

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار- عنابة

Faculté des Sciences de la Terre

Département de Géologie

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat En Sciences

**Etude lithologique, géochimique et minéralogique des formations géologiques de
la ligne de chemin de fer Annaba-Skikda (cas de la région d'Azzaba) :
conséquences géotechniques**

Option : Géologie

Par

CHOUAF Ibtissem

PRESIDENT	: TLILI Mohamed	MCA U.B.M. Annaba
DIRECTEUR DE THESE	: BOUABSA Lakhdar	Pr. U.B.M. Annaba
CO-DIRECTEUR DE THESE	: CHOUABBI A. Madjid	Pr. U.B.M. Annaba
EXAMINATEUR	: BOUMEZBEUR A. Rahmane	Pr U.C.L.T. Tebéssa
EXAMINATEUR	: KHIARI Abdelkader	Pr U.L.B.M. Oum El Bouaghi
EXAMINATEUR	: DJAIZ Fouad	MCA U.H.L. Batna
INVITE	: LAMOURI Bachir	MCB U. M.K. Biskra.

Décembre 2018

Dédicace

À mes parents

À tous ceux qui me sont chers

Remerciements

Ce travail est le résultat des années de recherche menées de 2010 à 2018 avec l'encadrement et le soutien de nombreuses personnes. A l'issue de ces années de recherche, je tiens à exprimer ma vive reconnaissance à mon directeur de thèse professeur BOUABSA Lakhdar, Professeur titulaire de l'université Badji Mokhtar Annaba, qui a encadré mon parcours universitaire depuis 2006, qui m'a orienté et dirigé dans ce sujet. Ses contributions multiformes ont été précieuses. Je lui présente ici, mes remerciements profonds.

Mes sincères remerciements s'adressent également à mon co-directeur de thèse professeur CHOUABBI A. Madjid, Professeur titulaire de l'Université Badji Mokhtar Annaba, qui a suivi mon parcours dans la recherche depuis 2008. Pour ses multiples conseils, ses orientations ont permis l'amélioration de la qualité de ce travail. Ce travail bénéficie très largement de ses compétences.

Professeur Nathalie FAGEL, Chargée de cours, Chef du Laboratoire Argiles, Géochimie et Environnements sédimentaires (AGEs) du Département de Géologie de l'Université de Liège qui a bien voulu m'accepter dans son Laboratoire, pour l'opportunité et l'honneur qu'elle m'a accordé en m'accueillant au sein de son unité de recherche. Ces conseils constructifs, m'ont permis d'avancer et de mener à bien ce modeste travail.

Mes remerciements aux membres de l'unité de recherche : Argiles, Géochimie et Environnement Sédimentaires Dépôt de Géologie Ulg Belgique : François Fontaine, Joël Otten pour leur aides et leur précieuses orientations au cours de tous mes travaux de laboratoire.

Mes sincères remerciements aussi aux personnels des autres laboratoires à qui j'ai fait appel et en particulier, Delmelle Nicolas (Laboratoire de pétrographie magmatique Dept de Géologie, Ulg), Frédéric Hatert (Laboratoire de minéralogie dept de Géologie, Ulg), (laboratoire de chimie inorganique et structurale).

Je tiens à remercier Mr Tlili Mohamed pour m'avoir honoré de présider le jury de cette thèse. Merci tout particulièrement à messieurs : Boumezbar A.M, Khiari A.K, Djair F pour avoir accepté de lire et d'évaluer ce modeste travail.

Je profite de cette occasion pour exprimer ma profonde gratitude à Mr Lamouri B membre de laboratoire géodynamique et ressources naturelles (LGRN) et enseignant à l'université de Biskra pour ses conseils et son aide précieuse surtout dans la réalisation de l'article.

Mes remerciements aussi à la société ANESRIF qui m'a attribué un stage de (03 mois) on m'autorisant l'accès au chantier (Tunnels), aux essais, aux analyses réalisées et aux rapports des travaux achevés.

Je prends l'occasion pour remercier les ingénieurs qui m'ont encadré pendant ce stage, Mr Mansouri Yahia et Mr Djaballah Zine Edine.

J'adresse également mes vifs remerciements à tous mes Professeurs du département des Sciences de la Terre de l'Université Badji Mokhtar d'Annaba.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude à l'ensemble des membres du département de Géologie université de Sétif : Dr A.Mebarkia, Mr R. Boustila, Mr M.Daas Amieur.

Je suis très reconnaissante envers mes parents, mon petit frère et ma sœur pour m'avoir soutenu tout le long de mon parcours académique et pour avoir cru en moi.

Mes plus sincères remerciements à tous mes amis, qui m'ont toujours soutenu et encouragé : Bouguebrine Janet, Fahas Mahmoud, Boughrira Nabil, Haid Nadjib.

Enfin, je désire témoigner ma reconnaissance à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

TABLE DE MATIERE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES PHOTOS

LISTE DES TABLEAUX

ABREVIATIONS

RESUMES (FRANÇAIS, ARABE, ANGLAIS).....I.II.III

INTRODUCTION GENERALE.....IV

GENERALITES

INTRODUCTION.....	1
I. LOCALISATION	1
II. CLIMAT ET VEGETATION.....	2
III. GEOMORPHOLOGIE ET RELIEF.....	3
IV. RESEAU HYDROGRAPHIQUE	4
V. ACTIVITE ANTHROPIQUE	5
VI. GEOLOGIE REGIONALE STRUCTURALE.....	5
VI.1. HISTORIQUE DES TRAVAUX DANS LA REGION.....	5
VI.2. Géologie régionale.....	6
VI.3. Etude structurale.....	7
VI.3.1. Zone interne.....	7
VI.3.1.1. Socle Kabyle.....	7
VI.3.1.2. Dorsale Kabyle.....	8
VI.3.1.3. Domaine des flyschs.....	8
VI.3.1.4. La nappe numidienne	10
VI.3.2. Zone externe.....	11
VII. TECTONIQUE.....	11
VIII. CADRE GEOLOGIQUE LOCAL.....	13
VIII.1. Numidien.....	13
VIII.I.I. Argiles sous numidiennes.....	13
VIII.1.2. Grès numidiens.....	13
VIII. 2. Quaternaire.....	15
VIII.2.1. Alluvions	15
VIII.2.1.1. Alluvions argileux	15
VIII.2.1.2. Alluvions sableux.....	17
VIII.2.2. Colluvions.....	18

IX..ETUDE PETROGRAPHIQUE DES GRES.....	19
CONCLUSION.....	22

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES ARGILES ET LES MINERAUX ARGILEUX

INTRODUCTION.....	23
I. DEFINITION	23
II. COMPOSITION.....	24
III. STRUCTURE DES ARGILES.....	24
IV. CLASSIFICATION.....	25
IV.1. LES MINERAUX PHYLITTEUX	25
IV.1.1. LES MINERAUX TYPE 1 :1.....	26
IV.1.2. LES MINERAUX TYPE 2 :1.....	27
IV.1.3. LES MINERAUX TYPE 2 :1 :1.....	31
IV.2. LES MINERAUX INTERSTRATIFIES.....	32
IV.3. LES MINERAUX FIBREUX	32
V. ORIGINE ET CONDITIONS DE FORMATION.....	34
VI. PROPRIETES DES ARGILES.....	36
VI.1. MECANISME DE RETRAIT GONFLEMENT DES ARGILES.....	36
VI.1.1. GONFLEMENT AU SENS PHYSICO-CHEMIQUE”	36
➤ SURFACE SPECIFIQUE.....	38
➤ CAPACITE D’ECHANGE CATIONIQUE.....	38
VI.1.2. GONFLEMENT AU SENS MECANIQUE.....	39
➤ INFLUENCE DE LA COMPOSITION MINERALOGIQUE	39
CONCLUSION.....	40

MATERIELS ET METHODES

INTRODUCTION	41
I. TRAVAUX SUR TERRAIN.....	41
I.1. ECHANTILLONAGE.....	41
I.2. LOCALISATION ET DESCRIPTION LITHOLOGIQUE DES FORMATIONS GEOLOGIQUE DANS LES SITES ETUDIES.....	43
II. TRAVAUX DE LABORATOIRE	51
II.1. ANALYSE MINERALOGIQUE.....	52

II.1.1. DIFFRACTION DES RAYONS X (DRX).....	53
➤ Principe.....	53
➤ Méthode d'analyse.....	54
a) Minéralogie totale	55
b) Minéralogie de la fraction argileuse	57
II.1.2. SPECTROMETRIE INFRA ROUGE.....	60
➤ Principe.....	60
➤ Méthode.....	62
II.1.3. MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE.....	63
➤ Principe.....	63
➤ Méthode.....	63
II.2. ANALYSE GEOCHIMIQUE.....	65
II.2.1. PRINCIPE DE LA METHODE.....	65
II.2.2. PREPARATION DES ECHANTILLONS	66
II.2.3. DETERMINATION DE LA PERTE AU FEU.....	67
II.3. ANALYSE PHYSIQUE.....	67
II.3.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE.....	67
II.3.2. LIMITES D'ALTERBERG.....	67
CONCLUSION.....	70

RESULTATS

INTRODUCTION	71
I. CARACTERISATION INERALOGIQUE DES ARGILES SOUS NUMIDIENNES.....	71
I.1. CARACTERISATION PAR DIFFRACTION DES RAYONS X.....	71
I.1.1. IDENTIFICATION DES MINERAUX NON ARGILEUX ET ARGILEUX.....	71
I.2. CACTERISATION PAR SPECTROSCOPIE INFRAROUGE	83
I.3. CARACTERISATION PAR MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE.....	90
II. CARACTERISATION GEOCHIMIQUE DES ARGILES.....	95
III. PROPRIETES PHYSIQUE DES DORMATIONS GEOLOGIQUES.....	96
III.1. PROPRIETES GRANULOMETRIQUES.....	97

III.1.1. Les argiles alluvionnaires	97
III.1.1. Les sables alluvionnaires	101
III.1.3. Les argiles sous numidiennes	102
III.2. PROPRIETES LIEES A LA PLASTICITE.....	105
III.2.1. Argiles alluvionnaires.....	105
III.2.2. Sables alluvionnaires.....	108
III.2.3. Argiles sous numidiennes.....	110
IV .CARACTERISATION GEOTECHNIQUE DES FORMATIONS TRAVERSEES DANS LES TUNNELS.....	112
INTRODUCTION	112
IVI.1. DESCRIPTION TECHNIQUE DES TUNNELS.....	113
IVI.2. CARACTERISATION GEOMECHANIQUE DES FORMATIONS OBSERVEES DANS LES TUNNELS.....	115
IV.2.1. Méthodes indirectes de caractérisation.....	115
IV.2.2.Méthodologie.....	115
IV.2.3. Analyse de la résistance simple.....	115
a) Caractérisation des argiles sous numidiennes	115
b) Caractérisation des grès numidiens	117
IV.2.4. Analyse du degré d'expansivité	119
a) Les argiles sous numidienne.....	119
CONCLUSION.....	123
INTERPRETATION ET DISCUSSION DES RESULTATS	
INTRODUCTION.....	125
I. CARACTERES MINERALOGIQUE.....	125
II. CARACTERES GEOCHIMIQUE.....	126
III. CARACTERES GEOTECHNIQUE.....	127
CONCLUSION GENERALE.....	128
BIBLIOGRAPHIE.....	129
ANNEXES	

LISTE DES FIGURES

N°	Titre	Page
01	Carte de localisation de la zone d'étude	01
02	Histogramme des précipitations et températures moyennes de la zone d'Azzaba	02
03	Carte de localisation des principales unités géologiques composant le pourtour de la Méditerranée Occidentale	07
04	Position des différentes unités géologiques des Maghrébides	9
05	Colonne stratigraphique synthétique du numidien	10
06	Position de quelques failles majeures	12
07	Carte structurale au 1/500 000 de la chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens	16
08	Représentation des tétraèdres et des octaèdres	25
09	Représentation schématique de la structure d'un minéral de type 1 :1 exemple kaolinite	27
10	Représentation schématique de la structure d'un minéral de type 2 :1	27
11	Représentation schématique de la structure de l'illite	28
12	Structure cristalline d'une smectite	29
13	Représentation schématique de la structure d'une montmorillonite	30
14	Représentation d'une vermiculite	30
15	Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdre alumineux d'un minéral de type 2 :1 :1 cas de la chlorite	31
16	Structure des minéraux à pseudo-feuillets et à faciès fibreux : (a) Attapulgitite ; (b) Sépiolite	32
17	Différentes possibilités d'interstratification au sein des minéraux argileux avec 2 ou trois composants	33
18	Evolution des minéraux primaires et formation des argiles	35
19	Conditions de formation et de stabilité (a) des minéraux argileux (b)	35
20	Phénomène de gonflement (hydratation des espaces interfoliaires et répulsion entre les particules)	37
21	Schéma de la méthodologie adoptée	42
22	Logs de sondages à Ain Charchar, Menzel El Abtal et Azzaba	45
23	Logs de sondages à Hellala (Sondage 1, 2 et 3)	46
24	Logs de sondages à Hellala (Sondage 4 et 5)	47
25	Logs de sondages Hellaha (Sondage 6)	48
26	Coupes verticales de Guessaba	49
27	Principe de diffraction des rayons X par le réseau cristallin	53
28	Diffractomètre Bruker D8-Advance (Laboratoire AGEs)	55
29	Etapas de préparation des échantillons bruts pour analyse DRX	56
30	Traitement avec l'acide chlorhydrique dilué	57
31	Etapas de préparation des fractions argileuses pour analyse par DRX	58
32	Etapas de préparation des fractions argileuses pour analyse par DRX	59
33	Spectres IR de la kaolinite bien cristallisé KGa-1 de Georgie	61
34	Spectre de Kaolinite	62
35	Spectromètre Nicolet NEXUS (AGEs)	62
36	Métallisation des poudres à carbone par pulvérisation plasma	63
37	Appareil FEG-ESEM XL3 (MEB)	64
38	Représentation des résultats du MEB et EDS	64
39	Principe de Fluorescence X	65

LISTE DES FIGURES

40	Etapes de préparation des échantillons pour analyse par FRX	66
41	Détermination de la limite de liquidité avec l'appareil de Casagrande	69
42	Spectre DRX de poudre d'argile du site Ain Charchar	72
43	Spectre DRX de poudre d'argile du site de Menzel El Abtal	72
44	Spectre DRX de poudre d'argile du site de Hellala	73
45	Spectre DRX de poudre d'argile du site de Guessaba	73
46	Composition minéralogique des argiles brutes de la région d'Azzaba.	74
47	Composition minéralogique des argiles brutes des tunnels	75
48	Spectre d'agrégat orienté des argiles de Menzel El Abtal	76
49	Spectre DRX d'agrégat orienté des argiles du site de Hellala CH10	77
50	Spectre DRX d'agrégat orienté des argiles du site de Hellala CH12	77
51	Spectre DRX d'agrégat orienté des argiles du site de Guessaba (Tunnel 1)	78
52	Spectre DRX d'agrégat orienté des argiles du site de Guessaba (entre les tunnels)	78
53	Spectre DRX d'agrégat orienté des argiles du site de Guessaba (Tunnel 2)	79
54	Composition minéralogique de la fraction argileuse de la région d'Azzaba	80
55	Composition minéralogique de la fraction argileuse des tunnels	81
56	Spectre d'analyse par IR (Tunnel 1 sondage 1)	85
57	Spectre d'analyse par IR (Tunnel 1 sondage 2)	85
58	Spectre d'analyse par IR (Tunnel 1 sondage 5)	86
59	Spectre d'analyse par IR (Tunnel 2 sondage 1)	87
60	Spectre d'analyse par IR (Tunnel 2 sondage 8)	88
61	Spectre d'analyse par IR (Tunnel 2 sondage 14)	88
62	Image MEB d'échantillon du premier tunnel (T1S1)	90
63	Image MEB d'échantillon du premier tunnel (T1S5)	90
64	Images MEB d'échantillon du deuxième tunnel (T2S8)	91
65	Photo par MEB de l'échantillon T2S8	91
66	Analyse par microscopie électronique à balayage et EDS de l'échantillon T2S8	92
67	Photo MEB de l'échantillon du tunnel 2 (T2S8)	92
68	Analyse par microscopie électronique à balayage et EDS de l'échantillon T2S8	93
69	Images MEB d'échantillon du deuxième tunnel (T2S13)	93
70	Photo par MEB de l'échantillon T2S13	94
71	Analyse par microscopie électronique à balayage et EDS de l'échantillon T2S13	94
72	Courbe granulométrique d'argiles alluviales d'Ain Charchar	98
73	Contenue granulométrique d'argiles alluviales d'Ain Charchar	98
74	Courbe granulométrique des argiles alluviales d'Azzaba	99
75	Contenue granulométrique d'argiles alluviales d'Azzaba	99
76	Courbe granulométrique des argiles alluviales de Guessaba	100
77	Contenue granulométrique d'argiles alluviales de Guessaba	100
78	Courbe granulométrique des sables alluvionnaire d'Ain Charchar	101
79	Contenue granulométrique des sables alluvionnaires d'Ain Charchar	102
80	Courbe granulométrique des argiles numidiennes d'Ain Charchar jusqu'à Azzaba	102
81	Contenue granulométrique des argiles numidiennes d'Ain Charchar jusqu'à Azzaba	103
82	Courbe granulométrique des argiles numidiennes de Hellala et Guessaba	103
83	Contenu granulométrique des argiles numidiennes de Hellala et Guessaba	104
84	Courbe granulométrique des argiles sous numidienne dans les différents sites	104
85	Diagramme de Casagrande des argiles alluviale d'Ain Charchar	105
86	Diagramme de gonflement des argiles alluvionnaires d'Ain Charchar	106

LISTE DES FIGURES

87	Diagramme de Casagrande des argiles alluviale d'Azzaba	106
88	Diagramme de gonflement des argiles alluviales d'Azzaba	107
89	Diagramme de Casagrande des argiles alluviale de Guessaba	107
90	Diagramme de gonflement des argiles alluviales de Guessaba	108
91	Diagramme de Casagrande des sables alluviale d'Ain Charchar	109
92	Diagramme de gonflement des sables alluviales d'Ain Charchar	109
93	Diagramme de Casagrande pour les argiles sous numidienne dans les trois secteurs d'étude	110
94	Graphique de gonflement pour les argiles numidienne dans les trois secteurs d'étude	111
95	Diagramme de résistance à la compression simple des formations argileuses sous numidienne au laboratoire	116
96	Diagramme de résistance à la compression simple des grès au laboratoire	117
97	Diagramme de résistance à la compression simple des grès pressiométrique (tunnel Guessaba)	118
98	Diagramme de résistance à la compression simple des grès dans les deux tunnels	119
99	Diagramme de pression de gonflement des argiles sous numidienne	120
100	Diagramme de liquidité et de pression de gonflement des argiles sous numidienne	121
101	Diagramme de casagrande des formations argileuses sous numidienne dans les deux tunnels	121
102	Diagramme de gonflement des formations argileuses sous numidienne dans les deux tunnels	122

LISTE DES PHOTOS

N°	Titre	Page
01	Exemple de marécage	04
02		
03	vue en sondage des argiles sous numidiennes (profondeur entre 17 et 20 mètre)	13
04	Vue générale des grès numidien	14
05	Banc de grès avec présence de niveau oxydés	14
06	Aspect en sondage des grès du numidien	14
07	Aspect général des alluvions	15
08	Aspect général des argiles alluvionnaires	15
09	Aspect en sondage des argiles alluvionnaires	17
10	Aspect en sondage des argiles sablonneuses	17
11	Poudingues, galets dans une matrice argilo-sableuses	17
12	Les surfaces d'érosion	18
13	Affleurement du manteau d'altération en surface	18
14	Affleurement du manteau d'altération en sondage	18
15	Vue générale du quartz (objectif x2) LN	19
16	Vue générale du quartz (objectif x2) LP	19
17	Vue générale du quartz (objectif x5) LN	20
18	Vue générale du quartz (objectif x5) LP	20
19	Vue générale du quartz (objectif x2) LN	20
20	Vue générale du quartz (objectif x2) LP	20
21	Vue générale du quartz (objectif x2) LN	21
22	Vue générale du quartz (objectif x2) LP	21
23	Vue générale du quartz et biotite (objectif x5) LP	21
24	Photo satellite montrant les sondages d'Ain Charchar, Menzel El Abtal et Azzaba	50
25	Photo satellite montrant les deux tunnels T1 : tunnel 1, T2 : tunnel 2	50
26	Photo satellite montrant les sondages de Hellala et Guessaba	51
27	Schistosité des formations argileuses observées à la sortie de premier tunnel	112
28	Grès intercalés avec des bancs d'argiles verdâtre dans le deuxième tunnel	113
29	Grès avec des bancs d'argiles de faibles épaisseurs	114
30	Grès intercalés ave des niveaux argileux grisâtre	114

LISTE DES TABLEAUX

N°	Titre	Page
01	Températures et précipitation annuelle de la région d'Azzaba	3
02	Classification des phyllosilicates selon la charge z du feuillet	26
03	Caractéristiques des différentes familles d'argile	38
04	Analyses effectuées et description lithologique des argiles sous numidiennes de chaque site	52
05	Liste des minéraux non argileux identifiés avec les facteurs correctifs associés	56
06	Liste des minéraux argileux identifiés avec les facteurs correctifs associés	59
07	Comportement des minéraux argileux suivant les différents traitements	59
08	Comportement des minéraux interstratifiés suivant les différents traitements	60
09	Limites d'Atterberg et de retrait de certains minéraux argileux	68
10	Distribution des minéraux non argileux dans chaque site	74
11	Distribution des minéraux non argileux dans les tunnels	75
12	Distribution des minéraux argileux dans chaque site	80
13	Distribution des minéraux argileux dans les tunnels	80
14	Distribution des minéraux argileux et non argileux de chaque site	82
15	Bandes caractéristiques des radicaux des matériaux étudiés	89
16	Résultats d'analyses géochimiques des argiles des différents sites	96
17	Résultats d'analyses géochimiques des argiles des tunnels	96
18	Paramètres géotechniques des sites étudiés	101
19	Degré d'altération des massifs argileux	116
20	Degré d'altération des massifs gréseux	118
21	Essais de pression de gonflement des argiles sous numidiennes	120

LISTE DES ABREVIATIONS

AIPEA	Association Internationale Pour l'Etude des Argiles
AGEs	Laboratoire Argiles Géochimie et Environnement sédimentaire
ANESRIF	Agence Nationale d'Etude et de Suivi de Réalisation des Investissements ferroviaire
ATD	Analyse Thermique Différentielle
ATG	Analyse Thermo-Gravimétrique
CH	Argile très plastique
CL	Argile peu plastique
DRX	Diffraction des Rayons X
EDS	Energy Dispersive Spectrometer
FRX	Fluorescence X
I.P	Indice de plasticité
IR	Spectroscopie infrarouge
Kaol	Kaolinite
Kg	Kilogramme
Km	Kilomètre
Kpa	Kilopascal
KV	KiloVolt
L.L	La limite de liquidité
LN	Lumière naturelle
L.P	Limite de plasticité
LP	Lumière polarisé
L.P	La limite de plasticité d'un sol
LTP Est	Laboratoire des travaux public de l'Est
LVB	Laboratoire voix et béton
Ma	Million d'années
mA	Milliampère
MEB	Microscope Electronique à Balayage
MH	Limon très plastique
ML	Limon peu plastique
M.O	Matière organique
MPa	Mégapascal
OH	Sol organique très plastique
OL	Sol organique peu plastique
PVC	Poly Vinyl Chloride (polychlorure de vinyle)
Qz	Quartz
RN	Route Nationale
Smec	Smectite
T°	Température
ULg	Université de Liège
BRGM	Bureau de la recherche géologique et minière
BAREM	Bureau Algérien de la recherche et d'exploitation minière
SONAREM	Société Nationale de la recherche et d'exploitation minière
W _L	Teneur en eau qui sépare l'état liquide de l'état plastique,
W _P	Teneur en eau qui sépare l'état plastique de l'état solide,
W _R	Teneur en eau qui sépare l'état solide avec
µm	Micromètre

RESUME

Le présent travail intervient dans le but de déterminer la composition minéralogique, la composition chimique des argiles sous numidiennes et la caractérisation physique des formations quaternaires et des formations numidiennes. Pour cela, deux démarches se sont avérées nécessaires, à savoir les travaux de terrain et de laboratoire.

Une campagne d'échantillonnage a été effectuée à travers ces formations. Les échantillons d'argiles ont été collectés depuis la région d'Azzaba, ils ont été préparés puis analysés par différentes méthodes d'analyses suivant des protocoles internationaux liés aux argiles à savoir : la diffraction des rayons X (DRX), fluorescence X (FRX), spectroscopie infrarouge (IR) et microscopie électronique à balayage (MEB). Ensuite par des analyses géotechniques telles que la granulométrie, casagrande, pressiométrie, gonflement.

Les résultats obtenus à partir des analyses (DRX, FTIR et MEB) ont révélé une paragenèse à dominance kaolinitique associée à l'illite, la chlorite, interstatifiés et smectite comme minéraux argileux et le quartz, feldspath, plagioclases, calcite, associés aux traces d'hématite, sidérite comme minéraux non argileux. Dans l'ensemble, ces proportions sont variables d'un site à l'autre. Les analyses chimiques des éléments majeurs montrent que les argiles de la région d'Azzaba sont constituées principalement par des oxydes avec une teneur élevée en silice (SiO_2), en alumine moyenne (Al_2O_3), en hydroxydes de fer (Fe_2O_3) élevée et en alcalins (K_2O) et en alcalino-terreux (CaO , MgO) relativement bas. Les propriétés physiques quant à elles montrent une granulométrie assez fine, suivant leur plasticité, elles se classent dans le groupe d'argiles non plastiques et ne présentent aucun degré d'expansivité.

Mots-clés : argiles sous numidiennes, minéralogie, géochimie, propriétés physiques, Azzaba.

ABSTRACT

The present work intervenes in order to determine the mineralogical composition, chemical composition of sub-numidian clays and physical characterization of quaternary formations and numidian formations.

For this reason, a sampling campaign has been done through these formations. Clays samples were collected from Azzaba area, they were prepared then analyzed by different methods according to international protocols related to clays namely: X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), infrared spectroscopy (IR) and scanning electron microscopy (SEM). Then by geotechnical analyzes such as granulometry, Casagrande, pressiometry, swelling.

The results obtained from the analyzes (XRD, XRF and SEM) revealed a paragenesis dominated by kaolinitic associated with illite, chlorite, interstratified and smectite as clay minerals and quartz, feldspar, plagioclase, calcite, associated with traces of hematite, siderite as non-clay minerals. Overall, these proportions vary from site to site. The chemical analyzes of the major elements show that the clays of the Azzaba region consist mainly of oxides with a high content of silica (SiO_2), medium alumina (Al_2O_3), high iron hydroxides (Fe_2O_3) and alkalis (K_2O) and alkaline earth (CaO , MgO) relatively low. The physical properties show a fine grain size, according to their plasticity, they are classified in the group of non-plastic clays and do not have any degree of expansiveness.

Keywords: Numidian clays, mineralogy, geochemistry, physical properties, Azzaba.

ملخص:

يهدف هذا العمل لتحديد التركيب المعدني والكيميائي للغضال تحت نوميدي ، التوصيف الفيزيائي للتكوينات الأخيرة والتكوينات النوميديّة.

لهذا هناك حاجة إلى إتباع منهجيتين وهما : العمل الميداني والمخبري ، ثم أخذ العينات من خلال التشكيلات الجيولوجية ، ثم جمع عينات من الغضال من منطقة عزابة ، ثم تحضيرها وتحليلها بواسطة طرق تحليل مختلفة وفقا للبروتوكولات الدولية المتعلقة بالغضال وهي :

- حيود الأشعة السينية.

- مضاد x

- مطيافية الأشعة تحت الحمراء.

- المسح المجهر الإلكتروني.

ثم عن طريق التحليل الجيوتقني ، مثل : قياس حجم الحبيبات ، قياس الضغط ، التورم. النتائج التي تم الحصول عليها من التحليلات المذكورة سابقا كشفت عن الهيمنة الكاولينية بالارتباط مع الايليت ، الكلوريت ، الطائفة بينية ، السمكتيت كمعادن طينية مع الكوارتز ، الفلسبار ، البلاجيوجلاز ، الكالسيت متعلق بآثار الهيماتيت ، سيديريت كمعادن غير طينية عموما ، هذه النسب تختلف من موقع لآخر.

تظهر التحاليل الكيميائية للعناصر الرئيسية أن غضال منطقة عزابة يتشكل أساسا من أكاسيد مع محتوى سيليسي عالي ، ألوميني متوسط ، هيدروكسيدات الحديد عالية ، القلوية والقلوية الأرضية منخفضة نسبيا، أما بالنسبة للخصائص الفيزيائية فإنها تظهر رفاعة حجم الحبيبات إلى حد ما وفقا لليونة الخاصة بهم ، يتم تصنيفها في مجموعة الغضال الغير بلاستيكي وليس لهم أي درجة من التوسعة.

الكلمات الرئيسية :

الغضال تحت النوميدي ، جيوكيمياء ، علم المعادن ، الخصائص الفيزيائية ، عزابة.

INTRODUCTION GENERALE

Le choix du sujet vient dans le cadre de la modernisation de la voie ferrée Annaba-Ramdane Djamel (pour la construction d'une ligne ferroviaire de 95 km). Le projet exige une connaissance rigoureuse du milieu naturel dans lequel se développeront les interventions et plus particulièrement une connaissance des caractéristiques géologiques du territoire.

D'une part, il est nécessaire d'étudier le comportement des divers matériaux face à la nouvelle situation et d'autre part d'identifier tous ces processus, matériaux et phénomènes qui peuvent affecter négativement les travaux. Le premier objectif de l'étude géologique consiste précisément à définir de manière détaillée et qualitative de tous ces aspects, et ce sur la base des techniques géologiques conventionnelles. Ce travail s'inscrit alors dans le cadre général de l'étude de différentes caractéristiques technologiques des formations géologiques surtout les formations argileuses. Il constitue un apport scientifique dans la connaissance et la caractérisation des formations argileuses sous numidiennes du Nord Est de l'Algérie et plus particulièrement de la région d'Azzaba. Au vu d'identification de ces formations, plusieurs méthodes de caractérisation minéralogique, géochimique et physique viennent contribuer à une meilleure reconnaissance de ces formations argileuses. Du point de vue géologique, ces formations argileuses sont des roches sédimentaires, résiduelles ou alluvionnaires composées pour une large part de minéraux spécifiques, qui sont des aluminosilicates plus ou moins hydratés, eux-mêmes nommés argiles (*Millot, 1964*). Leur étude nécessite une grande connaissance de leurs propriétés et de leurs comportements que l'ingénieur doit maîtriser pour faire face aux problèmes courants liés au dimensionnement, à la construction, à la stabilité et à la pérennité des ouvrages.

Pour réaliser ce travail, deux démarches ont été nécessaires, à savoir les travaux de terrain et les travaux de laboratoire. La description des affleurements géologiques a constitué les travaux de terrain après avoir décrit un cadre géologique régional de référence expliquant les caractéristiques géologiques détaillées du secteur en identifiant tous les ensembles lithologiques, ainsi que la détermination de leur développement dans l'espace.

Les échantillons prélevés ont été caractérisés au laboratoire suivant les standards internationaux relatifs aux argiles dans le but d'identification de la composition minéralogique et chimique. Plus spécifiquement, l'étude vise la variation des faciès, l'assemblage minéralogique et géochimique. Les données se sont enrichies également par des informations sur les propriétés physico-chimiques et géotechniques de toutes les formations rencontrées dans le site d'étude.

INTRODUCTION GENERALE

Le manuscrit s'articule autour de cinq chapitres.

- Le premier chapitre comprend des généralités sur la zone d'étude ; il est nécessaire de décrire le contexte naturel de la région, en touchant le cadre géologique régional et local décrivant la lithologie rencontrée ;
- le deuxième chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les argiles ;
- le troisième chapitre est consacré à la présentation de la partie expérimentale, en développant les différentes méthodes expérimentales (appareillage) utilisées au laboratoire.
- La présentation des résultats obtenus fait l'objet du quatrième chapitre ; il s'agit de caractériser les différents échantillons collectés des sites sur lesquels porte cette étude. Pour cela, nous avons utilisé les méthodes de caractérisation géochimique et minéralogique classiques telles que : la diffraction des rayons X, la spectroscopie infrarouge, la fluorescence des rayons X et la microscopie électronique à balayage. L'association de ces techniques analytiques a permis de préciser la nature et l'abondance des différentes phases minérales des argiles. S'ajoute à ça des méthodes de caractérisation physique ou géotechnique, non seulement pour les argiles sous numidiennes mais aussi pour les formations superficielles telles que : la granulométrie, la limite d'Alterberg, gonflement,...etc.
- Le dernier chapitre est essentiellement consacré aux interprétations et aux discussions des résultats.
- La thèse s'achève par une conclusion générale qui vient rappeler les résultats obtenus et les principaux apports de cette étude.
- Les références bibliographiques et les annexes sont reportées à la fin du manuscrit.

GENERALITES

INTRODUCTION

Le présent chapitre porte sur la région d'étude qui se situe au Nord-Est de l'Algérie. Il est nécessaire de présenter les caractéristiques climatiques, hydrologiques, géomorphologiques, géologiques, et anthropiques de la région ainsi que de donner quelques aspects particuliers dans chaque sites. Afin d'assurer la réalisation des objectifs principaux, il a été nécessaire d'établir un cadre géologique régional de référence qui explique les caractéristiques géologiques de détail.

I. LOCALISATION :

La zone d'étude se trouve au Nord-Est de l'Algérie entre Skikda à l'ouest et Annaba à l'est. Située à 80 Km au Nord-Est de Constantine et à 67 Km au Sud-Ouest d'Annaba, elle s'étend de Aïn Charchar jusqu'à Ramdan Djamel (**Fig.1**) et intègre les principales localités à savoir localité d'Aïn Charchar ($36^{\circ}43'52''N$ et $7^{\circ}13'11''E$) peuplée d'environ 15 725 habitants ; de Menzel El Abtal ($36^{\circ}73'33''N$ $7^{\circ}9'00''E$) d'Azzaba ($36^{\circ}44'00''N$ $7^{\circ}06'00''E$) peuplée de 56 922 habitants ; Ras El Maa ($36^{\circ}69'68''N$ $7^{\circ}01'10''E$) qui comprend Djebel Hellala et Djebel Guassaba et enfin Tarfaya. Sur le plan administratif, ces sites appartiennent à la daïra d'Azzaba dans la wilaya de Skikda.

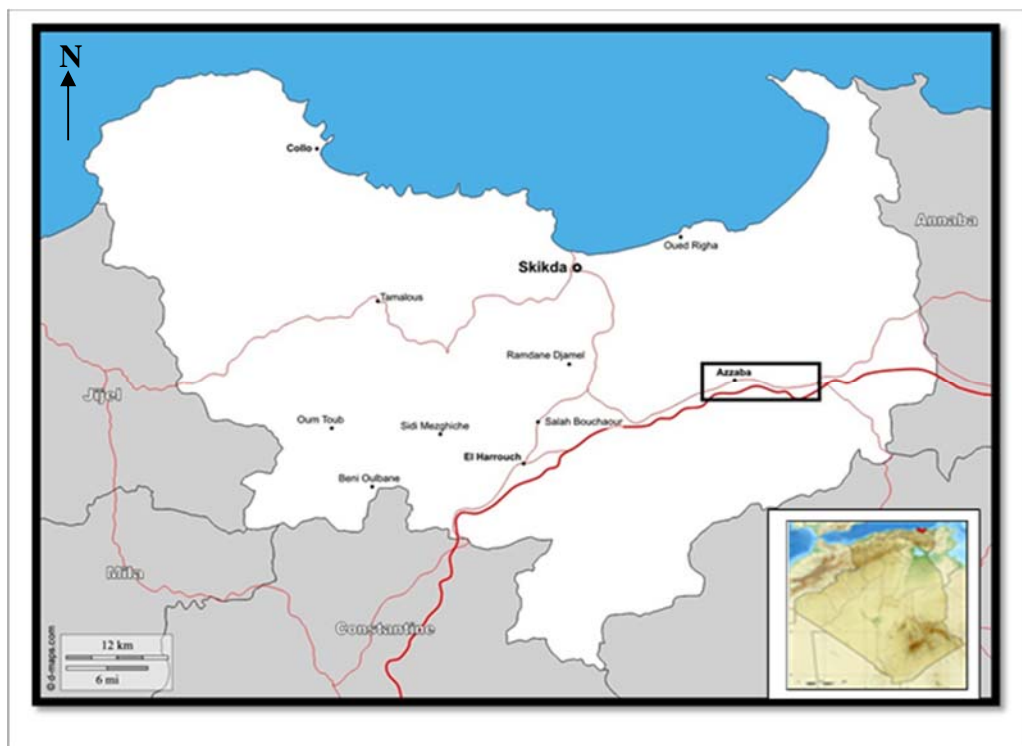


Fig. 1. Localisation géographique de la zone d'étude

II. CLIMAT ET VEGETATION :

Du point de vue climatique, la région est dominée par un climat dit de type méditerranéen, relativement doux et caractérisé par :

- Une saison chaude et sèche s'étalant sur cinq mois, de Mai jusqu'à Septembre caractérisée par une température moyenne mensuelle de l'ordre de 23°C ; pendant cette saison arrivent des vents chauds (sirocco) du Sud.
- Une saison froide et humide qui va d'Octobre jusqu'à Avril, caractérisée par une température moyenne saisonnière de l'ordre de 18 °C, avec une précipitation moyenne de l'ordre de 700 mm. **(Fig. 2), (Tableau 1).**

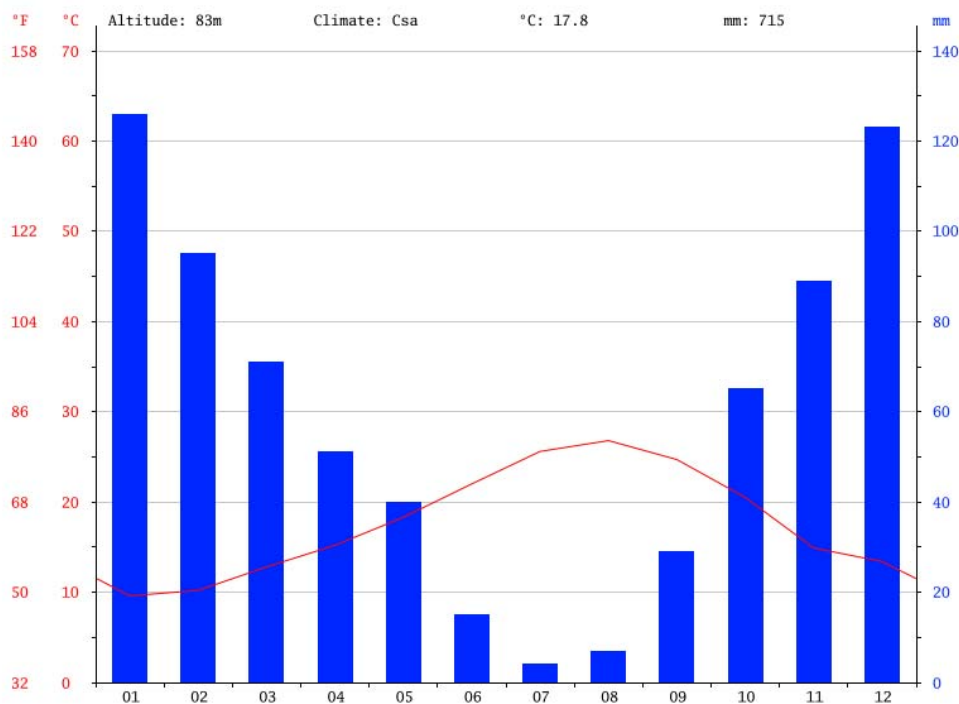


Fig. 2 : Histogramme des précipitations et températures moyennes de la zone d'Azzaba

<https://fr.climate-data.org/location/44205/>

Cette abondance de pluie explique également le vaste réseau hydrographique qui est constitué par les cours d'eau permanents et qui alimente les réserves en eau souterraine sous forme de nappes phréatiques. Ces cours d'eau sont très nombreux ; on cite Oued Fendek, Oued Saf Saf et Oued Guessaba. Ces pluies irrégulières et abondantes provoquent aussi une érosion importante.

A la faveur de ces conditions climatiques, il s'est développé une végétation typique dans la région, se traduisant sur le terrain par la densité des forêts de chênes lièges, d'un maquis et des oliviers.

Tableau 1 : Températures et précipitations annuelle de la région d'Azzaba

<https://fr.climate-data.org/location/44205/>

Mois /T	janv	fév	mars	avril	mai	juin	juill	aout	sept	octo	Nov	déc
Température moyenne(°C)	9.6	10.2	12.8	15.2	18.3	22	25.6	26.8	24.7	20.5	14.9	13.4
Température minémale moyenne (°C)	5.6	6	8	10.2	13.3	16.8	20.1	21.6	20.1	15.9	10.9	9.6
Température maximale (°C)	13.7	14.5	17.6	20.2	23.3	27.2	31.1	32.1	29.4	25.1	19	17.2
Température moyenne (°F)	49.3	50.4	55	59.4	64.9	71.6	78.1	80.2	76.5	68.9	58.8	56.1
Température minémale moyenne(°F)	42.1	42.8	46.4	50.4	55.9	62.2	68.2	70.9	68.2	60.6	51.6	49.3
Température maximale (°F)	56.7	58.1	63.7	68.4	73.9	81	88	89.8	84.9	77.2	66.2	63
Précipitation (mm)	126	95	71	51	40	15	4	7	29	65	89	123

III. GEOMORPHOLOGIE ET RELIEF

La morphologie du secteur d'étude présente deux zones distinctes :

- L'une correspond à une zone surélevée formant les montagnes environnantes ;
- L'autre correspond à la dépression d'Azzaba.

La zone de dépression forme la vaste plaine d'Azzaba ; elle est orientée NE-SW et comprise entre le massif métamorphique au Nord et les massifs de la chaîne numidique au Sud.

Le relief est fortement accidenté et caractérisé par de basses montagnes faiblement disloquées.

Les sommets sont arrondis aux pentes douces alternant avec des vallées assez larges. Le relief est peu marqué avec des crêtes d'altitudes moyennes voisines de 90 à 150 m.

Sur le plan géomorphologique, Aïn Charchar montre un relief plat avec de légères ondulations dues à la nature lithologique et à la topographie. Au niveau du village de Menzel el Abtal, on trouve une plaine alluvionnaire qui communique avec celle de Menzel Bendich jusqu'au Djebel Hellala. Ce dernier, est un relief abrupt avec des hautes pentes ensuite un relief plat qui constitue la terrasse alluviale de la rivière Guessaba.

IV. RESEAU HYDROGRAPHIQUE

La zone d'étude est constituée par un dépôt hétérogène d'argile sablonneuse et des blocs de grès, qui repose sur des formations argileuses pratiquement imperméables (**Photo 1 et 2**). En générale, ce sont des aquifères très limités et reposent sur un substratum argileux du numidien imperméable. C'est uniquement dans les zones de faible pente et avec des recouvrements alluviaux de faible épaisseur, que le niveau phréatique se trouve près de la surface.

La lithologie argilo-sablonneuse des formations superficielles et la présence d'une pente favorisent le ruissellement quand le sol est saturé.

On a localisé trois parties qui répondent à cela :

- Entre le croisement avec la route « RN-44 » et la tête du tunnel de Ras el Ma.
- Entre le croisement de la route qui monte à Sonelgaz et Tarfaya.
- Entre la sortie du déblai de Tarfaya et jusqu'au croisement de la route menant à Skikda.

Les matériaux représentent une zone de passage pour l'eau par infiltration et par courant direct.



Photos 1, 2 : Exemple de marécage, le substratum est constitué d'argiles numidiennes

Le réseau hydrographique qui est très dense, marque le trait commun des cours d'eau du littoral algérien, avec un écoulement superficiel et de courte durée, dû essentiellement à la période pluvieuse. Constitué surtout par des oueds temporaires, le principal oued est l'Oued Fendek, qui prend sa source dans la chaîne numidique. En amont, il a une direction subméridienne et en aval, dans la dépression d'Azzaba, sa direction est proche de celle d'oued Saf Saf qui se retrouve à l'ouest.

V. ACTIVITE ANTHROPIQUE

Vu la nature montagneuse de la région, la population se concentre principalement dans les dépressions où elle active dans l'agriculture (cultures maraichères, céréales, oliviers).

La région d'Azzaba qui constitue un centre urbain plus ou moins développé, présente actuellement une extension industrielle assez importante favorisant ainsi une concentration de la majorité de la population environnante.

La présence d'infrastructures développées, notamment l'Oléoduc, le Gazoduc, les chemins de fer, les ports maritimes, l'axe routier reliant Constantine à Annaba ont permis l'implantation de grandes entreprises.

VI. GEOLOGIE REGIONALE ET TRUCTURALE

VI.1. HISTORIQUE DES TRAVAUX DANS LA REGION

Les premiers travaux géologiques exécutés dans la région remontent à plus d'un siècle. Le gisement de barytine, mercuro-polymétallique de Grayer a été connu dès l'époque romaine. Les ruines romaines et les vestiges d'anciennes mines sont les principaux témoins.

En 1850, ce même gisement a fait l'objet de travaux de creusement de galerie effectué par Bayer. Depuis et durant toute l'époque coloniale, plusieurs travaux ont été réalisés.

En 1853, le gisement de mercure de Ras El Ma a été mis en évidence, son exploitation a débuté en 1861 et s'est achevée en 1950 avec des périodes d'interruption.

En 1881 Tissot a fait une étude par itinéraires de reconnaissance reportés sur la première carte géologique du Département de Constantine avec une notice explicative.

Le premier levé géologique au 1/50.000 des feuilles de Jemmapes (Azzaba) N° 32, de Hammam Meskhoutine N° 53 et celle de Saint Charles (Ramdane Djamel) N° 31 au 1/30.000 a été effectué par Delau durant la période allant de 1932 à 1937.

Les résultats ont été présentés dans une monographie, publiée en 1938. Delau a apporté certaines précisions concernant la stratigraphie et a essayé de donner une explication aux structures tectoniques de la région.

En 1952, sur la demande du BRGM (bureau de la recherche géologique et minière), la firme (Crelus) a exécuté des travaux géophysiques par la méthode (TURAM) sur le gisement de Mra-Sma et mis en évidence deux groupes d'anomalies en mercure, l'un d'eux lié à de petites ruptures, l'autre à des filons polymétalliques. Plus tard, les travaux de *Durand-Delga et al., (1955)* ont été d'une grande importance pour la compréhension de la structure et du développement paléogéographique de l'Algérie du Nord.

En 1962 *Kieken (1962)* a publié le schéma tectonique de l'Algérie du Nord, où il a mis en relief cinq nappes tectoniques et de grandes failles.

Au milieu des années soixante, en collaboration avec l'université de Paris, Raoult et Vila ont commencé à effectuer des études structuro- paléogéographiques dans la partie Est de la chaîne Numidique et des régions limitrophes. Ces travaux ont été poursuivis jusqu'en 1972 et furent achevés par l'établissement du levé géologique au 1/50 000.

En 1964, par décret présidentiel a été créé le BAREM (Bureau Algérien de la Recherche et d'Exploitation Minière), devenu en 1967 SONAREM (Société Nationale de la Recherche et d'Exploitation Minière) qui a conclu un contrat avec l'URSS concernant l'exécution des travaux de prospection géologique dans la région.

Pendant la période 1966 – 1970, les travaux de recherche minière et les levés géologiques effectués par les soviétiques sur une vaste superficie (90 Km²) du versant de la chaîne Numidique ont permis de délimiter la zone Nord Numidique, de découvrir les gisements de mercure et de mettre en évidence 27 indices mercuriels, polymétalliques et de cuivre.

Depuis, la zone d'Azzaba a fait l'objet de plusieurs études non seulement par les ingénieurs miniers et hydrogéologues mais aussi représente un pôle de la recherche pour les enseignants chercheurs et doctorants, on cite parmi eux : *Raoult J.F 1975, Bouaroudj M.T. 1986, Mezghache H. 1989.*

VI.2. Géologie régionale

La région étudiée représente une partie de la chaîne des Maghrébides dont la structure est extrêmement complexe et compris dans le domaine géologique tellien. C'est un domaine des grands charriages, appartenant à la chaîne alpine qui constitue l'ossature des reliefs de toute l'Algérie septentrionale au Nord de l'accident Sud atlasique.

Cette chaîne s'étend du Détroit de Gibraltar jusqu'au Nord de la Calabre (Italie) sur plus de 2000 km de long, en passant par le Rif marocain, l'Atlas littoral d'Algérie (Kabylie et Tell), de Tunisie (Kroumirie - Nefza), la Sicile et enfin la Calabre (**Fig. 3**).

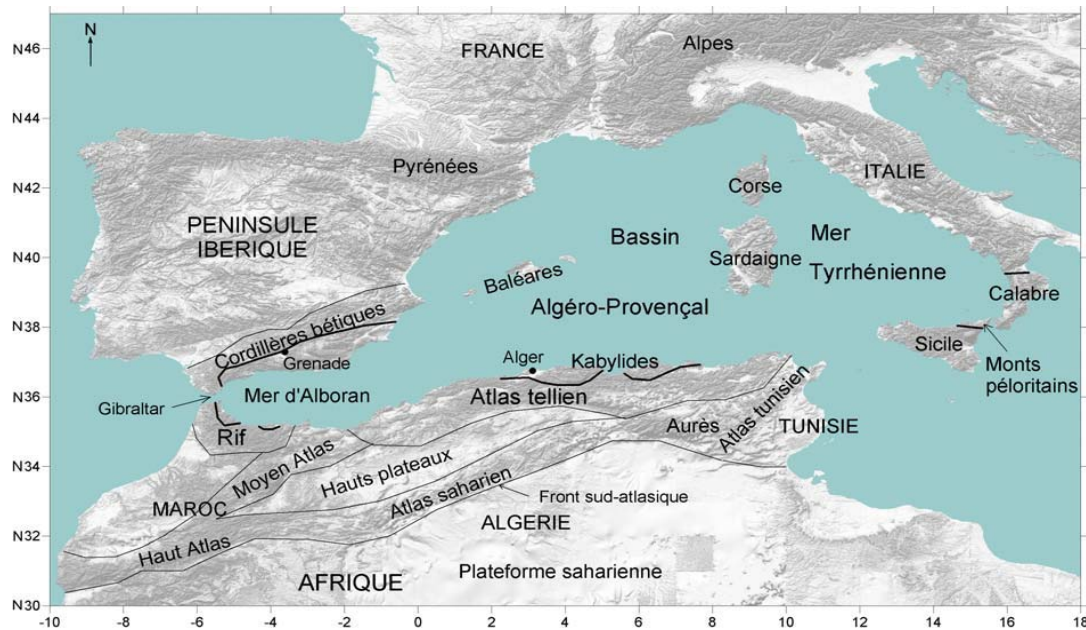


Fig. 3 : Carte de localisation des principales unités géologiques composant le pourtour de la Méditerranée Occidentale, *Domzig et al. (2006)*

Kieken (1962), *Raoult (1974)*, *Bouillin (1977)* et *Vila (1980)* ont défini l'ensemble des structures produites par l'orogénèse alpine, comme la superposition d'unités alloctones charriées sur l'autochtone présaharien. Cet ensemble peut être subdivisé en trois ensembles structuraux, qui sont les zones internes, le domaine des flyschs et les zones externes qui sont couverts par du matériel mio-plio-quaternaire discordant. (**Fig. 4**).

VI.3. Etude structurale :

VI.3.1. Zones internes

Ce domaine est représenté principalement par les massifs cristallins, composés par des roches métamorphiques (gneiss, micaschistes, marbres et schistes) et sont bordés au Sud par des formations sédimentaires de couverture en écaillés appelées dorsale kabyle par *Durand Delga (1969)*.

VI.3.1.1. Socle kabyle :

Le socle comprend d'ouest en est, les massifs du Chenoua et d'Alger, la grande kabylie et la petite kabylie (entre Jijel et Skikda). Il est composé de roches métamorphiques cristallophyliennes paléozoïque (principalement des gneiss). Bordé au sud par une couverture sédimentaire formée surtout de roches carbonatées d'âge secondaire-tertiaire moyen, appelée Dorsale Kabyle ou chaîne calcaire ; cette dernière est intensément écaillée. Ce socle chevauche la dorsale kabyle.

Il est par endroit recouvert en discordance par des dépôts détritiques (principalement des molasses conglomératiques) d'âge Oligocène supérieur et Miocène inférieur appelés Oligo-Miocène Kabyle (OMK).

Ce socle comporte deux ensembles :

- Un ensemble supérieur : essentiellement phylladique, surmonté en discordance par des formations non métamorphiques transgressives d'âge silurien (*Durand Delga, 1955*) ;
- Un ensemble inférieur : essentiellement gneissique ; constitué de paragneiss, d'orthogneiss et de gneiss fins ou ocellés. Il admet par endroit de puissantes intercalations de marbres et d'amphibolites.

VI.3.1.2. Dorsale kabyle : (chaîne calcaire)

Elle correspond à la couverture sédimentaire Mésozoïque du socle. Elle est composée de calcaire du Lias et de l'Eocène, de dolomies du Trias au Lias inférieur, de schistes primaire, de grès permien, et des roches détritiques du nummulitique supérieur (*Durand Delga, 1969*). Cette chaîne calcaire (*Glangeand, 1932*), affleure à cap Ténès, au Nord de Constantine (El-Kantour), à Bekouche Lakhdar (Est de la zone d'étude) et à Djebel Ghedir au sud de la zone d'étude et au Sud d'Annaba (Djebel Safia). Cette dorsale est subdivisée du Nord au Sud en 3 unités, à savoir : Dorsale interne ; dorsale médiane et Dorsale externe.

VI.3.1.3. Domaine des flyschs :

Il est caractérisé par des sédiments allant du Crétacé inférieur jusqu'à l'Oligo-Miocène inférieur. Ce sont des dépôts de mer profonde, mis en place, généralement, par des courants de turbidité. Il semble s'agir surtout de formations de plaines abyssales (*J-P. Bouillin, 1986*). Selon *Bouillin et al. (1986)*, on distingue du Nord au Sud du bassin, les flyschs maurétaniens et les flyschs massyliens, différents les uns des autres par leur position primitive et par leurs alimentations. L'ensemble est surmonté par la nappe numidienne d'âge Oligocène à Burdigalien basal.

Ce domaine est plus développé au nord et au sud d'Azzaba ; en effet, il occupe une place importante dans la structure géologique de la région. L'affleurement de ses formations qui sont des brèches calcaires, grès calcaires et des argilites se présente sous forme de couverture, dont la corrélation de certaines de ses parties est difficile à établir.

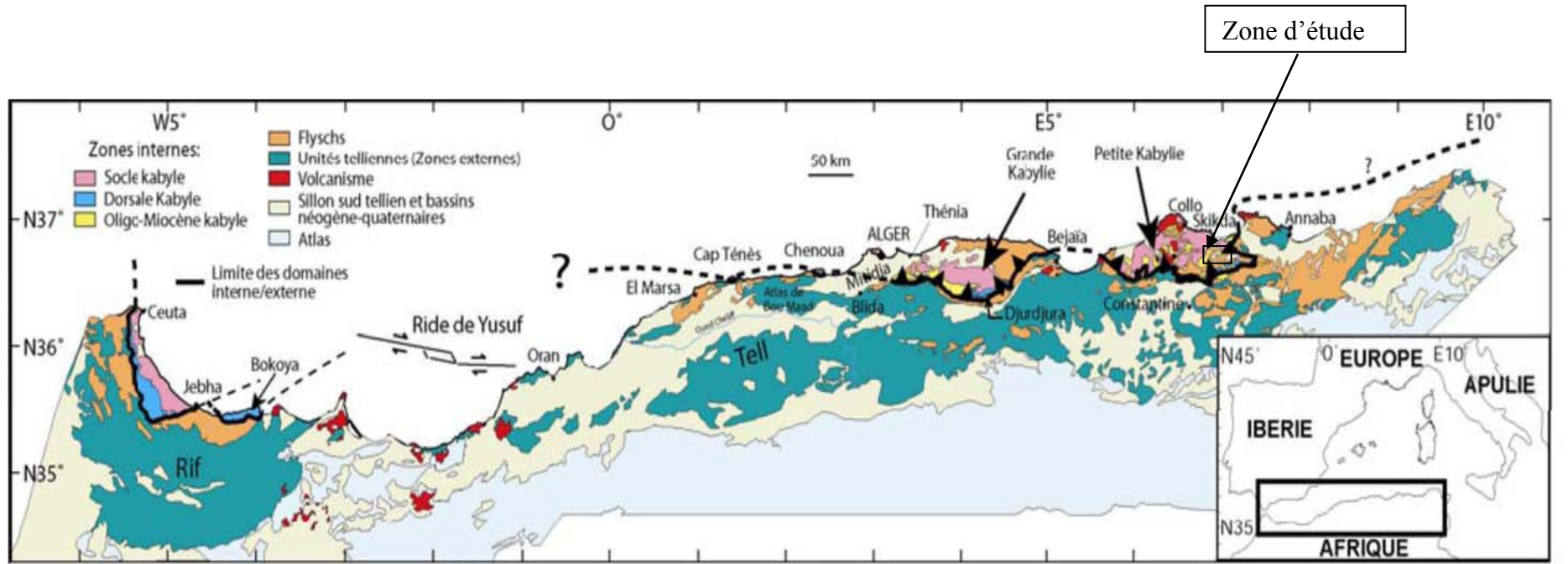


Fig. 4 : Position des différentes unités géologiques des Maghrébides (d'après Domzig, 2006)

VI.3.1.4. La nappe numidienne :

S'étalant sur plus de 2000 Km (de l'Espagne jusqu'à l'Italie), le terme Numidien a été proposé par *Ficher (1890)*. La série numidienne, caractérisée par des grès grossiers, a été longtemps considérée comme discordante sur les niveaux antérieurs. Son âge est compris entre l'Oligocène supérieur et le Miocène inférieur (Burdigalien inférieur).

Les formations gréso-argileuses numidienne constituent une nappe de charriage surmontant toutes les unités telliennes, les nappes de flyschs et le socle.

En divers points de l'Algérie orientale, le Numidien est caractérisé par la trilogie suivante de bas en haut :

- Une série appelée sous numidienne à Tubotumaculum d'une puissance qui va jusqu'à 150 mètres, constituée par des argiles versicolores de teintes vertes ou rouge-violacé. Dans la grande Kabylie, ces argiles ont fourni des associations pélagiques. Les datations donnent un âge Oligocène moyen à supérieur (*Magnés & Reynond 1972*).
- Quelques 400 mètres de grès quartzique avec un ciment siliceux sous forme de bancs métriques. Les grains sont hétérogènes en alternance avec des argiles verdâtres et rougeâtres parfois calcaires datés de l'Aquitaniens.
- Une série connue sous le nom supra-numidienne, constituée par des argiles et des marnes avec des niveaux à silex parfois calcaires.

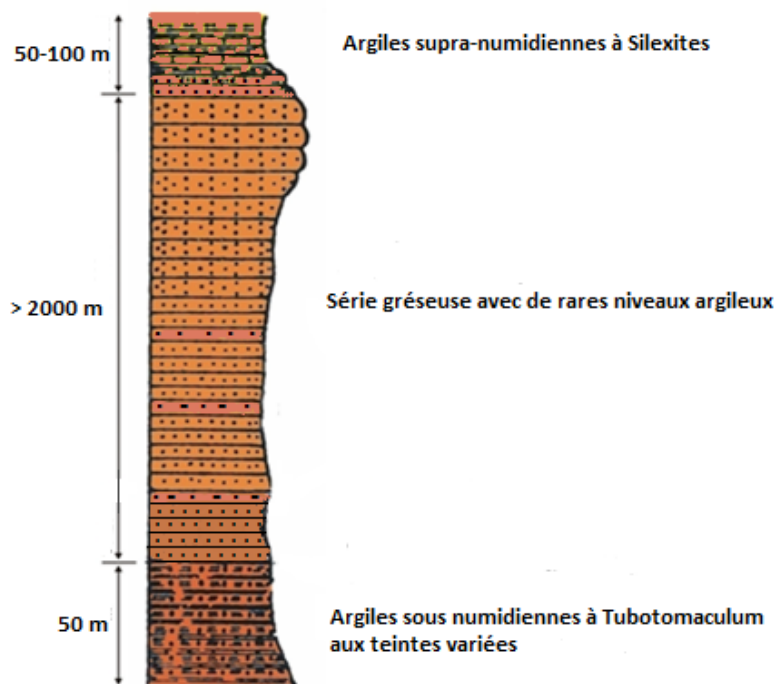


Fig.5 : Colonne lithologique du flysch Numidien in *Chouabbi, 1987*

VI.3.2. Zone externe

L'atlas tellien ou nappes telliennes s'étendent de l'Oranie jusqu'à la Tunisie et chevauchent l'atlas saharien avec des pendages nord (*Bracène, 2002 ; Bracène et Frizon de Lamotte, 2002*), *Benaouali Mebarek et al., (2006)*. Les unités telliennes forment un empilement complexe de nappes surmontant au sud l'autochtone présaharien des hautes plaines (zone haute et rigide qui sépare les chaînes littorales de l'Atlas saharien). On distingue du Nord vers le Sud :

- Les unités ultra-telliennes ;
- L'ensemble tellien s.s. ;
- Les unités méridionales à calcaires à Nummulites ;
- L'avant pays para-autochtone ;
- Le môle néritique constantinois ;
- Le sillon écaillé des Sellaoua ;

Cet aperçu structural, nous a permis d'avoir une idée globale sur la position de différentes formations géologiques et de leur extension dans l'espace.

VII. TECTONIQUE

Ce sont les derniers mouvements tectoniques compressives du Cénozoïque et du Quaternaire qui sont responsables de la structure du relief actuel.

La tectonique cénozoïque débute à l'Eocène par une compression N120°E, responsable d'un plissement d'orientation N20°-30°E observé dans les formations anté-miocènes connue sous le nom de la phase atlasique.

Durant le Miocène, deux phases tectoniques compressives sont mises en évidence :

- Une phase N20°- 30°E est rattachée à la mise en place des nappes d'âge Miocène inférieur ;
- Une phase N170°E, des déformations plio-quaternaires sont mises en évidence et marquées par la superposition d'une phase distensive N140°-150°E caractérisée par un plissement NE-SW. (*Raoult, 1974*) ; *Vila, 1974*).

L'examen du réseau d'accidents cassants établi à l'issue de l'interprétation des données géophysiques à caractère régional révèlent trois types d'accidents : (**Fig. 6**).

✓ **Faïlle d'orientation NE-SW**

Dans la partie orientale de la petite Kabylie et d'après (Romanko, 1991) on peut parler d'âge « Hercynien » des failles de direction NE-SW ; ce sont elles qui contrôlèrent les intrusions de granitoïdes Hercynien.

✓ **Faïlles d'orientation E-W**

On distingue la faille d'El-Kantour qui paraît avoir joué dès la phase fini-lutétienne (Raoult, 1974) et la faille de Hammam Debbagh qui est considérée comme une limite entre la zone des flyschs et le bord sud de la dorsale Kabyle.

✓ **Faïlles d'orientation NW-SE**

Parmi cette catégorie de failles, on distingue la faille de zitemba (faïlle décrochante senestre) au nord d'Azzaba.

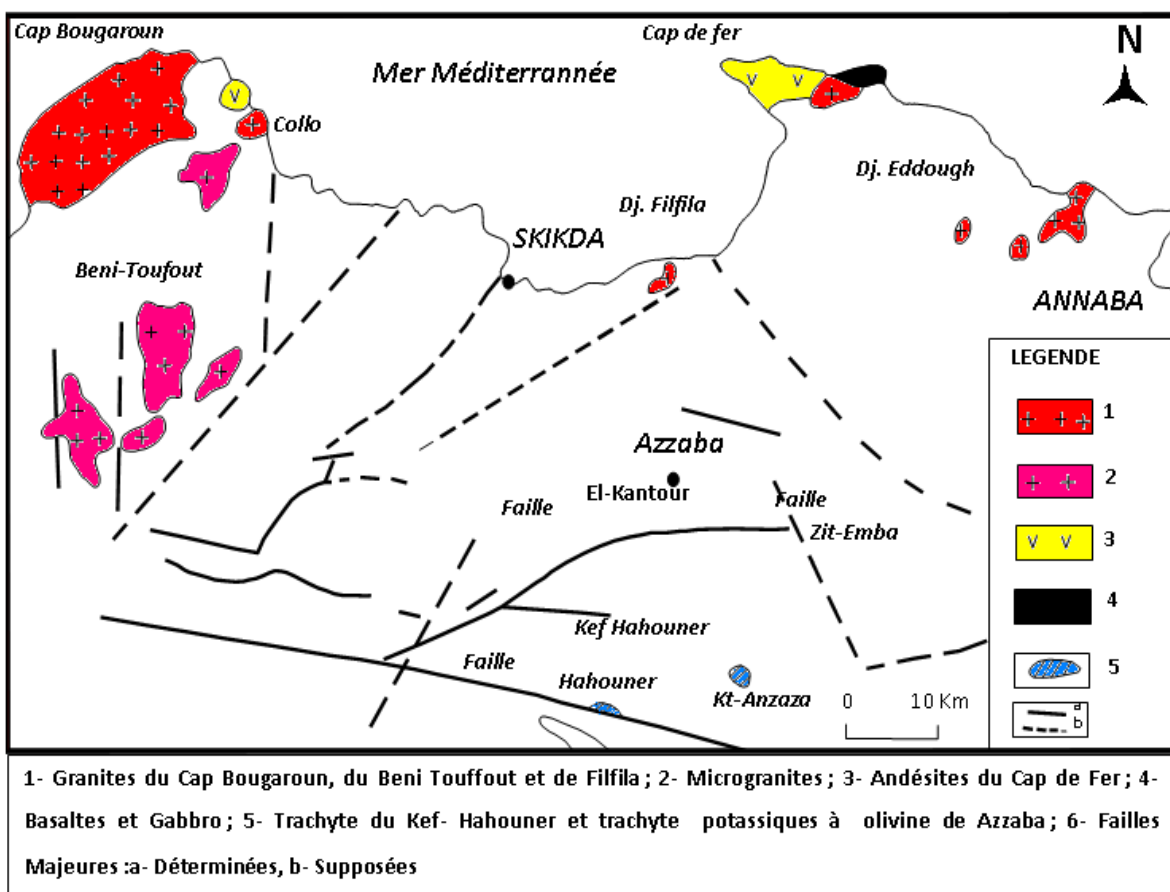


Fig. 6 : Position de quelques failles majeures, d'après Raoult (1974) ; Vila (1974) ; Durand Delga (1978) ; Bouaroudj (1986).

VIII. CADRE GEOLOGIQUE LOCAL

La zone d'étude qui se trouve dans la région de Skikda entre Bou Maiza à l'est et Ramdane Djamel à l'ouest correspond aux affleurements de la série sédimentaire (numidienne) d'âge tertiaire en plus des formations récentes du quaternaire (**Fig. 7**).

VIII.1. Numidien

On rencontre le numidien tout le long du secteur d'étude

Les formations numidiennes reposent en contact anormal sur les formations sous-jacentes probablement de type flyschs. Ces formations sont composés de bas en haut par :

- Des argiles versicolores à Tubotomaculum dites « sous-numidiennes »
- Une série gréseuse
- Des argiles à silexites appelées « supra-numidiennes ». On signale l'absence de cette série dans notre zone d'étude.

VIII.1.1. Les argiles sous-numidiennes

Ce sont des argiles de base de la série argilo-gréseuse. Elles sont de teintes vertes parfois rouge-violacées avec une épaisseur de l'ordre d'une cinquantaine de mètres. Généralement, à la base, on signale un faciès transgressif avec des conglomérats et de minces bancs gréseux.



Photo 3 : Aspect des formations argileuses sous numidiennes (prof. entre 17 et 20 m)

VIII.1.2. Les grès numidiens

Les grès numidiens affleurent sous forme de bancs d'épaisseur variable alternant avec des niveaux argileux (**Photo 4**). Ce sont des bancs décimétriques à métriques, leur grains sont hétérométriques de couleur brune. Les grès numidiens ne sont pas favorables à l'accumulation de l'eau en raison de leur alternance avec les argiles. Ce sont des grès grisâtres quand la roche est saine, et sablonneuses rougeâtres quand la roche est altérée.



Photo 4 : alternance des grès avec les argiles

Les grès à la surface sont souvent couverts par les formations colluvionnaires. Ces grès dans leur partie la plus superficielle sont très riches en oxydes de fer, lui conférant une couleur ocre (**Photo 5**). De même, près des fractures dans lesquelles il y'a une circulation d'eau, apparaissent généralement ces auréoles d'oxydation. Cette formation a fait une fonction de carcasse, qui a empêché l'érosion.

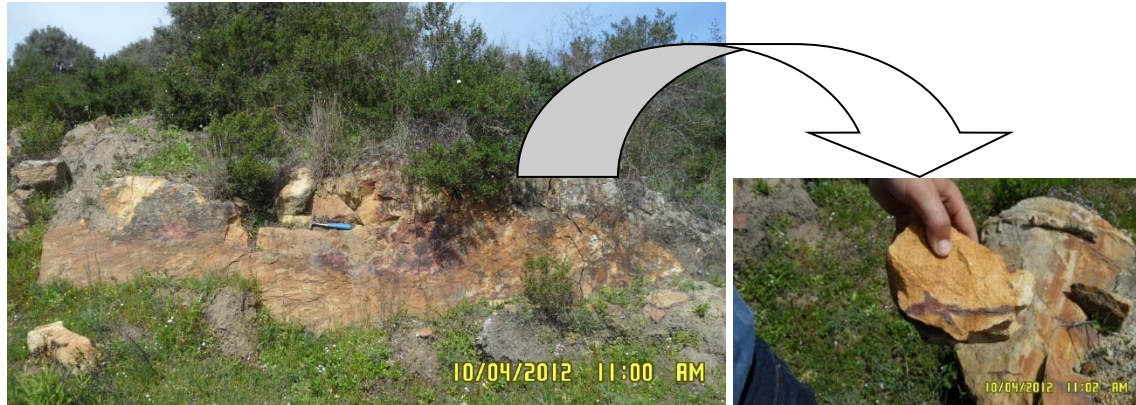


Photo 5 : banc de grès avec présence de niveaux oxydés



Photo 6 : aspect en sondage des grès du numidien

VIII.1.3. Quaternaire

VIII.1.3.1. Alluvions

Ce sont des sédiments déposés le long des cours d'eau dont l'origine est l'altération et l'érosion des roches en amont. Il s'agit des alluvions argilo-sableuses, bien développées au voisinage des cours d'eau (**Photo 7**). L'épaisseur des alluvions dépasse largement les quelques mètres et augmente au fur et à mesure qu'on s'approche du lit des oueds.



Photo 7 : aspect général des alluvions

VIII.1.3.1.1. Alluvions (argileux)

Ces dépôts constituent les terrasses des différents oueds. Ils sont constitués par une argile légèrement sablonneuse avec des traces de gravier gréseux (**Photo 8**). L'épaisseur de cette formation varie entre 1 et 5 mètres.



Photo 8 : aspect général des argiles alluvionnaires



Photo 9 : aspect en sondage des argiles alluvionnaires

VIII.1.3.1.1.2. Alluvions (sableux)

Ces formations n'apparaissent pas à l'horizon c'est-à-dire elle se trouve en profondeur (**Photo 10**). Ces matériaux sont rencontrés, généralement, à partir de 10 mètres de profondeur. Ils sont constitués par des sables fins argileux de couleur marron et jaunes avec des traces de gravier. Généralement, ce sont des niveaux à éléments grossiers, des poudingues et des galets dans une matrice argilo-sableuse (**Photo 11**).



Photo 10 : aspect en sondage des argiles sablonneuses



Photo 11 : poudingues et galets dans une matrice argilo-sableuses

VIII.1.3.2. Colluvions

Ce sont des formations récentes de base de pente résultant de l'altération et de l'érosion des roches en place (série argilo-gréseuse du numidien). On signale le long du secteur, en plus des blocs de grès, des couches d'un aspect de sable argileux. Ces dernières sont le résultat de l'altération des roches sous-jacentes, en particulier les argiles et les grès du numidien. Cette unité est rencontrée au niveau du Djebel Hellala dans laquelle on a observé une épaisseur qui varie entre 1 et 5m. L'érosion, la fracturation des bancs de grès et la présence d'une pente favorisent la naissance d'une couche constituée d'éboulis de pente sur les versants (**Photo 12**).



Photo 12 : photo montrant des surfaces d'érosion



Photo 13 : affleurement du manteau d'altération en surface



Photo 14 : affleurement du

manteau d'altération en sondage.

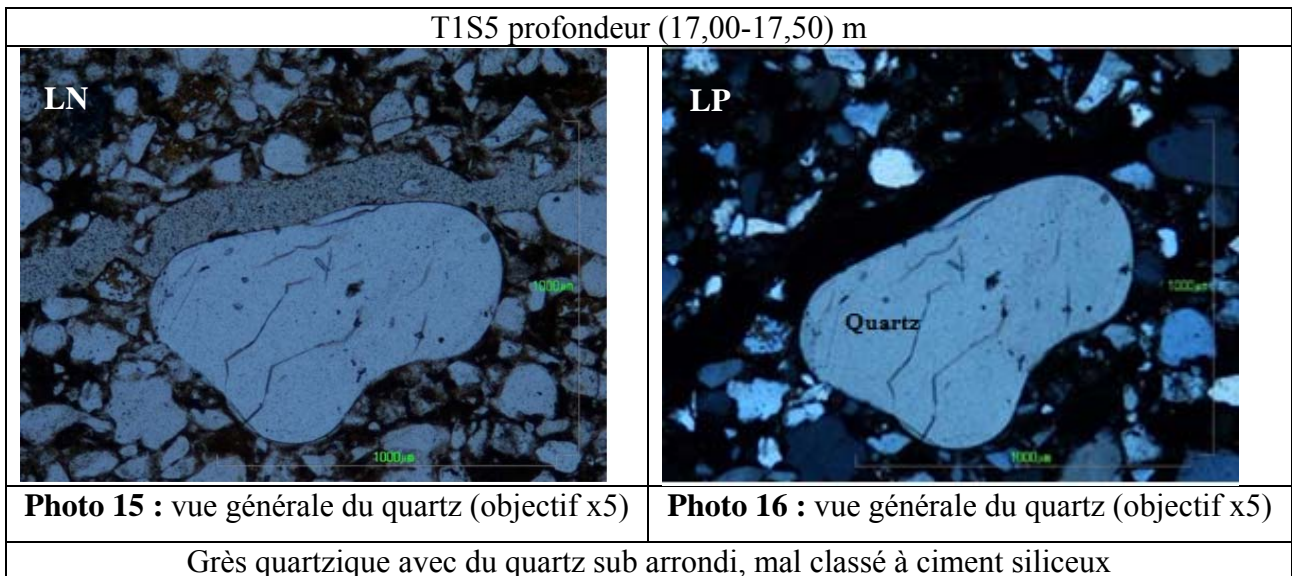
IX. ETUDE PETROGRAPHIQUE DES GRES

Cette étude nous a permis de décrire l'aspect pétrographique des grès du numidien de la région étudiée, pour cela il a fallu une observation de plusieurs lames minces confectionnées à partir des échantillons prélevés des tunnels à différentes profondeurs dont le but sera la détermination des caractéristiques suivantes :

- ✓ Les phases clastiques (pourcentages, formes, tailles, classement) ;
- ✓ Les phases liants (type, abondance).

La phase clastique est constituée de :

- Quartz qui est le plus abondant (environ 90%) avec un diamètre de 1 mm et granulométrie moyenne, le contour est sub-anguleux à subarrondi, le classement des clastes est moyen et parfois mal classé. Les contacts entre les grains de quartz sont de type : droit, convexe et suturé (**Photos 15 - 16**).
- Micas avec un pourcentage ne dépassant pas les 2%, ils sont représentés surtout par la biotite et la muscovite en baguettes coincées entre les grains de quartz (**Photos 17 - 18- 19 - 23**).



T1S5 profondeur (17,00-17,50) m	
<p>LN Biotite</p>	<p>LP Biotite</p>
Photo 17 : vue générale du quartz (objectif x2)	Photo 18 : vue générale du quartz (objectif x2)
Grès quartzique avec du quartz anguleux, moyennement classé à ciment siliceux	
T2S6 profondeur 14,45-14,78 m	
<p>LN Quartz</p>	<p>LP</p>
Photo 19 : vue générale du quartz (objectif x2)	Photo 20 : vue générale du quartz (objectif x2)
Grès quartzique avec du quartz sub arrondi, très mal classé à ciment siliceux	

T2S6 profondeur (23,74-30,00) m

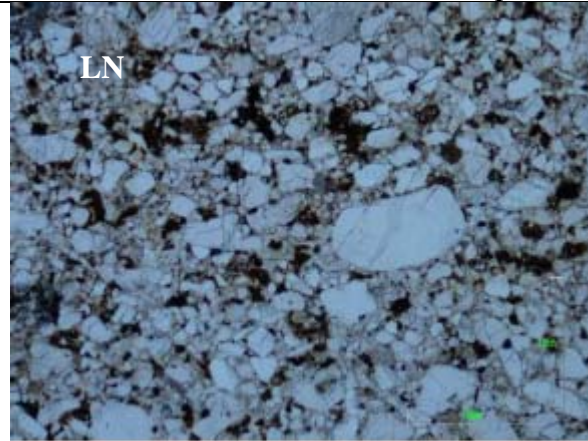


Photo 21 : vue générale du quartz (objectif x2)

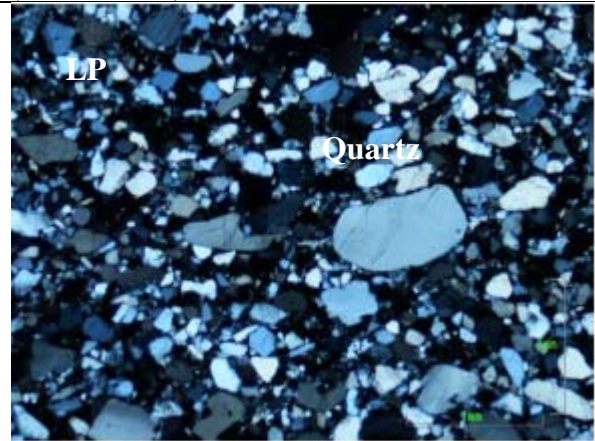


Photo 22 : vue générale du quartz (objectif x2)

Grès quartzique avec du quartz sub arrondi, mal classé à ciment siliceux

T2S6 profondeur 39,81-40,10 m

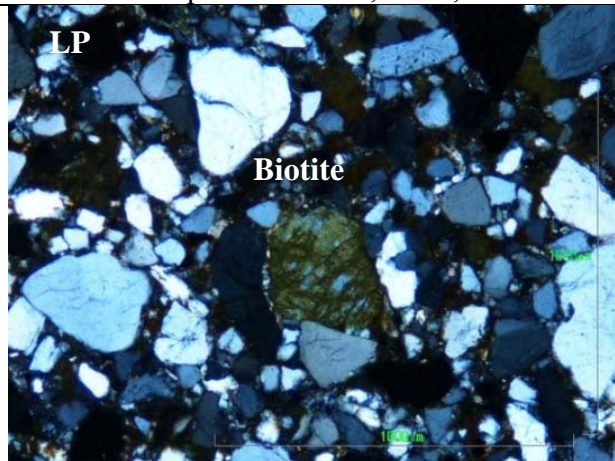


Photo 23 : vue générale du quartz et biotite (objectif x5) LP

Grès quartzique avec du quartz sub anguleux, mal classé à ciment siliceux

CONCLUSION

La région occupant la partie Nord Est de l'Algérie, entre Annaba à l'Est et Skikda à l'Ouest, est située dans la chaîne numidique ; elle est soumise à un climat méditerranéen (hiver doux et pluvieux et un été sec et chaud) avec une végétation marquée par la présence des forêts de chênes lièges, d'un maquis et d'oliviers. La région d'étude et du territoire voisin comprend quatre unités à savoir :

- Socle kabyle formant une zone étroite subdivisée d'après (*Vila, 1969*) en deux sous zones à savoir ; la sous zones intérieure qui confine au nord l'unité kabyle et la sous zones extérieure qui confine au Sud les unités de flysch ;
- Dorsale kabyle ;
- Domaine des flyschs ;
- La nappe numidienne.

Affectée par une tectonique parfois compressive et parfois distensive depuis le mésozoïque jusqu'à l'actuel, sa lithologie est constitué par une série argilo-gréseuse et une série gréseuse en plus d'un quaternaire observé par les dépôts qui se reposent sur le substrat numidien, sur des colluvions et sur la série numidienne.

Les affleurements observés sur terrain sont : des argiles grises et grises verdâtres ; grès quartzitiques ; dépôts de haute terrasse ; dépôts de colluvions argilo-sableuses ; dépôts d'alluvions argileux et dépôts d'alluvions sableux. Le sol est plus souvent argileux, qui se forment par altération et érosion des roches en place (série argilo-gréseuse du numidien). Ces dernières sont le résultat de l'altération des roches sous-jacentes en particulier les grès et les argiles du numidien. A partir de l'observation microscopique, il s'agit d'arénite quartzique dans une matrice siliceuse.

Etant donné que la région d'étude comporte plusieurs formations argileuses et sachant que la majorité des sols argileux est sensible au phénomène de gonflement et que cette sensibilité diffère en fonction de certaines propriétés. Pour mieux comprendre ce phénomène, nous allons essentiellement et volontairement développer dans le chapitre suivant, la partie relative à l'étude des minéraux argileux qui constituent le sol (classification, propriétés et mode de formation).

**REVUE
BIBLIOGRAPHIQUE SUR
LES ARGILES ET LES
MINERAUX ARGILEUX**

INTRODUCTION

Les sols argileux sont reconnus comme des sols sensibles aux variations hydriques pouvant engendrer des problèmes importants dans le domaine du génie civil, surtout dans les constructions des ouvrages (pont, tunnel,...). Ce phénomène nommé "retrait-gonflement" s'applique aux sols argileux et dépend de facteurs relatifs à la nature chimique et mécanique des constituants d'un sol argileux, à la composition minéralogique, la proportion de minéraux argileux, En effet, les sols à comportement gonflant sont ceux qui possèdent des minéraux argileux sensibles à l'eau, responsables de leur capacité à gonfler et à se rétracter après des variations de teneur en eau.

L'objectif de ce chapitre bibliographique est de définir ce que sont ces minéraux argileux ; nous ferons ressortir leurs structures, leurs classifications et leurs propriétés en analysant les différents critères jouant un rôle dans les processus de gonflement des sols argileux.

I. DEFINITION

Il existe plusieurs concepts pour définir les argiles, selon le producteur, selon l'utilisateur et selon la discipline considérée de l'ingénieur et du chercheur. Donc la définition des argiles dépend de l'intérêt qui est porté à une de ses catégories spécifiques.

Le mot argile aurait deux origines, l'une grecque par le mot "Argos" qui veut dire blanc ; l'autre latine par le mot "argilla" (*Caillère et al. 1982*). Dans les ouvrages de référence, il existe différentes propositions de définitions. Par exemple, *Eslinger & Peaver, (1988)* proposent de définir les argiles comme un minéral qui domine dans la fraction fine ($< 2 \mu\text{m}$) qui devient plastique à des teneurs en eau appropriées et qui durcit par séchage ou frittage (*Guggenheim & Martin, 1995*). Par contre, *Weaver, (1989)* regroupe tous les minéraux phyllosilicatés sans aucune connotation de taille et propose pour éviter les confusions d'utiliser le terme de "physils". Elles sont sous formes de petites paillettes ou phyllites (*Millot, 1964; Sigg, 1991*) et constituées de minéraux argileux et de minéraux non argileux. Suivant leur localisation dans l'espace, elles prennent les termes d'argiles sédimentaires dans les bassins côtiers et intracontinentaux, d'argiles résiduelles sur les sommets et interfluves de collines et enfin d'argiles alluviales le long des terrasses et berges des cours d'eau (*Thibault & Le Berre, 1985 ; Nkoumbou et al., 2001 ; Njoya et al., 2001*).

II. COMPOSITION

Les minéraux argileux sont les constituants essentiels des argiles. On cite la kaolinite à laquelle s'associent l'illite, les smectites, la chlorite et quelques interstratifiés (*Lambercy, 1993*). On retrouve également dans les argiles, les minéraux non argileux tel que (le quartz, oxydes et oxy hydroxydes de fer, gibbsite, feldspaths, calcite, matières organiques, micas,...etc.).

III. STRUCTURE DES ARGILES

Les minéraux argileux sont en forme de feuillets, d'où leur nom de phyllites. Ils appartiennent au groupe des phyllosilicates. Chaque cristal est composé de quelques centaines de feuillets empilés, de taille nanométrique. Chaque feuillet est composé de deux, trois ou quatre couches planes associées (*Millot, 1964*).

Il existe deux sortes de couches, selon que les oxygènes ou hydroxyles sont associés en tétraèdre ou en octaèdres (**Fig. 8**).

- Dans la couche tétraédrique, la cavité des tétraèdres est occupée par le cation silicium, qui peut être substitué par de l'aluminium (AlO_4)⁵⁻ entouré de quatre oxygène (SiO_4)⁴⁻ (coordination 4).
- Dans la couche octaédrique, la cavité octaédrique est occupée par des petits cations de (Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , Mg^{2+}) entouré de six oxygènes (coordination 6) (AlO_4)⁵⁻.

L'organisation planaire des couches octaédriques et tétraédriques détermine l'épaisseur du feuillet. L'espace entre deux feuillets parallèles s'appelle espace inter foliaire. L'ensemble feuillets-espace inter-feuillet est appelée «unité structurale» et l'épaisseur de celle-ci, nommée «distance basale», constitue une caractéristique essentielle des minéraux argileux (*Bouchet et al., 2000 ; Pialy, 2009*).

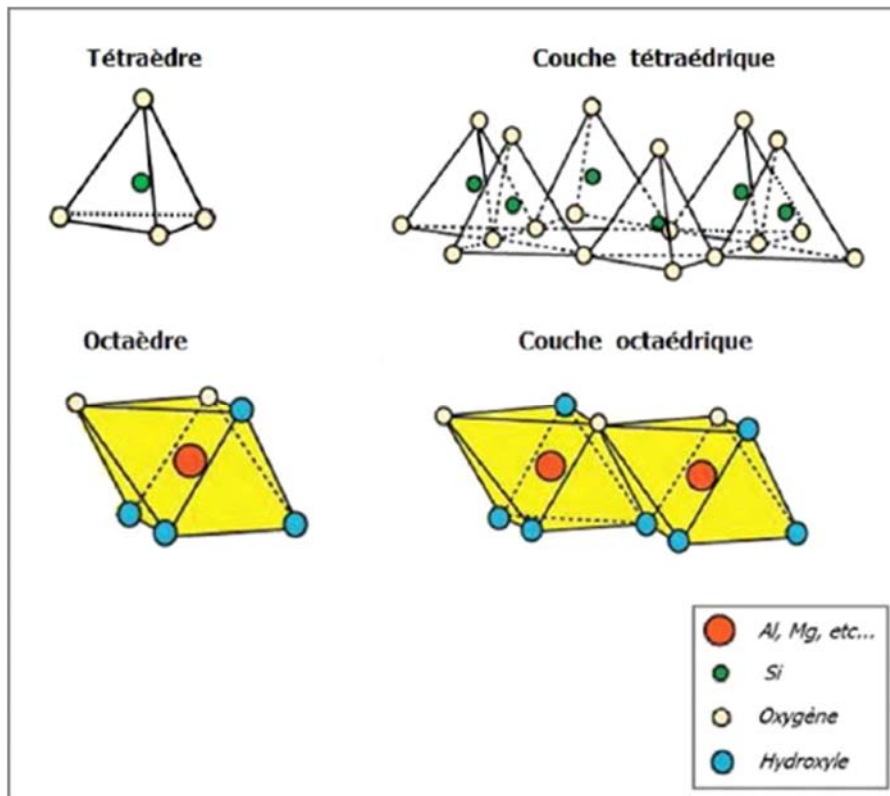


Fig. 8 : Représentation des tétraèdres et des octaèdres (*Gautier, 2008*).

IV. CLASSIFICATION

Depuis plus d'un demi-siècle, certains scientifiques, comme Brindley, Grim, Mac Ewan, Simone Caillère et d'autres, ont fait des efforts pour proposer une classification et une terminologie homogène relative aux minéraux argileux. Actuellement, un comité de nomenclature de l'Association Internationale Pour l'Etude des Argiles (AIPEA), publie régulièrement des articles qui essaient de définir la nomenclature commune à utiliser dans la science des argiles. On distingue trois grandes classes, à savoir les minéraux phylliteux, les minéraux fibreux et les minéraux interstratifiés (*Velde, 1995, AIPEA*).

IV.1. LES MINÉRAUX PHYLLITEUX (MONOPHYLLITES)

Les minéraux phylliteux ou phyllosilicates sont les plus répandus et les plus étudiés. Leur classification s'appuie, d'une part, sur le mode d'association des couches structurales (déficit de charge du feuillet) et, d'autre part, sur le taux d'occupation de la couche octaédrique (caractère di- ou tri-octaédrique) (*Konan, 2006; Pialy, 2009*). Le **tableau 2** donne la classification des phyllosilicates.

Tableau 2 : Classification des phyllosilicates selon la charge z du feuillet (*Nibambin, 2003*)

Type de feuillet	Charge du feuillet (z) et nom du sous-groupe		Exemple de minéral	Nombre (n) de cations en couche octaédrique
Minéraux à 3 plans anioniques ou minéraux 1/1 (distance basale ~ 7Å°)	z=0	Kaolinite	Kaolinite	n=4 : dioctaédrique
		Serpentine	Antigorite	n=6 : trioctaédrique
Minéraux à 4 plans anioniques ou minéraux 2/1 (distance basale =10 Å°)	z=0	Pyrophyllite	Pyrophyllite	n=4 : dioctaédrique
		Talc	Talc	n=6 : trioctaédrique
	0,25<z<0,6	Smectite	Montmorillonite	n=4 : dioctaédrique n=6 : trioctaédrique
			Verme culite	Verme culite
	0,6<z<0,9	Verme culite	Verme culite	n=4 : dioctaédrique n=6 : trioctaédrique
	z ~0,9	Illite Glauconite	Illite	n=4 : dioctaédrique n=6 : trioctaédrique
			Micas ductiles	Muscovite
	z~ 1	Micas rigides	Biotite	n=4 : dioctaédrique n=6 : trioctaédrique
Margarite			n=4 : dioctaédrique n=6 : trioctaédrique	
z~ 2	Micas rigides	Margarite	n=4 : dioctaédrique n=6 : trioctaédrique	
		Sudoite	n=4 : dioctaédrique n=6 : trioctaédrique	
Minéraux à 6 plans anioniques ou minéraux 2/1/1 (distance basale~14Å°)	z variable	Chlorite	Sudoite	n=4 : dioctaédrique n=6 : trioctaédrique

Selon la séquence d'empilement des plans anioniques X, Y et Z, cette famille peut se décomposer en trois sous-groupes (**Tableau 2**) :

- Les minéraux à 3 plans anioniques (X, Y, Z), appelés minéraux 1:1 ;
- Les minéraux à 4 plans anioniques (X1, Y1, Y2, X2), appelés minéraux 2:1;
- Les minéraux à 6 plans anioniques (X1, Y1, Y2, X2, Z1, Z2), appelés minéraux 2 :1 :1.

IV.I.1. LES MINÉRAUX DE TYPE 1:1 (T-O)

Les minéraux 1:1 notés encore T-O sont constitués de feuillets comprenant une couche tétraédrique (T) accolée à une couche octaédrique (O). L'équidistance caractéristique est environ 7.1 et 7,4 Å° (groupe de la kaolinite). La kaolinite de formule chimique $\text{Si}_2 \text{Al}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$.

La **Figure 9** illustre une représentation des empilements des tétraèdres et octaèdres d'un minéral de type 1:1.

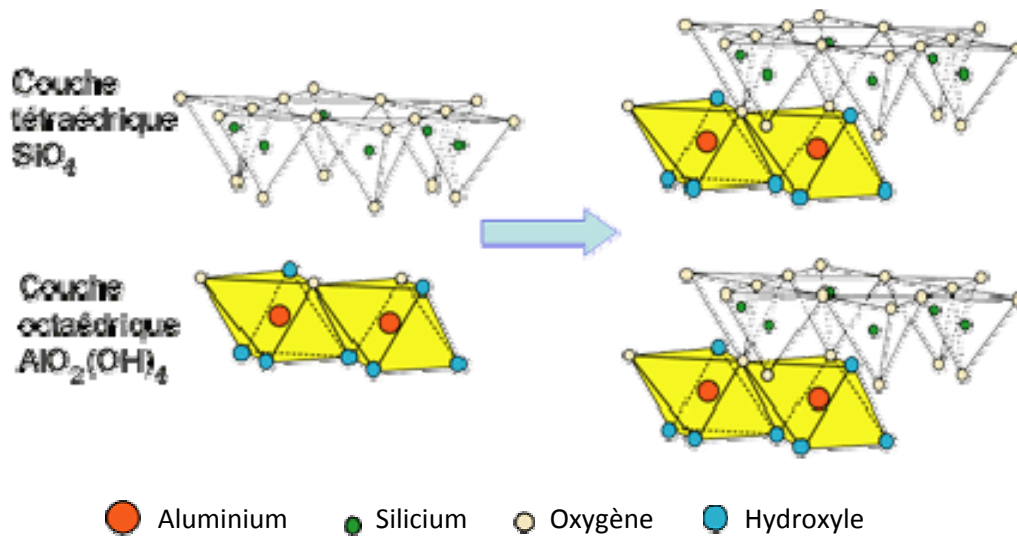


Fig. 9 : Représentation schématique de la structure d'un minéral de type 1:1 ; exemple de la kaolinite (*Gautier 2008*),

IV.1.2. LES MINÉRAUX DE TYPE 2:1 (T-O-T)

Ce type a une couche d'octaèdre encadrée par deux couches tétraédriques contenant de l'aluminium (**Fig. 10**).

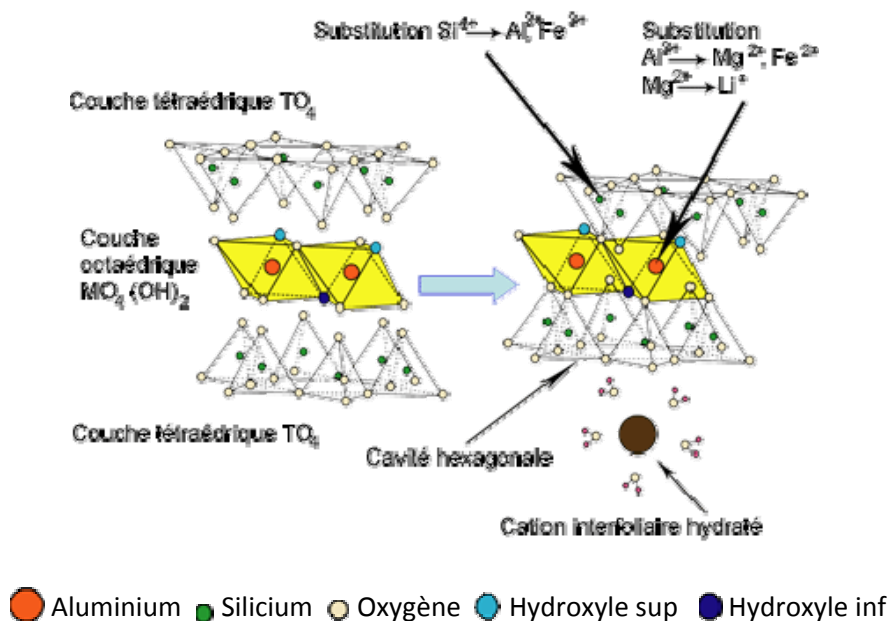


Fig. 10 : Représentation schématique de la structure d'un minéral de type 2 : 1 (*Gautier 2008*)

L'équidistance caractéristique varie de 9.4\AA à 15\AA .

- Lorsque le déficit de charge du feuillet est supérieur ou égal à 0,9 et la distance basale est voisine de 10\AA . C'est le cas de l'illite (**Fig. 11**). La formule des illites généralement admise est : $K_x Al_2 (Si_{4-x} Al_x) O_{10}(OH)_2 H_2O$

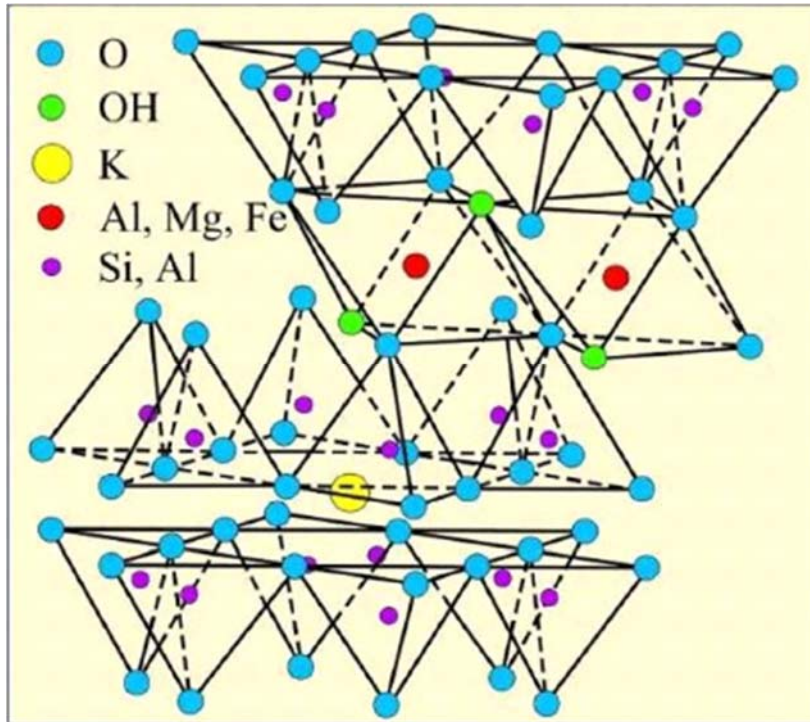
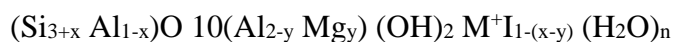


Fig. 11 : Représentation schématique de la structure de l'illite (*Gautier, 2008*)

- Lorsque le déficit de charge varie entre 0,6 et 0,9, ce type de minéraux argileux peut accueillir des molécules d'eau dans l'espace interfoliaire et constituer ce qu'on appelle une «argile gonflante». C'est le cas des smectites (**Fig. 12**).

Les minéraux les plus importants de cette famille sont la montmorillonite (**Fig.13**) et la vermiculite (**Fig.14**).

La formule générale de cette famille de minéraux argileux est :



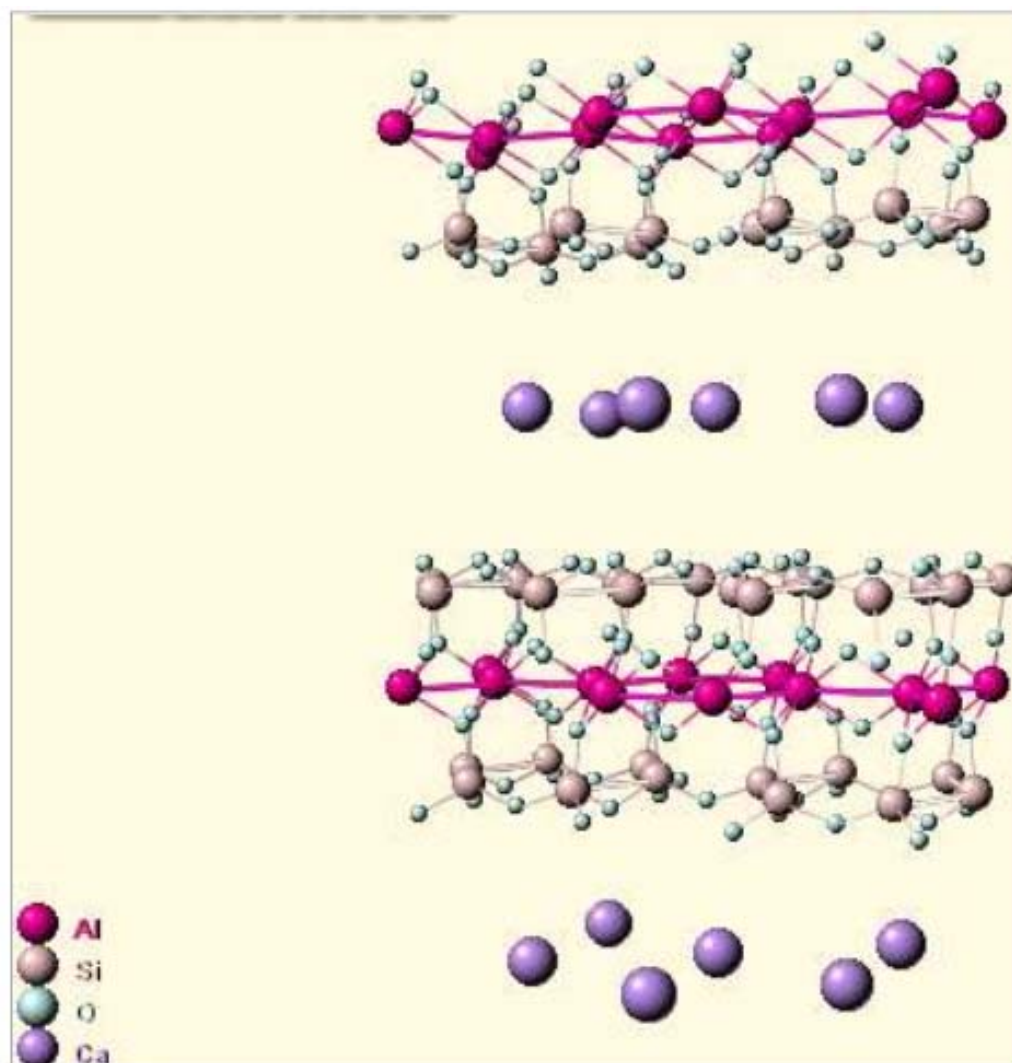


Fig. 12 : Structure cristalline d'une smectite (*Viani et al., 2002*).

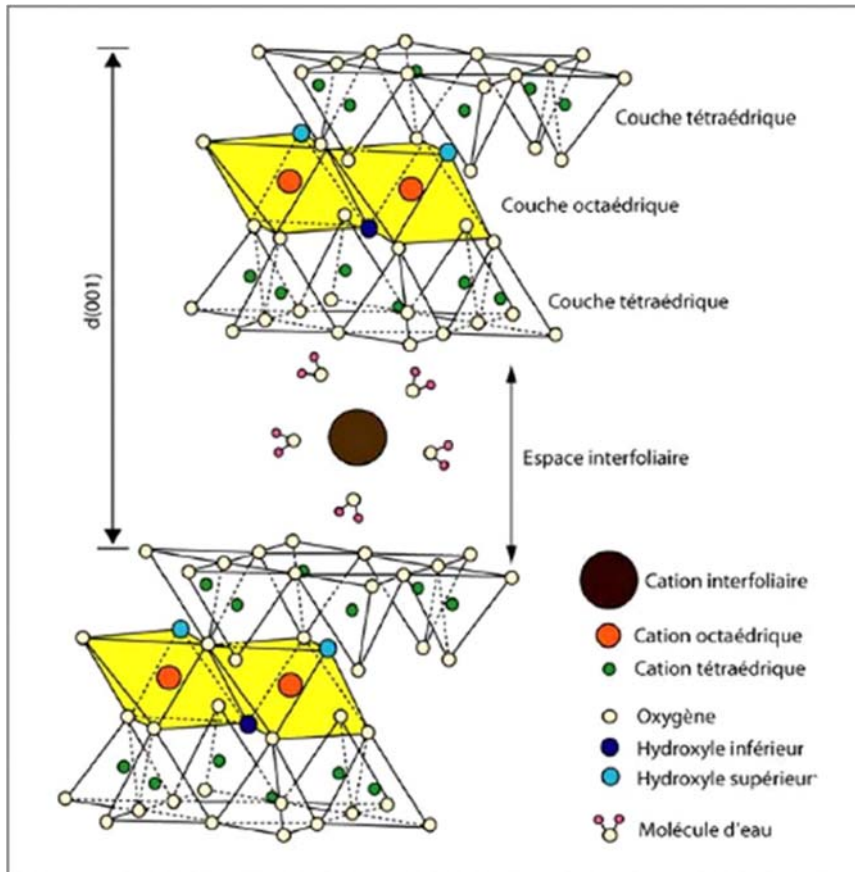


Fig. 13 : Représentation schématique de la structure d'une montmorillonite (Gautier, 2008)

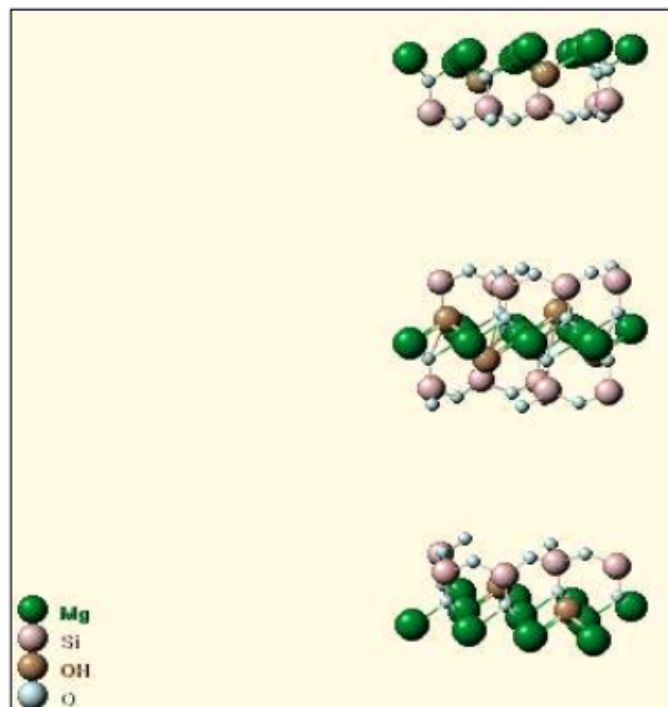


Fig. 14 : Représentation d'une vermiculite (Gruner, 1934).

VI.1.3. LES MINÉRAUX DE TYPE 2 : 1 : 1 (T-O-T-O)

Ce type a une couche d'octaèdre encadrée par deux couches tétraédriques et un interfeuillet constitué par une couche d'octaèdres. La couche interfoliaire octaédrique contient des atomes d'aluminium ou de magnésium. L'équidistance caractéristique est d'environ 14Å°. Le minéral argileux cristallisant dans cette structure correspond à la famille des chlorites (**Fig. 15**). Ces minéraux ont pour formule générale : $[\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x\text{O}_{10}\text{Mg}_3(\text{OH})_2][\text{Mg}_{3-x}\text{Al}_x(\text{OH})_6]$.

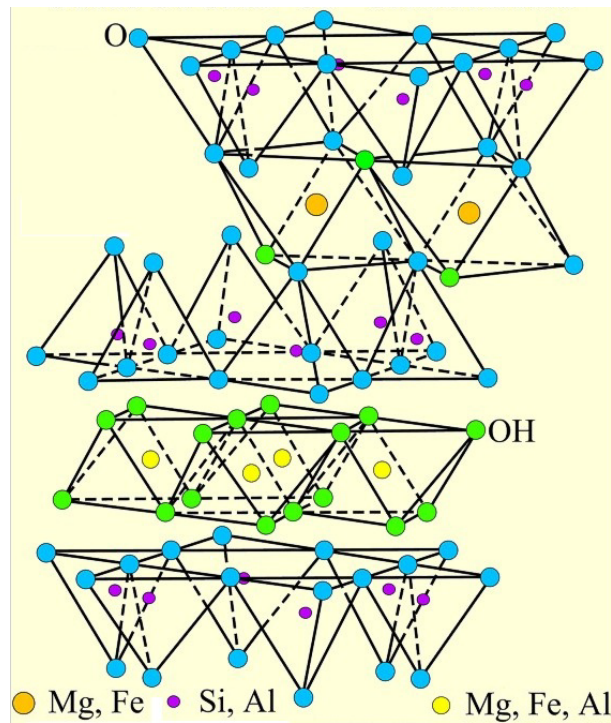


Fig. 15 : Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdre alumineux d'un minéral de type 2 : 1 : 1 ; cas de la chlorite (*modifiée par Grim, 1962*) (*USGS Open-file report 01-041, Chlorite Group, 2013*)¹

¹: Smectite Group (2013 January 11). In U. S. Geological Survey Open-file report 01-041, from http://pubs.usgs.gov/of/2001/of_01041/html/docs/clays/chlor.htm.

IV.2. LES MINÉRAUX INTERSTRATIFIÉS (LES POLYPHYLLITES)

Ce sont des minéraux argileux dans lesquels il y a alternance des feuillets de nature différente. Les édifices interstratifiés peuvent être de deux types (**Fig. 16**) :

- Les minéraux à interstratification régulière où l'empilement des différents types de feuillets (1 :1 et 2 :1) alternent selon des séquences répétitives (exemple d'empilement de minéraux interstratifiés à deux feuillets: 1:1/2:1, 2:1/2:1) et même des interstratifiés à trois composants (2:1/2:1/2:1:1) (exemple : Illite/Smectite/Chlorite) (*Drits et al., 1997, 2004; Lanson et al., 2009; Hubert, 2008*).

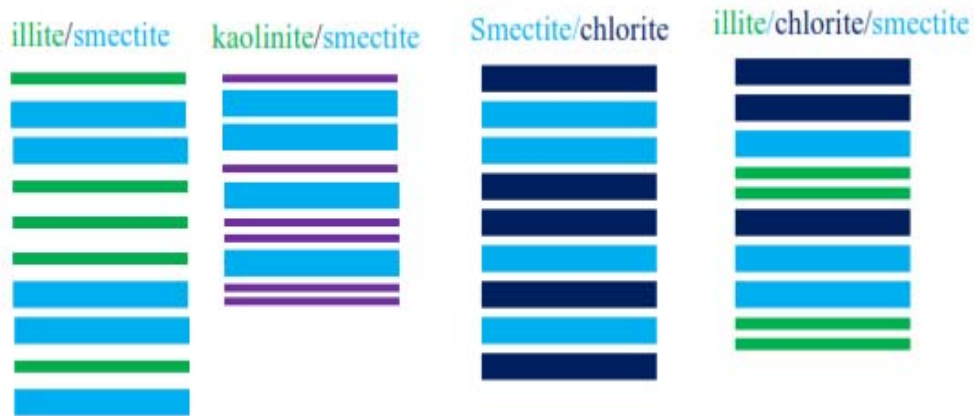


Fig. 16 : Différentes possibilités d'interstratification au sein des minéraux argileux avec deux ou trois composants (*Mache.JR. 2013*)

IV.3. LES MINÉRAUX FIBREUX

Les feuillets sont discontinus et forment des rubans. On les trouve dans les milieux confinés. Ces minéraux appartiennent à deux principales familles (**Fig. 17**) :

- La famille des palygorskites (encore appelées attapulgites) où l'empilement des deux plans discontinus fait apparaître un ruban à cinq octaèdres.
- La famille des sépiolites où l'empilement des deux plans discontinus fait apparaître un ruban à huit octaèdres. La largeur du ruban caractérise chacune des familles.

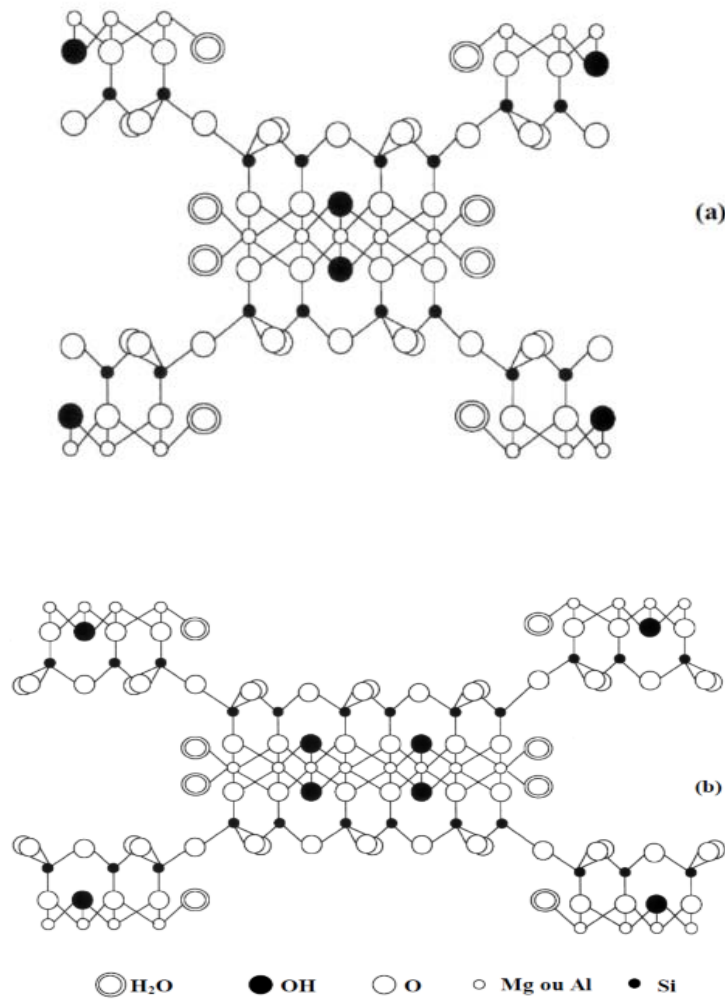


Fig. 17 : Structure des minéraux à pseudo-feuillets et à faciès fibreux :
(a) Attapulgite ; (b) Sépiolite (*Millot, 1964*)

Ces rubans sont disposés alternativement au-dessus ou au-dessous de la couche continue d'oxygène à assemblage hexagonal ; c'est cette disposition qui est à l'origine de l'expression «minéraux à pseudo-feuillets» (*Caillère et al., 1982; Chamayou & Legros, 1989*).

V. ORIGINE ET CONDITION DE FORMATION

Les sols argileux se forment suivant un processus lent d'altération (désagrégation physique ou chimique) de minéraux primaires sous l'action du climat sur un relief (altération d'une roche préexistante), suivi de phénomènes d'érosion, (*Millot, 1964*). Cette action s'opère de façon mécanique (minéraux primaires) et/ou chimique (minéraux transformés et néoformés) ce qu'on appelle le phénomène d'altération suivi de transport et de sédimentation (*Thorez, 2003*). La transformation des minéraux argileux consiste en une modification du minéral argileux tout en conservant son type de structure (*Millot, 1964*). On distingue les transformations par dégradation (soustractions d'ions) et par aggradation (fixation d'ions supplémentaires).

L'existence de divers minéraux argileux est dû au fait que selon la roche initiale, les conditions morphologiques et climatiques, les modes d'érosion et d'altération des roches peuvent être fort différentes, de même que les conditions de transport et de sédimentation (*Sigg, 1991 ; Velde, 1995*).

Selon le degré d'hydratation, si l'hydrolyse est totale (néoformation), cette néoformation d'argile n'est rendue possible que si les sols restent humides. Par contre si l'hydrolyse est progressive ou incomplète on parle d'héritage. Lorsque l'hydrolyse est neutre, le plus souvent dans des sols riches en Ca et Mg, les argiles néoformées sont très proches des minéraux qui leur ont donné naissance : par exemple, des illites à partir de micas ayant seulement perdu des ions K^+ (**Fig. 18**).

Pour la majorité des argiles, leur stabilité se limite aux quelques centaines de mètres supérieurs de la croûte terrestre. Dès que la température dépasse 50-80°C, les argiles deviennent instables et commencent à se modifier en d'autres minéraux, argileux ou non (ex : mica, feldspath) (*Velde, 1995*). Lorsque les températures sont faibles, il faut un temps plus longs pour changer la minéralogie des argiles (**Fig. 19 a**). Par contre, pour un temps plus court, la température de formation peut atteindre quelques centaines de degré (*Velde, 1995*). Les phénomènes localisés (telles les *intrusions magmatiques ou la percolation de fluide*) sont généralement rapides alors que les processus de sédimentation et d'enfouissement se produisent plutôt sur de longues périodes 1-100 Ma (**Fig. 19 b**).

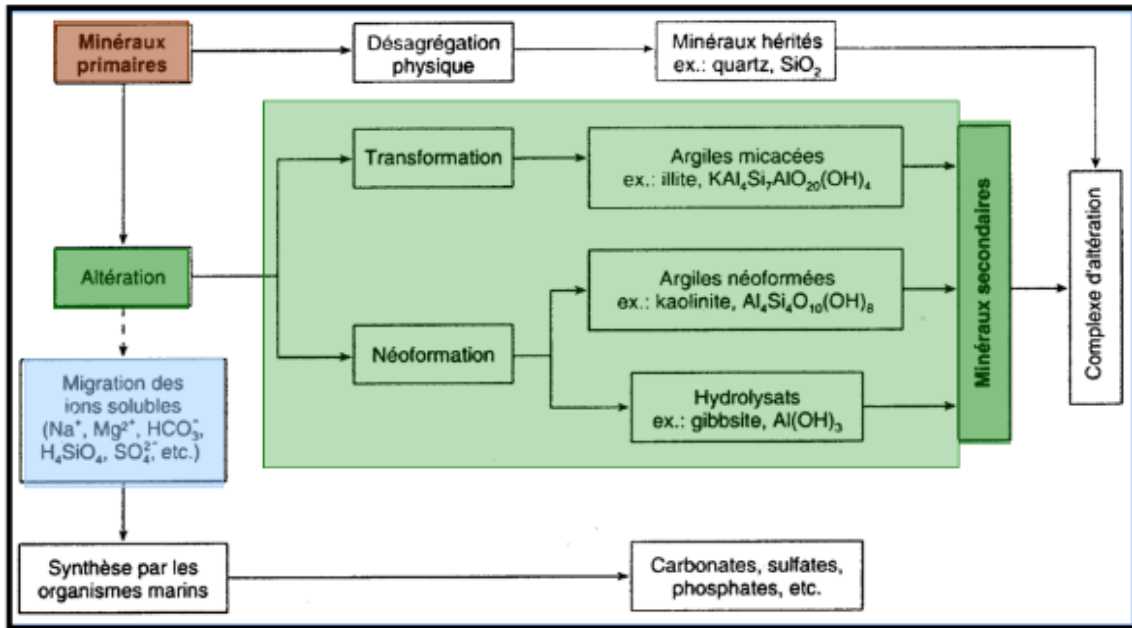


Fig. 18 : Evolution des minéraux primaires et formation des argiles (Landry et Mercier, 1992 in Fagel, 2004)

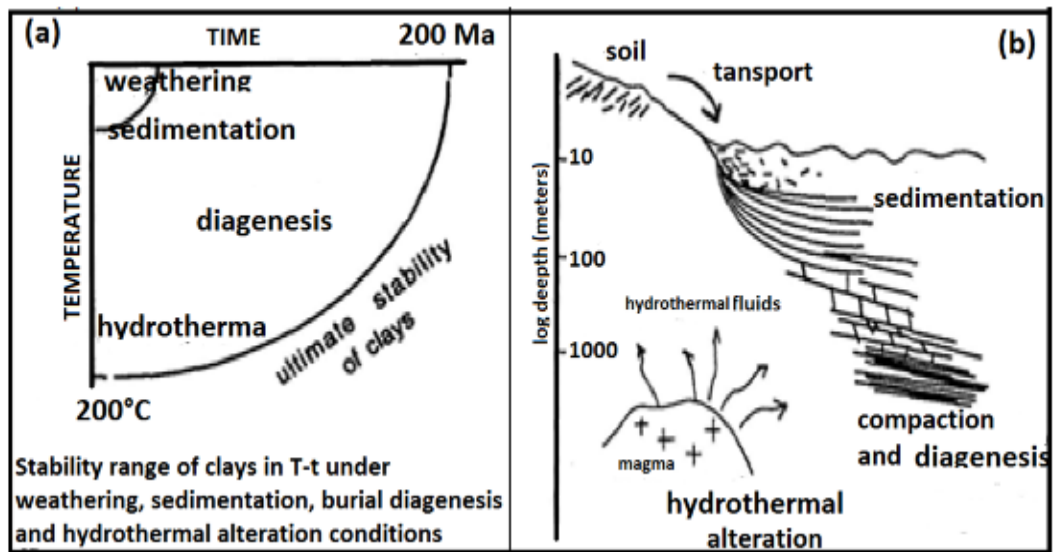


Fig. 19 : Conditions de formation et de stabilité (a) des minéraux argileux (b) (Velde, 1995)

VI. PROPRIETES DES ARGILES

VI.1. MECANISMES DE RETRAIT - GONFLEMENT DES ARGILES

La majorité des sols argileux est sensible au phénomène de retrait-gonflement, cette sensibilité diffère en fonction de certaines propriétés lors de l'étude géotechnique, dépendant en premier lieu de l'échelle d'étude.

- à l'échelle de la formation géologique, la structure et la nature géologique vont contrôler la sensibilité au phénomène, favorisé l'accès de l'eau vers des zones moins perméables et des intercalations de formations sableuses ou silteuses,
- à l'échelle de l'échantillon prélevé en laboratoire, cette sensibilité dépendra de plusieurs facteurs comme la nature et la proportion des minéraux argileux gonflants (smectites) dans les sols, de la texture et du réseaux poreux contrôlant l'accès des molécules d'eau au sein de la structure de formation et de la présence d'autres minéraux (carbonates, quartz) pouvant perturber l'interaction eau-argile.

➤ VI.1.1. LE GONFLEMENT AU SENS PHYSICO-CHIMIQUE

Dans les sols argileux, le gonflement résulte de forces de répulsion qui s'exercent entre les particules argileuses, entraînant une augmentation de volume à mesure que la teneur en eau augmente. Le gonflement des particules argileuses, à l'échelle microscopique, est directement lié à leurs propriétés minéralogiques et à leurs surfaces spécifiques qui varient d'une famille d'argiles à l'autre. D'après *Morel (1996)* et *Mouroux et al. (1988)*, le phénomène de gonflement paraît relever de deux causes (**Fig. 20**) ;

- *l'hydratation des espaces interfoliaires*, l'eau pénètre dans l'espace interfoliaire. Cette hydratation favorise la création d'une pression, qui a pour conséquence une augmentation de la distance interfoliaire et donc un gonflement (interfoliaire ou gonflement cristallin) (*Yong, 1999*). Ce gonflement n'est possible que lorsque les liaisons inter feuillets sont très faibles pour laisser pénétrer l'eau dans l'espace interfoliaire. C'est le cas par exemple de la montmorillonite. Dans les argiles de type illite, le gonflement cristallin est très faible et il est quasiment inexistant dans les kaolinites.

- *la répulsion entre les particules*, l'augmentation de la porosité peut affecter toutes les argiles (gonflement inter particulaire ou gonflement osmotique). L'adsorption des cations par les particules argileuses et la formation de la double couche diffuse sont responsables de la répulsion des deux particules (*Mitchell, 1993*).

Dans une argile sèche, les cations sont fortement adsorbés à la surface des feuillets argileux. Si l'argile sèche est placée au contact de l'eau, les sels se dissolvent dans la solution, et les différents ions se répartissent de manière non homogène : la concentration en cation devient plus forte au voisinage des surfaces externes des argiles, tandis que les anions ont plutôt tendance à s'éloigner des surfaces argileuses. Cette répartition non homogène des cations et des anions, est appelée la double couche diffuse (*Bolt, 1956*). Cette théorie permet d'expliquer le gonflement à l'échelle macroscopique; ce gonflement du sol argileux dépend non seulement de la minéralogie des argiles mais aussi de la texture de ces dernières (*Bauer-Plaindoux et al., 1998*).

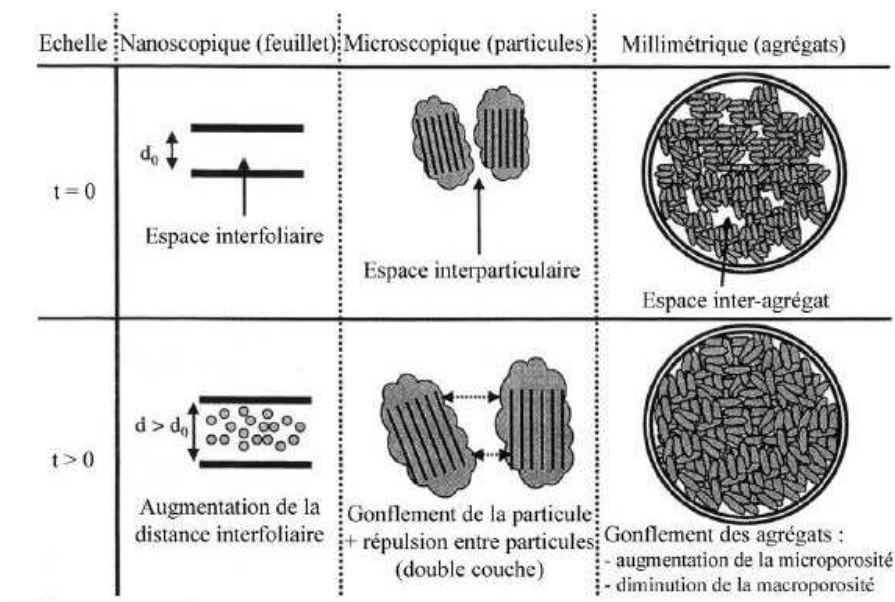


Fig. 20 : Phénomène de gonflement (hydratation des espaces interfoliaires et répulsion entre les particules) (*Gens et Alonso, 1992*)

À l'échelle du feuillet, deux propriétés jouent un rôle important dans le phénomène de gonflement. Ce sont la surface spécifique et la capacité d'échange cationique (CEC) (*Cojean et al., 2006*).

➤ **LA SURFACE SPECIFIQUE**

La surface spécifique d'un matériau argileux constitue un indicateur de sa susceptibilité au phénomène de retrait-gonflement, et par conséquent, il s'agit d'un paramètre important pour le choix des voies de valorisation. On la mesure le plus souvent en fixant un gaz (azote) à basse température en monocouche sur la surface de chaque grain : C'est la méthode d'adsorption de Brunauer, Emmett et Teller (méthode BET) (*Brunauer, 1943; Brunauer et al., 1938*).

En effet, l'augmentation de la surface spécifique active (S_a) entraîne une diminution de la densité de charge surfacique (D_s), et favorise donc le gonflement des matériaux argileux.

➤ **CAPACITE D'ECHANGE CATIONIQUE**

La capacité d'échange cationique (CEC) correspond au nombre de cations monovalents qu'il est possible de substituer aux cations compensateurs pour compenser la charge négative de 100 grammes d'argile. Elle s'exprime généralement en milliéquivalents pour 100 grammes (meq/100g), 1 meq valant 96.5 Coulomb. Elle est fortement liée aux teneurs en argile et en matière organique. Cette caractéristique est fonction du type d'argile, de ses caractéristiques cristallographiques, de ses cations et du pH du milieu. Cette propriété est importante dans le comportement rhéologique des argiles.

Plus la valeur de la CEC est élevée, plus les sols sont riches en minéraux argileux, mais les argiles ayant une valeur élevée de CEC auront aussi tendance à moins gonfler (*Lefevre et al., 1987*). Il existe différentes méthodes de mesure de la CEC ; en général, on sature une argile naturelle avec une solution contenant un excès de cations, ensuite on réalise une analyse élémentaire afin d'évaluer la quantité des cations échangés entre l'argile et la solution. Cette mesure se fait généralement avec des cations NH_4^+ ou Ba^{2+} microanalyse élémentaire des ions présents dans l'argile en substitution permet de déterminer la CEC (**tableau 3**).

Tableau 3 : Caractéristiques des différentes familles d'argiles (*Ouahabi, 2013*)

nom	type	diamètre d'une particule (μm)	surface spécifique en $m^2 g^{-1}$	C.E.C en meq /100g
Kaolinite	1 :1	0,1-4	10-30	3-15
Illite	2 :1	0,1-1	100-175	25-40
Smectite	2 :1	0,1	700-840	80-150
Vermiculite	2 :1	0,1	760	100-150
Chlorite	02 :01 :01	0,1	20	5-15

VI.1.2 LE GONFLEMENT AU SENS MECANIQUE

Le phénomène de gonflement, peut provenir d'une modification de l'état de contraintes dans le sol en présence d'eau. Un sol est constitué de 3 phases : une phase solide (les particules solides), une phase liquide (eau interstitielle en général) et une phase gazeuse (bulles d'air). Les paramètres géotechniques de base tels que la teneur en eau initiale et le poids volumique sec, définis à l'échelle macroscopique lors de l'échantillonnage, jouent un rôle important sur le processus de retrait et gonflement des sols argileux.

➤ INFLUENCE DE LA COMPOSITION MINERALOGIQUE

La quantité d'argile gonflante (type smectite) est l'un des premiers facteurs qui conditionne le gonflement d'un sol argileux ; en effet, les propriétés gonflantes du sol seront d'autant plus marquées que le pourcentage de minéraux expansifs du type smectite sera élevé (*Komine & Ogata, 1994; Tabani, 1999 ; Xu et al., 2003*).

CONCLUSION

Les minéraux argileux de par leur diversité, leurs propriétés et leur disponibilité sont devenus des matériaux d'intérêt dans divers domaines. L'étude bibliographique réalisée nous a permis de passer en revue les divers types d'argiles susceptibles d'exister et d'identifier leurs principaux constituants minéralogiques tout en mettant l'accent sur leur structure suivie par leur mode de formation. Chaque groupe minéralogique se caractérise par une structure particulière en couches avec divers matériaux remplissant l'espace interfoliaire. Les trois principales structures sont :

- Les minéraux 1/1 ou T-O avec un espace basal de 7 Å (kaolinite)
- Les minéraux 2/1 ou T-O-T avec un espace basal très variant : 9,5 Å pour le talc et la pyrophyllite ; 10 Å pour l'illite et l'halloysite ; 10,4 Å pour la palygorskite ; 12 Å pour la sépiolite et de 14 à 15 Å pour les smectites et les vermiculites ;
- Les minéraux 2/1/1 ou T-O-T-O avec un espace basal de 14 Å (chlorite).

En plus de ces minéraux argileux phylliteux, il existe d'autres minéraux argileux comme les fibreux et interstratifiés. Ces argiles se forment soit par altération météorique ou hydrothermale des roches (argile résiduelle), soit par des processus d'érosion et de sédimentation (argile sédimentaire et alluviale). Leurs compositions chimiques et minéralogiques caractérisent ses différentes propriétés. En fonction de ces propriétés, de la nature et de la quantité des matières non argileuses présentes dans les argiles, celles-ci sont orientées dans diverses applications.

Les smectites par exemple, du fait de leur capacité à gonfler en contact de l'eau, leur capacité d'échange ionique, constituent l'une des familles de minéraux argileux jouant un rôle important aussi bien dans le domaine de génie civil que de la géotechnique. La présence de ces argiles provoque une instabilité des terrains suivie par une instabilité des ouvrages d'art comme les tunnels, les infrastructures, les routes, ...etc.

Pour parvenir à l'identification des phases minérales dans les différents échantillons étudiés, et à la détermination de leurs propriétés physico-chimiques et texturales, nous avons fait appel aux techniques de caractérisations classiques et modernes décrites dans de nombreuses revues scientifiques et résumées dans le chapitre suivant.



**MATERIELS ET
METHODES**

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on présente les traits majeurs de la zone d'étude et les techniques utilisées pour la préparation et l'analyse des formations géologiques surtout les formations argileuses. L'objectif de ce chapitre est la caractérisation minéralogique, chimique et physique des formations géologiques de la région d'Azzaba. Pour atteindre notre objectif, une démarche a été adoptée (**Fig. 21**) et porte essentiellement sur les travaux de terrain ainsi que les travaux de laboratoire.

I. TRAVAUX DE TERRAIN

La première partie des travaux de terrain consiste à faire une observation générale et à sélectionner les sites pour échantillonnage. Les levés de terrains ont été effectués sur une distance de 30 Km, depuis Ain Charchar jusqu'à Ramdane Djamel englobant quatre sites, à savoir Ain Charchar (ACH), Menzel El Abtal (MEA), Azzaba (AZZ), Hellala (HELL) et Guessaba (GUESS).

I.1. ECHANTILLONNAGE

L'échantillonnage s'est fait au niveau des points de sondages à la pelle et sondages profonds. L'échantillonnage a été basé sur la variabilité des matériaux ; on a sélectionné des argiles sous numidienne d'âge Tertiaire et des argiles alluvionnaire d'âge Quaternaire, selon des profondeurs variant entre 1et 5 m pour les sondages à la pelle et entre 12 et 46 m pour les sondages profonds. Pour les formations argileuses de Hellala et Guessaba on a échantillonné à des profondeurs qui correspondent au niveau d'excavation des tunnels.

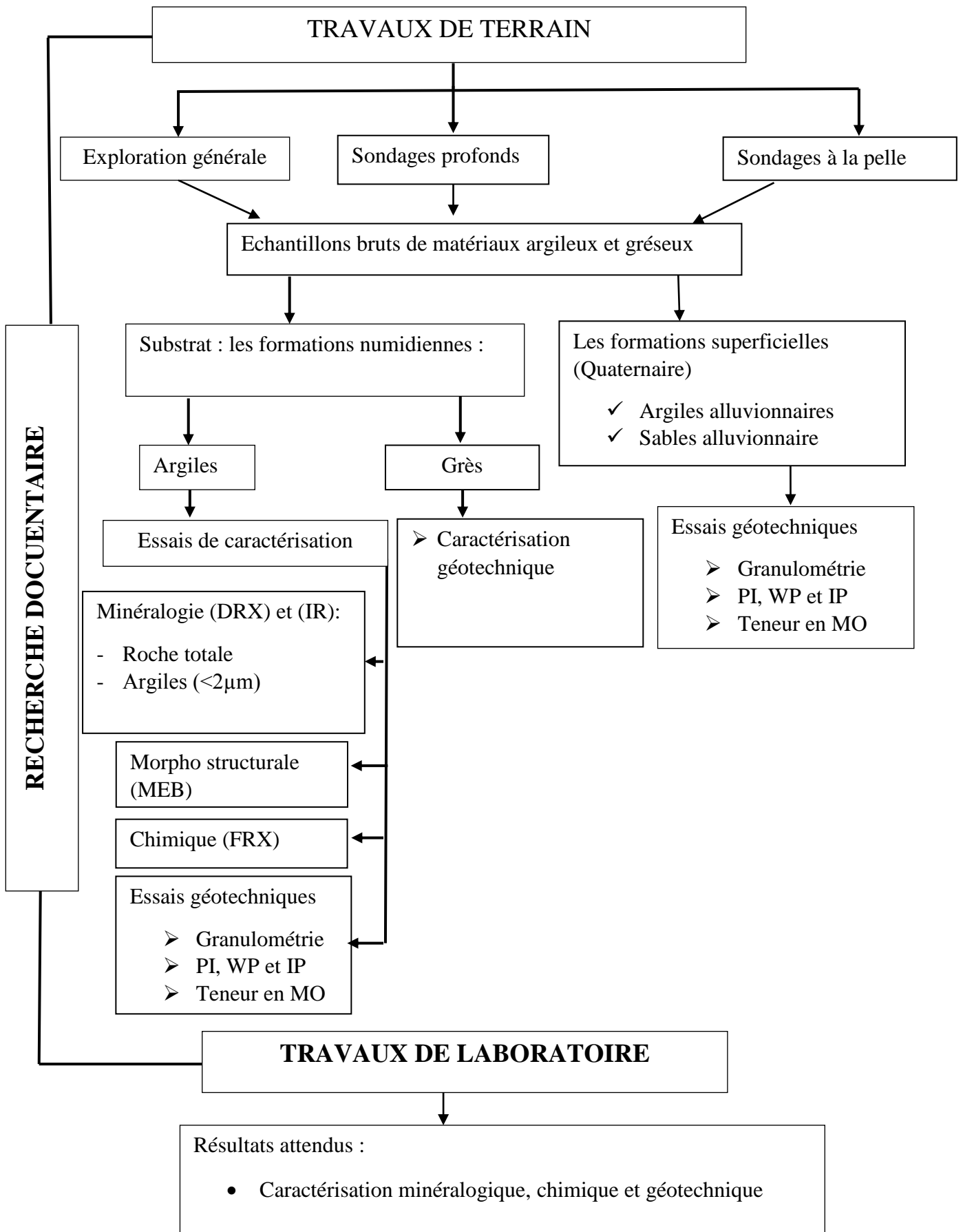


Fig. 21 : Schéma de la méthodologie adoptée

I.2. LOCALISATION ET DESCRIPTION LITHOLOGIQUE DES FORMATIONS GEOLOGIQUES DANS LES SITES ETUDIES

Depuis Mekassa jusqu'à Ain Charchar, les formations géologiques rencontrées sont constituées essentiellement d'alluvions argileux et des blocs de grès qui reposent sur les formations numidiennes. La nature de ces dernières est le résultat de la désagrégation et l'altération des roches sous-jacentes, en particulier les argiles et les grès du numidien. Les alluvions argilo-sablonneuses déposées le long des cours d'eau résultent de l'altération et de l'érosion des roches en amont. Elles sont bien développées dans le voisinage de l'oued Fendek. L'épaisseur des alluvions dépasse largement les quelques mètres et augmente de plus en plus, en allant vers le lit de l'oued. Depuis l'oued Fendek, on observe des formations alluvionnaires constituées de sables, graviers et galets arrondis de natures variées. L'ensemble repose sur des argiles du numidien. Ensuite, un quaternaire « ancien » est représenté par la haute terrasse. Cette dernière est constituée par des éléments grossiers dans une matrice argilo gréseuse. Depuis la sortie de la gare d'Aïn Charchar jusqu'à Menzel El Abtal, les formations géologiques rencontrées sont des argiles alluvionnaires qui deviennent parfois sablonneuses avec présence de niveaux à galets. De Menzel El Abtal jusqu'à Azzaba, on rencontre essentiellement des alluvions argileux. Toutefois, on signale que l'origine des matériaux alluvionnaires est due à l'altération et à l'érosion de la série argilo-gréseuse du numidien qui forme les reliefs avoisinants.

Le Djebel Hellala est constitué par une alternance d'argilites vertes avec des intercalations de bancs métriques et décamétriques de grès. Il s'agit d'un massif avec un haut degré de fracturation, dans lequel on a localisé une famille de failles de direction N-S, de même que des couches numidiennes avec un pendage de 20 ° à 50° vers le Nord-Est. On rencontre aussi des dépôts d'alluviaux de la rivière Guessaba, constitués par des argiles sablonneuses avec des traces de gravillon quartzitique, avec une épaisseur moyenne inférieure à 5 mètres. À partir du croisement avec la rivière Guessaba, on observe généralement des argilites vertes, avec certaines intercalations de paquets métriques de grès. Au niveau de la colline de Tarfaya on observe des affleurements d'argiles rouges versicolores avec des intercalations centimétriques de calcaire qui constituent la base du numidien et qui ont agi de couche de décollement des écaillés numidiennes chevauchées. À partir du pont franchissant la rivière Guessaba et jusqu'à la fin du Dj. Guessaba, on observe un substratum numidien, constitué par des argiles de couleur vertes, avec certaines intercalations de paquets métriques de grès.

Finalelement, des éboulis de base de pente, des argiles numidiennes et enfin des grès numidiens, sont présentes jusqu'à Ramdane Djamel. Les figures 22, 23, 24, 25 et 26 représentent les logs illustrés à partir des sondages dans différents sites. Les photos 26 et 28 correspondent aux positions des différents sondages, la photo 26 correspond à la position des tunnels et (**Annexe 2**) correspond à l'emplacement des échantillons dans les deux tunnels.

MATERIELS ET METHODES

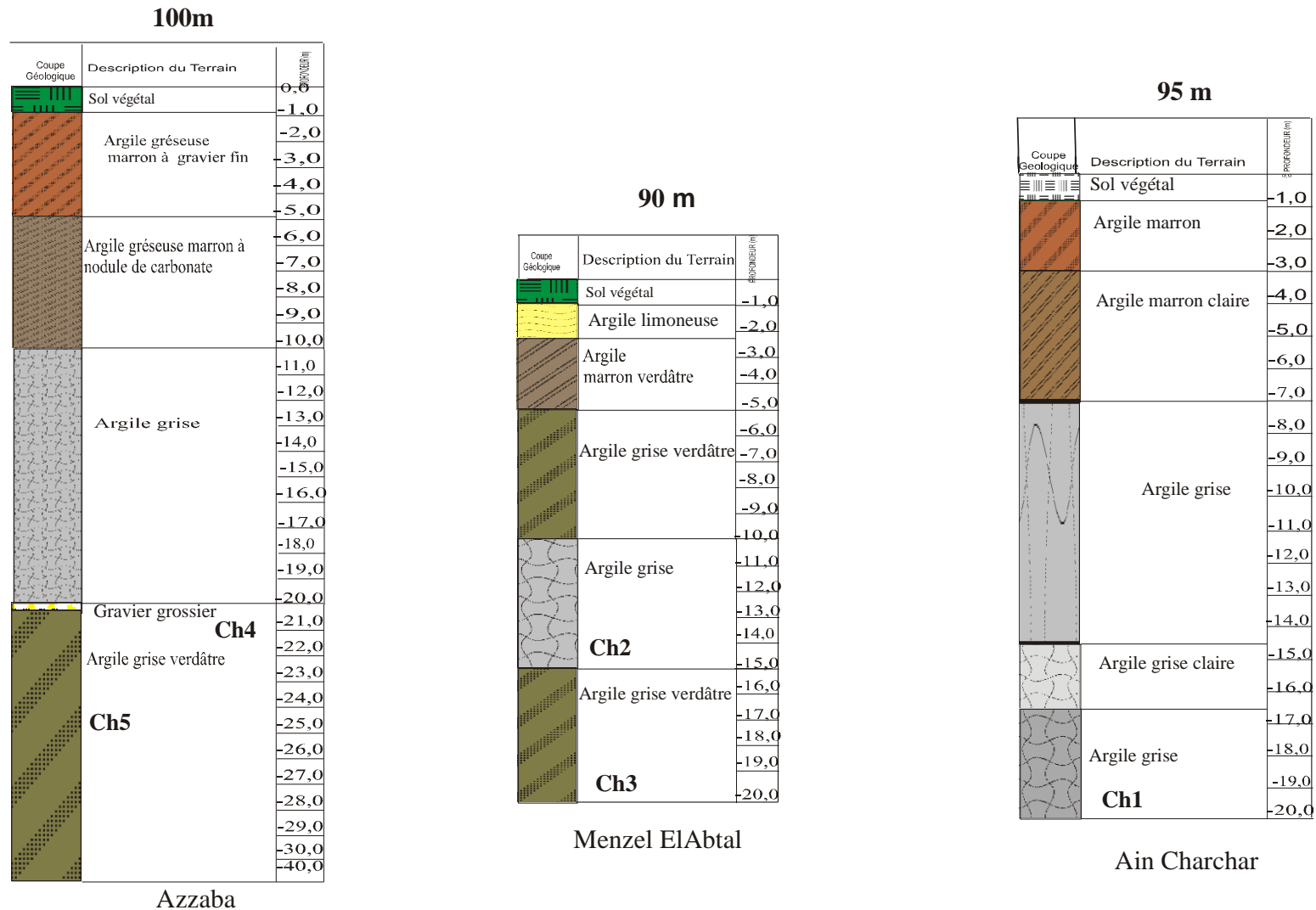


Fig. 22 : Logs de sondages à Ain Charchar, Menzel El Abtal et Azzaba

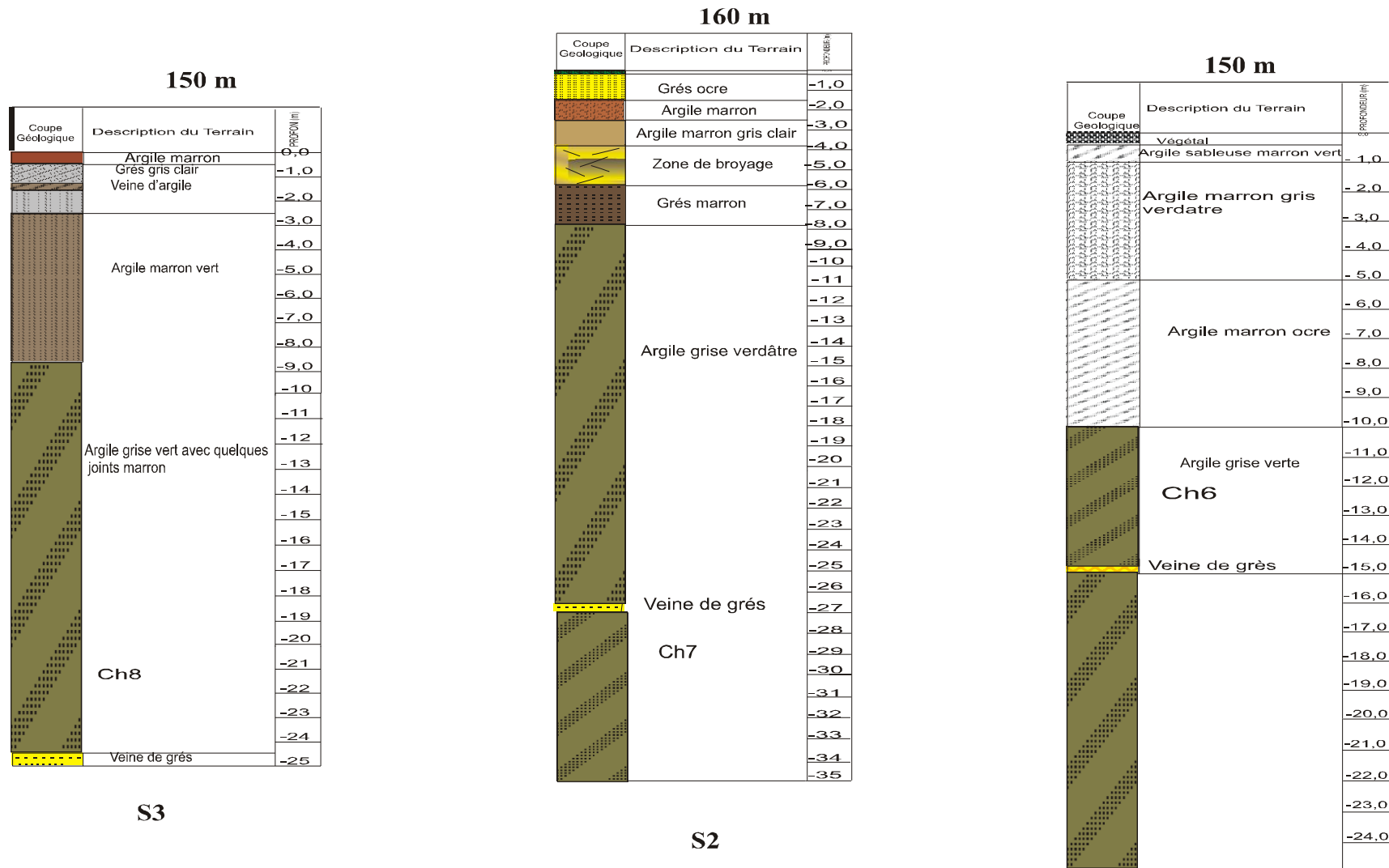
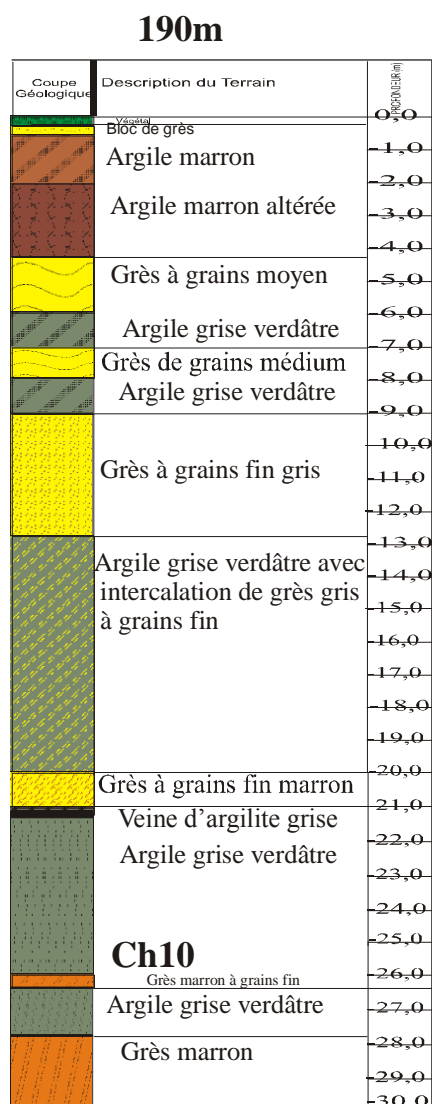
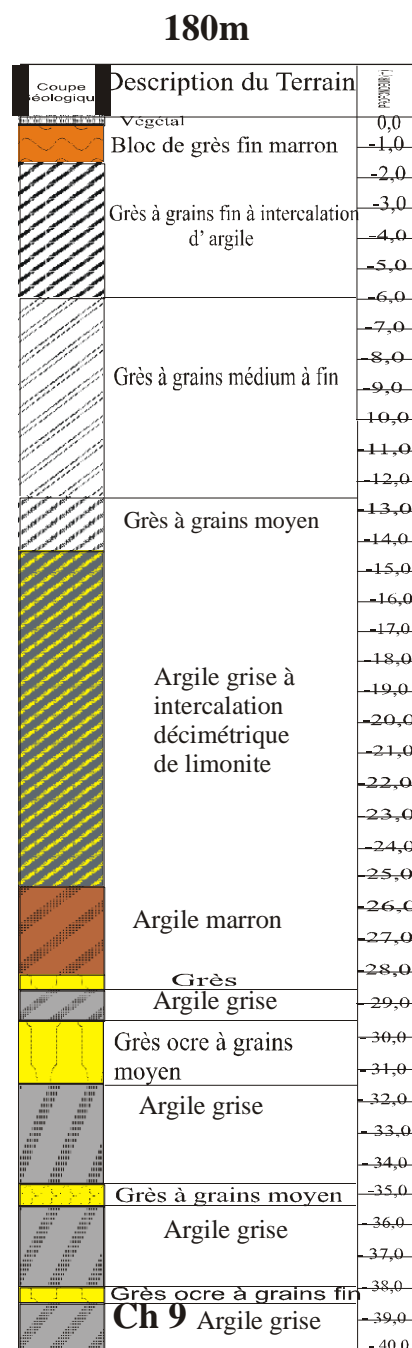


Fig. 23 : Logs de sondages à Hellala (Sondage1, 2 et 3)



Dj Hellala S5



Dj Hellala S4

Fig. 24 : Logs de sondages à Hellala (Sondage 4 et 5)

150



Dj Hellala S6

Fig. 25 : Logs de sondages Hellala (Sondage 6)

MATERIELS ET METHODES

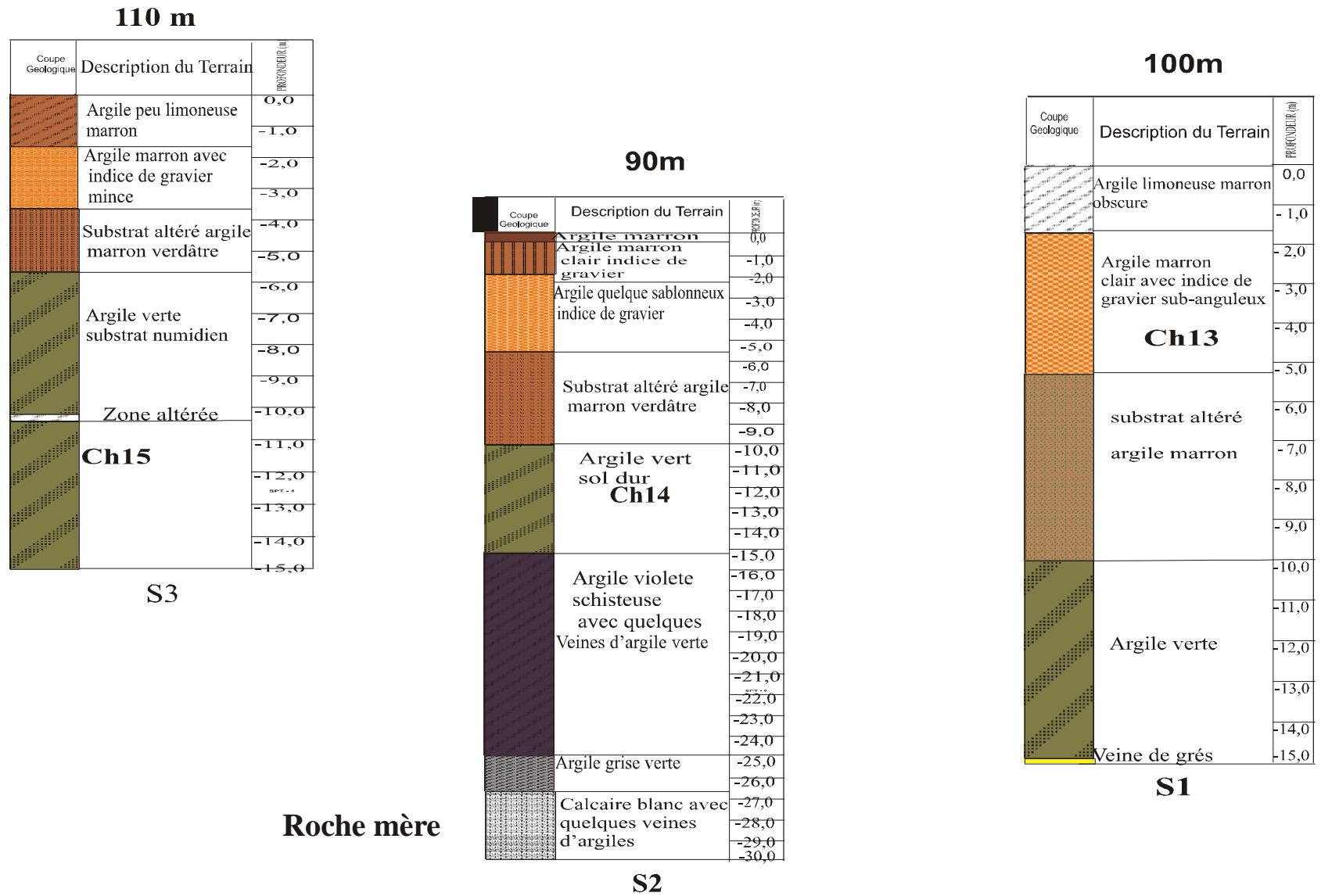


Fig. 26 : Coupes verticales de GueSSaba



Photo 24 : Photo satellite montrant la position des sondages d'Ain Charchar, Menzel El Abtal et Azzaba



Photo 25 : Photo satellite montrant la position des deux tunnels. T1 : tunnel 1, T2 : tunnel 2



Photo 26 : Photo satellite montrant la position des sondages de Hellala et Guessaba

II. TRAVAUX DE LABORATOIRE

Les analyses de caractérisation des matériaux argileux ont été effectuées en collaboration avec plusieurs laboratoires : le laboratoire de Chimie industrielle et de Chimie Inorganique Structurale (Faculté des Sciences, ULg), le Laboratoire des Argiles, Géochimie et Environnements sédimentaire (Laboratoire AGEs, ULg), Laboratoire de minéralogie de l'ULg, laboratoire de Pétrologie Magmatique ULg), le laboratoire Voix et Béton (LVB) Constantine, Laboratoire des travaux publique de l'Est (EPE), (Algérie) et Gabinet Geotécnico Laboratorio Poligono Industrial Los Linares Madrid (Espagne).

Les travaux de laboratoire ont consisté à la caractérisation minéralogique par des méthodes classiques (DRX, MEB et IR), géochimique (FRX) des échantillons de matériaux argileux. Les essais géotechniques concernent essentiellement les analyses physiques (densité, granulométrie, limite d'Atterberg). Dans les paragraphes suivants, on résume les méthodes analytiques en décrivant le principe de chaque méthode.

II.1. ANALYSES MINERALOGIQUES

La connaissance des différentes espèces minérales des matériaux argileux s’est faite après analyse par diffraction des rayons X (DRX), la microscopie infrarouge (IR) et la microscopie électronique à balayage (MEB). Le **tableau 4** résume les analyses minéralogiques effectuées sur toutes les formations argileuses prélevées.

Tableau 4 : Analyses effectuées et description lithologique des argiles sous numidiennes de chaque site

Site	Désignation/ Code échantillon		Profondeur (m)	Description	Analyse effectuées			
Ain Charchar	ACH	Ch1	20	Argile grise	minéralogie (DRX), chimie (FRX)			
Menze El Abtal	MEA	Ch2	14,5	Argile grise à gris verdâtre				
		Ch3	19,5					
Azzaba	AZZ	Ch4	21,5	Argiles grise clair				
		Ch5	25					
Dj Hellala	HELL	Ch6	12	Argile grise avec des niveaux marron				
		Ch7	27	Argile marron bariolé de jaunes clair avec des niveaux noirs		IR		
		Ch8	23	Argile grise plus ou moins sableuse				
		Ch9	39	Argile dure de couleur marron clair				
		Ch10	20	Argile friable de couleur marron jaunâtre				
		Ch11	26	Argiles marron noirâtre roche lisse au touché				
		Ch12	37	Argile brun à gris				
Dj Guessaba	GUESS	Tunnel 1	T1S1	7		Argiles grises avec des niveaux jaunâtres	IR	MEB
			T1S2	32		Argiles marron avec des niveaux oxydés de couleur foncé jaune et marron chocolaté avec présence de taches noires	IR	
			T1S5	11			IR	MEB
		Tunnel 2	Ch13	13	Argile très tendre de couleur grise bleuâtre			
			Ch14	13	Argile très tendre de couleur grise bleuâtre	IR		
			Ch15	12	Argiles grise avec présence des niveaux blanchâtres (talc ?)	IR		
			T2S1	13	argiles marron avec des niveaux orange	IR		
			T2S2	27	argiles gris souris intercalé avec des grès			
			T2S6	46	argiles grise avec les grès			
			T2S8	45	argiles marron clair	IR	MEB	
			T2S10	38	argiles grise avec des niveaux marron			
		T2S13	26	argiles marron clair avec des niveaux oxydés et des passades noirs		MEB		
		T2S14	15	argiles grise avec des niveaux oxydés	IR			
		T2S15	3	grès jaunâtre aspect sableux				

II.1.1 DIFFRACTION DES RAYONS X (DRX)

La détermination des minéraux est basée sur la connaissance de la distance réticulaire des plans (001) ou de leurs harmoniques (002), (003), etc... qui sont des fractions entières de la distance basale (001). Pour certains minéraux, ces distances réticulaires basales se déplacent d'une manière caractéristique après certains traitements spécifiques appliqués aux lames (Robert, 1975 et Brindley & Brown, 1980). La DRX constitue une des techniques les plus utiles et les plus répandues pour l'identification de ces minéraux ainsi que l'étude de leur cristallinité. Elle permet l'identification et la détermination semi-quantitative des principaux minéraux présents dans un échantillon.

➤ **Principe**

La diffraction des rayons X consiste à appliquer un rayonnement de la longueur d'onde des rayons ($0.1 < \lambda < 10\text{nm}$) sur un échantillon argileux orienté ou non. Les radiations émises par les plans atomiques qui sont en phases vont engendrer un faisceau cohérent qui pourra être détecté. Le rayonnement X est émis par un tube à rayons X constitué d'une anode métallique (Cu) bombardée par un faisceau d'électrons produit par un filament chauffé. Lorsque le rayonnement X rencontre des électrons, il est dispersé dans toutes les directions selon des fronts d'onde qui se propagent. Les rayons vont interférer entre eux et le faisceau diffracté mesuré constitue la résultante des interférences constructives (Fig. 27).

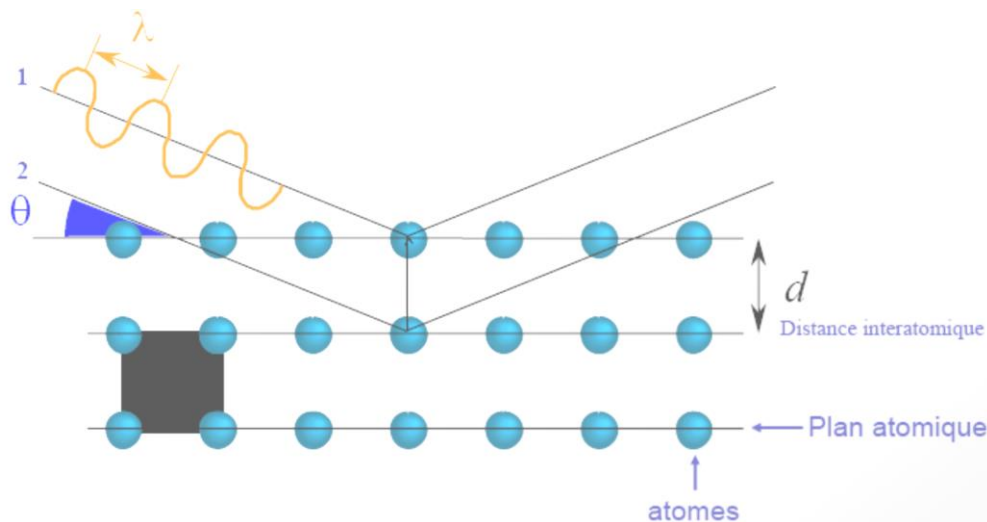


Fig. 27 : Principe de diffraction des rayons X par le réseau cristallin

(http://plateforme-chimie.utinam.cnrs/doku.php?id=diffractometre_des_rayons_x_drx)

Après diffraction, on enregistre un spectre d'énergie du faisceau diffracté en fonction de l'angle de diffraction 2θ . On peut convertir les valeurs angulaires en espace basal d (Angströms) en appliquant la loi de Bragg :

$$n \lambda = 2d \sin \theta$$

λ : longueur d'onde de la source ($\lambda_{Cu} = 1,54$)

d : espacement entre 2 plans parallèles successifs du réseau cristallin

θ : angle entre le faisceau incident et le réseau de plans

Sur un diffractogramme, les pics correspondent aux différents rayons diffractés en fonction de l'incidence du faisceau de RX. L'identification du minéral est donnée par la position d'un certain nombre de pics caractéristiques qui permettent de calculer la distance entre les plans de diffraction. La forme du pic renseigne sur l'état de cristallisation du minéral (cristallinité).

➤ Méthode d'analyse

La DRX a été effectuée suivant le protocole du Laboratoire de Argiles Géochimie et Environnement sédimentaire (AGEs) de l'Université de Liège. Les données ont été enregistrées à l'aide d'un diffractomètre de type *Brucker D8-Advance* (**Fig. 28**) utilisant le rayonnement $K\alpha_1$ du cuivre ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$). La vitesse de mesure du goniomètre est de 10 s/pas, vitesse de rotation $2^\circ 2\theta/\text{min}$, induisant un temps d'analyse de plusieurs minutes pour couvrir une gamme angulaire allant de 2 à $45^\circ 2\theta$ pour les poudres non orientés et de 2 à $30^\circ 2\theta$ pour les lames orientées. La tension d'accélération est de 40 KV, l'intensité est de 30 mA. Le dépouillement des diffractogrammes obtenus est effectué à l'aide d'un logiciel employé pour l'identification des phases cristallines *DIFFRAC Plus Release 2000-EVA 6.0* et des données fournies par les fiches PDF (Powder Diffraction File) de *Brown et Brindley (1980)*. Plusieurs types de préparations ont été effectués afin d'obtenir différentes informations sur les matériaux argileux.



Fig. 28 : Photo du diffractomètre Bruker D8-Advance (Laboratoire AGEs)

a) MINERALOGIE TOTALE

Pour l'analyse minéralogique totale (poudre désorientée), chaque échantillon est prélevé et séché à l'étuve (40°C) pendant au moins 24 h. L'échantillon est broyé manuellement au mortier à agate et tamisé à sec à 250 μm . La poudre est placée dans un porte-échantillon en PVC par simple pression afin de limiter toute orientation préférentielle des minéraux selon la méthode de [Moore et Reynolds \(1989\)](#) ou méthode « back-side » ([Brindley & Brown, 1980](#)) (**Fig. 29**). Ces échantillons de poudre désorientée ont été soumis à la diffraction des rayons X entre 2 et 45° 2 θ . Les minéraux présents ont été déterminés de manière semi-quantitative ($\pm 5\%$) selon ([Cook et al. 1975](#)). Pour ce faire, l'intensité du pic de diffraction principal de chaque minéral a été mesurée et corrigée par un facteur multiplicatif ([Cook et al. 1975](#)).

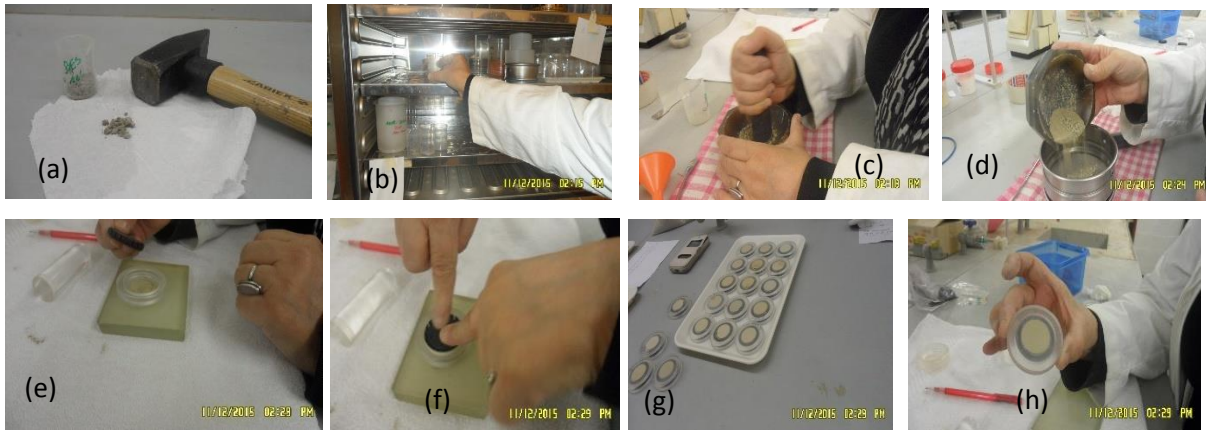


Fig. 29 : Etapes de préparation des échantillons bruts pour analyse DRX
Préparation désorientée ; a : broyage ; b : séchage à 40°C ; c : broyage avec mortier en agate ; d : tamisage à 100µm, e,f,g,h : méthode back-side

✓ **Estimation semi-quantitative des minéraux non argileux**

L'estimation semi-quantitative du pourcentage de chaque minéral (spectre brut) est obtenue en multipliant l'intensité mesurée de réflexions diagnostiques par un facteur correctif (FC) (*Boski et al., 1998 ; Cook et al., 1975; Brown and Brindley, 1980*) (**Tableau 5**).

Tableau 5 : Liste des minéraux non argileux identifiés avec les facteurs correctifs associés (*Thorez, 1976*).

	Minéraux	Distance basale d(Å)	2θ ° (CuKα)	CF	Référence
Poudre naturelle	Quartz	3,34	26,45-26,95	1	Cook et al., 1975 Brindley & Brown, 1980
	K-Feldspath	3,26-3,21	27,35-27,79	4,3	
	Plagioclase	3,21-3,16	27,80-28,15	2,8	
	Calcite	3,03	29,25-29,60	1,65	
	Hématite	2,69	33,00-33,40	3,33	
	Sidérite	2,8	31,90-32,40	1,15	
	Dolomite	2,90-2,87	30,80-31,15	1,53	
	Argile totale	4,46		20	Boski et al., 1998

b) MINERALOGIE DE LA FRACTION ARGILEUSE

La minéralogie des argiles a été déterminée sur la fraction inférieure à $2\ \mu\text{m}$ après sédimentation pendant 50 minutes (loi de Stokes). Pour cela une fraction de l'échantillon brut a été broyée manuellement, mise en suspension dans de l'eau distillée et tamisée à $63\ \mu\text{m}$ (tamisage humide), la solution contenant les particules inférieures à $2\ \mu\text{m}$ (*Moore et Reynolds, 1989*) (**Fig. 30a**). Selon la composition minéralogique établie préalablement (minéralogie totale), la fraction $< 63\ \mu\text{m}$ est, si nécessaire traitée avec de l'acide chlorhydrique dilué (0.1N) pour éliminer les carbonates (**Fig. 30b**). L'excès d'acide est rincé par centrifugations successives (**Fig. 30c**).

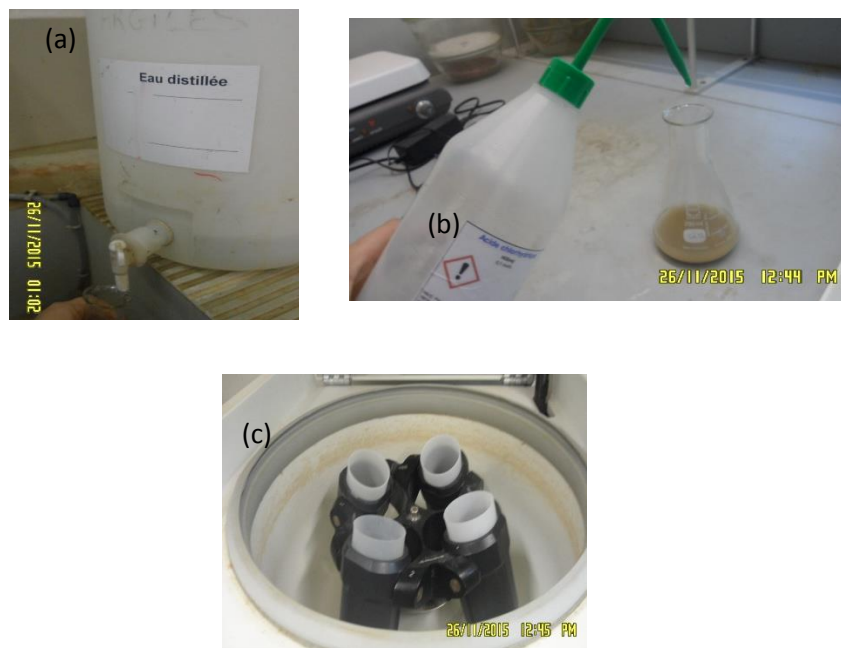


Fig. 30 : Traitement avec l'acide chlorhydrique dilué ; *a* : suspension dans l'eau distillé, *b* : ajout d'acide chlorhydrique, *c* : agitation, *d* : centrifugation

Cette fraction inférieure à $63\ \mu\text{m}$ est ensuite introduite dans des bouteilles pour y subir la sédimentation. La fraction argileuse ($< 2\ \mu\text{m}$) est aspirée par pipette après un temps de sédimentation calculé selon la loi de Stokes (50 minutes), ces agrégats orientés sont déposés sur une lamelle de verre pour séchage et à l'abri de toute vibration (méthode de *Moore et Reynolds, 1989*) (**Fig. 31**). Ces échantillons ont ensuite été soumis à la DRX entre 2 et $30^\circ 2\theta$.



Fig. 31 : Etapes de préparation des fractions argileuses pour analyse par DRX
Séchage à l'air libre (N) ; a : loi de Stokes et méthode de Moore et Reynolds, b : emplacement des lames pour analyse

Les échantillons contenant des particules argileuses cristallisées sont déterminés sur les spectres obtenus après séchage à l'air libre (N). Il est nécessaire d'enregistrer en plus du spectre dans les conditions normales, un spectre après solvatation (Éthylène-Glycol pendant 24h) (EG) et un spectre après chauffage (500°C pendant 4h) (H) (**Fig. 32**).

Le traitement à l'éthylène glycol a pour but de faire gonfler les feuillets des minéraux argileux par introduction, dans l'espace interfoliaire, de molécules d'éthylène-glycol de grosse taille. Le chauffage de l'échantillon traité à l'éthylène glycol permet de caractériser les minéraux argileux particulièrement sensibles à la chaleur tels que la kaolinite ainsi que d'autres minéraux hydratés.

Pour la minéralogie des argiles, la comparaison de ces trois spectres (N), (EG), (H) obtenus sur la même préparation argileuse permet d'identifier les minéraux argileux présents dans le matériau (**Tableau 7** et **Tableau 8**). Les estimations semi-quantitatives ($\pm 5-10\%$; *Biscaye, 1965*) des espèces d'argiles (kaolinite, illite, chlorite, smectite, etc.) ont été calculées en mesurant l'intensité du pic diagnostique du minéral multiplié par le facteur de correction recommandées (*Boski et al., 1998, Fagel et al., 2007 et cook et al., 1975*)(**Tableau 6**).



Fig. 32 : Etapes de préparation des fractions argileuses pour analyse par DRX
Saturation à l'éthylène glycol (EG) ; (a, b) : emplacement et saturation pendant 24 h,
chauffage à 500°C (H) (c, d) : chauffage dans un four pendant 4 heures.

Tableau 6 : Liste des minéraux argileux identifiés avec les facteurs correctifs associés

	Minéraux	Distance basale d(Å)	2θ ° (CuKα)	CF	Référence
Echantillon orienté	Illite	10		1	<i>Fagel et al., 2007</i>
	Chlorite	14	18,50-19,10	0,34	
	Smectite	17		0,25	
	Kaolinite	7	12,20-12,60	0,7	

Tableau 7 : Comportement des minéraux argileux suivant les différents traitements (*Thorez 1986*)

Spectre /minéraux	N	EG	H500 °C
Kaolinite	7	7	-
Illite	10	10	10
Chlorite	14	14	14
vermiculite	14	14	10
Smectite	12-14	17	10

Tableau 8 : comportement des minéraux interstratifiés suivant les différents traitements
(Thorez 1986)

MINERAL d(002) in Å	10	11	12	13	14	15	16	17
(I-C)			N EG 500					
(I-C _g)			N 500		EG			
(I-V)	500		N EG					
(I-M)	500			— N —			EG	
(C-V)			500		N EG			
(C-M)			500	— N —			EG	
(C-C _g)					N 500		— EG —	
(V-M)	500			— N —			EG	
(V-C _g)			500		N		EG	
(C _g -M)			500		N			EG

II.1.2. SPECTROMETRIE INFRAROUGE

➤ Principe

La spectroscopie infrarouge (IR) est une méthode d'analyse qui permet de montrer la présence de groupements atomiques spécifiques dans une phase donnée. Elle est largement utilisée dans l'étude de la cristallinité des minéraux, surtout les kaolins utilisables dans l'industrie papetière. Même en faibles quantités dans des mélanges polyphasés, la kaolinite est reconnue grâce à ses bandes d'absorption spécifiques ν OH vers 3700 cm^{-1} (Brindley *et al.*, 1986 ; Joussein *et al.*, 2001). Son principe est basé sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Les bandes d'absorption infrarouge sont dues aux vibrations des atomes autour de leur position d'équilibre. La masse des atomes, les forces de liaison et leur arrangement dans la molécule ou dans le cristal déterminent la fréquence des vibrations. Ainsi, toute substance définie chimiquement et cristallographiquement possède un spectre infrarouge caractéristique. Lorsque la longueur d'onde apportée par le faisceau infrarouge est voisine de l'énergie de vibration d'une molécule, cette dernière absorbe le rayonnement et l'on enregistre une diminution de l'intensité réfléchie ou transmise. Les analyses peuvent être effectuées en moyen infrarouge (domaine compris entre 4000 cm^{-1} et 400 cm^{-1}) ou en proche infrarouge (domaine compris entre 11000 cm^{-1} et 4000 cm^{-1}).

Cette méthode d'analyse permet donc de caractériser un matériau de composition chimique et de structure donnée par l'ensemble des bandes d'absorption composant son spectre. Des tables établies par de nombreux auteurs (*Petit, 1994 ; Fialips, 2000*) permettent d'attribuer les absorptions aux différents groupes chimiques présents dans le matériau analysé. Dans le cas de la kaolinite par exemple, les vibrations de valence de quatre groupes OH composant sa maille élémentaire se traduisent par quatre bandes de vibration (**Fig. 33**) centrées sur les fréquences 3693, 3667, 3651, et 3620 cm^{-1} respectivement indexées ν_1 , ν_2 , ν_3 (hydroxyles externes) et ν_4 (hydroxyle interne).

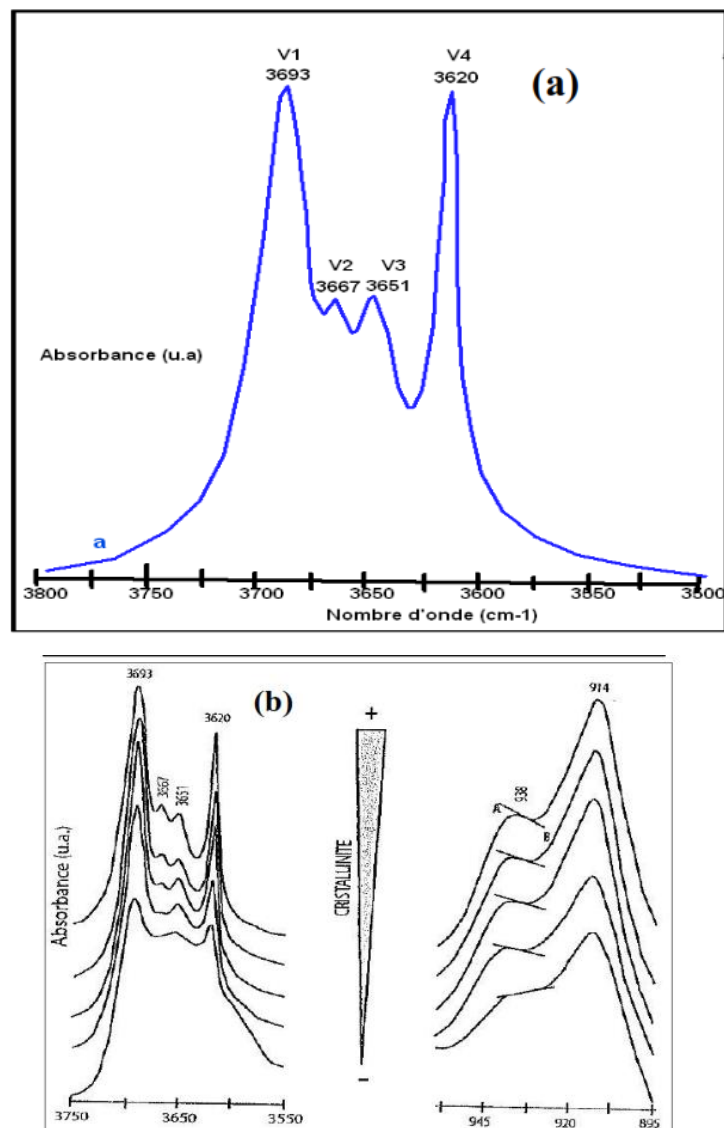


Fig. 33 : Spectres IR de la kaolinite bien cristallisée KGa-1 de Georgie (*Petit, 1994*)

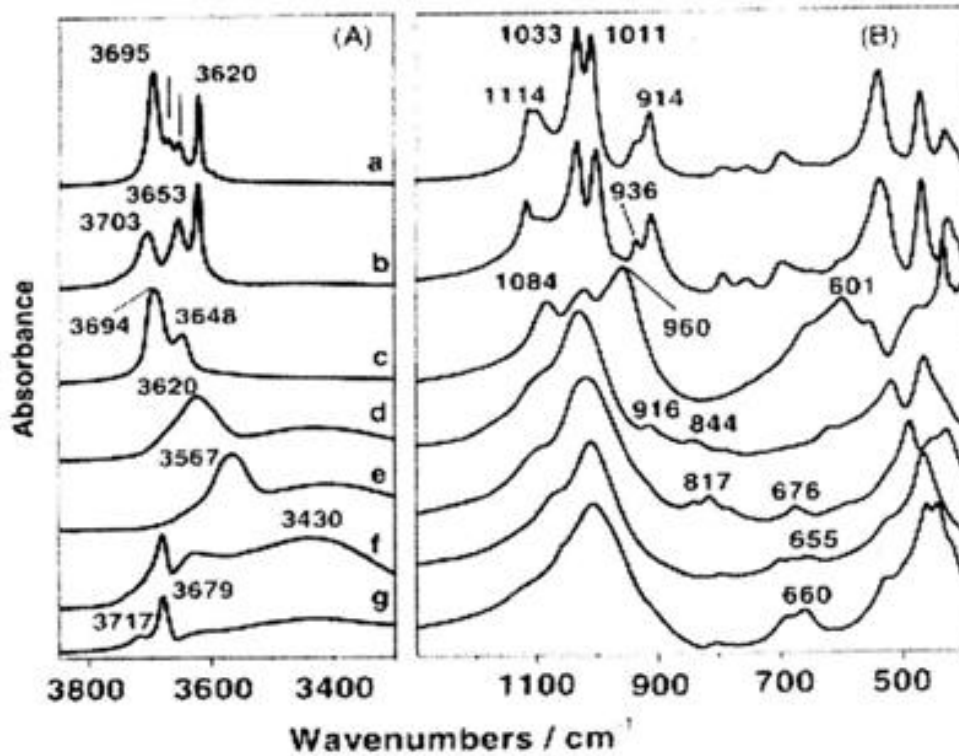


Fig. 34 : Spectre de Kaolinite (a), Dickite (b), Chrysolite (c), Smectite (d), Nontronite (e), Hectorite (f), saponite (g) extension OH dans (A) et 1300-400 cm⁻¹ régions (B).5 (*Madejová 2002*)

➤ Méthode

Les spectres IR des matériaux étudiés ont été enregistrés au Laboratoire de Minéralogie de l'ULg. Les spectres infrarouges couvrant le domaine 400-4000 cm⁻¹ ont été enregistrés sur un spectromètre Nicolet NEXUS (**Fig. 35**), à partir de 2 mg d'échantillon dilué dans une pastille de 180 mg de KBr. La résolution était de 1 cm⁻¹. Afin d'éviter toute contamination par l'eau atmosphérique, les spectres ont été enregistrés sous une purge d'air sec.



Fig. 35 : Spectromètre Nicolet NEXUS (AGEs)

II.1.3. MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE

➤ Principe

Le principe de cette technique repose sur l'interaction entre un faisceau d'électron engendré par un « canon à électrons » et une matrice cristalline ou non. Le faisceau d'électrons secondaires ou celui des électrons rétrodiffusés quittant la surface, sous l'impact de la sonde électronique, est attiré par le collecteur. Le balayage de la sonde sur l'échantillon est utilisé pour en obtenir une image point par point, ligne par ligne, selon un processus séquentiel. Cette technique donne des informations sur le relief de l'échantillon, la morphologie des grains et leur agencement. En complément, un spectre de dispersion en énergie (EDS) donne une information semi-quantitative sur la composition chimique du matériau examiné.

➤ Méthode

La microstructure de l'argile brute a été déterminée par un Microscope Electronique à Balayage (MEB) au Laboratoire de Chimie Inorganique Structurale (LCIS) de l'ULg. Les observations des poudres d'argile ont été réalisées sur un appareil de type Philips XL-30 FEG-ESEM (**Fig. 37**). Les images ont été obtenues par un détecteur d'électrons secondaires après métallisation avec des poudres en carbone par pulvérisation plasma au moyen d'un métalliseur de type « SPI-Module Carbon Coaster » (distance 5 cm, 30 mA, 0,05 atm. d'argon, 50 secondes) (**Fig. 36. c, d**). La tension d'accélération est indiquée sur les images (**15,0 kV**).



Fig. 36 : Métallisation des poudres à carbone par pulvérisation plasma : a : emplacement d'échantillons, b : chauffé, c et d : après métallisation des poudres à carbone par pulvérisation plasma



Fig. 37 : Appareil FEG-ESEM Philips XL30 (MEB)

En combinaison au MEB, on utilise généralement un spectromètre à dispersion d'énergie (EDS) (**Fig. 38**), dans le but d'avoir une analyse chimique qualitative locale. L'image par émission de rayons X est formée à l'aide du rayonnement X caractéristique ($K\alpha$ ou $L\alpha$) d'un élément choisi, contenu dans l'échantillon ; elle représente donc une carte de répartition de cet élément dans une couche superficielle d'environ $1\mu\text{m}$ d'épaisseur.

Le spectromètre étant calé sur la longueur d'onde d'une raie, le déplacement de la sonde permet d'enregistrer la variation de concentration de l'élément correspondant. Le mode de fonctionnement en balayage fournit rapidement des renseignements qualitatifs sur la répartition des éléments à la surface d'un matériau (mappage ou cartographie).

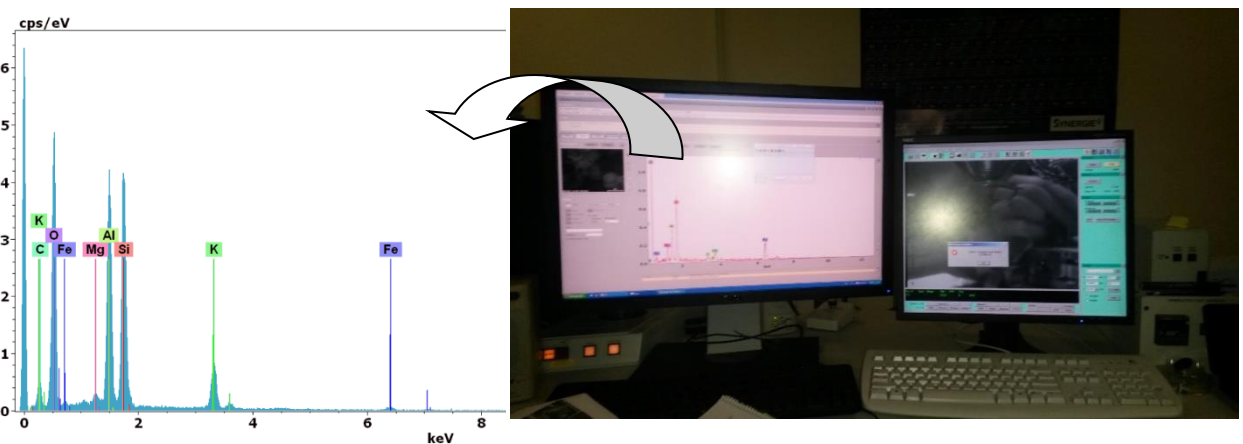


Fig. 38 : Représentation des résultats du MEB et EDS

II.2. ANALYSE GEOCHIMIQUE

La connaissance des compositions chimiques des matériaux argileux est d'une importance capitale dans la détermination de la nature et l'origine des matériaux (Thorez, 2003). Ces compositions chimiques ont été déterminées par spectrométrie de fluorescence atomique au laboratoire de Pétrologie Magmatique (ULg).

II.2.1. PRINCIPE DE LA METHODE

La spectrométrie de fluorescence atomique ou spectrométrie de fluorescence X, est une technique d'analyse qualitative et quantitative qui permet d'identifier et de doser tous les éléments à partir du carbone, parfois à l'état de trace. Elle repose sur l'émission d'un rayonnement caractéristique par les atomes après ionisation. Lorsqu'un électron d'une couche interne (E_0) est arraché à un atome sous l'effet d'un rayonnement quelconque (photons X ou γ , électrons, ions, protons), un électron d'une autre couche d'énergie supérieure E_1 vient immédiatement (10^{-16} s) prendre sa place en émettant un photon d'énergie $E_0 - E_1$ (Fig. 39). En analysant le spectre d'émission d'un échantillon après ionisation, on est capable d'identifier les éléments qu'il contient et, en prenant les précautions nécessaires, de déterminer leurs concentrations.

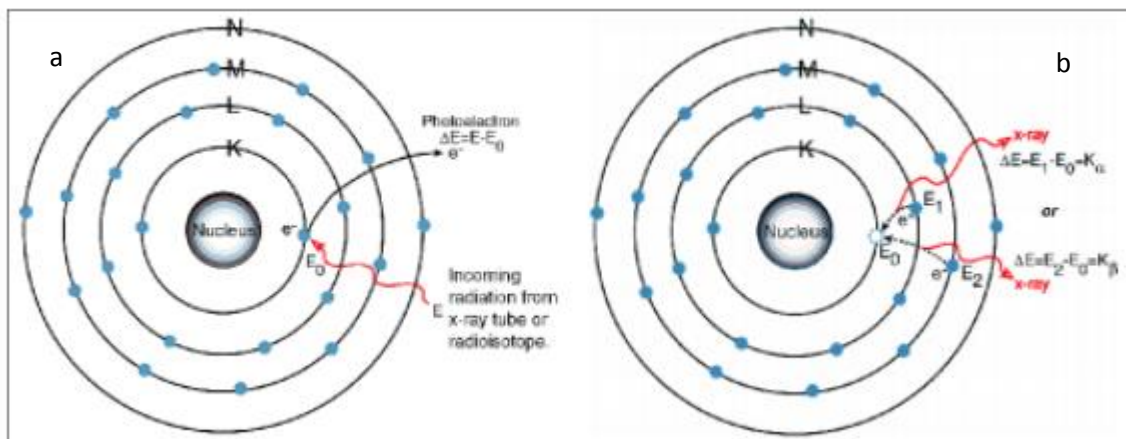


Fig. 39 : Principe de Fluorescence X ;(a) Ionisation de l'atome par un rayonnement électromagnétique (X ou γ) avec éjection d'un électron K. C'est l'effet photoélectrique. (b) La "place" libérée est instantanément occupée par un électron d'une couche supérieure : il y a émission d'un photon X dont l'énergie est égale à la différence d'énergie entre le niveau final et le niveau initial (Galoz, 2011).

II.2.2. PREPARATION DES ECHANTILLONS POUR L'ANALYSE

Une masse de poudre d'argile séchée (12 g) à laquelle on ajoute 2g de la poudre cellulosique WAX est homogénéisée et pressée (200 KN) sous forme de pastille ($\Phi=34$ mm, $e=2.5$ mm) et déposée sur un porte échantillon. Les concentrations des éléments majeurs et traces ont été mesurées en utilisant un spectromètre BRUKER S8 TIGER de longueur d'onde dispersive (WD-XRF) au Laboratoire de Ulg. L'échantillon à analyser, devenu instable, émet un rayonnement secondaire qui passe à travers un collimateur puis est diffracté par un cristal analyseur, selon la loi de Bragg. Les rayons diffractés sont ensuite orientés vers un détecteur pour être analysé. Afin de prendre en compte les éléments non dosés (carbone et eau), la perte au feu a été déterminée. Cette mesure de la perte au feu a été effectuée (selon la norme française NF B 42- 402) sur ~3g de poudre dans un creuset en alumine préalablement taré. L'ensemble creuset-échantillon a été placé dans un four puis chauffé à 5 °C/min jusqu'à 1000 °C pendant 5 heures (Fig. 40).

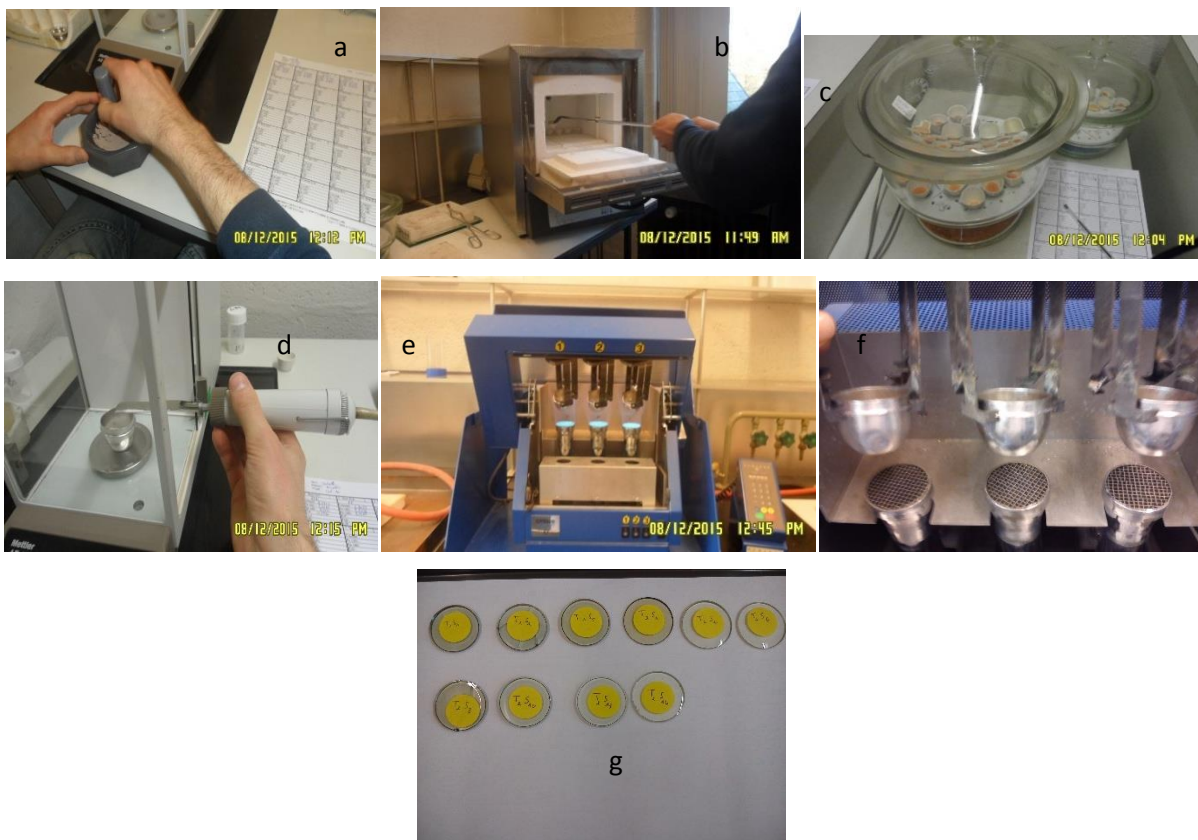


Fig. 40 : Etapes de préparation des échantillons pour analyse par FRX ;
a : broyage au mortier en agate, b : placer dans le four, c : poudre dans un creuset
préalablement taré, (d, e, f) : préparation des perles, g : perles

II.2.3. DETERMINATION DE LA TENEUR EN MATIERE ORGANIQUE PAR PERTE AU FEU

Cette méthode est utilisée pour déterminer la teneur en matière organique par calcination. L'échantillon est séché dans une étuve à 105 °C pendant 24 h pour éliminer l'humidité de l'échantillon. La masse de l'échantillon sec est déterminée (masse A). Ensuite, l'échantillon est placé dans un creuset en céramique et calciné à 550 °C pendant 4h dans un four (*Heiri et al., 2001*) (**Fig. 40b**). On détermine ensuite la masse de l'échantillon calciné (masse B). La perte au feu (LOI) est déterminée par la relation suivante :

$$\text{LOI \%} = (\text{poids sec avant calcination} - \text{poids après calcination}) / \text{poids sec avant calcination} * 100$$

II.3. ANALYSE PHYSIQUE

II.3.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Cette première série d'essai est consacrée à la caractérisation physique des matériaux de sol, c'est-à-dire à la description de la composition des sols et à la détermination de leurs propriétés physiques. La détermination de ces caractéristiques constitue une des premières étapes de la campagne de reconnaissance géotechnique ; elles permettent de déterminer à quelle famille de terrains appartient le sol. Les essais qui constituent cette série sont effectués en laboratoire, sur des échantillons prélevés dans le sol en place. Donc l'analyse granulométrique a pour but de déterminer la distribution en poids des particules d'un matériau suivant leurs dimensions (*Collas & Havard 1982*). Elle trouve un intérêt dans la classification des sols, et permet également d'avoir une idée sur le degré d'évolution du matériau. Cet essai se fait par tamisage à sec.

II.3.2 LES LIMITES D'ATTERBERG

Elles servent à identifier et à classer les sols fins dont les particules sont invisibles à l'œil nu et fournissent des informations complémentaires à celles obtenues par la granulométrie. Compte tenu de leur structure, les argiles ont la propriété d'absorber des quantités d'eau très importantes ou au contraire, de se dessécher, en fonction des conditions d'humidité auxquelles elles sont soumises (*Philiponat, 1998*). Atterberg a défini une série d'essais normalisés qui permet d'analyser la variation de consistance des sols fins triturés avec leur teneur en eau.

Les limites d'Atterberg (W_l , W_p et I_p) ont pour but de définir les états d'humidité correspondant aux limites entre les différents états du sol (liquide, plastique et solide). Ces limites s'expriment en pourcentage. La connaissance de ces limites permet ainsi de prévoir rapidement les possibilités constructives d'un sol. Les limites d'Atterberg et en particulier l'indice de plasticité d'un sol varient non seulement avec l'importance de sa fraction argileuse mais également avec la nature des minéraux argileux, et les valeurs les plus élevées sont observées dans les argiles montmorillonitiques (Kornmann, 2009) (Tableau 9). Pour déterminer la limite de liquidité, on a utilisé l'appareil de Casagrande. Cet appareil est constitué d'une coupelle de bronze, d'une base en caoutchouc dur et d'une came entraînée par une manivelle. On estime que le sol atteint la limite de liquidité lorsque, tombant d'une hauteur de 10 mm, on doit frapper la base 25 fois pour refermer, sur une distance de 13 mm (Fig. 41). L'essai de détermination de la limite de plasticité consiste à former un rouleau de 3 mm de diamètre. La limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint 3 mm. Ces limites ont été déterminées selon les normes ASTM D-422-63. L'indice de plasticité qui est la différence entre la limite de liquidité (W_l) et la limite de plasticité (W_p) traduit l'étendue de l'intervalle pendant lequel on peut travailler le sol (Philipponnat, 1998).

Tableau 9 : Limites d'Atterberg et de retrait de certains minéraux argileux (Kornmann, 2009)

Minéral	Limite de liquidité (%)	Limite de plasticité (%)	Indice de plasticité (%)	Limite de retrait (%)
Montmorillonite	100 à 900	50 à 100	50 à 800	8 à 15
Illite	60 à 120	35 à 60	25 à 60	15 à 17
Kaolinite	30 à 110	25 à 40	5 à 70	25 à 29
Chlorite	44 à 47	36 à 40	8 à 7	-

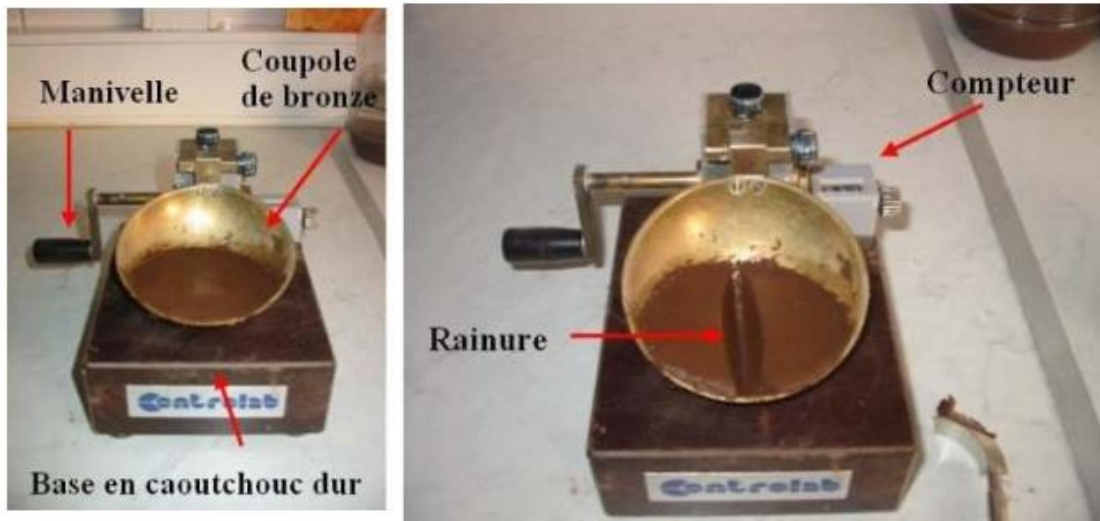


Fig. 41 : Détermination de la limite de liquidité avec l'appareil de Casagrande

CONCLUSION

Les formations géologiques rencontrées sont constituées essentiellement d'alluvions argileux, sableux et des blocs de grès qui reposent sur les formations numidiennes.

L'échantillonnage s'est fait au niveau des sondages à la pelle et des sondages profonds. Ces derniers ont fait l'objet d'analyses préliminaires ou approfondies en Belgique (Laboratoire Argiles, Géochimie et Environnements sédimentaires (AGEs), Laboratoire de Chimie Inorganique et Structurale, laboratoire de Pétrographie Magmatique, laboratoire de minéralogie ULg à l'Université de Liège), Gabinete Geotécnico Laboratorio Poligono Industrial Los Linares Madrid (Espagne) et laboratoire voix et béton (LVB) Constantine et laboratoire de l'Est (LTP EST), (Algérie).

Les analyses approfondies ont porté sur la minéralogie et la géochimie des argiles sous numidiennes. L'analyse minéralogique s'est effectuée par diffraction des rayons X sur la poudre totale (brut) et sur la fraction argileuse (<2 µm) (agrégat orienté) pour identifier les assemblages minéralogiques des formations argileuses ; par microscopie infrarouge (IR) et par microscopie électronique à balayage (MEB). L'analyse géochimique est obtenue par Fluorescence X (XRF) pour identifier les teneurs en oxydes ; des analyses complémentaires ont été menées pour déterminer le taux de matière organique (LOI). Les analyses physiques ont concerné l'étude granulométrique par tamisage et les limites d'Atterberg (limite de plasticité, limite de liquidité et indice de plasticité) et enfin les essais géomécaniques (compression simple et aux essais triaxiaux, ou plus communément ceux de la compression bi-axiale). Le chapitre suivant présente les résultats des travaux réalisés.

RESULTATS

INTRODUCTION

Les propriétés des argiles sont variables et sont fonction de leur structure et de leur composition (Murray, 1999). L'identification des espèces minérales d'une argile est primordiale dans l'évaluation de ses propriétés physiques et technologiques.

Dans ce chapitre, on reporte les résultats d'analyses de laboratoire, portées sur les caractères chimiques, minéralogiques et physique des argiles après avoir procédé à des traitements classiques décrits dans le chapitre précédent.

I. CARACTERISATION MINERALOGIQUE DES ARGILES SOUS NUMIDIENNE

I.1. CARACTERISATION PAR DIFFRACTION DES RAYONS X

I.1.1. IDENTIFICATION DES MINERAUX NON ARGILEUX ET ARGILEUX

Dans la nature, plusieurs espèces minérales présentent des feuillets d'épaisseurs variables, voisins et/ou identiques. La détermination de ces minéraux est basée sur la connaissance de la distance réticulaire des plans (001) ou de leurs harmoniques (002), (003), etc... qui sont des fractions entières de la distance basale (001). Pour certains minéraux ces distances réticulaires basales se déplacent d'une manière caractéristique après certains traitements spécifiques appliqués aux lames (Robert, 1975 et Brindley & Brown, 1980).

❖ Les résultats d'analyse minéralogique par DRX sur poudre des matériaux argileux sont illustrés par des spectres de diffraction, ces analyses montrent les réflexions différentes mentionnées ci- dessous :

- Quartz (Q) : réflexion à 4.26 Å, 4.25 Å, 3.34 Å, 3.33Å, 2.58 Å, 2.56 Å, 2.45 Å, 2.23 Å et 2.12 Å (**Fig. 42**)
- Feldspath (k-F) : réflexion à 3.24 Å, 3.23 Å, 3.31 Å (**Fig. 43**)
- Plagioclase (P) : réflexion à 3.16 Å, 3.18 Å
- Muscovite : réflexion à 2.56 Å
- Sidérite : réflexion à 2.8 Å. (**Fig. 44**).
- Hématite (He) : réflexion à 2.69, 2.71 Å (**Fig. 45**).
- Calcite (Ca) : réflexion à 3.02 Å, 3.03 Å. (**Fig. 43**).
- Dolomite : réflexion à 2.9 Å.
- Minéraux argileux : réflexion à 4.6 Å. (**Fig. 42 et Fig. 44**).

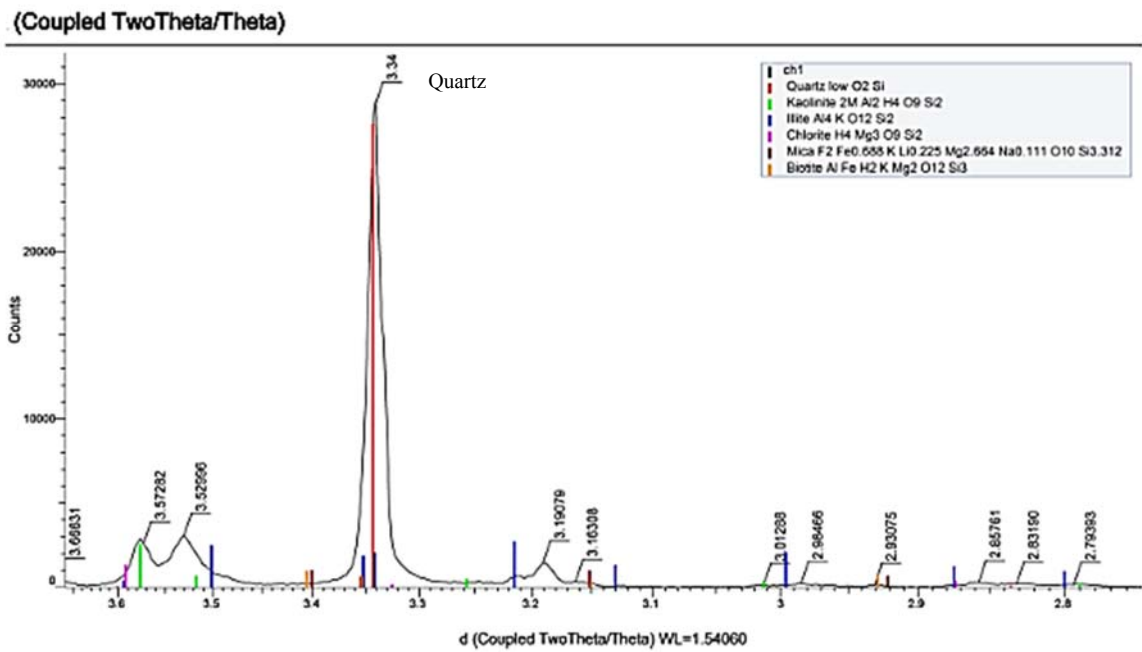


Fig. 42 : Spectre DRX de poudre d'argile du site Ain Charchar

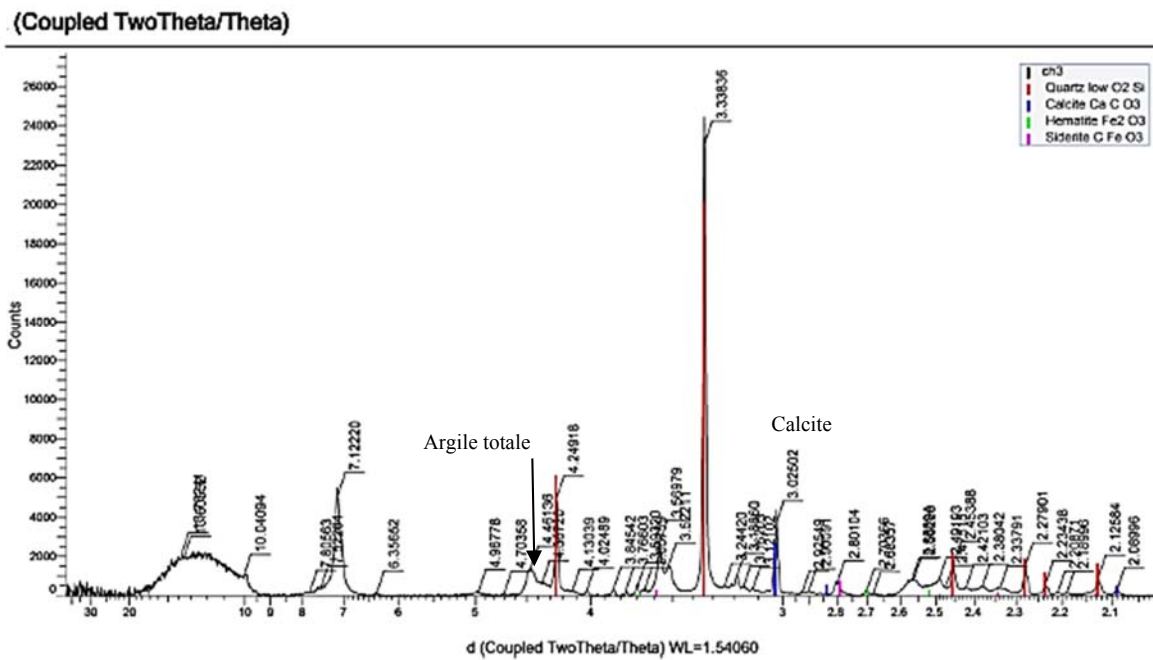


Fig. 43 : Spectre DRX de poudre d'argile du site de Menzel El Abtal



Fig. 44 : Spectre DRX de poudre d'argile du site de Hellala

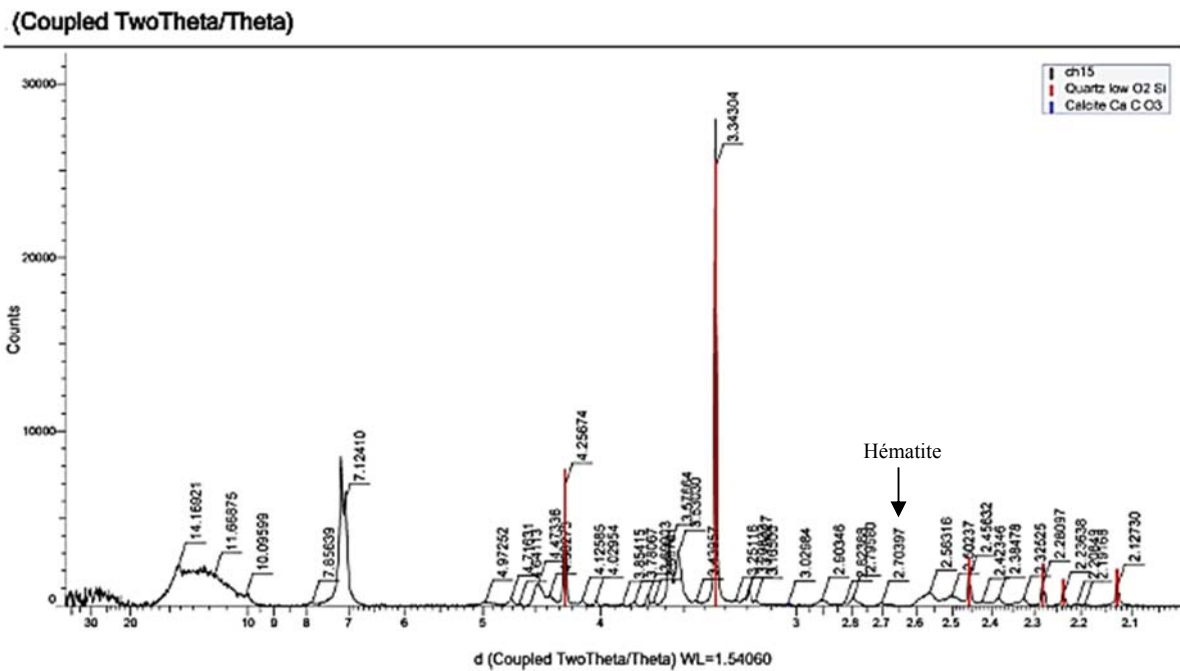


Fig. 45 : Spectre DRX de poudre d'argile du site de Guessaba

Les analyses minéralogiques représentées dans les **tableaux 10 et 11**, et **Fig. 46, Fig. 47**, montrent une composition pratiquement homogène sur l'ensemble des échantillons indiquant la prédominance de quartz dans tous les échantillons avec un pourcentage variant entre 19 et 40 %; s'ajoute à cela des minéraux accessoires tel que le feldspath-K avec un pourcentage de 3 à 6% ; les plagioclases avec un pourcentage allant de 1 à 5% ; présence de calcite (3 à 9%) , la sidérite (1 à 4%), traces de dolomite (0,2 - 1,5%). On note aussi des réflexions à 4.46 et 4,47 qui indiquent la présence de minéraux argileux avec un pourcentage compris entre 30 et 60 %.

Tableau 10 : Distribution des minéraux non argileux dans chaque site

Site/minéral	Muscovite	Quartz	Minéraux argileux	Plagioclase	Feldspath	Calcite
ACH	16,47	37,45	39,42	5,36	0,00	0,00
MEA	17	30,67	30,50	3,50	0,00	9,29
AZZ	8,87	35,53	41,42	5,52	0,00	4,88
HELL1	7,51	19,88	63	1,10	3,36	-----
HELL2	12,77	41,85	37,00	1,98	4,88	-----
GUES1	8,64	27,50	55	1	2,81	0,54
GUES2	13,10	32,18	51,26	0,48	3	0,00

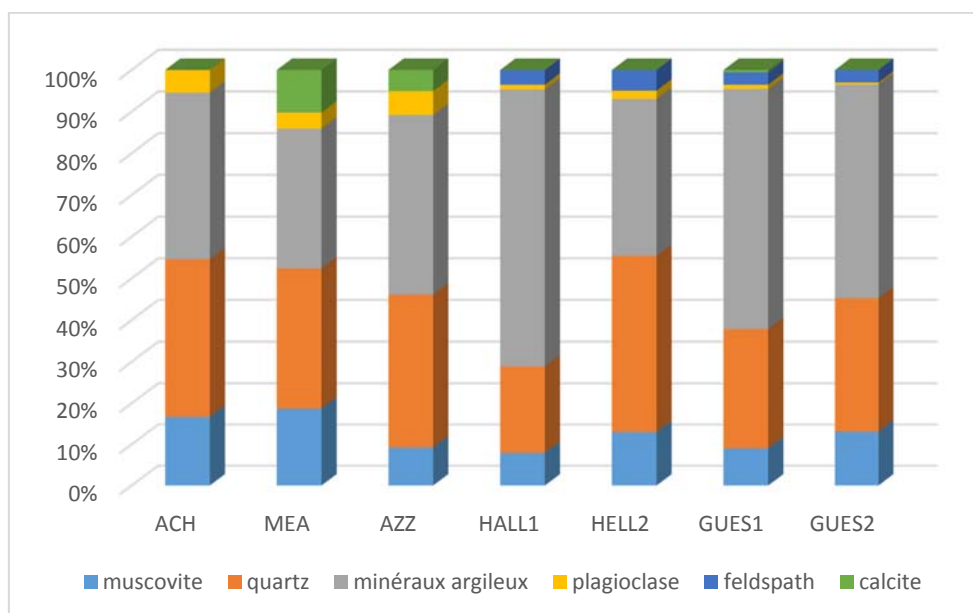


Fig. 46 : Composition minéralogique des argiles brutes de la région d'Azzaba.

Tableau 11 : Distribution des minéraux non argileux dans les tunnels

Echantillon	Muscovite	Quartz	Minéraux argileux	Plagioclase	Feldspath	Sidérite	
Tunnel 1	T1S1	8,60	27,5	55	1	2,81	2,86
	T1S2	9,27	38,44	43,93	-----	4,72	2,65
	T1S5	9,42	29	54,36	1,69	3,11	1,59
Tunnel 2	T2S1	7,21	31,14	52,91	1,34	5,17	2,21
	T2S2	13,1	32,18	51,26	0,48	3	-----
	T2S6	10,49	21,26	62,8	1,13	3,85	-----
	T2S8	7,37	42	41	0,43	6,6	2,59
	T2S10	5	52,18	29,81	1,62	7,12	2
	T2S13	5,11	50,4	30,24	3,25	10	1
	T2S14	6,23	48	40	2	3,78	-----

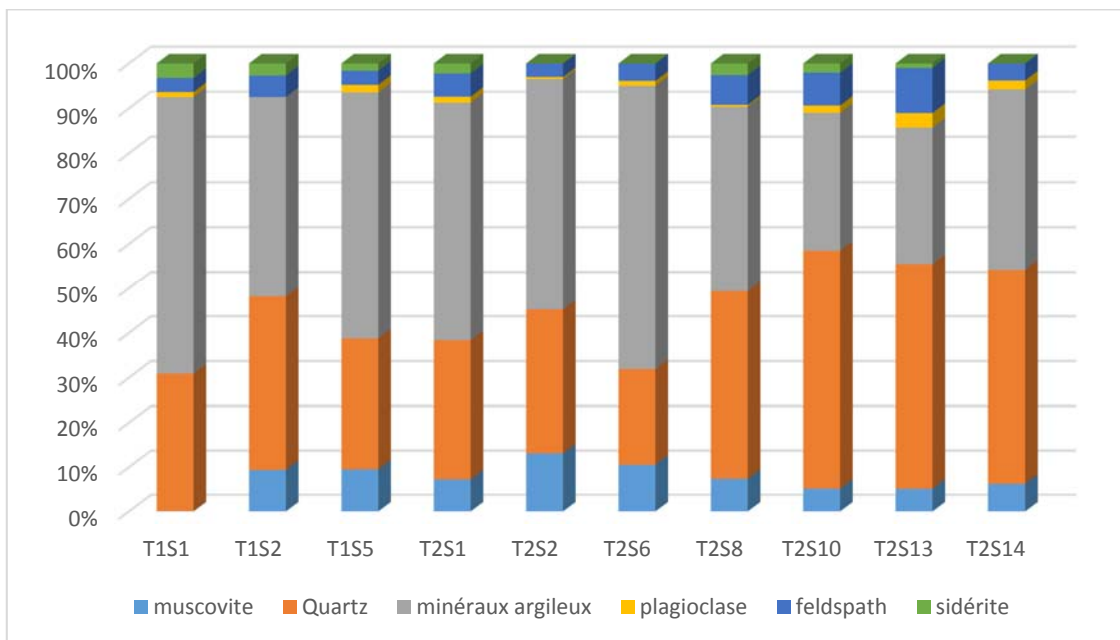


Fig. 47 : Composition minéralogique des argiles brutes des tunnels

❖ La minéralogie de la fraction argileuse montre des réflexions différentes :

- Kaolinite (K) : réflexion à 7.22 Å, 7.17 Å, 7.16 Å, 4.45 Å, 3.58 Å, 3.57 Å (**Fig. 48**)
- Chlorite : réflexion à 14.2 Å (**Fig. 48, Fig. 49**)
- Smectite (S) : réflexion à 14.52 Å (**Fig. 50, Fig. 51**)
- Illite (I) : réflexion à 9.98 Å, 9.81Å, 10 Å (**Fig. 50**)
- Vermiculite : réflexion à 17 Å
- Interstratifié (10-14) : réflexion Å (**Fig. 52**)

La réflexion à 10 Å (**Fig. 48**) est attribuée à l'illite qui est mesurée sur le spectre (EG), cette valeur reste la même quelque soit le traitement (N), (H). La réflexion à 7 Å est attribuée à la kaolinite ; en effet, cette valeur est la même dans EG, par contre elle disparaît après chauffage (H) (**Fig. 49**) ; la réflexion à 7 Å et 14 Å est attribuée à la chlorite (*Velde et Meunier, 2008 ; Thorez, 1986*). On note la présence d'une réflexion à 12 Å attribuée à un interstratifié 10-14 Å qui reste stable après traitement à l'éthylène glycol ; par contre elle disparaît après chauffage, cette réflexion correspond à l'interstratifié de type « illite-vermiculite ».

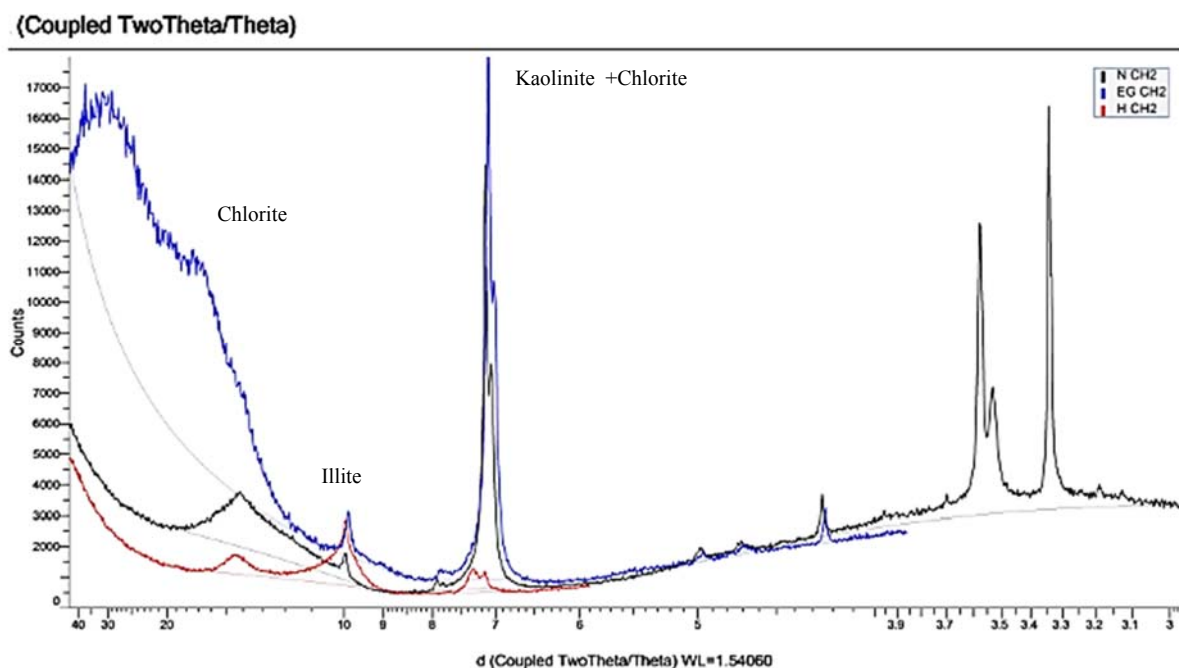


Fig. 48 : Spectre d'agrégat orienté des argiles de Menzel El Abtal

(Coupled TwoTheta/Theta)

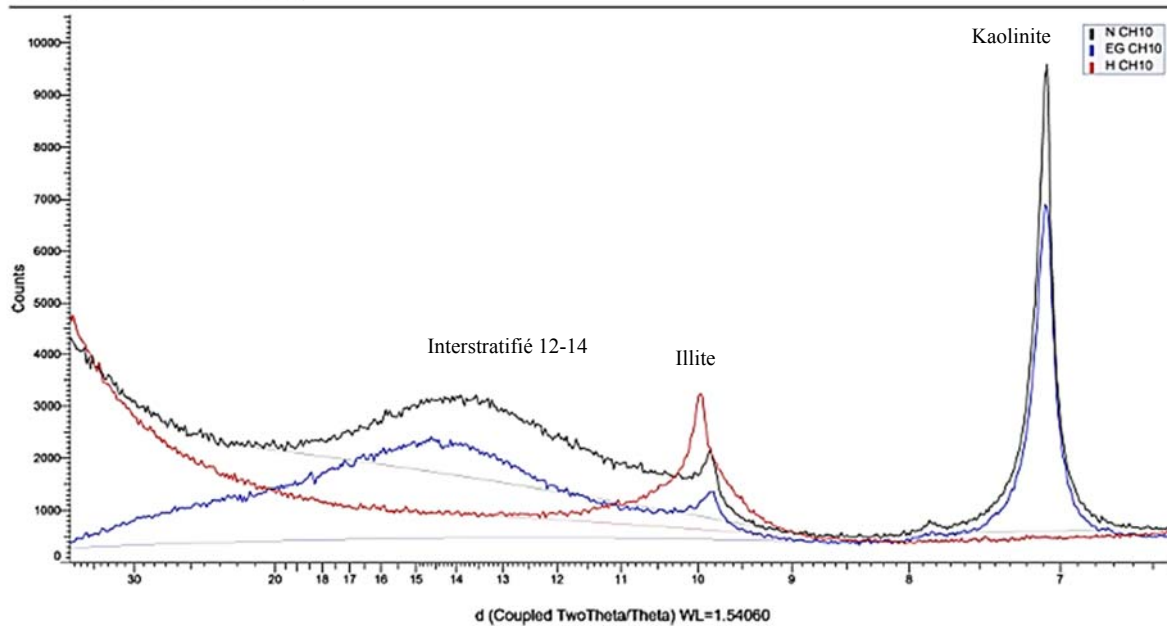


Fig. 49 : Spectre DRX d'agrégat orienté des argiles du site de Hellala CH10

(Coupled TwoTheta/Theta)

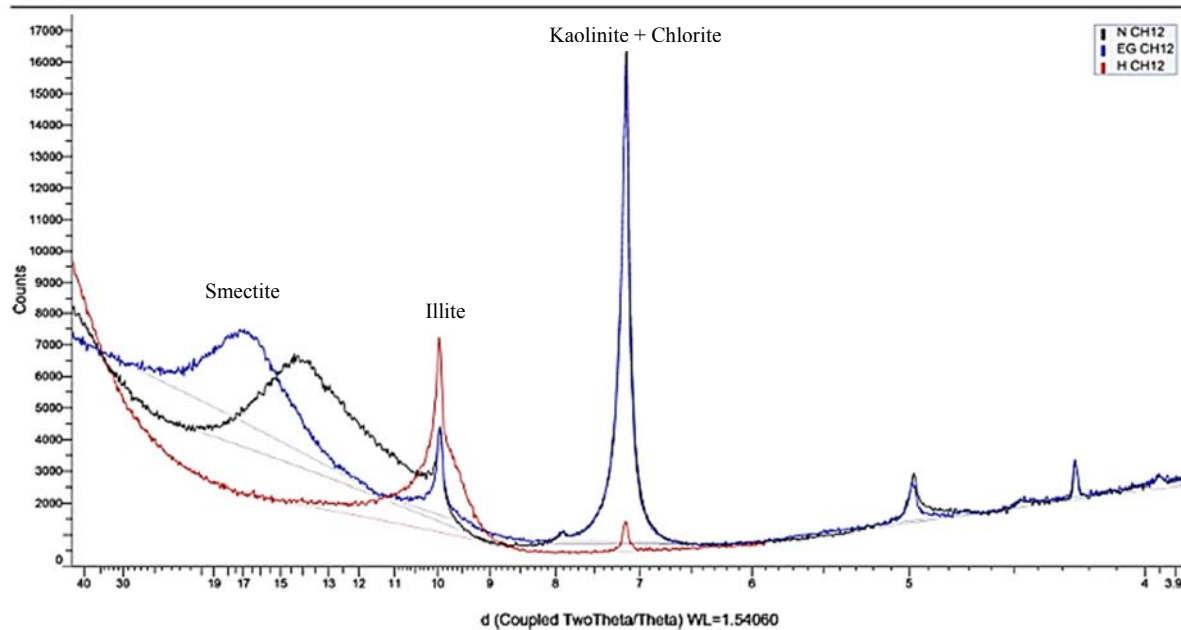


Fig. 50 : Spectre DRX d'agrégat orienté des argiles du site de Hellala CH12

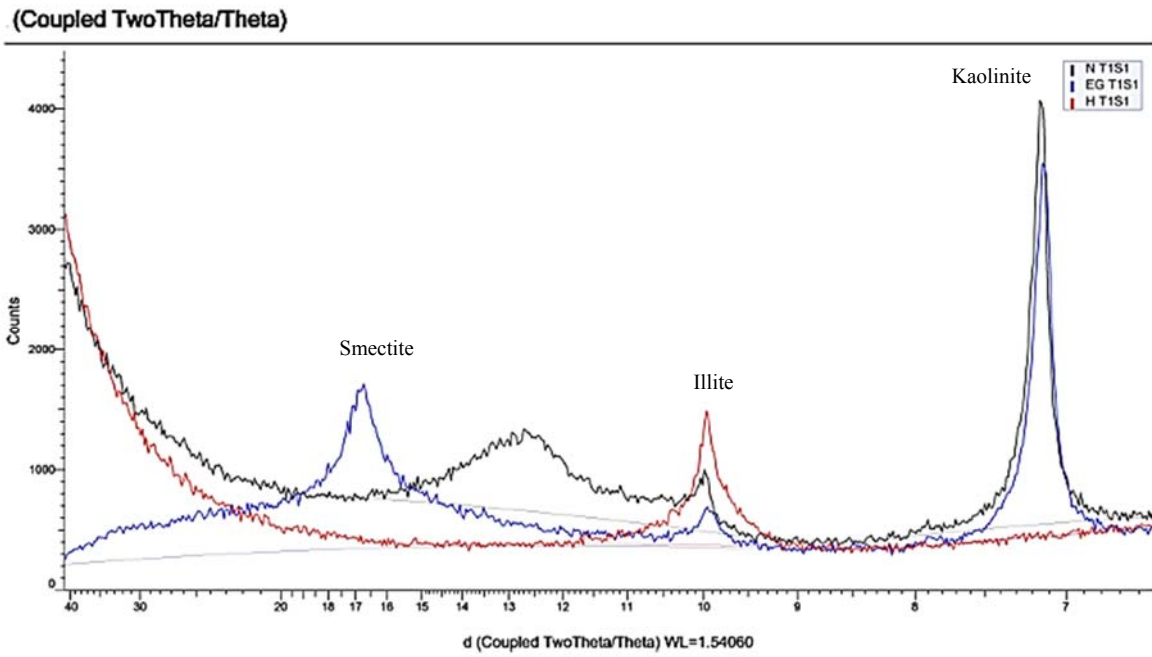


Fig. 51 : Spectre DRX d'agrégat orienté des argiles du site de Gueissaba (Tunnel 1)

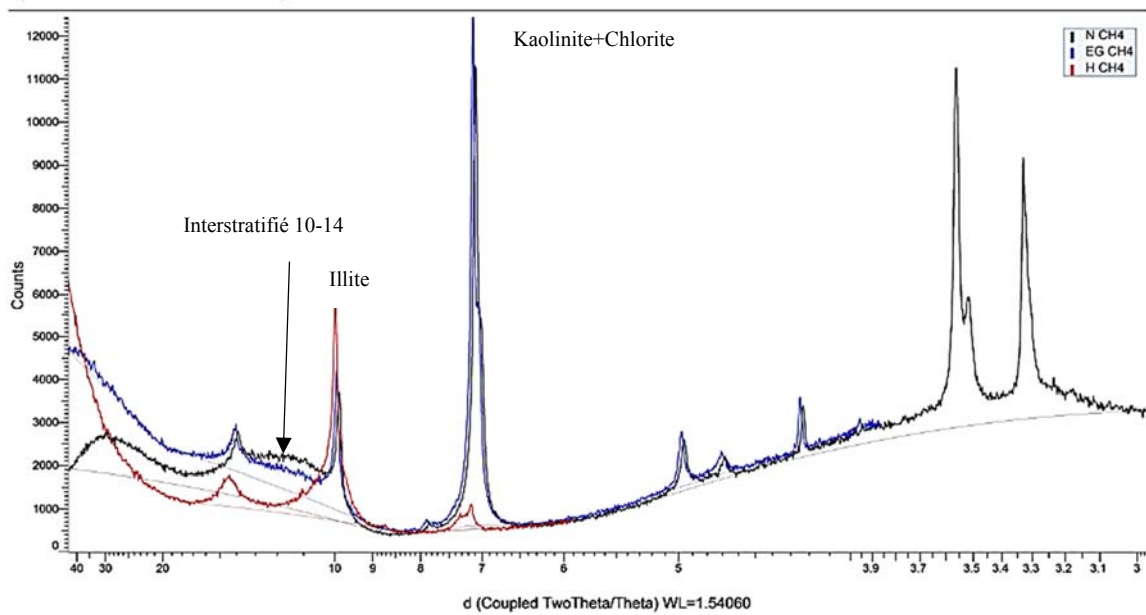


Fig. 52 : Spectre DRX d'agrégat orienté des argiles du site de Gueissaba (entre les tunnels)

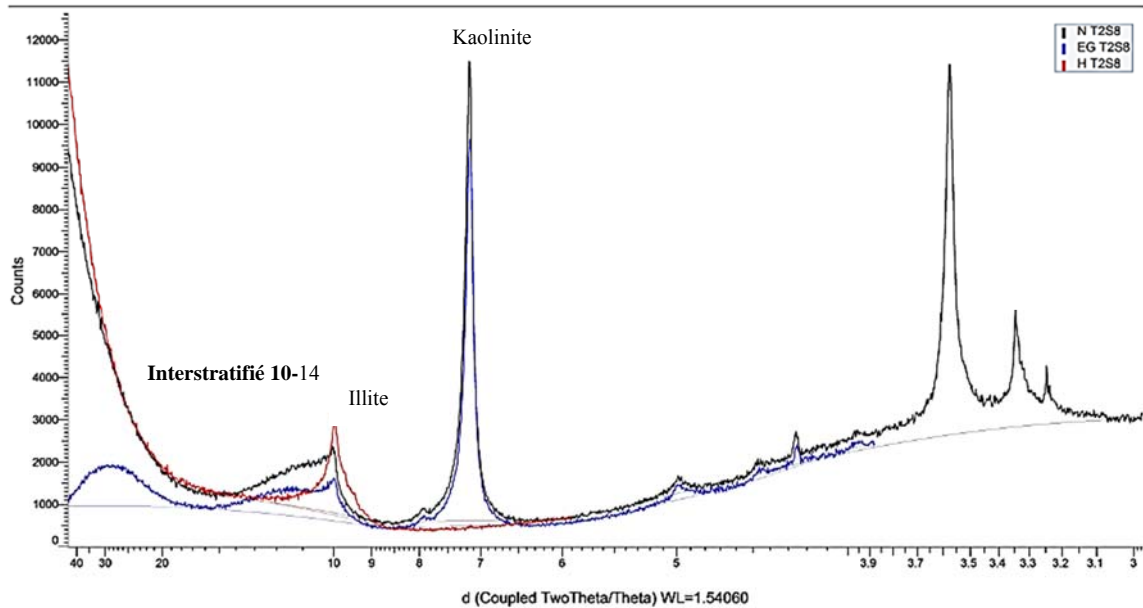


Fig. 53 : Spectre DRX d'agrégat orienté des argiles du site de Guessaba (Tunnel 2)

Ces spectre montrent une abondance du minérale kaolinite avec un pourcentage compris entre 60 et 84% ; l'illite présente un pourcentage compris entre 11 et 33%, la chlorite entre 0 et 11%, la smectite entre 0 et 6% et les interstratifiés (10 - 14) entre 2 et 6%. **(Tableaux 12, 13 et Figs. 54, 55).**

Les formations argileuses de la région d'azzaba sont composées par de la kaolinite, du quartz comme minéral dominant, du feldspath-K, des plagioclases, illite, chlorite et smectites comme minéraux accessoires. On note cependant que ces valeurs varient d'une localité à l'autre **(Tableau 14).**

Tableau 12 : Distribution des minéraux argileux dans chaque site

Site/minéral	Kaolinite	Illite	Chlorite	Interstratifiés	Smectite	Vermiculite
ACH	67	23	5	5	-----	-----
MEA	75	17	-----	2	-----	6
AZZ	67	25	4	2	-----	-----
HELL1	75	19	-----	-----	6	-----
HELL2	79	17	-----	4	-----	-----
GUES1	72	20	4	-----	4	-----
GUES2	80	16	-----	4	-----	-----

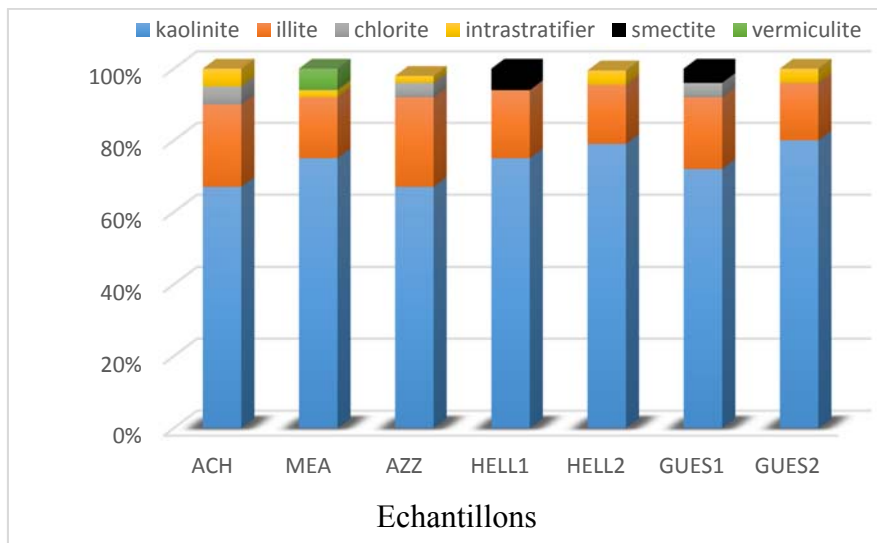


Fig. 54 : Composition minéralogique de la fraction argileuse de la région d’Azzaba

Tableau 13 : Distribution des minéraux argileux dans les tunnels

Echantillon / minéral	Kaolinite	Illite	Chlorite	Interstratifiés	Smectite
T1S1	75	21	4	-----	4
T1S2	72	23	-----	4	-----
T1S5	79	15	-----	5	-----
T2S1	82	14	-----	3,5	-----
T2S2	79	16	-----	4	-----
T2S6	67	28	-----	4,6	-----
T2S8	81	14,5	-----	4,28	-----
T2S10	70	26	-----	4	-----
T2S13	72	22	-----	5	-----
T2S14	85	12	-----	3	-----

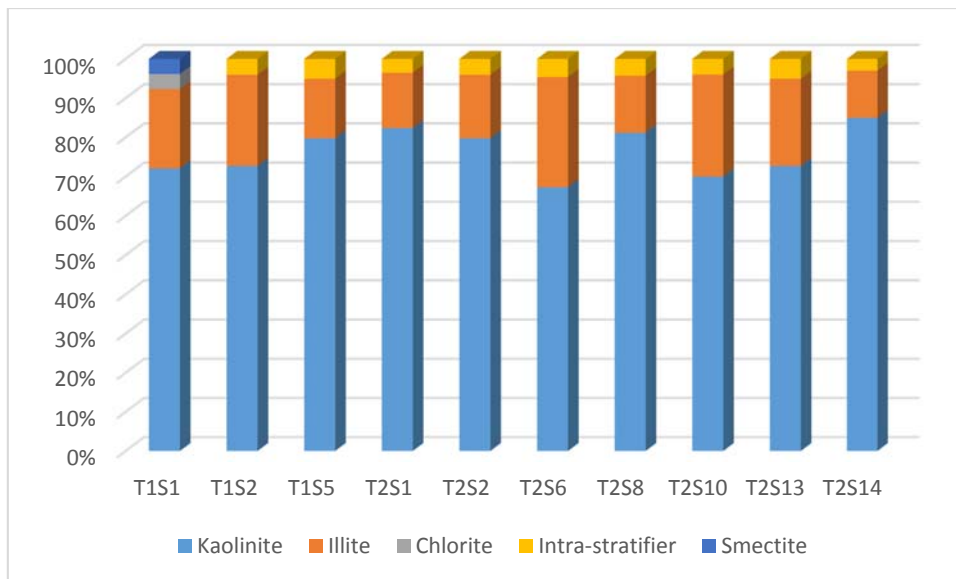


Fig. 55 : Composition minéralogique de la fraction argileuse dans les tunnels

Tableau 14 : distribution des minéraux argileux et non argileux de chaque site

Site et Nom d'échantillon	Minéralogie de brute (poudre) %										Minéraux argileux (fraction argileuse <2µm) %				
	Muscovite 2,56	Quartz 3,34	Minéraux Argileux 4,6	Plagioclase 3,21	Feldspath 3,26	Sidérite 2,8	Hématite 2,71	Calcite 3,03	Dolomite 2,9	Kaolinite 7	Illite 10	Chlorite 14	Inter Stratifier (10-14)	Smectite 17	Vermiculite 17
	Facteurs correctif pour chaque minéral														
	(6,00) Cook et al. (1975)	(1,00) Cook et al. (1975)	(20,00) Boski et al. (1998)	(2,80) Cook et al. (1975)	(4,30) Cook et al. (1975)	(1,15) Cook et al. (1975)	(3,33) Cook et al. (1975)	(1,65) Cook et al. (1975)	(1,53) Cook et al. (1975)	(0,70) Fagel et al. (2007)	(1,00) Fagel et al. (2007)	(0,34) Fagel et al. (2007)	(0,40) Fagel et al. (2007)	(0,25) Fagel et al. (2007)	(0,34) Fagel et al. (2007)
ACH	Ch1	16,47	37,45	39,42	5,36	-----	-----	-----	-----	67	23	5	5	-----	-----
MEA	Ch2	9	12,08	17	-----	8	1,12	-----	52,06	1	81	11	7	-----	-----
	Ch3	17	30,67	37,5	3,5	-----	1	-----	9,29	Trace	75	17	-----	2	-----
AZZ	Ch4	15	32,4	40,51	2,83	2,17	1,16	-----	4,17	1,47	60	33	3	4	-----
	Ch5	8,87	35,53	41,42	5,52	4,24	-----	-----	4,88	1,5	67	25	4	2	-----
	Ch6	9	28,6	53,12	-----	3,51	3,13	0,89	-----	0,2	63	32	-----	5	-----
	Ch7	13,19	31,25	46,65	-----	4,48	1,59	1,92	-----	0,88	75	22	-----	2	-----
	Ch8	13,61	12,16	65,99	2	2,21	4,74	0,75	0,51	-----	80	16,5	-----	3	-----
HEL	Ch9	7,51	19,88	62,61	1,09	3,36	3,96	1,56	-----	-----	79	16,5	-----	4	-----
	Ch10	11,08	30,79	49,27	1,72	3,44	1,62	2,05	-----	-----	67	27	-----	-----	6
	Ch11	17,68	45,68	30,94	2	4,75	1	-----	-----	-----	73	24	-----	-----	3
	Ch12	12,77	41,85	37	1,98	4,88	1,14	0,35	-----	-----	75	19	-----	-----	6
	T1S1	8,64	27,5	55	1	2,81	2,86	1,3	0,54	0,4	75	21	4	-----	4
	T1S2	9,27	38,44	43,93	-----	4,72	2,65	0,36	-----	-----	72	23	-----	4	-----
	T1S5	9,42	29	54,36	1,69	3,11	1,59	0,8	-----	-----	79	15	-----	5	-----
	Ch13	7,41	34,61	37,1	3,8	4,25	-----	-----	7,13	5,67	90	2	3	1,5	-----
	Ch14	7,22	38,75	43,36	4,38	2,58	-----	-----	2,68	-----	72	12	11	5	-----
	Ch15	8,56	40	42,8	1	6,13	1,31	-----	0,23	-----	84	3	6	6	-----
GUESS	T2S1	7,21	31,14	52,91	1,34	5,17	2,21	-----	-----	-----	82	14	-----	3,5	-----
	T2S2	13,1	32,18	51,26	0,48	3	-----	-----	-----	-----	79	16	-----	4	-----
	T2S6	10,49	21,26	62,8	1,13	3,85	-----	-----	0,44	-----	67	28	-----	4,6	-----
	T2S8	7,37	42	41	0,43	6,6	2,59	-----	-----	-----	81	14,5	-----	4,28	-----
	T2S10	5	52,18	29,81	1,62	7,12	2	-----	-----	2,28	70	26	-----	4	-----
	T2S13	5,11	50,4	30,24	3,25	10	1	-----	-----	-----	72	22	-----	5	-----
	T2S14	6,23	48	40	2	3,78	-----	-----	-----	-----	85	12	-----	3	-----

I.2. CACTERISATION PAR SPECTROSCOPIE INFRAROUGE (IR)

La spectrométrie IR est une technique complémentaire à la DRX. Elle est un outil précieux connu pour sa sensibilité à détecter les minéraux très hydratés et à forte instabilité thermique. Le tableau 15 fait ressortir les différentes bandes d'absorption des radicaux des minéraux présents dans les argiles étudiées.

Les spectres infrarouges des échantillons du tunnel 1 et tunnel 2 sont reportés sur les figures 55 jusqu'à 60 ; ces derniers représentent les spectres IR des argiles étudiées dans l'intervalle 4000-400 cm^{-1} . A l'observation de ces spectres et dans les hautes fréquences, les vibrations caractérisant les groupements hydroxyles de la kaolinite sont :

- ν_1 à 3695-3696 cm^{-1} ;
- ν_3 à 3654 cm^{-1} ;
- ν_4 à 3619-3620 cm^{-1} .

En application des tests de *Van der Marel et al. (1962)*, les formations argileuses étudiées présentent toutes des kaolinites mal cristallisées selon le plan (a, b) au vu du fait que ν_2 a diminué jusqu'à devenir inférieure à ν_3 . De même, ces matériaux présentent des défauts d'empilement suivant l'axe (c) car la bande à 938 cm^{-1} est inexistante.

Pour le premier tunnel, les spectres IR étudiés, montrent deux bandes de vibration d'élongation C-O autour de 1425 cm^{-1} (**Fig. 56**), 1429 cm^{-1} (**Fig. 58**) caractéristique de la calcite. Les bandes apparaissant autour de (3696, 3697) cm^{-1} et (3619, 3620, 3621) cm^{-1} ont révélé la présence de la kaolinite et de l'illite (*Farmer, 1974 ; Russel et Fraser, 1994*). Ces bandes sont observées dans tous les spectres. Le pic à 3425 cm^{-1} et celui à 1635 cm^{-1} (**Fig. 56**) correspondent à la bande d'absorption de l'eau de constitution (OH) caractéristique des phyllosilicates hydratés (*Farmer, 2000 ; Madejova, 2003*).

Les larges bandes d'absorption, de faible intensité centrées autour de 1625 cm^{-1} (**Fig. 57**) et 1626 cm^{-1} (**Fig. 58**) sur tous les matériaux analysés correspondent à l'absorption de l'eau ou des radicaux (OH) caractéristique des phyllosilicates hydratés (*Farmer, 2000 ; Madejova, 1998*) ou éventuellement aux autres radicaux constitutifs des aluminosilicates amorphes.

Celles dans le domaine 2820-2960 cm^{-1} sont probablement révélateurs des matières organiques, (*Mudrikah, 1993*) (**Fig. 56, Fig. 57**).

La bande à 912 cm^{-1} (**Fig. 56, Fig. 57 et Fig. 58**) est attribué aux vibrations des groupements Al-Al-OH et Al-Mg-OH, indiquant la présence de la smectite (*Caillere et al, 1982 ; Madejova et al, 1998*). Cette smectite est observée dans le premier tunnel mais qui reste en faible quantité. Dans la liaison Al-O, les vibrations se manifestent par une large bande centrée sur

915 cm^{-1} comportant sur son flanc de hautes fréquences, un épaulement vers 937 cm^{-1} (*Brindley et al., 1986*).

La bande autour de 470 cm^{-1} (**Fig. 56**) et 471 cm^{-1} (**Fig. 57, Fig. 58**) observée dans tous les spectres est attribuée aux vibrations de flexion Si-O-Si. Les bandes autour de 538 cm^{-1} proviennent des vibrations Si-O-Al (Al en position octaédrique) (*Madejova, 2003, Van Jaarsveld et al., 2002*). (**Figs. 56, 57, 58**). Les bandes à 1033 cm^{-1} , 796 cm^{-1} (**Fig. 57**), 798 cm^{-1} (**Fig. 56**), et 694 cm^{-1} (**Fig. 57**), 695 cm^{-1} (**Fig. 56, 58**) cm^{-1} correspondent aux vibrations d'élongation de Si-O du réseau de quartz (*velde, 1978*) ; ces bandes sont observées dans tous les échantillons.

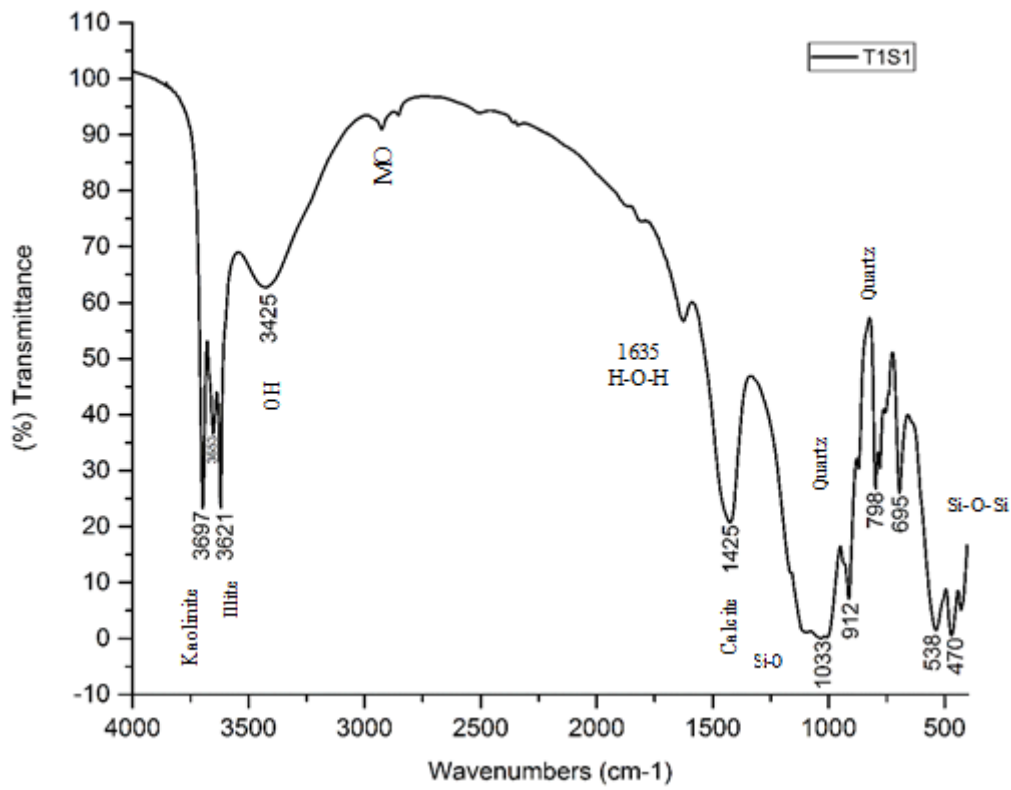


Fig. 56 : Spectre d'analyse par IR (Tunnel 1 sondage 1)

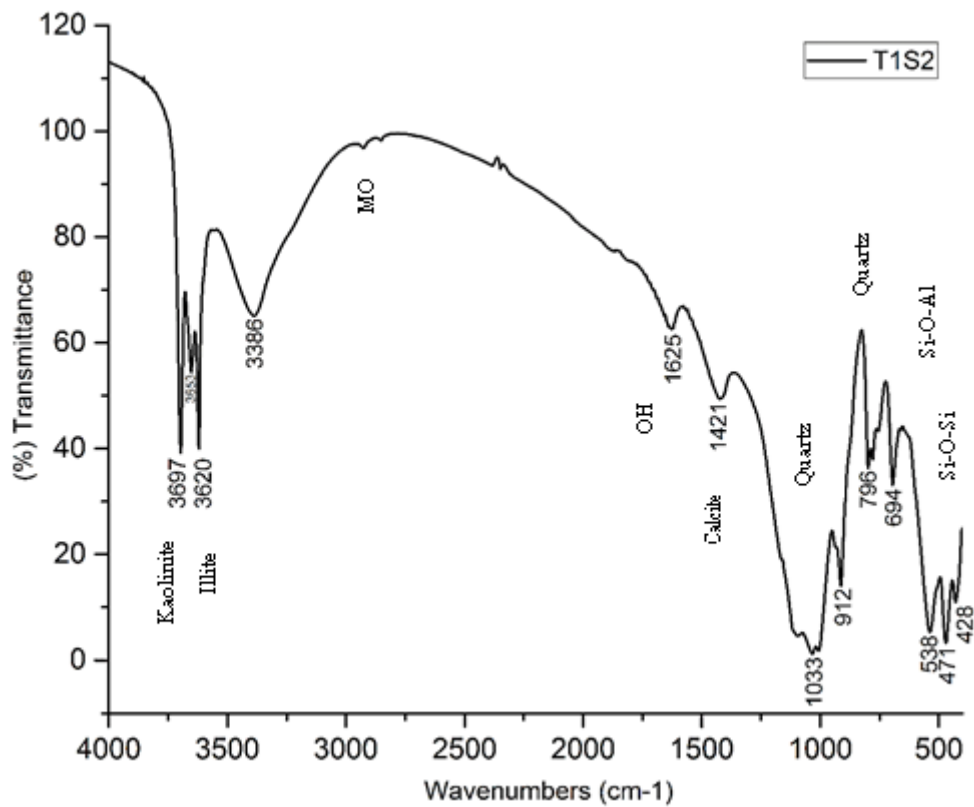


Fig. 57 : Spectre d'analyse par IR (Tunnel 1 sondage 2)

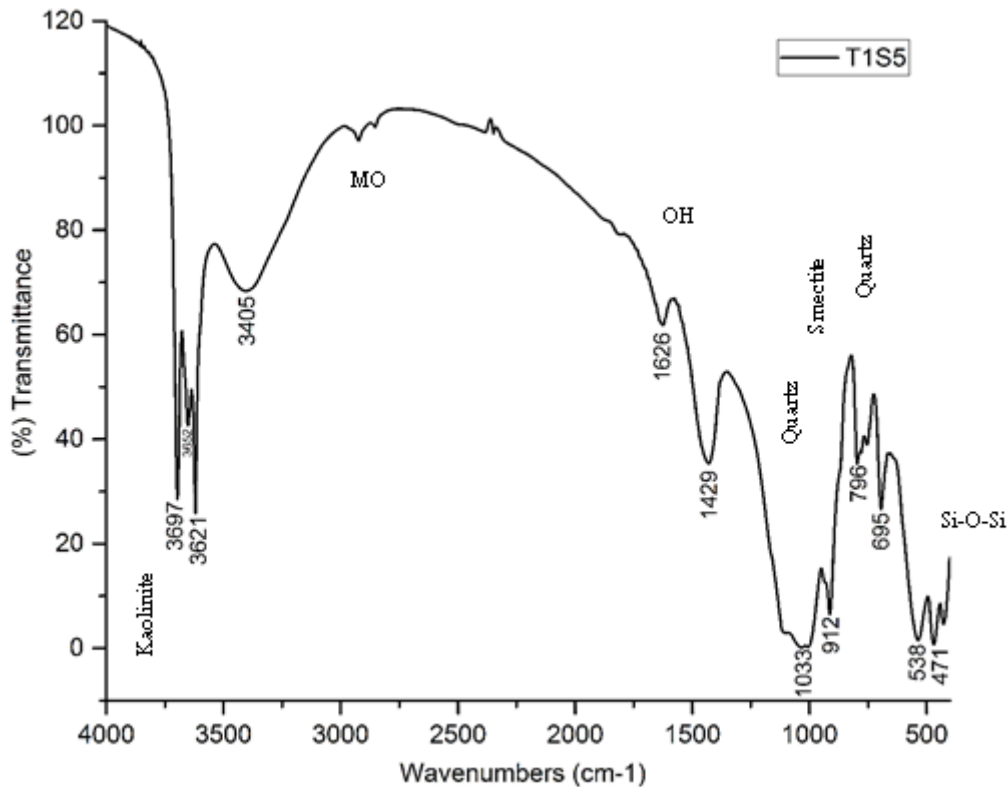


Fig. 58 : Spectre d'analyse par IR (Tunnel 1 sondage 5)

Pour le deuxième tunnel, les spectres IR étudiés, montrent deux bandes de vibration d'élongation C-O autour de 1424 cm⁻¹ (**Fig. 59**), 1427 cm⁻¹ (**Fig. 60**) caractéristique de la calcite. La bande d'adsorption à 3414 cm⁻¹ est probablement liée à la présence des phyllosilicates autre que la kaolinite tels que l'illite, muscovite et/ou la chlorite (*Brindley et al., 1986*). (**Fig. 59**). Les bandes apparaissant autour de (3696, 3697) cm⁻¹ et (3619, 3620, 3621) cm⁻¹ ont révélé la présence de la kaolinite et de l'illite (*Farmer, 1974 ; Russel et Fraser, 1994*). Ces bandes sont observées dans tous les spectres. Celles dans le domaine 2820-2960 cm⁻¹ sont probablement révélatrice des matières organiques, (*Mudrikah, 1993*) (**Fig. 59, Fig. 60, Fig. 61**). Les vibrations de déformation de la liaison Al-O sont localisées à 913 cm⁻¹ (**Fig. 58**) et 914 cm⁻¹ (**Fig. 60, Fig. 61**). Les bandes autour de 469 cm⁻¹ (**Fig. 59**), 470 cm⁻¹ (**Fig. 61**) et 471 cm⁻¹ (**Fig. 60**) sont attribuées aux vibrations de flexion Si-O-Si. Les bandes autour de 537 cm⁻¹ et 538 cm⁻¹ proviennent des vibrations Si-O-Al (Al en position octaédrique) (*Madejova, 2003, Van Jaarsveld et al., 2002*).

Les bandes à 1033 cm^{-1} , 796 cm^{-1} (**Fig. 60, Fig. 59**), 799 cm^{-1} (**Fig. 59**) et 694 cm^{-1} (**Fig. 59, 61**), 695 cm^{-1} (**Fig. 60**) cm^{-1} correspondent aux vibrations d'élongation de Si-O du réseau de quartz (*velde, 1978*), ces bandes sont observées dans tous les échantillons.

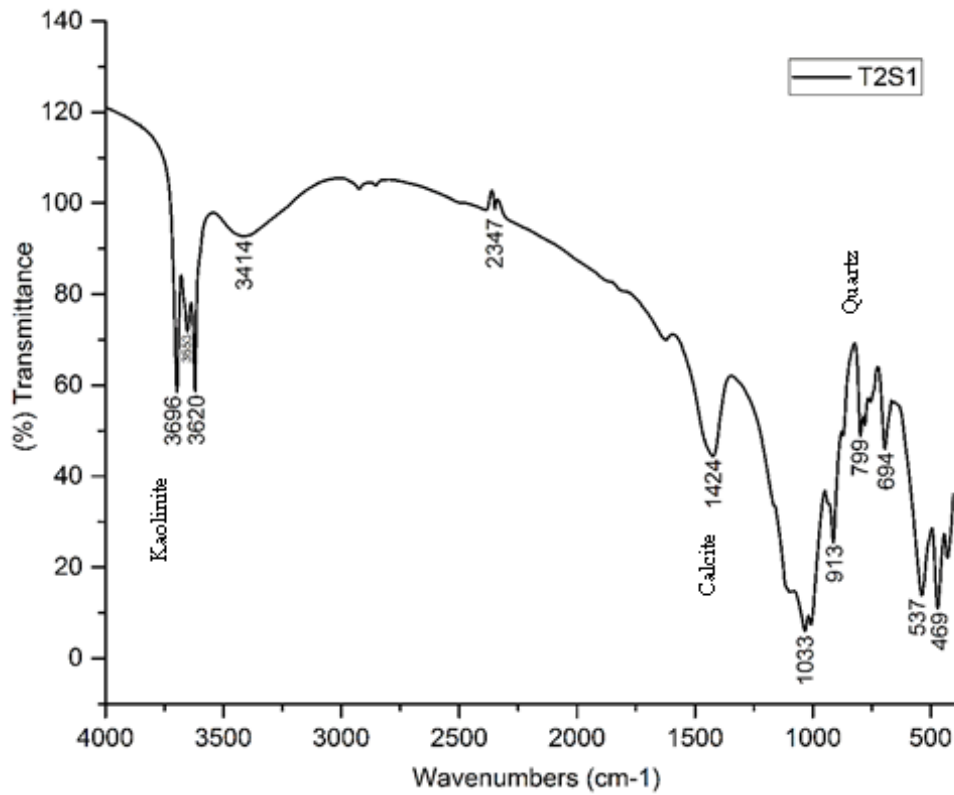


Fig. 59 : Spectre d'analyse par IR (Tunnel 2 sondage 1)

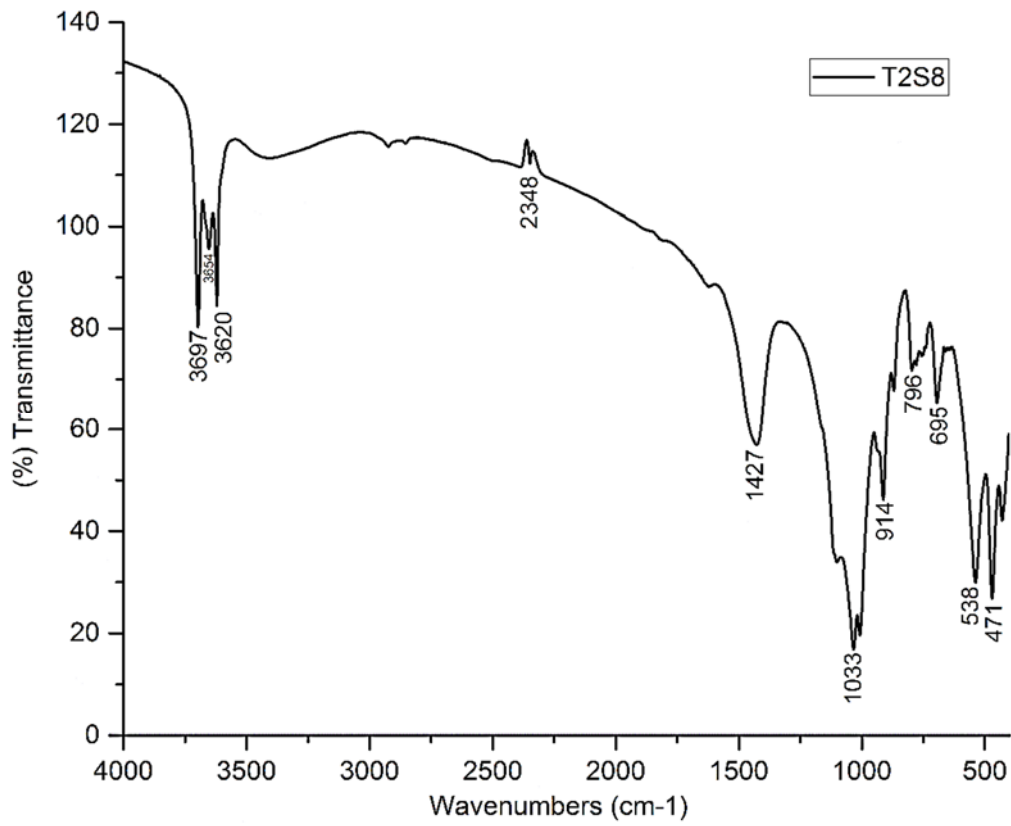


Fig. 60 : Spectre d'analyse par IR (Tunnel 2 sondage 8)

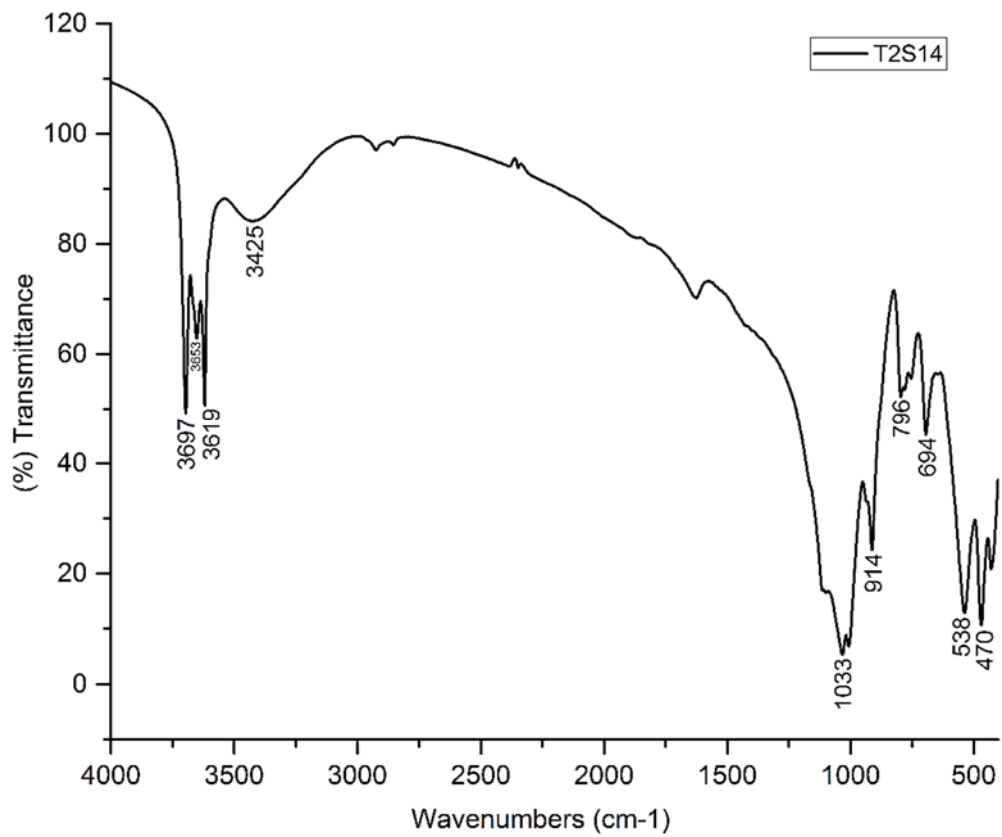


Fig. 61 : Spectre d'analyse par IR (Tunnel 2 sondage 14)

Tableau 15 : Bandes caractéristiques des radicaux des matériaux étudiés

Radicaux	Nombre d'onde (cm ⁻¹)	Echantillons					Minéraux
		Tunnel 1			Tunnel 2		
Sondages	1	2	5	1	8	14	
Echantillon	T1S1	T1S2	T1S5	T2S1	T2S8	T2S14	
OH	3697	3697	3697	3696	3697	3697	Kaolinite
	3621	3620	3621	3620	3620	3619	
H-O-H	3425	3366	3405	3414	-----	3425	Illite
Eau absorbé H ₂ O	1635	1625	1626	-----	-----	-----	Alumino-silicates amorphes
Al-OH	912	912	912	913	914	914	Smectite
C-O	1425	1421	1429	1424	1427	----	Calcite
Si-O	1033	1033	1033	1033	1033	1033	Quartz
	798	796	796	799	796	796	
	695	694	695	694	695	694	Kaolinite
	470	471	471	469	471	470	
Si-O-Al	538	538	538	537	538	538	

Dans l'ensemble, les spectres IR des argiles de Ras El Maâ et Guessaba (Tunnels) sont identiques d'un échantillon à l'autre malgré la variabilité des intensités caractéristiques de chaque hydroxyle. Les résultats de la spectroscopie infrarouge marquent comme les résultats d'analyses minéralogiques, une homogénéité dans la paragenèse minérale des matériaux étudiés.

I.3. CARACTERISATION MORPHO-STRUCTURALE PAR MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (MEB)

La microscopie électronique à balayage a été utilisée afin d’analyser la forme et la taille des différents minéraux. L’examen de poudres métallisées au carbone des échantillons bruts des formations argileuses du premier tunnel (Ras El Mâa) a révélé :

- des formes en petites plaquettes hexagonales correspondant à la kaolinite associée au quartz (**Fig. 62**).
- la taille de kaolinite est variable (en amas dont la longueur avoisine les 3 µm) qui dominent et montrent des morphologies irrégulières s’empilant de façon désordonnée associés au quartz de forme sub-arrondie (**Fig. 63**).

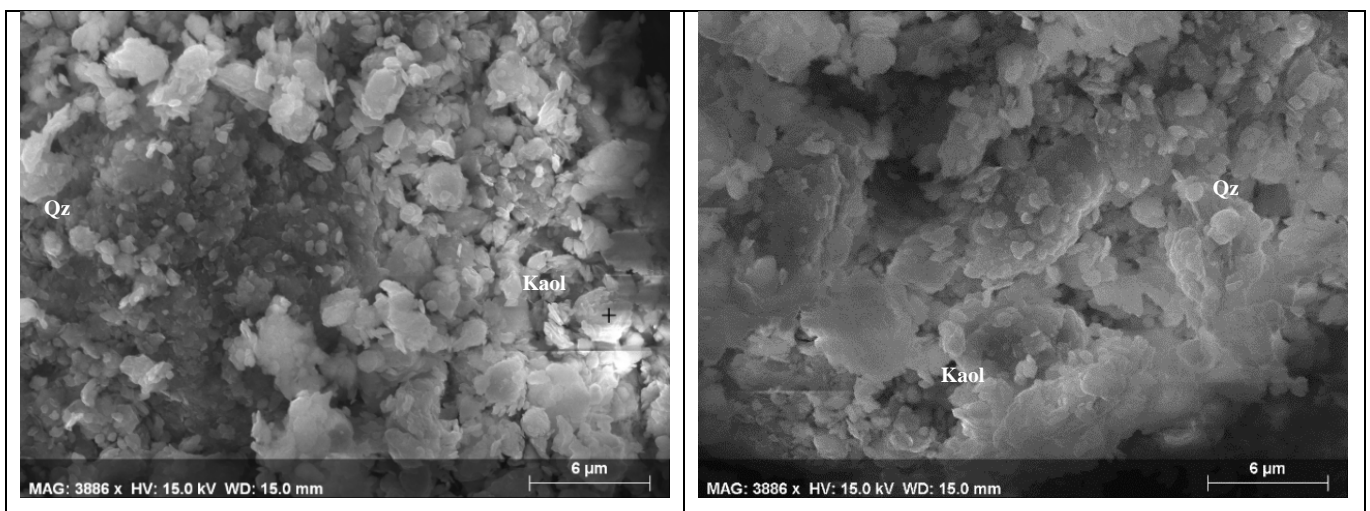


Fig. 62 : Images MEB d’échantillon du premier tunnel (T1S1)

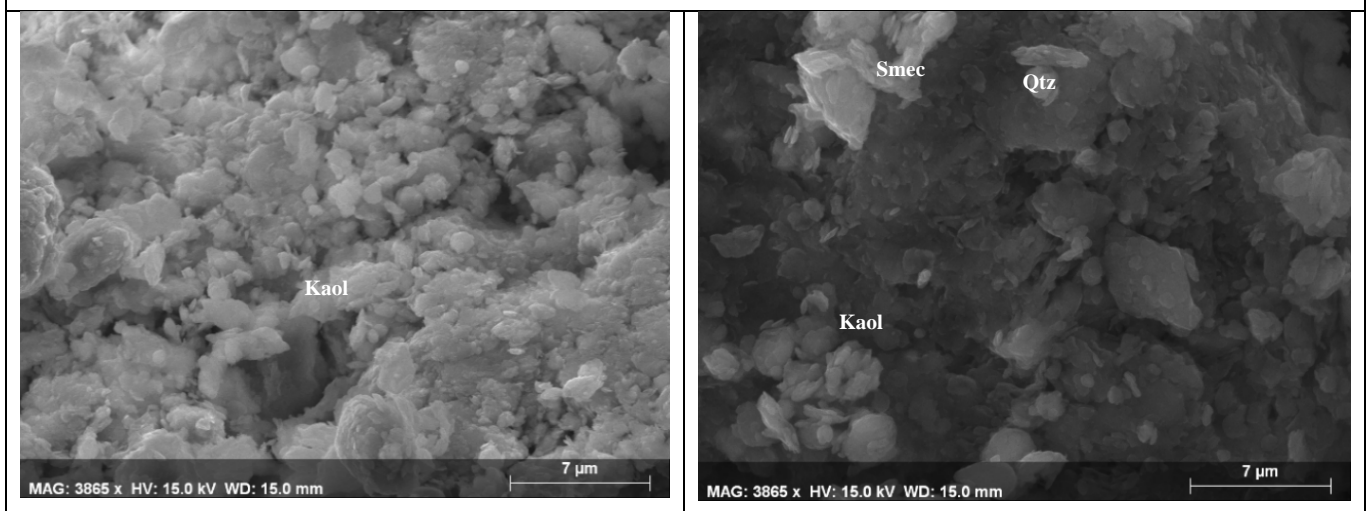


Fig. 63 : Images MEB d’échantillon du premier tunnel (T1S5)

- ✓ L'observation au microscope électronique à balayage (MEB) associé avec les spectres EDS associés aux formations argileuses du deuxième tunnel (Guessaba) a révélé comme dans le premier tunnel présence de kaolinite associé au quartz.

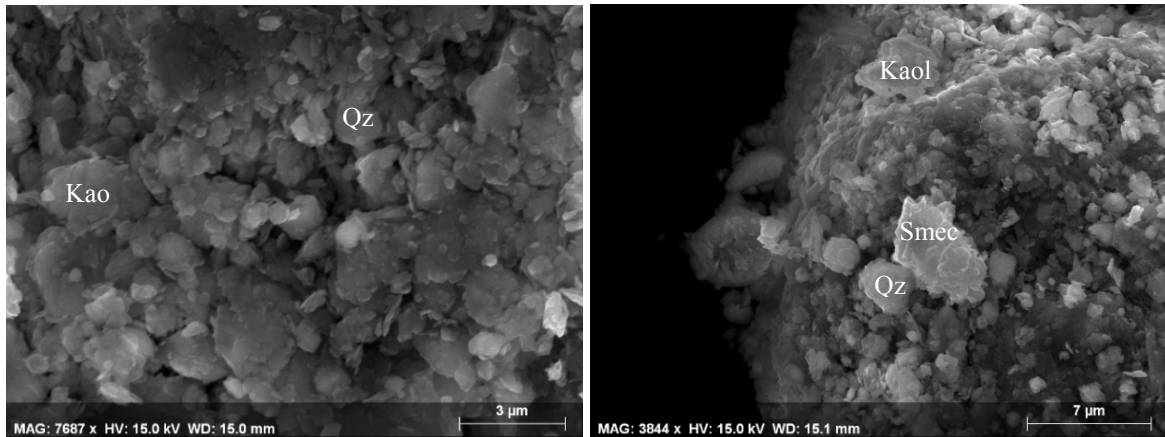


Fig. 64 : Images MEB d'échantillon du deuxième tunnel (T2S8)

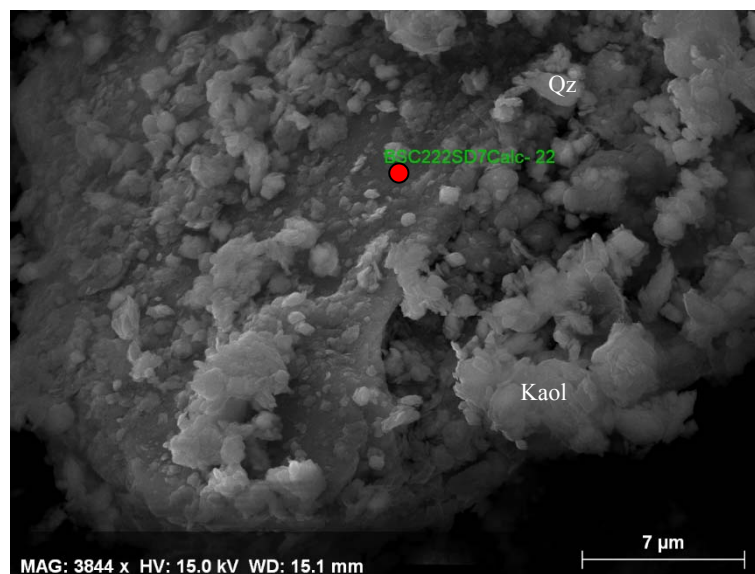


Fig. 65 : Photo par MEB de l'échantillon T2S8

Les illustrations EDS qualitatives associées aux images MEB indiquent une forte teneur en silicium (12%) et aluminium (10%), de faible teneur en magnésium (0,73%) et fer (0,7%) et de très faible teneur en potassium (3,11%) (**Fig. 66**).

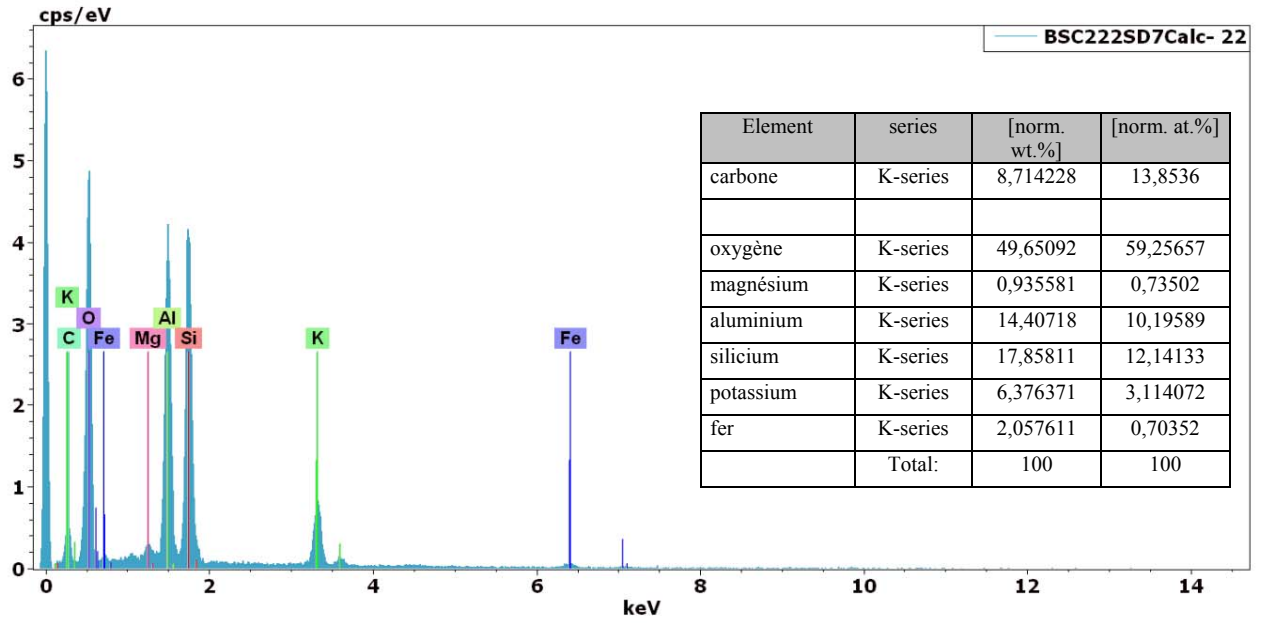


Fig. 66 : Analyse par microscopie électronique à balayage et EDS de l'échantillon T2S8

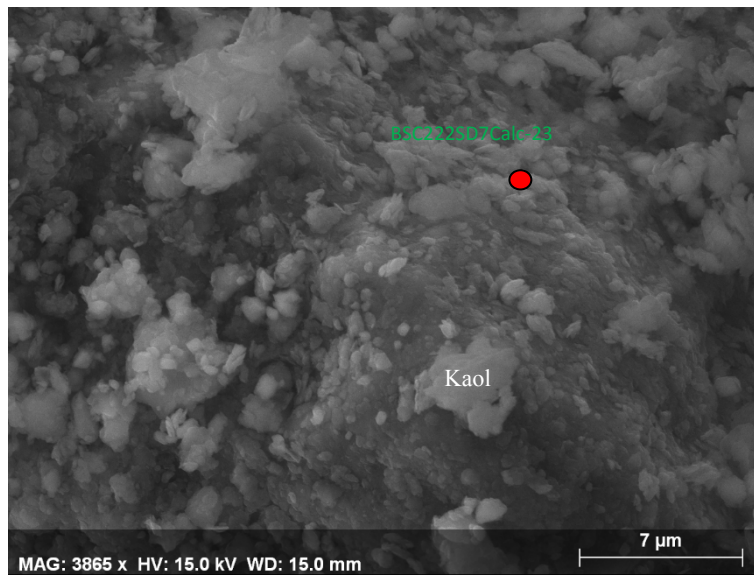


Fig. 67 : Photo MEB de l'échantillon du tunnel 2 (T2S8)

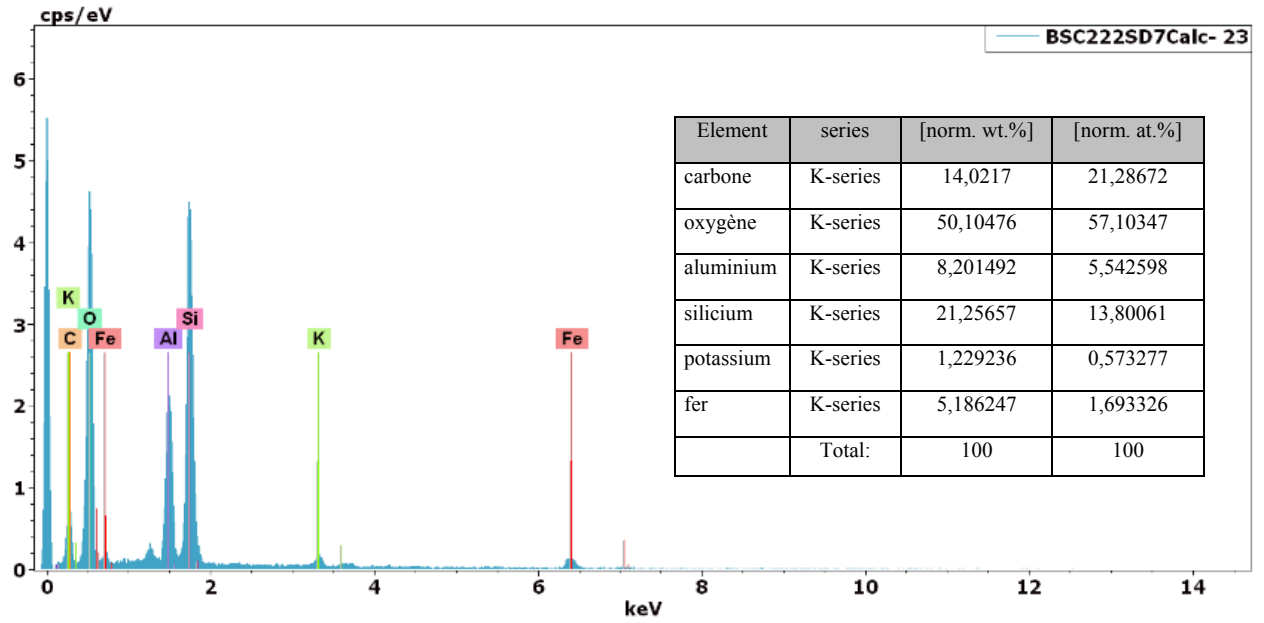


Fig. 68 : Analyse par microscopie électronique à balayage et EDS de l'échantillon T2S8

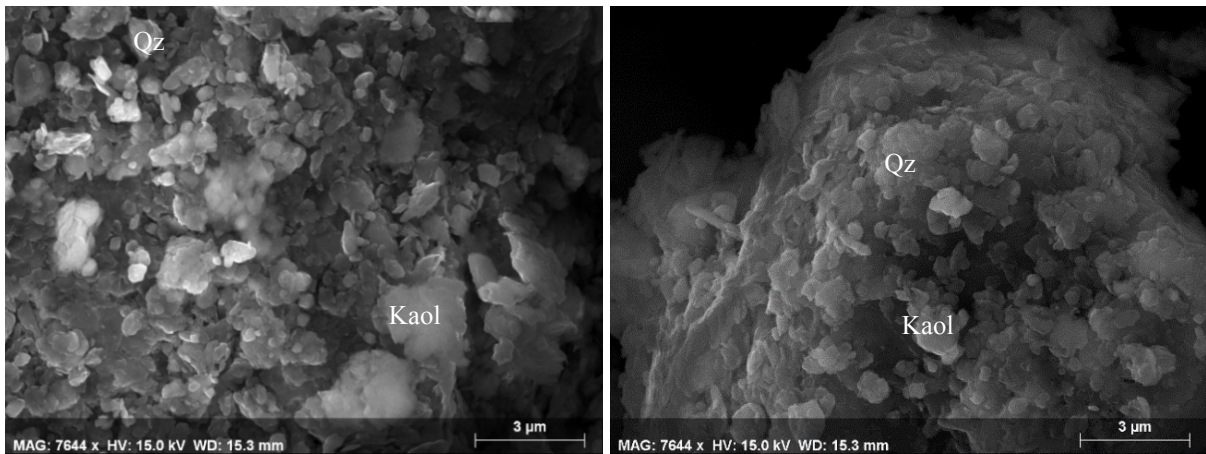


Fig. 69 : Images MEB d'échantillon du deuxième tunnel (T2S13)

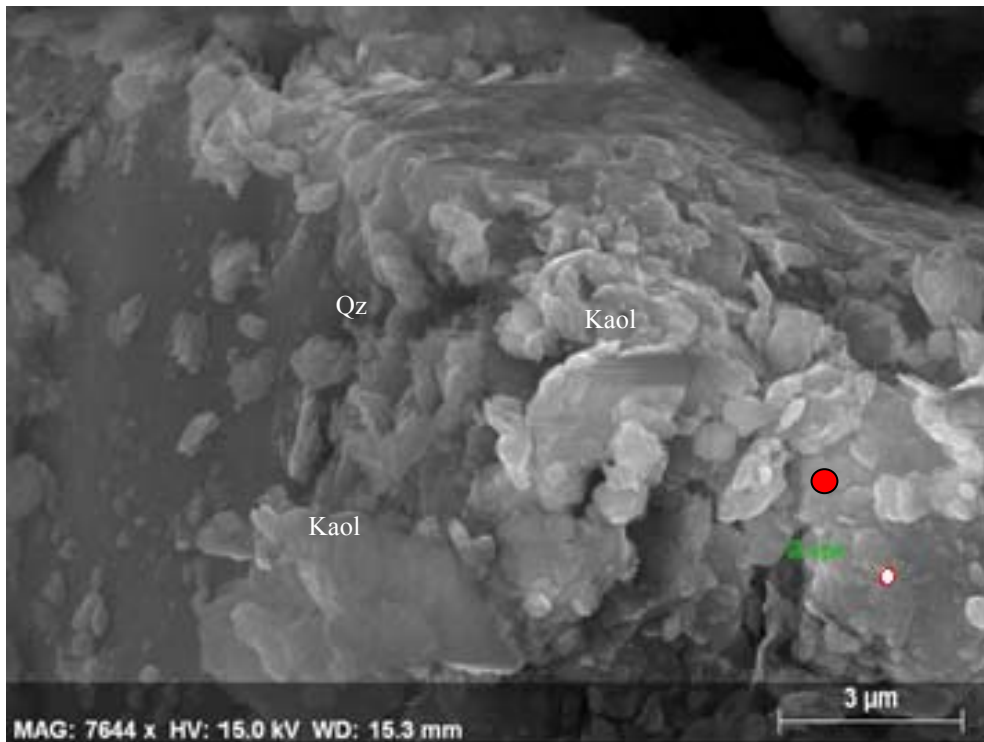


Fig. 70 : Photo par MEB de l'échantillon T2S13

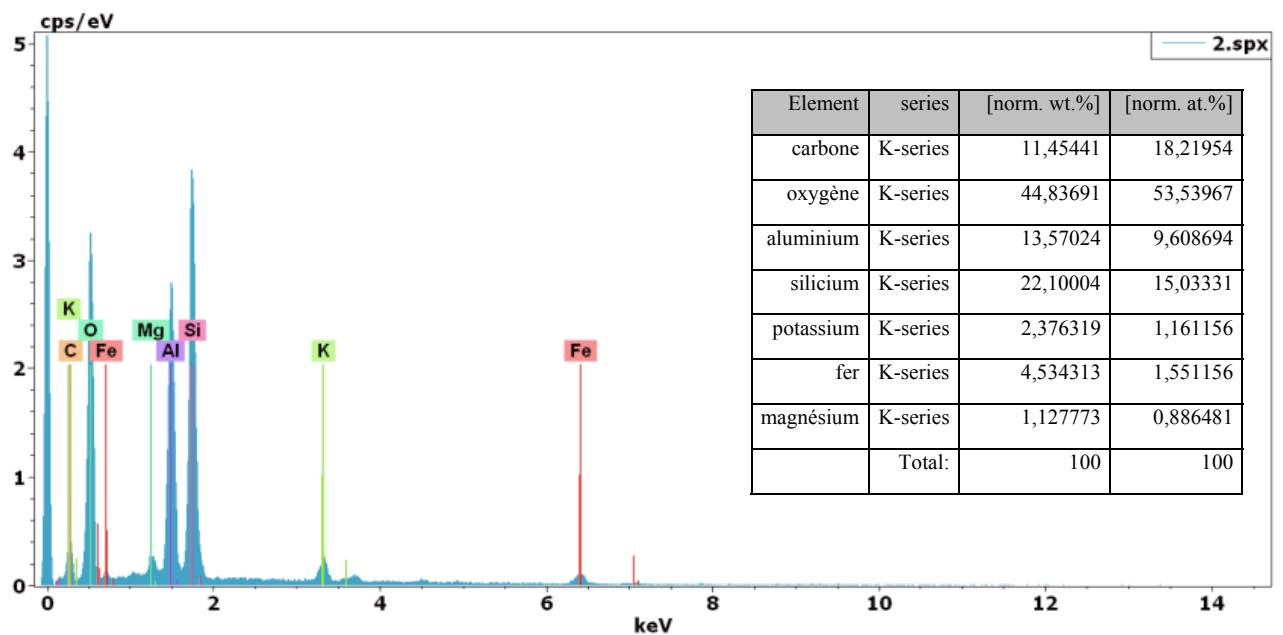


Fig. 71 : Analyse par microscopie électronique à balayage et EDS de l'échantillon T2S13

Donc les observations au microscope électronique (MEB), effectuées à différents agrandissements ont confirmé les données qualitatives et quantitatives de l'analyse minéralogique. Les photos confirment l'abondance des minéraux non argileux, notamment le quartz et le minéral argileux dominant reste la kaolinite. Voir aussi photos en (Annexe 2).

II. CARACTERISATION GEOCHIMIQUE DES FORMATIONS ARGILEUSES

La méthodologie adoptée pour la détermination des différents éléments chimiques est développée dans le chapitre III. Les résultats d'analyses chimiques des formations argileuses sont présentés dans les tableaux 16 et 17.

Ces analyses montrent que l'ensemble des formations argileuses est constitué principalement d'oxydes SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 et CaO . Le pourcentage en silice varie entre 48 et 50% et peut atteindre 75% pour Guessaba. Les teneurs en alumine sont faibles (entre 19 et 24%) ; en oxydes de fer élevé (5 à 8)% pour Ain Charchar et Menzel El Abtal, 8% à Azzaba, entre 7 et 17% pour Hellala et entre 3 et 7% pour Guessaba ; en alcalins (K_2O) entre 1,41 et 3,14% et alcalino-terreux (CaO , MgO) relativement bas entre 0,83 et 6,3% ; les teneurs en titane (TiO_2) sont relativement modestes et varient entre 0,7 et 1,33% dans tous les échantillons. Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est relativement élevé (1,9 - 4)% et peut atteindre 5,78 et 7,32 %. On note dans presque tous les échantillons l'absence ou des traces de sodium (Na_2O) ; la présence des sulfates (SO_3) est quasi nulle ou en traces (< 1 %) dans toutes les argiles. Il en est de même pour le phosphore (P_2O_5) et l'oxyde de manganèse (MnO). La perte au feu (L.O.I) de ces formations argileuses est comprise entre 7,73 et 26,6%.

Dans l'ensemble, les échantillons d'argiles de la région présentent des pourcentages par ordre d'importance des oxydes suivants : SiO_2 (40 - 70 %), Al_2O_3 (10 - 24,5 %), Fe_2O_3 (2,5 - 10 %) et les alcalino-terreux (0,83 à 6 %). **(Tableaux 16 et 17).**

Tableau 16 : Résultats d'analyses géochimiques des formations argileuses des différents sites

Eléments	ACH	MEA			AZZ		HELL						GUESS		
	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5	Ch6	Ch7	Ch8	Ch9	Ch10	Ch11	Ch12	Ch13	Ch14	Ch15
SiO ₂	48,08	51,86	47,6	50,81	50,25	42,65	43,65	43,07	39,3	47,62	51,99	29,47	42,13	48,3	45,84
Al ₂ O ₃	19,02	18,87	18,87	19,7	18,45	18,76	20,03	22,6	19,54	18,58	19,34	12,67	18,88	17,42	19,6
Fe ₂ O ₃	8,11	7,25	5,85	8,58	8,29	8,53	17,68	9,79	8,44	7,85	9,83	5,44	7,02	6,49	7,38
CaO	0,57	0,77	2,94	3,45	4,01	1,21	1,24	1,09	1,05	2,94	0,83	0,64	2,13	1,09	1,18
MgO	2,00	1,68	1,84	2,52	2,29	1,3	1,26	1,49	1,18	1,84	1,61	1,1	1,95	2,45	1,94
K ₂ O	2,98	1,91	2,15	3,02	3,14	1,42	1,96	1,94	1,42	2,11	1,79	1,66	2,13	2,1	1,96
Na ₂ O	-----	-----	-----	-----	1,14	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
TiO ₂	0,88	1,21	1,23	1,12	1,18	1,15	1,31	1,4	1,29	1,22	1,33	0,78	1,28	0,98	1,03
SO ₃	0,24	0,57	0,62	0,32	0,52	0,52	0,96	0,44	0,47	0,62	0,6	0,65	0,2	0,34	0,33
MnO	0,06	0,06	0,05	0,07	0,08	0,06	0,09	0,12	0,08	0,04	0,06	0,04	0,03	0,03	0,03
P ₂ O ₅	0,06	0,12	0,18	0,22	0,16	0,2	0,19	0,16	0,18	0,17	0,14	0,07	0,13	0,12	0,29
LOI	17,19	15,27	15	9,52	9,9	23,77	10,79	17,5	26,6	16,24	13,05	47,4	23,9	20,04	20,27
Somme	82	84,3	78,1	89,81	89,51	75,8	88,37	82,1	72,95	80,88	87,52	52,52	75,88	79,32	79,58
CaO+MgO	2,57	2,45	4,78	5,97	6,30	2,51	2,50	2,58	2,23	4,78	2,44	1,74	4,08	3,54	3,12
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	2,52	2,74	2,56	2,57	2,72	2,27	2,17	1,90	2,01	2,56	2,68	2,32	2,23	2,77	2,33
Alcalin terreux	5,55	4,36	6,93	8,95	10,58	3,93	4,46	4,52	3,65	6,89	4,23	6,21	5,64	5,08	5,08

Tableau 17 : Analyses géochimiques des formations argileuses des tunnels

Eléments/ échantillons	T1S1	T1S2	T1S5	T2S1	T2S2	T2S5	T2S8	T2S10	T2S13	T2S14
SiO ₂	44,90	58,85	51,99	55,92	54,43	53,92	59,31	68,24	74,52	68,65
Al ₂ O ₃	16,04	15,45	20,36	17,75	23,55	24,57	14,95	11,79	10,18	15,46
Fe ₂ O ₃	7,29	7,41	7,29	7,47	3,54	3,05	8,72	6,30	3,99	2,53
CaO	1,03	0,72	0,74	0,77	0,29	0,38	0,79	0,70	0,80	0,26
MgO	1,14	0,92	1,18	1,16	0,78	0,74	1,03	0,89	0,54	0,57
K ₂ O	1,34	1,63	1,84	1,73	1,90	1,88	1,58	1,45	1,41	1,58
Na ₂ O	0,34	0,54	0,45	0,45	0,32	0,30	0,32	0,40	0,54	0,49
TiO ₂	0,92	1,08	1,27	1,06	1,31	1,50	0,96	0,78	0,70	1,01
SO ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MnO	0,04	0,04	0,07	0,07	0,01	0,01	0,09	0,06	0,04	0,01
P ₂ O ₅	0,21	0,14	0,22	0,19	0,16	0,13	0,18	0,15	0,08	0,10
LOI	26,60	13,46	14,48	13,20	13,19	12,81	12,19	9,60	7,73	8,88
Somme	99,86	100,23	99,89	99,78	99,47	99,30	100,11	100,34	100,53	99,54
CaO+MgO	2,17	1,64	1,92	1,93	1,07	1,12	1,82	1,59	1,34	0,83
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	2,79	3,80	2,55	3,15	2,31	2,19	3,96	5,78	7,32	4,44
Alcalin terreux	3,85	3,81	4,21	4,11	3,29	3,3	3,72	3,44	3,29	2,9

III. PROPRIETES PHYSIQUES DES FORMATIONS GEOLOGIQUES

INTRODUCTION

On résume ici les données et les critères adoptés pour procéder à la caractérisation physique des formations géologiques. Ce travail se base sur les données des reconnaissances géotechniques et des essais de laboratoire.

Tout le long du site, un total de quatre formations géologiques ont été identifiées, dont deux correspondent aux formations numidiennes (argiles sous numidiennes et grès) et les autres sont représentées par des formations superficielles (argiles alluvionnaires et sables alluvionnaires).

III.1. PROPRIETES GRANULOMETRIQUES

Les résultats d'analyse granulométrique par tamisage à sec ont été déterminés suivant la méthodologie décrite dans le chapitre 3. Cette analyse est faite sur les argiles alluvionnaires, sables alluviaux et les argiles sous numidiennes.

III.1.1. Les argiles alluvionnaires

Les essais granulométriques montrent une abondance de particules fines avec quelques traces de sable et de gravier. Les **figures 72, 74 et 76** représentent les courbes granulométriques en pourcentage cumulé des argiles alluviales de la région.

Pour le premier site, ces formations contiennent par ordre d'importance, 73,1% d'argiles, 22% de sable et 4,7% de graviers (**Tableau 18**) **Fig. 74. Fig. 76, Fig. 78.**

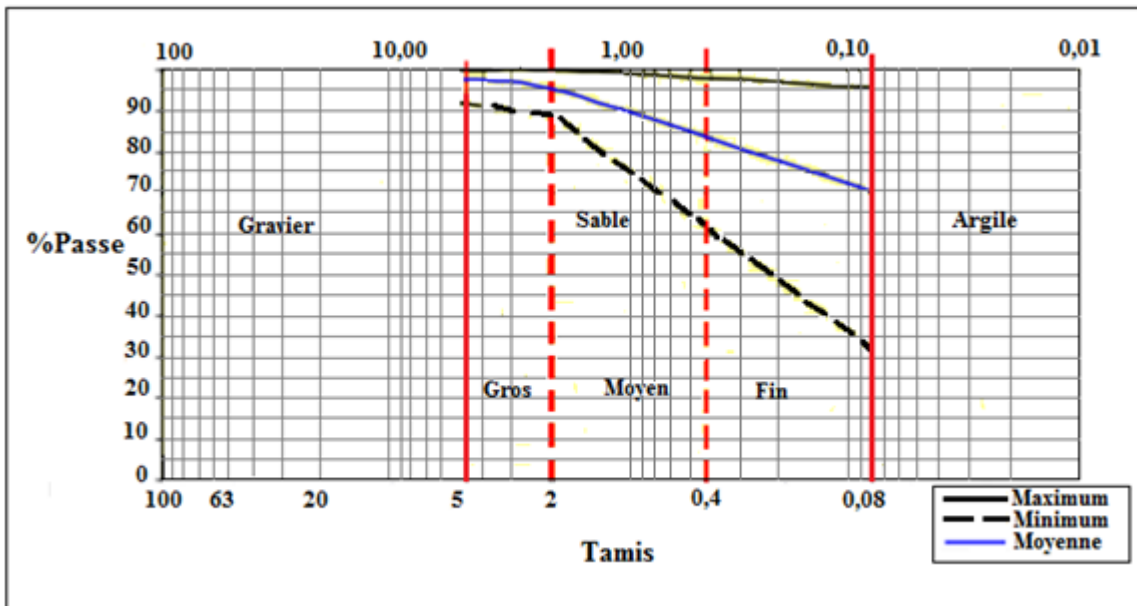


Fig. 72 : Courbe granulométrique des argiles alluviales d'Ain Charchar

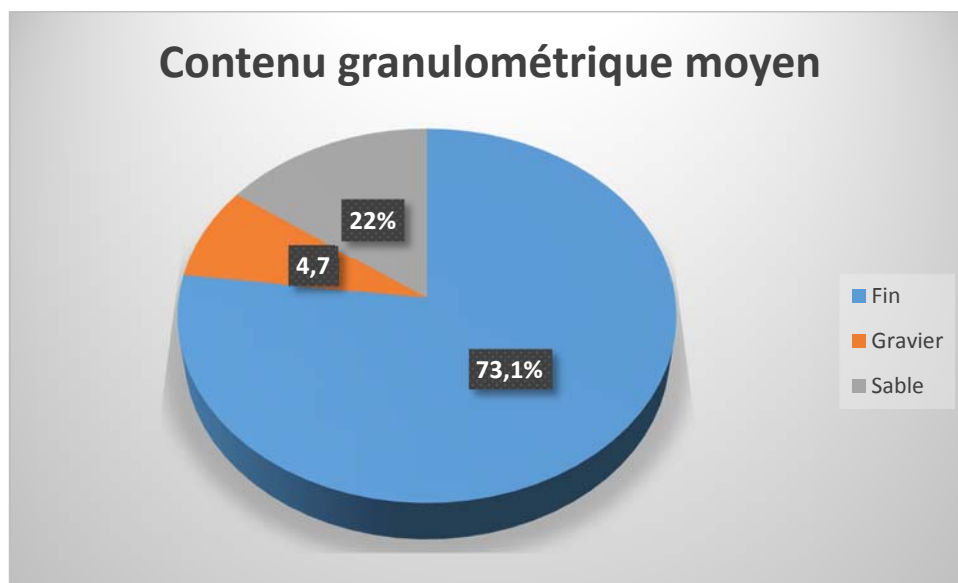


Fig. 73 : Contenu granulométrique moyen des argiles alluviales d'Ain Charchar

Pour le deuxième site, ces matériaux contiennent 68,91 % d'argiles, entre 23,1% de sables et 8,3% de gravier.

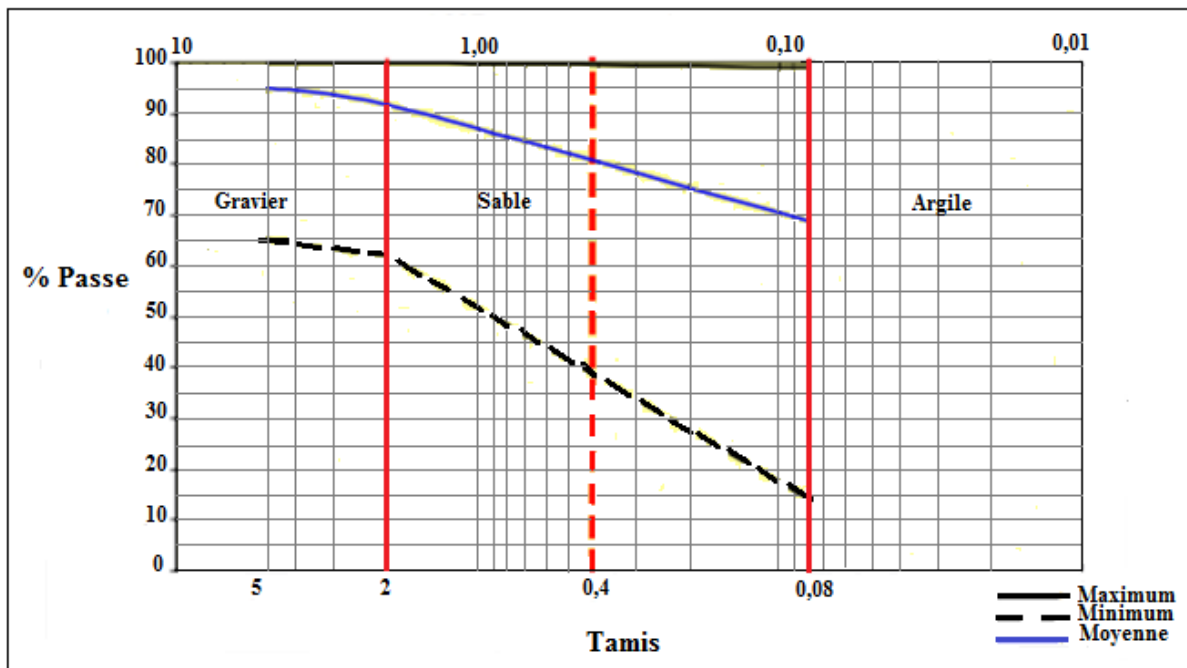


Fig. 74 : Courbe granulométrique des argiles alluviales d'Azzaba

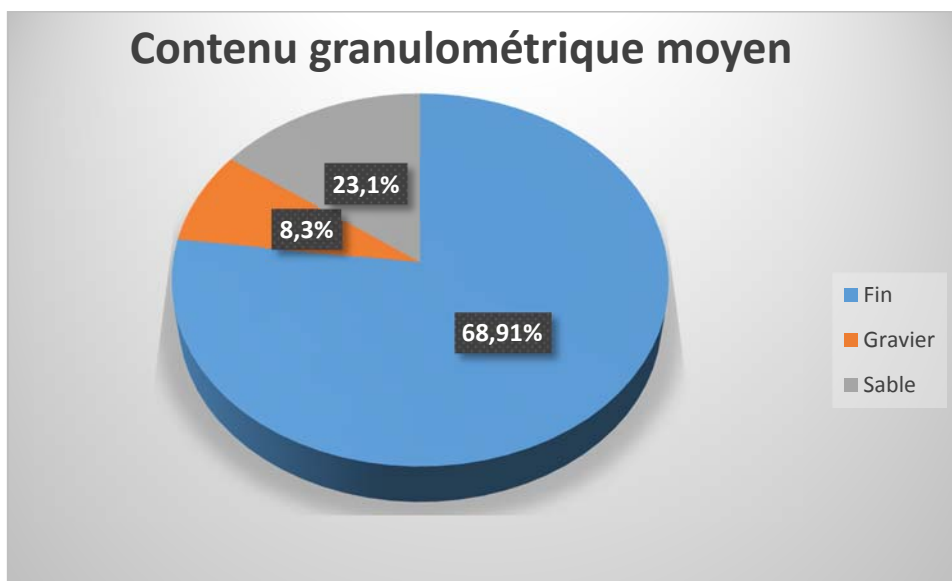


Fig. 75 : Contenu granulométrique moyen des argiles alluviales d'Azzaba

Enfin pour le dernier site, on note 64% d'argiles, 13% de sables et 23% de gravier.

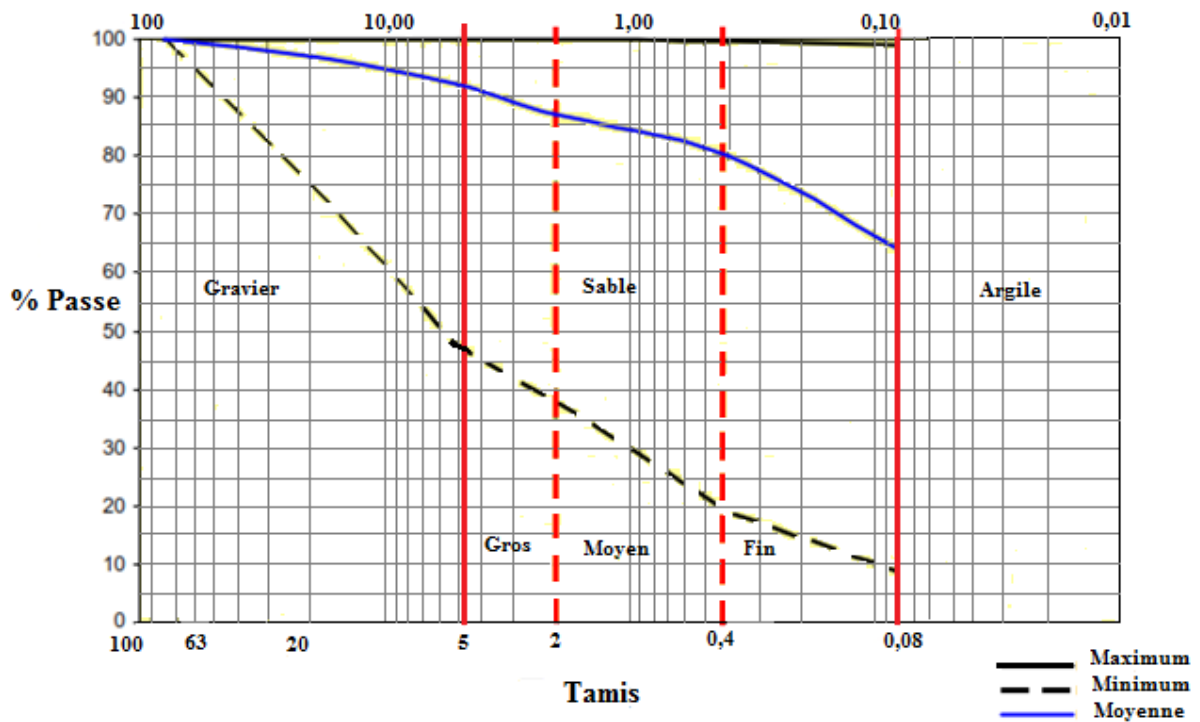


Fig. 76 : Courbe granulométrique des argiles alluviales de Guessaba

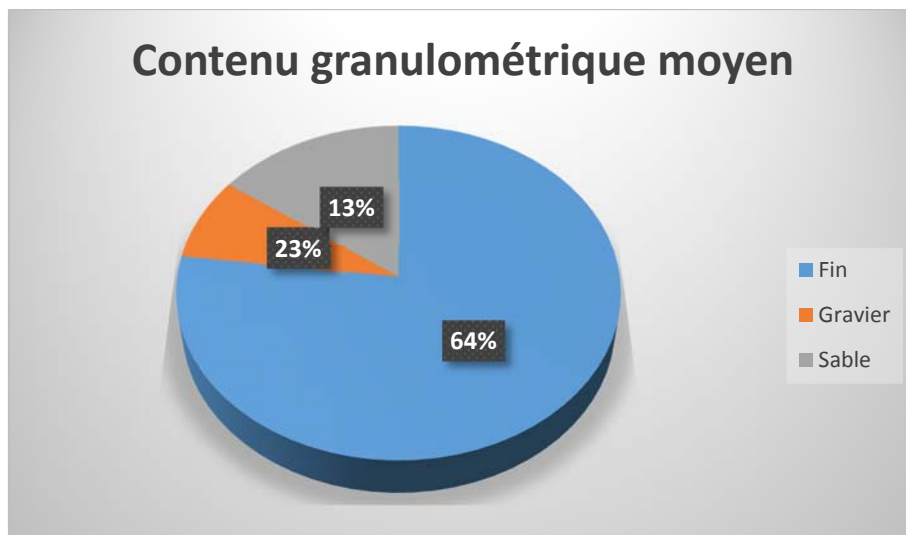


Fig. 77 : Contenu granulométrique moyen des argiles alluviales de Guessaba

Dans l'ensemble, les teneurs moyennes en fines sont à plus de 65%. Ces formations argileuses sont plus ou moins homogènes en termes de granulométrie. On observe que ces formations ont presque la même allure d'une localité à l'autre et témoigne de leur homogénéité granulaire.

Tableau 18 : Synthèse des paramètres géotechniques des sites étudiés

Sites/mesures	Ain Charchar- Menzel El Abtal		Menzel El Abtal-Azzaba		Azzaba-Guessaba		
	argiles alluvial	sables alluvial	argiles numidiens	argiles alluvial	argiles numidiens	argiles alluvial	argiles numidiens
Pourcentage de fin %	73,1	39	65	68,91	65	64	77
Pourcentage de sable %	22,1	53	23	23,1	23	13	15
Pourcentage de gravier %	4,7	8	12	8,3	12	23	8
Densité naturel moyenne gr/cm ³	1,99	1,93	2,04	1,97	2,04	1,88	2,15
Humidité moyenne %	13,7	14	9,75	12,77	9,75	15,27	16,7
Densité sèche moyenne gr/cm ³	1,75	1,69	1,86	1,81	1,86	1,65	1,92
Limite de liquidité LL %	28,5	27,7	38,2	35,6	38,2	39,17	46,4
Limite de plasticité LP %	17,5	15,3	20,01	19,4	20,01	20,8	24,8
Indice de plasticité IP %	11	12,3	18,3	12,77	18,3	11	21,5

III.1.2. Les sable alluvionnaires

Ces formations, peu présentes en surface dans le premier site, se trouvent cependant en profondeur, en contact avec les argiles. Elles sont formées par des sables légèrement argileux avec des traces de graviers. Le pourcentage moyen de la fraction fine est de 39 %, et le contenu moyen du sable est de 53 % alors que celui du gravier est de 8 % **Fig 78**. La **Fig.79** présente la courbe granulométrique en pourcentage cumulé de ces formations.

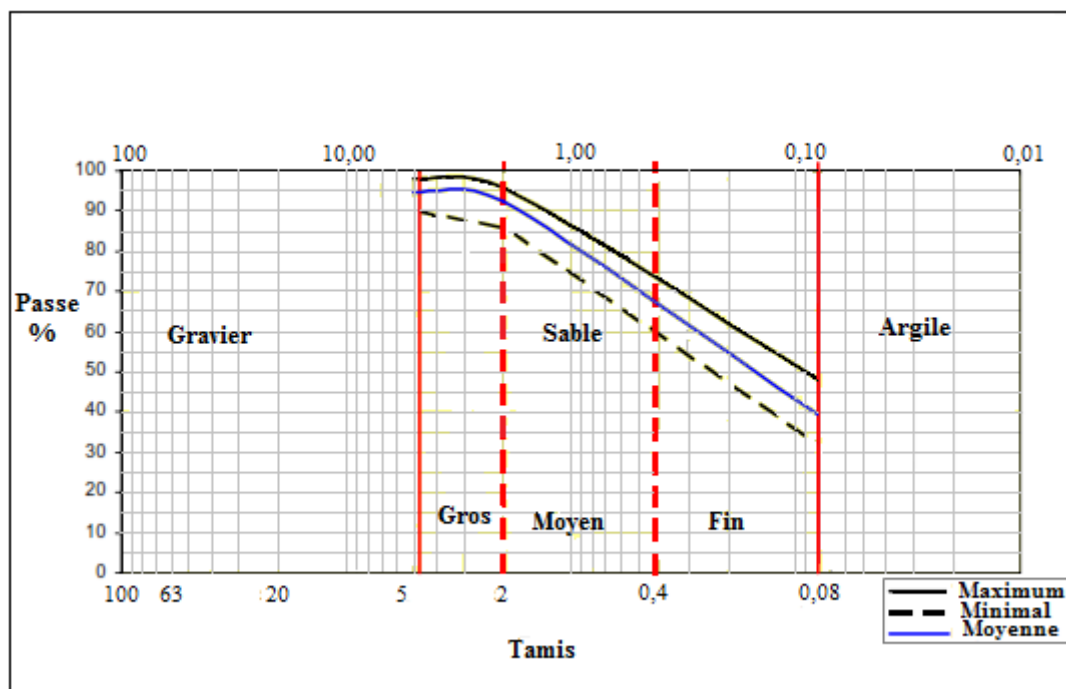


Fig. 78 : Courbe granulométrique des sables alluvionnaire d’Ain Charchar

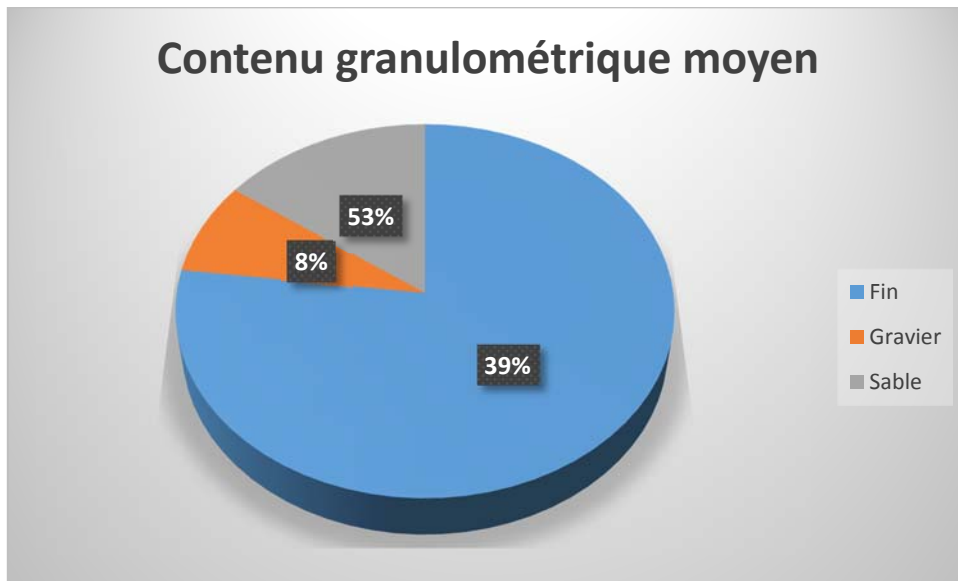


Fig. 79 : Contenu granulométrique moyen des sables alluviaux d'Ain Charchar

III.1.3. Les argiles sous numidiennes

Les résultats d'analyse granulométrique par tamisage à sec présentés dans la Fig. 80 montrent que les argiles sous numidiennes entre Ain Charchar et Menzel El Abtal jusqu'à Azzaba contiennent par ordre d'importance, 65% d'argiles, 23% de sable et 12% de gravier Fig.81.

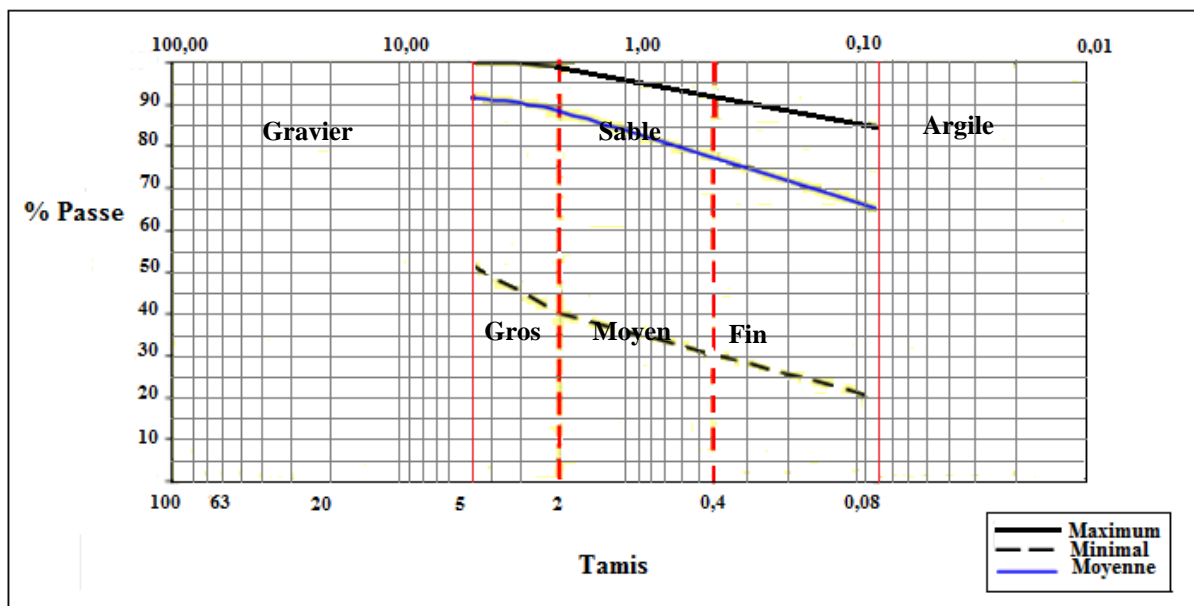


Fig. 80 : Courbe granulométrique des argiles sous numidiennes d'Ain Charchar jusqu'à Azzaba

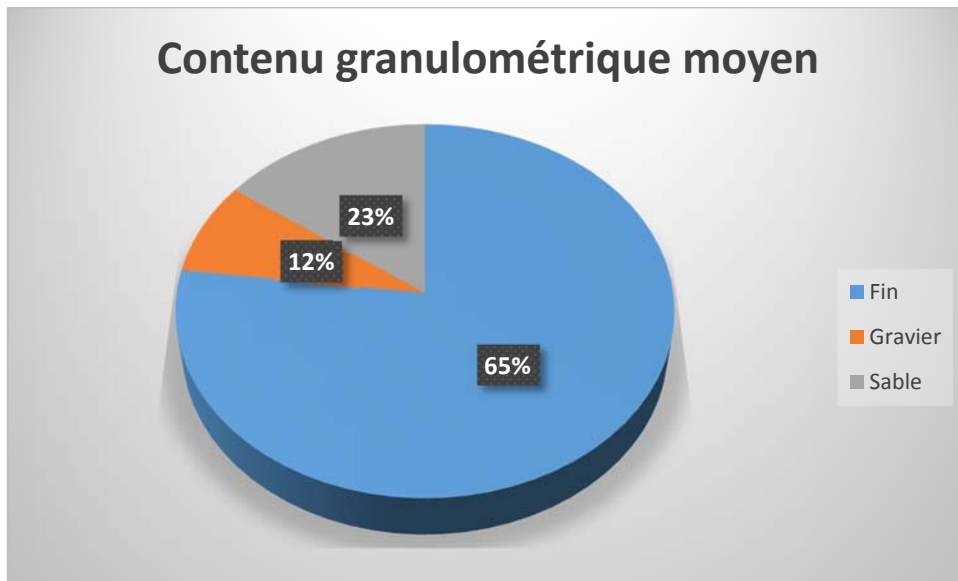


Fig. 81 : Contenu granulométrique moyen des argiles sous numidiennes d'Ain Charchar jusqu'à Azzaba

Pour les argiles de Guessaba, on note 77% d'argiles, 15% de sables et 8% de gravier (**Fig. 82**).

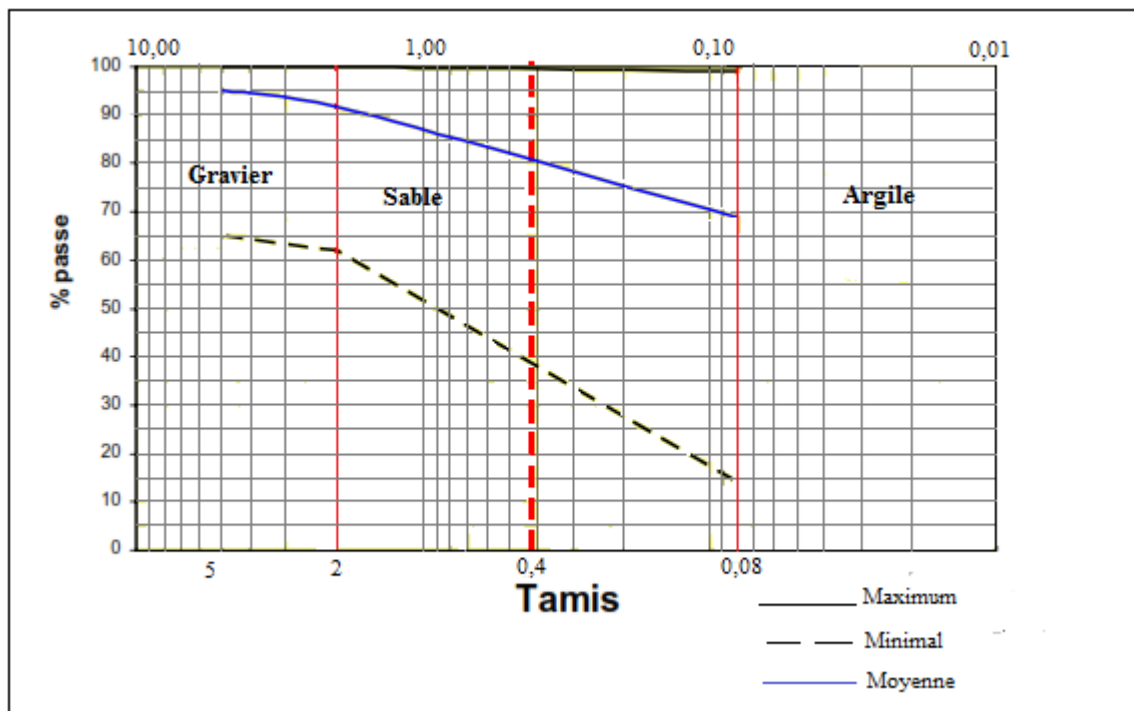


Fig. 82 : Courbe granulométrique des argiles numidiennes de Hellala et Guessaba

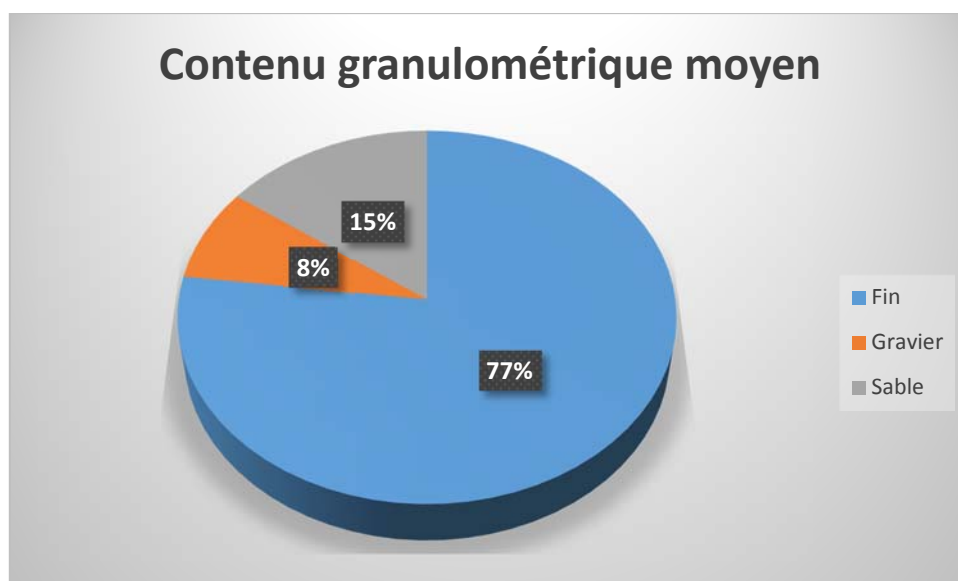


Fig. 83 : Contenu granulométrique moyen des argiles numidiennes de Hellala et Guessaba

La Fig. 84 présente les courbes granulométriques en pourcentage cumulé des argiles numidiennes de la région.

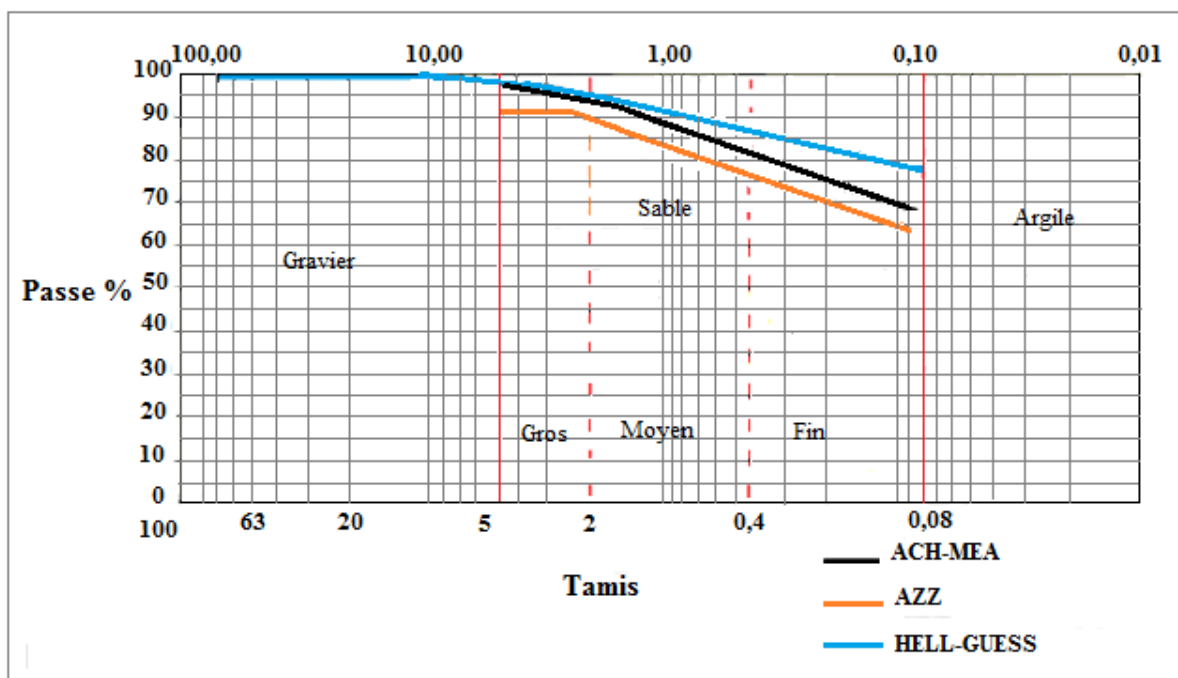


Fig. 84 : courbe granulométrique des argiles sous numidienne dans les différents sites

III.2. PROPRIETES LIEES A LA PLASTICITE

Les résultats des limites d'Atterberg effectués sur les argiles alluviales et sous numidiennes d'Azzaba sont présentés dans le **Tableau 18**. Voir aussi **Annexe 4**.

III.2.1. Les argiles alluviales

Les valeurs de la limite de liquidité varient entre 23% et 46%, la limite de la plasticité entre 15% et 25%, et l'indice de plasticité entre 8% et 21,5%. Le positionnement de ces valeurs dans le diagramme de plasticité de Casagrande (**Fig. 85**) montre que pour le premier site, ces argiles sont de plasticité faible (CL) et se situent dans la zone où l'expansivité est nulle (**Fig. 86**).

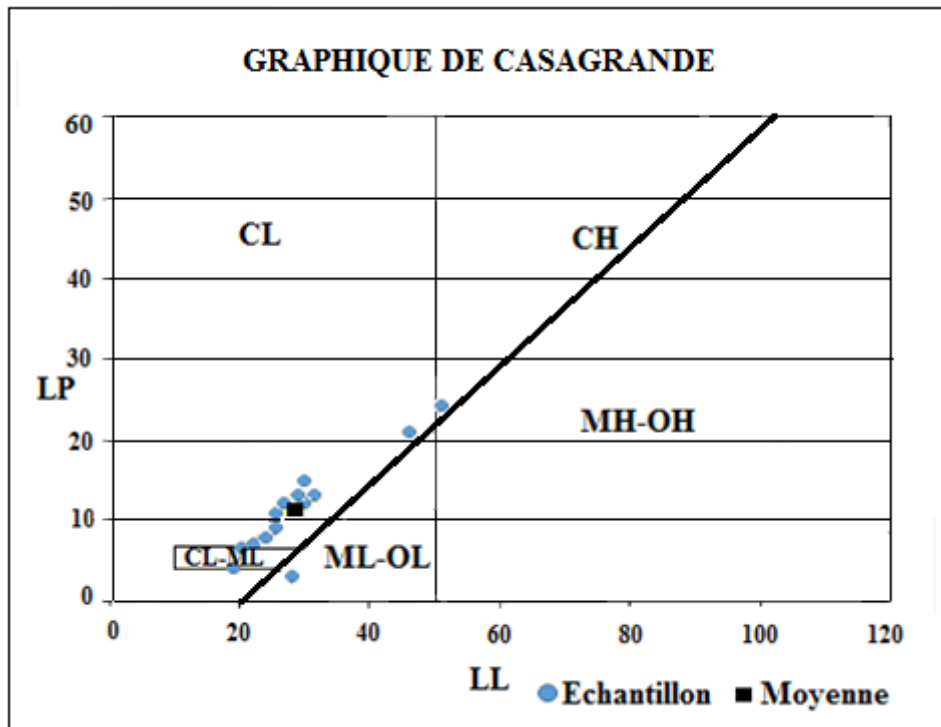


Fig. 85 : Diagramme de Casagrande des argiles alluviale d'Ain Charchar

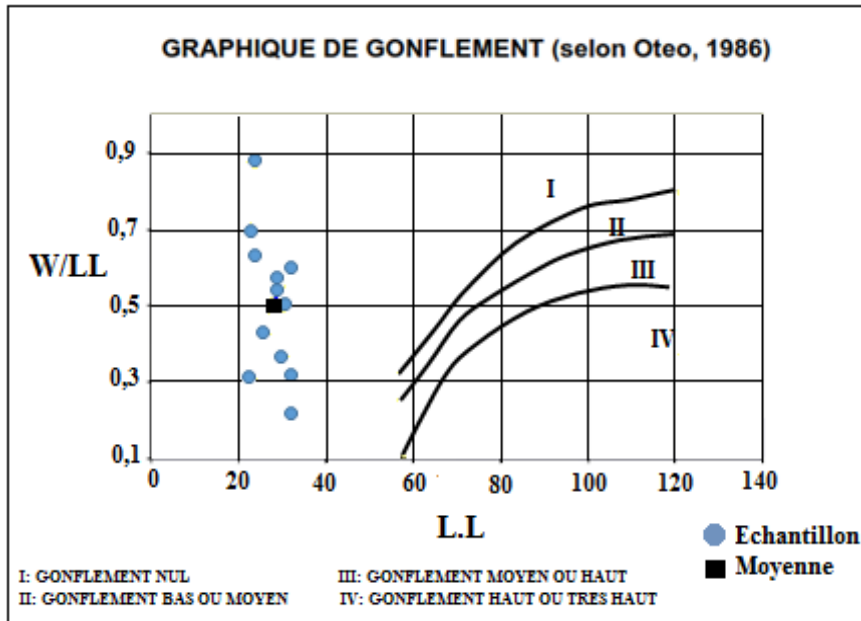


Fig. 86 : Diagramme de gonflement des argiles alluvionnaires d'Ain Charchar

Pour le deuxième site, il s'agit d'argiles de plasticité faible (CL) ; quatre (04) échantillons ont été identifiés dans toute la population et on les a classés comme (CH) (**Fig. 87**). Elles se situent dans la zone où l'expansivité est nulle. Seuls deux échantillons se trouvent dans la zone d'expansivité moyenne-haute (**Fig. 88**).

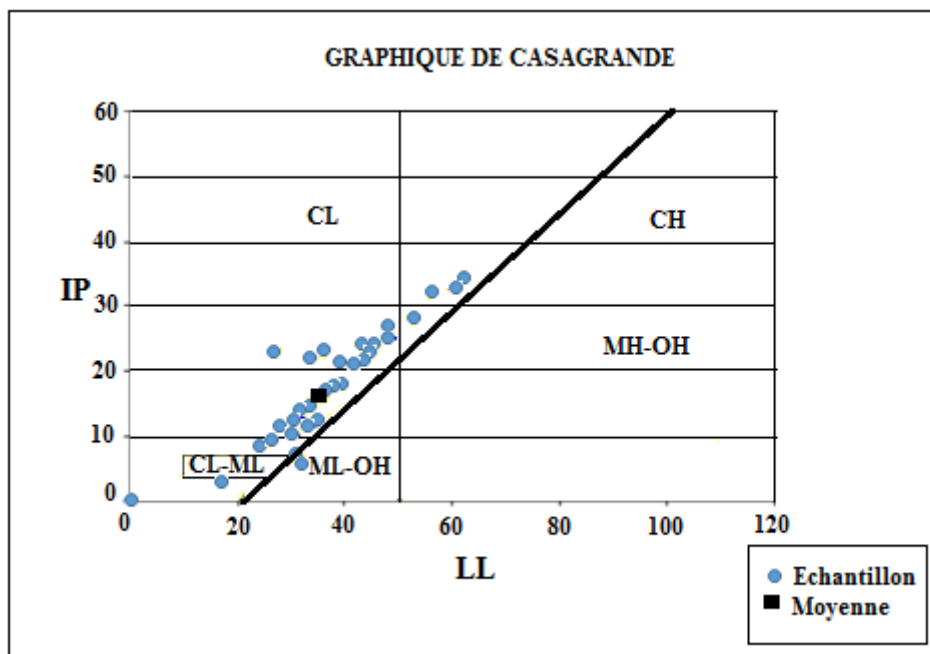


Fig. 87 : Diagramme de Casagrande des argiles alluviales d'Azzaba

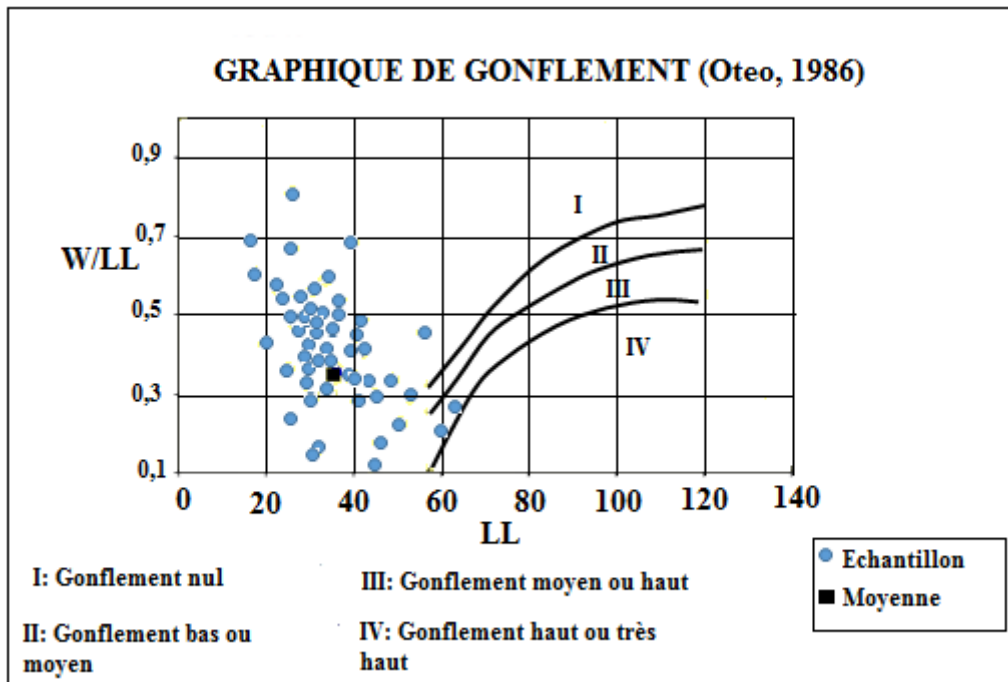


Fig. 88 : Diagramme de gonflement des argiles alluviales d’Azzaba

Pour le dernier site, il s’agit d’argiles de plasticité faible (CL) et plasticité haute (CH) (Fig. 89). Ces argiles se situent dans la zone où l’expansivité est nulle. Les échantillons qui apparaissent dans la zone d’expansivité haute (Fig. 90), correspondent à des échantillons essayés dans la fin du secteur.

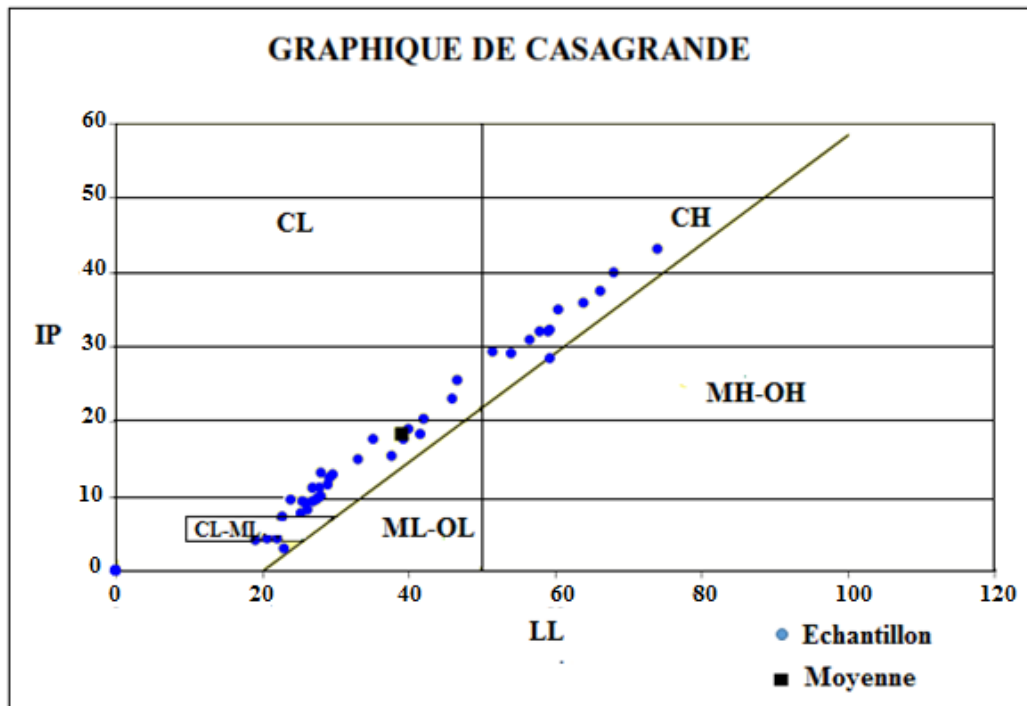


Fig. 89 : Diagramme de Casagrande des argiles alluviale de Guessaba

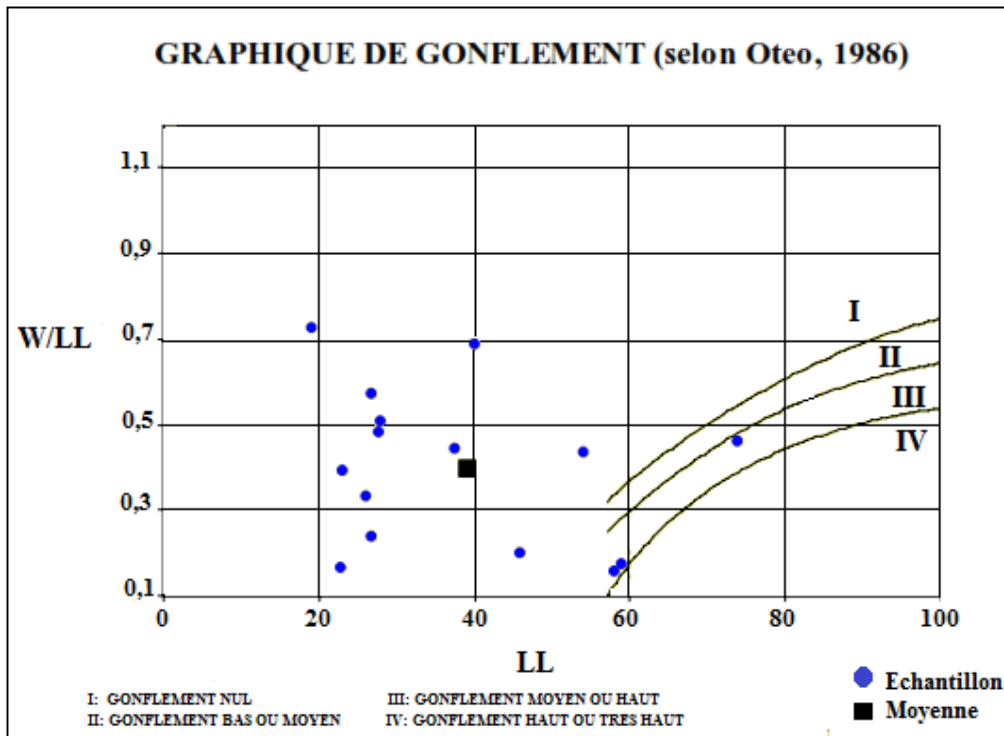


Fig. 90 : Diagramme de gonflement des argiles alluviales de Guessaba

III.2.2. Les sables alluvionnaires

La valeur moyenne de la limite de liquidité est de 27,5%, et la limite de plasticité est de 15 %, et l'indice de plasticité est de 12%. D'après le positionnement de ces valeurs dans le diagramme de plasticité de Casagrande (**Fig. 91**), il s'agit des sables argileux et limoneux. Ces formations se situent dans la zone où l'expansivité est nulle (**Fig. 92**).

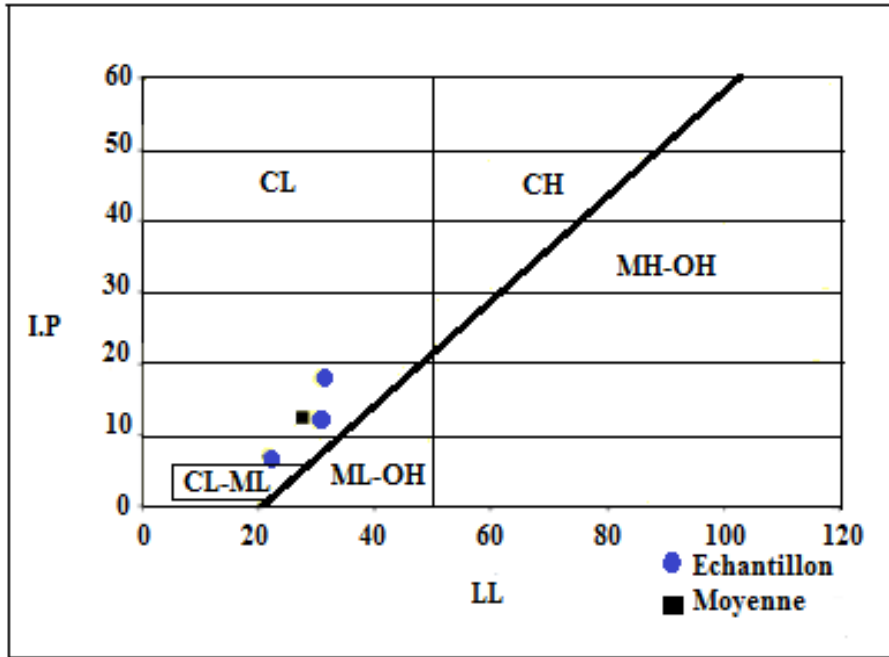


Fig. 91 : Diagramme de Casagrande des sables alluviales d'Ain Charchar

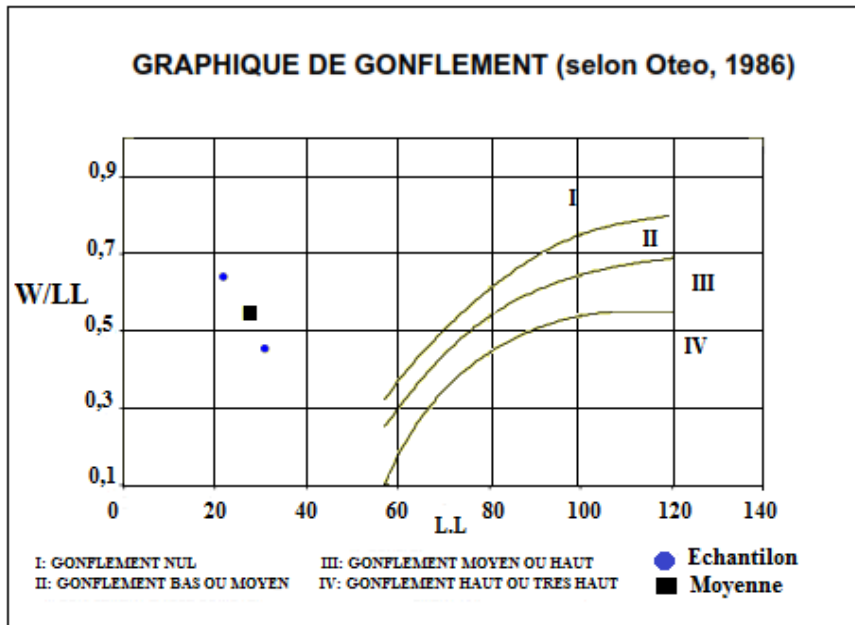


Fig. 92 : Diagramme de gonflement des sables alluviale d'Ain Charchar

III.2.3. Les formations argileuses sous numidiennes

Les argiles sous numidiennes ont des limites de liquidité entre (38-39)%, de plasticité entre (20-24)% et l'indice de plasticité est entre (18-21)% (**Tableau18**). Selon la classification de Casagrande, pour le premier site, il s'agit d'argiles de faible plasticité (CL), mais on a trouvé trois (03) échantillons qui peuvent être classés comme plasticité haute (CH) (**Fig. 93**).

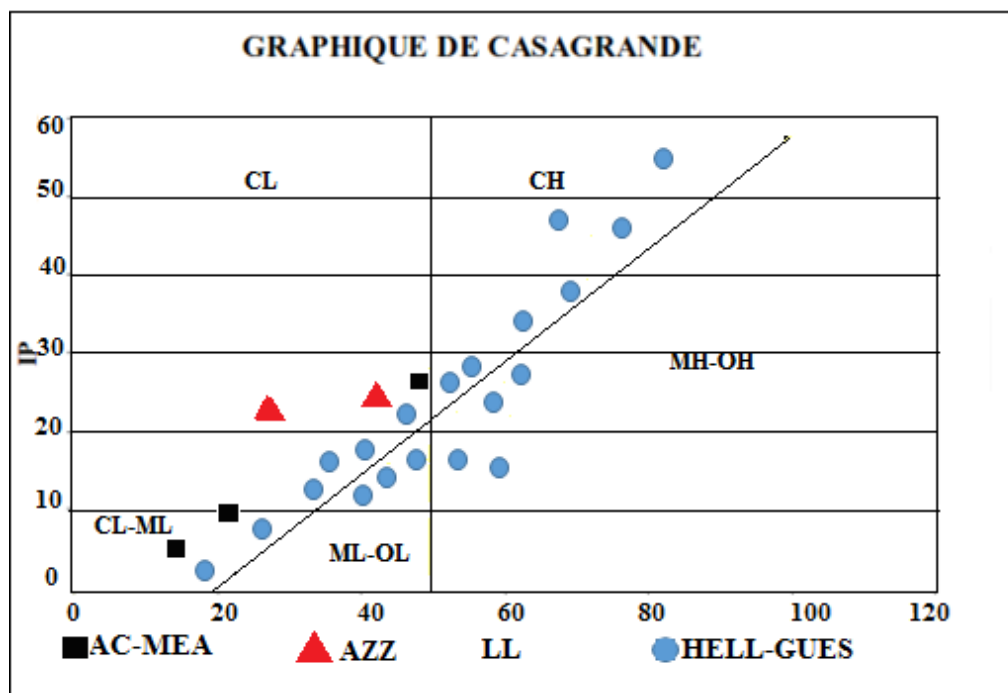


Fig. 93 : Diagramme de Casagrande pour les argiles sous numidiennes dans les trois secteurs d'étude.

Selon la relation d'Oteo (1986), il existe quatre (04) échantillons avec humidité, deux (02) se trouvent dans la zone d'expansivité nulle, un (01) dans la zone d'expansivité moyenne – haute et un (01) dans la zone d'expansivité très haute (**Fig. 94**).

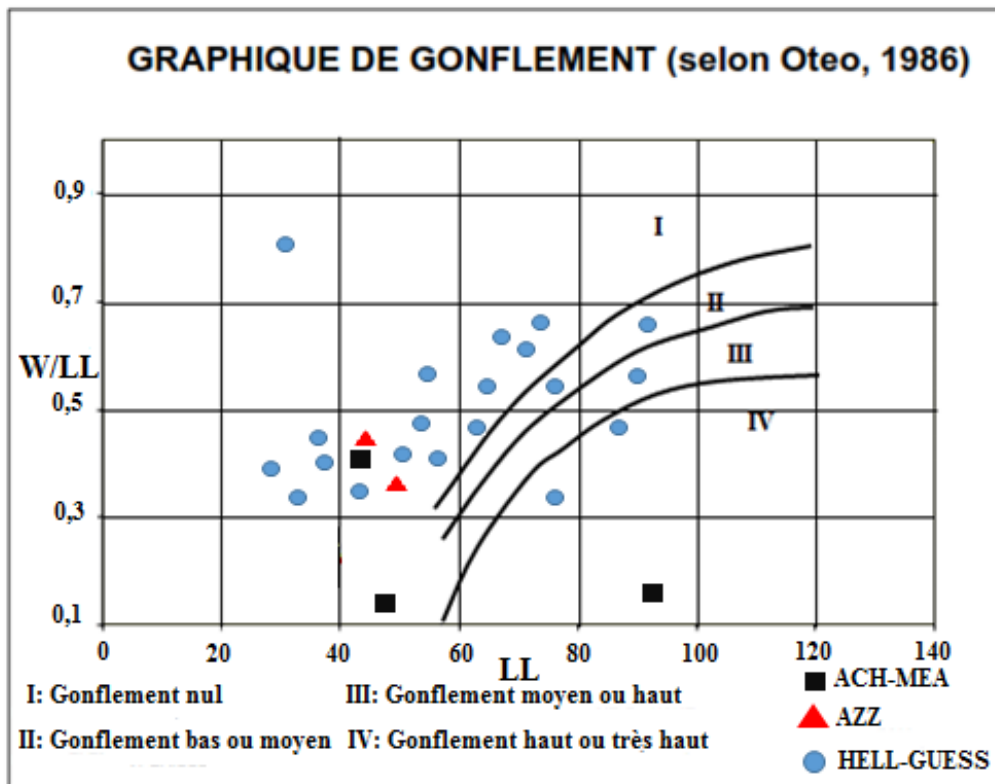


Fig. 94 : Graphique de gonflement pour les argiles numidiennes dans les trois secteurs d'étude

IV. CARACTERISATION GEOTECHNIQUE DES FORMATIONS TRAVERSEES DANS LES TUNNELS

Introduction

L'objectif fondamental de cette partie est la caractérisation géomécanique des formations traversées dans les tunnels. En plus des différentes formations quaternaires observées en surface, l'observation géologique au niveau des tunnels nous a permis d'identifier deux formations, qui sont :

- Des argiles vertes et rouges dans lesquelles une certaine schistosité est identifiée (**Photo 27**) ;
- Des grès et des conglomérats (**Photo 28**).



Photo 27 : Schistosité des formations argileuses observées à la sortie du premier tunnel (Bouche 2)

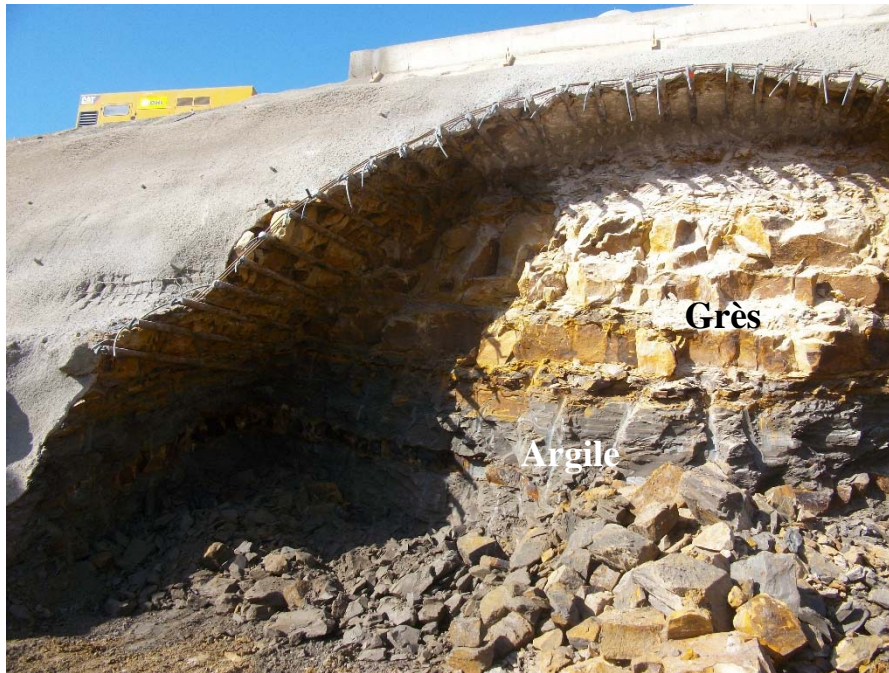


Photo 28 : Grès intercalés avec des bancs d'argiles verdâtre dans le deuxième tunnel

IV.1 DESCRIPTION TECHNIQUE DES TUNNELS

a) Tunnel Ras El Mâa

- Longueur : 568 m
- Couverture maximale : 22 m
- Formations traversées : majoritairement argiles avec des bancs de grès intercalées d'argiles (**Photo 30**).

b) Tunnel Guessaba

- Longueur : 1423 m
- Couverture maximale : 40 m
- Formations traversées : majoritairement des grès avec des bancs d'argiles de faible épaisseur (**Photo 30**).



Photo 29 : grès avec des bancs d'argiles de faibles épaisseurs

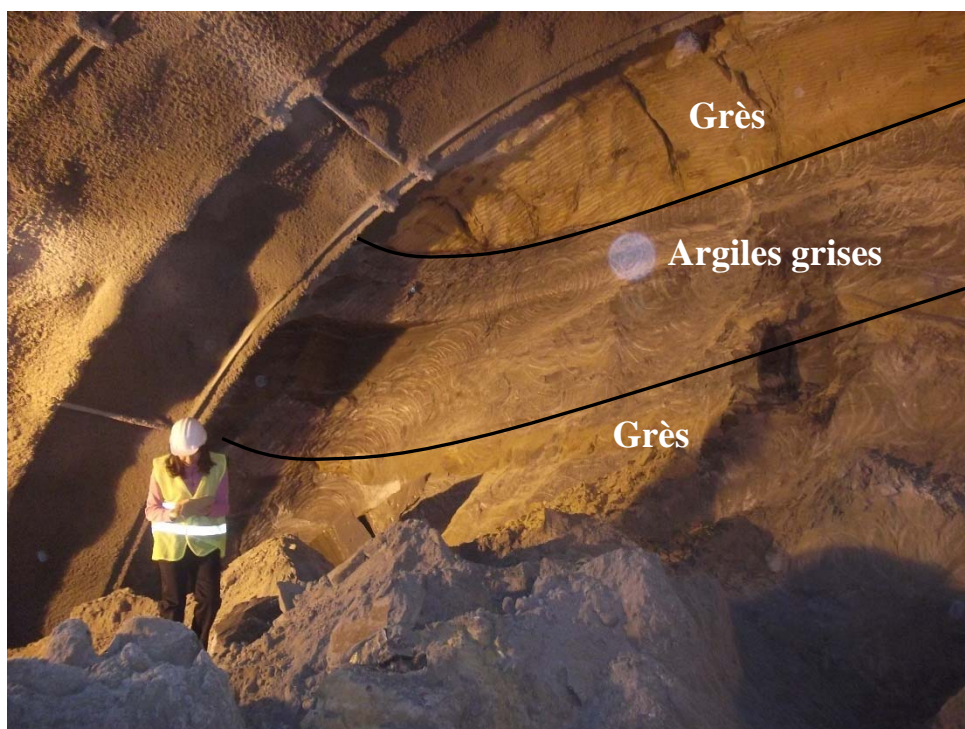


Photo 30 : grès intercalés ave des niveaux argileux grisâtre

IV.2. CARACTERISATION GEOMECANIQUE DES FORMATIONS OBSERVEES DANS LES TUNNELS

IV.2.1. Méthodes indirectes de caractérisation

Les paramètres de résistance des massifs rocheux constituent une donnée fondamentale pour la caractérisation des formations géologiques. Afin d'obtenir une caractérisation suffisante du comportement d'un seul type de massif, il serait nécessaire d'augmenter considérablement le nombre des essais nécessaires.

IV.2.2. Méthodologie

La norme habituelle consiste à l'utilisation des critères de ruptures obtenues à partir d'analyse d'essais en laboratoire. La loi de résistance la plus diffusée actuellement est le critère de rupture défini par *Hoek et Brown (1980)* qui sera employé dans cette étude.

- La roche intacte se caractérise principalement à partir d'essais en laboratoire, comme celui de la résistance à la compression simple et aux essais triaxiaux, ou plus communément ceux de la compression bi-axiale. Les résultats obtenus présentent généralement une dispersion importante, d'où la nécessité d'effectuer des regroupements de données. Une des méthodes les plus habituelles consiste à regrouper les résultats d'une même lithologie, tout en y différenciant le degré d'altération.

IV.2.3. Analyse de la résistance à la compression simple

a) Caractérisation des argiles sous numidiennes

La figure 94 reprend le total des résultats d'essais de résistance à la compression réalisés en laboratoire (**Annexes 5**). On observe que le plus grand pourcentage de valeurs se trouve dans un rang de résistance inférieur ou égal à 20 Kg/cm² (2000 Kpa) ; on peut apprécier en plus une certaine tendance d'incrément de résistance avec la profondeur.

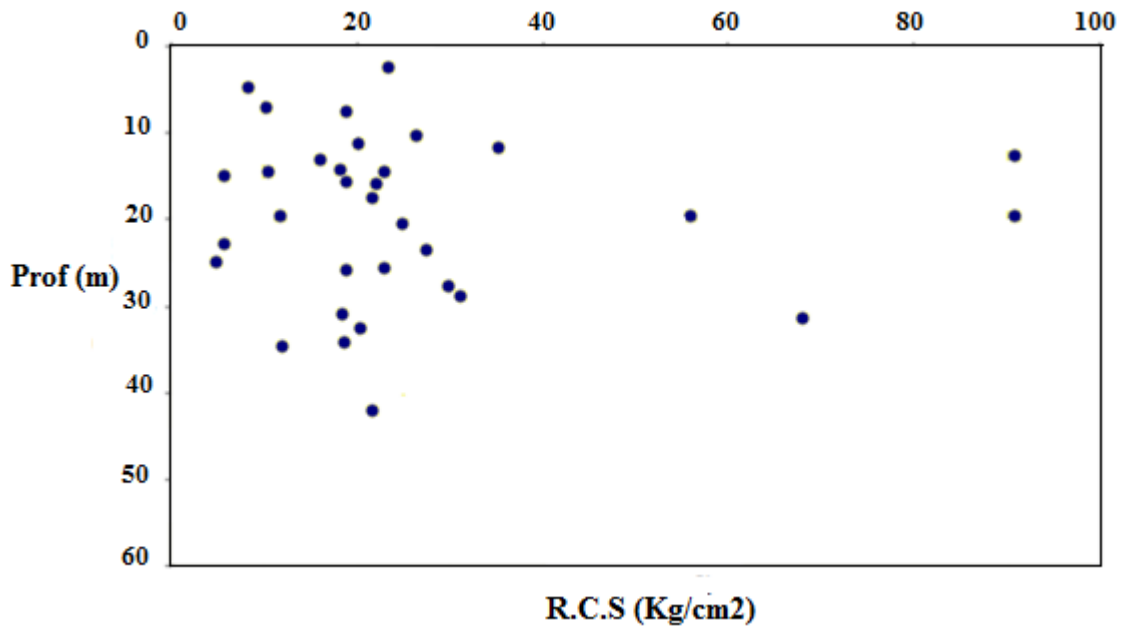


Fig. 95 : Diagramme de résistance à la compression simple des formations argileuses sous numidienne au laboratoire

En accord avec la **Fig. 95**, on pourrait différencier à priori trois rangs de valeurs de résistance :

(5 - 20), (20 - 40), (40 -100) Kg/cm², lesquels à leur tour correspondraient avec les formations argileuses dont le degré d'altération varierait entre roche altérée / très altérée à roche saine / modérément altérée selon les RMR (**Tableau 19**).

Tableau 19 : Degré d'altération des massifs argileux (RMR)

Degré d'altération	Rang résistance
III	(5 - 20)
II/III	(20 - 40)
II	(40 - 100)

b) Caractérisation des grès numidiens

On observe des valeurs de résistance excessivement basses (entre 1Kg/cm² et 5Kg/cm²) qui pourraient être considérées anormales, soit par les conditions de l'échantillon au moment de l'essai. La plupart des données sont encadrées autour des limites supérieure et inférieure ; on observe une tendance assez linéale d'augmentation de la résistance avec la profondeur. Dans le graphique, on a signalé deux lignes de tendance qui pourraient être considérées comme limites supérieure et inférieure pour les rangs de résistance à partir des données en laboratoire.

La **fig. 96** reprend le total des résultats d'essais de résistance à la compression.

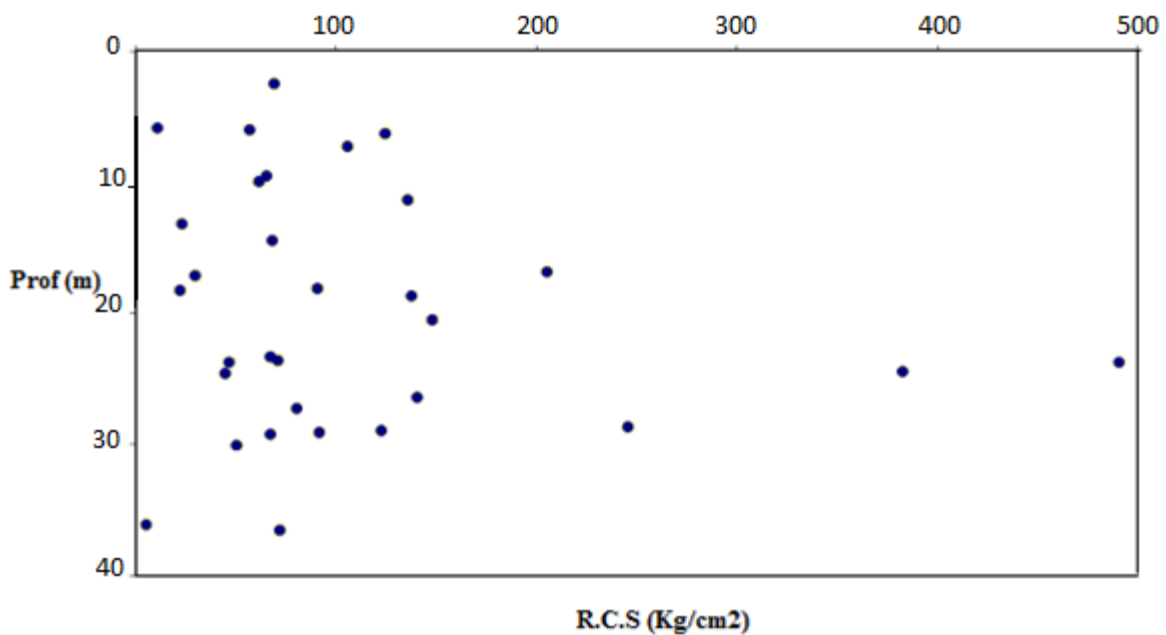


Fig. 96 : Diagramme de résistance à la compression simple des grès au laboratoire

La dispersion est très élevée, avec des valeurs qui pourraient être groupées au début en trois classes fondamentales (jusqu'à 200 Kg/cm², entre 200-400 Kg/cm² et supérieures à 400 Kg/cm²). En rejetant les valeurs qui pourraient être considérées anormales, deux valeurs de (383,1 et 491,8) Kg/cm², ou basses, la valeur inférieure à 6 Kg/cm² ; une analyse statistique plus détaillée, permet de différencier trois grandes classes, (10 - 50), (50 - 100), (100 - 150) Kg/cm².

Le tableau 20 reprend la distribution des valeurs de résistance pour chacun des rangs différenciés.

Tableau 20 : Degré d'altération des massifs gréseux

Degré d'altération	Rang de résistance (Kg/cm ²)
III	(10-50)
II/III	(50-100)
II	(100-150)

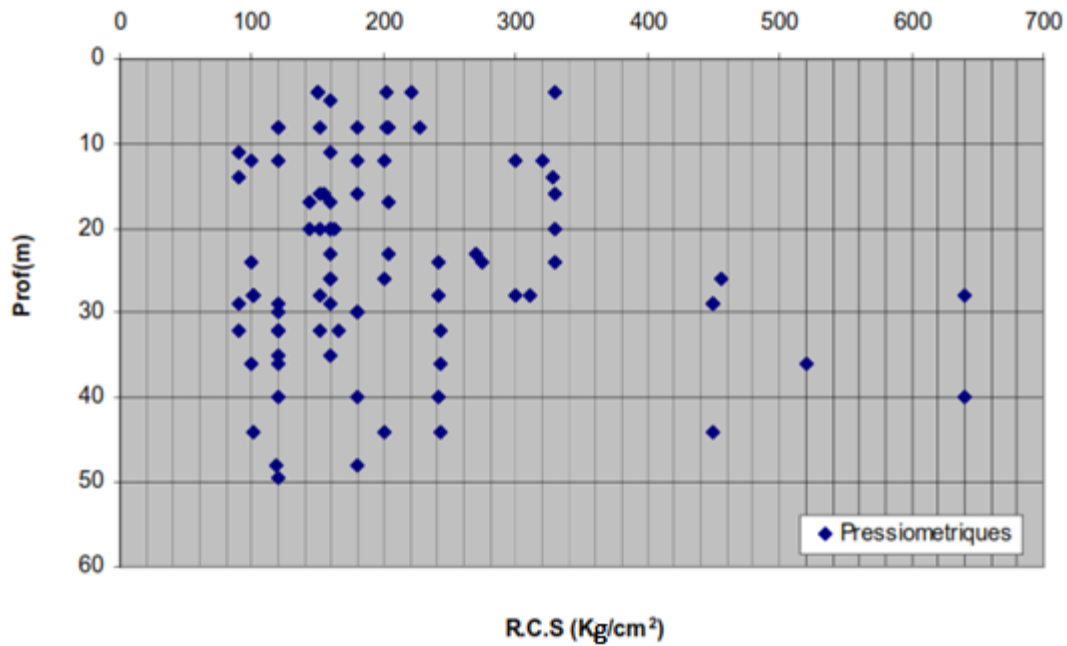


Fig. 97 : Diagramme de résistance à la compression simple des grès pressiométrique (tunnel Guessaba)

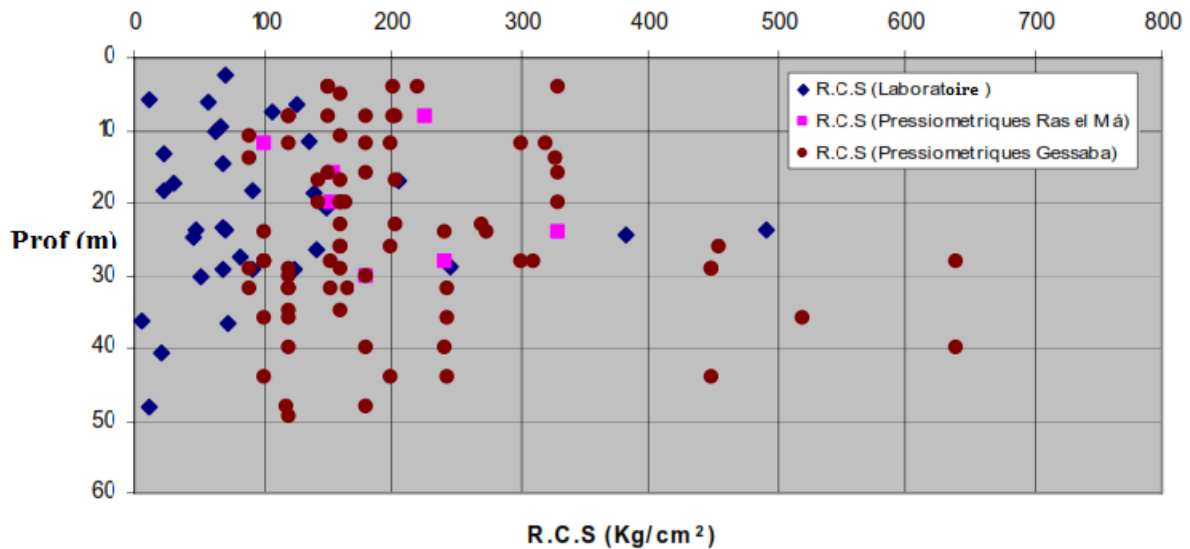


Fig. 98 : Diagramme de résistance à la compression simple des grès dans les deux tunnels

A partir des pressiomètres qui sont considérées excessivement optimistes pour le type de matériau analysé, le rang plus probable de résistances pour la roche intacte serait compris entre 50 et 150 kg/cm² ; néanmoins, il existe des valeurs extrêmes (10 et 200 Kg/cm²) dans une certaine zone des tunnels.

IV.2.4. Analyse du degré d'expansivité

a) Les argiles sous numidienne :

Dans les sites d'étude, les formations argileuses sont susceptibles de présenter des phénomènes de gonflement. Pour identifier ces argiles, on dispose d'un total de vingt-deux (22) essais de pression de gonflement, entre lesquels, onze (11), seraient menés à terme avec l'humidité naturelle de l'échantillon et les autres avec l'échantillon séché, les résultats obtenus sont présentés dans la **Fig. 99**.

Le tableau 21 résume les valeurs de pression de gonflement obtenu dans les formations argileuses.

Tableau 21 : Essais de pression de gonflement des argiles sous numidiennes

	H. Nat (Kg/cm²)	Ech. sec (Kg/cm²)
N° valeurs	11	11
valeur moyenne	0,70	1,71
déviatoin typique	1,42	1,25
valeur maximale	4,80	4,73
valeur minimale	0,05	0,72

Les valeurs indiquent un potentiel expansif qui se situe entre modéré et moyen-haut.

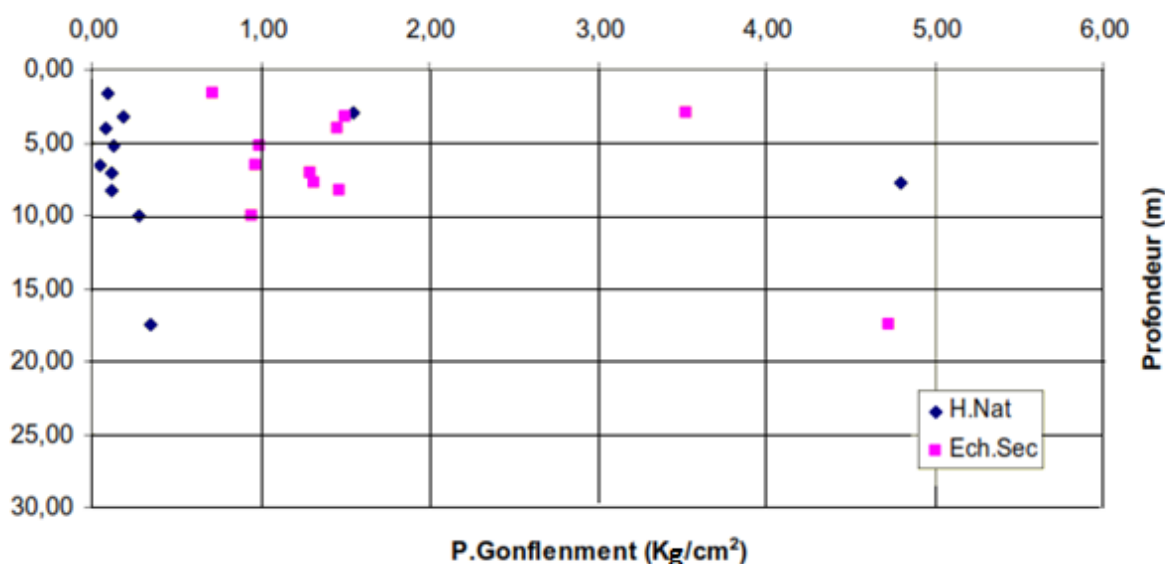


Fig. 99 : Diagramme de pression de gonflement des argiles sous numidiennes

De façon générale, les valeurs de pression de gonflement sur échantillon desséché sont supérieures à celles obtenues sur échantillon humides. Dans la Figure 98, on observe que pour les échantillons naturels, la plus part des résultats se trouve au-dessus 1 Kg/cm², et entre 1 et 2 Kg/cm² pour les échantillons desséchés. Les pressions maximales enregistrées se trouveraient proches de 5 Kg/cm². Un de ces essais aurait été mené à terme avec humidité naturelle et l'autre sur échantillon desséché. Quant à l'échantillon essayé avec humidité naturelle pour lequel, on a obtenu une pression de 4,80 Kg/cm².

En fonction des corrélations empiriques, d'autres paramètres et en plus du potentiel expansif, la représentation de limite de liquidité face à la pression de gonflement a été testée (**Fig. 100**).

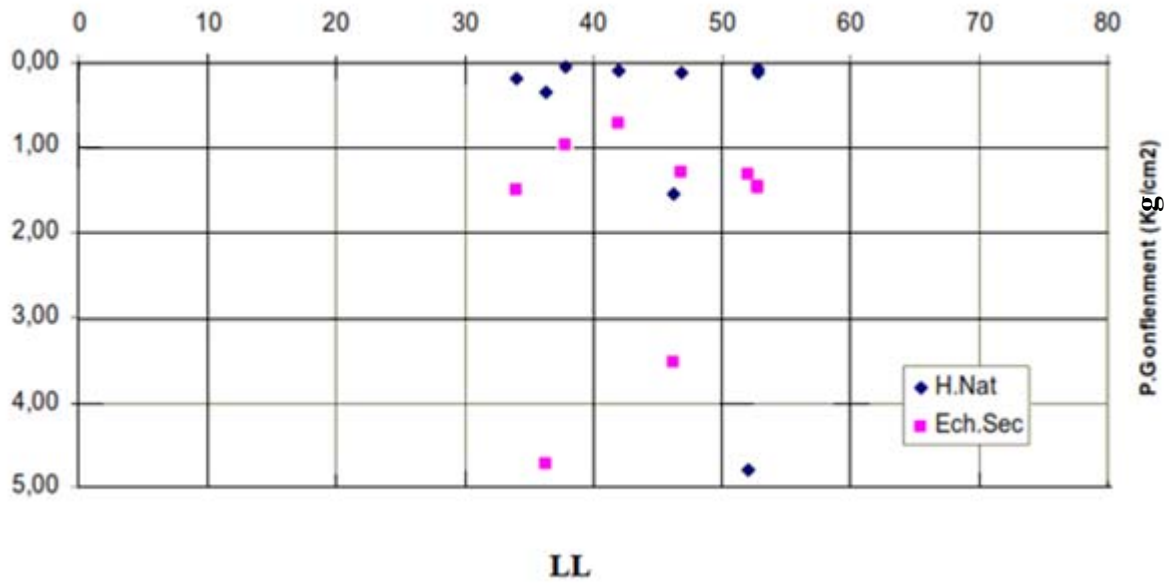


Fig. 100 : Diagramme de liquidité et de pression de gonflement des argiles sous numidienne

D'après ce diagramme, on observe que la limite de liquidité des formations argileuses sous numidienne est comprise entre 30 et 60 % et le potentiel expansif se trouvent entre 1 et 2 Kg/cm² pour la plupart des échantillons analysés que soient humides ou secs.

En fonction des corrélations empiriques d'autres paramètres avec le potentiel expansif, la représentation dans le diagramme de plasticité de Casagrande (limite de liquidité « L.L » face à l'indice de plasticité « I.P ») (**Fig. 101**) démontre que la plupart des données se trouvent au-dessous de la limite 50.

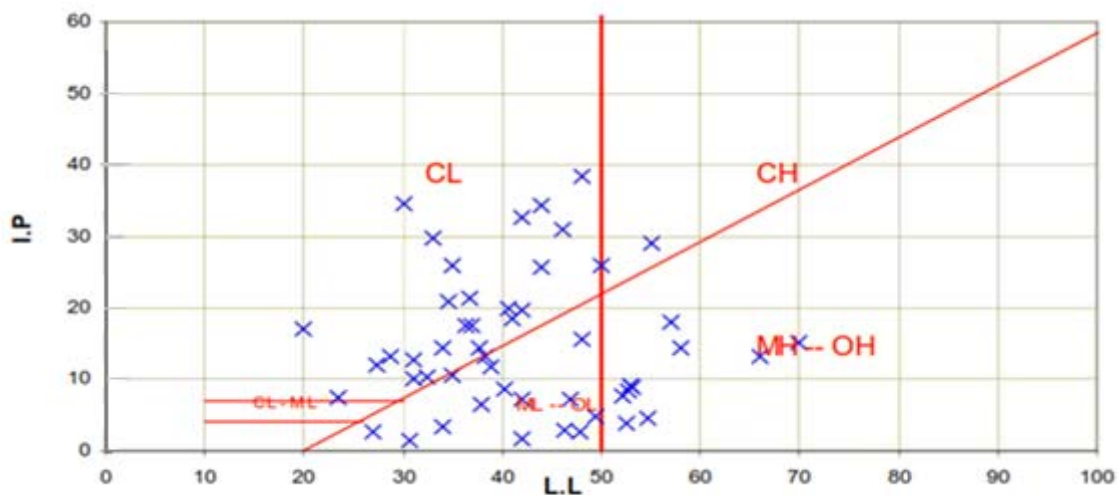


Fig. 101 : Diagramme de casagrande des formations argileuses sous numidienne dans les deux tunnels

Dans le graphique on constate que la plupart des données se trouve dans la région nommée «I» correspondant à une expansivité nulle à basse (Fig. 102).

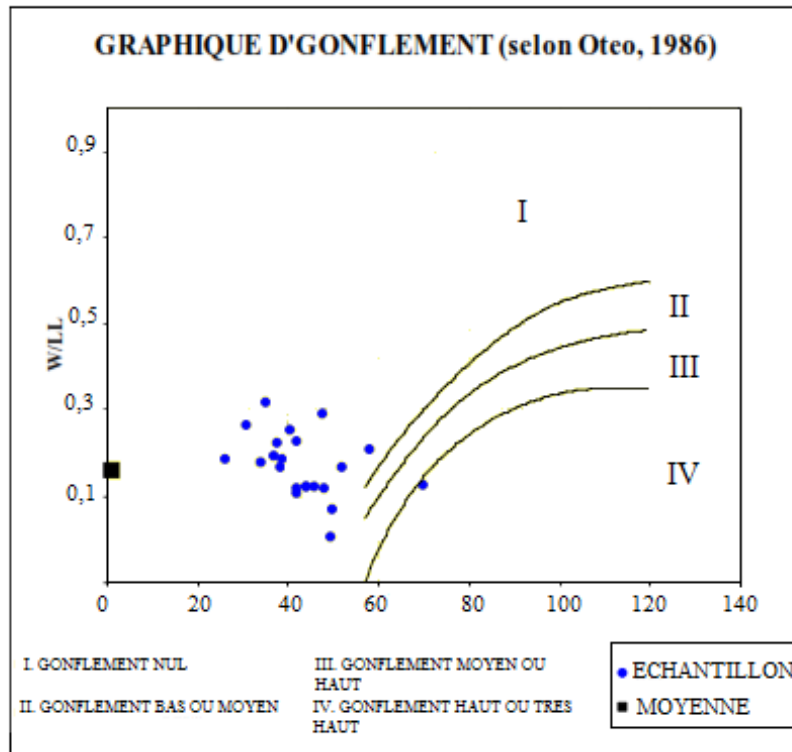


Fig. 102 : Diagramme de gonflement des formations argileuses sous numidienne dans les deux tunnels

En fonction des analyses D.R.X menés sur dix (10) échantillons correspondant aux argiles sous numidienne (**Annexe 6**) ; les résultats sont en général assez homogènes et indiqueraient qu'il s'agit de matériaux composés fondamentalement par du quartz (30-50%) et argiles (40-60%) avec un pourcentage très faible en feldspaths. Dans les argiles, le minéral majoritaire serait la kaolinite (30 - 75 %) avec des pourcentages de l'ordre de 6 à 10% de smectite.

CONCLUSION

Les observations de terrain ainsi que les travaux de laboratoire ont permis l'exploration des formations argileuses alluviales et sous numidiennes dans quatre localités à savoir Ain Charchar, Menzel El Abtal, Azzaba et Guessaba. De Mekassa à Ain Charchar, les argiles alluviales sont assez homogènes (2 à 3,5 m), de couleur grise à gris verdâtre. A Menzel El Abtal, les sondages à la pelle ont permis d'identifier des argiles grises à dominance rouge pour une épaisseur variant entre 1 et 2,5 m. A Azzaba, les argiles fines, homogènes et d'épaisseur variant entre 2,5 et plus de 3 m.

A Hellala et Guessaba, les argiles sont assez homogènes, fines, gris tachetées de jaune, de rouge brique et de brun. Leur épaisseur varie entre 2 et 2,5 m.

Pour les argiles sous numidiennes, elles sont assez homogènes, mais variables en terme de couleur d'une localité à l'autre.

Les analyses minéralogiques qualitatives par (DRX, IR et MEB) effectuées sur les échantillons les plus représentatifs des différents faciès argileux dans chaque site ont montré que les argiles sous numidiennes de la région ont une paragenèse à dominance kaolinique associés à l'illite, la chlorite et des interstratifiés (10 - 14). En plus de ces minéraux argileux, on note la présence de quartz, de calcite ainsi que des plagioclases et des feldspath-K comme accessoires et de la sidérite et de l'hématite comme traces. Sur le plan quantitatif, les minéraux argileux représentent (36 - 60)% avec présence de quartz (20 - 50)% auxquels s'ajoutent : muscovite (7 - 17)%, plagioclases (1 - 5)%, feldspath-K (2 - 8)% et calcite (1 - 9)%. L'étude micro morphologique de la kaolinite observée en MEB montre que cette dernière est mal cristallisée. Sur le plan géochimique, l'analyse par FRX des formations argileuses, montre que les principaux oxydes majeurs sont la silice (SiO_2) avec une teneur élevée (50 - 70)%, une teneur faible en alumine Al_2O_3 (10 - 24)%, en fer Fe_2O_3 (2,5 - 9)% et en alcalins et alcalino-terreux relativement bas (2 - 6%). Le TiO_2 est également présent en proportion significative (0,7 - 1,5 %).

Les résultats de la caractérisation géotechnique montrent que les formations géologiques de la zone d'étude sont légèrement sablonneuses avec des traces de graviers. Ces matériaux sont généralement constitués de fines particules avec une plasticité moyenne de 11% pour les argiles alluvionnaires et de 19 % pour les argiles sous numidiennes. Suivant leur plasticité, elles se classent dans le groupe d'argiles non plastiques.

A partir des deux formations traversées dans les tunnels, à savoir, les formations gréseuses et les formations argileuses du numidien, ces dernières sont caractérisées par un certain degré d'expansivité :

- Pour les argiles sous numidiennes, les valeurs maximales de pression de gonflement dans leur état naturel est de $1,55 \text{ Kg/cm}^2$, se trouvent les valeurs majoritairement dans le rang $0,1 - 0,5 \text{ Kg/cm}^2$.
- La valeur maximale de pression de gonflement des argiles préalablement desséchées est de $4,73 \text{ Kg/cm}^2$ se trouvant de façon majoritaire entre les valeurs $(1,0 - 1,5) \text{ Kg/cm}^2$.

**INTERPRETATION
ET DISCUSSION
DES RESULTATS**

INTRODUCTION

Ce dernier chapitre porte sur un essai d'interprétation et de discussion des résultats. En premier point, seront analysés les traits minéralogiques des argiles sous numidiennes étudiées et dans un second temps, les traits géochimique et enfin une caractérisation géotechnique des formations géologique rencontrés dans les différentes zones, suivi par une caractérisation géo mécanique des formations qui affleurent dans les tunnels.

I. CARACTERES MINERALOGIQUES

Les analyses minéralogiques qualitatives par DRX, IR et MEB ont montré que les argiles sous numidiennes de la région d'Azzaba sont essentiellement kaoliniques. Les pics principaux présents dans les diagrammes DRX sont caractéristiques du quartz apparaissant autour de $d=3,34 \text{ \AA}$ et de la kaolinite autour de $d = 7 \text{ \AA}$. L'illite, chlorite, interstratifiés et smectite sont également présent. La smectite (en proportions faibles) détectée dans les spectres de la minéralogie totale, apparaît clairement dans les spectres d'argiles traitées. Selon *Thorez (1976)* ; *Moore et Reynold, (1989)*, la smectite à l'état naturel, présente un spectre à environ 15 \AA , une fois saturé au glycol, on observe une très forte réflexion (001) à 17 \AA . Après chauffage, le pic de smectite s'effondre à 10 \AA pour produire un spectre semblable à celui de l'illite. La plus haute intensité de la smectite est observée dans le site de Hellala et Guessaba. Le reste des minéraux identifiés comme accessoires sont : feldspath, calcite et sidérite. D'une localité à l'autre, la composition minéralogique semi-quantitative des argiles sous numidienne d'Azzaba présente une forte proportion en quartz (28 - 52%) et en kaolinite (67 à 85%). Pour le quartz, les teneurs sont sensiblement moyennes (28 à 52%) sauf à Hellala (échantillon ch8) où elle se situe autour de 12 %. L'absence d'hématite dans les argiles est caractéristique des milieux hydromorphes, car l'hématite, instable en milieux aqueux a tendance à se transformer en sidérite. Par ailleurs, la proportion importante de kaolinite ainsi que la présence de l'illite et du quartz démontrent le caractère acide des roches du milieu environnant (*Velde, 1995*).

Les spectres IR montrent, en dehors des bandes caractéristiques de la kaolinite (OH vibrations) dans la plage $3700 - 3619 \text{ cm}^{-1}$ (*Fialips et al., 2000*), des traces probables de gibbsite à 3414 cm^{-1} (*Schroeder, 2002*). Celles dans le domaine $2820-2960 \text{ cm}^{-1}$ sont probablement révélatrices de la matière organique (*Mudrikah, 1993*). Les bandes à 796 et 698 cm^{-1} correspondent aux vibrations du réseau de quartz. Ces bandes confirment les résultats obtenus par DRX.

L'étude morpho structurale par MEB sur les argiles de la région montre des formes hexagonales de kaolinite et des formes arrondies de quartz. Par ailleurs, les compositions

élémentaires déterminées par EDS associé au MEB est en accord avec les compositions chimiques provenant de l'analyse FRX. La présence du potassium suggère son hébergement par le mica et/ou l'illite et/ou le feldspath K.

II. CARACTERES GEOCHIMIQUES

L'étude géochimique nous a permis d'avoir une idée sur la composition chimique des formations argileuses ; on peut citer entre autres : la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3), le fer (Fe_2O_3), le titane (TiO_2), les alcalins et alcalino-terreux (K_2O , CaO et MgO). Ces oxydes sont probablement issus des roches métamorphiques constituant le socle de la région d'étude ou des régions lointaines. Les minéraux argileux identifiés sont de ce fait des néoformations dérivant des solutions issues de l'altération (lessivage) des minéraux constitutifs de ces roches. A partir de l'examen des pourcentages en éléments chimiques contenus dans les argiles sous numidiennes étudiées, il se dégage les interprétations suivantes :

- ❖ Les teneurs en silice varient entre 60 et 70 % pour tous les échantillons. Ces teneurs en silice sont relativement élevées et se rapprochent des argiles sédimentaires plastiques.
- ❖ Les teneurs en alumine (Al_2O_3) sont le plus souvent corrélées à la présence des minéraux argileux tels que la kaolinite. Leurs teneurs relativement significatives en Al_2O_3 (39 - 75%) dans les argiles sous numidiennes de la région confirment les teneurs en kaolinite obtenus par DRX (60 - 90%).
- ❖ Les rapports massiques $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ sont autour de 3, ce qui suggère la présence d'une quantité importante de silice libre (quartz ou silice amorphe) due probablement à un apport détritique assez important (*Abdelhak Arib et al., 2007*). La silice peut provenir de différentes origines minérales (feldspath, muscovite) ou de la silice libre (due à l'alternance des argiles avec les grès). Une concentration forte en cet oxyde (4 - 7%) dans les tunnels signifie qu'il est présent dans la roche sous ces deux formes (*Abdelhak Arib et al., 2007*).
- ❖ Les teneurs en Fe_2O_3 sont relativement élevées (3 à 10%) corrélées à la présence de l'hématites et sidérite observés par les analyses DRX.
- ❖ Les teneurs en alcalins et alcalino-terreux ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}$) oscillent autour de (3 - 4) % dans les tunnels et entre (3 - 7) % dans les argiles des différents secteurs, à part dans le secteur d'Azzaba avec un pourcentage de 10%, comparativement aux argiles européennes (ATB, ATM et TF) qui sont de l'ordre de 5% et vont jusqu'à 15 % pour certaines (ATM) riche en chaux (CaO).

- ❖ L'absence ou traces de sodium (Na_2O) et la faible teneur en potassium (K_2O) suggère un lessivage en base élevé pendant le processus de mise en place des formations argileuses.
- ❖ la présence de calcium (CaO) dans l'argile confirme la présence (en faibles teneurs) de la calcite observée par DRX.
- ❖ La faible teneur en ferromagnésiens (MgO , FeO) montre que les minéraux du groupe de la chlorite sont censés être en trace ou absents dans les argiles (*Manning, 1995*). Ce fait est confirmé par la minéralogie (espèces argileuses) obtenues par la DRX.
- ❖ Les valeurs de la perte au feu sont comprises entre (8 - 26)% (valeur généralement attribuée à la perte au feu de la kaolinite). Elles laissent donc supposer pour nos matériaux la présence d'autres minéraux fondants comme l'illite et la smectite (*Christidis, 2011*).

III. CARACTERES GEOTECHNIQUE

Les matériaux argileux de la zone d'étude sont légèrement sablonneux avec des traces de graviers. Ils ont une plasticité moyenne de 11% pour les argiles alluviales et de 19 % pour les argiles sous numidiennes ; suivant leur plasticité, elles se classent dans le groupe d'argiles non plastiques.

Des deux formations traversées dans les tunnels, la formation d'argile est celle qui présente des symptômes de se caractériser par un certain degré d'expansivité.

CONCLUSIONS GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Cette thèse représente une contribution et un apport à une meilleure reconnaissance des argiles de la région d'Azzaba. Le secteur étudié concerne la zone entre Mekassa et Ramdane Djamel en passant par Menzel El Abtal, Azzaba et Guessaba (soit un parcours total d'environ 30 km). Les données sont basées sur des sondages à la pelle et des sondages profonds.

Dans ce travail, nous avons procédé à une caractérisation lithologique et physique pour toutes les formations géologiques rencontrées suivi d'une caractérisation minéralogique et chimique pour les argiles sous numidiennes et enfin une étude géotechnique qui résume les critères physiques de chaque formation rencontrée dans les tunnels.

Les argiles sous numidiennes, sont assez homogènes, mais variables en terme de couleur d'une localité à l'autre. Leur étendue est plus ou moins importante dans chaque localité. Les analyses minéralogiques qualitatives par diffraction des rayons X (DRX), infrarouge (IR) et par microscopie électronique à balayage (MEB) ont montré que pour les poudres argileuses sous numidiennes, se sont des formations argileuses à dominance quartzique associé aux minéraux argileux et aux assemblages minéralogiques diversifiés (en particulier une proportion variable d'argile, de calcite ainsi que des plagioclases, feldspath-K comme accessoires et sidérite, hématite comme traces.). La fraction argileuse sous numidienne est dominée par la kaolinite, l'illite, la chlorite et les interstratifiés (10-14). Sur le plan quantitatif, ces minéraux argileux représentent (36 - 60)% avec présence de quartz (20 - 50)% auxquels s'ajoutent : muscovite (7 - 17)%, plagioclases (1 - 5)%, feldspath-K (2 - 8)% et calcite (1 - 9)%. Par ailleurs, la proportion importante de kaolinite ainsi que la présence de l'illite et du quartz confirme le caractère acide des roches du milieu environnant. La micro-morphologie de la kaolinite observée par MEB montre que cette dernière est mal cristallisée. Sur le plan géochimique, l'analyse par FRX des formations argileuses, montre que les principaux oxydes majeurs sont la silice (SiO_2) avec une teneur élevée (50 - 70)%, une teneur faible en alumine Al_2O_3 (10 - 24)%, en fer Fe_2O_3 (2,5 - 9)%, avec un rapport massique $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ autour de 2 %. La présence d'alcalins de type K_2O (1,09 - 3)% suggère son hébergement par le mica, l'illite ou le feldspath K.. Les teneurs en alcalino-terreux (CaO , et MgO) sont relativement basses (2,4 à 3,76)%. Ces éléments sont probablement issus des roches métamorphiques (gneiss et micaschistes) constituant le socle de la région. Les rapports massiques $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ sont autour de 4 à 7%, suggérant la présence d'une quantité importante de silice libre qui s'explique par l'abondance du quartz observé dans les spectres de DRX ; cette silice libre est due à un apport détritique assez important dans ces argiles et l'aspect sableux des argiles.

CONCLUSION GENERALE

L'absence ou la présence sous forme de trace de sodium (Na_2O) (0 à 1,99)% et la faible teneur en potassium (K_2O) (1,34 à 3)% suggèrent un lessivage des minéraux primaires (Plagioclases et feldspaths potassiques) pendant la mise en place des formations argileuses.

Les résultats de l'analyse géotechnique montrent que les formations géologiques sont légèrement sablonneuses avec des traces de graviers. Ces matériaux sont généralement constitués de fines particules avec une plasticité moyenne de 11% pour les argiles alluvionnaires et de 19 % pour les argiles sous numidiennes. Suivant leur plasticité, elles se classent dans le groupe d'argiles non plastiques et d'expansivité nulle.

La caractérisation géomécanique menée sur les deux formations traversées dans les tunnels montre que la formation argileuse est celle qui présente des symptômes de se caractériser par un certain degré d'expansivité. Cette caractérisation est basée sur des essais en laboratoire comme, celui de la résistance à la compression simple et aux essais triaxiaux, ou plus communément ceux de la compression bi-axiale. Les résultats obtenus présentent généralement une dispersion importante.

Pour les argiles sous numidienne, les valeurs maximales de pression de gonflement dans cet état naturel est de $1,55 \text{ Kp/cm}^2$, se trouvant les valeurs majoritairement dans le rang $0,1-0,5 \text{ Kp/cm}^2$. La valeur maximale de pression de gonflement des argiles préalablement desséchées est de $4,73 \text{ Kp/cm}$ se trouvant de façon majoritaire dans le rang $1,0 - 1,5 \text{ Kp/cm}^2$. D'après ces résultats, les formations rencontrées dans les tunnels ne présenteraient aucun risque sur la stabilité des ouvrages.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdelhak A., Abdallah S., Redouane M., Taoufik R., Moussa G. 2007.** Caractéristiques structurales et mécaniques de céramiques à base d'argiles : influence de la source de feldspath. *C. R. de Chimie*, vol. 10, p 502-510.
- Bauer-Plaindoux C., Tessier D., Ghoreychi M. (1998).** Propriétés mécaniques des roches argileuses carbonatées : importance de la relation calcite-argile. *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes, Earth & Planetary Sciences*, 326, pp. 231-237.
- Bekkouche M.F., 2009.** Caractéristiques des sources thermales de la région d'azzaba, Mémoire de magister UBMA 166 p.
- Benaouali-Mebarek, N. 2006.,** Frizon de Lamotte, D., Roca, E., Bracène, R., Faure, J.-L., Sassi, W., and Roure, F. (2006), Post-Cretaceous kinematics of the Atlas and Tell systems in central Algeria: Early foreland folding and subduction-related deformation, *C. R. Geoscience*, 338, 115-125.
- Bieniawski Z.T. 1979** Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering 251 pages.
- Biscaye P.E. 1965.** Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. *Geological Society of America Bulletin*, 76, 803-832.
- Boski T., Pessoa J., Pedro P., Thorez J., Dias J.M.A., Hall I.R. 1998.** Factors governing abundance of hydrolysable amino acids in the sediments from the N.W. European Continental Margin (47-50°N). *Progress in Oceanography*, 42, 145-164.
- Bolt G.H. (1956).** Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clays, *Géotechnique*, vol.6, n°2, pp. 86-93.
- Bouarroudj M.T., 1986.** Les minéralisations à Hg, Pb, Zn, Cu, Ba de la zone Nord Numidique du Nord de l'Algérie orientale – Métallogénie et recherche de guides de prospection. Thèse de Docteur ingénieur, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.242 p.
- Bouchet A., Meunier A. & Sardini P. 2000.** Minéraux argileux : structure cristalline, identification par diffraction de rayons X", *Bulletin Elf Exploration Production*, Pau, Mémoire, 23, p.136.
- Bouillin J.P et Raoult J.F 1971.** Présence sur le socle kabyle du constantinois d'un olistostrome lié au charriage des flyschs ; le Numidien peut être un néo-autochtone ? *Bull. Soc. Géol. France*, 7, pp 338-362.
- Bouillin J.P., 1977.** Géologie Alpine de la petite Kabylie dans les régions de Collo et d'ELMilia. Thèse, Paris -Toulouse, 511p.
- Bouillin J.-P., Durand Delga, M., and Olivier, P. 1986,** Betic-Rifian and Tyrrhenian Arcs : Distinctive features, genesis and development stages. The origin of Arcs, in *Developments in*
- Bracène R. 2002.** Géodynamique du Nord de l'Algérie : impact sur l'exploration pétrolière, PhD thesis, University of Cergy-Pontoise, France, 2002.
- Bracène R.D. Frizon de Lamotte 2002.,** The origin of intraplate deformation in the Atlas system of western and central Algeria: from Jurassic rifting to Cenozoic–Quaternary inversion,
- Brindley G.W., Oughton. & Robinson K. (1950)** Polymorphism of the chlorites. I. Ordered structures. *Acta Crystallographica*, 3, 408-416.
- Brindley G.W., Chih-Chun K., Harrisson J.L., Lipsicas M., Raythatha R. 1986.** Relations between structural disorder and other characteristics of kaolinites and dickites. *Clays and Clay Minerals*, 34, 239-249p.
- Brindley G.W., 1966.** Discussion and recommendations concerning the nomenclature of clay minerals and related phyllosilicates: *Clay and Clay Minerals*, v. 14, p. 27-34.
- Brown G. and Brindley G.W., 1980.** Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. Eds. G.W. London: Mineralogical Society, 495 p.
- Brown B. E., and Bailey, S. W., 1963.** Chlorite polytypism: II. Crystal structure of a one-layer Cr-chlorite, Note: variety called kammererite, *American Mineralogist*.
- Brunauer, S., 1943.** The Adsorption of Gases and Vapours, Princeton University Press.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Brunauer S., Emmett, P. H., and Teller, E., 1938.** Adsorption of Gases in Multimolecular Layers: Journal of the American Chemical Society, v. 60, no. 2, p. 309-319.
- Caillère S., Henin S. & Rautureau M. 1982.** Minéralogie des argiles : Classification et nomenclature (Tome 2), Ed. Masson, Paris, pp. 9, 107 & 114.
- Caillere S., S. 1982.** Hénin and M. Rautureau, "Minéralogie des argiles" Masson, Tomes 1 et 2, 184 p et 189p (1982).
- Carroll D. L., Kemp T.H., Bastow T.J. & Smith M.E. 2005.** Solid-state NMR characterization of the thermal transformation of a Hungarian white illite. Solid State Nuclear
- Chamayou H. & Legros J.P., 1989.** Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol. Presses Universitaires de France, 593 P.
- Chouabbi A.M., 1987.** Etude géologique de la région de hammam N'Bails (SE de Guelma, Constantinois, Algérie) : un secteur des zones externes de la chaîne des Maghrebides. Université Paul Sabatier de Toulouse, 113 P
- Christidis G.E. 2011.** Industrial clays. European mineralogical Union, Notes in mineralogy. Vol. 9, chapter 9, 341-414P.
- Cojean R., Audiguier M., Cui Y.J, Delage P., Geremew Z., Grambin C., Laribi S. (2006).** Synthèse bibliographique sur l'aptitude des sols argileux au retrait-gonflement, *Rapport Armines-Centre de Géosciences réalisé pour le projet « Aléa et risque sécheresse »*, Fondation MAIF, 99 pp.
- Collas J. et Havard M. 1982.** Guide de géotechnique, lexique et essai. Éd Eryolles, 130p.
- Cook H.E, Johnson P.D, Matti J.C., Zemmels I. 1975.** Methods of sample preparation and X-ray diffraction in X-ray mineralogy laboratory. *Deep Sea Drilling Project*, University of California, Riverside. Contribution n°74-5, 999-1007.
- Deere D.U. et Deere D.W. 1988.** The rock quality designation (RQD) index in practice. In Rock classification systems for engineering purposes, (ed. L. Kirkaldie), ASTM Special Publication 984, 91-101. Philadelphia: Am. Soc. Test. Mat.
- Deere D.U. 1989.** Désignation de la qualité de la roche (RQD) après 20 ans. U.S. Army Corps Contract Report Engrs GL-89-1. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station.
- Deleau P., 1938.** Bulletin Du Service De La Carte Géologique De L'Algérie 2e Série Stratigraphie-Descriptions Régionales N° 14 Etude Géologique Des Régions de Jemmapes, Hammam Meskoutine et étude du col des oliviers Tome I- Texte . Docteur Es Sciences Assistant du service de la carte géologique de l'Algérie.
- Deleau P, 1938.** Etude géologique des régions Jemmapes- Hammam Meskhoutine et du Col des Oliviers (Tome I). *Publication du service de la carte géologique de l'Algérie*.
- Domzig A 2006.** Déformation active et récente, et structuration tectono-sédimentaire de la marge sous-marine algérienne 16-17p.
- Drits V.A., Sakharov B.A., Lindgreen H. & Salyn A., 1997.** Sequential structure transformation of illite-smectite-vermiculite during diagenesis of Upper Jurassic shales from the North Sea and Denmark. *Clay Minerals*, **32**, 351-371.
- Drits V.A., Lindgreen H., Sakharov B.A., Jacobsen H.J. & Zviagina B.B. 2004.** The detailed structure and origin of clay minerals at the Cretaceous/Tertiary boundary, Stevns Klint (Denmark). *Clay Minerals*, **39**, 367-390.
- Durand-Delga M et Lambert A., 1955.** Existence d'un flysch schisto-gréseux tithonique à néocomien aux abords des massifs anciens kabyle. C.R. Somm. Soc. Géol. France, p.296-298.
- Durand-Delga M., 1969 .** Mise au point sur la structure du Nord-Est de la berberie. P.S.C.G.A., N.S. Bull. n°39, p.89-131, 9 fig., Alger.
- Durand-Delga M., 1978** Corse./Michel [et col.], Masson.
- El Ouahabi, M., 2013.** Valorisation industrielle et artisanale des argiles du Maroc, thèse de doctorat en science. Université de Liège. Ecole doctorale du Département de Géologie. Bruxelles. p16.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Eslinger E, D & Peaver.D., 1988.** *Clay minerals for petroleum geologist and engineers, SEPM Short course Notes N° 22. Soc. Economic paleontologists and mineralogists, Tulsa, USA (1988).*
- Fagel N., 2004.** Géologie des argiles. Notes de cours, Faculté des Sciences, Université de Liège, 1-185p.
- Fagel N., Thamo-Bozso Heim B., 2007.** Mineralogical signatures of Lake Baikalsediments: Sources of sediment supplies through late Quaternary. *Sedimentary Geology*, 194, 37-59.
- Fan H., Baozhen S., Qiaoxia Li., 2006.** Thermal behavior of goethite during transformation to hematite. *Materials Chemistry and Physics*, 98,148–153.
- Farmer V.C., 1975.** The Infrared Spectra of Minerals, Mineralogical Society, Monograph 4, London.
- Farmer V.C., 2000.** Transverse and longitudinal crystal modes associated with OH stretching vibrations in single crystals of kaolinite and dickite. *Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 56, 927-930.
- Fialips C.I., Petit S., Decarreau A., 2000.** Hydrothermal formation of kaolinite from various metakaolins. *Clay Minerals*, 35, 559-572.
- Ficher E. 1890.** Description géologique de la kabylie du Djurdjura. Etude spéciale des terrains tertiaires. Thèse Paris. Edit. Fontana et Cie. Alger.
- Galoz P., 2011.** Techniques spectroscopiques d'analyse / Spectrométrie de fluorescence atomique. Mesure Physique Annecy – MPh2 SE3 ME3, 18p.
- Gautier M., 2008.** *Interactions entre argile ammonie et molécules organiques dans le contexte du stockage des déchets.* Thèse de doctorat. Université d'Orléans (2008), 276 pages.
- GENS A., ALONSO E.E. (1992).** A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays, *Can.Geotech. J.*, vol. 29, pp. 1013-1032
- Glangeaud L., 1932.** Etude géologique de la région littorale de la province d'Alger. (Thèse,Paris)., Bulletin, Services des cartes géologiques de l'Algérie, (2), no8, 590p, Alger.
- Grim R. E., 1962.** Applied clay mineralogy. McGraw Hill Book Co. Hong, Z. (1998). Effect of initial water content on compressibility of remoulded Ariake clays. Proc. Int Symposium on Lowland Technology, Saga University, pp 69-74.
- Gruner J. W., 1934.** The structures of vermiculites and their collapse by dehydration *American Mineralogist*, v. 19, p. 557-575.
- Guggenheim S. & Martin R.T., 1995.** Definition of clay and clay minerals: joint report of the AIPEA and CMS nomenclature committees. *Claysminerals*, 32,493-495.
- Heiri O., Lotter, A. F., and Lemcke, G., 2001.** Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproductibility and comparability of results: *Journal of Paleolimnology*, v. 25, p. 101-110.
- Hoek E et Brown, E.T.1980.** *Underground Excavations in Rock.* London: Institution of Mining and Metallurgy 527 pages. Empirical strength criterion for rock masses.
- Holtzapffel T. 1985.** Les minéraux argileux : préparation, analyse diffractométrique et détermination. *Société Géologique du Nord*, 12, 15-43.
- Holtzapffel T. 1985.** Les minéraux argileux, préparation, analyse diffractométrique et détermination. *Soc. Géol. Nord*, n°12, 135p.
- Hubert F. 2008.** Modélisation des diffractogrammes de minéraux argileux en assemblages complexes dans deux sols de climat tempéré. Implications minéralogique et pédologique. *Université de Poitiers.* 205p.
- Joussein E., Petit S., Decarreau A. 2001.** Une nouvelle méthode de dosage des minéraux argileux par spectroscopie infrarouge. *Earth and Planetary Sciences*, 332, 83-89p.
- Kamgang Beyala, V. 1987.** Altération supergène des roches grenatifères de la région de Yaoundé (Cameroun). Pétrologie et Minéralogie. Thèse Doc 3 ème cycle, Univ. Poitiers,
- Kieken, M., 1962.** Les Traits essentiels de la géologie algérienne. Livre mémoire, Pr Paul

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Fallot, Mémoire, h, s, Société, Géologique, France, T1. 545-614 p.
- Komine H, Ogata N. (1994).** Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite, *Can. Geotech. J.*, vol. 31, pp. 478-490
- Konan K. L. 2006.** *Interactions entre des matériaux argileux et un milieu basique riche en calcium.* Thèse de doctorat. Université de limoges (2006) ,144 pages.
- Kornman M. 2009.** Matériaux de terre cuite -propriétés et produits, Septima, Paris, ISBN 2-904845-32-1.
- Lambercy E. 1993.** Les matières premières céramiques et leur transformation par le feu. Granit 1. Des Dossiers Argiles, 509p.
- Landry, Bruno et Mercier, Michel., 1992.** Notions de géologie. Mont-Royal, Modulo, 3^{ème} édition revue et augmentée, 565 p.
- Lanson B., Sakharov B.A., Claret F. & Drits V.A. 2009.** Diagenetic smectite-to-illite transition in clay-rich sediments: A reappraisal of X-ray diffraction results using the multi-specimen method. *American Journal of Science*, **309**, 476-516.
- Lefevre I., Lajudie A. (1987).** Détermination des capacités d'échange des argiles. Corrélation avec certaines propriétés physico-chimiques, *Note technique C.E.A., SESD/87.11.*
- Mache J.R., 2013.** Minéralogie et propriétés physico-chimiques des smectites de Bana et Sabga (Cameroun).Utilisation dans la décoloration d'une huile végétale alimentaire. 24, 134 p.
- Magné J. & Rayond.D. 1972.** Dans le Nord de la Grande kabylie (Algérie), le Numidien a un âge compris entre l'Oligocène moyen et le Burdigalien inférieur.C. R. Acad .sc., (D), t. 274,p.3052-3055, 1fig., Paris.Magnetic Resonance, 28, p. 31-43.
- Manning D.A.C. 1995.** Introduction to industrial mineral. Chapman & Hall Edition, London. 275 p.
- McKenzie R. C., 1975.** The classification of soil silicates and oxydes. In : Soil components: Inorganic components. Gieseking J. E. eds. Spring-Verlag, New York, Berlin,Heidelberg, v. 2, p. 1-25.
- Meunier A. 2005.** Clays. *Springer*, Heildeberg, 472 p.
- Mezghache H., 1989.** Cartographie automatique et interprétation géostatistique d'une campagne de prospection géochimique sur sol – Application à la zone mercurielle Nord Numidique (Algérie). Thèse de Docteur de l'INPL. 178 p.
- Millot G. 1964.** Géologie des argiles : Altérations, Sédimentologie, Géochimie. Masson et Cie, Paris, P.35.
- Mitchell J.K. (1993).** Fundamentals of soil behavior, 2 ème edition, John Wiley and sons, NewYork, 437 pp.
- Modejova J, Bujda k.J, Janek.M, Komadel. P, 1998.** Comparative FT-IR study of the structural modification during acid treatment of dioctahedral smectites and hectorite. *Petrochimica Arca A*, 54; 1397-1406.
- Modejová J., 2002.** Institut of inorganic chemistry, Slovak Academy of sciences, SK-84236, Bratislava, Slovak republic Received 18 March 2002; revised 31 May 2002, accepted 6 june 2002; available online 14 August 2002.
- Moore D.M. and Reynolds R.C.Jr. (1989).** X-Ray Diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford University Press, Oxford, 332p.
- Morel R. (1996).** Les sols cultivés, 2ème edition, Paris : *Technique & documentation*, ISBN : 27430-0149-6.
- Mouroux P., Margon P., Pinte J.C. (1988).** La construction économique sur les sols gonflants : *Manuels et méthodes*, vol. 14, BRGM.
- Mudrikah R. 1993.** Caractérisation par analyse IR des dépôts argileux continentaux récents. Dépression d'Ambarawa (Indonésie, Centre de Java) in: *Spectrométrie infrarouge et analyse minéralogique quantitative des roches* (ORSTOM, ed). Pp 53-63.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Mudrikah R. 1993.** Caractérisation par analyse IR des dépôts argileux continentaux récents. Dépression d'Ambarawa (Indonésie, Centre de Java) in: *Spectrométrie infrarouge et analyse minéralogique quantitative des roches* (ORSTOM, ed). Pp 53-63.
- Murray H.H. 1999.** Applied clay mineralogy today and tomorrow», *Clay Minerals*, N° 34, pp. 39-49.
- Nibambin S.S. 2003.** Thèse de l'Université de Limoges. Okwara C. A. & Osoka E.C. (2006) Caustic Activation of Local Clays Palm Oil Bleaching. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(4), 526-529.
- Njoya A., Ekodeck G.E., Nkoumbou C., Njopwouo D., Tchoua F.M. 2001.** Matériaux argileux au Cameroun : Gisements et exploitation. *Acte de la 1ère conférence sur la valorisation des matériaux argileux au Cameroun*, 11-12 av. 2001, 13-30.
- Nkoumbou C., Njoya A., Njopwouo D., Wandji R. 2001.** Intérêt économique des matériaux argileux. *Actes de la première conférence sur la valorisation des matériaux argileux au Cameroun*, 11 au 12 avril 2001 pp 1 à 12.
- Petit S., Madejova J., Decarreau A., Martin F. 1999.** Characterization of octahedral substitutions in kaolinites using near infrared spectroscopy. *Clays and Clay Minerals*, 47, 103 108p.
- Philipponnat G., Hubert B. 1998.** Fondation et ouvrages en terre ; Ed Eryolles, 547p.
- Pialy P. 2009.** Thèse de l'Université de Limoges.
- Poppe L.J., V.F. Paskevich, J.C. Hathaway, and D.S. Blackwood.** *A Laboratory Manual for X-Ray Powder Diffraction*. U. S. Geological Survey Open-File Report 01-041.<http://www.usgs.gov>.
- Raoult J.F., 1969.** Relation entre la dorsale kabyle et les flyschs sur la transversale du Djebel Rhedir ; phases tangentielles éocènes, paléogéographie (Nord du Constantinois, Algérie). B.S.G. France, (7), XI, p. 523-543, 11 fig., Paris.
- Raoult J.F., 1969.** Série de Tangout, unité externe de la Kabyle annonçant le flysh de Penthève. Bull, Serv, Géol., Fr., 7^{ème} série, TomeXI.
- Raoult J.F., 1974.** Evolution paléogéographique et structurale de la chaîne alpine entre le golf de Skikda et Constantine (Algérie Nord Oriental) Bull, Serv. Géol. Fr., 7^{ème} série, tome XVII, N °3, P 394-409.
- Raoult J.F., 1974.** Géologie du centre de la chaîne numidique (Nord du Constantinois, Algérie). Nouvelle série tome II. Mém. Soc. Géol. France, Nouvelle, Série, LIII, No121,
- Raoult J.F., 1975.** Evolution paléogéographique et structurale de la chaîne A alpine entre le Golf de Skikda et Constantine (Algérie orientale).Bull. Soc. Géol. France, (7), XVII ,394-409.
- Robert M., 1975.** Principes de détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide des rayons X. Annales Agronomiques, 26, p. 363-399.
- Romanko. E.F 1991.** Etude métallogénique au 1/200 000 de la feuille de Skikda.
- Russel J. D., Fraser A. R, (1994).** Infrared methods. Clay mineralogy: spectroscopic and chemical determinative methods/ ed par M.J. WILSON. London: Chapman and Hall) p. 11-67.
- Sato T., Watanabe T., Otsuka R. 1992.** Effects of layer charge, charge location, and energy change on expansion properties of dioctahedral smectites. *Clays and Clay Minerals*, 40: 103 113.
- Shroeder P.A. 2002.** Infrared spectroscopy in clay science. Pp 181-206 in: *CMS workshop lecture, vol. 11, Teaching Clay Science* (A. Rule & S. Guggenheim editors.), The Clay Mineral Society, Aurora, CO.
- Sigg J. 1991.** Les produits de terre cuites, SEPTIMA, Paris, 423p.
- Tabani P. (1999).** Transfert hydrique dans des sols déformables, *Thèse Doctorat*, Institut National Polytechnique de Lorraine, ENSG, Nancy, 173 pp.
- Thibault P.M. & Le Berre P.1985.** Les argiles pour brique. BRGM. 1985. CRMO 65 ; MIMEE, Yaoundé Cameroun.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Thorez J. 1976.** Practical Identification of Clay Minerals. Ed. G. Lelotte, Dison, 190p.
- Thorez J. 2003.** L'argile, minéral pluriel. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*. Vol. 72, 1, 19-70. v. 48, p. 42-61.
- Thorez, J, 1986.** Physico-chemical studies of the structure of the solid supports: X-Ray studies. In: P. Laszlo (ED.) Preparative chemistry Using supported Reagents. Academic Press, New-York, 177-189.
- Van der Marel H.W., Khroner P. 1969.** OH stretching vibrations in kaolinite and related minerals. *Cong. Miner.Petrol.*, 22, p73-82.
- Van Jaarsveld, J., Van Deventer, J., Lukey, G., 2002.** The effect of composition and temperature on the properties of fly ash-and kaolinite-based geopolymers. *Chem. Eng. J.* 89, 63-73.
- Velde B., 1978.** Infrared spectra of synthetic micas in the series muscovite-Mg Al celadonite. *Am. Mineral.* 63, 343-349.
- Velde B. 1995.** Origin and mineralogy of clays. *Clays and the environment*. Springer, 427p.
- Velde B., 1995.** Composition and Mineralogy of Clay Minerals, Origin and Mineralogy of Clays, *Clays and Environment*: Berlin, Springer, p. 8 – 41.
- Velde B. & Meunier A., 2008.** The origin of clay minerals. Pp. 406, in: soils and weathered rocks. Heidelberg.
- Viani A., Gualtieri, A., and Artioli, G., 2002,** The nature of disorder in montmorillonite by simulation of X-ray powder patterns, Note: Structural simulation model *American Mineralogist* v. 87, p. 966-975.
- Vila J.M, 1969.** Relations paléogéographiques et structurales entre le Flysch de Penthièvre et les unités de dorsale Kabyle dans la région d'Azzaba (Nord du Constantinois, Algérie), *Bull, Serv, Géol, Fr.*, 7^{ème} série, Tome XI. 554 pages.
- Vila J.M, 1980.** La chaîne Alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens. Thèse de Doctorat d'état, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France, 665 pages.
- Vila J.M., 1974.** Le rocher de Constantine : stratigraphie, microfaunes et position structurale. *B.S.H.N. Afr. Nord* 65, fasc. 1-2, p. 385-392, 1 fig., 7 pl. Alger.
- Vila J.M., 1978.** La nappe néritique constantinoise : un élément majeure de la chaîne alpine d'Algérie orientale. 6^{ème} Réun. Ann. Sc. Terre, Orsay, p. 404, 1 fig.
- Vila J.M., 1980.** La chaîne Alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens. Thèse de Doctorat d'état, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France, 665p, 199 Fig., 40pl.
- Weavers, C.E. 1989.** Clays, Muds, and shales. Amsterdam: Elsevier, 819 pp.
- Xu Y.F., Matsuoka H., Sun D.A. (2003).** Swelling characteristics of fractal-textured bentonite and its mixtures, *Applied Clay Science*, vol. 22, pp. 197-209.
- Yong R.N. (1999).** Overview of modeling of clay microstructure and interactions for prediction of waste isolation barrier performance, *Engineering Geology*, vol. 54, pp. 83-91.

ANNEXES

ANNEXES

ANNEXE 1 : REPORTAGE PHOTOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

ANNEXE 2 : POSITION DES ECHANTILLONS DANS LES DEUX TUNNELS

ANNEXE 3 : PHOTOS OBSERVEES PAR MEB

**ANNEXE 4 : CARACTERISATION GEOTECHNIQUE DES FORMATIONS
ARGILEUSES DANS LES DIFFERENTS SECTEURS**

ANNEXE 5 : ESSAI BI AXIAL

**ANNEXE 6 : LES SPECTRES DRX DES FORMATIONS ARGILEUSES DANS
DIFFERENTS SECTEUR**

ANNEXES

ANNEXES 1 : REPORTAGE PHOTOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE



Photo : alluvions et éboulis de pente



Photo : éboulis d'argiles rouges à verdâtres



Photo : cimetière Makassa, importante couche de terre végétale recouvre des dépôts colluvions-alluvions



Photo : des éboulis de pente à éléments gréseux avec une matrice argileuse, recouvrent les dépôts tertiaires.



Photo : des éboulis de pente à éléments gréseux avec une matrice argileuse.



Photo : petit déblai sur le flanc Est de la colline de Makassa, formée par des matériaux tertiaires.

ANNEXES



Photo : des formations alluvionnaires recouvrent, avec une épaisseur de 15 mètres le substrat créatique de nature calcaire.



Photo : passage de la route Makassa vers Bekouche. Le terrain est constitué par de matériau alluvial qui recouvre le substrat crétacique .



Photo : Oued El hammam est constitué par des matériaux alluviaux qui recouvrent les argilites vertes



Photo : des alluvions argilo -sableuses.



Photo : Détail de la terrasse de l'Oued el Kebir, composée par des argiles sablonneuses marron avec des canaux de gravillon fin calcaire sablonneux.



Photo : Numidien. Alternance de couches décimétriques de grès avec intercalations centimétriques d'argilites

ANNEXES



Photo : argiles altérées du numidien



Photo : matériaux argileux numidien altérés



Photo : argiles altérées du numidien



Photo : argiles altérées du numidien



Photo : argiles altérées du numidien



Photo : argiles alluvionnaires parfois sablonneuse

Photos de terrain de la zone de Mekassa-Ain Charchar

ANNEXES



Photo : argiles sablonneuses jaunâtres à tendance marron



Photos : sables jaunâtres qui constituent les matériaux de terrassement de l'oued Hammam



Photo : des argiles jaunâtres à tendance marron avec des niveaux sablonneux.



Photo : fin de la zone

Photos de la zone de Menzel El Abtal

ANNEXES



Photo : argiles marron à tendance noirâtre avec de rares niveaux sablonneux



Photo : argiles sablonneuses avec des galets



Photo : argiles et argiles sablonneuses avec des galets



Photo : argiles et argiles sablonneuses avec des galets

ANNEXES



Photo : argiles sablonneuses



Photo : argiles sablonneuses



Photo : sables argileux (Menzel Bendich)



Photo : argiles sablonneux

Photos de terrain de la zone de Azzaba

ANNEXES



Photo : les dépôts alluviaux de la rivière Fendek.



Photo : des argiles sablonneuses alluvionnaires.



Photo : Les alluvions d'oued Fendek



Photo : Des argiles sablonneuses rencontrées.



Photo : Argiles numidiennes vers l'usine de mercure.



Photo : les argiles alluvionnaires (photo orientée vers Annaba).

ANNEXES



Photo : Les argiles alluvionnaires



Photo : Les argiles sablonneuses alluvionnaires (photo orienté e vers Annaba).



Photo : Les argiles sablonneuses alluvionnaires.



Photo : Les argiles sablonneuses et des galets (colluvions).



Photo : Les argiles sablonneuses et des galets (colluvions).

ANNEXES



Photo : les argiles numidiennes et les colluvions



Photo : Vue de l'entrée du tunnel de Ras el Ma.



Photo : Vue de l'entrée du tunnel vers Annaba.



Photo : Sortie du tunnel de Ras el Ma.



Photo : Vue entre les deux tunnels (photo vers Annaba).



Photo : Entée du tunnel de Guessaba.

ANNEXES



Photo : Sortie du tunnel de Guessaba.



Photo : Les grès numidiens.



Photo : Début de viaduc



Photo : Fin du viaduc argiles alluvionnaires de Guessaba.



Photo : argiles alluvionnaires photo orientée vers Annaba.



Photo : Début du viaduc sur oued Guessaba.

ANNEXES



Photo : Fin du viaduc, un ensemble argilo-gréseux du numidien.



Photo : Les argiles numidiennes sous une couche importante de terre végétale.



Photo : Les argiles numidiennes sous une couche importante de terre végétale .



Photo : Les argiles numidiennes, (orientée vers Annaba),



Photo : Les argiles numidiennes.



Photo : Les argiles numidiennes avec quelques niveaux calcaires.

ANNEXES



Photo : des alluvions.



Photo : Les alluvions et des argiles numidiennes.



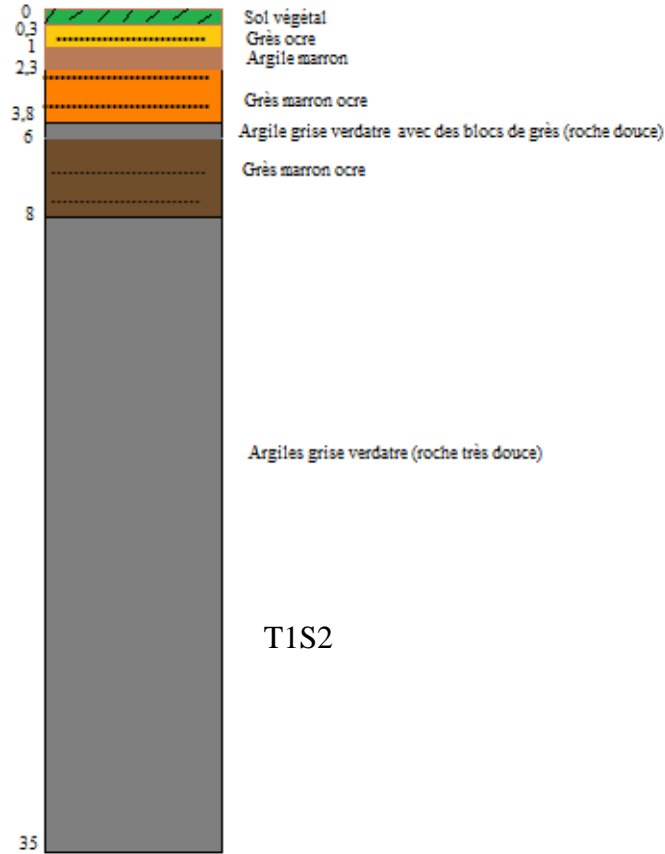
Photo : des argiles numidiennes.

ANNEXES

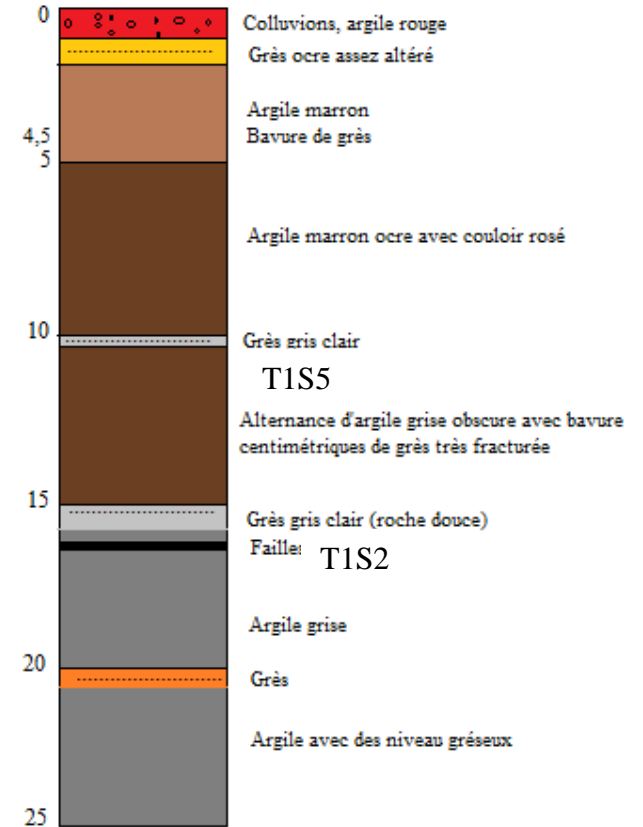
ANNEXE 2 : POSITION DES ECHANTILLONS DANS LES DEUX TUNNELS



Sondage 1 Tunnel 1

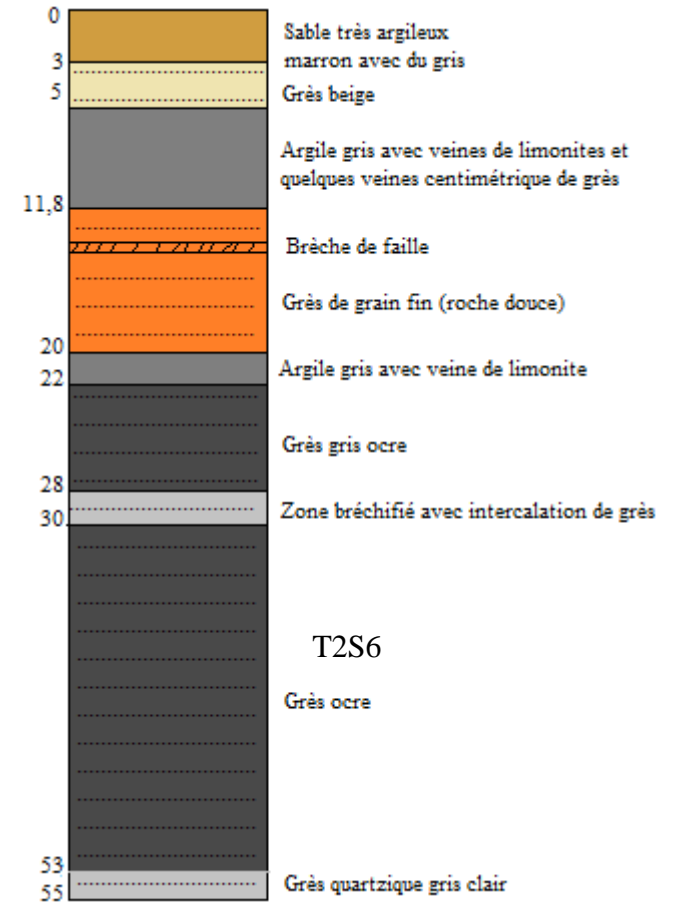
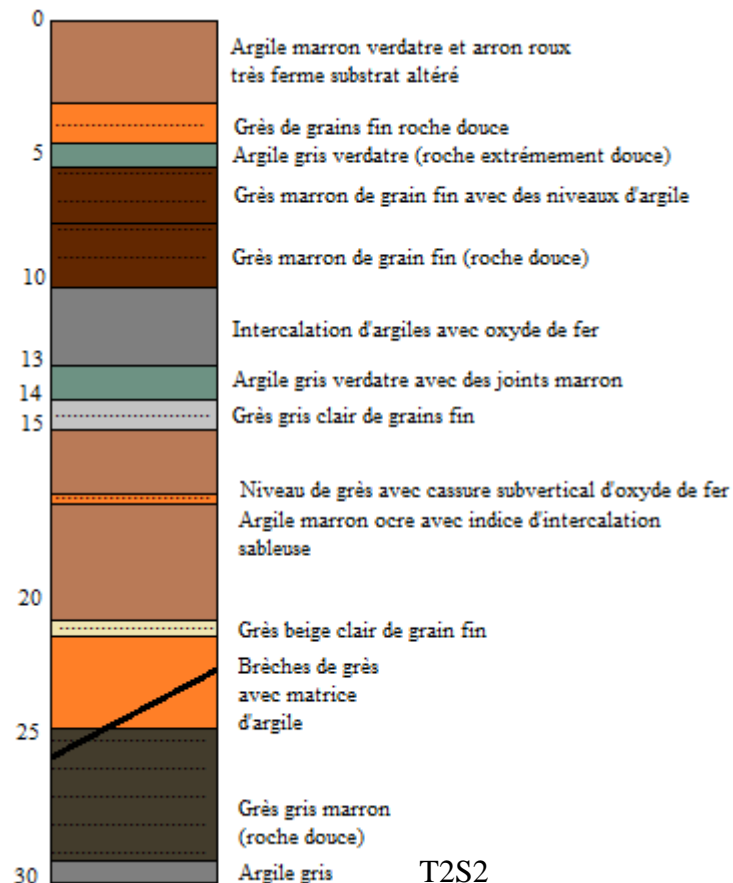
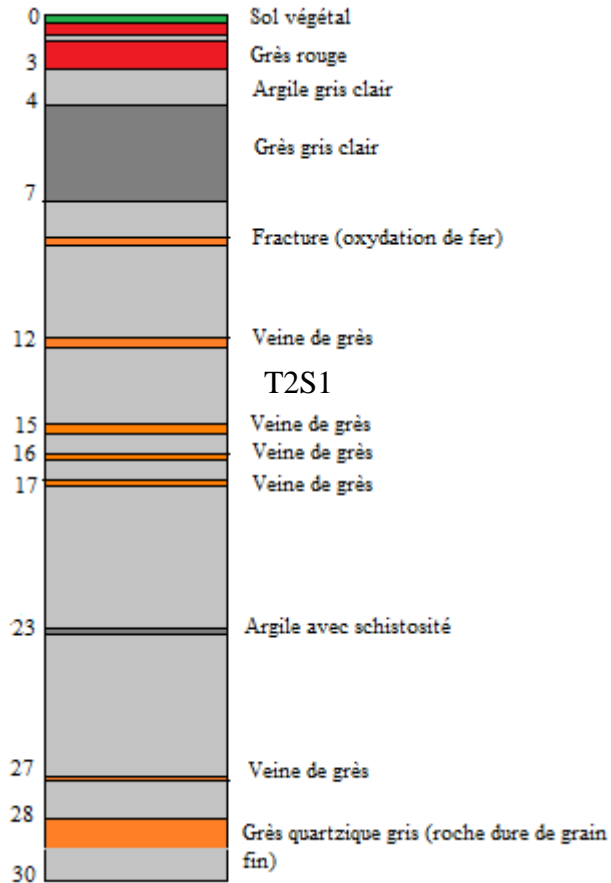


Sondage 2 Tunnel 1



Sondage 5 Tunnel 1

ANNEXES

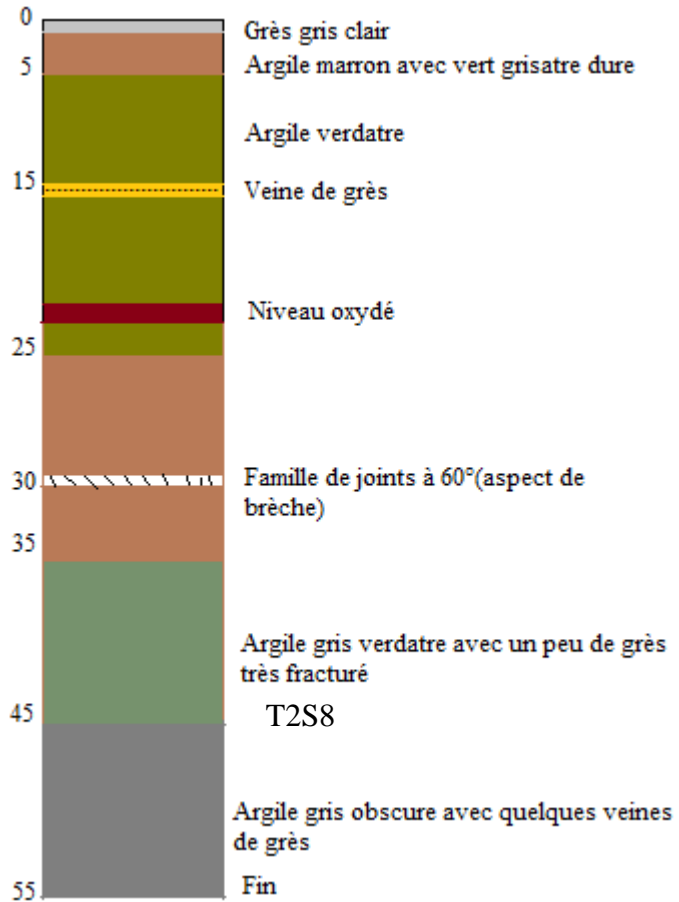


Sondage 1 Tunnel 2

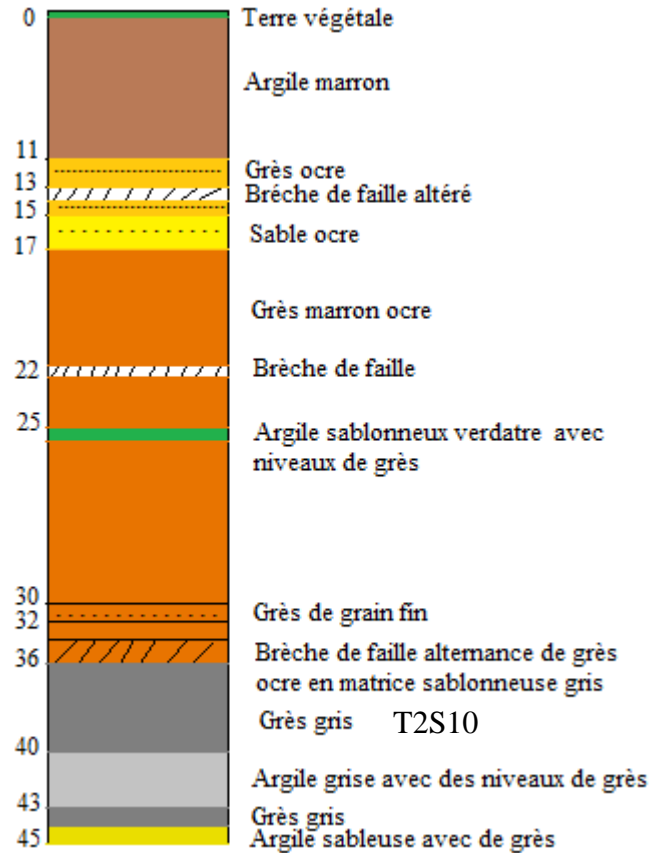
Sondage 2 Tunnel 2

Sondage 6 Tunnel 2

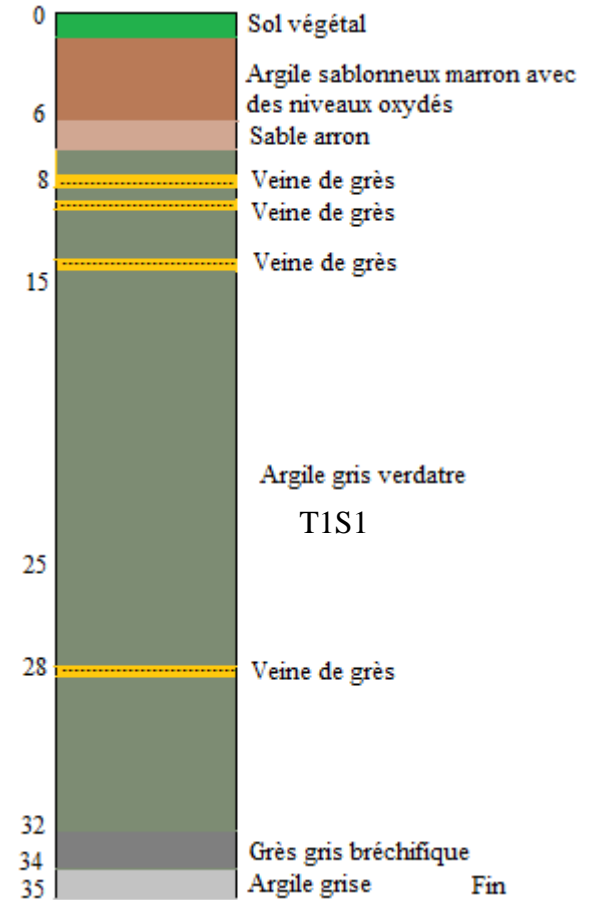
ANNEXES



Sondage 8 Tunnel 2

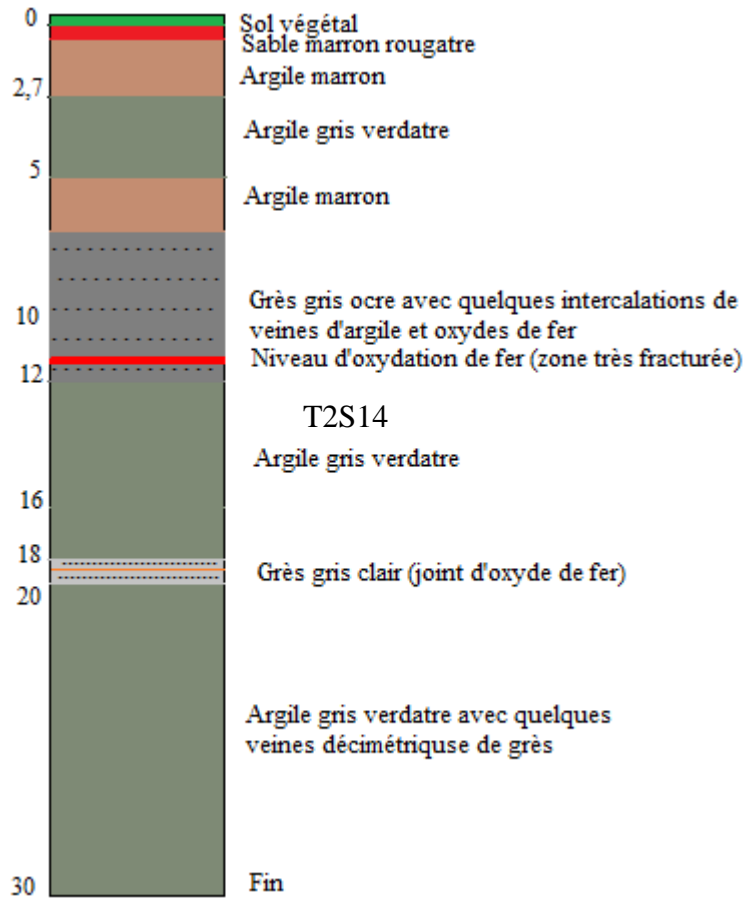


Sondage 10 Tunnel 2

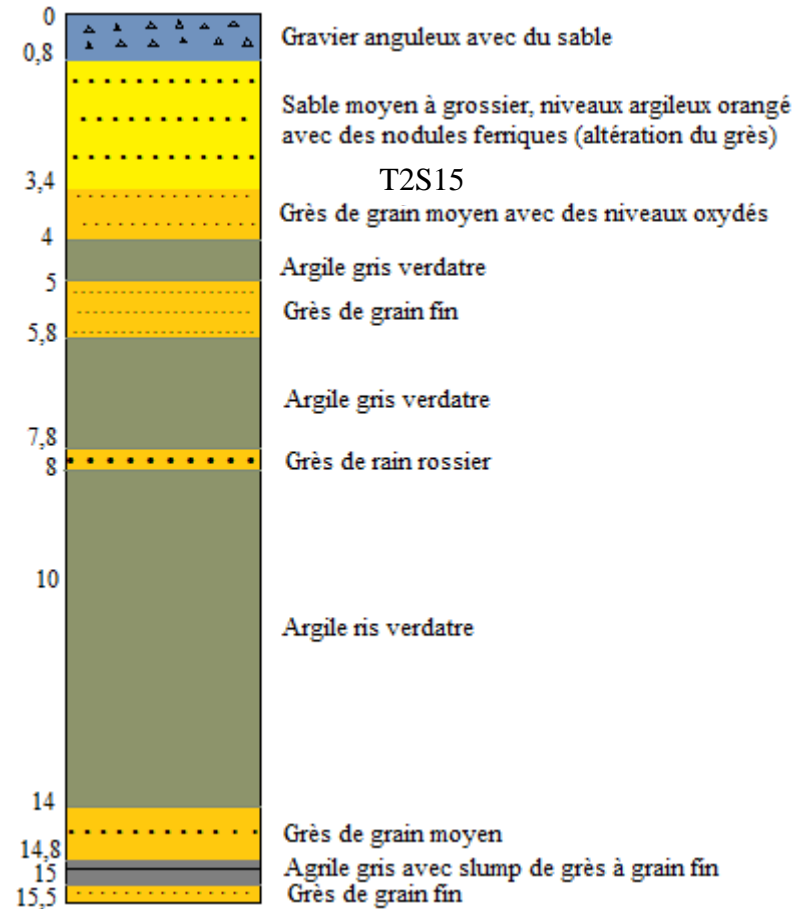


Sondage 13 Tunnel 2

ANNEXES



Sondage 14 Tunnel 2



Sondage 15 Tunnel 2

ANNEXES

ANNEXE 3 : PHOTOS OBSERVEES PAR MEB

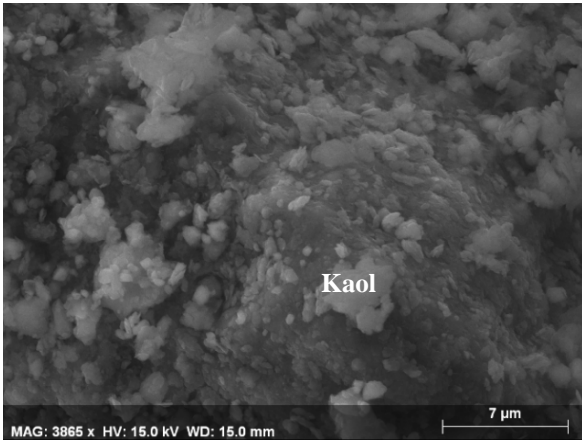


Photo : photo MEB de l'échantillon prélevé du tunnel 1 Ras El Mâa sondage 1 (T1S1)



Photo : photo MEB de l'échantillon prélevé du tunnel 1 Ras El Mâa sondage 1 (T1S1)

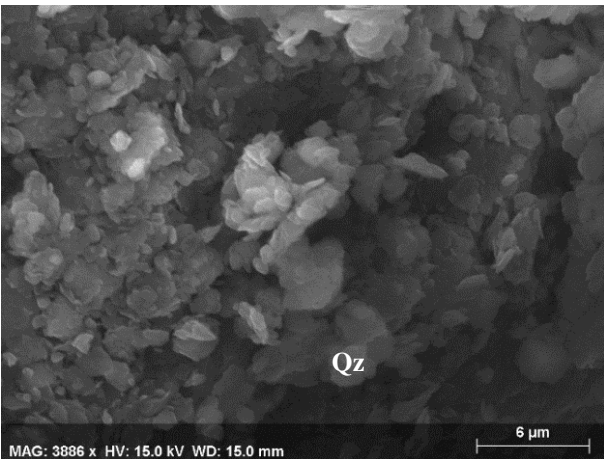


Photo : photo MEB de l'échantillon prélevé du tunne2 Guessaba sondage 8 (T2S8)



Photo : photo MEB de l'échantillon prélevé du tunne2 Guessaba sondage 13 (T2S13)

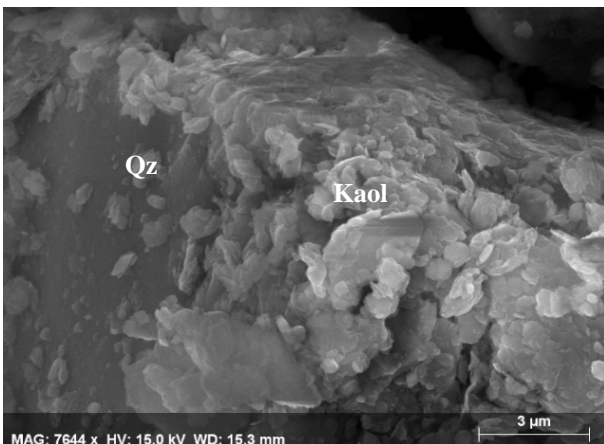


Photo : photo MEB de l'échantillon prélevé du tunne2 Guessaba sondage 13 (T2S13)

ANNEXES

ANNEXE 4 : CARACTERISATION GEOTECHNIQUE DES FORMATIONS ARGILEUSES DANS LES DIFFERENTS SECTEURS



C.I.F. B-81542581

OFICINAS
c/ Sánchez Pinedo nº 5 - 1º
28039 Madrid
TÉ: 913117103 - Fax: 914594730

LABORATORIO
Polígono Industrial Los Linares
c/ Pico Almaraz nº 30
28970 Humanes (Madrid)
TÉ: 914982637 - Fax: 914982638

e-mail: ggeotec@yahoo.es

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PAR TAMISAGE À SEC APRÈS LAVAGE

Conformément à la norme NF 94-056

TITRE DE L' ETUDE	MODERNISATION DE LA LIGNE ANNABA-RAMDANE DJAMEL	CLIENT	O.H.L.
EMPLACEMENT	ANNABA-RAMDANE DJAMEL	ADRESSE	C/ GOBELAS, 35-37. EL PLANTÍO. - MADRID-
SONDAGE	SVH 84+060	REFERENCE	6707060
ECHANTILLON	Échantillon Paraffiné 36,16-30,25 m	DATE	FÉVRIER 2008

COURBE GRANULOMETRIQUE

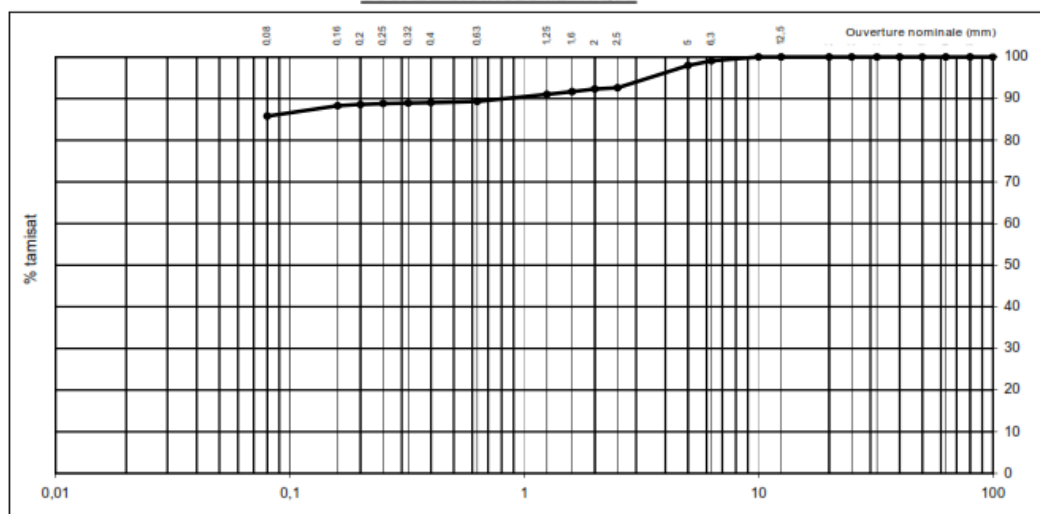


TABLEAU DES POURCENTAGES

TAMIS d mm	PASSANT %	TAMIS d mm	PASSANT %
100	100,0	1,6	91,7
80	100,0	1,25	91,0
63	100,0	0,63	89,3
50	100,0	0,4	89,1
40	100,0	0,32	88,9
32	100,0	0,25	88,8
25	100,0	0,2	88,6
20	100,0	0,16	88,3
12,5	100,0	0,08	85,8
10	100,0		
6,3	99,1		
5	98,0		
2,5	92,6		
2	92,3		

TEMPERATURE D' ÉTUVAGE (°C): 80

OBSERVATIONS:

OPÉRATEUR Steluta Garjan TECHNICIEN RESPONSABLE Nuria Gómez García

ANNEXES

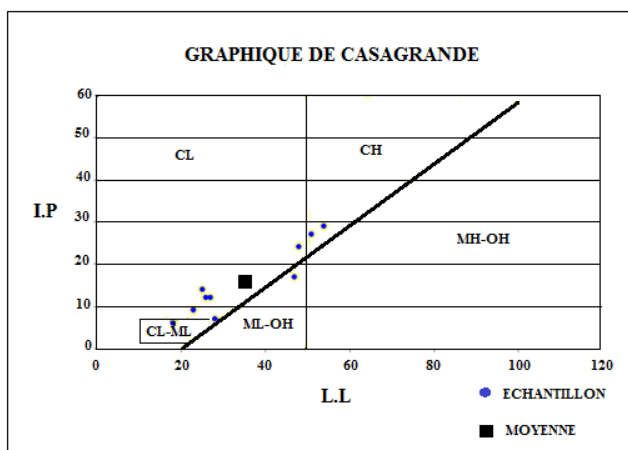


Figure : Diagramme de Casagrande pour les argiles numidiennes d'Ain Charchar

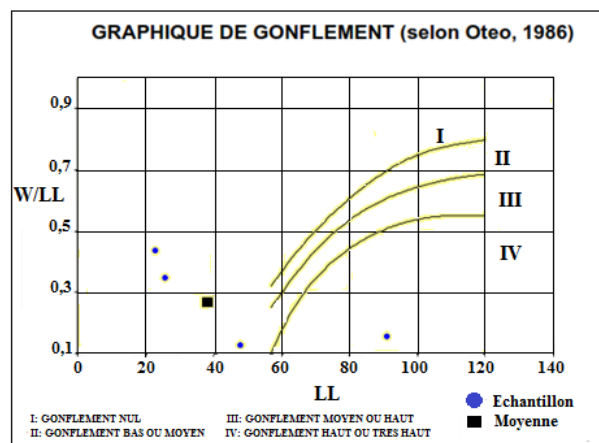


Figure : Graphique de gonflement pour les argiles numidiennes d'Ain Charchar

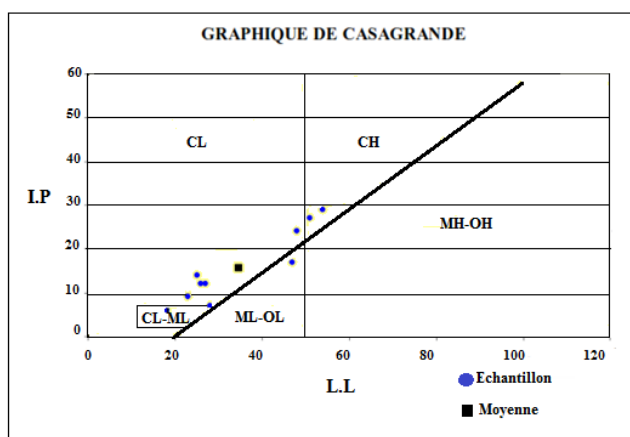


Figure : Diagramme de Casagrande pour les argiles sous numidiennes d'Azzaba

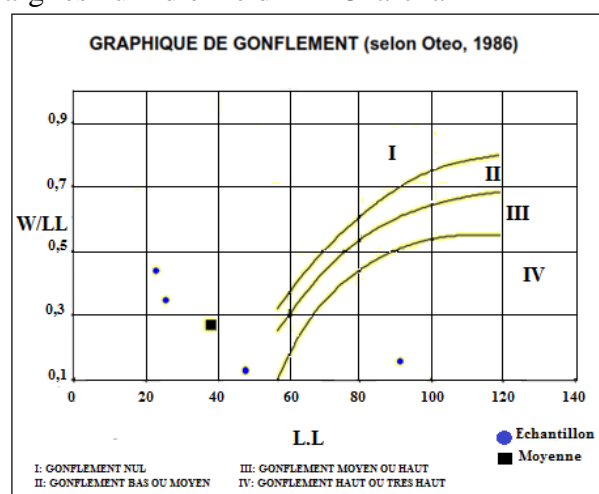


Figure : Graphique de gonflement pour les argiles sous numidiennes d'Azzaba

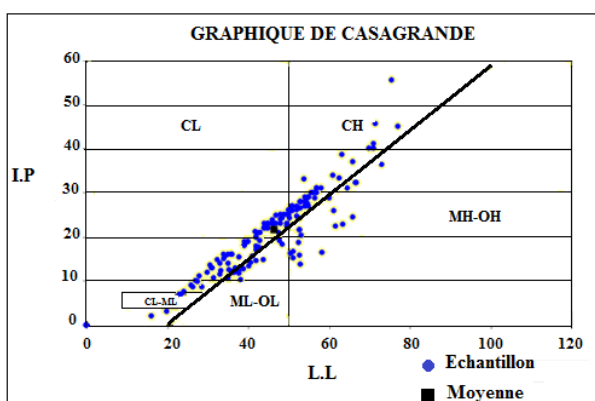


Figure : Diagramme de Casagrande pour les argiles sous numidiennes de Guessaba

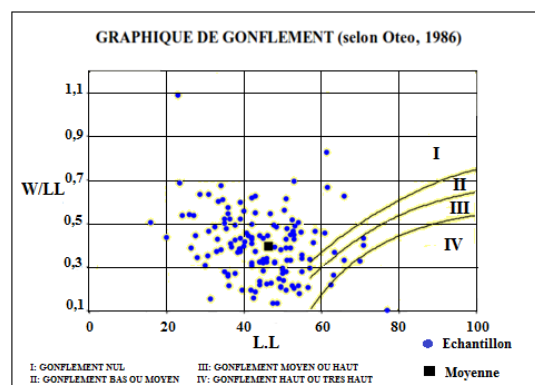


Figure : Graphique de gonflement pour les argiles sous numidiennes de Guessaba

ANNEXES

ANNEXE 5 : ESSAI BI AXIAL

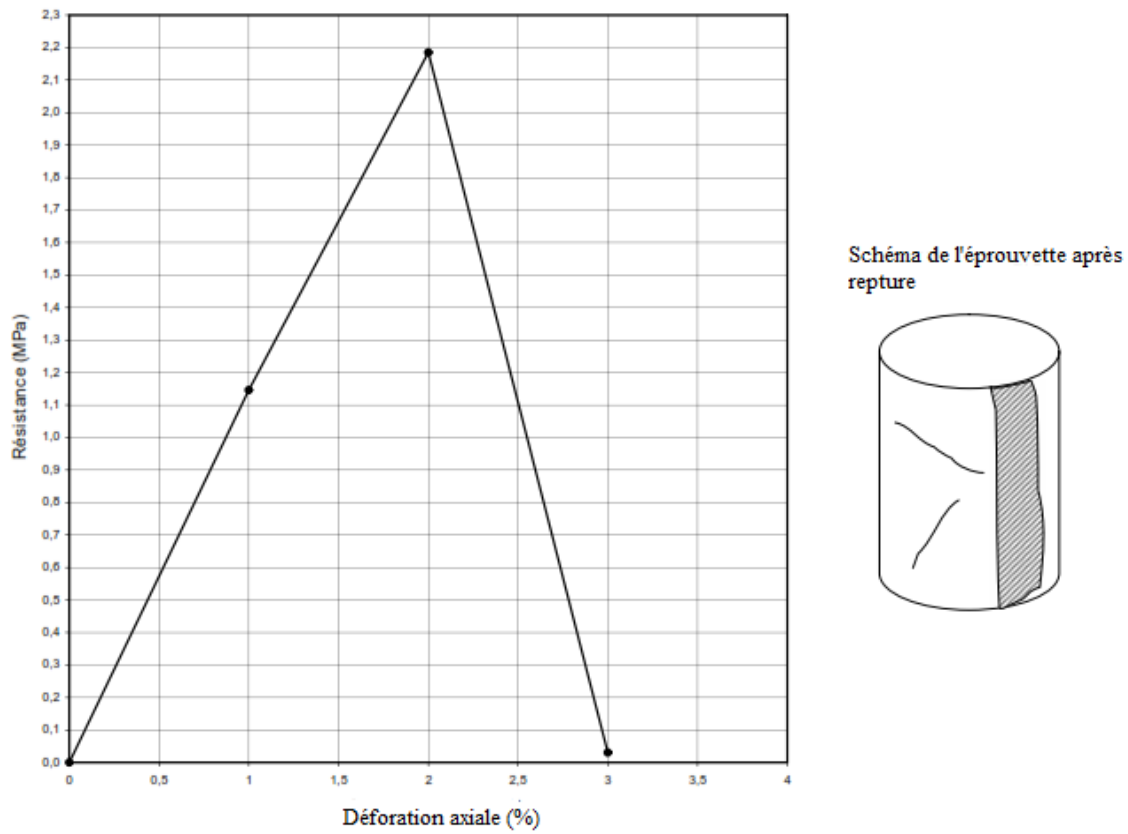


Figure : Exemple de essai de compression uni axiale T2S10

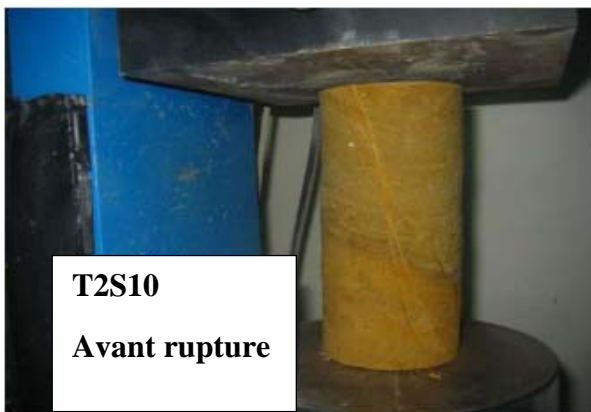


Photo : essai bi axial (échantillon avant rupture) Photo : essai bi axial (échantillon après rupture)

ANNEXES

Tableau : Essais de compression simple des formations géologiques dans les tunnels

Sondage	Tunnel	Echantillon (Profondeur)		Essais mécaniques		
		Début	Fin	Formation	Compression simple	
					qu (KPa)	qu (Kg/cm ²)
Sondage 1	Ras El Mâa	4	4,5	argiles sous numidienne	5	0,05
		8,3	8,7	argiles sous numidienne		
		9,1	9,4	argiles sous numidienne	142	1,42
		14,5	14,9	argiles sous numidienne	1066	10,66
		17,5	17,6	argiles sous numidienne	2174	21,74
		21,3	21,5	argiles sous numidienne		
Sondage 2	Ras El Mâa	1,5	2	argiles sous numidienne	105	1,05
		3,5	3,9	argiles sous numidienne	268	2,68
		4,5	4,9	argiles sous numidienne	433	4,33
		7,2	7,4	argiles sous numidienne	1039	10,39
		8,8	9	argiles sous numidienne		
		11,9	12,2	argiles sous numidienne	3543	35,43
Sondage 3	Ras El Mâa	1,6	2	Grès numidien	28	0,28
		2,5	3	Grès numidien	7000	70,00
		6,3	6,61	Grès numidien	12480	124,80
		11,2	11,5	argiles sous numidienne	420	4,20
		18,4	19	argiles sous numidienne	94	0,94
		23	23,5	argiles sous numidienne	590	5,90
		25	25,5	argiles sous numidienne	490	4,90
		31	31,4	argiles sous numidienne	392	3,92
		34,6	34,8	argiles sous numidienne	1200	12,00
Sondage 4	Ras El Mâa	4,5	4,6	argiles sous numidienne	183	1,83
		5,92	6,15	Grès numidien	1132	11,32
		9,53	9,8	Grès numidien	6610	66,10
		13,3	13,7	argiles sous numidienne	2319	23,19
		17,3	17,6	Grès numidien	3050	30,50
		24,5	24,6	Grès numidien	38310	383,10
Sondage 5	Ras El Mâa	27,4	27,6	Grès numidien	8100	81,00
		3,0	3,2	argiles sous numidienne	318	3,18
		7,7	8,1	argiles sous numidienne	103	1,03
		10,5	10,7	argiles sous numidienne		
		15,9	16,2	argiles sous numidienne	6250	62,50
		16,9	17,1	argiles sous numidienne	20620	206,20
Sondage 6	Ras El Mâa	19,8	20,1	argiles sous numidienne	314	3,14
		2,65	3	Grès numidien	122	1,22
		4	4,5	Grès numidien	53	0,53
		6,56	7	Grès numidien	94	0,94
		11,3	11,8	argiles sous numidienne	2031	20,31
		17,0	17,5	argiles sous numidienne	489	4,89
	19,7	20,0	argiles sous numidienne	1191	11,91	

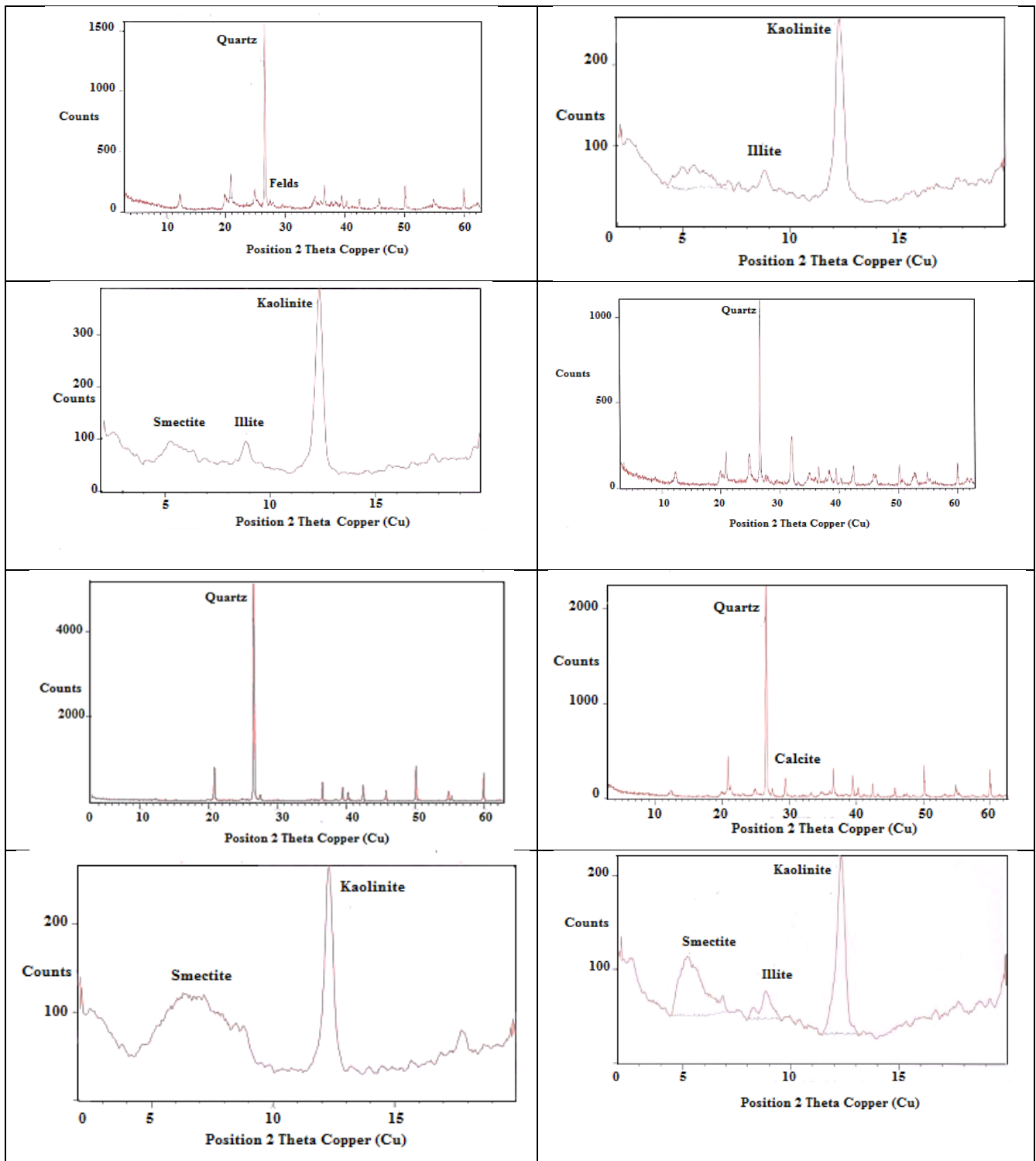
ANNEXES

Suite

Sondage	Tunnel	Echantillon (Profondeur)		Essais mécaniques		
		Début	Fin	Formation	Compression simple	
					qu (KPa)	qu (Kg/cm ²)
Sondage 1	Guessaba	14,5	14,8	Grès numidien	6820	68,20
		20,8	21,1	argiles sous numidienne		
		23,8	24	Grès numidien	4720	47,29
		29,1	29,3	Brèche	9180	91,80
		39,8	40,1	Grès numidien		0,00
		44,3	44,5	Grès numidien		0,00
		48,2	48,4	Grès numidien		0,00
		48,2	48,5	Grès numidien	1130	11,30
Sondage 2	Guessaba	5,3	5,6	argiles sous numidienne	35	0,35
		10,0	10,3	argiles sous numidienne	84	0,84
		28,8	29,2	Grès numidien	24650	246,50
		36,6	37,1	Faille	7270	72,70
		40,6	41	Faille	2150	21,50
		53,7	53,9	argiles sous numidienne	41720	417,20
Sondage 3	Guessaba	10,3	10,6	Argiles sous numidienne	57	0,57
		24,6	24,8	Faille	4530	45,30
		30,2	30,3	Grès numidien	5080	50,80
		36,2	36,4	Faille	535	5,35
		42,2	42,6	Faille	2185	21,85
		44,7	45	Faille		0,00

ANNEXES

ANNEXE 6 : LES SPECTRES DRX DES FORMATIONS ARGILEUSES DANS DIFFERENTS SECTEUR



ANNEXES

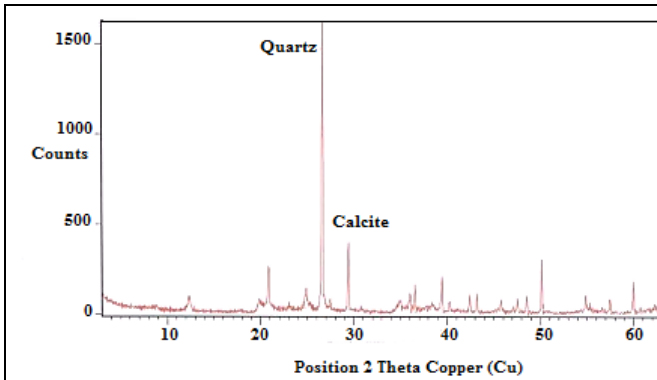


Figure : spectre DRX de la poudre (échantillon prélevé du tunnel Ras El Mâa, sondage 10 : T2S10)

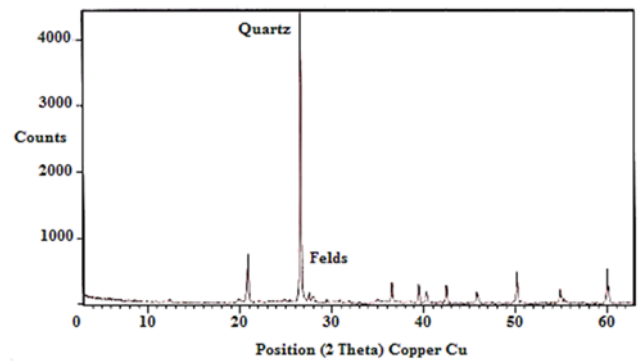


Figure : spectre DRX de la poudre (échantillon prélevé du tunnel Ras El Mâa, sondage 13 : T2S13)

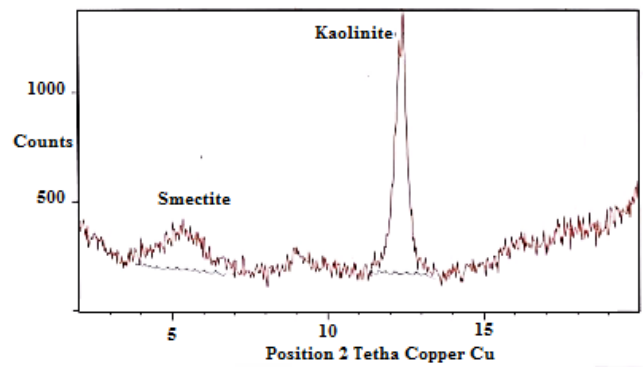
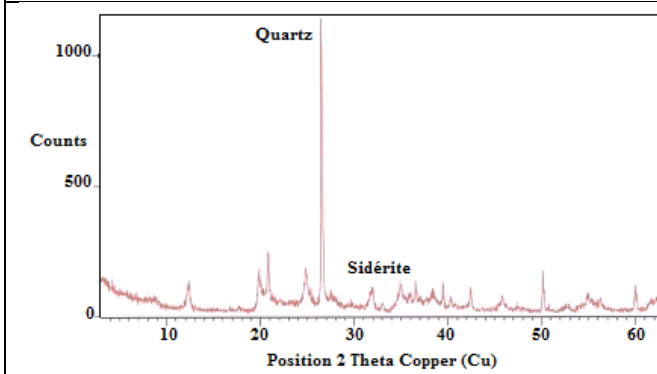


Figure : spectre DRX de la fraction argileuse (échantillon prélevé du tunnel Ras El Mâa, sondage 13 : T2S14)

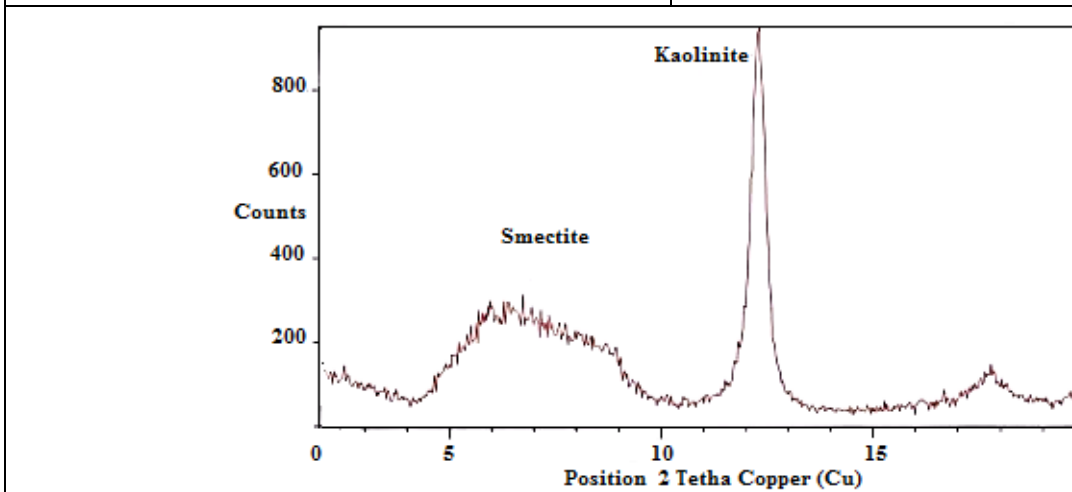


Figure : spectre DRX de la fraction argileuse (échantillon prélevé du tunnel Ras El Mâa, sondage 13 : T2S13)