Evolution du gonflement des mélanges argile-sable en fonction du temps.

Les différents résultats de cette stabilisation sont notés au tableau V-12.

Pourcentage de sable de dune	Argile de Harraten A.H			
	$\varepsilon_{SW}$ %	$(\frac{\Delta\varepsilon_{SW}}{\varepsilon_{SW}})\%$	$\sigma_{SW}$ (bars)	$(\frac{\Delta\sigma_{SW}}{\sigma_{SW}})\%$
0 %	3 %	/	3,54	/
15 %	2,4 %	20 %	2,13	39,83 %
25 %	1,7 %	43,33 %	1.51	57,34 %
45 %	1,2 %	60 %	0.86	75,70 %

Tableau V-12 : Stabilisation par ajout de sable de dune.

A la lecture de ces valeurs, on peu dire que :

- A faibles pourcentages de sable ajouté, les particules de sable sont dispersées dans la masse argileuse. L'effet de l'ajout de sable sur la porosité de la masse du sol est faible et par conséquent la réduction du gonflement n'est pas importante.
- A moyen et fort pourcentage de sable ajouté, l'effet de celui-ci devient important. Cette quantité additionnée permet de créer des vides à l'intérieur de la masse sol, ce qui permet d'encaisser au sein de la structure, les variations de volume expérimentées par les particules argileuses.

Les résultats obtenus sont très encourageants, le sable de dune peut être utilisé comme stabilisant pour les sols expansifs.

#### V-4-2- Synthèse des résultats :

La figure V-12, présente une comparaison entre les effets des différentes proportions du sable sur l'argile de Harraten,  $\frac{\Delta\varepsilon_{SW}}{\varepsilon_{SW}}$  étant le pourcentage de réduction du taux de gonflement.

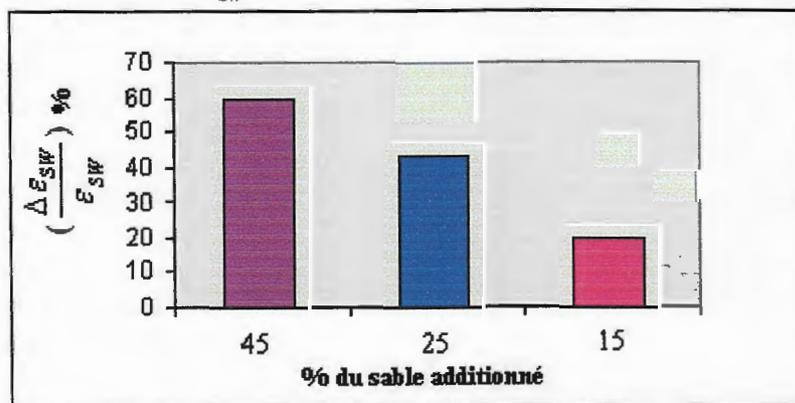


Figure V-13 : Effet des différents pourcentage du sable additionné.

Une diminution du gonflement de l'ordre de 43% et obtenue pour une proportion de 25% du sable, tandis qu'une proportion de 45% engendre une diminution de 60%.

Donc il est plus efficace et économique de prendre la valeur de 25% du sable additionné comme valeur traitante pour le problème, mais si on veut une stabilisation importante pour avoir des caractéristiques mécaniques maximales surtout en cas des nappes phréatiques rencontrées au niveau du site, on adopte 45% mais on aura dans ce cas une argile sableuse. Reste seule chose de côté économique qu'il faut mettre en considération, c'est la distance entre le terrain à problème de gonflement et le sable utilisé au traitement.

# CONCLUSION GENERALE

En effet malgré les multiples contraintes rencontrées au début du projet surtout pour effectuer les différents essais nécessaires (physiques, mécaniques et minéralogiques) et le temps qui semblait trop court pour ce genre de travail, nous avons pu réaliser le plus important, c'est-à-dire le minimum d'essais concernant directement les paramètres de gonflement ( $C_g, \varepsilon_{SW}, \sigma_{SW}$ ), et d'autres caractéristiques physiques et mécaniques qui nous ont aidé à classer et déterminer le type d'argile (argile marneuse) d'un côté et les essais minéralogiques (diffraction au rayon X, analyse chimique quantitative), qui sont réalisés pour la première fois dans un projet de fin d'étude des élèves ingénieurs de géologie et qui nous ont permis de donner une appellation à l'argile (illite et peut être smectite), déterminer les différents composants chimiques ainsi que le sable de oued Zhour (sable siliceux).

L'argile de Harraten a un potentiel de gonflement plus élevé que celle d'Abloutte traitée par l'autre binôme, l'argile de Harraten s'étend sur une grande superficie qui se prolonge vers la ville de Jijel tel que El akabi où on enregistre tous les jours des accidents typiques des sols gonflants tel que les fissurations dans les murs des constructions, éclatement des corps de chaussée, le décrochement et le glissement de masses énormes de sols malgré les dispositifs de soutènement retenus tels que le gabionnage, les caniveaux pour l'évacuation rapide des eaux de pluie...etc.

La stabilisation par ajout de sable du dune devient significative pour des pourcentages au-delà de 25% (jusqu'à 45%) de la masse de sol stabilisé.

En fin, on peut conclure que vu la quantité considérable de sable à ajouter aux sols gonflants pour aboutir à des réductions satisfaisantes du potentiel de gonflement (facteur économique), la technique de stabilisation par ajout de sable du dune s'impose comme une alternative efficace et économique pour le traitement des argiles gonflantes, le sujet reste ouvert pour la même étude sur d'autres argiles de la grande Algérie et notamment pour des argiles de Jijel pour les caractériser et établir une carte de zoning concernant le potentiel de gonflement et le meilleur pourcentage de sable à ajouter pour sa réduction.

Les techniques d'application de tout ceci sur le terrain restent un volet ouvert de la recherche dans le domaine de génie-civil.

Mis à part les essais physiques et mécaniques habituels réalisés dans les labos de génie-civil et génie géologie, les essais du bleu de méthylène, les essais chimiques et minéralogiques ont été réalisés au laboratoire de chimie-électronique et l'ENAVA à Taher, ainsi que interprétés par l'utilisation d'un logiciel approprié (les fiches ASTM).

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Belmedrec. S (2005) :**  
 Granulométrie et minéraux lourds des sables dunaire et de pelage des secteurs de Oued Zhour et Bni Belaid (Jijel, Algérie Nord Orientale). Thèse de magister en géologie structurale université de Constantine.
- [2] **Benzerara. K (2005) :**  
 Quelques techniques de la minéralogie, institut de minéralogie physique, matière condensée, université de paris 7, Denis diderot.
- [3] **Bekkouche A., Djedid A., et Aissa Mamoune S. M. (2001) :**  
 Identification et prévision du gonflement de quelques sols de la région de Tlemcen(Algérie). Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N°223 de juillet – août. Département de Génie Civil, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, BP 230 Tlemcen (13000). Tél/Fax: 00 213 43 28 56 85
- [4] **Bekkouche A., Aissa Mamoune S. M. et Djedid A. (2002) :**  
 Technique de stabilisation des sols expansifs. Journées d'Études sur les sols gonflants-JESG 27 Octobre 2002, Tlemcen. Département de Génie Civil, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, BP 230 Tlemcen (13000). Tél/Fax: 00 213 43 28 56 85.
- [5] **Betat. F., Khelaf. K. (2006) :**  
 Etudes géotechniques et géologiques du site de 185 logements (Mila) et proposition des solutions aux problèmes posés. Projet de fin d'étude géologie de l'ingénieur, université de Jijel.
- [6] **Bouillin. (1977) :**  
 Géologie Alpine de la petite Kabylie dans la région de Collo et d'Elmilia. Thèse de doctorat, Paris, France.
- [7] **Bultel F. (2001) :**  
 Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des tunnels. Thèse de doctorat. L'école Nationale des Ponts et Chaussées (France).
- [8] **Caquot. A et Kerisel. J. (1966) :**  
 Traité de mécanique des sols. 4<sup>ème</sup> édition, g/v, Paris. Gauthier-Villars
- [9] **Cordary. D (1994) :**  
 Mécanique des sols, édition Lavoisier, Tec et Doc.
- [10] **Costel. J et Sanglerat. G :**  
 Cours pratiques de mécanique des sols (calcul des ouvrages) tome 2. 3<sup>ème</sup> édition.
- [11] **Degoutte. G et Royet. P (2005) :**  
 Aide mémoire mécanique des sols. Les publications de l'ENGREF.

- [12] **Durand Delga. M (1955) :**  
Etude géologique de l'Ouest de la chaîne numidique. Thèse. Sciences, public.  
Serv. Carte géol. Algérie
- [13] **Durand Delga. M (1969) :**  
Mise au point sur la structure du Nord Est de la berbérie. Bull. Serv. Carte  
Géologique N° 39. Algérie.
- [14] **Donsimoni. M, Hatten. C, Giraud. F (2004):**  
Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de  
Val-doise. Opérations de service public du BRGM PSP31.DF20.
- [15] **Dunod (1970) :**  
Essai de compressibilité à l'oedomètre. Modes opératoires du laboratoire central  
des ponts et chaussées.
- [16] **Ecole nationale des travaux publics d'Alger (ENTPA) :**  
Catalogue des essais.
- [17] **Ferrah. F (2006) :**  
Prise en compte du gonflement pour le dimensionnement des fondations. Thèse de  
Magister en génie civil, option mécanique des sols, université de Batna.
- [18] **Gueddouda. M. K, Lamara. M, Hachichi. A et Goual. I (2006) :**  
Effet de l'ajout de sable dunaire sur le potentiel de gonflement des argiles.  
Communication science et technologie N° 4.
- [19] **Habib. P (1997) :**  
Génie géotechnique, application de la mécanique des sols et des roches. Edition  
Marketing/Ellipses.
- [20] **Léreau. J (2005) :**  
Cours géotechnique chapitre I. Institut national des sciences appliquées de  
Toulouse. France.
- [21] **Mouroux P, Magron P. et Pinte J.C (1987) :**  
La construction économique sur sols gonflants, Manuel et Méthodes N°14  
Ed. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans
- [22] **Philipponnat .G et Bertrand .H (1970) :**  
Fondations et ouvrages en terre, Eroylles.
- [23] **Raoult .J.F (1969) :**  
Relation entre la dorsale Kabyle et les flyschs sur la transversale de Dj. Ghdeir,  
phases tangentielles Eocène, paléogéographique (Nord Constantinois, Algérie)  
Bull. Soc. Paris. France.
- [24] **Raoult .J.F (1974) :**  
Géologie du centre de la chaîne numidique (nord Constantinois, Algérie). Thèse.  
science. Paris

- [25] Schlosser. F (1980) :  
Cours sommaire de mécanique des sols (LCPC).
- [26] Tisot, J.P (1983) :  
Les essais de laboratoire en mécanique des sols (école nationale supérieur de géologie appliquée et de prospection minière de Nancy)
- [27] Vila. J. M (1980) :  
La Chaîne Alpine d'Algérie Orientale et des confins Algéro-Tunisiens. Thèse de doctorat, université de Pierre et Marie Curie (Paris. France)
- [28] Wildi. W (1983) :  
Chaîne tello- rifaine (Algérie – Maroc – Tunisie) structure stratigraphique et évolution du Trias au Miocène.
- [29] Woltz. R et Kovellev. W:  
Introduction à la géotechnique (traduite par J.Lafleur. AF)

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Avantages et inconvénients des techniques de stabilisation couramment utilisées.....	12
Tableau II-1: Cordonnées des stations météorologiques de la région de Jijel.....	23
Tableau II-2 : précipitations moyennes annuelles des station : Jijel (ANRH) et d'Achouat en (mm).....	23
Tableau II-3 : Précipitations moyennes mensuelles et saisonnières (Série ancienne P.SELTZER (1913-1938) de la station d'Achouat, en (mm).....	24
Tableau II-4 : Précipitations moyennes mensuelles et saisonnières des stations Jijel (ANRH), Achouat, et barrage El Agrem en (mm).....	24
Tableau II-5 : Températures moyennes mensuelles de la station Jijel (port) pour la période (1978-1989).....	25
Tableau II-6 : Températures moyennes mensuelles de la station d'Achouat pour la période (1996-2005).....	26
Tableau II-7 : Valeurs moyennes mensuelles des vents, (en m /s).....	27
Tableau II-8 : Valeurs moyennes mensuelles de l'humidité de la station d'Achouat.....	27
Tableau II-9 : Valeurs moyennes mensuelles de l'évaporation de la station d'Achouat.(en mm).....	28
Tableau III-1 : Valeurs de l'indice des vides en fonction de la nature lithologique du sol.....	30
Tableau III-2 : Classification du sol en fonction de la teneur en eau.....	31
Tableau III-3 : La nature lithologique du sol en fonction de la teneur en eau.....	32
Tableau III-4 : Quelques valeurs d'équivalent de sable.....	36
Tableau III-5 : Degré de plasticité.....	39
Tableau III-6 : Classification L.P.C des sols grenus.....	41
Tableau III-7 : Classification des sols organiques selon L.P.C .....	42
Tableau III-8 : Classification des sols (NFP 11-300) - Tableau simplifié.....	43
Tableau III-9 : Teneur en CaCO <sub>3</sub> en fonction de la nature lithologique.....	46
Tableau III-10 : Classification des sols suivant leur indice de compression.....	50
Tableau III-11 : Classification des sols en fonction de C <sub>C</sub> .....	50
Tableau IV-1: Caractéristiques des argiles .....	55
Tableau IV-2 : Relation entre le gonflement libre et l'indice de plasticité (Seed et al.1962).....	58
Tableau IV-3 : Classification proposée par Dakshanamurthy et Raman (1973).....	60
Tableau IV-4 : Relation entre l'indice de plasticité et le pourcentage des particules <2 μ m (BRE, 1980).....	60
Tableau IV-5 : Relation entre La limite de liquidité et la pression de gonflement (Chen, 1988).....	60
Tableau IV-6 : Relation entre le gonflement libre et l'indice de plasticité (Seed et al. 1962).....	61
Tableau IV-7 : Relation entre potentiel de gonflement et limite de retrait (Altemeyer, 1955).....	61
Tableau IV-8 : Relation entre potentiel de gonflement et indice de retrait (Ranganatham et Satyanarayana, 1965).....	61
Tableau IV-9 : Potentiel de Retrait (Holtz et Gibbs, 1956).....	62
Tableau IV-10 : Potentiel de gonflement (Holtz, Dakshanamurthy et Rama, 1973).....	62
Tableau IV-11 : Comparaison entre les différentes de méthodes de classification (Johnson et Sneathen, 1978) et (Josa, 1988).....	64

Tableau IV-12 : Evaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de la valeur au bleu (VBS).....	65
Tableau IV-13: Résultats d'ajustement des modèles de gonflement.....	66
Tableau V-1 : Paramètres d'identification de sable de oued Zhour.....	68
Tableau V-2 : Résultat d'analyse chimique de sable d'oued Zhour.....	69
Tableau V-3 : Résultat d'analyse chimique du sol de Harraten.....	70
Tableau V-4: Caractéristiques physiques des argiles de Harraten.....	72
Tableau V-5 : Résultats de l'analyse sédimentométrique de l'argile de Harraten.....	73
Tableau V-6 : Résultats de l'essai au bleu de méthylène.....	74
Tableau V-7 : Caractéristiques de compressibilité.....	76
Tableau V-8: Estimation indirecte du potentiel de gonflement du sol de Harraten.....	76
Tableau V-9 : Résultats de la pression de gonflement proposer pour l'argile de Harraten....	77
Tableau V-10 : Résultats de l'amplitude de gonflement proposer pour l'argile de Harraten.....	77
Tableau V-11: Caractéristiques de compressibilité du mélange argile + 15% du sable.....	80
Tableau V-12 : Stabilisation par ajout de sable de dune.....	81

# LISTE DES FIGURES

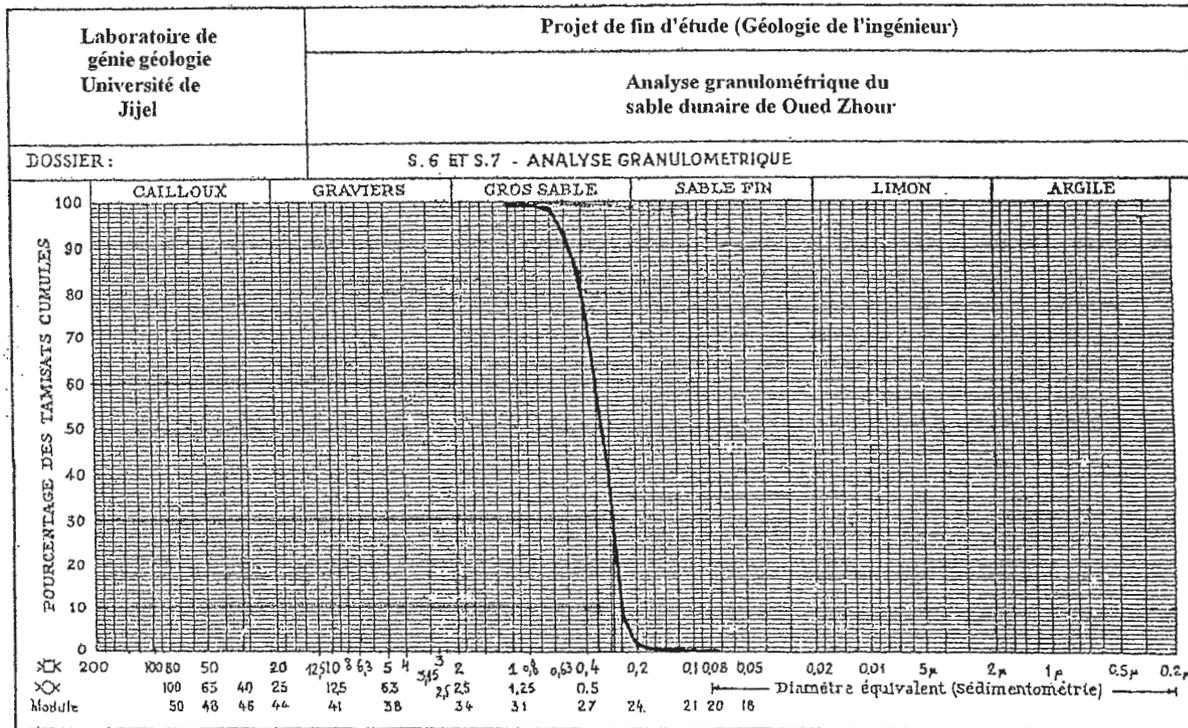
Figure I-1 : Localisation des zones (Argile de Harratene, sable dunaire de oued Zhour) dans la Wilaya de Jijel.....	3
Figure I-2 : Situation géographique du site de Harratene Extrait de la carte de Djidjelli (dépôt de Constantine) Feuille N° 28, selon I.G.N (1959).....	4
Figure I-3 : Photo satellite (plage d'oued Zhour) Extrait de Google Earth 2007.....	5
Figure I-4 : Formes de dégâts sur des bâtiments reposant sur des terrains gonflants, (Mouroux et al. 1987).....	8
Figure I-5 : Forme des désordres subits par la chaussée.....	9
Figure I-6 : Semelle superficielle sur remblai .....	10
Figure I-7 : Semelle superficielle sur remblai partiel + vide sanitaire.....	11
Figure I-8 : Fondation profonde (puits ou pieux).....	11
Figure II-1 : Esquisse structurale du nord- Est Algérien (W. Wildi, 1983.).....	13
Figure II-2 : Extrait de la carte structurale du Nord-Est de l'Algérie et des confins Algéro-Tunisiennes.....	16
Figure II-3 : Coupe géologique Nord-sud, parallèle à la route Jijel-TeXenna, illustrant le schéma du bassin néogène de Jijel (Boufatouha.Y.2005).....	19
Figure II-4 : Coupe géologique Est-Ouest, parallèle au trait de coté illustrant le schéma structural du bassin néogène de Jijel (Boufatouha.Y.2005).....	20
Figure II-5 : Les différentes formations lithologiques du site de Harraten.....	22
Figure II-6 : Coupe géologique illustrant les différentes formations lithologiques du site de Harraten (D'après L.N.H.C).....	22
Figure II-7 : courbes des précipitations moyennes mensuelles et saisonnières des stations Jijel (ANRH), Achouat, et barrage El Agrem.....	25
Figure II-8 : Températures moyennes mensuelles des séries ancienne (1978-1989) et récente (1996-2005).....	26
Figure II-9 : Diagramme ombrothermique.....	27
Figure II-10 : Valeurs moyennes mensuelles de l'humidité et du vent (en m/s).....	28
Figure II-11 : Valeurs moyennes mensuelles d'évaporation de la station d'Achouat (en mm).....	28
Figure III-1 : Schéma simplifié des trois phases du sol.....	33
Figure III-2 : Exemples des courbes granulométriques.....	35
Figure III-3 : Essai d'équivalent de sable.....	36
Figure III-4 : Etats des sols.....	37
Figure III-5 : Appareillage pour la détermination de la limite de liquidité.....	37
Figure III-6 : Limite de liquidité.....	38
Figure III-7 : Détermination de la limite de plasticité.....	38
Figure III-8 : Seuils d'argilosité des sols cité par le GTR 92 .....	39
Figure III-9 : Valeurs de bleu des sols.....	40
Figure III-10 : Diagramme de plasticité de Casagrande.....	42
Figure III-11 : Schéma de principe de diffractomètre de rayon X.....	44
Figure III-12 : Résultat d'une expérience de diffraction des rayons X.....	45
Figure III-13 : Exemple de fiche A.S.T.M .....	45
Figure III-14 : Différents parties d'un appareil œdométrique.....	47
Figure III-15 : Exemple des courbes de compressibilité pour les sols .....	48

Figure III-16 : Courbe œdometrique en coordonnées semi logarithmique.....	49
Figure III-17 : Détermination graphique de pression de consolidation ( $\sigma'_c$ ).....	51
Figure IV-1 : a) Unité tétraédrique à coeur de silicium; b) Schéma d'une couche de tétraèdre avec arrangement hexagonal .....	52
Figure IV-2 : a) Unité octaédrique b) Structure en couche à base d'octaèdre de Brucite Mg(OH) <sub>2</sub> ou de Gibbsite Al(OH) <sub>3</sub> .....	52
Figure IV-3:Structure particulaire de la Kaolinite, (Mouroux et al. 1987) .....	53
Figure IV- 4:Structure particulaire de l'illite, (Mouroux et al. 1987).....	53
Figure IV-5:Structure particulaire de la chlorite, (Mouroux et al. 1987).....	54
Figure IV-6 : Structure particulaire de la montmorillonite, (Mouroux et al. 1987).....	54
Figure IV-7: Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles.....	55
Figure IV-8 : Evolution de texture des sols au cours du gonflement .....	56
Figure IV-9: Observation au MEB d une texture argileuse (Troalen et al. 1984).....	56
Figure IV-10 : Diagramme de classification du potentiel de gonflement (Seed et al.1962)...	58
Figure IV-11 : Abaque de Williams et Donaldson pour l'identification des sols gonflants....	59
Figure IV-12: Caractérisation des sols gonflants.....	59
Figure IV-13 : Influence de la densité sèche sur le gonflement (Sridharan et al. 1986).....	62
Figure V-1 : Courbe granulométrique du sable dunaire de oued Zhour.....	68
Figure V-2 : Composition minéralogique du sable dunaire de oued Zhour.....	69
Figure V-3 : Résultat de diffraction des rayons X, sol de Harraten.....	71
Figure V-4 : Exemple d'échantillon du sol de Harraten.....	71
Figure V-5 : Diagramme de Casagrande de classification des sols fins.....	72
Figure V-6: Position des minéraux argileux les plus communs sur l'abaque de plasticité de Casagrande.....	73
Figure V-7 : Position du sol de Harraten dans le diagramme de classification du potentiel de gonflement (Seed et al.1962).....	74
Figure V-8 : Présentation de l'argile de Harraten dans l'abaque de Williams et Donaldson.....	74
Figure V-9 : La courbe de compressibilité.....	75
Figure V-10 : Evolution du gonflement libre en fonction du temps.....	78
Figure V-11 : Diagramme œnométrie du mélange argile + 15% du sable.....	79
Figure V-12 : Evolution du gonflement des mélanges argile-sable en fonction du temps.....	80
Figure V-13 : Effet des différents pourcentage du sable additionné.....	81

# ANNEXES

# ANNEXE I

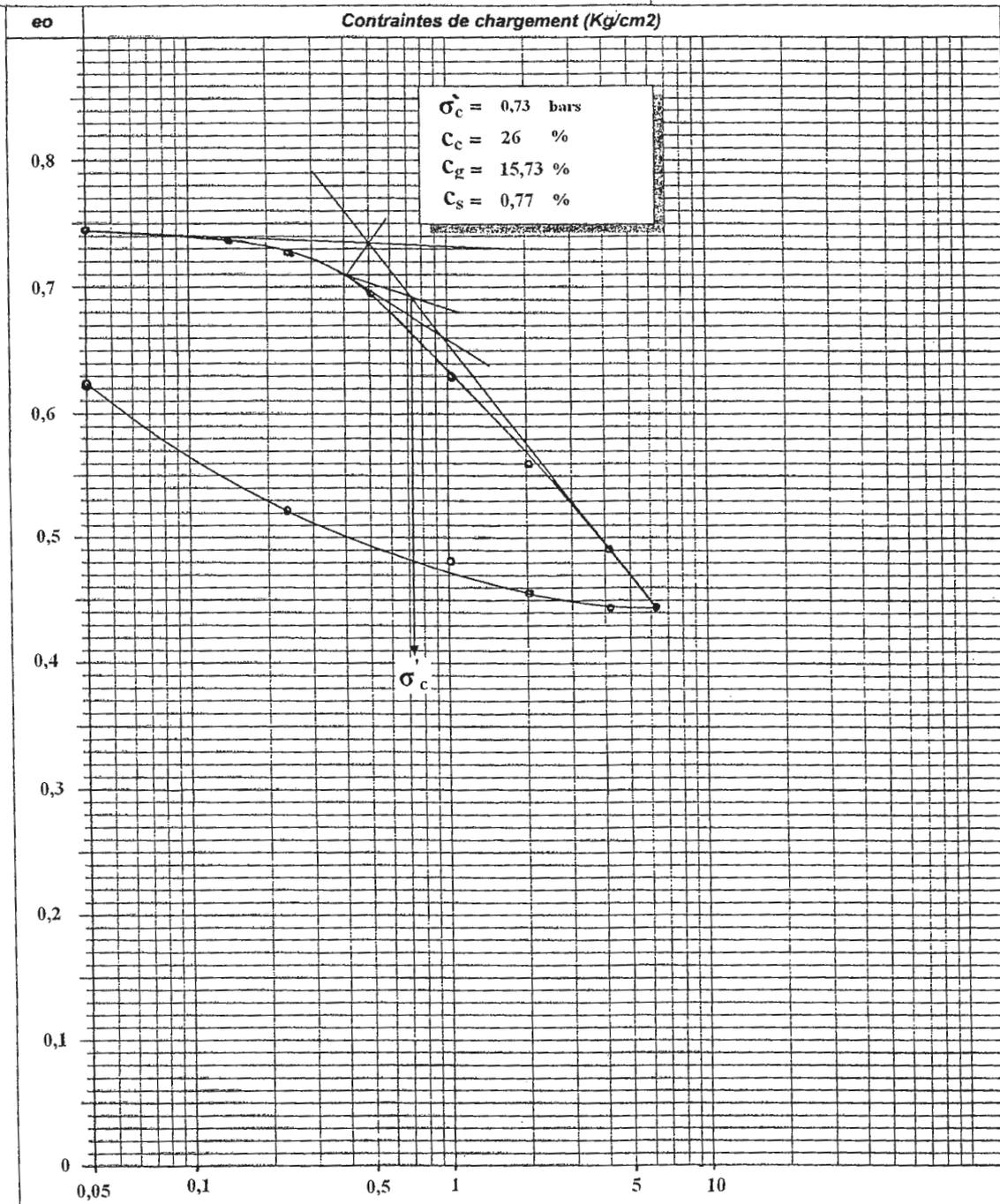
## COURBE GRANULOMETRIQUE DU SABLE DUNAIRE DE OUED ZHOUR.



# ANNEXE 2

## COURBE DE COMPRSSIBILITE À L'OEDOMETRE. ARGILE HARRATEN.

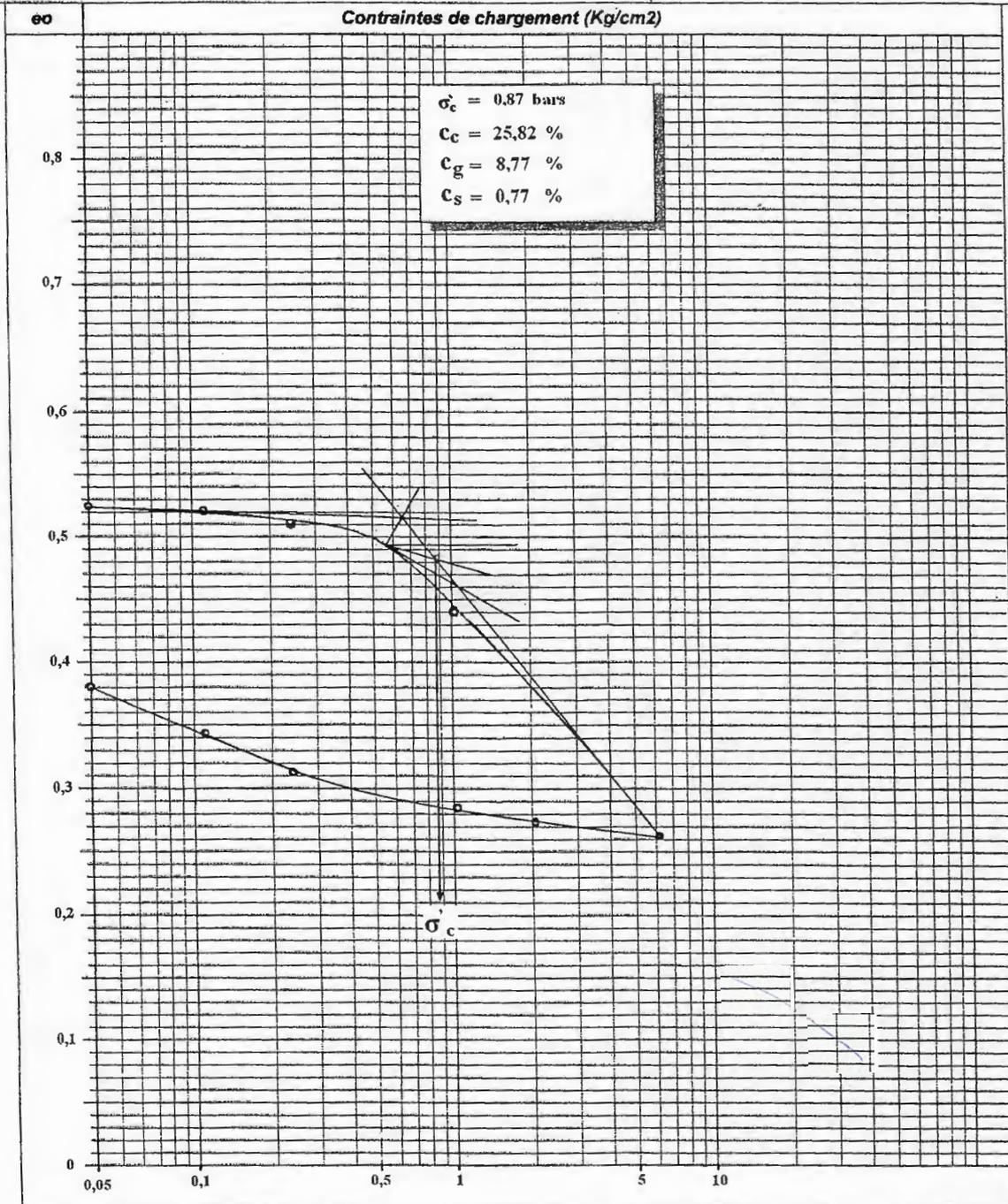
Dossier N° :	Réf Sondage : Argile de Harraten .
Étude : Projet de fin d'étude (géologie de l'ingénieur)	Profondeur : 0 - 1,5 m
Lieu : Laboratoire de génie civile université de Jijel.	Date essai : Le 13/05/2007
Client :	



# ANNEXE 3

## COURBE DE COMPRESSIBILITE A L'OEDOMETRE DU MELANGE (15% SABLE + ARGILE)

<b>Dossier N° :</b> Essai oedométrique sur le mélange (15% sable + argile)	<b>Réf Sondage :</b>
<b>Etude :</b> Projet de fin d'étude géologie de l'ingénieur	Argile de Harraten + Sable de oued Zhou
<b>Lieu :</b> Laboratoire de génie civile université de Jijel.	<b>Date essai :</b> Le 03/06/2007
<b>Client :</b>	



# ANNEXE 4

AGENCE NATIONALE DES RESSOURCES HYDROLIQUES.  
TABLEAU DES PRECIPITATIONS MOYENNES MENSUELLES (en mm).

STATION D'ACHOUAT.  
(1995 - 2005).

ANNEE MOIS	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Jan	132.4	55.2	34.5	181.4	99.8	248.3	67.4	332.5	121.3	260.7	190.4
Fev	238.9	17.1	132.9	90.4	37.6	100.8	67.8	121.5	75.6	212.6	183
Mar	142.1	21.1	64.5	75.3	15.3	13	31.6	33.5	73.5	82.2	59.7
Avr	117	87	98	39.5	30.6	57	51.9	129.2	107	134.8	32.6
Mai	61.6	12.7	135	3.3	108.3	47.1	12.9	50.5	85.5	6.4	26.8
Jui	41.7	23.9	1	0	12.2	0	1.4	0	86.8	0	2.2
Juil	5.5	0	0	0	1.5	0	18.6	4.2	1.1	4	0
Aout	0.8	6.1	24.5	0	10	1.7	84.3	0	2.2	7.5	27.1
Sep	-	-	115.6	94.6	23	26.6	40.6	83.1	136.2	71.5	52.7
Oct	82.4	121.6	186.4	81.6	8.7	104.3	3.7	68	77.8	33.4	71.72
Nov	60.2	90.1	153.1	325.8	210.4	160.5	139.9	189.7	160	263.8	144.4
Dec	83.4	123.6	144.7	153.4	299.8	69.7	136.7	398.7	254.2	174.9	166.2

AGENCE NATIONALE DES RESSOURCES HYDROLIQUES.  
TABLEAU DES PRECIPITATIONS MOYENNES MENSUELLES (en mm).

STATION DE JIJEL (ANRH).  
(1995 - 2005).

ANNEE MOIS	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Jan	138.1	53.1	46.5	136.2	87.5	240.4	71.2	349.2	130.5	270	176.5
Fev	293.9	13.1	120.1	71.1	29.5	79.4	59.7	118.6	63	199.5	172
Mar	113.1	16	92.1	61.2	17.6	13.1	34.7	37.2	79.5	70	55
Avr	119	73.7	107.7	45.6	24.6	63.3	47.1	114.3	123.5	111.5	26.5
Mai	48.9	8.7	100.1	4.1	56.7	53.1	11.2	40	84	4	28
Jui	45.9	26.3	1.2	3.6	8.7	0	0.0	0.6	32.5	0	1.5
Juil	7	0	0	2.9	1.6	0	5.8	1.5	1	0.5	1.5
Aout	9.6	5	28.6	3	0.2	2.9	23.4	0.3	10	8	45
Sep	56.8	36.5	134.5	89.3	28.6	9.9	20.4	25.3	64.2	58	33
Oct	99.1	138.5	69.3	75	19	106.3	0.3	46.4	69	55	13.5
Nov	62,3	117.1	162.7	355.9	279.8	97	125.2	260.4	88.1	322	206
Dec	89.9	169	102	187.8	213.3	107.3	113	353.5	234.2	155	160.5

**OFFICE NATIONAL DE LA METEOROLOGIE.  
TABLEAU DES TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES (en °C).**

**STATION JIJEL (PORT).  
(1978-1989)**

<b>MOIS ANNEE</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dec</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Avr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jui</b>	<b>Juil</b>	<b>Aou</b>
<b>1978-1979</b>	22.6	20.4	17.3	12.5	11.9	12.5	13.8	15.4	18.2	23.1	27.2	26.3
<b>1979-1980</b>	23.1	20.5	16.8	11.8	12.1	12.7	13.7	15.7	18.4	24.2	26.9	26.7
<b>1980-1981</b>	23.4	20.4	16.5	12.3	12.4	12.4	13.8	15.7	18.3	23.4	27.0	26.8
<b>1981-1982</b>	-	-	18.1	12.7	13.4	12.6	13.8	15.2	18.5	23.3	27.2	25.6
<b>1982-1983</b>	22.6	18.9	17.8	14.1	11.8	11.6	13.8	16.5	18.8	22.1	27.1	25.6
<b>1983-1984</b>	23.3	20.7	18.6	13.4	12.9	11.9	12.5	15.1	16.6	24.0	24.3	23.6
<b>1984-1985</b>	23.6	21.2	16.7	14.3	11.1	14.1	12.6	16.0	17.5	21.7	24.7	24.4
<b>1985-1986</b>	26.1	22.8	16.8	13.0	12.7	12.5	13.4	16.0	19.0	20.6	23.7	25.8
<b>1986-1987</b>	22.7	22.0	16.9	15.1	12.0	12.5	13.5	16.7	17.8	21.9	25.3	26.7
<b>1987-1988</b>	24.3	20.6	17.4	12.6	14.2	12.5	13.2	16.1	18.9	22.0	26.4	26.5
<b>1988-1989</b>	26.1	22.8	17.1	16.3	11.6	13.1	13.8	15.8	18.4	22.0	25.6	27.1

**OFFICE NATIONAL DE LA METEOROLOGIE.  
TABLEAU DES TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES (en °C).**

**STATION D'ACHOUAT.  
(1996 -2005).**

<b>ANNEE MOIS</b>	<b>1996</b>	<b>1997</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>
<b>Jan</b>	14,4	13,4	12,3	11,5	09,7	12,6	10,9	11,4	11,6	09,1
<b>Fév</b>	11,5	12,3	12,1	10,0	11,7	11,3	11,5	11,0	12,2	09,2
<b>Mar</b>	13,8	12,0	13,5	13,2	13,3	16,6	13,5	13,4	13,4	13,0
<b>Avr</b>	15,7	14,6	15,0	14,5	16,0	14,7	14,6	15,6	14,6	16,1
<b>Mai</b>	18,1	19,0	17,8	20,0	19,3	17,4	17,7	17,8	17,0	19,8
<b>Jui</b>	21,7	22,9	22,6	23,0	21,5	22,7	21,7	14,7	21,2	23,5
<b>Juil</b>	24,8	23,5	24,0	24,4	25,4	24,4	24,2	27,2	24,4	26,1
<b>Août</b>	24,9	25,8	25,0	27,9	26,4	25,6	24,8	27,4	26,5	25,5
<b>Sept</b>	21,0	23,8	23,5	24,5	23,4	22,8	22,6	23,9	23,9	23,7
<b>Oct</b>	17,5	20,0	17,8	22,8	19,5	22,6	19,5	21,0	21,9	21,0
<b>Nov</b>	15,5	16,3	14,4	14,8	15,7	15,6	16,5	16,2	14,2	15,7
<b>Déc</b>	14,0	13,7	11,6	12,0	11,2	11,0	13,9	12,0	12,8	11,9

**OFFICE NATIONAL DE LA METEOROLOGIE.  
TABLEAU DES VITESSES MOYENNES MENSUELLES DES VENTS (en m/s).**

**STATION D'ACHOUAT.  
(1995-2005).**

ANNEE MOIS	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Jan	1.8	0.9	2	2.7	3.4	2.5	2.9	2.8	3.1	1.9	3
Fév	2.5	1.5	2.1	3.1	1.5	3.9	1.4	2	5	2.4	2.4
Mar	3.2	1.8	2.1	1.5	2.4	2.3	2.2	2.9	5.1	2.1	2.8
Avr	2.5	3.3	1.8	2.5	1.5	2	2.9	2.4	0.3	3.1	3
Mai	2.3	1.9	1.8	1.3	2.5	1.8	2.5	-	0.8	1.7	2.3
Jui	2.1	2.4	1.9	1.8	1.8	2.1	2.3	1.6	6	2.2	2.6
Juil	1.6	1.8	2	2.2	2.1	1.2	2.5	2.4	2	2.4	2.3
Août	1.5	1.6	1.5	1.8	2.1	1.7	2.3	2.9	0.8	2.3	2.3
Sept	1.8	2.1	1.6	2.8	1.8	2.4	1.9	3.1	2.6	1.9	2.1
Oct	1.9	1.8	1.6	1.8	1.1	2.7	2.3	2.5	3	2.1	1.7
Nov	1.7	1.5	1.4	1.7	2.1	2.8	3.8	4.8	0.8	1.9	3
Déc	2.2	2.1	2.4	1.5	2	3.1	3.7	3.6	-	2.8	2

**OFFICE NATIONAL DE LA METEOROLOGIE.  
TABLEAU DES VALEURS MOYENNES MENSUELLES DE L'HUMIDITE (en %).**

**STATION D'ACHOUAT.  
(1995-2005).**

ANNEE MOIS	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	TOTAL
Jan	80	83	81	83	75	72	72	77	81	80	77	861
Fév	78	85	77	77	80	75	83	82	79	77	77	870
Mar	77	82	76	81	75	76	77	75	75	78	72	844
Avr	77	81	77	68	77	76	74	76	75	71	76	828
Mai	77	84	76	76	72	119	67	82	73	81	79	886
Jui	77	78	77	70	76	77	13	75	73	81	67	764
Juil	73	81	76	69	72	69	74	74	70	69	73	800
Août	71	74	77	65	69	73	71	76	70	69	71	786
Sept	76	76	78	70	72	114	74	88	74	77	77	876
Oct	79	79	76	79	73	77	76	77	67	74	71	828
Nov	80	82	80	77	69	74	77	80	80	77	77	853
Déc	79	78	83	80	75	74	75	79	81	80	77	854

**OFFICE NATIONAL DE LA METEOROLOGIE.  
TABLEAU DES VALEURS MOYENNES MENSUELLES D'EVAPORATION (en  
mm)**

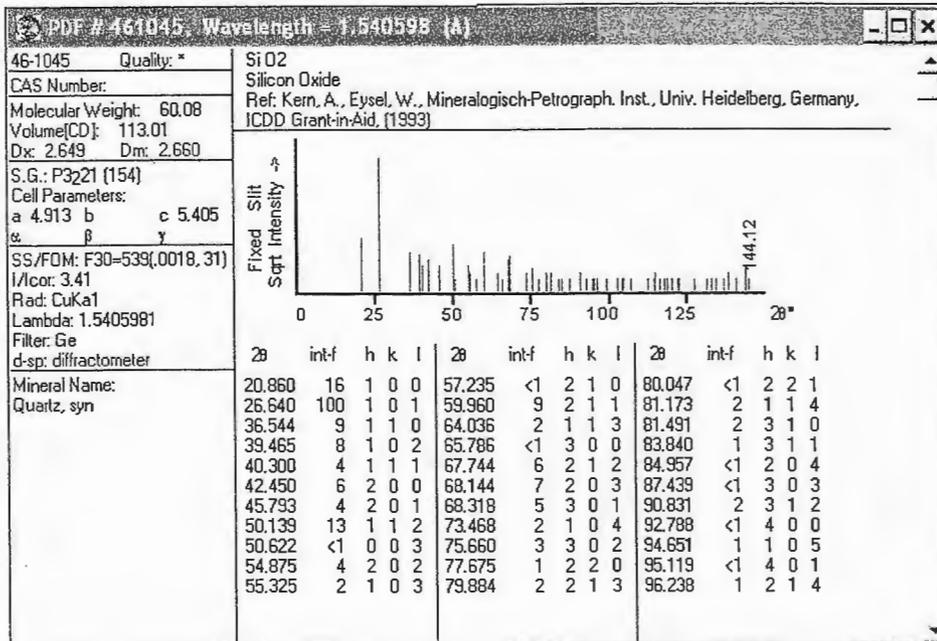
**STATION D'ACHOUAT.  
(1995-2005).**

<b>ANNEE MOIS</b>	<b>1995</b>	<b>1996</b>	<b>1997</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Jan</b>	65	44	48	75	87	88	63	49	33	33	49	634
<b>Fév</b>	64	61	65	83	64	72	31	31	36	44	41	592
<b>Mar</b>	99	56	78	53	81	72	50	53	55	47	78	722
<b>Avr</b>	89	76	81	83	74	71	61	52	52	78	54	771
<b>Mai</b>	89	60	92	96	106	69	64	41	31	46	55	771
<b>Jui</b>	104	405	96	136	85	83	88	71	78	55	107	1008
<b>Juil</b>	147	93	125	157	123	133	87	75	100	104	89	1233
<b>Août</b>	164	128	120	179	134	117	91	74	107	106	97	1317
<b>Sept</b>	122	128	115	142	109	100	76	72	80	75	64	1083
<b>Oct</b>	90	91	99	78	81	79	64	51	101	75	84	893
<b>Nov</b>	64	58	62	73	96	74	54	40	49	55	48	673
<b>Déc</b>	64	68	56	47	75	66	52	42	45	63	37	615

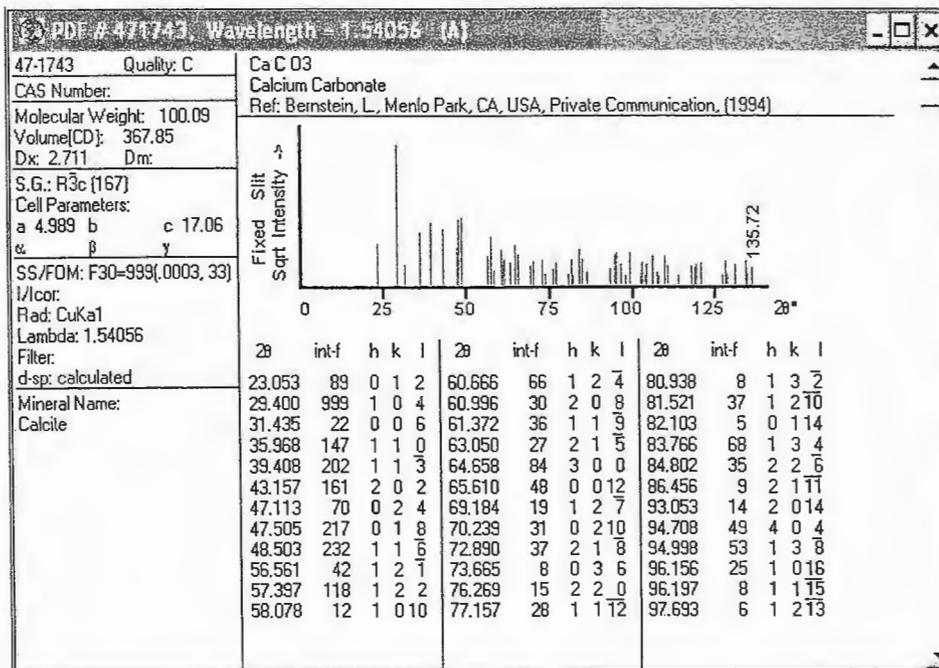
# ANNEXE 5

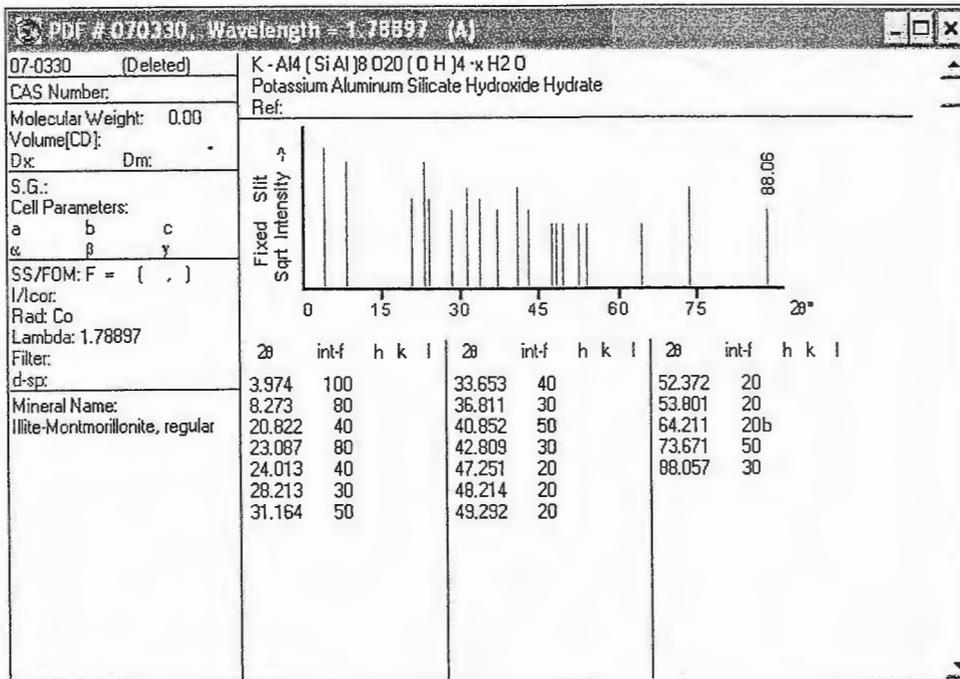
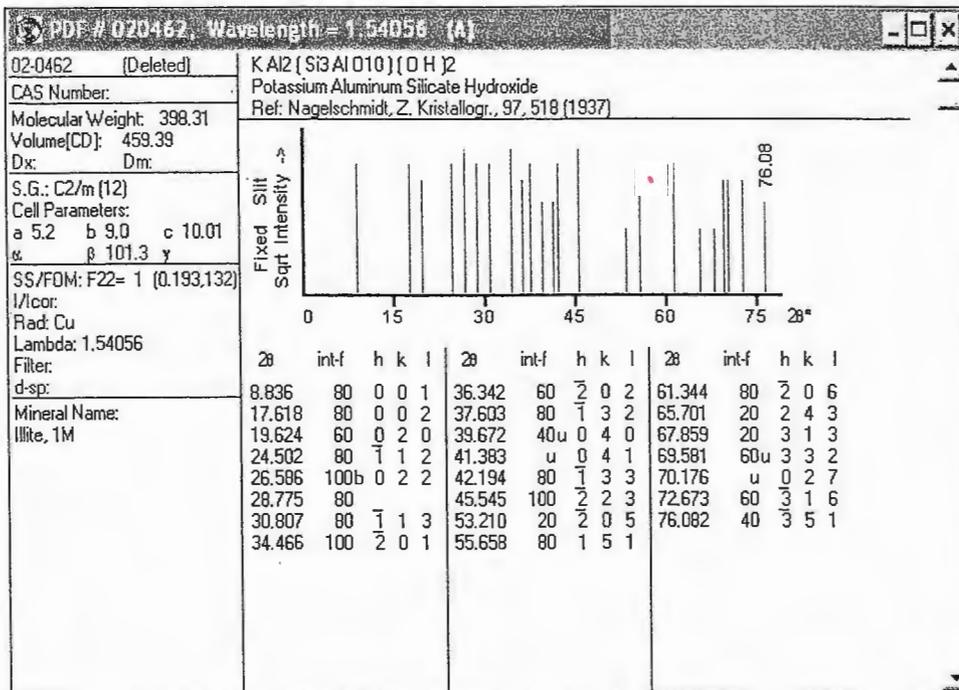
## LES FICHES D'ANALYSE MINÉRALOGIQUE D'ARGILE DE HARRATEN.

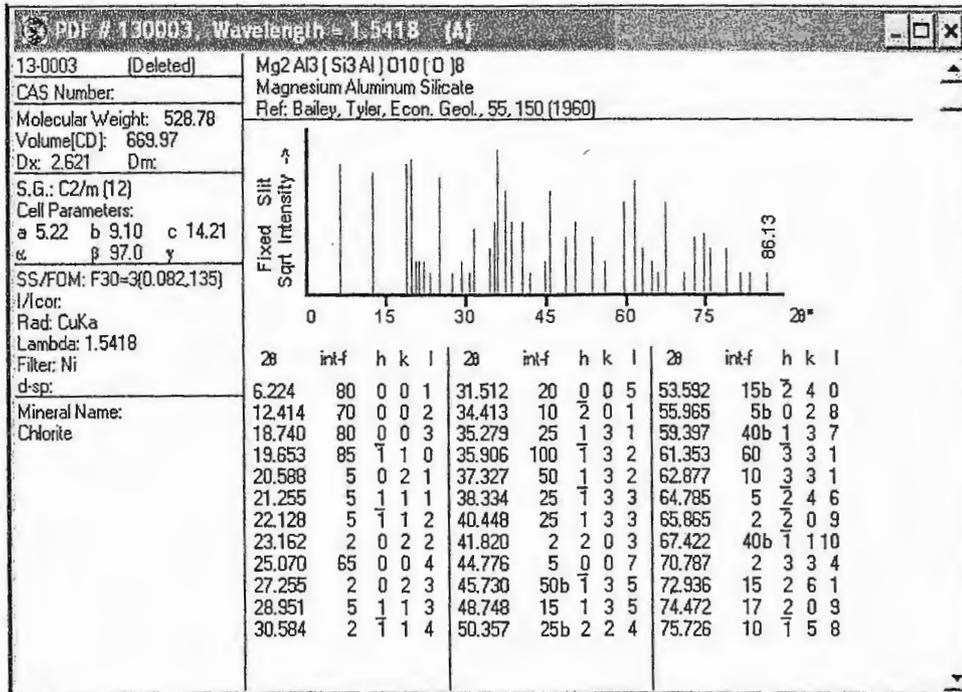
### A/- Quartz : (SiO<sub>2</sub>)



### B/- Calcite : (CaCO<sub>3</sub>)



**C/- Montmorillonite :  $KAl_4(SiAl)_8O_{20}(OH)_4(H_2O)$** **D/- Illite :  $KAl_2(SiAlO_{10})(OH)_2$** 

**E/- Chlorite :  $Mg_2 Al_3 (Si Al) O_{10} (O)_8$** **F/- Kaolinite :  $Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4$** 