REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE



SCIENTIFIQUE UNIVERSITE : EL HADJ LAKHDAR - BATNA



FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER en Géologie du génie civil et des milieux aquifères

Thème :

Influence du comportement des argiles sur les écoulements souterrains au sein des formations du recouvrement de la zone de Fesdis — plaine d'El Madher (Nord-Est Algérien).

Présenté par : BELOUANAS Hemza

Soutenue devant le jury composé de:

Président :	Mr YAHIAOUI A	M C A	Université de Batna
Promoteur :	Mr MENANI M.R	Professeur	Université de Batna
Examinateur :	Mr MARMI R	Professeur	Université de Constantine
Examinateur :	Mr FOURAR A	M C A	Université de Batna

Année 2012

Abstract:

The study presented in this paper concerns a study of the influence of behavior on the groundwater emerald to his training in the recovery area Fesdis which is located in the upper watershed of El Madher (W Batna). The area has a semiarid climate with a cold and rainy winter and a hot dry summer.

The alluvial aquifer piezometric fluctuations presented a contrast compared to the alluvial aquifer of El Madher. The work required therefore combined two approaches, namely a hydrogeological approach of the phenomenon and another,rather Geotechnical which highlighted the physical environment can influence groundwater flow.

The upper part of the alluvial aquifer consists of fine particles which are clayswith some intercalations of gravel and pebbles. The lower part of the collection consists of coarse FORMED sand, gravel and pebbles weakly cemented by clay.

The study of the shallow aquifer water table showed abnormal fluctuation in the water at the area Fesdis. Indeed the level the groundwater is higher in summer than pluvial period.

The geotechnical study in situ and laboratory has shown that this phenomenon is related to the predominance of clays at the top of the aquifer and the cycle of shrinkage and swelling of the clay matrix, clays in question are of the illite.

Remerciements

Au terme de ce travail, il m'est agréable de remercier tous ceux qui ont contribué à sa réalisation et en particulier :

- Mr. Le Professeur Menani Mohamed Rédha, qui a accepté de diriger ce travail. Ayant eu le privilège d'assister a ses cours durant mes études de graduations ainsi qu'au poste graduation, j'ai pu profiter de sa grande expérience. Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude
- Dr. YAHIAOUI .A, qui a eu la bien veillance d'accepter de juger ce travail et de le présider.
- Le Professeur. MARMI R et Le Professeur FOURAR A, d'accepter de juger ce travail.

Mes remerciements vont encore à :

- Mes Enseignants, et doctorants du département de la science de la terre et de l'univers, pour leur soutien moral et leur accueil chaleureux.
- ✤ Le DR. BOUABSA Lakhder université de Annaba.
- ✤ Mes collègues et amis pour leur soutien et leur aide durant ce travail.
- Je remercie également Mr le directeur du laboratoire nationale de l'habitat et de la construction (LNHC unité de Batna), Kamel, Hichem, Hassan, Zoubir, Mme Jamila et Mme Hourria.

Je n'oublie pas, enfin, d'exprimer ma profonde reconnaissance à :

✤ Mes parents et ma famille.

SOMMAIRE

Abstract
Remercîments
Sommaire
Liste des figures
Liste des tableaux

INTRODUCTION	GENERALE1
--------------	-----------

CHAPITRE I : CADRE GEOGRAPHIQUE

I.1. Situation géographique	4
I-2 Géomorphologie	4
I-3 Réseau hydrographique	4
I-4 Climat.	5
I-5 Végétation	5
I-6- Aperçu socio-économique	5

CHAPITRE II: CADRE GEOLOGIQUE

II.1. INTRODUCTION	8
II.2. GEOLOGIE REGIONAL	8
1– introduction	9
2– Lithostratigraphie	9
a) Les formations du Trias:	9
b) Les formations du Jurassique	9
c) Les formations du Crétacé	
d) Les formations du Tertiaire	
e) Les formations du Quaternaire	12
f) Les formations du recouvrement	13
3– cadre structural	16
3.1. Le plissement	16
3.2. Les accidents tectoniques :	16
II.3. GEOLOGIE DU SITE	19
CONCLUSION	21

CHAPITRE III : CADRE HYDROCLIMATOLOGIQUE

Partie A : CARACTERISTIQUE MORPHOMETRIQUE	
1. Introduction	23
2. Paramètres morphométriques	23
3. Conclusion	
Partie B : CONDITIONS CLIMATIOUES.	
Introduction	
1. Analyse climatique	
1.1. Étude des précipitations	
1.2. Etude des températures	
1.3. Etude de la relation température – précipitation :	
2. Evaporation :	
3. Etude de l'évapotranspiration	
3.1. Evapotranspiration potentielle ETP :	
3.2. Evapotranspiration réelle (ETR)	40
3.2.1. Formule de Turc	40
3.2.2. Méthode de C.W.Thornthwaite	40
Conclusion	44

CHAPITRE IV : CADRE GEOPHYSIQUE

1.	Introduction	46
2.	Objectifs de l'étude	46
3.	Travaux effectués	46
4.	Profils géologiques	48
5.	Etude du recouvrement	.50
6.	Conclusion	

CHAPITRE V : CADRE HYDROGEOLOGIQUE Introduction.....

Introduction	54
1. L'aquifère superficiel du Mio-Plio-Quaternaire (du recouvrement)	54
2. Etude de l'aquifère du Mio-Plio-Quaternaire	.54
2.1. Géométrie de la nappe	54
2.2.Catégorie de l'aquifère	
2.3.Etude piézométrique .	58
2.3.1. Inventaire des points d'eau	.58
2.3.2. Nature des limites géographiques	61
2.3.3. La carte d'égale épaisseur de la nappe superficielle	61
2.3.4. Piézomètrie	63
2.4. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe Moi-plio-quaternaire	70
a) Les méthodes d'expérimentation et d'interprétation des essais par pompage	70
b) Interprétation.	70
c) Résultats	71
Conclusion	72

CHAPITRE VI : CADRE GEOTECHNIQUE

1- Introduction :	78
2- Les phases de reconnaissance	78
3- Travaux réalises	80
	01
1- IDENTIFICATION DES SOLS GONFLANTS.	01 01
1 I Minéroux angileux	01 01
1.2 Structure realization des aucilies	81
1.2 Structure moleculaire des arglies	83
1.3 Texture microscopique des particules d'argile	8/
1.4 Conditions de formation des sols argileux	88
2 -Mecanismes de gonflement des sols argileux	90
2.1 Gonflement interfoliaire et gonflement interparticulaire	90
3- Mécanisme de gonflement	91
3.1 Gonflement au sens physico-chimique	91
3.2 Gonflement au sens mécanique	92
3.3 Relations entre la texture du matériau et le gonflement	93
II- ESSAIS DE LABORATOIRE	96
1_Essais physiques	96
2- Analyse granulo-sédimentométrique	97
3- Les limites d'Atterberg	98
4_ Analyse chimique et minéralogique	101
5_ Essais mécaniques	104
5.1 Essai de cisaillement	104
5.2 Essai de compressibil1te a l'oedometre	105
5.3 Essai de gonflement a l'oedometre (gonflement libre)	109
	110
III-CARACTERISATION EN LABORATOIRE DU PHENOMENE DE GONFLEMENT	112
I_Définition des paramètres de gonflement	112
2_Méthodes directe de mesure des paramètres de gonflement	112
2.1_Methode Du Volume Constant	113
2.2_Methode Du Pré-gonflement	113
2.3_ Méthode Des Différentes Pressions (MYSLIVEC 1969)	113
3_ Méthodes indirectes de caractérisation	113
3.1 Par la mesure des limites d'Atterberg	114
IV-TRANSPORT DE L'EAU EN SOLS FISSURÉS :(à travers les fontes de retrait)	116
1 - CONCEPTS DE BASE	116
- Porosité, Pores, Types et dimensions des pores, Macropores, Fentes de retrait	116
- Les caractéristiques de rétrécissement	119
A -Méthodes de mesure	120
B -Mécanismes en cause	121
2 - TRANSPORT DE L'EAU EN SOLS FISSURÉS	122
- Infiltration de l'eau dans les sols fissurés	122
- Digitation (Fingering Flow)	123
V- CONCLUSION	124

CONCLUSION GENERALE	126
Bibliographie	129
Annexes	135

Liste des figures :

FIG 1-1 : Situation géographique du bassin d'El Madher6
FIG 2-1 : Extrais de la carte géologique de Ain El Ksar10
FIG 2-2 : Profil latéral des coupes des sondages M1,M2,M314
FIG 2-3 : Schéma structural simplifié17
FIG 2-4 : Coupe interprétative
FIG 3-1 : Carte du bassin versant d'Oued El Madher
FIG 3-2 : Répartition des superficies du bassin versant en fonction d'altitudes26
FIG 3-3 : Coupe hypsometrique du bassin versant d'El Madher
FIG 3-4 : Position géographique des différentes stations climatiques
FIG 3-5 : carte des isohyètes établies par le BNEDER (1983) sur le bassin versant d'el madher32
FIG 3-6 : Représentation graphique de la variation des précipitations saisonnières des 3 stations (1984-2005)
FIG 3-7 : La variation des températures moyennes mensuelles des 3 stations (1986-1996)35
FIG 3-8 : Les diagrammes pluviothermiques des différentes stations (1986-1996)37
FIG 3-9 : bilan hydrique avec l'ETP de Thornthwaite43
FIG 4-1: Position des sondages électriques47
FIG 4-2: Coupes géologiques détaillées49
FIG 4 -3 : Carte du mur du recouvrement résistant (d'après C.G.G 1969)51
FIG 5-1: Coupe géologique du sondage M557
FIG 5-2 : Carte d'inventaire des points d'eau60
FIG 5-3 : Carte en isobathes de la nappe superficielle d'après Mr Menani (1991)62
FIG 5-4 : Carte piézométrique d'aout 1989 Mr Menani (1991)64
FIG 5-5 : Carte piézométrique de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire (Janvier 2007)66
FIG 5-6 : Carte piézométrique de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire (Septembre 2007)66
FIG 5-7 : Superposition des cartes piézométriques, janvier 2007 et septembre 200767
FIG 5-8: Zone de fluctuation piézométrique inverse67
FIG 5-9: Fluctuation de la nappe (schéma explicative)69

FIG 6.1, FIG 6-2 : L'octaèdre d'alumine et éventuellement de magnésium
FIG 6-3 : Schéma de la particule de kaolinite
FIG 6-4 : Schéma de la particule d'illite
FIG 6-5 : Schéma de la particule de montmorillonite
FIG 6-6: Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles (Mitchell, 1976)86
FIG 6-7 : Arrangement des particules d'argile (Van Olphen, 1963)
FIG 6-8 : Schéma d'assemblages de particules (Collins et McGown, 1974)
FIG 6-9 : Schéma de la double couche d'eau entourant une particule argileuse
FIG 6-10 : Evolution de texture des sols au cours du gonflement (Bultel, 2001)
FIG 6-11 : Classification des sols d'après CASAGRANDE
FIG 6-12 : Abaque de CASAGRANDE101
FIG 6-13 : courbe de compressibilité d'un sol gonflant107
FIG 6-14 : Fentes de retrait (plaine d'El Madher /sept 2007)118
FIG 6-15 : (a) Expansion en 3 dimensions. (b) Expansion en 1 dimension (Taboada,2003)120
FIG 6-16 : Étapes de fissuration d'une argile St-Alban intacte (Konrad et Ayad, 1997)121
FIG 6-17 : Illustration du phénomène de la digitation123

Liste des tableaux :

Tableau 3-1- répartition de la surface totale par tranches d'altitudes	25
Tableau 3-2 : superficies cumulées supérieures à une altitude donnée	25
Tableau 3-3 : Les caractéristiques des stations pluviométriques	29
Tableau 3-4 : Répartition de la pluviométrie moyenne mensuelle des 3 stations	33
Tableau 3-5 : Répartition de la pluviométrie moyenne saisonnière	34
Tableau 3-6 : Moyenne mensuelle des températures.	35
Tableau 3-7: Températures et précipitations des stations (1986-1996)	35
Tableau 3-8: Représentation des rapports P/T des différentes stations (1986-1996)	36
Tableau 3-9 : Indice d'aridité annuel de Martonne	38
Tableau 3-10 : L'évaporation moyenne inter annuel (1984-1997)	38
Tableau 3-11: L'ETP des différentes stations pour la période (1986-1996)	39
Tableau 3-12 : L'ETR selon la méthode de Turc des différentes stations (1986-1996)	40
Tableau 3-13 : Le bilan hydrique pour les 3 stations	42
Tableau 3-14: Evapotranspiration réelle (mm/an) par les deux méthodes	44
Tableau 4-1 : Profondeurs et épaisseurs du substratum du recouvrement Mr Menani(1991)	48
Tableau 5-1: Inventaire des points d'eau pour la nappe superficielle	59
Tableau 5-2 : résultats de l'interprétation des pompages d'essais	71
Tableau 5-3 : valeurs de transmissivité calculées	71
Tableau 6-1 : Caractéristiques des argiles (Bultel, 2001)	86
Tableau 6.2 Argiles formées par altération des roches sous climat tempéré	89
Tableau 6-3 : les paramètres physiques des sols	97
Tableau 6-4 : Résultats des essais de l'analyse granulo-sédimentométrique	98
Tableau 6-5 : résultats des limites d'Atterberg	100
Tableau 6-6 : résultats d'essais chimiques	102
Tableau 6-7: résultats des essais de cisaillement	105
Tableau 6-8: résultats des essais de compressibilité et de gonflement	109
Tableau 6-9 : Potentiel de gonflement d'après RAGANATHAN et SATYANA	.115
Tableau 6-10 : Potentiel de gonflement d'âpres SEED, WOOD WARD et UNDGREN(1962)	115

Tableau 6-11 : Potentiel de gonflement d'après GHEN	.115
Tableau 6-12 : Potentiel de gonflement des sols d'El Madher	.115
Tableau 6-13 : Noms des pores des sols selon leurs demensions(Perret et al, 1999)	.117
Tableau 6-14 : Potentiel de gonflement et de rétrécissement des sols argileux (Taboada, 2003)	.120

INTRODUCTION GENERALE

Cette étude concerne une zone au comportement hydrogéologique très particulier consistant en une évolution du niveau piézométrique totalement inverse à une évolution normale conforme aux cycles saisonnière c'est à dire qu'en période hivernale humide, le niveau baisse alors qu'en période estivale le niveau remonte. Ce phénomène est lié probablement en partie à la nature du sous-sol et qui est située dans les environs de la localité de Fesdis, à une dizaine de Kms au nord de la ville de Batna. Cette zone couvre approximativement une superficie de l'ordre de 10 Kms.

Le bassin d'El Madher amont se resserre au niveau de Fesdis, où subsiste un seuil alluvionnaire qui repose sur un substratum marno-argileux, en partie miocène.

Ce niveau alluvionnaire est constitué par un matériel à dominante fine ; la matrice est à prédominante argileuse. Cette particularité n'empêche qu'il est le siège d'un écoulement d'autant plus accru en période estivale à l'inverse de l'ensemble de la nappe des alluvions de la plainte d'El Madher.

Ce travail a pour but d'étudier la particularité de ce milieu aquifère dont la porosité s'apparente à une porosité de fissures dans un milieu paradoxalement élastique, en se penchant sur ses propriétés morphologiques, structurales et physiques qu'il s'agira de définir sur terrain et au laboratoire.

Ce travail nécessite par conséquent deux approches combinées, à savoir une approche hydrogéologique du phénomène et une autre, plutôt géotechnique qui fera ressortir les propriétés physiques du milieu à même d'influencer les écoulements souterrains.

La partie hydrogéologique aura pour buts :

✓ De caractériser dans un premier temps cette zone selon une démarche classique (géologie, géomorphologie, hydroclimatologie,...)

✓ De placer cette zone dans son contexte global au sein du complexe alluvionnaire moiplio-quaternaire qui caractérise le recouvrement de la plaine d'El Madher.

 \checkmark D'identifier les conditions aux limites de cette zone.

✓ D'identifier ses caractéristiques hydrodynamiques par des essais de pompage et d'établir leur répartition spatiale.

 ✓ D'effectuer un inventaire des points d'eau et d'effectuer plusieurs compagnes piézométriques pour suivre les fluctuations et situer avec précision l'inversion de l'évolution piézométrique par rapport au reste de la nappe. La partie géotechnique portera sur :

✓ Sur une partie mécanique des sols, par une série de prélèvements d'échantillons de la zone aérée et de la zone aquifère de la zone concernée par le comportement piézométrique
« anormal » dont il s'agira d'identifier au laboratoire les propriétés physiques.

✓ Sur l'étude au laboratoire du comportement de ces sols et sous-sols sous différentes contraintes, similaires à celles rencontrées dans le milieu naturel.

La zone de Fesdis située dans la partie amont du bassin versant d'El Madher, qui est sujet à une exploitation de ses ressources en eaux souterraines par de nombreux puits à usage agricole, et par des sondages destinés à l'alimentation en eau potable de la ville de Batna depuis 1970.

En 1991 Mr Menani dans le cadre de doctorat, établit une étude hydrogéologique complète (géologie, climatologie, hydrogéologie et modélisation des écoulements souterraines de l'aquifère Mio-Plio-quaternaire) durant un programme de prospection de deux ans (1989,1990), cette étude a constitué la base et la référence des autres recherches et études réalisées dans la région, ainsi que notre étude.

Le même auteur (Mr Menani) a réalisé d'autres études, recherches et publications concernant la plaine d'El Madher, et par la suite d'autres études et thèses ont également été réalisées dans la région en hydrogéologie, agronomie... (Voir bibliographie).

L'exploitation de cette documentation nous a permit de faire une synthèse sur la géologie, climatologie, hydrogéologie... ainsi que les données géophysiques et hydrogéologiques de la région.

Nous avons également procédé à une prospection piézométrique au courant des mois de février 2007, septembre 2007 et février 2008, et relevé des échantillons du sol. Nous avons également procédé à une étude géotechnique en laboratoire pour déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques des échantillons du sol prélevés.

Les écoulements représentent une partie essentielle du cycle hydrologique. L'eau précipitée sur un bassin versant va se répartir en eau interceptée, évaporée, infiltrée et écoulée. La quantité d'eau collectée puis transportée par la rivière résultera des précipitations directes à la surface même du cours d'eau et des écoulements de surface et souterrains parvenant à son exutoire. La proportion entre ces deux types d'écoulements est définie par la quantité d'eau infiltrée dans le sol. L'estimation de l'importance du processus d'infiltration permet de déterminer quelle fraction de la pluie va participer à l'écoulement de surface, et quelle fraction va alimenter les écoulements souterrains et donc aussi participer à la recharge des nappes souterraines.

L'infiltration est conditionnée par les principaux facteurs, la compaction de la surface du sol, la couverture du sol, la topographie et la morphologie, le débit d'alimentation (intensité de la précipitation, débit d'irrigation), l'humidité du sol, et surtout le type de sol (structure, texture, porosité), ce dernier est le facteur le plus influent.

CHAPITRE- I Cadre géographique

- I.1. Situation géographique
- I-2 Géomorphologie.
- I-3 Réseau hydrographique.
- I-4 Climat.
- I-5 Végétation.
 - ✓ La végétation de la plaine.
 - ✓ La végétation de montagne.
- I-6- Aperçu socio-économique
 - ✓ Habitat
 - ✓ Agriculture et industrie.

I-1- Situation géographique ; (Fig 1-1)

La région d'étude entre dans le cadre administratif de la wilaya de Batna (fig1-l), à15kms au nord-est de la ville et à environ 450 kms au sud-est d'alger, entre les dégrés 35.5° et 35.7° de latitude nord, Il est représenté sur la feuille d'état major n° 173 d'Ain El ksar à l'échelle 1/50.000. Ce terrain est représenté par une plaine inter- montagneuse appartenant au grand bassin des hauts plateaux Constantinois (fig3-1, fig3-2). Il est limité dans sa partie Nord par la plaine de Gadaine.

- Au Sud et Sud-Est par l'anticlinal du Dj.Bouarif ;

- A l'Est, par Dj.Tafraout ;

- A l'Ouest par les monts de Bellezma qui se prolongent vers le Nord-Est jusqu'à Kte Tfouda.

Le secteur ainsi délimité fait partie de sous bassin 07-03, selon les coordonnées Lambert suivantes :

X1-2 (Km) : 262 - 278.3. Y1-2 (Km):819-835.

Des voies de communications bordent et traversent la plaine, notamment la RN3 qui relie Batna à Constantine et les RD26 et 40 qui relient respectivement El Madher à Chemora et Batna à Seriana.

I-2- Géomorphologie :

La région d'étude se situe à l'Est algérien, sa géomorphologie est liée à la tectonique cassante des phases atlasique, où l'on distingue une zone d'effondrement correspondant à la plaine, et une zone surélevée correspondant au massifs, Dj.Bouarif au Sud et Sud -Est de la plaine, avec une altitude de 1744m, Kte Tfouda (1080m), et Dj.Sarif (1744m).

I-3-Réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique est étroitement lié à :

- L'organisation du relief;
- La tectonique complexe ;
- La lithologie hétérogène ;
- La couverture végétale continue.

Ces facteurs jouent un rôle très important sur les grandes lignes de révolution de réseau hydrographiques, pour notre secteur le réseau hydrographique est représenté essentiellement par l'Oued El Gourzi (ou oued El Madher), qui est issu du sous bassin versant de Batna et se jette dans le Chott Gadaine, avec une multitude de chaaba et talwegs.

I-4- Climat :

La région est caractérisée par un climat semi-aride avec un été chaud et un hiver froid.

I-5- Végétation :

La végétation est une résultante des facteurs physico géographiques, le climat, relief, lithologie, ainsi que le facteur humain. La pauvreté en végétation est la conséquence de l'aridité de la région et la faible pluviométrie, la répartition de la couverture végétale peut être subdivisée en deux parties :

La végétation de la plaine :

Pour la zone sud de la région d'étude, la culture des céréales est très répandue avec peu d'arbres fruitier.

Vers le Nord la présence du chott et la faible pluviométrie expliquent la pauvreté en végétation, cette partie est représentée essentiellement par une végétation naturelle qui est la steppe à armoise, l'halophyte (halfa et diss).

La végétation de montagne :

Elle est Caractérisée par une végétation arbustive, localisée surtout au Dj.Bouarif et les monts de Bellezma recouverts essentiellement de pin d'Alep.

I-6- Aperçu socio-économique

> Habitat :

La commune d'El Madher présente une population importante, dont l'accroissement démographique a été rapide, selon les deux derniers recensements :

-> En 1987: 8667 habitants.

-> En 1998: 14959 habitants

-> En 2005:18545 habitants

Agriculture et industrie :

La vocation de la région est uniquement agricole, les cultures du blé dure et l'orge, tenant de loin la première place, les cultures irriguées sont pratiquées dans quelques petits secteurs, l'élevage forme un appoint économique important pour la population rurale.

Les exploitations minières ont une valeur économique très limitée, concernant la carrière du Dj.Sarif (graviers).





Fig. $n^{\circ}1$ -1 : Situation géographique de la zone d'étude

CHAPITRE

-II-Cadre géologique

- **II.1. INTRODUCTION**
- II.2. GEOLOGIE REGIONAL
 - 1- introduction.
 - 2- Lithostratigraphie.
 - a) Les formations du Trias:
 - b) Les formations du Jurassique.
 - c) Les formations du Crétacé
 - 1- les formations du Crétacé inférieur.
 - 2- Les formations de l'Aptien.
 - 3- Les formations de l'Albien.
 - 4- Les formations du Crétacé supérieur.
 - d) Les formations du Tertiaire.
 - e) Les formations du Quaternaire
 - 1- Le Quaternaire ancien
 - 2- Les glacis polygéniques
 - f) Les formations du recouvrement.
 - 3- cadre structural.
 - **3.1.** Le plissement.
 - **3.2.** Les accidents tectoniques :
 - a) Les accidents de direction N 50 °.
 - b) Les accidents de dilection N 140° à N 160° E.
 - c) Les accidents de direction N 20 $^{\circ}$ E.
- II.3. GEOLOGIE DU SITE

CONCLUSION

II-1-INTRODUCTION :

La géologie constitue la base fondamentale d'une étude hydrogéologique et géotechnique, elle détermine les formations susceptibles de contenir des nappes aquifères à partir de leur lithologie.

La synthèse géologique a été réalisée sur la base des documents suivants :

- Carte géologique n°173 d'Ain El Kser et sa notice explicative ;
- Rapport de l'étude géophysique effectuée par la compagnie générale de géophysique (C.G.G) en 1969 ;
- Les logs stratigraphiques des forages effectués dans la région ;
- Travaux réalisés par J.M.Vila dans la région (1977);
- Les travaux de Mr Menani dans la région (1991).

Notre région fait partie de l'ensemble autochtone et para-autochtone aurèsien caractérisé par des séries sédimentaires du Crétacé et du Jurassique de Dj.Bouarif, l'anticlinal de Ravin bleu, Dj.Sarif, Dj.Tafraout.

II-2-GEOLOGIE REGIONAL:

1-introduction:

La plaine d'El Madher est un bassin subsident, dans lequel se sont accumulées, notamment au quaternaire, d'abondantes formations détritiques continentales et fluviales issues du démantèlement des massifs.

Ce bassin sédimentaire est un synclinal à substratum marneux très épais d'age cénomanien .Il est limité par deux structures anticlinales :

-d'une part au nord, par l'anticlinals des monts de Batna de direction SW-NE ou le coeur est jurassique à triasique, compliqué au voisinage du Dj Sarif par des effets tectoniques importants.

-d'autre part au sud par l'anticlinal de Dj Bou Arif, de même direction ou le coeur est représenté par le crétacé inférieur.

Ces structures sont affectées par de nombreux accidents tectoniques :

 des accidents longitudinaux aux axes des anticlinaux et a la faveur desquels apparaissent les faisceaux jurassique dans les monts de Batna, d'après l'appellation de M.D bureau (1970), et qui constituent également des axes d'effondrementau droit du village d'El Madher (Dj Bou Arif).

- des accidents transverses aux structures, de direction générale NW-SE.
- des accidents de direction N-S à N 20° E, à l'origine de nombreux décrochements,

2- Lithostratigraphie: (Voir FIG : 2.1):

a- Les formations du Trias:

C'est au voisinage du Djebel Sarif, que les terrains attribués au Trias connaissent leur plus large affleurement

IL s'agit de formations généralement complexes, dans lesquelles des masses confuses de marnes bariolées et d'argiles gypseuses englobent des amas plus ou moins volumineux et chaotiques de dolomies broyées et cargneulisées.

Les terrains triasiques peuvent occuper une position structurale anormale (et ils sont alors injectés au sein des séries encaissantes à la faveur de cassures) ou bien ils soulignent des contacts anormaux entre des unités chevauchantes. Mais le plus souvent c'est en position de cœur d'anticlinal qu'ils affleurent.

b- Les formations du Jurassique

La série du jurassique épaisse de prés de 1000m se subdivise eu 3 formations bien distinctes avec de la base au sommet:

- La formation des dolomies.
- La formation des calcaires à silex.
- La formation des marno-calcaires.



FIG 2-1 : Extrais de la carte géologique d'Ain El Ksar

C-Les formations du Crétacé :

1- Les formations de Crétacé inferieur :

Dans l'anticlinal du Djebel Bou Arif, l'étage le plus ancien qui a été reconnu est le Barrémien gréseux, tandis que dans les monts de Batna, la série basale a pu être identifiée dans le Berriasien et notamment le passage Jurassique-Crétacé On peut distinguer:

Un ensemble basal : représenté par une formation essentiellement carbonatée attribués au Jurassique terminal-Berriasien inférieur

Un ensemble inférieur : en concordance par dessus les calcaires, marqué par une formation d'argiles silteuses daté par la zone à Occitanica du Berriasien moyen-Valenginien.

Un ensemble médian et supérieur: d'une épaisseur d'environ 1400m, dans lequel l'Hauterivien et le Barrémien font corps dans une même formation gréso-dolomitique

Les formations du Crétacé inférieur qui se présentent sur une épaisseur considérable sont les témoins d'une subsidence accrue à cette époque géologique.

2- Les formations de l'Aptien :

En couverture et en concordance de la formation gréseuse du Barrémien fait suite un ensemble constitué d'un niveau marneux à la base surmonté par une formation à dominante calcaire. La limite supérieure de cet ensemble est marquée par l'apparition des assises détriques de l'Albien.

3- Les formations de l'Albien :

Au dessus et en concordance de la formation carbonatée de l'Aptien affleure, sur les deux flancs de l'anticlinal du Djebel Bou Arif, une formation à dominante détritique. Le sommet de cette formation se termine par un très mince niveau de marnes grises.

4- Les formations du Crétacé supérieur :

A une sédimentation ou le détritisme silto-gréseux était prépondérant va faire suite une sédimentation essentiellement marno-calcaire. Les formations du crétacé supérieur ont été

reconnues seulement dans l'anticlinal du Djebel Bou Arif. Dans les Monts de Batna et au Djebel Tombait les formations les plus récentes du Crétacé qui y ont été reconnues sont albo-aptiennes.

d- Les formations du Tertiaire :

Seuls les terrains attribués au Miocène marin affleurent sur les flancs des anticlinaux du Djebel Bou Arif et des Monts de Batna, en un cycle nettement discordant qui recouvre les formations du secondaire. On peut reconnaître de bas en haut:

- Une formation conglomératique, qui affleure à la Mechta Mezzari (au piémont sud du Djebel Sarif) est sur les flancs nord-est du Djebel Bou Arif, à la Mechta Malakhal. Il s'agit de conglomérats rouges polygéniques, à galets de taille variable enrobés dans des argiles silteuses rouges.
- Une formation marno-gréseuse : Il s'agit de grès roux calcareux, d'argiles et de marnes bleu, bien visibles au nord-ouest de Gseya.
- Une formation marno-gréseuse : qui constitue les plus larges affleurements du Miocène marin de part et d'autre du Djebel Bou Arif.

e-Les formations du Quaternaire :

A l'affleurement, les terrains attribués au Quaternaire se présentent sous plusieurs formes et à des altitudes très variables.

1- Le Quaternaire ancien

On peut distinguer plusieurs formes :

Les croutes calcaires : elles affleurent notamment sur le flanc sud du Djebel Bou Arif en un vaste glacis en pente très douce vers le sud.

Les paléosols rouges : Sur le flanc sud de l'anticlinal des Monts de Batna, des lambeaux discontinus de Quatenaire se présentent sous la forme d'un paléosol rouge.

Entre le flanc nord du Djebel Bou Arif et les calcaires cénomaniens constituant le Djebel Fesdis. A partir de la vallée de Fesdis et en se dirigeant vers le nord, ces formations étagées du Quaternaire passent à des glacis polygéniques qui les recouvrent et qui constituent, à l'affleurement, l'essentiel des formations du Quatenaire.

2- Les glacis polygéniques :

Ils sont constitués d'éléments détriques de nature très variable. Ils sont anguleux et de gros calibre près des reliefs, siège de l'érosion, pour devenir, à la suite du transport, très fragmentés et de petit calibre aux bas des pentes.

f- Les formations du recouvrement :(Fig 2-2)

Ce sont des sédiments détritiques (sables, graviers, galets et argile) d'épaisseur considérable qui augmente progressivement des reliefs vers le centre de la plaine et notamment vers sa partie N-E, d'une épaisseur de 134 m au M1, situé le plus proche des reliefs, les formations du recouvrement dépassent 200 m au M3, où le substratum marneux n'a pas été atteint.

L'examen des coupes des sondages a permis de constater qu'en plus de son épaisseur considérable, la formation détritique du recouvrement se subdivise en deux ensembles bien distincts :

Un ensemble A : situé à la base du recouvrement récent, il est constitué essentiellement d'éléments grossiers (sable, graviers et galets faiblement cimentés par de l'argile)

Un ensemble B : qui constitue la partie supérieure du recouvrement ou les éléments fins sont prédominants (argiles avec quelques intercalations de graviers et galets)

La formation du recouvrement présente un granoclassement vertical de ses éléments qui lui donne une configuration de séquence sédimentaire typique. A ce granoclassement vertical, on constate l'existence d'un autre dans le sens latéral. En effet les argiles sont prédominantes vers le centre de la plaine, à l'inverse des éléments grossiers qui sont prépondérants à l'approche des reliefs.

Mr Menani (1991) considère que la plaine d'El Madher, notamment dans sa partie nordest, constitue une fosse, d'origine tectonique, comblée d'une forte épaisseur de sédiments détritiques issus principalement du démantèlement des reliefs voisins. Les phénomènes de subsidence décelés tout le long du Secondaire, peuvent s'être à nouveau manifestés au courant du Quaternaire pour contribuer ainsi à la mise en place d'épaisseurs considérables de sédiments détritiques, dépassant 200 m par endroits.

	Terre argiteuse au sommet Argites à graviers Argite brune avec quelques passées de graviers à la base Argite plastique à rares petits galets, sables grossiers à la base et galets calcaires, dolomitiques et gréseux	Argiles à graviers peu abondants avec quelques horizons de graviers	argileuses notamment à la base	ct quelques rares graviers	Sables grossiers, graviers et galets faiblement ou non cincentés par de l'argile rouge Marne brune, rouge et grs-verte plus ou	moins plastique à quelques rares graviers
z=852 m		• • • • • • • • • • • • • • • • • • •			0.0.	
M2 (z		rossiers sages c galets				
l3 (z=851 m)	Terre argileuse noire	Argite jaune sableuse à sables gr 	Argile sableuse et galets			
M1 (z=857 m) M	Terre argleuse noire Arglie jaune et graviers à la baxe Arglie jaune et graviers à la baxe Arglie à graviers Arglie à graviers Arglie à graviers et peuits galets Arglie à graviers Arglie à graviers Arglie à graviers Arglie à graviers	20 m Argie compacts a gaviers et galets			:	
		2				

Fig 2-2 : Profil latéral (CD) des coupes des sondages M1,M2,M3 d'apres Mr Menani

Les niveaux inférieurs du recouvrement :

L'examen de la coupe du sondage M2 (Fig. 2-2), la plus complète dans le recouvrement de la plaine (300 m de profondeur) laisse apparaître, au dessous des formations détritiques récentes du Quaternaire devisée par Mr Menani (1991) en trois niveaux :

- niveau 1 : des marnes brunes, ocres à rouges avec quelques graviers sur une épaisseur de 71 m
- niveau 2 : au dessous, constitué de 28 m de sables grossiers, de graviers et galets faiblement cimentés par de l'argile rouge.

 niveau 3 : les 23 premiers mètres d'une formation constituée de marnes brunes, rouges et gris vertes à quelques rares graviers.

3- CADRE STRUCTURAL :

La région de Batna a été le siège d'une tectonique assez complexe surtout dans la partie septentrionale de la région, la tectonique prédominante est la tectonique atlasique ayant abouti à des structures généralement anticlinales, de même que les grandes fractures présentant la direction SW-NE.

A un style tectonique relativement souple ayant abouti à la formation des anticlinaux et synclinaux de direction générale SW-NE, se sont succédés des styles différents qui ont profondément modifié ces structures et qui sont notamment les accidents tectoniques et les chevauchements. (Fig n° 2-3).

3-1- Le plissement :

Les axes des anticlinaux des Monts de Batna et du Djebel Bou Arif qui enserrent le synclinal d'El Madher, ont une direction atlasique typique SW-NE, cette dernière a été reprise par une phase de plissement intra-Miocène, antérieure au Tortonien. En engendrant des accidents cassants décrochants, des déversements et des chevauchements locaux, mis en évidence au piémont sud du Dj Sarif. (Fig n° 2-4)

3-2- Les accidents tectoniques :

a- Les accidents de direction N 50 ° E :

Longeant les structures anticlinales dans la même direction que les axes des plis, ils prennent de l'importance notamment dans l'anticlinal des Monts de Batna ou ils aboutissent à la création de faisceaux jurassiques.

Plus au nord, aux alentours du Djebel Sarif, favorisent la remontée des formations du Trias, dont la position en cœur d'anticlinal, plus au sud, n'a fait qu'évoluer à la faveur de ces accidents.

b- Les accidents de dilection N 140° à N 160° E :

C'est au Djebel Bou Arif notamment qu'ils sont représentés par un réseau très dense de coulissements dextres.

Ce décrochement, et la série de coulissement qui l'accompagne, modifient la direction des accidents tectoniques de direction SW-NE et indiquent par conséquence leur postérieuroté.

c- Les accidents de direction N 20 $^\circ$ E :

C'est dans les collines surplombant la mechta Ouled Lakhdar (terminaison oriental des monts de Batna) que la structure présentait de nombreux plis à axes verticaux, souvent décrochés

par des accidents dont la plupart sont sénestres de direction N 20° E.

Le plus important de ces accidents est celui qui longe, au Nord la colline de theniet Snouber, et qui était considéré jusqu'à présent comme front de nappe de charriage. Or la présence sur la limite de cet accident, de stries fortement marquées indique beaucoup plus un décrochement sénestre (Mr Menani 1991).



FIG 2-3 : schéma structural simplifié



II-4 – GEOLOGIE DU SITE : (voir coupe géologique)

La région d'étude appartient au versant méridional de l'Aurès. Elle est située au Sud Est de la médiane des hautes plaines constantinoises correspondant au début des massifs des Aurès. Elle est disposée dans la zone synclinale déprimée du bled El-Madher sur le coté droite de la route national RN3 menant vers Constantine dans la zone de Fesdis.

Le site est constitué par des formations alluvionnaire d'âge mio-plio-quaternaire qui caractérise le recouvrement de la plaine d'El Madher, ce sont des formations détritiques fines.

La partie supérieure du recouvrement est constituées par des argiles dures verdâtres à plaquettes de gypse (photo n°1) avec quelques intercalations de graviers et galets (voir photo n° 2). Ce sont des matériaux gonflants (voir étude géotechnique).

La partie inferieur du recouvrement est constituée essentiellement d'éléments grossiers des sable, graviers et galets faiblement cimentés par de l'argile (voir photo n°2)

La formation du recouvrement présente un granoclassement vertical de ses éléments qui lui donne une configuration de séquence sédimentaire typique.

Les argiles sont prédominantes vers le centre de la plaine, à l'inverse des éléments grossiers qui sont prépondérants à l'approche des reliefs. (Voir Fig. 2-1)

Le sondage M5 est le plus proche de la zone et nous a permis avec l'appui des données des sondages electriques, d'affiner la continuité des couches (voir chapitre n° 5).





Photo $n^{\circ}1$: Bordure d'oued El Madher (centre de la plaine) E1 : échantillon $n^{\circ}1$



Photo n°1 : Bordure d'oued El Madher (proche des reliefs)

II-4 – Conclusion

La plaine d'El Madher est un bassin de sédimentation subsident sous la forme d'un synclinal à substratum marneux très épais d'âge Cénomanien. Il est limité par deux structures anticlinales:

• D'une part, au Nord, par l'anticlinal des monts de Batna de direction SW-NE.

• D'autre part, au Sud, par l'anticlinal de Djebel Bou Arif, de même direction. Ces structures sont affectées par de nombreux accidents tectoniques.

Dans la partie Nord, la plaine d'El Madher constitue une fosse d'origine tectonique, comblée d'une forte épaisseur de sédiments détritiques issus principalement du démantèlement des reliefs voisins. Les phénomènes de subsidence décelés tout le long du secondaire, peuvent s'être à nouveau manifestés au courant du quaternaire pour contribuer à la mise en place d'épaisseurs considérables de sédiments détritiques, dépassant 200 m par endroits.

Une corrélation entre les différentes formations détritiques recoupées par les sondages M1, M2 et M3 (Fig. 2-2), a permis de constater qu'en plus de l'importante épaisseur, la formation détritique se subdivise en deux ensembles distincts (Menani, 1991): • Le premier est situé à la base du recouvrement récent qui est constitué essentiellement d'éléments grossiers (sables, graviers, et galets) faiblement cimentés par des argiles. • Le deuxième constitue la partie supérieure du recouvrement où les éléments fins sont les plus dominants (argiles verts avec quelques intercalations de graviers et galets).

CHAPITRE-III-Cadre hydroclimatologique

Partie A : CARACTERISTIQUE MORPHOMETRIQUE

- 1. Introduction
- 2. Paramètres morphométriques
- 3. Conclusion.

Partie B : CONDITIONS CLIMATIQUES.

Introduction

- 1. Analyse climatique
 - 1.1. Etude des précipitations.
 - 1.2. Etude des températures.
 - 1.3. Etude de la relation température précipitation :
- 2. Evaporation :
- 3. Etude de l'évapotranspiration.
 - 3.1. Evapotranspiration potentielle ETP :
 - 3.2. Evapotranspiration réelle (ETR).
 - 3.2.1. Formule de Turc.
- 4. Méthode de C.W.Thornthwaite (bilan hydrologique)

Conclusion.

Partie -A- CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES:

1 - Introduction :

Le bassin hydrologique est circonscrit par les lignes de crête topographique, délimitant le bassin versant d'un cours d'eau et de ses affluents. Les écoulements prennent naissance à l'intérieur de la surface topographique et doivent traverser la section du cours d'eau, pour suivre leurs trajets vers l'aval.

Le bassin d'EL Madher –Gadaine est compris dans le très vaste bassin versant des hauts plateaux constantinois, cependant la délimitation des lignes des partages des eaux l'isole en une unité hydrogéologique bien différenciée (Fig.:3-1) où les reliefs principaux sont le Dj Bou Arif au sud, et les monts de Batna au nord.

L'entrée du bassin se démarque de celui de Batna par une ligne de partage des eaux, où coule dans sa partie basse l'oued El Gourzi, à l'aval et cet oued prend le nom de l'oued El Madher, et se jette dans le chott Gadaine.

2- Paramètres morphométriques :

Notre plaine d'étude fait partie du sous bassin versant d'oued El Gourzi.

2-1- Superficie « A» (Km²): La superficie planimétrée est d'ordre de 209.5 Km2.

2-2-Périmètre « P » (Km):

Le périmètre est essentiel pour calculer l'indice de compacité de GRAVELIUS « Kc », il est mesuré par un curvimètre, sa valeur est : P = 81 Km

2-3-Indice de compacité « Kc »:

Est le rapport du périmètre " P" au périmètre d'un cercle ayant la même surface, il donne des informations importantes sur la concentration de l'écoulement à l'exutoire et sur la forme du bassin.

Si: Kc < 1 => bassin versant de forme circulaire ;

 $Kc = 1,12 \Rightarrow$ bassin versant a une forme d'un carré ;

kc > 1,12 => bassin versant allongé.

 $\mathbf{Kc} = \mathbf{0,28p}/\sqrt{A}$ A : Superficie de B.V en $\mathrm{Km}^2 = 209.5 \mathrm{Km}^2$

P: Périmètre de B.V en Km = 81 Km

<u>Application:</u> Kc=1,57 Km/Km^2 Kc>1,12 donc notre bassin est **allongé**.


2-4- Courbe hypsométrique (fig3-3) :

Elle permet de connaître l'état de répartition des altitudes de B.V en fonction de surface, et de calculer le volume de bassin versant.

La répartition du bassin versant par tranches d'altitudes est consignée dans le tableau n° 3-1 et reportée sur la figure 3-2

classes d'altitudes (m)	superficie (km ²)	% de superficie
800-900	54,47	26
900-1000	55,81	26,6
1000-1100	40,81	19,5
1100-1200	23,47	11,2
1200-1300	15,63	7,5
1300-1400	10,22	4,9
1400-1500	5,75	2,7
1500-1600	2,44	1,2
1600-1700	0,81	0,4
1700-1800	0,09	0,04
total	209,5	100,04

Tableau 3-1- répartition de la surface totale par tranches d'altitudes :

A partir des mêmes données, nous avons calculé les superficies et le pourcentage de superficie supérieur a une altitude donnée (voir le tableau n°3-2)

	superficies cumulées supérieures à	
altitude (m)	l'altitude (km ²)	% de superficie cumulée (%)
800	209.5	100
900	105.03	50.13
1000	99.22	47.36
1100	58.41	27.88
1200	34.94	16.67
1300	19.31	9.21
1400	9.09	4.33
1500	3.34	1.59
1600	0.9	0.43
1700	0,09	0.04
1800	0	0

Tableau n°3-2 : superficies cumulées supérieures à une altitude donnée :





Les altitudes caractéristiques sont les suivants :

- Dénivelée simple « D »: On prend la distance verticale en (m) sur la courbe hypsométrique, qui sépare les altitudes ayant 5% et 95% de la surface totale du B.V.

 $D=H_5\%$ - $H_{95}\%$ D dénivelée simple ;

-H₅% : altitude du 5% de la surface de B.V ; H5%=1375m

- H_{95} % : altitude du 95% de la surface de B.V. H95%=805m

D=1375-805=**570m**.

- Longueur et largeur du rectangle équivalent « L » et « l » :

C'est la longueur et la largeur d'un rectangle de même superficie « A », même périmètre « P ». Même indice de compacité « Kc » et même hypsométrie Que le bassin versant étudié. Elles sont calculées par les formules suivantes :

$$\mathbf{L} = \frac{Kc\sqrt{S}}{1.12} (1 + \sqrt{1 - (\frac{1.12}{Kc})^2})$$

OÙ : L : Longueur du rectangle équivalent en Km

Kc : Indice de compacité

S : Supeficie du B.V en Km2

 $S=209.5 \text{ Km}2 \Rightarrow L= 34.5 \text{ Km}.$

La largeur de rectangle équivalent est donné par la relation suivante $l = \frac{S}{L}$

OU S : Surface du rectangle équivalent ainsi que du B.V (Km2)

L= Longueur du rectangle équivalent en Km

l= Largeur du rectangle équivalent en Km

Application:

S= 209.5 Km2

 $L= 34.5 \text{ Km} \Rightarrow l= 6.072 \text{ Km}.$

-Indice de pente globale « I g » : C'est le rapport entre la différence H5% - H95% et la longueur L du rectangle équivalent, il est exprimé en mètre de dénivelée par Km de longueur Ig =

 $\frac{H5\% - H95\%}{L}$

L: Longueur du rectangle équivalent. Donc: **Ig =16.52 m/km** Selon la valeur de (Ig) on classe le relief :

-Si Ig>35
$$(\frac{m}{km}) \Rightarrow$$
: relief assez fort

-Si 20(\frac{m}{km})
$$\Rightarrow$$
 relief fort

-Si Ig<20(
$$\frac{m}{km}$$
) \Rightarrow relief modéré

Dans notre cas Ig<20 donc le relief fort

paramètres	symbole	valeur	Unité
La superficie	S	209.5	Km2
Périmètre	Р	81	Km
Indice de forme (compacité)	Кс	1.57	-
Longueur de rectangle équivalent	L	34.5	Km
Largeur de rectangle équivalent	1	6.072	Km
Indice de pente globale	Ig	16.52	m/Km
H5%	H5%	1375	m
H95%	H95%	805	m
Dénivelé simple	D	570	m
Altitude moyenne du B.V	Нтоу	1000	m

Tableau Récapitulatif :

3-Conclusion:

Le sous bassin versant d'oued El Madher appartient au grande B.V de hauts plateaux constantinois dont la superficie est de l'ordre de 209.5km", il est allongé du Sud vers le Nord.

Du point de vue morphologique, le B.V est caractérisé par un relief fort, avec une dénivelée simple (D) égale 570m.

Un indice de compacité de l'ordre de 1,57, indiquant la forme allongée du bassin, qui va influer le régime d'écoulement.

Partie -B- CONDITIONS CLIMATIQUES.

Introduction :

L'étude hydrogéologique est étroitement liée à l'étude climatique de la région. Il s'agit donc, à partir des paramètres hydro-climatiques (pluviométrie, température, évaporation) d'établir un bilan, et d'essayer de dégager les caractéristiques climatiques de la région.

Ainsi la différence d'altitude constatée dans la plaine d'El Madher s'accompagne par une diversité climatique. Le climat régnant sur la plaine est un climat semi-aride (annexes 1), avec deux saisons distinctes :

- Une saison froide et humide s'étalant du mois de Décembre jusqu'au mois de Mars, avec souvent des chutes de neige et de brusques gelées.
- Une saison chaude et sèche caractérisant en particulier les trois mois d'été.

1- Analyse climatique :

Pour le sous bassin de la plaine d'El Madher nous disposons de données de 3 stations pluviométriques (Fig. n°3-4). Ces stations sont situées à l'extérieur de la plaine, 2 stations sont gérées par l'ANRH par contre celle de Ain-sekhouna est gérée par l'ONM.

Remarque : La station de Ain Sekhouna est la plus proche de la zone d'étude et intégrée au calcul, du fait de la proximité immédiate de la plaine d'El Madher.

Stations	latitude	longitude	Altitude(m)	Paramètres disponibles	Période d'observation
Batna	35°33'53N	6°10'19E	1040	P et T	P:68/05 T:86/96
Ain- sekhouna	35°42'69N	6°20'64E	827	P et T	P:84/05 T:84/03
Ain-yagout	35°47'15N	6°25'06E	912	P et T	P : 68/05 T : 86/96

Tableau n°3-3 : Les caractéristiques des stations pluviométriques :



FIG 3-4: Position géographique des différentes stations climatiques.

1-1- Etude des précipitations :

Dans son étude sur le climat de l'Algérie, P.Seltzer (1913-1938) a montré que la répartition des pluies obéit aux trois lois suivantes :

- La hauteur de pluie augmente avec l'altitude, mais elle est plus élevée sur le versant exposé aux vents humides que sur les autres.
- Elle augmente de l'Ouest à l'Est, à cause du régime du vent.
- Elle diminue au fur à mesure que l'on s'éloigne du littoral.
- L'étude de Paquin et Chaumont (1913-1963) a abouti à une carte pluviométrique de l'Algérie au 1/500.000 (annexe 2). D'après cette carte la région d'el Madher se situe dans une zone où la pluviométrie s'échelonne entre 300 et 400 mm/an dans la plaine et peut atteindre les 500mm/an au niveau du Djebel Bou Arif.
- Selon la carte pluviométrique construite par l'ANRH établi en 1993 (annexe 3), les précipitations annuelles dans la région d'el Madher s'échelons entre 200 et 300mm, et elles peuvent atteindre les 300 à 400mm dans la partie Sud de la plaine.

En comparant les données de la carte pluviométrique de Paquin et Chaumont, et la carte pluviométrique d'ANRH, on remarque que les précipitations annuelles de la période ancienne (1913-1963) sont légèrement supérieures à celles de la période récente (1993). Ceci met en évidence l'existence d'une sécheresse lors des dernières décennies.

1-1-1 Les précipitations annuelles et leurs variations :

Le B.N.E.D.E.R. (Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural (1983) établie une carte isohyètes d'El Madher, elle est reporte sur la figure 3-5, ont été établies en tenant compte de :

- 36 valeurs de pluies moyennes annuelles observées :

- 30 valeurs ponctuelles de pluies calculées selon la corrélation a 3 variables ;
- de la corrélation pluvio-altimétrique.

L'examen de la carte en isohyètes montre que la pluviométrie moyenne annuelle varie d'un seuil de 350 mm, dans la dépression de la plaine d'El Madher, jusqu'a un maximum moyen de 450 mm, dans les sommets du Djebel Bou Arif 1'est, ct ceux des Monts de Batna a 1'ouest.

Le gradient pluvio-altimétrique moyen est de 21 mm pour 100 m d'altitude.

La série de pluies annuelles de la station de Batna école. ajustée par une loi lognormale (BNEDER, 1983), a permis d'obtenir les valeurs caractéristiques suivantes :

- pluie moyenne : 342 mm ;

- pluie atteinte ou dépassée 9 années sur 10 : 245 mm. soit une fréquence de 71 % ;
- pluie atteinte ou dépassée 1 année sur 10 : 447 mm. soit une fréquence de 1.31%.



1-1-2- Pluviométrie mensuelle et saisonnière :

Pour caractériser le régime des pluies en une station exploité depuis de nombreuses années, il est de tradition d'établir la courbe des hauteurs des pluies moyennes mensuelles pour chacun des mois de l'année. Il est bon de faire figurer sur le même graphique la courbe des maxima et des minima observés (Fig. n°3-6).

Les valeurs de la pluviométrie mensuelle et saisonnière ont été relevées pour les 3 stations pour deux périodes (1984-2005) et (1986-1996). Tableau n°3-4 et Tableau n°3-5.

14	01000011 0	nope	in the local of the				,••	10110 0001		500000			
Station	Mois	S	0	Ν	D	J	F	Μ	Α	Μ	J	Ju	Α
	Période												
Batna	86-96	40	28	35	43	39	29	47	32	41	26	14	11
	84-05	43.7	26	31.7	34.4	35.7	25.2	37.1	29.7	36.3	19.2	9.6	13.5
Ain-	86-96	30	19	19	30	31	24	41	23	35	19	15	17
sekhouna	84-05	37.2	24.6	23.3	32.3	30.1	29.2	37.7	40.4	37.9	16.5	9.7	16.5
Ain-	86-96	27	19	22	34	34	27	33	25	36	20	4	21
yagout	84-05	33.9	23.6	25.2	36.3	29	24	35	24.9	42.8	16.4	3.6	15.2

Tableau n°3-4 : Répartition de la pluviométrie moyenne mensuelle des 3 stations :



FIG 3-6 : Représentation graphique de la variation des précipitations mensuelles des 3 stations (1984-2005).

Station	Moyenne	Automne	Hiver	Printemps	Eté
	saisonnière				
Batna	mm	101.4	95.3	103.1	42.3
	%	29.64	27.86	30.14	12.36
Ain-	mm	85.1	86.6	116	42.7
sekhouna	%	25.76	26.21	35.11	12.92
Ain-yagout	mm	82.7	89.3	102.7	41.2
	%	26.18	28.27	32.51	13.04

Tableau n°3-5 : Répartition de la pluviométrie moyenne saisonnière des 3 stations pour la période (1984-2005) :

Dans la région d'el Madher, les maximums mensuels se situent au printemps, les mois les plus pluvieux étant Mars, Avril et Mai .

1-2-Etude des températures :

1-2-1- Température moyenne mensuelle :

La température constitue un facteur important dans l'estimation du déficit d'écoulement. Les températures des différentes stations ont été fournies par le BNEDER pour une période de 10 ans (1986-1996) pour 2 stations, mais les températures de la station d'Ainsekhouna ont été fournies par l'ONM. Tableau n°3-6.

Tubleau it 5 0 : Moyeline mensuene des temperatures des 5 stations en C (1900 1990).								•					
Mois	S	0	Ν	D	J	F	Μ	Α	Μ	J	Ju	Ao	Moy
Station													
Batna	22.4	16.2	9.25	5.25	5.55	7.15	10.8	13.5	19.3	24.2	26.4	28.1	15.68
Ain-	21.6	18.9	10.5	6.9	5.4	6.6	9.2	11.8	17.5	22.2	25.6	25.8	15.17
sekhouna													
Ain-	23.1	16.9	9.55	5.95	6.25	7.85	11.5	14.2	20	24.9	27.1	28.8	16.84
yagout													

Tableau n°3-6 : Moyenne mensuelle des températures des 3 stations en C° (1986-1996).

D'après ce tableau, la variation moyenne mensuelle montre une croissance régulière des températures de Janvier à Août, suivie d'une décroissance jusqu'à Décembre, (Fig. n°3-7).



FIG 3-7 : La variation des températures moyennes mensuelles des 3 stations (1986-1996)

1-3-Etude de la relation température – précipitation :

Cette étude donne un aperçu sur l'étendue de la période sèche. La détermination de cette période déficitaire est d'une grande importance pour les agronomes afin d'estimer les besoins en eaux et de déterminer les mois d'irrigation.

1-3-1-Méthode pluviothermique :

Elle à été mise au point par Gaussen et Bagnouls, un mois sec est un mois ou les précipitations exprimées en (mm) sont inférieures ou égales au double de la température exprimée en °C.

Cette relation permet d'établir des diagrammes pluvio-thérmiques sur les quels les températures sont portées à une échelle double de celle des précipitations.

		T							~ (->		- / -		
Station	Paramét	S	0	Ν	D	J	F	М	Α	Μ	J	Ju	Ao
Batna	P (mm)	40	28	35	43	39	29	47	32	41	26	14	11
	T(C°)	22.4	16.2	9.25	5.25	5.55	7.15	10.8	13.5	19.3	24.2	26.4	28.1
Ain-	P (mm)	30	19	19	30	31	24	41	23	35	19	15	17
sekhouna	T(C°)	21.6	18.5	10.5	6.9	5.4	6.6	9.2	11.8	17.5	22.2	25.6	25.8
Ain-	P (mm)	27	19	22	34	34	27	33	25	36	20	4	21
yagout	T(C°)	23.1	16.9	9.55	5.95	6.25	7.85	11.5	14.2	20	24.9	27.1	28.8

Tableau n°3-7: Températures et précipitations des 3 stations (1986-1996):

Lorsque la courbe des précipitations passe au-dessus de la courbe de température, il s'agit d'une période excédentaire, dans le cas contraire, il s'agit d'une période déficitaire. Les diagrammes de la Fig. n°3-8, font ressortir dans la plupart des cas l'existence d'une période humide s'étalant du mois de Novembre jusqu'au mois de Avril. Alors que la période sèche s'étale sur le reste de l'année.

1-3-2- Méthode ombrothérmique : (Méthode d'Euverte)

Cette méthode considère l'action de la chaleur et l'humidité vis-à-vis de l'activité biologique. En effet, les besoins en eau des plantes suivent une progression exponentielle pour un accroissement de température les besoins en eau doublent. On établit les diagrammes ombrothérmique en adoptant une progression linéaire pour les températures, et logarithmique pour les besoins en eau. Le rapport P/T établi mensuellement permet de définir le type de régime des différentes stations.(régime humide où P/T >3, régime sèche où P/T <3)

Selon le tableau n°3-8, le régime humide où P/T > 3 débute au mois de Novembre jusqu'au mois d'avril, alors que la période sèche dure six mois depuis le mois de Mai jusqu'au mois d'Octobre

Mois	Ś	0	Ν	D	J	F	Μ	Α	M	J	Ju	Α
Station												
Batna	1.8	1.7	3.8	8.2	7	4.1	4.4	2.4	2.1	1.1	0.5	0.4
Ain-sekhouna	1.4	1	1.8	4.3	5.7	3.6	4.5	1.9	2	0.9	0.6	0.7
Ain-yagout	1.2	1.1	2.3	8	5.4	3.4	2.9	4.6	1.8	0.8	0.1	0.7

Tableau n°3-8: Représentation des rapports P/T des différentes stations (1986-1996) :



FIG 3-8 : Les diagrammes pluviothermiques des différentes stations (1986-1996).

1-4- Les indices climatiques :

Indice d'aridité de Martonne :

En se basant sur le régime des précipitations et des températures, Martonne (1923) a fait une première tentative concernant l'aridité du climat en établissant un indice d'aridité A.

$$A = \frac{P}{T+10}$$

d'où :

P : Les précipitations moyennes annuelles en (mm).

T : Les températures moyennes annuelles en (C°).

Pour notre étude l'indice d'aridité de Martonne est calculé pour la période (1986-1996).

Tubleuu II 5 7. Illulee u ul	fuite annuel de Dennartonik
Stations	Α
pluviométriques	
Batna	14.99
Ain-sekhouna	12.04
Ain-yagout	11.47

Pour les stations Batna - Ain-sekhouna - Ain-yagout, ainsi que le bassin d'el Madher, l'indice d'aridité est compris entre 10 et 20; donc on est dans un milieu semi-aride, ce qui confirme la classification du climat au début de ce chapitre (annexe 4).

2- Evaporation :

Les seules mesures en notre possession sont des relevés d'évaporation à la station d'Ain-sekhouna. Ces mesures concernent la période (1984-1997).Tableau n°3-10, le maximum d'évaporation a lieu au mois de Août et le minimum au mois de Janvier.

rableau n 5-10 : L evaporation moyenne inter annuer (1984-1997).												
Mois	S	0	Ν	D	J	F	Μ	Α	Μ	J	Ju	Ao
Evapor (mm)	12.5	10.7	8.4	7.1	6.3	6.5	7	7.9	9.8	11.6	11.6	12.7

Tableau n°3-10 : L'évaporation moyenne inter annuel (1984-1997).

3- Etude de l'évapotranspiration :

La connaissance du bilan d'eau d'une région consiste à évaluer la répartition des précipitations entre l'écoulement, l'infiltration et l'évapotranspiration. Ce dernier paramètre qui est le retour de l'eau sous forme de vapeur de la surface terrestre (sols, végétaux eaux libres) à l'atmosphère.

Il est utile de distinguer :

- Une évapotranspiration potentielle ETP, qui correspond à l'évapotranspiration d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour évaporer la qualité d'eau maximale, permise par les conditions climatiques.
- Une évapotranspiration réelle ETR, qui correspond à l'évapotranspiration se produisant dans les conditions réelles.

L'estimation de la lame d'eau évapotranspirée est possible grâce à des formules empiriques à caractère statistique que divers auteurs ont élaboré.

3-1- Evapotranspiration potentielle ETP :

- Calcul de l'ETP selon Thornthwaite :

C.W Thornthwaite (1944) a établi une corrélation entre la température moyenne mensuelle et l'évapotranspiration potentielle mensuelle.

Les résultats de l'évapotranspiration potentielle mensuelle calculée reportés au tableau n°3-11

	mois	S	0	Ν	D	J	F	Μ	Α	Μ	J	JU	Α
	paramét												
	K	1.03	0.97	0.86	0.85	0.87	0.85	1.03	1.05	1.21	1.21	123	1.16
	T(C°)	22.4	16.2	0.25	5.25	5.55	7.15	10.8	13.5	19.3	24.2	26.4	28.1
tna	Ι	9.68	51.93	2.54	1.08	1.17	1.72	3.21	4.5	7.73	10.89	12.42	13.65
Bat	EP(mm)	103	60	23	9	10	15	30	44	80	117	136	151
, ,	ETP(mm)	106	58	20	8	9	13	31	48	97	142	167	175
u	T(C°)	21.6	18.9	10.5	6.9	5.4	6.6	9.2	11.8	17.5	22.2	25.6	25.8
-u	Ι	9.17	7.49	3.18	1.63	1.12	1.52	2.52	3.67	6.66	9.55	11.85	11.19
Ai kh	EP(mm)	99	80	31	16	10	14	25	37	70	104	131	132
Š	ETP(mm)	102	78	27	14	9	12	26	40	85	126	161	153
	T(C°)	23.1	16.9	9.55	5.95	6.25	7.85	10.5	14.2	20	24.9	27.1	28.8
Ain- yagout	Ι	10.15	6.32	2.66	1.3	1.4	1.98	3.53	4.86	8.16	11.37	12.92	14.17
	EP (mm)	106	61	22	10	11	16	31	45	82	121	141	157
	ETP(mm)	109	59	19	9	10	14	32	49	99	146	173	182

Tableau n°3-11: L'ETP des différentes stations pour la période (1986-1996) :

D'après le résultat du tableau n°3-11, le pouvoir évaporant d'atmosphère atteint des valeurs maximales pendant la période sèche. L'accumulation en eau souterraine se trouve pendant la période froide où l'ETP décroît progressivement et atteint des valeurs minimales.

3-2- Evapotranspiration réelle (ETR) :

L'évapotranspiration réelle ETR est appelée souvent déficit d'écoulement (De) bien que celui–ci corresponde à l'évapotranspiration réelle et à l'infiltration. Pour le calcul de l'ETR, nous avons choisi les méthodes de Turc et le bilan de Thornthwaite.

3-2-1- Formule de Turc :

L. Turc a établi une relation tenant compte des précipitations et des températures. Cette formule est applicable à toutes les régions.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (mm/an)$$

Avec :

P: Précipitation moyenne en (mm).

 $L = 300 + 25T + 0.05T^3$.

T : Température moyenne annuelle en (C°).

En appliquant cette méthode pour notre zone, les résultats reportés au tableau n°3-12

Station	T(C°)	P(mm)	ETR(mm)	ETR (%)
Batna	15.68	385	369	95.8
Ain-sekhouna	15.17	300	299	98.7
Ain-yagout	16.34	302	301	99.7

Tableau n°3-12 : L'ETR selon la méthode de Turc des différentes stations (1986-1996).

3-2-2- Méthode de C.W.Thornthwaite :

Les données sur l'évapotranspiration potentielle calculée pour chaque mois par la méthode de Thornthwaite et les précipitations mensuelles relevées aux différentes stations nous ont permis d'esquisser un bilan hydrique dont les différents éléments sont exprimés en millimètres.

Cette méthode fait ressortir quatre paramètres : ETP, ETR, déficit agricole et excédent. A partir de ce dernier paramètre on aboutira au ruissellement et à l'infiltration. Tous ces paramètres, reposent sur l'estimation des réserves facilement utilisables (RFU).

La RFU est la qualité d'eau emmagasinée dans la couche du sol (pédologique) utilisable facilement par les plantes, pour son fonctionnement physiologique. Richard (1979) a proposé une formule pour le calcul de la RFU, dans la partie Nord- Est de l'Algérie.

$$RFU = \frac{1}{3}D_aH_eP$$

Avec :

RFU : réserve facilement utilisable en (mm).

Da: densité apparente du sol, Da = 1.4.

 H_e : Capacité de retentions = 25% soit 0.25.

P : Profondeur de la terre parcourue par les racines en (m).

Pour un sol de 0.4 m de profondeur, la RFU est de 47mm.

L'application de la méthode de Thornthwaite a donné les résultats du tableau n°3-13. Le bilan hydrique des 3 stations peut être représenté sous forme graphique, les courbes de L'ETP et des précipitations sont représentées dans un repère avec les mois en abscisse, et les quantités en (mm) en ordonnée. Voir Fig. n°3-9.

	Mois	S	0	Ν	D	J	F	Μ	Α	Μ	J	Jui	Aou	Ann.
	paramètre													
	s													
	T(C°)	22.4	16.2	9.25	5.25	5.55	7.15	10.8	13.5	19.3	24.2	26.4	28.1	15.68
	i	9.68	5.93	2.54	1.08	1.17	1.72	3.21	4.50	7.73	10.89	12.42	13.65	74.52
3atna	EP(mm)	103	60	23	9	10	15	30	44	80	117	136	151	
	k	1.03	0.97	0.86	0.85	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	
le l	ETP(mm)	106	58	20	8	9	13	31	48	97	142	167	175	874
u c	P(mm)	40	28	35	43	39	29	47	32	41	26	14	11	385
utio	VR(mm)	-66	-30	15	35	30	16	16	-16	-56	-116	-153	-164	
ste	RFU(mm)	-	-	15	47	47	47	47	31	-	-	-	-	
La	DA(mm)	66	30	-	-	-	-	-	-	25	116	153	164	554
	EX(mm)	-	-	-	3	30	16	16	-	-	-	-	-	65
	ETR(mm)	40	28	20	8	9	13	31	48	72	26	14	11	320
	T(C°)	21.6	18.9	10.5	6.9	5.4	6.6	9.2	11.8	17.5	22.2	25.6	25.8	15.17
nu;	i	9.17	7.49	3.18	1.63	1.12	1.52	2.52	3.67	6.66	9.55	11.85	11.99	70.35
ho	EP(mm)	99	80	31	16	10	14	25	37	70	104	131	132	
Ain-skl	k	1.03	0.97	0.86	0.85	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	
	ETP(mm)	102	78	27	14	9	12	26	40	85	126	161	153	833
le A	P(mm)	30	19	19	30	31	24	41	23	35	19	15	17	303
p u	VR(mm)	-72	-59	-8	16	22	12	15	-17	-50	-107	-146	-136	
tio	RFU(mm)	-	-	-	16	38	47	47	30	-	-	-	-	
sta	DA(mm)	72	59	8	-	-	-	-	-	20	107	146	136	548
La	EX(mm)	-	-	-	-	-	3	15	-	-	-	-	-	18
	ETR(mm)	30	19	19	14	9	12	26	40	65	19	15	17	285
	T(C°)	23.1	16.9	9.55	5.95	6.25	7.85	11.5	14.2	20	24.9	27.1	28.8	16.34
out	i	10.1	6.32	2.66	1.3	1.4	1.98	3.53	4.86	8.16	11.37	12.92	14.1	78.82
agı	EP(mm)	106	61	22	10	11	16	31	45	82	121	141	157	
n-y	k	1.03	0.97	0.86	0.85	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	
Aiı	ETP(mm)	109	59	19	9	10	14	32	49	99	146	173	182	901
de	P(mm)	87	19	22	34	34	27	33	25	36	20	4	21	362
u	VR(mm)	-22	-40	3	25	24	13	1	-24	-63	-126	-169	-161	
ati	RFU(mm)	-	-	3	28	47	47	47	23	-	-	-	-	
l st	DA(mm)	22	40	-	-	-	-	-	-	40	126	169	161	558
La	EX(mm)	-	-	-	-	5	13	1	-	-	-	-	-	19
	ETR(mm)	87	19	19	9	10	14	32	49	59	20	4	21	343

Tableau $n^{\circ}3-13$: Le bilan hydrique pour les 3 stations.







FIG 3-9 : bilan hydrique avec l'ETP de Thornthwaite

Les résultats relatifs à l'ETR obtenu par les deux méthodes (tableau n°3-14) n'ont pas trop varié pour chaque station, ils sont relativement proches l'un de l'autre.

Station	Batna	Ain-	Ain-
		sekhouna	yagout
Turc	369	299	301
Thornthwaite	320	285	283
Moyenne	345	292	292

Tableau n°3-14: Evapotranspiration réelle (mm/an) par les deux méthodes

Conclusion :

La zone d'étude fait partie du grand basin versant de hauts plateaux constantinois. Elle est caractérisée par un climat semi-aride avec un hiver froid et pluvieux, et un été chaud et sec.

L'examen de la série de précipitation pour la période (1984-2005) a révélé une pluviométrie moyenne de 322 mm/an selon la station de Ain skhouna . Cependant pour la période (1986 –1996), l'examen des précipitations et des températures des différents postes pluviométriques a donné des résultats spécifiques pour le basin d'el Madher avec :

- Les précipitations moyennes annuelles d'après la carte isohyète établi par le BNEDER et de l'ordre de 342 mm/an.
- ➢ Les températures moyennes annuelles de l'ordre de 15.17 C°.
- Le période humide s'étalant du mois de Novembre jusqu'au mois de Avril. Alors que la période sèche s'étale sur le reste de l'année.
- La région a un climat semi-aride
- L'évapotranspiration potentielle (ETP) selon Thornthwaite de l'ordre de 833 mm/an.
- L'évapotranspiration réelle moyenne (ETR) évaluée par la méthode de turc par classes d'altitudes est de 367 mm/an.
- Le déficit agricole pour satisfaire les besoins en eau d'irrigation des cultures est de 548 mm à partir du mois du Mai jusqu'au mois d'Octobre. Notons que le bilan hydrique est déficitaire, et l'alimentation se fait latéralement soit par les bassins voisins, soit par le phénomène de drainance.

Remarque :

Le climat de la zone d'étude est semi-aride avec un hiver froid et pluvieux et un été chaud et sec dans tous les points du bassin versant sans exception.

CHAPITRE–IV-*Cadre géophysique*

- 1. Introduction
- 2. Objectifs de l'étude
- 3. Travaux effectués
- 4. Répartition des sondages électriques
- 5. Echelle des résistivités
- 6. Examen des résultats et interprétation
 - 5.1. Etude de substratum
 - 5.1.1. Profils géologiques détaillés
 - 5.1.2. Carte de résistivité en ligne AB = 3000m
 - 5.2. Etude du recouvrement
- 7. Conclusion

1-Introduction :

Pour toute étude géotechnique et hydrogéologique, la géologie est primordiale mais elle est limitée par le non affleurement des formations géologiques.

De ce fait l'étude géophysique est d'un rapport précieux car elle permet de compléter ou de confirmer l'étude géologique et déterminer les zones susceptibles d'être aquifère.

Cette dernière est basée sur des sondages électriques, lesquels vont permettre de caractériser les terrains aquifères en vue de l'étude de leurs potentialités.

L'étude géophysique faite dans notre région d'étude a été effectuée en 1969 par la campagnie générale de géophysique (C.G.G).

2-Objectifs de l'étude:

Dans notre sujet l'objectif de l'étude géophysique est la détermination des formations du recouvrement, leur extension, épaisseur, et leur nature.

3-Travaux effectués :

La méthode adoptée dans l'étude de la C.G.G était celle du sondage électrique avec les dispositifs quadratiques rectiligne ABMN de Schlumberger.

Dans la zone d'étude les sondages électriques sont disposés suivant des profiles SE-NW repartis suivant une maille de lKm*2Km, sauf à El Madher, où elle a été resserrée, il s'agit des profiles A, B, C, D, E...etc.,(fig. 4-1) avec ligne d'injection AB=2000m et 4000m, soit une profondeur d'investigation variant de 500 à 1000m respectivement.

Les coupes A et B sont les deux coupes concernent notre secteur d'étude.



FIG 4-1: Position des sondages électriques

4- Profils géologiques :

Pour déterminer l'organisation des différents niveaux grossiers du recouvrement au sein de la matrice argileuse, Mr Menani(1991) établi des coupes géologiques détaillées (Fig. 4-2).

Les sondages électriques matérialisés sur les profils par SE1, SE2 permettent de contrôler les profondeurs du toit du substratum marneux pour lequel, l'étalonnage géophysique (CGG,1969) a donné une résistivité de 3 Ohm/m. Il a été également tenu compte des coupes des sondages, pour la répartition des niveaux grossiers au sein du recouvrement.

Les profondeurs du toit du substratum du recouvrement ainsi que ses épaisseurs sont consignées dans le tableau n°4-1 :

							. ()
Sondages électriques	1	2	3	4	5	6	7
Coupe A	P=85 m E= 130 m	P= 70 m E= 95 m					
Coupe B	P= 80 m E= 180 m	P=70 m E=130 m	P=30 m $E=100 m$				

Tableau n°4-1 : Profondeurs du substratum et épaisseur du recouvrement Mr Menani(1991).

Les nombreux sondages électriques, effectués par la C.G.G. et répartis uniformément sur toute l'étendue de la plaine, permettent une bonne reconnaissance du toit du substratum d'autant plus que la résistivité de ce marqueur (3 Ohm/m) se démarque nettement de celles des formations du recouvrement (50 à 60 Ohm/m, avec des pointes de 100 Ohm/m).

> coupe géologique A :

Les marnes du Miocène affleurant sur le flanc sud des Monts de Batna d'une part, et le prolongement des marnes cénomaniennes affleurant sur le flanc nord du Djebel Bou Arif d'autre part, ont permis de supposer que le substratum imperméable est constitué en fait d'une superposition de ces deux types de marnes :(Mr Menani 1991)

- au sommet : les marnes du Miocène (attribuées au Burdigalien) discordantes ;

- à la base : les marnes du Cénomanien, en formation très épaisse.

Sur le flanc nord-ouest du Djebel Bou Arif, au dessus du substratum constitué des



FIG 4-2: Coupes géologiques détaillées ; Mr Menani 1991

marnes du Cénomanien à cet endroit, se superposent des formations du Cénomanien supérieur (calcaires marneux), du Turonien (marnes et calcaires) et du Miocène (calcaires et grès).

> coupe géologique B :

Effectuée au nord de la coupe géologique Al, elle met également en évidence le biseautage sous les recouvrements de la plaine, des formations résistantes du Cénomanien supérieur (calcaires marneux) et du Miocène (calcaires et grès), affleurant sur le flanc nord du Djebel Bou Arif (Mr Menani 1991).

5- Etude du recouvrement : (Fig n° 4-3)

La carte du recouvrement résistant (Fig. 4-3) permet de délimiter parfaitement les formations détritiques du recouvrement. Ces formations s'épaississent considérablement dans la partie nord-est de la plaine, par comblement de 1'avant fosse tectonique.



5 - Conclusion :

Le substratum de l'aquifère mio-plio-quaternaire est constitué de marnes du Cénomanien et du Miocène et localement par des argiles du Tortonien supérieur pour la bordure est de la plaine.

La superposition des marnes miocènes par discordance sur les marries cénomaniennes n'est pas différenciable du point de vue géophysique ; les deux formations conductrices ayant des résistivités de 3 Ohm/m. Cette épaisse formation marneuse et argileuse, dans son ensemble, limite parfaitement du point de vue hydraulique et sur toute son étendue l'aquifère mio-plio-quaternaire.

CHAPITRE –V-Cadre hydrogéologique

Introduction.

- 1. L'aquifère superficiel du Mio-Plio-Quaternaire (du recouvrement).
- 2. Etude de l'aquifère du Mio-Plio-Quaternaire.
 - 2.1. Géométrie de la nappe.
 - 2.2.Catégorie de l'aquifère .
 - 2.3. Etude piézométrique .
 - 2.3.1. Inventaire des points d'eau.
 - 2.3.2. Nature des limites géographiques .
 - 2.3.3. La carte d'égale épaisseur de la nappe superficielle
 - 2.3.4. Piézomètrie.
 - 2.4. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe Moi-plio-quaternaire .
 - a) Les méthodes d'expérimentation et d'interprétation des essais par pompage.
 - b) Interprétation.
 - c) Résultats .

Conclusion.

Introduction :

L'étude hydrogéologique aura pour buts d'identifier les conditions aux limites de la zone, et d'identifier ses caractéristiques hydrodynamiques par des essais de pompage et d'établir leur répartition spatiale, d'effectuer un inventaire des points d'eau et d'effectuer plusieurs campagnes piézométriques pour suivre les fluctuations et situer avec précision l'inversion de l'évolution piézométrique par rapport au reste de la nappe.

La détermination des différents aquifères dans la plaine d'El Madher, à été basée surtout sur l'analyse lithostratigraphique, géophysique et structurale des formations géologique. A partir de cette analyse le cadre hydrogéologique de la plaine peut être divisé en deux ensembles :

L'un superficiel => L'aquifère superficiel Mio-Plio-Quaternaire (de recouvrement). L'autre profond => L'aquifère du Crétacé et du Jurassique.

L'aquifère du recouvrement a été l'objet de notre étude.

1- L'aquifère superficiel du Mio-Plio-Quaternaire (du recouvrement) :

Les formations détritiques du recouvrement sont le siège d'une nappe importante et généralisée. Le réservoir constitué par les produits de démantèlement des reliefs, plus ou moins remaniés par les eaux courantes, donc grossièrement détritiques dans une matrice argileuse, se caractérise par des épaisseurs considérables.

2- Etude de l'aquifère du Mio-Plio-Quaternaire :

2-1 – Géométrie de la nappe :

Les limites de l'aquifère mio-plio-quaternaire s'étendent en bordure des massifs crétacés des Monts de Batna et du Djebel Bou Arif au sud, et du Djebel Tafraout et la Koudiat Tfouda au nord.

A partir de l'étude géophysique (chapitre précédent) Le substratum de l'aquifère mioplio-quaternaire est constitué de marnes du Cénomanien et du Miocène et localement par des argiles du Tortonien supérieur pour la bordure est de la plaine. Ces formations marneuses du point de vue hydraulique et sur toute son étendue l'aquifère mio-plio-quaternaire. De même, qu'elle constitue le toit des formations captives du Crétacé.

2-2 -Catégorie de l'aquifère :

L'étude des sédiments détritiques du recouvrement (voir cadre géologique) et l'étude de son substratum, a montré que l'épaisseur des sédiments détritiques devenait très importante dans la partie nord-est de la plaine.

Au sud de cette fosse, l'épaisseur du recouvrement s'amenuise, avec une remontée progressive du toit du substratum jusqu'à la fermeture du synclinal.

Cette configuration nous permet de distinguer au sein du grand réservoir les aquifères suivants :

- les niveaux aquifères profonds ;

- l'aquifère de surface.

2-2-1- Les niveaux aquifères profonds du recouvrement :

Ils sont exclusivement localisés dans la grande dépression située au nord-est de la plaine, où la fosse tectonique a favorisée leur accumulation.

L'examen des coupes des sondages M1, M2 et M3 (voir cadre géologique), implantés dans cette dépression, a permis de mettre en évidence que le recouvrement s'organisait en deux grands ensembles :

- un ensemble inférieur : situé à la base du recouvrement, où les éléments grossiers sont prédominants (sables, graviers et galets). Les niveaux aquifères captés par les sondages se situent en grande majorité dans cet ensemble, jusqu'à des profondeurs de 277 m.

- un ensemble supérieur : à dominante argilo-sableuse, de nature semi perméable.

2-2-2- L'aquifère de Surface :

Au sud de la dépression, la coupe du sondage M5 caractérise de manière générale l'aquifère de surface.

D'une profondeur de 89 m, le sondage M5 capte complètement un étagement régulier d'assises grossières (sables, graviers et galets) alternant avec des assises argileuses, au dessus du substratum imperméable, ce sont des argiles vertes dures et gonflantes. Ces niveaux, captés entre 3 et 68 m de profondeur, font " corps " avec l'aquifère de surface, dans un ensemble à nappe libre.

La nappe est exploitée durant presque toute l'année, avec une intensification en période sèche.



Fig n° 5-1 : Coupe géologique du sondage M5, Mr Menani(1991)

2-3 - Etude piézométrique :

L'analyse piézométrique a pour but d'étudier la nappe de l'aquifère du Mio-Plio-Quaternaire dans son contexte géologique, et de déterminer le schéma général de son écoulement. Ceci à nécessité son suivi pendant trois campagnes de relèves piézométriques établies comme suit :

- ➢ La campagne de janvier 2007.
- ➢ La campagne de septembre 2007.
- ➢ La campagne de février 2008 (pour confirmation de la fluctuation de la nappe).

Pour élaborer la carte piézométrique de la nappe mio-plio-quaternaire les données publiées dans les études de la plaine d'El Madher (étude hydrogéologique de la plaine d'El Madher par MR Menani 1991) ; on été mises a contribution.

2-3-1- Inventaire des points d'eau :

Une campagne d'inventaire des points d'eau à été effectuée au début (Fig. n°5-2). Ainsi on a 22 puits répartis à travers la zone d'étude. Les points d'eau retenus durant les trois campagnes piézométriques couvrent de manière satisfaisante la zone étudiée .Ils sont pour la plupart des puits domestiques non couverts, creusés à la main et construits en briques ou en pierre, de faible profondeur et de diamètre variables de 3 à 5 mètres, et équipés généralement de pompes horizontales . Ils sont destinés à l'irrigation des cultures.

Les données piézométriques ont été consignées dans le (Tableau 5-1)

N°			Altitude	janvier 2007		septembre 2007.		février 2008	
puits	latitude°	Longitude°	sol (m)	Ns (m)	Hp(m)	Ns(m)	Hp(m)	Ns(m)	Hp(m)
p1	E6°14,577	N35°36,522	944.5	15,8	928,7	14,6	929,9	15.75	928,75
p2	E6°14,415	N35°36,511	950	16,4	933,6	14,7	935,3	16.38	933,62
p3	E6°14,133	N35°36,602	960	15,7	944,3	14,8	945,2	15.5	944,5
p4	E6°14,130	N35°36,649	962	17,1	944,9	15,3	946,7	17	945
p5	E6°14,286	N35°36,534	951	13,15	937,85	11	940	13.15	937,85
p6	E6°14,649	N35°36,480	935	14,3	920,7	11,6	923,4	14.25	920,75
p7	E6°14,747	N35°36,443	907.75	12,85	894,9	10,4	897,35	12.8	894,95
p8	E6°15,040	N35°36,562	941.8	14,6	927,2	13,3	928,5	14.45	927,35
p9	E6°15,102	N35°36,512	934.5	12,5	922	11,7	922,8	12.48	922,02
p10	E6°15,134	N35°36,565	939	12,7	926,3	11,7	927,3	12.65	926,35
p11	E6°15,399	N35°36,575	934	11,3	922,7	10,1	923,9	11.32	922,68
p12	E6°15,461	N35°36,703	922	12	910	9,9	912,1	12	910
p13	E6°15,526	N35°36,660	921.3	11,15	910,15	9,5	911,8	11.1	910,2
p14	E6°15,547	N35°36,799	910	12,8	897,2	11,2	898,8	12.75	897,25
p15	E6°15,721	N35°36,790	914	10,9	903,1	9,5	904,5	10.85	903,15
p16	E6°16,250	N35°36,886	909	6,8	902,2	6,7	902,3	6.82	902,18
p17	E6°16,205	N35°36,962	907.75	6,3	901,25	5,7	901,85	6.33	901,22
P18	E6°14,577	N35°36,780	949.5	2.95	946,55	3.4	946,1	3.0	946,5
P19	E6°14,133	N35°36,750	943.5	2.78	940,72	3.25	940,25	2.8	940,7
P20	E6°14,129	N35°36,720	962.8	19	943,8	21.45	943,35	18.4	944,4
P21	E6°15,125	N35°36,700	960.3	16.2	944,1	18.38	943,92	16	944,3
P22	E6°16,215	N35°37,100	906	18	888	20.43	887,57	17.66	888,34

Tableau n°5-1: Inventaire des points d'eau pour la nappe superficiellen
(Période Janvier, Septembre 2007 et Février 2008)

Ns : Profondeur de niveau statique (m) Hp : Hauteur piézométrique (m)

Repérage des puits par GPS



FIG 5-2: carte d'inventaire des puits
2-3-2-Nature des limites géographiques :

Ces limites sont marquées par la présence de massifs montagneux.

Djebel Bou Arif :

Le long de cette limite au Sud du sous bassin, le contact est désigné par des marnes cénomaniennes du substratum. Leur nature lithologique freinerait toute alimentation souterraine directe de la nappe par les formations crétacées, mais l'existence de fracturation limite par conséquent l'étanchéité des marnes cénomaniennes.

Au nord de cette limite, les calcaires et les marnes du Turonien marquent un contact de plus en plus franc avec l'aquifère. Mais ce sont surtout les calcaires aptiens, sous-jacents dans la série stratigraphique, qui alimentent la nappe (bordure d'El Madher).

Monts de Batna :

Cette limite de l'aquifère est marquée par les marnes miocènes, relayant celles du Cénomanien (substratum) dans cette partie de la plaine (voir coupes géologiques détaillées)., cette étanchéité est interrompue par l'effet d'importants accidents tectoniques, dont la plupart sont orientés selon une direction SE-NW, permettant ainsi aux assises calcaires (Jurassique) et gréseuses (Barrémien), d'alimenter l'aquifère mio-plio-quaternaire.

Selon Mr Menani (1991) les marnes marquant le contact avec l'aquifère mio-plioquaternaire sont également interrompues aux débouchés des différents cours d'eaux secondaires (voir carte du bassin versant). Le sous écoulement dans ces Oueds et une partie des eaux de ruissellement collectées à leurs niveaux, constituent un mode d'alimentation non négligeable en période pluvieuse.

2-3-3- La carte d'égale épaisseur de la nappe superficielle :(Fig. n°5-3).

La carte isobathe établie par Mr Menani (1991) de la nappe mio-plio-Quaternaire montre que la surface libre de la nappe s'équilibre en moyenne à une dizaine de mètres de profondeur.

La profondeur de la nappe augmente progressivement vers sa limite nord nord-est et vers le sud pour atteindre 30 m, et diminue progressivement par la suite, pour s'équilibrer en moyenne à une profondeur de 5 à 15 m dans le secteur de Fesdis « secteur de Gseya ».



2-3-4 Piézométrie :

2-3-4-1- Interprétation des cartes piézométriques :

- La piézométrie en 1989-1990 :(Mr Menani 1991) (Fig. n°5-4)

L'écoulement (perpendiculaire aux isopièzes) est en règle générale orienté du sud vers le nord. L'eau provient à la fois du sud, essentiellement par l'alimentation fracturale de la bordure des Monts de Batna et de la borde Nord-Est de la plaine (bordure d'El Madher). Les écoulements issus de deux limites convergent dans le secteur de la Mechta Arour, pour être draine vers l'exutoire du bassin.

dans la partie nord-est de la plaine les isopièzes présentent un Jar_ espacement avec un gradient hydraulique moyen de l'ordre de 0.3 %, alors que près de la bordure d'El Madher, les isopièzes se resserrent sensiblement, pour avoisiner un gradient de 6 %. Plus au sud, dans la vallée de Fesdis, il est de l'ordre de 2.5%.

à l'ouest de Gseya, les isopièzes sont concaves vers la bordure des Monts de Batna, mettant nettement en évidence l'apport par cette limite. Le même cas de figure (concavité des isopièzes vers la bordure) s'observe en bordure du Djebel Bou Arif, à partir d'El Madher vers le nord, où les calcaires aptiens sont à l'origine de cet apport.

Oued El Madher, avant qu'il ne se scinde en plusieurs bras juste à l'amont de Mechtat Arour, connaît un régime d'écoulement pérenne, qui s'interrompt dans cette zone, avant de reprendre à l'exutoire du bassin.

Le long de son tracé méandrique, notamment dans la vallée de Fesdis, les isopièzes marquent un espacement plus net, dû au fait que les alluvions de l'Oued sont de meilleure perméabilité que les formations environnantes. A certains endroits de son cours (vallée de Fesdis), la convexité des isopièzes vers l'amont hydraulique souligne le drainage de la nappe par cet Oued, alors qu'à d'autres (de Mechtat Arour à l'exutoire), l'Oued El Madher recharge la nappe.



- La piezometrie en 2007-2008 :

Les cartes piézométriques n°5-5 et 5-6 relatives respectivement aux campagnes de janvier 2007(hautes eaux), de septembre 2007(étiage) et de février 2008 période de hautes eaux aussi, (ce dernier réalisé juste pour confirmation de la première campagne (janvier 2007)), ont été construites à partir des mesures des niveaux statiques et des cotes de terrain mesurées par GPS. L'équidistance des cartes piézométriques et de 5m.

En général l'écoulement est orienté de Sud vers le Nord, avec une alimentation essentiellement par les monts de Batna (Sud Ouest).



Fig n° 5-5 : Carte piézométrique de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire (Janvier 2007).



Fig n° 5-6 : Carte piézométrique de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire (Septembre 2007).



Fig n° 5-7 : superposition des cartes piézométriques, janvier 2007 et septembre 2007



Fig n° 5-8: Zone de fluctuation piézométrique inverse.

2-3-4-2- Fluctuation de la nappe :

- La fluctuation de la nappe en 1989_1990:

Pour l'ensemble de la nappe la fluctuation diminue progressivement vers les limites nord-est et nord-ouest de la nappe pour atteindre 0.30 à 0.40 m en moyenne.

Dans la partie amont de la nappe, au niveau de Chabet Tazebennt, l'alimentation accrue par la bordure des Monts de Batna, se traduit par un rehaussement caractéristique des niveaux d'eau, où il atteint 1.50 m.

Les mesures effectuées en mai 1990 attestent d'un rehaussement du niveau de la nappe variant entre 0.30 et 0.60 m selon les endroits. La rapidité de réaction de la nappe, atteste par conséquent de sa réalimentation, du moins en partie, par infiltration directe des eaux de pluies, ce que ne relevaient pas les bilans hydriques aux pas mensuels.

Concernant la zone qui nous intéresse particulièrement, la piézométrie enregistrée en mai 1990 par Mr Menani dans la zone de Fesdis, après l'épisode pluvieux, montre une **fluctuation totalement inverse** à celle enregistrée dans le reste de la nappe c'est-à-dire que les niveaux continuaient à baisser, alors qu'ailleurs s'enregistrait un rehaussement très net.

- La fluctuation de la nappe en 2007_2008:

La superposition des cartes isopièzes de janvier 2007(période de hautes eaux) et septembre 2007(période d'étiage), nous a permis de tracer un schéma qui donne la fluctuation de la nappe (Fig. n°5-8, tableau 5-1).

La fluctuation des niveaux piézométriques dans la partie sud du bassin d'El Madher est <u>totalement inverse</u> (voir Fig. n° 5-8) c.-à-d. la hauteur piézométrique en période d'étiage est supérieur à la hauteur piézométrique de la période des hauts eaux (cela confirme l'étude de Mr Menani 1991), la fluctuation de la nappe est négative et varié entre 0.6 à 2.15 m (fig n°5-9)

La fluctuation des niveaux piézométriques dans le reste de la nappe est normale, le niveau piézométrique de la période des hautes eaux est supérieur a celui de la période d'étiage. La fluctuation du niveau de cette zone varie entre 18 et 45 cm.



2-4- Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe du mio-plio-quaternaire :

La détermination des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère se fait par des essais de pompage. Ces essais consistent à représenter expérimentalement par des graphiques, les courbes et les droites des fonctions mathématiques régissant l'écoulement des eaux souterraines vers les ouvrages de captage. L'étude de ces graphiques permet :

- > D'analyser l'évolution du cône de dépression de la surface piézométrique.
- > De préciser les caractéristiques hydrauliques de la nappe.
- De déterminer les paramètres hydrodynamiques et délimitation des zones de transmissivites.

La conduite des essais de débit et leur interprétation repose sur le régime d'écoulement des eaux souterraines vers les ouvrages de captage. C'est pourquoi, il est recommandé d'être prudent sur le choix des formules à appliquer et de leurs conditions aux limites.

Les résultats des essais de pompage existants dans la zone d'étude ont été effectués par Mr Menani(1991) (puits n°164,98 et 104 selon leur numérotation « étude hydrogéologique de la plaine d'El Madhre 1991 »).

Les conditions de validité des méthodes d'interprétation des pompages d'essais, reposent en effet sur l'utilisation de piézomètres pour la détermination des caractéristiques hydrodynamiques.

A- Les méthodes d'expérimentation et d'interprétation des essais par pompage:

Essais de nappe : cet essai est réalisé en un seul palier de débit de longue durée, avec la mesure des niveaux d'eau dans le puits (rabattement) et dans des piézomètres si c'est possible ,en fonction du temps. Ce type d'essai est utilisé dans le but de déterminer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (T, S, ...). Il faut noter que l'interprétation n'est possible que si le type d'aquifère est identifié.

B-Interprétation :

L'interprétation des essais par pompage repose sur des méthodes graphiques d'approximation, ces méthodes sont toutes basées sur les hypothèses suivantes :

Le débit est supposé constant pendant toute la durée de pompage.

La surface de la nappe est supposée horizontale.

- > Le puits ou forage captent la nappe sur la totalité de son épaisseur.
- L'écoulement est supposé laminaire.
- L'aquifère est d'extension illimitée.

L'exécution et l'interprétation des données brutes (rabattements et temps), reposent sur l'emploi des expressions d'hydrodynamiques en régime transitoire, établies par Theis (1935) et Papadopulos-Cooper courbes de descentes.

C-Résultats :

L'interprétation des courbes de descentes par la méthode de Theis et celle de Papadopulos-Cooper a permis d'obtenir les résultats suivants :

puits	T (m ² /s)		T moyenne (m^2/s)	S
	Theis	Papadopulos-Cooper		
164	6.10.10 ⁻³	9.10.10 ⁻³	7.60.10 ⁻³	0.29
98	6.10.10 ⁻³	$1.10.10^{-3}$	3.60.10 ⁻³	0.31
104		6.10.10 ⁻³	6.10.10 ⁻³	0.08

Tableau n°5-2 : résultats de l'interprétation des pompages d'essais :

Les valeurs de transmissivites obtenues par I' interprétation des pompages d'essai, constituent des valeurs brutes qui nécessitent des corrections liées notamment a I' épaisseur de la nappe.

La carte du toit du substratum imperméable (voir étude géophysique) a permis d'estimer les épaisseurs de I' aquifère dans le secteur de pompage. Les épaisseurs de la nappe sont alors obtenues par soustraction des profondeurs des niveaux statiques.

Avec cette hypothèse, nous avons ensuite cherche les valeurs de perméabilités (K = T/E) caractéristiques de chaque zone (voir tableau n°5-3).

N° puits	Altitude Sol (m)	Altitude Toit (m)	Profond N.S(m)	Épaisseur E(m)	T brutes (m ² /s)	K (m/s)	T calculées (m ² /s)
							$T_m = E.K_{moy}$
164	960.3	930	18.07	12.2	7.6 10 ⁻³	6.2 10 ⁻⁴	3.4
98	930	900	8.73	21.3	3.60 10 ⁻³	1.6 10 ⁻⁴	6.1
104	910	865	4.96	40	6.10 10 ⁻³	$0.78 \ 10^{-4}$	11.4

Tableau n°5-3 : valeurs de transmissivité calculées :

K moyenne= $2.86 \ 10^{-4}$ m/s T moyenne= $6.9 \ 10^{-3}$ m²/s

Conclusion :

L'étude hydrogéologique montre que la nappe de surface constitue essentiellement par des formations du recouvrement d'âge mio plio-Quaternaire. L'alimentation de cet aquifère se fait principalement par les massifs de Djebel Bou Arif, les Monts de Batna, et par les précipitations sur l'impluvium de la plaine en période d'averse.

L'étude piézométrique de la nappe superficielle montre que l'écoulement est orienté en général vers la vallée de Fesdis, ainsi l'alimentation se fait à partir des massifs qui bordent la plaine où les axes d'écoulement y prennent naissance et se dirigent vers la dépression.

Le gradient hydraulique est pratiquement fort au piémont des massifs, il décroît en se dirigeant vers le centre de la plaine.

La superposition des cartes isopièzes de janvier 2007(période de plus hautes eaux) et septembre 2007(période d'étiage), nous a permis de dire que la partie sud de la plaine d'El Madher est caractérisé par une **fluctuation piézométrique inverse** où le niveau piézométrique de la nappe augmente au période sèche et diminue en période humide. En ce qui concerne le reste da la nappe, la fluctuation piézométrique est normale par comparaison aux périodes de recharge et d'étiage.

L'étude des caractéristiques hydrodynamiques a permis de déterminer les paramètres et ces variations dans la nappe. La nappe superficielle est caractérisé par une transmissivité moyenne de 6.10^{-3} m²/s , et une perméabilité de 2.8 10^{-4} m/s avec un coefficient d'emmagasinement moyen de l'ordre de 0,2.

La fluctuation piézométrique inverse dans la zone de Fesdis ne semble pas avoir explication du point de vue structural ou hydroclimatique, recharge artificielle ... etc

Ce phénomène est lié probablement a la nature de sous sol, et à son comportement différent lors de périodes sèches et humides, c'est ce que nous essayerons de clarifier dans les prochains chapitres.

D'après l'étude de Mr Menani(1991) : « Au sud de la localité de Gseya, et alors qu'aucun indice géologique apparent ou géophysique ne le prévoyait, la piézométrie enregistrée en mai 1990, après l'épisode pluvieux, montre une fluctuation totalement inverse a celle enregistrée dans le reste de la nappe), c'est-a-dire que les niveaux continuaient à baisser, alors qu'ailleurs s'enregistrait un rehaussement très net. Cependant, aucune hypothèse vraisemblable (défaut d'infiltration, variations latérales de facies et donc de perméabilités, temps de transferts différents, accidents tectoniques drainants ! etc...), qui n'a d'ailleurs pu être confortée par des observations de terrain, ne nous est apparue satisfaisante.

Le comportement hydrodynamique de cette zone, pour laquelle différents profils ont été établi), reste inexpliqué ».

L'étude climatologique montre que la zone d'étude est caractérisée par un climat semi aride, dans tous les points du bassin sans exception avec un hiver froid et pluvieux (période humide) et un été chaud et sec (période d'étiage),

La zone singuliere de Fesdis est une zone agricole où la quantité d'eau prélevée en période de sécheresse pour l'irrigation est plus importante dans les mois de sécheresse que durant les mois d'hiver et de précipitations. (Le déficit agricole pour satisfaire les besoins en eau d'irrigation des cultures est de 548 mm à partir du mois du Mai jusqu'au mois d'Octobre).

Au cours de la campagne piézométrique de septembre « basses eaux » on a remarqué des fissures centimétriques et parfoie décimétriques qui apparaissaient en surface de la zone particulière (voir photo n°3, 4,5et6). Ce sont des fents de retrait de la matrice argileuse, le retrait-gonflement de ces argiles peut agir sur l'écoulement au sien de la nappe dans ce secteur.

Pour cette approche nous avons établi une étude géotechnique de la zone concernée par le comportement piézométrique « anormal » dont il s'agira d'identifier au laboratoire les propriétés physiques du sol.



Photo $n^{\circ}3$: fentes de retrait, Fesdis (sept 2007)



Photo n°4 : fentes de retrait, Fesdis (sept 2007)



Photo $n^{\circ}5$: fentes de retrait, Fesdis (sept 2007)



Photo $n^{\circ}6$: fentes de retrait, Fesdis (sept 2007)

CHAPITRE -VI-

Cadre géotechnique

- 1- Introduction :
- 2- Les phases de reconnaissance
- 3- Travaux réalises

I- IDENTIFICATION DES SOLS GONFLANTS

1 Nature et structure des sols fins

- 1.1 Minéraux argileux
- 1.2 Structure moléculaire des argiles
- 1.3 Texture microscopique des particules d'argile
- 1.4 Conditions de formation des sols argileux
- 2 -Mécanismes de gonflement des sols argileux
- 2.1 Gonflement interfoliaire et gonflement interparticulaire
- 3- Mécanisme de gonflement
 - 3.1 Gonflement au sens physico-chimique
 - 3.2 Gonflement au sens mécanique
 - 3.3 Relations entre la texture du matériau et le gonflement

II- ESSAIS DE LABORATOIRE

- 1_Essais physiques
- 2- Analyse granulo-sédimentométrique
- 3- Les limites d'Atterberg
- 4_ Analyse chimique et minéralogique
- 5_Essais mécaniques
 - 5.1 Essai de cisaillement
 - 5.2 Essai de compressibil1te a l'oedometre
 - 5.3 Essai de gonflement a l'oedometre (gonflement libre)

III-CARACTERISATION EN LABORATOIRE DU PHENOMENE

DE GONFLEMENT

- 1_Définition des paramètres de gonflement
- 2_ Méthodes directe de mesure des paramètres de gonflement
 - 2.1_Methode Du Volume Constant
 - 2.2_Methode Du Pré-gonflement
 - 2.3_ Méthode Des Différentes Pressions (MYSLIVEC 1969)
- 3_ Méthodes indirectes de caractérisation 3.1 Par la mesure des limites d'Atterberg

IV-TRANSPORT DE L'EAU EN SOLS FISSURÉS :(à travers les fontes de retrait)

1 - CONCEPTS DE BASE

- 1.1- Porosité.
- 1.2- Pores.
- 1.3- Types et dimensions des pores.
- 1.4- Macropores.
- 1.5- Fentes de retrait.
- 1.6 Les caractéristiques de rétrécissement A -Méthodes de mesure
 - B -Mécanismes en cause
- 2 TRANSPORT DE L'EAU EN SOLS FISSURÉS
- A- Infiltration de l'eau dans les sols fissurés
- B- Digitation (Fingering Flow)

V- CONCLUSION

1-Introduction:

L'objectif de l'étude géotechnique est l'étude des propriétés, physiques, mécaniques et hydrauliques des sols et de leurs influences sur l'écoulement souterrain et la fluctuation de la nappe de la zone de Fesdis.

Les études précédentes (géologique et hydrogéologique) indiquent que les sols de la région d'étude peuvent être gonflants, car le couple climat semi-aride et les sols fins (marnes, argiles) est en géotechnique pratiquement le synonyme de phénomène Retraitgonflement.

2-Les phases de reconnaissance : les études progressent par étapes allant du général au particulier.

Trois stades principaux peuvent être suivis :

-l'étude préliminaire : A ce stade, aucun moyen mis en ouvre, et 1'on s'efforce d'utiliser les documents essentiels pour connaître le site.

Les études géologiques sont à ce stade très importantes, il s'agit d'abord de consulter les documents existants (cartes géologiques, photos aériennes, publications scientifiques...etc), puis de procéder à une visite de site.

-L'avant projet sommaire (APS) : 1'essentiel des travaux de reconnaissance géologique géotechnique sont fait à ce stade tel que la réalisation des essais in situ, les essais de laboratoire, hydrogéologie, ...etc.

-L'avant projet détaillé (APD): A ce stade doit être produit, un schéma du problème, Quelques reconnaissances complémentaires sur certains points détaillés sont souvent nécessaires pour compléter 1'étude du phénomène de la fluctuation piézométrique inverse.



- Campagne de reconnaissance -

3- Travaux réalisés :

L'étude en cours vise à déterminer les propriétés physiques et mécaniques du sol de la zone de Fesdis.

✓ prélèvement des échantillons remaniés : Dans cette investigation au site d'étude, quatre échantillons ont été prélevées, les profondeurs variant de 40 cm à 3 m (rive de oued El Madher). (voir localisation des échantillons, Fig 2-1)

✓ Description Lithologique du site : Les formations mises en évidence sont :

-terre de recouvrement (alluvions actuelles, galets et des glacis polygéniques).

-argiles verdâtres à plaquettes gypseuses. Échantillon n°1,2et 3.

- marne argileuse.(Échantillon n°4).

Les échantillons préleves généralement sont des argiles gonflantes, dont nous devons identifier le type d'argile et connaitre les mécanismes qui gouvernent ce gonflement (minéralogie, structure...etc).

II-IDENTIFICATION DES SOLS GONFLANTS

1 Nature et structure des sols fins :

Le phénomène de gonflement est rencontré essentiellement dans les sols fins, notamment les sols argileux ou marno-argileux qui réagissent avec l'eau. Ce phénomène prend naissance à l'échelle microscopique à l'intérieur même de la structure du sol et entraîne le développement de déformations et de pressions à l'échelle macroscopique.

1.1 Minéraux argileux

Les minéraux argileux sont des substances cristallines qui tirent essentiellement leur origine de la désagrégation physique et mécanique, puis de l'altération chimique de certains minéraux composant la roche. Une particule d'argile est formée d'un empilement de feuillets élémentaires constitués par l'association de deux unités structurales de base : le tétraèdre de silice et l'octaèdre d'alumine et éventuellement de magnésium.

1.1.1 Le tétraèdre de silice (SiO4)

Dans l'élément tétraédrique, l'ion central est la silice (S^{4+}) qui est entouré par 4 ions d'oxygène (O^{-2}) (figure 6.1) « Mekki.L 2004 ». Les tétraèdres sont liés ensemble par leurs bases en partageant un ion d'oxygène entre deux tétraèdres pour former une couche tétraédrique. On remarque la présence d'un « trou » en forme d'hexagone au centre des feuilles.La formule générale de cet ensemble est n [(Si_2O_5)⁻²].

1.1.2 L'octaèdre d'alumine Al2 (OH) 6 et éventuellement de magnésium Mg3(OH)6

Dans l'élément octaédrique, l'ion central est soit un ion d'aluminium (Al+3), soit un ion de magnésium (Mg+2). Ces derniers sont entourés par six ions d'hydroxyde (OH-) (figure 6.2) « Mekki.L 2004 ». Les unités octaédriques sont liées ensemble de telle sorte que chaque groupement fonctionnel (OH⁻) est partagé entre 3 unités octaédriques. La formule générale de ce groupement est n $[AL_2(OH)_6]$ ou n $[Mg_3 (OH)_6]$.



Figure 6.1 : a) Tétraèdre de silice (d'après Grim., 1959) ; b) vue isométrique d'un feuillet de silice en tétraèdre (d'après Grim., 1959) ; c) schéma du feuillet de silice (d'après Lambe., 1953) ;

d) vue en plan du feuillet de silice (d'après Warshaw et Roy., 1961) (cité par Holtz et al., 1991) in

MEKKI.L(2004).



Figure 6-2 : a) Octaèdre d'aluminium (ou de magnésium) (d'après Grim., 1959) ; b) vue isométrique d'un feuillet en octaèdre (d'après Grim., 1959) ; c) schéma du feuillet en octaèdre d'aluminium (ou de magnésium) (d'après Lambe., 1953) ; d) vue en plan du feuillet en octaèdre (d'après Warshaw et Roy., 1961) (cité par Holtz et al., 1991)in MEKKI.L(2004).

1.2 Structure moléculaire des argiles

La combinaison périodique des éléments ou feuillets tétraédriques et octaédriques conduit à la formation d'une unité structurale (ou couche), suivant deux cas possibles : soit à une unité structurale 1 :1, soit à une unité structurale 2 : 1. L'unité structurale 1 : 1 (ou T-O) est en fait le résultat de la liaison d'un élément tétraédrique et d'un élément octaédrique, dont l'épaisseur est de l'ordre de 7,2 A°. De la même manière, l'unité structurale 2 : 1 (ou T-O-T) n'est autre que le résultat de la liaison d'un élément octaédrique inséré entre deux éléments tétraédriques, dont l'épaisseur est estimée à 9,6 A° environ.

Les liens de covalence et les liaisons ioniques assurent les liaisons rigides du feuillet élémentaire. Des liaisons moins fortes, mais essentielles, assurent l'assemblage des feuillets élémentaires pour former les particules d'argile. Les forces de liaison entre feuillets sont principalement :

• les forces d'attraction moléculaire de Van Der Waals qui sont des liaisons faibles ;

• les liaisons hydrogènes qui se forment avec des atomes fortement électronégatifs, comme par exemple l'oxygène dans le cas des argiles ;

• les substitutions isomorphes constituées dans le remplacement de certains cations constitutifs du réseau cristallin par d'autres de moindre valence, ce qui crée des déficits de charge qui affaiblissent les forces ioniques de liaison entre les feuillets (remplacement d'un ion (Si4+) par un ion (Al3+) dans la couche tétraédrique de silice, d'un ion (Al3+) par un ion (Mg2+) dans la couche octaédrique d'aluminium, etc.). Les particules acquièrent ainsi une charge négative et peuvent absorber de façon réversible des cations et des dipôles d'eau pour atteindre l'électroneutralité. La capacité d'échange ionique (C.E.C) permet de mesurer la charge positive nécessaire pour arriver à l'électroneutralité (milliéquivalents /100 g d'argile sèche).

Les trois types des argiles qui sont les plus couramment rencontrés sont la kaolinite, l'illite et la montmorillonite. On en distingue aussi le chlorite et les interstatifiés. Le chlorite présente des propriétés proches de celles des argiles, mais leur structure est plus complexe (AZZOUZ F.Z. 2006).

1.2.1 La kaolinite n [(Si₂O₅) Al₂(OH)₄]

Elle est constituée d'une succession de couches alternées de silice (tétraèdre) et d'alumine (octaèdre) (figure 6.3), dont la liaison se fait par substitution de certain OH⁻ par des oxygènes O²⁻⁻. Les liaisons entre feuillets de kaolinite sur l'effet composé de liaisons hydrogène et de forces de Van der Waals qui confèrent à l'ensemble **une structure stable qui n'est pas affectée par la présence d'eau**. La particule kaolinite comporte 100 à 150 feuillets qui lui donnent une épaisseur de 0,1 mm et une largeur de 1 mm ; l'épaisseur d'un feuillet est d'environ 7.2 A°. Sa surface spécifique totale de l'ordre de 10 à 20 m²/g.



Figure 6.3 Schéma de la particule de kaolinite.

1.2.2 *L'illite* n [(Si_{4-n} Al_nO₁₀) Al₂ K_n (OH)₄]

Le feuillet élémentaire est composé d'une couche d'alumine entre deux couches de silice (figure 6.4). Dans les couches de silice, un ion Si⁴⁺ sur quatre est remplacé par un ion Al³⁺. Le déficit de charge qui en résulte est compensé par les ions K⁺ qui assurent des liaisons assez fortes entre les feuillets. On peut aussi rencontrer dans le feuillet de silice certaines substitutions isomorphes partielles de Al³⁺ par Mg²⁺ et F²⁺ ainsi que de silicium par l'aluminium. Les particules d'illite sont plates de forme moins régulière que celle des particules de kaolinite. Elles ont diamètre moyen variant entre 0,1 µm et 3 µm et une épaisseur de l'ordre de 0,01µm à 0,3 µm. L'illite à une surface spécifique totale de l'ordre de 65 à 100 m²/g.



Figure 6.4 Schéma de la particule d'illite.

1.2.3 La montmorillonite n [(Si₄O₁₀) (Al_{5/3} Mg_{1/3})Na_{1/3}(OH)₂]

La montmorillonite, appelée aussi smectite, est un minéral argileux de type 2 : 1 dont le feuillet élémentaire est composé d'une couche d'alumine comprise entre deux couches de silice. Une substitution partielle de l'aluminium Al par le magnésium Mg est fréquente. À l'instar de la kaolinite, les couches peuvent se prolonger indéfiniment dans les deux autres directions. Les forces de Van der Waals, dues principalement au moment électrique qui règne entre les feuillets et qui soudent les sommets de feuillets de silice, sont faibles par rapport aux autres forces de liaison. Cela se traduit par une déficience en charge négative nette dans les feuillets en octaèdre. Pour cette raison les ions échangeables peuvent pénétrer dans la structure et séparer les couches. **La montmorillonite est donc caractérisée par une structure instable qui est affectée par la présence d'eau**. Les plaquettes de montmorillonite ont une forme quelconque est de taille très petite, un diamètre moyen entre 0,1 µm et 1 µm et une épaisseur moyenne entre 0,001 µm et 0,01 µm. La montmorillonite possède une surface spécifique totale entre 700 et 840 m²/g et un espace inter-feuillets de 9,6 Å.



Figure 6.5 Schéma de la particule de montmorillonite.

Les caractéristiques de ces argiles sont résumées dans le tableau 6.7.

Argile	Туре	Nombre	Diamètre	Épaisseur	Surfacespé	C.E.C.
		de	d'une	d'une	cifique	(meq/100g)
		feuillets	particule	particule	(m2/g)	
		par	(µm)	(µm)		
		particule				
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	2:1	1	0,1	0,001	700 - 840	80 - 150

Tableau 6-1 : Caractéristiques des argiles (Bultel, 2001) in (AZZOUZ F.Z. 2006) :

C.E.C. : capacité d'échange cationique.

La figure 6.6 présente leurs photographies prises au microscope électronique à balayage (M.E.B).



Kaolinite

Illite

Montmorillonite

Figure 6.6: Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles (Mitchell, 1976) in MEKKI.L (2004)

1.3 Texture microscopique des particules d'argile

En géologie, la texture désigne la forme, la dimension et la disposition d'un certain nombre de minéraux naturellement groupés en une population au sein du matériau (Le Roux, 1976). L'étude systématique de matériaux argileux au M.E.B a permis de cerner l'organisation des particules d'argile qui sont plus ou moins dispersées et orientées de façon privilégiée dans une direction. Van Olphen (1963), cité par Bultel (2001) in RIHANI.Aet BOULEHBAL.S(2005), a proposé une classification basée sur l'association des particules argileuses entre elles à partir des critères : dispersé, agrégé (face contre, face en agrégats), floculé (association d'agrégats ou de particules bord-bord ou bord-face), défloculé (aucune association entre les particules ou entre les agrégats). Cette classification ne repose pas sur une observation directe, mais sur les possibilités d'assemblage géométrique. La figure 6.7 présente les différents modes d'arrangement des particules d'argile.



Figure 6.7 Arrangement des particules d'argile (Van Olphen, 1963).

Collins et Mc Gown (1974) in RIHANI.A et BOULEHBAL.S(2005) ont tenté de préciser cette définition dans le cas des terrains contenant une proportion non négligeable de grains non argileux, en introduisant une classification des relations existant entre particules argileuses et grains sableux ou silteux (figure 6.8). On en distingue : connexions argileuses entre grains silteux (a, b, c), agrégats irréguliers en nid d'abeille (d, e), agrégats réguliers (f, g), particules argileuses entrelacées avec ou sans inclusions silteuses (h, j) et matrice argileuse (k) ou matrice granulaire (l).



Figure 6.8 Schéma d'assemblages de particules (Collins et McGown, 1974).

Le Roux (1972) distingue, à partir d'observations sur les marnes, trois classes principales de textures :

• la texture homogène où tous les minéraux sont intiment mélangés et où aucune direction n'est privilégiée ;

• la texture orientée où une direction privilégiée apparaît dans l'arrangement des grains ;

• la texture floconneuse où la phase argileuse se présente sous forme grossièrement sphérique soit seule, soit associée aux carbonates.

1.4 Conditions de formation des sols argileux

Les argiles proviennent de la transformation de minéraux par la sédimentation, l'altération, la diagenèse et le métamorphisme. Elles sont également formées par un processus d'altération des roches sédimentaires. Les principaux facteurs étant la nature de la roche mère, le climat, la topographie, les micro-organismes et le temps. L'altération apparaît à toutes les teneurs en eau et l'eau, qui agit comme le solvant universel et moyen de transport, doit être présente pour démarrer le processus.

1.4.1 L'altération chimique

L'altération et le lessivage d'espèces minérales, telle que le feldspath, par les eaux superficielles faiblement acides avec un bon drainage lors de la formation d'un sol, aboutit à une présence dominante de feuillets d'argiles non gonflantes de type 1 : 1. Mais, lorsque le drainage au sein du massif est gêné, créant des stagnations auxquelles s'ajoute un environnement alcalin et réducteur, les sols gonflants où la montmorillonite domine, se développent. Ainsi, la décomposition des plagioclases feldspathiques provenant des micaschistes donnera naissance à des argiles litées gonflantes de type 2 : 1. Dans les zones supérieures plus lessivées, ces argiles seront transformées en argiles litées 1 : 1 non-gonflantes du groupe des kaolinites. Un pH élevé et une présence abondante de calcium et de magnésium favorisent la formation de montmorillonite. Elles se rencontrent souvent comme produit d'altération des roches éruptives acides (rhyolites, pegmatites, diorites, granulites) et également dans l'altération de certaines cendres volcaniques (Righi et al., 1999)in MEKKI L(2004).

Les argiles gonflantes se développent aussi à partir des minéraux de teinte verte: amphibole, serpentines (pyroxène altérés) et les minéraux phylliteux. De plus, le lessivage par une eau acide de sédiments qui contiennent de l'illite, chlorite et calcite peut enlever la couche intermédiaire K de l'illite formant ainsi une argile interstratifiée potentiellement gonflante. Il en résulte des associations plus ou moins caractéristiques. Ces altérations peuvent conduire à des sols (dépôts détritiques continentaux), caractérisés par un type d'argile: arènes à illites, latérites à kaolin, etc. Le tableau 6.2 présente les différentes combinaisons possibles pour des argiles formées par altération des roches sous climat tempéré.

		, ,		
	Illite	Kaolinite	Montmorillonite	Chlorite
Gneiss, Granite				
Diorites,				
Gabbros				
Basaltes				
Schistes				

Tableau 6.2Argiles formées par altération des roches sous climat tempéré (Tourenq et al.,1989).

1.4.2 L'altération biologique

Même si le rôle des bactéries et des micro-organismes dans les sols et les roches n'est pas toujours clairement défini, il est probable, étant donné leur tendance à acidifier le sol par leurs sécrétions et leur décomposition et leur abondance, qu'elle est non négligeable. Des études en laboratoire menées sur l'action des solutions organiques produites par certaines essences d'arbres sur l'altération des roches, ont mis en évidence une grande corrélation entre la présence de ces solutions organiques à pH élevé et une dissolution des minéraux riches en Ca, Fe et Mg. Il semble que la concentration de ces solutions organiques est plus importante que leur composition (Raulund-Rasmussen et al., 1998) in M, MEKKI .L(2004).

1.4.3 Influence de la topographie

Du fait que la topographie influence le drainage et les microclimats, elle agit sur les propriétés du sol au travers de son altération. En général, les sols de couleur sombre, peu drainés apparaissent dans les plaines et les faibles pentes et tendent à avoir une plus grande concentration de minéraux argileux du type 2 : 1.

1.4.4 Influence du climat

Généralement, on constate une correspondance entre le climat semi-aride de type steppe et le climat méditerranéen avec la distribution des sols gonflants. En dehors d'exceptions mineures, les minéraux de la famille des micas et les smectites sont localisés dans ces zones climatiques. Les sols contenant de la kaolinite et ceux contenant de la montmorillonite peuvent se développer à partir de la même roche mère selon l'environnement. La kaolinite se développe dans un climat où la pluviométrie excède l'évaporation et le pH est bas, en particulier quand le massif rocheux est très perméable. La montmorillonite se développe sous un climat plus aride où la circulation d'eau est plus faible et le pH plus haut. Ce qui explique l'abondance d'argiles gonflantes en zone méditerranéenne ou tropicale. La formation d'illite nécessite des conditions légèrement alcalines.

2 -Mécanismes de gonflement des sols argileux

Le processus de gonflement des sols argileux au contact de l'eau et des sels dissous met en jeu séparément ou de façon combinée des phénomènes physico-chimiques et mécaniques variés. Ces phénomènes sont décrits ci-après.

2.1 Gonflement interfoliaire et gonflement interparticulaire

L'analyse minéralogique montre que certaines argiles, pour les quelles les liaisons interfeuillets sont très faible, ont la propriété de fixe les molécules d'eau entre deux feuillet voisins (c'est le cas de smectites tell que la montmorillonite, et de certain chlorites.

Cette quantité d'eau fixée peut être très importante, donc une augmentation de la distance interfoliare, gonflement de l'ensemble des deux feuillets.

Selon VAYSSAD(1978), MOUROUXet AL(1988) in RIHANI.A, BOULEHBEL.S (2004) ont distingue deux types de gonflements :

- gonflement inter foliaire : résulte de la cassure des faibles liaisons entre les feuilles de particules d'argiles .ainsi, les molécules d'eau peuvent pénétrer entre les feuillets (au sein de la structure) et provoque un gonflement très notable.

- *gonflement interparticulaire* : résulte d'un apport d'eau supplémentaire en écartant les plaquettes, les unes des autres, à une ampleur assez limitée par apport a un gonflement interfoliaire, il affecte toutes les argiles.

3- Mécanisme de gonflement :

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. Le processus de gonflement interparticulaire met en jeu séparément ou de façon combinée des phénomènes physico-chimiques et mécaniques varies. Il dépend aussi de la texture du matériau.

3.1 Gonflement au sens physico-chimique :

Les effets physico-chimiques sont fonction d'hydratation des particules et de l'absorption des cations et à l'interaction des forces d'attraction et de répulsion interparticules dus au phénomène d'osmose. Cette approche physico-chimique est basée sur la théorie de double couches de GOUY et CHAPMAN 1910 in MEKKI.L (2004).

3.1.1_ Modèle de la double couche :

La particule d'argile présente généralement une charge nette négative due a des substitutions isomorphes au niveau des feuillets. Ce déficit de charges se traduit par la fixation des cations et par l'orientation des molécules polaires (d'eau par exemple) dans 1 'espace périphérique de la particule appelé double couche électrique diffuse (figure 6-9) On a ainsi, autour de chaque particule, la formation d'une double couche d'origine électrique, dite "couche de Gouy-Chapman", composée ;

- d'une couche fixe liée au solide,
- D'une couche diffuse en affinité avec cette particule.





La théorie de Gouy-Chapman présentait l'inconvénient de prédire des concentrations d'ions extrêmement élevées à proximité de la surface. Elle a été modifiée par Stem (1924) pour prendre en compte une quantité finie d'ions aux abords de la particule argileuse. La couche de Stern consiste en une quantité d'ions finie à coté de la surface, elle est fixe tandis que la couche de Gouy est mobile. Cette dernière fait la transition entre la solution perturbée par la particule et la zone plus éloignée, non perturbée.

3.2 Gonflement au sens mécanique :

Le phénomène de gonflement, provient d'une modification de l'état de contraintes dans le sol en présence d'eau. Dans cette approche 1'imbibition par 1'eau est attribuée a un gradient hydraulique introduisant un écoulement à travers 1'échantillon.

En 1941, TERZAGUI a relié cette approche à l'énergie emmagasinée dans la structure solide qui résulte de l'augmentation des espacements entre particules, suite au changement de volume du à) la courbure des particules.

3.3 Relations entre la texture du matériau et le gonflement :

Pour analyser le développement microscopique du gonflement, on s'est attaché à définir la notion de texture d'un terrain et a décrire 1'évolution de sa texture au cours du gonflement.

3.3.1_Definition de la texture d'un terrain :

En géologie, la texture désigne la forme, la dimension et la disposition d'un certain nombre de minéraux naturellement groupés en une population au sein du matériau. L'étude systématique de matériaux argileux au M.E.B(microscope électrique a balayage) a permis de cerner 1'organisation des particules d'argile et de dégager certaines textures.

Le Roux (1976) in MEKKI.L (2004) distingue trois classes principales de textures, à partir d'observations sur les marnes;

la texture homogène où tous les minéraux sont intimement mélangés et où aucune direction n'est privilégiée,

➤ la texture orientée où une direction privilégiée apparait dans l'arrangement des grains,

La texture floconneuse ou en micro agrégats où la phase argileuse se présente sous forme grossièrement sphérique, soit seule, soit associée aux carbonates.

3.3.2 Evaluation de la texture au cours du gonflement :

La variation de la texture des sols, au cours du gonflement, peut être étudiée a l'aide de deux techniques complémentaires :

La microscopie électronique à balayage (M.E.B.): permet de visualiser la texture des sols, donc d'obtenir des informations générales (arrangement des particules, estimation des rayons de pores, de tailles des particules, détermination de certains minéraux)
 La porosimètrie 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.

Grace à ces deux techniques, Vayssade (1978) et Parcevaux (1980) in SALLES.F (2007) ont obtenu des résultats très significatifs sur plusieurs argiles composées essentiellement de kaolinite et, en moindre importance, d'un interstratifie illite-sméctite : Argile Verte de Villejuif, Argile Plastique de Provins et Fausses Glaises. Leurs observations au M.E.B. ont montré que les sols étudiés ont, à 1'état naturel, une texture assez compacte, constituée plus ou moins nettement d'agrégats argileux individualisés et tassés les uns contre les autres. Au gonflement, cette texture évolue en une configuration en agrégats séparés par des pores de géométrie plutôt bidimensionnelle. La taille des



agrégats diminue et l'épaisseur des pores augmente au cours du gonflement.

Figure 6.10 : Evolution de texture des sols au cours du gonflement (Bultel, 2001).

Par injection de mercure, deux classes de pores ont été mises en évidence pour l'essentiel des sols étudiés :

- une classe de pores intra-agrégats (rayon de pores inférieur à 0,05 mm),

- une classe de pores inter-agrégats (rayon de pores supérieur à 0,05 mm) II apparait que la classe de pores intra-agrégats ne varie pas au cours du gonflement. L'augmentation de la porosité est due uniquement à l'augmentation de la porosité inter-agrégats ; elle correspond à une croissance des rayons de pores au cours du gonflement. Cette étude montre que le gonflement des sols argileux saturés ne contenant pas de grande quantité de minéraux dits "gonflants" (smectites) est un phénomène qui se produit au niveau des zones de faible résistance, analogues à des fissures (pores bidimensionnels) individualisant un réseau tridimensionnel d'agrégats.

Cas de l'anhydrite :

Le gypse et l'anhydrite sont des roches sulfatées, formées par précipitation chimique. Le gypse CaSO₄, 2 H_2O) cristallise dans le système monoclinique ; Sa densité est de 2,32 et sa solubilité atteint de 2 g/1 a 20°C sous la pression atmosphérique.L'anhydrite (CaSO₄) admet plusieurs formes cristallines (rhomboédrique ou monoclinique) ; Sa densité est de 2,92 et sa solubilité atteint presque 3 g/1 (le gypse et 1'anhydrite sont les plus soluble dans la nature après 1'halite (NaCl)).La transformation chimique de 1'anhydrite en gypse se produit avec la variation de volume spécifique suivante :

	$CaSO_4 + 2 0 H_2$	 $(H_20, CaS0_4)$
Masse	136 g 36 g	172g
volume de solide	$46 \text{ cm}^3 36 \text{ cm}^3$	74 cm^3

Cette évolution se produit sous certaines conditions de pression, de température et de teneur en eau Ainsi, le sulfate de calcium sous sa forme anhydrite CaSO₄ est stable a des températures supérieures à 58°C et à une pression proche de 100 kPa. Au-dessous de 38°C, l'anhydrite peut être présente si I' eau nécessaire à sa transformation est insuffisante ; seul le gypse est stable. Entre 38°C et 58°C, les deux composés coexistent et présentent des évolutions différentes.

L'anhydrite est une roche légèrement évolutive et sa pression de gonflement n'atteint pas des valeurs de 70 MPa comme il a longtemps été suggéré. En fait la transformation anhydrite - gypse est lente, durable et favorise le colmatage, donc 1'arrêt des circulations d'eau en profondeur. Néanmoins, le gonflement de I' anhydrite est un phénomène à prendre très au sérieux, compte tenu des dommages déjà occasionnés et le phénomène est plus rapide que pour les sols argileux,

L'analyse microscopique du gonflement a permis de mettre en évidence plusieurs formes de gonflement. Tout d'abord, lorsque le matériau est sature, on se rend compte qu'il y a une interaction notable entre la particule argileuse, et les cations de l'eau interstitielle. Cette affinité induit un gonflement d'autant plus important que le terrain contient des particules fines comme les sméctites.

L'analyse minéralogique et chimique ne permettaient pas d'interpréter toutes les manifestations macroscopiques du gonflement car la disposition des différentes particules, c'est à-dire la texture, avait une influence importante sur la forme du gonflement. Compte tenu de 1'importance de ce phénomène, il est nécessaire de pouvoir quantifier ce gonflement, si possible à partir d'essais d'identification ou d'essais en laboratoire ou in situ.

III- ESSAIS DE LABORATOIRE :

Pour identifier le sol de notre terrain, plusieurs essais ont été effectués au niveau de laboratoire de (LNHC : Laboratoire National de L'Habitat et de la Construction) sauf l'analyse minéralogique (diffractométrie) réalisée au laboratoire de l'université de Annaba.

- ✓ Essais des Propriétés physiques,
- ✓ Analyse granulométrique et sédimentmétrique,
- ✓ Limite d'Atterberg,
- ✓ Essai de cisaillement,
- ✓ Essais Oedometriques (essai de compressibilité, essai de gonflement)
- ✓ Analyses chimiques.

Tous ces essais ont été effectués selon les normes et modes opératoires utilisés par LNHC (en particulier les normes AFNOR)

1_Essais physiques :

Ces essais consistent à déterminer les paramètres suivants :

Le poids volumique d'un sol : est le poids d'un volume unité de sol, on distingue :

- Le poids volumique humide (γ h): γ h = Pt / Vi

P_t: poids total Vi: volume total

- Le poids volumique sec (γd) : $\gamma d = Ps / Vt = \gamma h / 1 + Wn$ Ps: Poids sec Vi: volume total γ h: Densité humide Wn: teneur en eau naturel

La teneur en eau (w) : exprime, pour un volume de sol donné, le rapport du poids d'eau au poids de la matière sèche.

- La teneur en eau moyenne (w) : w = (P_{eau} / Ps).100

P _{eau}: poids de Peau Ps: poids sec

- La teneur en eau de saturation (W_{sat}) : W_{sat} = γ_w (I/ γ_d -1/ γ_s)

 $\mathbf{\gamma}_{w}$: Poids volumique de l'eau $\mathbf{\gamma}_{d}$: densité sèche

 $\boldsymbol{\gamma}_{s}$: densité des grains solides

Degré de saturation (Sr) : indique dans qu'elle proportion une phase liquide se substitue à l'air dans les interstices intergranulaires. II s'exprimera comme le rapport du volume
occupe par de l'eau (Ve) au volume des vides(Vv).

$$Sr = V_e / V_v$$

Résultats :

Tableau n°6-3 : les paramètres physiques des sols

Échantillon	Profondeur(m)	$\boldsymbol{\gamma}$ h (t/m ³⁾	$\gamma d (t/m^3)$	Wn %	Ws %	Sr %
Ech :1	0.4	2.11	1.88	16.36	17.8	91.40
Ech :2	3	2.14	1.89	23.9	25.5	93.88
Ech :3	0.5	2.11	1.83	20.51	21.82	93.85
Ech :4	0.5	2.10	1.81	19.06	22.52	85.02

yh : densité humide yd : densité sèche Sr : degré de saturation Wn : teneur en eau naturel Ws : teneur en eau de saturation

* les résultats montrent que les sols testés sont denses et proches de la saturation avec des valeurs > 90% en majorité.

2- Analyse granulo-sédimentométrique:

- But de l'essai :

L'analyse granulo-sédimentométriques a pour but de déterminer les proportions de grains de différentes tailles dans le sol. Elle s'effectue:

- par tamisage, pour les grains de diamètre supérieur a 0.08mm.

- par sédimentométrie pour les grains les plus fins. (<0.08mm)., Elle permet de qualifier le sol par un nom plus précis (argile, sable, limon argileux,...). L'essai permet également de donner une idée sur la distribution des particules constituant la matrice du sol suivant leur diamètre

- Procédure de L'essai :

La granulométrie d'un sol est obtenue par tamisage sur une colonne de tamis, à taille de maille décroissante de haut en bas. Le tamisage s'effectue soit à sec soit sous l'eau. Les refus dans chaque tamis sont séchés le cas échéant, et pesés. Les pourcentages cumulés des refus sont calculés. Les résultats sont reportés sur un graphique faisant intervenir le diamètre des tamis. « Les fractions inférieures à 0,08 mm sont analysées par sédimentométrie qui, permet d'évaluer le diamètre de particules fines en utilisant leur vitesse de sédimentation dans l'eau »

- Les résultats de l'essai: Voir tableau n° (6-4)

		Re	efus en %	6		
numéro d'Echantillon	Argile (d<2µ)	Limon (0.2mm>d>2µ)	Sable fin (0.2mm>d>0.2mm)	Gros sable (2.00mm>d>0.2mm)	Graviers (20mm>d>2mm)	Nature de l'échantillon
1	54	30	14	02	/	argile
2	54	28	10	05	03	argile
3	49	25	22	04	/	argile
4	50	18	28	04	/	Marne argileuse

Tableau n°6-4 : Résultats des essais de l'analyse granulo-sédimentométrique

Les échantillons analysés contiennent plus de 80% d'élément dont le diamètre est inférieur à 0.08mm, ce qui les classe parmi les sols fins. Ce sont des argiles et des limons argileux d'après la classification triangulaire de CASAGRANDE. (Figure n°: 6-11).



FIG 6-11 : Classification des sols d'après CASAGRANDE

3- Les limites d'Atterberg :

La présence d'eau dans les pores d'un sol à grains fins peut en modifier le comportement de façon significative. Il est important non seulement de connaitre la quantité d'eau présente dans un dépôt naturel, mais aussi de situer cette teneur en eau sur une échelle. Les limites de consistance, ou limites d'Atterberg, permettent d'atteindre cet objectif et constituent un indice important en géotechnique.

Les limites d'Atterberg correspondent à des teneurs en eau pour lesquelles le comportement du sol est modifié. Lorsque la teneur en eau augmente, le sol passe graduellement d'un matériau fragile à un matériau plastique, puis à un matériau liquide visqueux.

Etat solide Etat plastique Etat liquide Wr wp wl

L'essai définit conventionnellement les limites entre ces états :

Wr : limite de retrait

Wp : limite de plasticité

W1 : limite de liquidité

-La limite de liquidité (WI) :correspond à la teneur en eau permettant un éloignement des particules suffisant pour annuler pratiquement les forces de liaison interarticulaires, ce qui leur permet un libre déplacement relatif.

L'échantillon de sol est mis en place dans la coupelle et on trace un sillon avec I' outil a rainure. Par convention, la limite de liquidité est la teneur en eau du matériau, qui correspond à une fermeture de 1 cm, des lèvres de la rainure après 25 chocs.

Wl= W $(N/25)^{121}$

Avec N: nombre de coups

- *La limite de plasticité* (Wp) : correspond à la teneur en eau suffisante pour permettre une certaine liberté de déplacement relatif des particules, mais trop faible pour les éloigner au point de réduire fortement les forces de liaisons entre elles.

A partir d'une boulette d'échantillon qu'on roule sur un marbre à la main ou avec une plaque, on forme un rouleau aminci progressivement jusqu'a 3mm de diamètre sur une longueur de 10 à 15 cm. Par convention, la limite de plasticité est atteinte lorsque le rouleau soulevé par le milieu de 1 à 2 cm se fissure.

- *La limite de retrait* (**Wr**) : correspond à la teneur en eau atteinte lors du séchage d'un échantillon quand I' épaisseur de la pellicule d'eau est telle que les grains solides et 1'eau

liée peuvent venir en contact, ce qui interdit toute contraction ultérieure.

Wr = (15 Wl)/(15+Ip)

✤ <u>L'indice de plasticité:</u>

L'indice de plasticité Ip est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité. Ip = Wl - Wp

L'indice de plasticité permet de définir le degré de plasticité d'un sol.

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

* <u>L'indice de consistance *Ic*:</u>

L'indice de consistance, ou teneur en eau relative aux limites de liquide et de plasticité.

$$Ic = (Wl - W) / Ip$$

✤ <u>L'indice de liquidité *Il*:</u>

Il = (W - Wp) / Ip

-Indice de retrait (Ir) : Ir = Wl - Wr

Tableau 6-5: résultats des limites d'Atterberg

Échantillon	Wl	Wp	Ip	Wr	Ir	Ic
1	68.3	32.9	35.3	20.35	47.95	1.36
2	73,6	30,4	43,0	19.02	54,63	1.15
3	72.3	32.3	39.9	19.72	52.59	1.24
4	72.3	31.2	41.1	19.33	52.97	1.21

En utilisant les résultats des limites d'Atterberg, pour la classification des sols fin dans un diagramme comportant la limite de liquidité Wl en abscisses et l'indice de plasticité Ip en ordonnés.

Les sols argileux sont approximativement séparés des limons par une droite (appelée ligne A) d'équation: Ip = 0.73 (Wl – 20).



FIG 6-12 : Abaque de CASAGRANDE

Les résultats des limites d'Atterberg caractérisent un sol très plastique, à consistance dure.

4_ Analyse chimique et minéralogique : (tableau n° 6-6)

4.1- Détermination du pourcentage de carbonate de calcium (CaCo₃) :

But de l'essai :

La détermination du pourcentage de carbonate de calcium $(CaCo_3)$ d'un sol est « un bon indice de sa résistance mécanique et de sa sensibilité à l'eau», le comportement du sol évalue suivant la valeur de cette teneur en $(CaCo_3)$.

Procédure de l'essai :

La méthode de détermination du pourcentage de carbonate de calcium (CaCo₃) contenu dans un échantillon de sol, consiste à provoquer sa réaction avec de l'acide chlorhydrique. En mesure le dégagement des gaz carboniques avec un appareil appelé calcimètre.

4.2- Détecteurs des sulfates (So4⁻) :

But de l'essai :

Le but de cet essai est la détermination du pourcentage des sulfates (So4⁻) contenu dans le sol.

Procédure de l'essai :

Pour la détermination des sulfates, il suffit de détecter qualitativement la présence de

ces sels. « On place l'échantillon dans une éprouvette contenant de l'eau distillée. On additionne à cette eau une solution de 20 % d'acide chlorhydrique et on porte le tout à ébullition. On filtre et on ajoute une solution de chlorure de baryum dosé 100 g/l »

Si l'échantillon contient des sulfates, il se forme un précipité blanc de sulfate baryum.

Teneur en	So4	CaCo ₃ %	Degré D'agressivité
échantillon			
1	1.06	30.0	modérée
2	0.66	26.0	modérée
3	0.78	42.0	modérée
4	0.85	43.0	modérée

Tableau n°6-6 : résultats d'essais chimiques

D'après les résultats de l'analyse chimique du sulfates représentés des le tableau cidessus on peut dire que le sol est modérément à fortement agressif

4-3. Analyses minéralogiques et chimiques (La diffractométrie de rayons X) :

La diffractométrie de rayons X (DRX, on utilise aussi souvent l'abréviation anglaise XRD pour X-ray diffraction) est une technique d'analyse fondée sur la diffraction des rayons X sur la matière. La diffraction n'ayant lieu que sur la matière cristalline, on parle aussi de radiocristallographie. Pour les matériaux non-cristallins, on parle de diffusion. L'appareil de mesure s'appelle un diffractomètre. Les données collectées forment le diagramme de diffraction ou diffractogramme ou spectre de rayons X.

La diffractométrie de rayons X est une méthode d'analyse physico-chimique. Elle ne fonctionne que sur la matière cristallisée (minéraux, métaux, céramiques, produits organiques cristallisés), mais pas sur la matière amorphe (liquides, polymères, verres) ; toutefois, la matière amorphe diffuse les rayons X, et elle peut être partiellement cristallisée, la technique peut donc se révéler utile dans ces cas-là. (Voir annexe, Méthode d'étude, Traitement des spectres et identifications des minéraux, Interprétation des spectres DRX ...)

Le spectre de diffraction au rayon x de l'échantillon, montre des pics de diffraction située entre $2\Theta = 5.64^\circ$ et $2\Theta = 79.89^\circ$.Ces pics correspondent selon la fiche ASTM aux plan des silicates d'alumines hydratés (argiles), Illites avec la présence du Quartz et de Calcite, le minéral argileux prédominant étant <u>l'illite</u>, Pour les analyses chimiques, les principaux constituants minéralogiques sont : la silice, l'alumine et les carbonates, les deux premiers éléments constituent la structure des argiles.

L'analyse minéralogique a été effectuée par diffraction à rayon X au niveau de laboratoire de l'université d'Annaba



Spectre DRX de l'échantillon prélevé

5_ Essais mécaniques:

5.1 Essai de cisaillement :

« L'essai de la boite de cisaillement est le plus ancien pratiqué en M.D.S., il reste encore très utilisé pour l'étude de la rupture » (courbe contrainte/déformation), et à partir de la courbe intrinsèque on détermine les caractéristiques de plasticité qui sont la cohésion (Cu), et l'angle de frottement interne (φ_{μ}).

- Procédure de l'essai :

L'échantillon est placé dans un cylindre constitué de deux demi-boites qui peuvent coulisser horizontalement, « il consiste à appliquer une contrainte normal à un échantillon de sol maintenu en conditions drainées, puis à la soumettre à un cisaillement horizontal jusqu'à la rupture »



Les résultats sont représentés dans le tableau (6-7) au dessous.

Tableau 6-7: résultats des essais de cisaillement

Échantillon	Cu (bars)	$arphi_u^\circ$
1	0.84	13.03
2	1.13	11.78
3	0.98	13.63
4	1.20	12.46

 φ_{u}° : angle de frottement interne. Cu : cohésion du sol (Bar)

*L'angle de frottement varie entre 11.78 a13.63°, et la cohésion varie entre 0.84-1.20 bars.

5.2 Essai de compressibilité a l'oedometre :

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

a)Description de l'appareillage: L'appareil comprend:

✤ Une cellule contenant l'échantillon.

Les organes essentiels de la cellule sont:

- un cylindre en métal contenant l'échantillon.
- Deux pierres poreuses assurant le drainage de deux faces de l'échantillon.
- Un piston coulissant dans le cylindre et venant charger l'échantillon.
- Des comparateurs mesurant les déplacements du piston au 1/100 mm, donc les variations d'épaisseur de l'échantillon.
 - Un bâti de chargement: qui permet d'appliquer sur le piston des charges verticales



b)Procédure d'essai:

Cet appareil permet d'établir deux types de courbes:

- les courbes de compressibilité qui indiquent le tassement total en fonction de la contrainte appliquée.
- Les courbes de consolidation qui donnent le tassement de ces courbes permettant la détermination expérimentale du coefficient *C v*.

***** <u>Courbe de compressibilité:</u>

L'établissement de la courbe de la compressibilité se fait de la façon suivante:

- des contraintes normales sont appliquées à l'échantillon par palier 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 4 heures.

Deux procédures différents de chargement sont utilisées selon le comportement du sol sous la première charge appliquée (charge faible ≤ 10 Kpa):

- sole non gonflants à la mise en eau.
- Sole gonflants à la mise en eau.
 - Si le sol est non gonflant, deux cycles de chargement/ déchargement sont réalisée.
 - 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.

Les résultats donnant les variations d'indice des vide (e) en fonction de $(\log \delta)$. En fait, celle-ci sont liées au tassement relatif par la relation suivante:

$$\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e}{1+e_0}$$

Où:

H₀: épaisseur initial de l'échantillon.

 e_0 : indice des vides initial correspondant à H_0 .



a- sol non gonflant



b- sol gonflant

FIG 6-13 : courbe de compressibilité

Caractéristique de la compressibilité:

Plusieurs caractéristiques du sol définies à partir des courbes de compressibilité: la contrainte effective de préconsolidation, l'indice de compression, l'indice de gonflement, et les modules oedometrique sécant.

• <u>contrainte effective de préconsolidation ($\hat{\sigma}_p$):</u>

C'est la contrainte effective maximale sous laquelle le sol s'est déjà consolide au cours de son histoire. Elle est déterminée graphiquement selon la méthode de casagrande.

• <u>l'indice de compression Cc:</u>

L'indice de compression qui par définition est la pente (au signe près de la tangente à la courbe vierge, permet de précise la sensibilité du sol au tassement le long de cette courbe.

On peut classer la compressibilité d'un sol, en fonction de Cc, comme suit:

 $Cc < 0,020 \longrightarrow \text{sol incompressible}$ $0,020 < Cc < 0,050 \longrightarrow \text{sol très peu compressible}$ $0,050 < Cc < 0,100 \longrightarrow \text{sol peu compressible}$ $0,100 < Cc < 0,200 \longrightarrow \text{sol moyennement compressible}$ $0,200 < Cc < 0,300 \longrightarrow \text{sol assez fortement compressible}$ $0,300 < Cc < 0,500 \longrightarrow \text{sol très compressible}$ $0,500 < Cc \longrightarrow \text{sol extrêmement compressible}$ $0,010 < Cc / (1+e_0) < 0,015 \longrightarrow \text{sol incompressible}$ $0,015 < Cc / (1+e_0) < 0,05 \longrightarrow \text{sol peu compressible}$ $0,05 < Cc / (1+e_0) < 0,20 \longrightarrow \text{sol moyennement compressible}$ $0,20 < Cc / (1+e_0) < 0,20 \longrightarrow \text{sol moyennement compressible}$

• L'indice de gonflement Cs:

Cet indice traduit la déformabilité d'un échantillon non gonflant en deçà de la contrainte de consolidation au quelle il a été soumis.

• <u>Le coefficient de gonflement Cg:</u>

C'est la pente de la courbe de déchargement (à ne pas confondre ce coefficient avec l'indice de gonflement (Cs).

On peut également classer le sol vis-à-vis du gonflement en fonction de (Cg) comme suit:

Coefficient de gonflement	Classification
Cg < 0,025	Faible gonflement
0,025 ≤ Cg < 0,035	Gonflement moyen
$0,035 \le Cg < 0,055$	Gonflement fort
Cg ≥ 0,055	Gonflement très fort

• Module oedometrique *Eo*:

On peut représente les résultats de l'essai de compressibilité a l'odomètre en exprimant directement le tassement relatif $\frac{\Delta H}{H_0}$ en fonction de la contrainte normal

appliqué σ .

Soit N et \dot{N} deux point(s quelconques de cette courbe le module oedometrique est:

$$E_0 = -\Delta\sigma / \frac{\Delta H}{H_0}$$

5.3 Essai de gonflement à l'oedomêtre (gonflement libre) :

Cet essai permet de déterminer la pression de gonflement d'un matériau ainsi que sa déformation lorsqu'il est soumis en présence d'eau. Des contraintes verticales inferieurs a celle de pression de gonflement (δg).

L'essai s'effectue sur plusieurs éprouvettes provenant d'un même échantillon et prélevées sensiblement au même niveau. Chaque éprouvette du sol est placée dans une enceinte cylindrique rigide (oedomêtre) et un dispositif applique sur cette éprouvette un effort axial vertical maintenu constant.

L'essai consiste à appliquer à chaque éprouvette une contrainte verticale différente et à mesurer sa variation de hauteur lorsqu'elle est mise en présence d'eau.

Tableau 6-8: résultats des essais de compressibilité et de gonflement libre

Échantillon	P_0 bars	Pc bars	Cc %	Cg %	Cs %	δg bars
01	0,5	1,91	10.22	4,66	0,49	0.86
02	0,450	1,43	11.93	4.33	0,82	0,90
03	0,450	1.09	21.01	4,33	0,41	1,04

P₀: La pression initialCc % : Indice de compressionCs % : Indice de recompression

Pc: pression de consolidation Cg % : Indice de gonflement δ g bars: pression de gonflement A partir du tableau on a :

 $1,8 < \sigma_c < 2,54$ bar \longrightarrow le sol est normalement à surconsolidé 0,100 < Cc < 0,200 \implies sol moyennement à assez fortement compressible $0,035 < Cg < 0,05 : \implies$ le sol est assez fortement gonflant.

- Les sols sont surconsolidé, moyennement à assez fortement compressible.
- Les essais de gonflement libre donnent une pression de gonflement qui varie entrer 0,86 à 1,04 bars, ce qui caractérise un sol est gonflant.

Caractéristiques	Ech n°1	Ech n°2	Ech n°3	Ech n°4
Profondeur [m]	0.4	3	0.5	0.5
Teneur en eau naturelle [%]	16.36	23.9	20.51	19.06
Densités Apparentes (humide) [g/cm3]	2.11	2.14	2.11	2.1
saturation [%]	91.40	93.88	93.85	85.02
Limite de liquidité [%]	68,30	73,65	72.31	72.3
Limite de plasticité [%]	32,97	30,48	32.32	31.2
Indice de plasticité [%]	35,33	43,08	39.99	41.1
Densité sèche maximum [g/cm3]	1.88	1.89	1.83	1.81
Sulfates So4 ⁻	1.06	0.66	0.78	0.85
Carbonates CaCO3	30.0	26.0	42.0	43.0
Diffractométrie	Illite			
Cohésion (Cu) bars	1.20	1.13	0.98	0.84
Angle de frottement φ_u°	13.03	11.78	13.63	12.46
coefficient de gonflement Cg (%)	4,66	4,33	4,33	
Pression de gonflement δg (bars)	0,86	0,90	1,04	

Selon les résultats obtenus à partir des différents essais de laboratoire, on constate que :

- Le sol se caractérise par une quantité d'éléments dont le diamètre inferieur à 0.02 mm est de 50 à54 %, dense (γh varie de 2,10-2,14 t/m3), le degré de saturation (Sr varie entre 88.64 %-91.40 %) et la teneur en eau naturelle (Wn = 16 a 23.9 %), ce qui signifie que nous somme en présence d'un sol fin, dense et proche de la saturation.
- ✓ Les échantillons analysés contiennent plus de 80% d'éléments dont le diamètre est inférieur à 0.08mm, ce qui les classe parmi les sols fins. Ce sont des argiles et des limons argileux d'après la classification triangulaire de CASAGRANDE.
- La limite de liquidité et l'indice de plasticité correspond sur le diagramme de Casagrande à un sol très plastique.
- ✓ Le sol a une cohésion comprise entre 0,84 1,2 bar, et un angle de frottement de 11à13°
- ✓ L'analyse de la courbe oedomêtrique nous donne des indications sur :

-Pression de pré consolidation Pc, c a d les états de contrainte qui a subi le sol au cours de son histoire (1,09<Pc<1,91 bars) par comparaison à la pression effective appliquée actuellement sur 1'échantillon, ceci nous indique que le sol est **sur consolidé.**

-L'indice de compression Cc varie entre 10 et 20% indique que le sol est moyennement à assez fortement compressible.

-Les pressions de gonflement varient entre 0,86 et 1,04 bars, le coefficient de gonflement varient entre 4,33 et 4,66% indiquent que le sol est assez fortement gonflant.

III-CARACTERISATION EN LABORATOIRE DU PHENOMENE DE GONFLEMENT

L'identification des sols gonflants est généralement abordée à partir des paramètres physico-chimiques facilement mesurables lors des essais préliminaires. Or, cette identification se trouve compliquée par l'existence de plusieurs approches qui ne se basent ni sur les mêmes paramètres ni sur le même nombre.

1- Définition des paramètres de gonflement :

Les paramètres mécaniques à déterminer pour caractériser les terrains gonflants ne sont pas les mêmes selon que l'objectif choisi est d'empêcher le gonflement ou de s'assurer qu'il se produira de façon progressive ou périodique, ou de construire l'ouvrage après achèvement du processus de gonflement.

On distingue trois notions: la pression de gonflement, le gonflement libre et l'indice de gonflement.

-La pression de gonflement 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. Cette définition de la pression de gonflement est la plus usitée mais elle n'est pas la seule.

Le gonflement libre d'un élément de sol ou de roche, dont 1'état physique initial est connu. Est la déformation maximale que provoque 1'imbibition de cet élément soumis a un état de contraintes nulles ou quasi-nulles.

-L'indice de gonflement traduit 1'importance de la déformation de gonflement induit par un déchargement ou 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.

2_ Méthodes directe de mesure des paramètres de gonflement :

Il existe un grand nombre de procédures d'essais de gonflement, elles tirent leur diversité de la complexité du phénomène analysé, des nombreuses variétés de matériaux gonflants et d'une longue pratique empirique.

Les procédures d'essais se distinguent principalement par les modalités d'application des charges sur l'éprouvette (charge de mise en imbibition, durée des paliers, taux de déchargement d'un palier à l'autre, etc.), par leurs méthodes de suivi en temps réel ou par leurs méthodes d'exploitation des résultats.

L'oedomêtre est le seul appareillage préconisé pour la réalisation des essais de

gonflement. Il existe cependant trois techniques principales pour mesurer le gonflement :

- 1. méthode du volume constant,
- 2. méthode du pré-gonflement,
- 3. méthode des différentes pressions

2.1_Methode Du Volume Constant:

La pression de gonflement est définie comme étant la pression nécessaire pour que ni gonflement, ni compression ne prennent place quand l'échantillon est saturé. D'après DEDIER et AL(1987) GHEN(1988) in AZZOUZ F.Z(2006), I' échantillon est chargé à une pression équivalente a la pression des terres, puis l'échantillon est saturé, de petits incréments sont par la suite appliques, jusqu'a manifestation de la pression de gonflement.

2.2_Methode Du Pré-gonflement:

Dans ce cas de figure, la pression de gonflement est définie comme la pression nécessaire pour ramener le sol à son volume initial, qu'il ait gonflé librement sous une faible pression (ou nulle), jusqu'à stabilisation, il permet de déterminer :

➢ Le taux de gonflement,

- ➢ La pression de gonflement,
- L'indice de gonflement.

La mesure de la pression de gonflement, est faite par incrément de la charge suivant une consolidation normale Jusqu'a ce qu'il retrouve son état initial.

2.3_ Méthode Des Différentes Pressions (MYSLIVEC 1969):

Dans cette méthode trois à cinq échantillons identiques sont taillés et placés dans des oedomêtre sous des pressions initiales différentes, ensuite 1'eau est introduite et des mesures sont prises jusqu'à stabilisation pour chacun. La courbe ($\Delta h/h_0 - \log(\sigma)$), est une droite et la pression de gonflement correspond à $\Delta h/h_0 = 0$

Les résultats de cette méthode (méthode directe) sont rapportés précédemment dans le tableau n°6-8

3_ 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 semblent être les facteurs influant sur le gonflement des argiles. Ainsi, après avoir déterminé les paramètres géotechniques d'un matériau, l'emploi de formules empiriques permet de connaitre rapidement le potentiel de gonflement du terrain, c'est-à-dire estimer si ce potentiel est faible, moyen ou élevé et donc si le phénomène est a prendre en compte ou non.

3.1 Par la mesure des limites d'Atterberg : (PIERRE. M, PATRICK. M, JEAN-CLAUDE .P)

II s'agit sans doute des mesures à la fois les plus simples, les plus fiables, et peut être les plus représentatives et les moins coûteuses. De très nombreux auteurs ont relié les limites d'Atterberg (W_1 , W_p , W_r) ou des grandeurs tirées de celles-ci comme l'indice de plasticité Ip (Ip = W_1 - W_p), indice de retrait I_{re} (I_{re} = W_1 - W_r), au gonflement sous différentes formes (taux, potentiel et pression de gonflement). On citera quelques résultats :(tableau 6-9,6-10,6-11)

Ip varie de : 5 à 20 pour les argiles constituées principalement de kaolinite

40 à 110 pour les argiles constituées principalement de **montmorillonite** Le taux de gonflement S est défini comme le pourcentage de gonflement d'échantillon compacté a 1'optimum Proctor et surcharge de 7kPa. La relation s'écrite : S =21,6 10⁻⁵ Ip^{2,44}.

Par ailleurs, les sols gonflants semblent tous appartenir au même secteur dans un diagramme Ip - w_1 (DIAGRAMME DE CASAGRANDE).



uuo >	. I otentiel de gomi	ement d'après la lor n'arrith n'e	t DI I
	Ire(%)	Potentiel de gonflement	
	0-20	faible	
	20-30	Moyen	
	30-60	Fort	
	>60	Très fort	

Tableau6-9 : Potentiel de gonflement d'après RAGANATHAN et SATYANA

Tableau 6-10 : Potentiel de gonflement d'âpres SEED , WOOD WARD et

Taux de gonflement	S (%)	Ip
Faible	0 - 1,5	0 - 10
Moyen	1,5 - 5	10 - 20
Elevé	5 - 25	20 - 35

LUNDGREN(1962)

|--|

%<74µ	\mathbf{W}_1	Pression de gonflement	Potentiel de gonflement	
>95	>60	1	Très élevé	
>60-95	40-60	0,25-0,50	Elevé	
30-60	30-40	0,15-0,25	Moyen	
<30	<30	<0,05	Faible	

4- Une application aux sols d'El Madher :

Les résultats de ces classifications sont résumés sur le tableau 6-12 :

Fableau	6-12:	Potentiel	de	gonflement	des	sols d	Έl	Madher	
1 ubicuu	012.	I otentier	ue	Somement	ues	5015 U	L /1	maunor	

classification	Potentiel de gonflement
Méthode directe /oedometre	modérément gonflent
RAGANATHAN et SATYANA	Fort
SEED, WOOD WARD et LUNDGREN(1962)	Elevé
GHEN	Elevé a trés elevé

L'examen du diagramme de CASAGRANDE et le tableau ci-dessus permettent de constater que nos sols sont classés parmi les sols gonflants. Le potentiel de gonflement est important.

Pour connaitre le comportement des ces argiles gonflantes sur l'écoulement souterrain (vers la nappe), on a effectue un recherche bibliographique pour comprendre le mécanisme des écoulements à travers les sols fissurés et la relation « eau-fente de retrait ».

IV-TRANSPORT DE L'EAU EN SOLS FISSURÉS :(à travers les fentes de retrait)

1 - CONCEPTS DE BASE

- **1.1-Porosité :** Pourcentage du volume de la masse totale du sol qui n'est pas occupé par des particules solides.
- 1.2-Pores : Espace, dans la masse du sol, qui n'est occupé par aucune matière minérale solide. (Cet espace peut être occupé par de l'air, de l'eau ou d'autres matières gazeuses ou liquides.)

1.3-Types et dimensions des pores :

Les ouvertures observées dans les sols peuvent être classées en fonction de leur dimension. Les micropores et les pores moyens ont généralement moins de 1 mm alors que les fentes de retrait (des macropores) qui peuvent être préoccupantes ont plusieurs millimètres et peuvent atteindre quelques centimètres. Elles sont souvent visibles à « l'œil nu » en surface du sol. Le tableau suivant (tableau 6-13) fait une revue des définitions des pores selon différents auteurs.

1.4-Macropores :

Bevan et Germann (1982) in TABOADA.M. A(2007) font une énumération des types de macropores présents dans les sols :

-Pores formés par la faune du sol,

-Pores formés par les racines des végétaux,

-Pores formés par les canaux naturels,

-Pores formés par les fissures (fentes de retrait).

Ces derniers sont formés par le rétrécissement résultant de la dessiccation de sols argileux et sont désignés, comme étant des fentes de retrait. Les cycles de gel et de dégel peuvent aussi produire des fissures. Les sols argileux sont sujets, en gonflement et en rétrécissement, aux variations saisonnières qui déterminent les changements de la teneur en eau du sol. Lorsqu'une fissure est formée, elle peut revenir au même endroit au cours de plusieurs cycles d'humidification/dessiccation. Aussi, dans les sols drainés à forte teneur en argile, les fissures entre les agrégats naturels structuraux pourraient ne pas se refermer, même après une humidification prolongée. Cependant, dans un article de Wells et al. (2003) in TABOADA.M. A(2007), portant sur l'infiltration et la géométrie de surface d'un sol gonflant par suite de multiples averses simulées, il est mentionné que les fentes de retrait ne réapparaissaient pas dans la même position d'une averse à l'autre.

Terminology	ECD	Reference
Micropore Mesopore Macropore	<30 μm 30 μm–100 μm >100 μm	Jongerius (1957)
Micropore Macropore	<30 μm >30 μm	Marshall (1959)
Micropore Very fine pore Fine pore Medium pore Coarse pore	<75 μm 75 μm–1000 μm 1000 μm–2000 μm 2000 μm–5000 μm >5000 μm	Johnson et al. (1960)
Cryptovoid Ultramicrovoid Microvoid Mesovoid Macrovoid	<0.1 μm <5 μm 5 μm–30 μm 30 μm–75 μm >75 μm	Brewer (1964)
Very fine pore Fine pore Medium pore Coarse pore	<2 μm 2 μm–20 μm 20 μm–200 μm >200 μm	Russell (1973)
Micropore Minipore Macropore Super pore	<0.3 μm 0.3 μm–30 μm 30 μm–300 μm >300 μm	McIntyre (1974)
Bonding pore Residual pore Storage pore Transmission pore Fissure	>0.005 μm <0.5 μm 0.5 μm–50 μm 50 μm–500 μm >500 μm	Greenland (1977)
Macropore	>1000 µ.m	Bouma et al. (1977)
Macropore	>60 µm	Bullock and Thomansson (1979)
Macrofissure Enlarged macrofissure	200 μm–2000 μm 2000 μm–10 000 μm	Reeves et al. (1980)
Macropore	>3000 µ.m	Beven (1981)
Micropore Mesopore Macropore	<10 μm 10 μm–1000 μm >1000 μm	Luxmoore (1981)
Macropore	>1000 p.m	Luxmoore et al. (1990)
Macropore Macropore Note : 1 µm = 0,	>1000 μm >1000 μm >1000 μm	Luxmoore et al. (1990)

Tableau n°6-13 : Noms des pores des sols selon leurs dimensions (Perret et al, 1999) :

1.5-Fentes de retrait :

Les sols argileux changent de consistance selon leur teneur en eau. Tout dépend de sa teneur en smectite, un sol argileux gonflera avec une teneur en eau élevée et se rétractera lors de son dessèchement. Sous nos climats, les sols argileux sont souvent près de leurs états de saturation, et leur potentiel de gonflement est alors limité. Cependant, lors de périodes de sécheresse prolongée, ces sols, ayant une teneur en eau plus faible, ont tendance à diminuer de volume et à créer des fentes de retrait.

Les dimensions de ces fentes diminuent une fois le sol réhumidifié. Les fentes ainsi créées forment des chemins favorisant l'écoulement préférentiel de l'eau au travers du sol. D'après Denis Baize et Bernard Jabiol (1995) in PIERRE .L.B, DENIS .N(2007), les fentes de retrait sont décrites comme étant des macro-fissures qui affectent plusieurs horizons. Ces macro-fissures s'observent généralement dans les vertisols (Argiles foncées riches en montmorillonite avec des caractéristiques d'expansion et de retrait. Ce groupe de sols a une haute teneur en argile (>30 % à au moins 50 cm de la surface) et, une fois sec, peut avoir des fentes de retrait qui ont au moins 1 cm de largeur et 50 cm ou plus de profondeur). Les macrofissures s'observent également dans les sols très argileux smectitiques. Les fissures, orientées verticalement, peuvent atteindre de 3 à 5 cm de largeur (fig 6-14) et un mètre de profondeur. Elles forment habituellement un réseau hexagonal de diamètre allant de 40 cm à un mètre.



Figure 6-14 : Fentes de retrait (plaine d'El Madher /sept 2007).

Selon la FAO (2002)in PIERRE .L.B, DENIS .N(2007), « une fente de retrait est une séparation entre polyèdres grossiers (apparition de plusieurs surfaces de forme polygonale à la surface du sol qui sont en fait des polyèdres en trois dimensions et cette forme doit être perçue macroscopiquement). Si la surface est fortement autofoisonnante (Qui augmente de volume), c'est-à-dire si elle est constituée d'une masse de granules (" grumique"), ou si le sol est cultivé lorsque ces fentes sont ouvertes, celles-ci peuvent se remplir, principalement de matériaux granulaires provenant de la surface ; cependant, elles restent ouvertes, c.-à-d. les polyèdres sont séparés. Une fente est considérée comme ouverte si elle permet l'infiltration et la percolation de l'eau dans un sol argileux sec (Soil Survey Staff, 1996). »

Un sol argileux qui a des propriétés d'expansion et de retrait formera lors de son assèchement des polyèdres de sol séparés entre eux par des fentes dites de retrait. Ces fentes peuvent laisser passer de l'eau et du matériel tant que le sol ne sera pas assez humide pour que l'argile se gonfle et les referment.

1.6-Les caractéristiques de rétrécissement :

Selon Taboada (Miguel Angel Taboada est ingénieur-agronome et professeur associé à la Faculté d'agronomie de l'Université de Buenos Aires en Argentine.) vulgarise les caractéristiques des sols gonflants. Les sols qui ont des propriétés gonflantes ont une masse volumique apparente qui change selon leur teneur en eau. Ils ont généralement une texture fine avec des argiles de type smectite. Ils développent des fentes de retrait lors de leur assèchement.

Taboada résume aussi les processus qui interviennent lors de l'assèchement et de l'humidification de ces sols. Les sols qui s'assèchent diminuent de volume, et des fentes de retrait apparaissent en raison du stress interne dans le sol qui a réduit de volume. Ces fentes apparaissent dans les plans préexistants de faiblesse à l'intérieur des agrégats du sol (Aux endroits où il y a naturellement moins de cohésion dans le sol).

Le sol se réduit donc aussi en hauteur. Lors de l'humidification, le sol augmente son volume en gonflant, les fentes de retrait se referment, et le niveau du sol remonte. Le gonflement est produit principalement par les molécules d'eau qui s'insèrent entre les plans de smectites.

La première phase de gonflement s'effectue en trois dimensions (figure 6-15a) et, ensuite, lorsque les fentes de retrait sont refermées, le gonflement s'effectue seulement en une dimension (figure 6-15b), causant ainsi une élévation du niveau du sol.



Figure 6-15. (a) Expansion en 3 dimensions. (b) Expansion en 1 dimension (Taboada,2003).

A-Méthodes de mesure :

Le potentiel de rétrécissement peut être mesuré par le coefficient of linear extensibility (COLE). Plus ce coefficient est élevé (tableau 6-14), plus le sol considéré présente des propriétés de rétrécissement et de gonflement importantes. Le coefficient se détermine à l'aide de la formule :

$$COLE = (v_{1/3atm} - v_{dry})^{1/3} - 1$$

$$v_{1/3atm} : \text{volume du sol à 1/3 atm (capacité au champ)}$$

$$v_{dry} : \text{volume du sol à l'étuve}$$

Par exemple, la FAO (2002) stipule que : « Si le sol est irrigué, les 50 premiers cm ont partout un coefficient d'extensibilité linéaire (COLE) d'au moins 0,06. »

Potentiel		
gonflement-rétrécissement	COLE	
Bas	< 0,03	
Modéré	0,03-0,06	
Haut	0,06-0,09	
Très haut	> 0,09	

Tableau n°6-14 : Potentiel de gonflement et de rétrécissement des sols argileux (Taboada, 2003).

Une autre méthode consiste à effectuer une courbe de rétrécissement. Cette méthode, un peu plus complexe (au niveau des manipulations), propose de construire une courbe de rétrécissement en présentant la variation du volume spécifique du sol en lien avec sa teneur en eau durant un séchage à l'air.

B-Mécanismes en cause :

Konrad et Ayad (1997) in PIERRE .L.B, DENIS .N(2007) décrivent les mécanismes qui se produisent lors de la dessiccation. Pour comprendre ces mécanismes, il faut mesurer l'évolution de la teneur en eau, du tassement, de la succion en fonction de la profondeur, de la température et de l'humidité relative à la surface du sol. Voici un bref aperçu (figure 6-16) des étapes de fissuration d'une argile Saint-Alban intacte située à 80 km à l'ouest de la ville de Québec :



Figure 6-16. Étapes de fissuration d'une argile St-Alban intacte (Konrad et Ayad, 1997).

Lors d'une expérience portant sur la recharge en eau dans un sol présentant des fentes de retrait, Blake et al. (1973) in BOUMA. J and RAATS. P(1984), ont ajouté du tritium (radio-isotope de l'hydrogène) à 100 litres d'eau dans un sol relativement sec (pélosol). Ce sol était caractérisé par un COLE de 0,115 et de petites fentes de retrait entre les

agrégats naturels. Les résultats ont fait voir que le tritium et l'eau se sont écoulés dans les fentes de retrait des horizons de 0 à 55 cm de profondeur comme de l'eau libre. Le tritium et l'eau se sont aussi imbibés sur la surface des agrégats naturels (ped walls) et ont même migré jusqu'à l'horizon de plus de 55 cm. Dans l'horizon de 11-24 cm, la concentration de tritium était beaucoup plus grande sur la surface des agrégats naturels (peds) que dans le sol provenant de l'intérieur des agrégats naturels (le tritium ne pénétrait pas ou peu à l'intérieur des agrégats).

Lors de l'application de la solution aqueuse, les auteurs ont remarqué que le taux d'infiltration était de l'ordre de 9 cm/min. Aussi, le sol au-dessus du niveau de 50-55 cm est resté beaucoup plus sec que la capacité au champ ce qui indiquait **que le débit massique au travers des fentes de retrait était plus dominant que le flux d'infiltration.**

Cette évolution où la structure argileuse soumise à retrait-gonflement s'apparent le milieu et le cas de Fesdis.

2 - TRANSPORT DE L'EAU EN SOLS FISSURÉS A-Infiltration de l'eau dans les sols fissurés :

Novàk et al. (2000) in PIERRE .L.B, DENIS .N (2007) ont effectué une étude portant sur l'infiltration de l'eau dans un sol présentant des fentes (soit sur une surface de 1 m² ayant une porosité réelle des fentes de 0,046 m²/m² et une longueur spécifique des fissures de 11,1 m/m², ce qui donnerait des fissures de largeur moyenne de 4 mm). Cette étude associe l'infiltration dans les fentes avec un transport accéléré des solutés, qui pénètrent plus profondément dans le sol et qui présentent alors des risques pour la pollution du sol et de la nappe phréatique. Ces solutés contiennent notamment des nutriments qui se déplacent rapidement sous la zone racinaire des cultures agricoles. La capacité d'infiltration de ce type de sol (présentant des fentes de retrait) peut donc être majorée de 34 % par rapport à un sol argileux ne présentant pas de fentes de retrait. Les taux d'infiltration de ces sols ont été évalués pour l'irrigation.

Dans l'étude de Chadwick et Chen (2002) in PIERRE .L.B, DENIS .N (2007), on rapporte que l'application de nutriments peut passer rapidement au travers de la matrice du sol si ce dernier possède des canaux d'écoulement préférentiel. Ces canaux seraient d'ailleurs la cause majeure de la contamination des eaux souterraines selon ces auteurs. La vitesse de contamination est attribuée aux fissures (dans le sol) qui causent l'écoulement préférentiel.

Dans le nord de l'Italie, Mantovi et al. (2005) in PIERRE .L.B, DENIS .N (2007) ont étudié le lessivage des nitrates au travers de la zone non saturée suivant l'application

d'engrais. Ils ont réalisé que, dans un sol avec une texture fine, les propriétés de rétrécissement/gonflement des argiles déterminent des conditions de drainage rapide (macroporosité). Ils ont aussi constaté que, durant les premières périodes de précipitation, les nitrates ont été lessivés au travers des premiers mètres de la zone non saturée, à au moins 4 mètres de profondeur. Il est à noter que ce sol possédait une forte teneur en argile (de 39 % à 53 % sur les 150 premiers centimètres) et que la nappe se trouvait à une profondeur qui oscillait entre 10 et 17 mètres.

B-Digitation (Fingering Flow) :

La digitation est un écoulement préférentiel qui se produit dans un sol non saturé lorsqu'une couche de sol à texture fine repose sur une couche de sol à texture grossière (fig 6-17). Ce phénomène ne se produira pas si l'ordre des couches est inversé. Quand le front de mouillage du sol à texture fine entre en contact avec le sol à texture grossière, l'absorbance et la capillarité de ce dernier sont souvent insuffisantes pour attirer l'eau de l'autre côté de l'interface. Alors, l'eau s'accumule à la surface supérieure de l'interface jusqu'au point où la tension de l'eau diminue suffisamment pour pouvoir s'écouler dans le sol grossier (dans ce cas, il n'y a probablement pas de fentes de retrait en profondeur). Si la perméabilité du sol grossier est beaucoup plus élevée que le taux d'infiltration dans le sol fin, la pénétration dans le sol grossier surviendra en des points isolés le long de l'interface plutôt que sur toute sa surface (il n'y aura pas de front mouillant). L'eau s'écoule alors rapidement au niveau des points de pénétration en créant de minces doigts d'eau. Comme les doigts sont minces, l'eau peuvt potentiellement se déplacer rapidement à de grandes profondeurs dans le sol à texture grossière. La digitation constitue donc un mécanisme important qui, même en l'absence de fentes de retrait ou de macropores, entraîne les eaux à se déplacer rapidement d'une couche supérieure de sol à texture fine vers l'eau souterraine (Bowman et Renolds 2006) in TABOADA.M. A(2007). Ce type de superposition (texture fine sur texture grossière) est commun aux sols de Fesdis.



Figure 6-17. Illustration du phénomène de la digitation

V- CONCLUSION :

L'exploitation des résultats des reconnaissances géotechniques nous a permet de constate que le sol de la zone de Fesdis est une argile fine proche de la saturation, C'est une argile plastique qui appartient a la famille de l'illite. Du point de vue mécanique, le sol est sur-consolidé et moyennement compressible avec un caractère gonflant.

Le phénomène de gonflement provient d'une modification de l'état des contraintes dans le sol en présence d'eau.

Selon les différentes méthodes de classification, nos sols sont classés parmi les sols gonflants avec un potentiel de gonflement important.

La matrice argileuse de la zone de Fesdis est caractérisée par une macroporosité (fissures) lors des périodes de sécheresse. Ces fissures sont formées par le rétrécissement résultant de la dessiccation des sols argileux et sont désignés, comme étant des fentes de retrait.

Un sol argileux gonflera avec une teneur en eau élevée et se rétractera lors de son dessèchement, les dimensions de ces fentes diminuent une fois le sol réhumidifié.

Les fentes ainsi créées forment des chemins favorisant l'écoulement préférentiel de l'eau au travers du sol. Ce sont des fissures, orientées verticalement, qui peuvent atteindre de 3 à 5 cm de largeur et un mètre de profondeur. Elles forment habituellement un réseau hexagonal de diamètre allant de 40 cm à un mètre.

Une fente est considérée comme ouverte si elle permet l'infiltration et la percolation de l'eau dans un sol argileux sec. Ces fentes peuvent laisser passer de l'eau tant que le sol ne sera pas assez humide pour que l'argile se gonfle et les referment.

De point de vue hydrogéologique, le débit massique au travers des fentes de retrait est plus dominant que le flux d'infiltration, et la capacité d'infiltration en sol fissuré (présentant des fentes de retrait) peut être majorée de 34 % par rapport à un sol argileux ne présentant pas de fentes de retrait, et déterminera les conditions de drainage rapide (macroporosité).

Un autre type d'écoulement dans les sols fissurés, la digitation qui est un écoulement préférentiel qui se produit lorsqu'une couche de sol à texture fine repose sur une couche de sol à texture grossière. Ce type d'écoulement aussi entraîne les eaux à se déplacer rapidement d'une couche supérieure de sol à texture fine vers l'eau souterraine.

Finalement nous pensons que le phénomène en question (rehaussement du niveau piézométrique en période de sécheresse) peut être expliqué par la nature du sous sol c.-à-d

la matrice argileuse, et liée au cycle retrait-gonflement.

L'argile en état de gonflement est presque imperméable et absorbe l'apport pluvial, la quantité d'eau infiltrée vers la nappe superficielle est alors faible, et la vitesse d'écoulement est très lente.

A l'inverse, en état de retrait de l'argile (période d'étiage), les fissures (fentes de retrait) permettent l'écoulement vers la nappe alluvionnaire, la quantité d'eau infiltrée vers la nappe est très importante et libèrent également les espaces pour les écoulements horizontaux.

CONCLUSION GENERALE

L'étude présentée dans ce mémoire avait pour finalité de faire un état des connaissances sur l'influence du comportement des sols argileux sur l'écoulement souterraine au sien de la nappe de recouvrement, au niveau de la zone de Fesdis situé dans la partie amont de la plaine d'El Madher où la nappe présenté un fluctuation piézométrique inverse de l'ensemble de la nappe alluvionnaire d'El Madher, puis de déterminer les paramètres physiques et mécaniques des argiles.

La plaine d'El Madher est un bassin de sédimentation subsident sous la forme d'un synclinal à substratum marneux très épais d'âge Cénomanien. Il est limité par deux structures anticlinales ; au Nord, par l'anticlinal des monts de Batna de direction SW-NE et au Sud, par l'anticlinal de Djebel Bou Arif, de même direction.

Le site est constitué par des formations alluvionnaire d'âge mio-plio-quaternaire qui caractérise le recouvrement de la plaine d'El Madher, Se sont des formations détritiques fins. La partie supérieure du recouvrement où les éléments fins se sont des argiles dures verdâtres à plaquettes de gypse avec quelques intercalations de graviers et galets, la partie inferieur du recouvrement est constitué essentiellement d'éléments grossiers des sable, graviers et galets faiblement cimentés par de l'argile.

Le climat de la zone d'étude est semi-aride avec un hiver froid et pluvieux et un été chaud et sec, les précipitations moyennes annuelles est de 342 mm/an, la température moyenne annuelle de l'ordre de 15.17 C°, le période humide s'étalant du mois de Novembre jusqu'au mois de Avril, la période sèche s'étale sur le reste de l'année.

Le déficit agricole pour satisfaire les besoins en eau d'irrigation des cultures est de 548 mm à partir du mois du Mai jusqu'au mois d'Octobre, le bilan hydrique est déficitaire.

La nappe superficielle constitue essentiellement par des formations du recouvrement de mio plio-Quaternaire, un matériel à dominante fine ; la matrice est à prédominante argileuse.

L'étude piézométrique de la nappe superficielle montre que l'écoulement est orienté en général vers la vallée de Fesdis, ainsi l'alimentation se fait à partir des massifs qui bordent la plaine où les axes d'écoulement y prennent naissance et se dirigent vers la dépression. La superposition des cartes isopièzes de janvier 2007(période de plus hautes eaux) et septembre 2007(période d'étiage), nous a permis de dire que la partie sud de la plaine d'El Madher est caractérisé par une fluctuation piézométrique inverse où le niveau piézométrique de la nappe augmente au période sèche et diminue en période humide. En ce qui concerne le reste da la nappe, la fluctuation piézométrique est normale par comparaison aux périodes de recharge et d'étiage. Cette particularité est visée par Mr Menani dans le cadre d'étude de la plaine d'El Madher (1991).

La remonté de niveau piézométrique au période de sécheresse par rapport au période humide signifié la recharge de la nappe alluviale en période de sécheresse au lieu des mois pluviales, c'est-a-dire la particularité est le temps de parcours des avers vers la nappe a travers le sous sol (éléments fins gonflantes) où le phénomène est lie par le cycle retrait-gonflements des argiles.

L'étude géotechnique in situ et en laboratoire montre que le sous-sol de la zone en question est constitué par des argiles gonflantes avec un potentiel de gonflement important, la matrice argileuse d'El Madher caractérisé par une macroporosité (fissures) lors de période de sécheresse, ces derniers sont formés par le rétrécissement résultant de la dessiccation de sols argileux et sont désignés, comme étant des fentes de retrait.

La recharge en eau dans un sol présentant des fentes de retrait, le débit massique au travers des fentes de retrait était plus dominant que le flux d'infiltration, et la capacité d'infiltration de sol fissuré (présentant des fentes de retrait) peut être majorée de 34 % par rapport à un sol argileux ne présentant pas de fentes de retrait, et déterminent les conditions de drainage rapide (macroporosité). Autre type d'écoulement dans les sols fissurés, la digitation qui est un écoulement préférentiel qui se produit lorsqu'une couche de sol à texture fine repose sur une couche de sol à texture grossière. Ce type d'écoulement aussi entraîne les eaux à se déplacer rapidement d'une couche supérieure de sol à texture fine vers l'eau souterraine.

Finalement nous pensons que le phénomène en question (rehaussement du niveau piézométrique en période de sécheresse) peut être expliqué par la nature du sous sol c.-à-d la matrice argileuse, et liée au cycle retrait-gonflement.

L'argile en état de gonflement est presque imperméable et absorbe l'apport pluvial, la quantité d'eau infiltrée vers la nappe superficielle est alors faible, et la vitesse d'écoulement est très lente.

A l'inverse, en état de retrait de l'argile (période d'étiage), les fissures (fentes de retrait) permettent l'écoulement vers la nappe alluvionnaire, la quantité d'eau infiltrée vers la nappe est très importante et libèrent également les espaces pour les ecoulements horizontaux.

Cet écoulement fissural au sein d'argiles soumis à retrait-gonflement nécessite une étude plus approfondie avec des mesures plus serrée dans l'espace (tridimensionnel) et dans le temps.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

AFNOR (1991) Norme Française : NF P 94-050 : Sols : Reconnaissance et Essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des sols

AFNOR (1991) Norme Française : NF P 94-053 : Sols : Reconnaissance et Essais - Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire

AFNOR (1993) Norme Française : NF P 94-051 : Sols : Reconnaissance et Essais - Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau.

AFNOR (1993) Norme Française : NF P 94-068 Sols : Reconnaissance et Essais - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tache.

AFNOR (1995) Norme XP P 94-091 : Sols : Reconnaissance et essais - Essai de gonflement à l'œdomètre - Détermination des déformations par chargement de plusieurs éprouvettes.

AFNOR (1996) Norme Française : NF P 94-041 : Sols : Reconnaissance et Essais - Analyse granulométrique

AFNOR (1997) Norme XP P 94-060-1 : Sols : Reconnaissance et essais - Essai de dessiccation -Partie 1 : Détermination conventionnelle de la limite de retrait sur le passant à 400 μ m d'un matériau.

AFNOR (1997) Norme XP P 94-060-2 : Sols : Reconnaissance et essais - Essai de dessiccation -Partie 2 : Détermination effective de la limite de retrait sur un prélèvement non remanié.

AISSIOU .F.Z et NECHNECH. A (2009) : Amélioration des caractéristiques mécaniques d'un sol argileux par incorporation de chaux » 1st International Conférence on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - 8p.

AZZOUZ F.Z. (2006) : Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen », mémoire de magister, Département de Génie Civil, Université de Tlemcen, Algérie, 179 p.

BEKKOUCHE. A, DJEDID.A et AISSA MAMOUNE S. M.(2002) : Identification et Prévision du gonflement des sols expansifs », symposium, Département de Génie Civil, FSI, Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen, Algérie. Pages 67-75.

BELKHIRI.L (2005) : étude hydrogéologique et problème de la qualité des eaux de la plaine d'Ain Azal. Mémoire de Magister, Université de Batna. 169 p. **BELLAOUEUR .A .A** (2008) : Etude hydrogéologique des eaux souterraines de la région de Ouargla soumise a la remontée des eaux de la nappe phréatique et perspectives de solution palliatives. Mémoire de magister, Département des sciences de la terre. Université de Batna.157 p.

BENCER.S (2005) : étude hydrogéologique de la région d'Ain Djasser (W .Batna). Mémoire de Magister. Département d'hydraulique. Université de Batna.120 p.

BOUAFIA. A (2004) : Les essais in situ dans les projets de fondations. Office des Publications Universitaires. Uni Blida. 160p.

BOUDOUKHA .A (1988) : Etude hydrogéologique et modélisation du système aquifère ferme d'El Eulma-Ain Lahjar (region Est de Sétif-Algérie) Diplôme de docteur de l'université de Franche-Comté Besançon – France .167 p.

BOUMA. J and RAATS. P.A.C (1984): Proceedings of the ISSS symposium on water and solute movement in heavy clay soils ; publication n°37 (ILRI) International Institute for Land Reclamation and Improvement, Netherlands 38 p.

BOURGUIGNON.A, BELLIER.A, DELPONT.G, CHEVREL.S(2007) : Spectrométrie pour la caractérisation minéralogique des minéraux argileux Application aux risques naturels BRGM ,19p.
BRINIS.N. (2003) : Etude de la salinité de la région d'El Outaya (Biskra), Mémoire de Magister. Université d'Annaba 165 p.

Bultel .F (2001) : Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels. Thèse docteur ENPC, 298 pages.

CABIDOCHE.Y.M,GUILLAUME. P,OZIER-LAFONTAINE, HARRY,RUY.S et VOLTZ.M(1998): Les enseignements des mesures de retrait et gonflement in situ d'un Vertisol ; Enregistrement scientifique n° : 981 /Symposium n° : 2/Présentation : poster, 8p.

CASTANY. G (1963) : Traite pratique des eaux souterraines, ed Dunod. Paris, 651p.

CASTANY. G (1982) : Principes et méthodes de l'hydrogéologie, ed Dunod. Paris, 236p.

Chaumont, et Paquinc (1971) : Les influences des régimes climatiques en France, en Espagne et en Afrique du Nord et leurs conséquences hydrologiques, thèse de doctorat d'état , Faculté des Sciences de Paris ,174P.

CHEBBAH. L (2004) : Etude hydrogéologique de la plaine de « Zana-Chott saboun » (W. de Batna - Est Algérien) ; mémoire de magister, faculté des sciences de l'ingénieur, univ de Elhadj Lakhder. Batna, 150 p.

CHETTAH .W (2009) : Investigation des propriétés minéralogiques et géomécaniques des terrains en mouvement dans la ville de Mila « Nord-Est d'Algérie » mémoire magister université de Batna; 157 p. **COSANDEY.C** et **ROBINSON.M** (2000) : Hydrologie continentale, éd Armand Colin .Paris, 360p.

COSTET.J, SANGLERAT .G, (1981) : Cours pratique de mécanique des sols Tome 1 - Plasticité et calcul des tassements. Ed. Dunod. Paris. 285 p.

COSTET.J, SANGLERAT.G, (1983) : Cours pratique de mécanique des sols Tome 2 - Calcul des ouvrages. Ed. Dunod. Paris. 447 p.

Cote M. (1998) :, les régimes bioclimatiques de l'Est Algérien, Pages 57-71.

DE MARSILY.G (1981) : Hydrogéologie quantitative. Edition Masson .

DERCOURT.J et PAQUET.J (1978) : Géologie objet et méthodes, 3^é ed Dunod.Paris, 329p.

DJEDID. A (2001) : L'Identification des sols gonflants Pour une démarche unifiée. Département

de Génie Civil, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Aboubekr Belkaid, 8 p.

GUELLOUH.F et BOUAICHA.F (2003) : Etude hydrogéologique de la plaine d'El-madher-Gadaine, W de Batna : Mémoire d'ingénieur, faculté des sciences de la terre, univ de Mentouri. Constantine, 128p

KHEMISSA . M et MEKKI .L. (2003) : Détermination des paramètres de gonflement des argiles expansives de M'sila », 2ième Journée d'études sur les sols gonflants, Université Aboubekr,

Tlemcen, Lecture given at the College on Soil Physics Trieste, pages 471-486.

Le Roux A. (1972) : Caractéristiques mécaniques des roches argileuses en relation avec leur texteur. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°61, pages 155-176.

MEGUELLATI .S (2005) : Etude hydrogéologique de la plaine de Boumia (W.Batna).Mémoire de Magister –Département d'hydraulique Université de Batna 85p.

MEKKI .L : (2004) Méthodologie d'étude et techniques d'identification des paramètres de comportement des sols fins soumis a des cycles de secheresse prolongee (application aux argiles expansives de m'sila) mémoire de magister université Mohamed Boudiaf -M'sila ,96 p.

MENANI .M.R, BENCER .S , CHERIET. M, KHEDIDJA. A (2004) : Etude du cycle global : Rejets, Contamination et Prélèvements auxquels sont soumis les champs captant des plaines d'El Madher et Gadaine destinés à l'AEP de la ville de Batna. (Projet de recherche G 0501/01/2004 département des sciences de la terre – université de Batna), 35p.

MENANI, M. R (2007). Rapport Final D'un Projet CNEPRU - Etude du cycle global : Rejets, Contamination et Prélèvements auxquels sont soumis les champs captant des plaines d'El Madher et Gadaine destinés à l'AEP de la ville de Batna, 17p.

MENANI, M. R., (2001). Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'El Madher, Nord-Est algérien, selon la méthode DRASTIC. *Revue Sécheresse*, 12, (2) ,95-101.
MENANI. M.R (1991) : Etude hydrogéologique de la plaine d'El-Madher (Algérie orientale) : Géologie, climatologie, hydrogéologie et modélisation des écoulements souterrains de l'aquifère

Moi-Plio-Quaternaire : Thèse de doctorat, univ de Nancy I G.E.S., 409p.

PHILIPPONAT.G (1987) : Fondations et ouvrages en terre, 402 p.

PIERRE .L.B, DENIS .N (2007): Fentes de retrait du sol et amas de fumier, revue de littérature, direction de l'environnement et du développement durable ; Bibliothèque et Archives nationales du Québec ISBN 978-2-550-49027-2-2007 ; 18 p.

PIERRE. M, PATRICK. M, JEAN-CLAUDE .P : Manuels et méthodes n°14 : la construction économique sur sol gonflant, 125 p.

RABAHI.N, (2008) : La série Néritique du Constantinois Central « Massif du Chattabah, DjebelFelten » lithostratigraphie, sédimentologie et caractérisation hydrogéologique (région de Constantine) mémoire de magister, université de Batna, 170 p.

RIHANI.A, BOULAHBEL.S (2005): Les argiles gonflantes de la région de N'gaous et leur influence sur la stabilité de la construction cas d'école fondamentale base 07, thèse d'ingéniera université de Batna, 97 p.

ROCHE.M (1963) : Hydrologie de surface. Gautier-Villars.430 p.

SAIDI .D (2010) : Evolution de la porosité des sols argileux du Bas Cheliff sous contraintes
salines ; Faculté des Sciences Agronomiques et des Sciences Biologiques, Université Hassiba Ben
Bouali de Chlef, Algérie, Revue « Nature et Technologie ».Pages 51 à 58

SALLES.F (2007) : hydratation des argiles gonflantes : séquence d'hydratation multi-échelle, détermination des énergies macroscopiques a partir des propriétés microscopiques, thèse de doctorat de l'universite PARIS VI- PIERRE et MARIE CURIE U.F.R. de science, 160 p.

Seltzer.P (1949) : le climat de l'Algérie. Alger

TABOADA.M. A(2007) : Soil shrinkage characteristics in swelling soils, departamento de ingenieria agricola y uso de la tierra, facultad de agronomia uba, buenos aires, argentina <u>;</u> pages 471-486

VINCENT. M., (2003) « Retrait-gonflement des sols argileux : Méthode cartographique d'évaluation de l'aléa en vue de l'établissement de PPR », JPRN - SIRNAT, 15p

ZOUAOUI .S (2008) : Etude géologique et géotechnique des glissements de terrains dans le bassin néogène de Mila : glissement de Sibari ; mémoire de magister université de Batna; 150 p.

CARTES :

- Carte géologique d'Ain Elkser : 1/50.000
- Carte pluviométrique de l'Algérie 1/500.000 d'après Chaumant-Paquin.
- Carte pluviométrique de l'A.N.R.H 1/500.000.

DONNEES:

- Données climatiques O.N.M de Constantine.
- ✤ logs stratigraphique s des forages D.H.W de Batna.
- Etude géophysique sur les hautes plaines constantinoises, d'après C.G.G (1969).

ANNEXES



Annexe 1: Classification du climat de la région de Batna (M. Cote 1979).



Annexe 2 : La carte pluviométrique du Paquin et Chaumont (1913-1963).



Echelle : 1/500 000

Annexe 3 : La carte pluviométrique d'après l'ANRH (1993).



Annexe 4: Abaque de Demartonne (indice d'aridité) d'après Demartonne 1983.





Annexe 5: Essai de cisaillement échantillon n°1



LABORATOIRE NATIONAL DE L'HABITAT ET DE LA CONSTRUCTION

UNITE DE BATNA



Annexe 6: Essai de cisaillement échantillon n°2



Annexe 7: Essai de cisaillement échantillon n°3



Annexe 8: Essai eodometrique, échantillon nº1



Annexe 9: Essai eodometrique, échantillon n°2



Annexe 10: Essai eodometrique, échantillon n°3



Annexe 11: Essai de gonflement libre, échantillon n°1



Annexe 12: Essai de gonflement libre, échantillon n°2



Annexe 13: Essai de gonflement libre, échantillon n°3

Annexe 14 - La diffractométrie de rayons X (DRX) :

La diffractométrie de rayons X (DRX, on utilise aussi souvent l'abréviation anglaise XRD pour X-ray diffraction) est une technique d'analyse fondée sur la diffraction des rayons X sur la matière. La diffraction n'ayant lieu que sur la matière cristalline, on parle aussi de radiocristallographie. Pour les matériaux non-cristallins, on parle de diffusion. L'appareil de mesure s'appelle un diffractomètre. Les données collectées forment le diagramme de diffraction ou diffractogramme ou spectre de rayons X.

La diffractométrie de rayons X est une méthode d'analyse physico-chimique. Elle ne fonctionne que sur la matière cristallisée (minéraux, métaux, céramiques, produits organiques cristallisés), mais pas sur la matière amorphe (liquides, polymères, verres) ; toutefois, la matière amorphe diffuse les rayons X, et elle peut être partiellement cristallisée, la technique peut donc se révéler utile dans ces cas-là.

Elle consiste à appliquer un rayennement de la longueur d'onde des rayons x (01 \ll 10 mm) sur un échatillon argileux orienté ou non. Le rayennement pénètre le cristale, il ya absorption d'une partie de l'énergie et excitation des atomes avec émissions de radiations émises par des plan atomiques qui sont en phases vont engendrer un faisceau cohérent qui pourra être détecté. Les conditions pour que les radiations soit en phase s'exprime par la loi de Bragg : $2d \sin \theta = n \cdot \lambda$ (L.BERTHOIS. 1975).

n : nombre entier correspondant à l'ordre de la diffraction .

 λ : longueur d'onde du rayonnement utilisé.

d : distance interréticulaire (A°).

 $\boldsymbol{\Theta}$: angle de diffraction .

1La diffractométrie aux rayon X 1.1. Mode opératoire

On dispose la poudre du minéral à étudier sur une plaque de verre qui est posée dans les rainures d'une plaque métallique qui lui imprime un mouvement de rotation autour d'un axe perpendiculaire au cercle porteur.

Les rayons réfléchis sont reçus par un compteur Geiger Muller qui transmet les impulsions à un potentiomètre qui enregistre les angles et trace un pic lorsqu'il ya réflexion suivant la loi de Bragg voir (*Fig. 1*).



Fig. 1. Schéma d'un diffractomètre (vue de plan)

- S : Source des rayons X – anticathode .

- f : fentes de Sollers

- F.F1.F2 : fenêtres litant le faisceau X

- **O** : Echantillon placé au centre du cercle de focalisation et entrainé dans un mouvement de rotation GM : compteur Geiger Muller , qui se déplace d'un angle double de celui de l'échantillon , pour suivre le faisceau réfléchi .

- En pointillé : cercle de focalisation ,(L.BERTHOIS. 1975).

Les méthodes pétrographiques classiques comme l'étude microscopique et les analyses chimiques sont généralement insuffisantes lorsqu'elles sont appliquées pour l'étude des argiles.

Deux méthodes physiques se sont imposées pour l'étude des argiles :

- L'analyse thermique différentielle.

- L'étude au rayon X.

Dans notre cas, nous avons utilisé la douzième méthode c'est-à-dire l'analyse par diffractométrie aux rayon X.

1.2. Traitement des spectres et identifications des minéraux

Les propriétés physico-chimique d'un matériau dépendent non seulement de sa composition chimique mais aussi, et en grande partie, de ses caractéristiques structurales : (structure cristalline, la taille des cristaux et la nature chimique du matériau). Après diffraction, cette identification a été faite en deux étapes : une étape de recherche à partir du logiciel PCPDFWin (American Society for Testing Materials) dans une base contenant tout les signatures possible (Fiches ASTM), puis une confrontation des valeurs \mathfrak{D} de chaque pics du diffractogramme ou du spectre avec les fiches ASTM probables.

Displa	splay Matched Item Number:		to 32		Print S	earch Result	
		77	10 33		OK	Cancel	
D CI	hemical Name		Chemical Formula	3 Strongest	Lines		
6-1344 IIIi	ite-1M. ammonian. Potassium Ammo-		[(N H4) . K1-	10.3 4.49 2.	.57		
3-0685 Illi	ite-2M2, Potassium Aluminum Silica-		KA12 (Si3 AI)-	2.58 4.49 3	.35		
9-0363 Si	idwillite, Molybdenum Oxide Hydrate		Mo 03 2 H2 0	3.32 3.25 6.	.94		
8-0371 M	linehillite, Potassium Calcium Zinc Alu-		K3 Ca28 Zn4 Al4 -	2.76 3.35 1.	.85		
5-0652 Illi	ite-montmorillonite, Potassium Alumi-		KAN4 (Si,AI)-	3.33 9.50 12	2.6		
5-0628 D	ervillite, Silver Arsenic Sulfide		Ag2 As S2	3.08 3.02 2.	.84		
5-0617 Le	eadhillite, Lead Carbonate Sulfate Hyd-		Pb4(SO4)(C-	3.57 2.94 2.	.31		
5-0507 C	yanophillite, Copper Aluminum Antimony	r-	Cu10 Al4 Sb6 025 -	4.84 9.67 2.	.59		
5-0478 St	terlinghillite, Manganese Arsenate Hyd-		Mn 3 (As 04) 2·4	11.1 3.21 2.	.75		
3-0891 M	logillite, Manganese Chloride Silicate -		Mn8 Si6 O15 (OH-	2.56 7.16 2.	.89		
1-0968 Illi	ite-1M, Potassium Aluminum Silicate -		KA12 (Si3 AI) -	3.35 2.60 1.	.99		
9-1496 Illi	ite-1M, Potassium Aluminum Silicate -		K0.7 Al2 (Si, -	4.43 2.56 3.	.66		
9-0330 Ad	fwillite, Calcium Silicate Hydroxide H-		Ca3 (SiO3 O H)-	3.17 2.83 2.	.73		
6-0911 Illi	ite-2M1, Potassium Aluminum Silica-		(K,H3O)A42 -	3.34 10.0 5.	.02		
25-0001 Illi	ite, sodian brammallite, Sodium Alum-		(Na,K)1-x(-	10.2 4.40 3.	.20		
(4-0495 III)	ite-2M2, Potassium Aluminum Silica-		K0.7 Al2.1 (Si,-	2.58 4.49 3.	.35		
21-0381 Fr	rancevillite, syn, Barium Uranyl Vanad-		Ba(U02)2V2O-	8.40 3.00 5.	.20		



Fig .2. Fiches de référence. (ASTM)

ملخص:

تندرج الدراسة المقدمة في إطار هذه المذكرة حول تأثير سلوك بعض التربة الطينية على تدفق المياه من خلالها نحو الطبقة الباطنية وذلك بمنطقة "فسديس" الواقعة في الجزء العلوي من حوض المعذر بولاية باتنة. تمتاز هذه المنطقة المنطقة بمناخ شبه جاف حيث الشتاء بارد و ممطر والصيف يمتاز بالحرارة والجفاف ,سلوك المياه السطحية في هذه المنطقة مخالف ومتميز عن بقية حوض المعذر والمنطقة ككل. هذا العمل من شأنه البحث عن أسباب هذه الميزة الخاصة وذلك يتطلب در اسة هيدر وجيولوجية من جهة وجيوتقنية من جهة أخرى لتحديد ودر اسة الخصائص الفيزيائية للوسط وتأثيره على تدفق المياه الباطنية. الجزء العلوي من السماط المائي يتكون من عناصر وأجزاء دقيقة، طمي وطين تتخللها بعض الطبقات المغيرة من الحصى والرمل. الجزء العلوي من السماط المائي يتكون من عناصر وأجزاء دقيقة، طمي وطين تتخللها بعض الطبقات الصغيرة من الحصى والرمل. الجزء السفلي يتكون من عناصر خشنة هي عبارة عن رمل وحصى ملتصقة فيما بينها بالتربة الطينية. در اسة مستوى المياه الباطنية بينت أنَّ مستوى المياه في منطقة فسديس مغاير ومختلف عن بقية المنطقة، حيث مستوى المياه ألباطنية بينت أنَّ مستوى المياه في منطقة فسديس معاير ومختلف عن بقية المنطقة، الدراسة مستوى المياه الباطنية بينت أنَّ مستوى المياه في منطقة فسديس معاير ومختلف عن بقية المنطقة، در اسة مستوى المياه الباطنية بينت أنَّ مستوى المياه في منطقة فسديس معاير ومختلف عن بقية المنطقة، الراسة الجيوتقنية للتربة في الميدان والمخبر بينت أنَّ هذه الظاهرة مرتبطة بالتربة الطينية (صلصال)

المكون للجزء العلوي للسماط المائي ومتعلق بظاهرة انكماش وانتفاخ ا التربة الطينية التي بينت الدراسة أنها من نوع الإيليت (illite).

RESUME :

L'étude présentée dans ce mémoire porte sur une étude de l'influence du comportement des agriles sur les écoulements souterrains au sien des formations du recouvrement de la zone de Fesdis qui est située dans la partie amont du bassin versant d'El Madher (W de Batna). La zone présente un climat semi-aride avec un hiver froid et pluvieux et un été chaud et sec.

La nappe alluviale présentée une fluctuation piézométrique inverse par comparaison de la nappe alluviale d'El Madher. Le travail a nécessité par conséquent deux approches combinées, à savoir une approche hydrogéologique du phénomène et une autre, plutôt géotechnique qui a fait ressortir les propriétés physiques du milieu à même d'influencer les écoulements souterrains.

La partie supérieure de l'aquifère alluvial est composée d'éléments fins qui sont des argiles avec quelques intercalations de graviers et galets. La partie inferieure du recouvrement est constitué par des éléments grossiers constitues de sables, graviers et galets faiblement cimentés par de l'argile.

L'étude piézométrique de la nappe superficielle a montre une fluctuation anormale de la nappe au niveau de la zone de Fesdis. En effet le niveau piézométrique de la nappe est plus élevé en été qu'en période pluviale.

L'étude géotechnique in situ et en laboratoire a montre que ce phénomène est liée à la prédominance des argiles dans la partie supérieure de l'aquifère et au cycle de retrait- gonflement de la matrice argileuse, les argiles en question sont de type Illite.