



Université Kasdi Merbah Ouargla

N° d'ordre :
N° de série :

**FACULTE DES SCIENCES
ET SCIENCES DE L'INGENIEUR**

DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCÉDES

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Spécialité : Génie des Procédés

Option : Génie Chimique

Par : **Harrat Mohamed**

Thème

**Contribution à l'amélioration du procédé de
fabrication de la céramique
Etude sur site : unité Maghreb céramique de
Touggourt**

Soutenu publiquement le : 31/ 01/ 2007 devant le jury composé de :

Dendougui Houcine	Maître de conférences	Université de Ouargla	Président
Bebba Ahmed Abdelhafid	Maître de conférences	Université de Ouargla	Examineur
Benzaoui Ahmed	Maître de conférences	Université de USTHB	Examineur
Bouчекима Bachir	Professeur	Université de Ouargla	Rapporteur
Moad Moncef	Ingénieur d'état	U . M . C . T	Invité

REMERCIEMENTS

J'adresse ma profonde gratitude à Mr : BOUCHÉKIMA Bachir, professeur à l'Université Kasdi Merbah Ouargla, qui a dirigé ce travail de recherche et qui m'a permis de mener à bon terme ce mémoire.

Je remercie Monsieur DENDOUGUI Houcine Maître de conférences de l'Université Kasdi Merbah Ouargla qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire, qu'il trouve ici l'assurance de ma respectueuse gratitude.

Je remercie également, Monsieur : BEBBA Ahmed Abdelalfid Maître de conférences de l'Université Kasdi Merbah Ouargla, et Monsieur : BENZAOUI Ahmed Maître de conférences à l'Université USTHB ALGER d'avoir accepté d'examiner ce travail.

A tous les responsables de l'université de Ouargla enseignants et administrateurs, je leur exprime ma profonde gratitude, et leur grande générosité tout au long de ma formation en post-graduation.

Je remercie chaleureusement tous les responsables de l'unité Maghreb céramique de Touggourt, ainsi, tous les agents et les techniciens travaillant dans cette unité spécialement Mr Zennou houcine, de ses aides et soutiens morales et matières.

Je tiens à exprimer mes plus vives reconnaissances à Mohamed Kamel Gueddouda, chargé de cours à l'Université Amar Thlidji Laghouat, avec qui j'ai travaillé tout au long de ce mémoire. J'y ai pu profiter de ses connaissances scientifiques, de ses conseils éclairés et apprécier de sa constante disponibilité et sa grande qualité humaine.

Je remercie pareillement l'ensemble des membres du laboratoire de génie civil de l'Université Amar Thlidji Laghouat que j'ai côtoyés quotidiennement, notamment A ZIRGUE chargé de cours à l'Université Amar Thlidji Laghouat.

Mes plus sincères remerciements vont aussi à B.HElifa, chargé de cours à l'Université Amar Thlidji Laghouat, de m'avoir initié à l'utilisation de rayon X au laboratoire de physique département de technologie, qui m'a favorablement aidé par ces conseils et ces orientations très précieuses.

Je ne saurais oublier tous les responsables du département de Génie civil, Technologie et Chimie industrielle de l'université de Laghouat de m'avoir facilité l'accès aux différents laboratoires.

Mes pensées vont également à toute ma famille et particulièrement À mes parents pour leur soutien et leur encouragement permanent

Enfin Je remercie aussi mes amis pour leur soutien moral et leur encouragement à suivre mes études, ainsi tous ce qui contribuent à la réalisation de cet mémoire.

liste des symboles

Al^{+3}	: Ion d'aluminium
A_1	: Activité d'après Skempton
A_2	: Activité d'après Seed et al
AG	: Argile de Gare Aomar
Al_2O_3	: Oxyde d'aluminium
C	: Paramètre de cohésion
C_2	: Pourcentage des éléments inférieur à deux microns (%)
Ca^{++}	: Ion de calcium
C_d	: Indice de correction due au defloculant
C.E.C	: Capacité d'échange cationique (meq/100g)
C_m	: Correction due au ménisque
C_t	: Correction due à la variation de température au cours de l'essai.
D	: Diamètre (m)
g	: Pesanteur (m/s^2)
G	: Potentiel de gonflement
H_2O	: Eau
H_r	: Hauteur (m)
I_p	: Indice de plasticité
K^+	: Ion de potassium
Mg^{+2}	: Ion de magnésium
\mathcal{N}	: Nombre d'Avogadro
Na^+	: Ion de sodium
O^{-2}	: Ion d'oxygène
Si^{+4}	: Ion de silicium
SiO_2	: Oxyde de silicone
Sst	: Surface spécifique totale (m^2/g)
t	: Temps (s)
TG	: Argile de Touggourt
TM	: Argile de Timgad
T-O	: Tétraédrique- octaédrique

T-O-T : Tétraédrique- octaédrique- Tétraédrique

T-O-T-O : Tétraédrique- octaédrique- Tétraédrique- octaédrique

U : Vitesse (m/s)

V_B : Volume (ml)

w : Teneur en eau (%)

w_L : Limite de liquidité (%)

w_P : Limite de plasticité (%)

OH : Hydroxydes

Fe^{+2} : Ion de fer

τ : Contrainte tangentielle (bar)

σ : Contrainte normale (bar)

φ : Angle de frottement

γ_s : Poids spécifique du solide (Kg/m^3)

γ_w : Poids spécifique d'eau (Kg/m^3)

η : Viscosité (poiseuilles)

listes des figures

Figure I.1 : Représentation d'un plan compact	06
Figure I.2 : Représentation d'un plan hexagonal	07
Figure I.3 : Couches tétraédriques et octaédriques	08
Figure I.4 : Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile	08
Figure I.5 : Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite	09
Figure I.6 : Vue isométrique de la structure atomique de l'illite	10
Figure I.7 : Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite	11
Figure I.8 : Forme des particules argileuses	13
Figure I.9 : Surface des particules argileuses: interne et externe	15
Figure I.10 : Conséquence du gonflement des argiles dans la déstructuration d'un sol	16
Figure I.11 : Abaque pour identification des sols gonflants	20
Figure I-12 : Mécanismes de gonflement des argiles par hydratation	24
Figure I.13 : Courbe du gonflement en fonction du temps	25
Figure I.14 : Critère de rupture de Mohr	26
Figure I.15 : Représentation graphique de l'équation de résistance au cisaillement de Coulomb	27
Figure I.16 : Profils de chauffe pour la production d'argiles pour la construction	29
Figure I.17 : Argiles réfractaires	33
FigureII.1:Eprouvette de mesure avant et après introduction du densimètre	42
Figure II.2 : Coupe transversale de l'appareil de cisaillement direct	48
Figure III.1 : Analyse minéralogique des argiles	54
Figure III.2 : Analyse minéralogique des argiles cuites.....	56
Figure III.3 : Schéma synoptique du processus opératoire de l'essai du bleu à la tâche	58
Figure III.4 : Courbes granulométriques des trois sols	59
Figure III.5 : Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande	61
Figure III.6 : Analyse minéralogique des matériaux non plastiques	63
Figure III.7 : Analyse minéralogique des carreaux céramiques	65
Figure III.8 : Evolution du gonflement en fonction du temps	67
Figure III.9 : Courbes intrinsèques pour les argiles	68

Listes de tableaux

Tableau I.1: Principales caractéristiques minéralogiques des argiles	12
Tableau I.2: Surface spécifique des particules argileuses	14
Tableau I.3: Classification des argiles selon leurs propriétés de gonflement	17
Tableau I.4: Capacité d'échange de cations (C.E.C) et surface spécifique totale (Sst) de quelques argiles	18
Tableau I.5 : Activité de différents minéraux	19
Tableau I.6 : Principales utilisations des kaolins, «Ball Clay» et bentonites	31
Tableau I.7: Compositions de mélanges de matières premières utilisées en technologie de céramique	34
Tableau II.1 : Evaluation du potentiel de gonflement à partir de l'indice de plasticité	44
Tableau II.2 : Degré d'expansion en fonction de limite de liquidité et d'indice de plasticité	45
Tableau II.3 : Vitesses des essais de cisaillement	48
Tableau III.1 : Analyse chimique des argiles	57
Tableau III.2 : Résultats de l'essai au bleu de méthylène et surface spécifique totale	58
Tableau III.3: Pourcentage des particules < 2 μ	59
Tableau III.4 : Paramètres physiques des argiles étudiées	60
Tableau III.5 : Présentation des résultats portés sur le diagramme de Casagrande	60
Tableau III.6 : Activités des argiles étudiées	61
Tableau III.7 : Nature des sols d'après la classification de Skempton	62
Tableau III.8 : Analyse chimique des matériaux non plastiques	64
Tableau III.9 : Classification du potentiel de gonflement selon un seul paramètre	66
Tableau III.10 : Classification du potentiel de gonflement selon deux paramètres	66
Tableau III.11 : Paramètres de résistance aux cisaillements des argiles	68

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	01
------------------------------------	----

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I. 1. MINERALOGIE ET PROPRIETES DES ARGILES	05
I. 1. 1. Généralités et définitions	05
I. 1. 2. Minéralogie des argiles	05
I. 1. 2. 1. Minéraux argileux	05
I. 1. 2. 2. Structure des argiles	05
I. 1. 2. 3. Principales catégories des minéraux argileux	09
I. 1. 3. Propriétés des argiles	13
I. 1. 3. 1. Forme et surface spécifique	13
I. 1. 3. 2. Degré d'hydratation	15
I. 1. 3. 3. Capacité d'échange cationique	18
I. 1. 3. 4. Activité des argiles	18
I. 2. PHENOMENE DU GONFLEMENT	21
I. 2. 1. Introduction	21
I. 2. 2. Mécanisme du gonflement	21
I. 2. 2. 1. Composantes mécaniques du gonflement	21
I. 2. 2. 2. Composantes physico-chimiques du gonflement	21
I. 2. 3. Description du phénomène de gonflement	22
I. 3. RESISTANCE DE CISAILLEMENT	26
I. 3. 1. Généralités et définitions	26
I. 3. 2. Critère de rupture de Mohr-Coulomb	26
I. 3. 3. Paramètres de résistance de cisaillement pour les sols saturés	28
I. 4. COMPORTEMENT THERMIQUE	29
I. 4. 1. Introduction	29
I. 4. 2. Modification minéralogique lors du chauffage	29
I. 4. 3. Analyse thermique différentielle(ATD)	30
I. 4. 4. Analyse thermo gravimétrique (ATG).....	30
I. 5. ARGILE ET INDUSTRIE	31
I. 5. 1. Introduction	31
I. 5. 2. Kaolin et bentonites	31
I. 5. 3. Argiles pour la construction	32
I. 5. 4. Matériaux réfractaires	33
I. 5. 5. Composition des pâtes céramiques	34

I. 6. LES MATIERES PREMIERES DURES (OU MATERIAUX NON PLASTIQUES)	36
I. 6. 1. Introduction	36
I. 6. 2. Rôle des dégraissants et des fondants	36
I. 6. 2. 1. Les dégraissants	36
I. 6. 2. 2. Les matériaux fondants	37
I. 6. 3. Les principaux matériaux non plastiques utilisés dans la fabrication des céramiques	37
I. 6. 3. 1. Les rebuts de cuisson	37
I. 6. 3. 2. Les feldspaths	37

CHAPITRE II

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

II. 1. INTRODUCTION	39
II. 2. CARACTERISATION CHIMIQUE	39
II. 2. 1. Diffraction des rayons X	39
II. 2. 2. Spectrométrie d'émission atomique (SEA)	40
II. 2. 3. Essai au bleu de méthylène	40
II. 3. CARACTERISATION PHYSIQUE	41
II. 3. 1. Analyse granulométrique des sols	41
II. 3. 2. Limites d'Atterberg	42
II. 3. 2. 1. Limite de liquidité	43
II. 3. 2. 2. Limite de plasticité	43
II. 4. CARACTERISATION MECANIQUE	44
II. 4. 1. Mesure du potentiel de gonflement	44
II. 4. 1. 1. Mesure indirecte du potentiel de gonflement	44
II. 4. 1. 2. Mesure directe du potentiel de gonflement	45
II. 4. 2. Essais de résistance de cisaillement	46
II. 4. 2. 1. Essais de cisaillement direct	46

CHAPITRE III

CARACTERISATION DES SOLS UTILISES

III. 1. INTRODUCTION	50
III. 2. CARACTERISATIONS DES MATERIAUX	50
III. 2. 1. Echantillonnage	50
III. 2. 1. 1. Argile	50
III. 2. 1. 2. Matière non plastique	50
III. 2. 1. 3. L'eau	50
III. 2. 2. Caractérisation physico-chimique des matériaux	50
III. 2. 2. 1. Les argiles	51
III. 2. 2. 2. Matériaux non plastiques	62
III. 2. 2. 3. Carreaux céramiques	64
III. 2. 3. Caractérisation mécanique	66
III. 2. 3. 1. Potentiel de gonflement	66
III. 2. 3. 2. Résistance au cisaillement	67
III. 3. CONCLUSION	69

CONCLUSION GENERALE	70
----------------------------------	----

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

Annexes I : Les courbes ATD de quelques échantillons d'argiles.....	I
Annexes II : Mesure indirecte du potentiel de gonflement.....	III
Annexes III : Appareils utilisés.....	IV
Annexes IV : Bulletin d'analyse chimique des eaux.....	VI

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

L'argile est une matière première utilisée depuis la haute antiquité. L'abondance naturelle et la disponibilité immédiate des argiles expliquent leurs grandes utilisations à travers les temps.

Au début du 18^{ème} siècle, le concept d'argile a été évalué à partir des premières analyses chimiques réalisées sur le Kaolin ; c'est juste au 20^{ème} siècle et grâce aux travaux effectués en diffraction de rayons X et en granulométrie que les chercheurs ont pu donner la définition correcte de l'argile.

De nos jours l'utilisation des argiles, notamment celles qui sont riches en SiO_2 et Al_2O_3 , connaît un nouvel essor dans la construction, dans la céramique industrielle et artisanale, dans l'industrie pharmaceutique et dans la poterie.

Les matériaux argileux constituent souvent des mélanges naturels complexes de minéraux dont la granulométrie et les propriétés physico-chimiques sont très variables.

Les critères de choix des utilisateurs sont moins liés à la composition chimique globale des matériaux argileux qu'à leurs comportements pendant les différentes étapes de la fabrication des produits céramiques.

Les minéraux argileux et les argiles sont étudiés dans de nombreux domaines tel que: céramique, agriculture.... Pour les géologues, les argiles apportent des informations sur les conditions environnementales (source, condition de formation, diagenèse ...). Les ingénieurs pétroliers, déduisent les conditions thermiques des gisements (degré de maturation), les ingénieurs civils, s'intéressent aux propriétés des argiles en tant que matière industrielle (réfractaires, matériaux de construction), tandis que les agronomes, analysent les propriétés d'hydratation et d'adsorption des argiles pour concevoir les fertilisants.

Quelque soit la discipline, la structure cristalline des argiles est importante, car elle est responsable des propriétés spécifiques du minéral.

On accuse souvent le séchage ou la cuisson d'être à l'origine du déchet observé à la sortie du four et beaucoup plus rarement à la préparation. Les causes d'une production médiocre sont pourtant nombreuses au niveau de la préparation:

- ❖ Un dosage irrégulier du mélange entraîne une dispersion des caractéristiques des produits finis, accompagnée de séquences de déchets anormaux.
- ❖ Une mauvaise homogénéisation du mélange provoque des fissures au séchage et donne des produits hétérogènes.
- ❖ Un dosage irrégulier de l'humidité rend impossible l'équilibrage de la filière, favorisant les fentes et déformations au séchage.

❖ Une mauvaise désaération de l'argile perturbe le séchage, diminue la cohésion des produits et modifie les propriétés des produits.

Donc, il ne faut pas négliger la phase de préparation si on désire avoir des produits de qualité. C'est pour cette raison que s'inscrit ce travail, basé sur la caractérisation et l'étude physico-chimique de la matière première (argile) utilisée au niveau de l'unité Maghreb céramique de Touggourt dans le but d'améliorer la qualité du produit (céramique) et de savoir si on peut intégrer cette argile locale dans le procédé de fabrication.

Ce travail est composé de deux volets et est structuré comme suit:

Le premier volet est une synthèse bibliographique qui comporte un chapitre, réparti comme suit:

- ❖ Les notions générales sur les argiles, tel que: la minéralogie et quelques propriétés physico-chimiques spécifiques.
- ❖ La présentation du gonflement: mécanisme et description du phénomène.
- ❖ Les notions sur la résistance aux cisaillements.
- ❖ Comportement thermique
- ❖ Les différents types d'argiles et leur utilisation.
- ❖ Les matériaux non plastiques

Le deuxième volet consiste en une étude expérimentale, répartie en deux chapitres:

- ❖ Chapitre deux : présentation des techniques expérimentales d'analyses.
- ❖ Chapitre trois : présentation des résultats caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques des sols étudiés, résultats et discussions.

Une conclusion générale résume les résultats obtenus lors de ce travail et des recommandations pour la suite du travail.

Chapitre I

Etude

Bibliographique

I.1 MINÉRALOGIE ET PROPRIÉTÉS DES ARGILES

I.1.1 Généralités et définition

Le terme argile vient du mot grec « argilos », dont la racine argos signifie blanc, ce sont des aluminosilicates dont la structure est formée d'un empilement de feuillets. Il n'existe pas de définition unique du terme « argile ». Ce mot englobe deux connotations, l'une liée à la taille des grains et l'autre à la minéralogie.

Cette définition dépend de la discipline concernée: Le géologue ou le pédologue considèrent comme « argile » tout minéral de faible granulométrie, la limite étant fixée à 2 ou 4 microns selon les cas. Les ingénieurs s'attachent plutôt aux propriétés de plasticité des matériaux argileux quelque soit leur taille. Les céramistes regroupent les matériaux selon leurs comportements au chauffage.

I.1.2 Minéralogie des argiles

Les minéraux argileux sont de très petites particules très actives sur le plan électrochimique. Lorsque le pourcentage d'argile augmente, l'influence de la portion argileuse sur le comportement global du sol augmente proportionnellement.

I.1.2.1 Minéraux argileux

Les minéraux argileux sont des substances cristallines qui tirent essentiellement leurs origine de l'altération chimique de certains minéraux composant les matériaux parents. La famille des minéraux argileux regroupe tous les silicates hydratés appartenant au groupe des phyllosilicates. Sur le plan chimique, ce sont des alumino-silicates hydreux ajoutés à d'autres ions métalliques (Holtz et al, 1991, [17]). Ils sont composés des particules de formes aplaties et de dimensions très petites qu'on ne peut voir qu'au microscope électronique, les cristaux ressemblent à de minces plaques ou plaquettes. Leurs formule chimique est de la forme suivante (cité par Hafsi, 1993, [15]):



I.1.2.2 Structure des argiles

Les particules d'argile sont formées d'un empilement de feuillets qui sont constitués par l'association de deux unités structurales de base, ces feuillets sont formés par la juxtaposition des couches structurales tétraédriques (silice) et octaédriques (aluminium).

Les couches structurales sont à leur tour formées d'unités structurales de base par empilement d'ions ou d'hydroxydes en disposition hexagonale ou compacte.

I.1.2.2.1 Dispositions des oxygènes

Il existe deux arrangements, l'un valable pour les ions oxygènes exclusivement, l'autre pour les ions oxygènes et les hydroxydes. Nous commençons par ce dernier qui, d'ailleurs est le plus simple, il s'agit de l'assemblage compact. On peut en première approximation considérer que les atomes ont la forme d'une sphère et sont en contact dans des plans successifs, ils sont disposés de telle façon que les centres de ces sphères se situent sur des droites parallèles entre elles, les sphères appartenant à deux rangs contigus sont décalées d'un rayon, les centres des deux sphères appartenant à une ligne voisine sont situés au sommet d'un triangle équilatéral (Figure I.1).

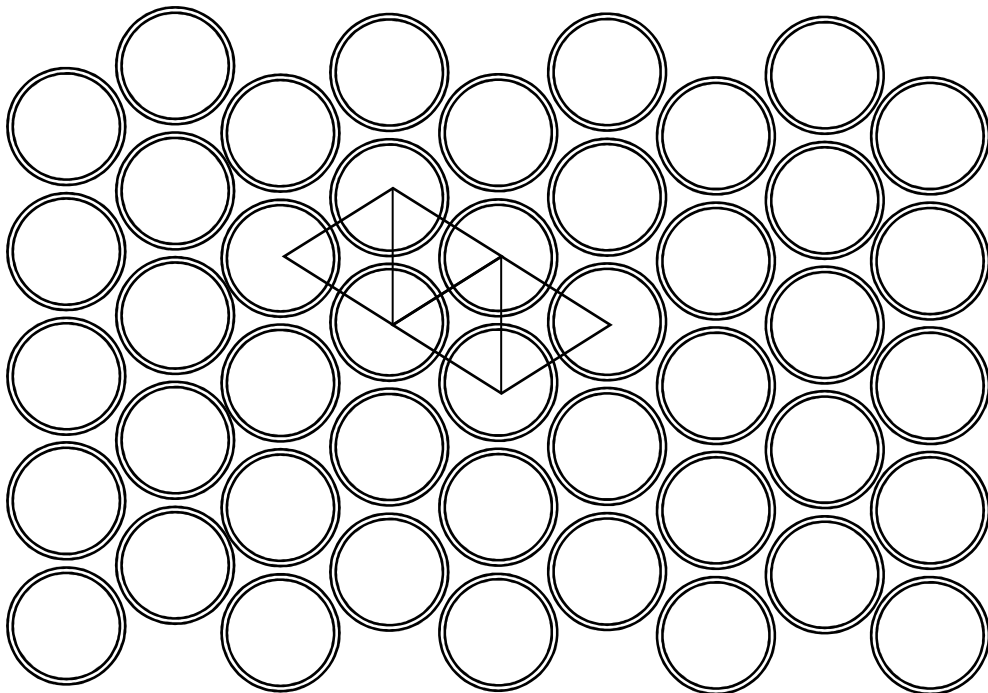


Figure I.1 : Représentation d'un plan compact, [4] [21]

Le 2^{ème} arrangement qui s'applique exclusivement aux ions oxygènes est obtenu à partir du précédent en retirant une sphère sur deux tous les deux rangs, comme on peut le constater, chaque cavité est limitée par 6 sphères, on pourrait y situer un hexagone, on l'appelle parfois un plan hexagonal (Figure I.2). En superposant un plan hexagonal et un plan compact on obtient des tétraèdres et si on dispose de deux plans compacts on forme un octaèdre.

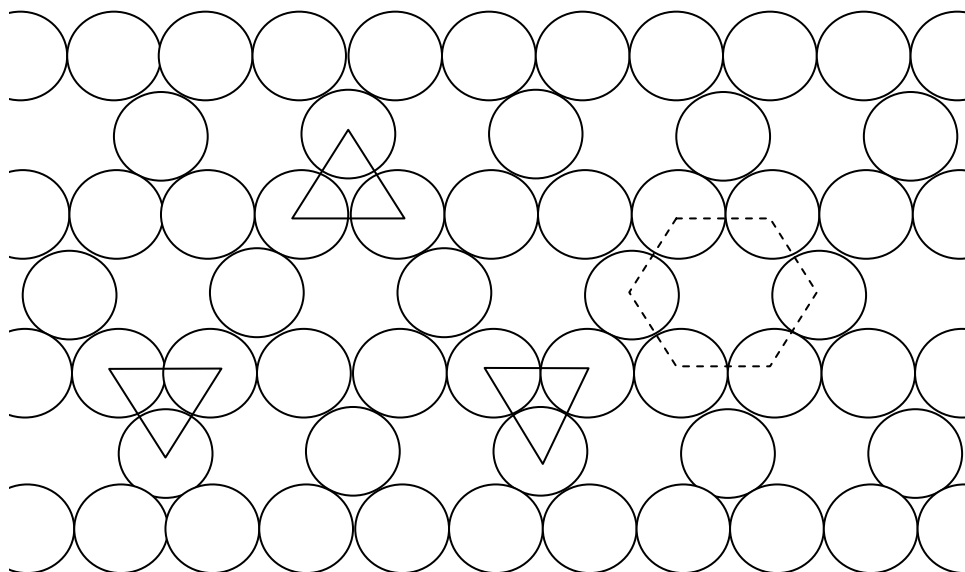


Figure I.2 : Représentation d'un plan hexagonal, [4] [21]

L'empilement des plans hexagonaux et des plans compacts, dont le nombre est constant et qui forme le feuillet est la base de la constitution de la structure des minéraux argileux. Il existe plusieurs grands groupes de minéraux argileux, parmi eux, trois sont définis par l'épaisseur de leurs feuillets, chacun correspondant à l'empilement d'un nombre variable de couches d'oxygènes et d'hydroxyles.

Les types à 7\AA sont formés de trois plans, un hexagonal et deux compacts, ils appartiennent à la série 1/1.

Les types à 10\AA constitués également par deux plans compacts et deux plans hexagonaux, ils appartiennent à la série 2/1.

Enfin, un groupe de minéraux de 14\AA est constitué par un ensemble de quatre plans d'hydroxyles compacts (deux couches tétraédriques et deux couches octaédriques). Cette classification est couramment utilisée.

I.1.2.2.2 Unité structurale tétraédrique

L'unité structurale tétraédrique est formée d'un tétraèdre au sommet duquel quatre ions d'oxygène (O^{2-}) enserrent un ion de silicium (Si^{4+}), équidistant de chacun d'eux. Ce tétraèdre est matérialisé par la présence d'une cavité comprise entre trois sphères en contact, d'une couche hexagonale d'oxygène, et une sphère de la couche contiguë d'oxygène. (Figure I.3.a).

I.1.2.2.3 Unité structurale octaédrique

L'unité structurale octaédrique est formée d'un octaèdre au centre duquel un ion d'aluminium (Al^{3+}) ou de magnésium (Mg^{2+}) est équidistant aux six hydroxydes (OH^-) aux sommets. Ces octaèdres se combinent pour former des couches planes dites couches octaédriques et la liaison avec la couche tétraédrique se fait au niveau des oxygènes. (Figure I.3.b).

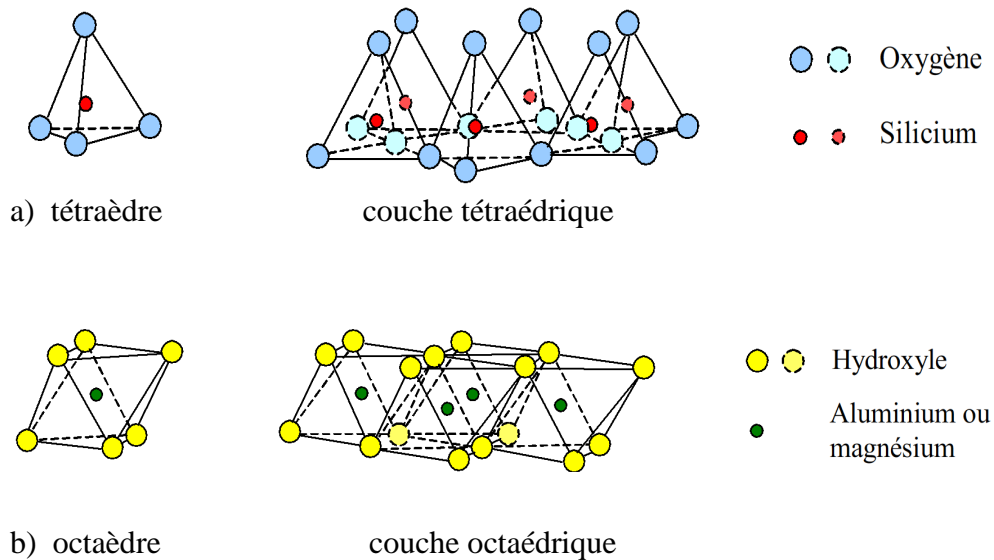


Figure I.3 : Couches tétraédriques et octaédriques, [7]

La représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile est donnée par l'organigramme suivant (Figure I.4) :

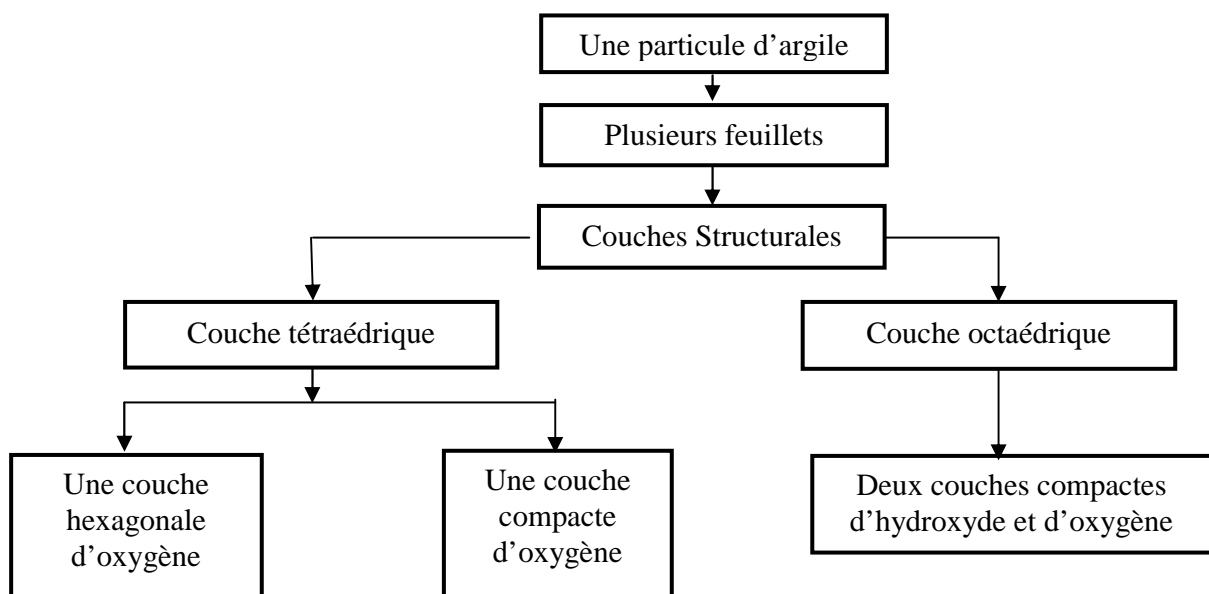


Figure I.4 : Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile, [17]

I.1.2.3 Les principales catégories des minéraux argileux

Il est possible de distinguer les types de minéraux argileux par :

- Le nombre de couches d'octaèdres et de tétraèdres dans le feuillet élémentaire (une ou deux).
- L'équidistance entre deux feuillets dans les conditions naturelles.
- La variabilité de l'équidistance entre deux feuillets sous l'action de traitements variés.

I.1.2.3.1 Les monophyllites

Elles sont constituées d'une seule catégorie de feuillets.

a) La famille de la kaolinite (T-O ou 1:1)

A une couche d'octaèdres et une couche de tétraèdres, l'épaisseur du feuillet élémentaire est de 7 Å. Ces feuillets élémentaires adhèrent assez fortement entre eux par leurs faces basales, des liaisons hydrogènes existant entre les oxhydroyles de la base d'un feuillet et les oxygènes du haut du feuillet en dessous. Il constitue ainsi une particule primaire (Mering et Oberlin, 1971), qui comprend de 70 à 100 feuillets accolés. L'halloysite résulte de l'adjonction des couches d'eau entre les feuillets, l'équidistance entre les feuillets hydratés est donc variable dans ce cas. La formule générale d'un feuillet de Kaolinite est donnée par la formule suivante (cité par Hafsi, 1993, [15]):

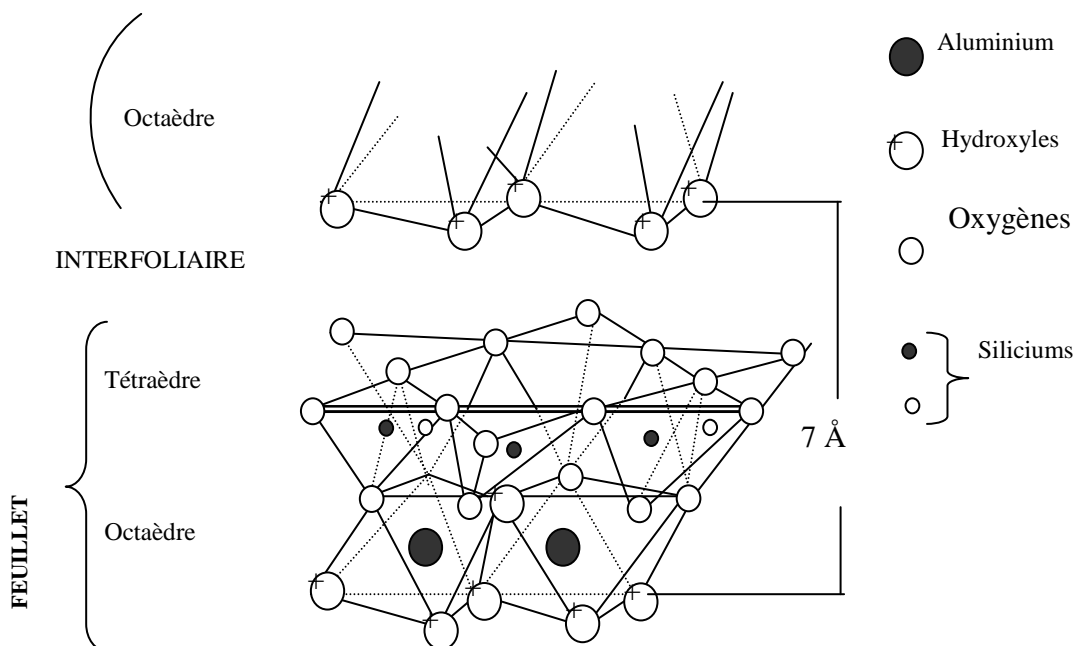
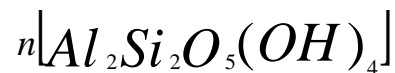


Figure I.5 : Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite [12]

b) Famille de l'illite (T-O-T ou 2:1) (argiles micacées, ou hydro micas)

A une couche d'octaèdre encadrée par deux couches tétraédriques, les feuillets d'équidistance 10 Å sont assez fortement liés les uns aux autres par des ions potassium(K^+), l'équidistance est donc constante. Les propriétés sont intermédiaires entre celles de la kaolinite et celles de la montmorillonite.

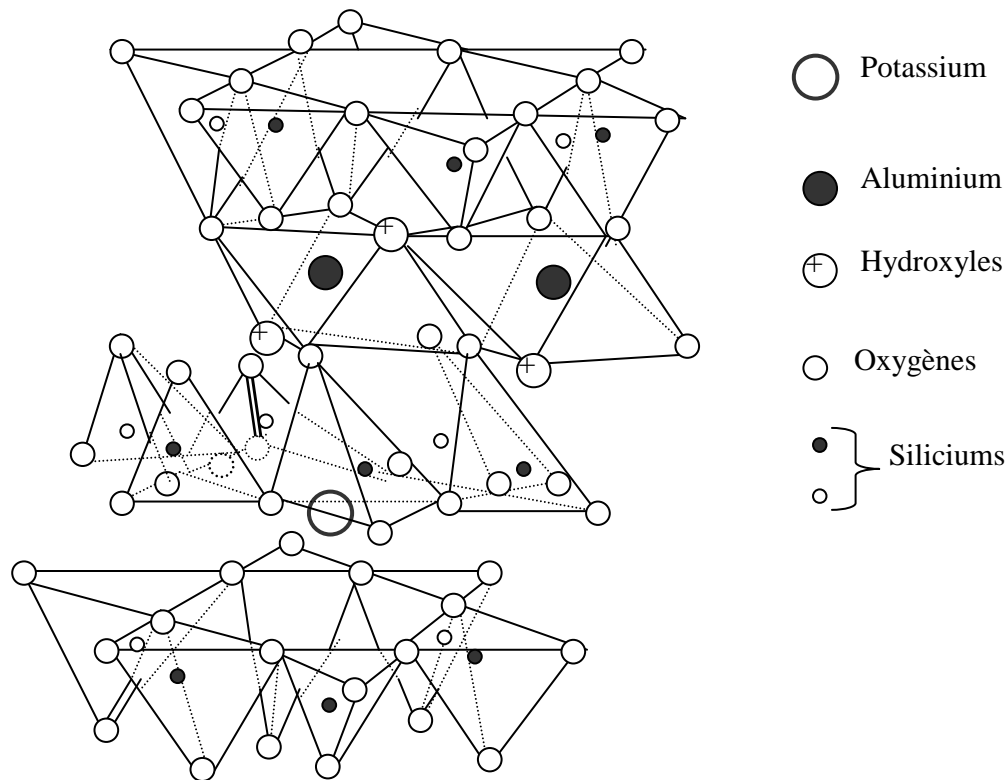
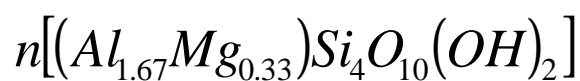


Figure I.6 : Vue isométrique de la structure atomique de l'illite (cité par Bengraa, 2004, [2])

c) Famille de la montmorillonite (T-O-T ou 2:1)

A une couche d'octaèdre encadrée par deux couches tétraédriques, les feuillets, épais de 10 Å, sont très faiblement liés les uns aux autres ; aussi des couches d'eau peuvent se fixer entre les feuillets, l'épaisseur de ces couches pouvant atteindre 9 Å. Ce matériau est donc gonflant. La montmorillonite peut exister sous la forme de cristaux isolés épais de 10 Å. Pour la vermiculite, l'absorption d'eau est limitée à 2 couches de molécules d'eau. La formule générale de la montmorillonite est la suivante (cité par Hafsi, 1993, [19]):



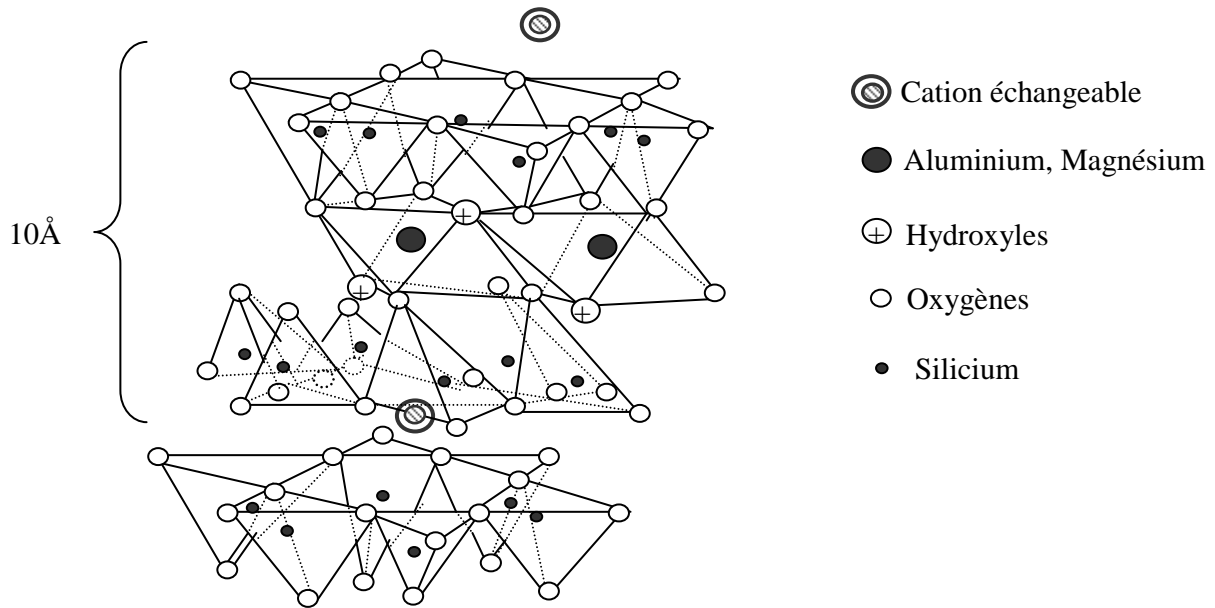


Figure I.7 : Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite [15]

d) Famille des chlorites (T-O-T-O ou 2:1:1)

A une couche d'octaèdre encadrée par deux couches tétraédriques et un inter feuillet constitué par une couche d'octaèdre ; les feuilles épaisses de 14 Å sont assez fortement liées entre elles pour les chlorites vraies. Les pseudo chlorites peuvent présenter des phénomènes de gonflement notables.

I.1.2.3.2 Les polyphillites (ou argiles inter stratifiées)

Elles sont composées de l'empilement de plusieurs catégories de feuillets, en général deux.

I.1.2.3.3 Les argiles fibreuses

Ces argiles se présentent sous forme de fibres et non de lamelles. Elles sont constituées de feuillets qui n'ont pas une extension infinie, d'où une architecture générale du type brique creuse. Ce groupe est représenté par les actapulgites et les palygorskites.

Tableau I.1: Principales caractéristiques minéralogiques des argiles (Pedro, 1965, [11])

	Constitution des feuillets T : couche tétraédrique O : couche octaédrique	Equidistance « a » (Å)	Liaison entre feuillets	Nombre de Feuillets dans une particule primaire	origine des charges négatives
ARGILES PHULLITEUSES					
1) Kaolinite dicrite nacrite		7 (stable)	Forte, par pont H	30 à 100	Liaisons rompues en bordures et substitution ionique
2) Halloysite		7 (variable)	Faible	-	
3) Illite Sericite Glauconite		10 (stable)	forte, par ion K	30	Substitution ionique dans le réseau, liaison rompue en bordure.
4) Montmorillonite		10 (variable)	faible	1 à 15	Substitution ionique, faible contribution des bordures.
Beidellite Hectorite Nontronite					
5) Chlorites vrais		14 (stable)	-	-	Substitution ionique, quelques liaisons rompues en bordure.
ARGILES FIBREUSES					
6) Palygorskite Attapulgite Spiolite					

I.1.3 Propriétés des argiles

Les minéraux argileux se caractérisent par quatre propriétés principales :

1. formes et surfaces spécifiques.
2. capacités d'adsorption d'eau et de gonflement.
3. multiples possibilités d'échanges cationiques.
4. activité des argiles

I.1.3.1 Forme et surface spécifique

Les argiles se présentent sous trois formes (Figure I.8) :

- ❖ en flocons, caractérisés par une même dimension dans les deux directions et une épaisseur équivalente à $1/20^{\text{ième}}$ de la longueur.
- ❖ en lattes, avec une dimension plus longue, épaisseur toujours équivalente à $1/20^{\text{ième}}$ de la longueur.
- ❖ en aiguilles, deux dimensions identiques et la $3^{\text{ième}}$ beaucoup plus grande (assez rare).

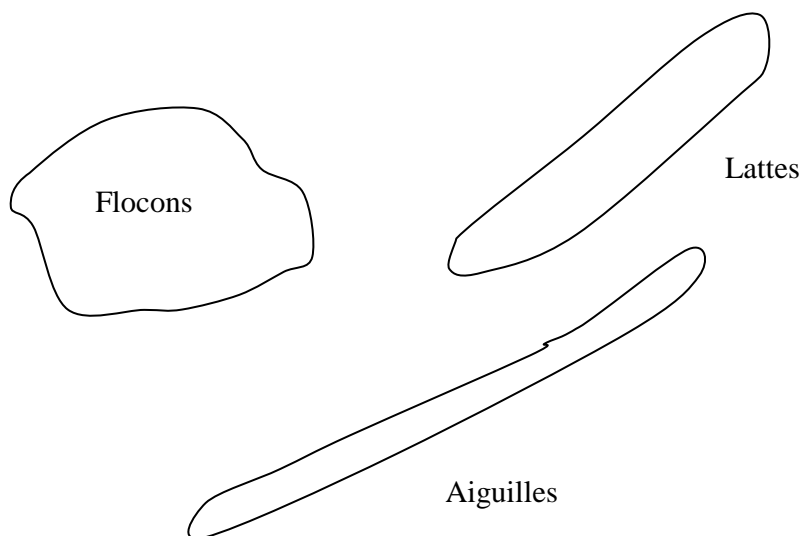


Figure I.8 : Forme des particules argileuses (Fagel, 2005, [20])

La fine taille des argiles leur confère une surface spécifique importante par rapport au volume des particules. La surface relative augmente avec la diminution du diamètre. La surface des argiles est supérieure à celle des minéraux de même taille mais de formes différentes. Le rapport épaisseur/largeur est de l'ordre de 20 pour les argiles. Les propriétés des argiles sont principalement contrôlées par leurs surfaces.

Les particules d'argiles présentent des surfaces spécifiques très importantes et peuvent de ce fait attirer un grand nombre de molécules d'eau et d'ions, et exercer entre elles d'importantes forces d'interactions. Ces forces influent amplement sur le comportement mécanique des argiles. L'intensité de la charge électrique est liée à la surface spécifique de la particule. Dans le cas des argiles, cette surface varie entre 10 à 20 m²/g et peut atteindre 800 m²/g dans le cas de la montmorillonite sodique. Warkentin et Bozozuk (1961), ont noté que le gonflement est d'autant plus fort que la surface spécifique de l'argile est grande.

Le tableau I.2 indique les valeurs caractéristiques des surfaces des grandes familles argileuses. La surface totale comprend la surface externe, comprise entre les particules argileuses, et la surface interne, correspondant à l'espace inter foliaire (Figure I.9). Les smectites ont les surfaces totales maximales: surface Smectites > Vermiculites >>> Illites > Kaolinites = Chlorites.

Tableau I.2: Surface spécifique des particules argileuses (Fagel, 2005, [20])

Argile	Surface spécifique (m ² /g)		
	Interne	Externe	Totale
Smectite	750	50	800
Vermiculite	750	<1	750
Illite	5	25	30
Kaolinite	0	15	15
Chlorite	0	15	15

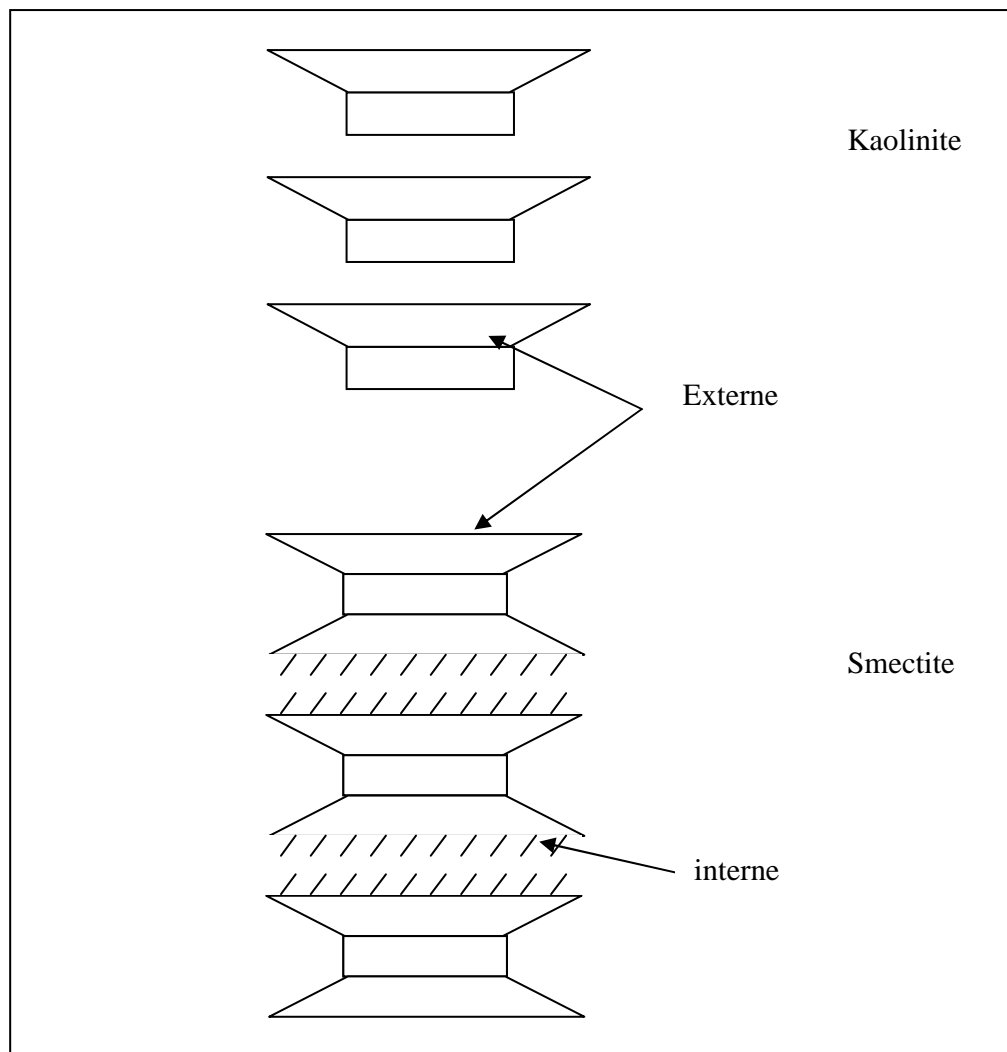


Figure I.9 : surface des particules argileuses: interne et externe (Fagel, 2005, [20])

I.1.3.2 Degré d'hydratation

Le degré d'hydratation varie d'une famille argileuse à une autre. Certains minéraux argileux ont la capacité d'incorporer dans leur structure des molécules d'eau. Cette eau modifie la dimension de la couche en provoquant son gonflement. Ces argiles sont appelées argiles gonflantes (Tableau I.3). Les smectites, vermiculites et minéraux interstratifiés offrent des capacités d'expansion beaucoup plus importantes que celles des autres espèces argileuses. L'incorporation d'eau est réversible à la pression atmosphérique et dépend de la température et de la pression de vapeur. Plus l'air est humide, plus l'argile pourra incorporer de l'eau (Fagel, 2005, [20]).

Les minéraux gonflants ont une structure de base à 10\AA . Selon l'hydratation, une couche d'eau de 2.5 ou 5.2\AA d'épaisseur se développe. Cette hydratation conduit à une augmentation de volume pouvant atteindre 95%. Notons qu'il existe des minéraux comprenant de l'eau adsorbée mais qui n'ont pas pour autant de propriétés de gonflement. Dans un climat à saisons contrastées la présence de smectites conduit à la déstructuration du sol: en hiver les smectites gonflent; en été les smectites se déshydratent et entraînent la formation de larges fissures (Figure I.10).

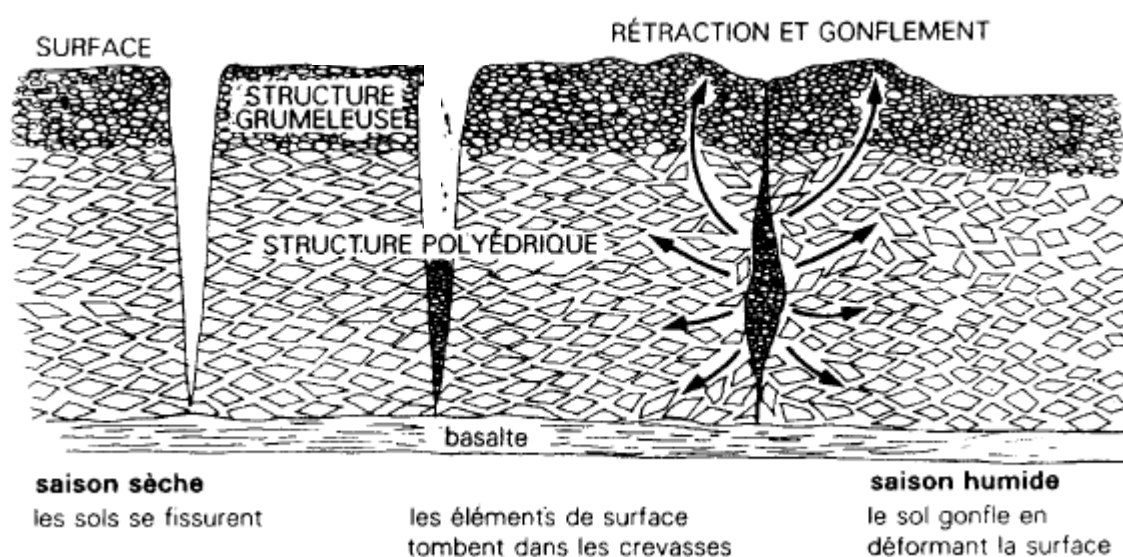


Figure I.10 : Conséquence du gonflement des argiles dans la déstructuration d'un sol (Fagel, 2005, [20]).

Tableau I.3: classification des argiles selon leurs propriétés de gonflement (Fagel, 2005, [20])

	Eléments dominants	Espacement (Å)	
		Glycol Sec	
TYPES CROISSANTS			
Smectites			
Beidellite	Al	17	10
Montmorillonite	Al (Mg, Fe ²⁺ minor)	17	10
Nontronite	Fe ³⁺	17	10
Saponite	Mg, Al	17	10
Vermiculite	Mg, Fe ²⁺ , Al (Fe ³⁺ minor)	15,5	10-12
Couche minérale composée		10-17	<10
TYPES NON CROISSANTS			
Illite	K, Al (Fe, Mg secondaire)	10	
Glauconite	K, Fe ²⁺ , Fe ³⁺	10	
Celadonite	K, Fe ²⁺ , Mg, Fe ³⁺ , Al ³⁺	10	
Chlorite	Mg, Fe, Al	14	
Berthiérine	Fe ²⁺ , Al ³⁺ (secondaire Mg)	7	
Kaolinite	Al	7	
Halloysite	Al	10,2	
Sepiolite	Mg, Al	12,4	
Palygorskite	Mg, Al	10.5	
Talc	Mg, Fe ²⁺	9,6	

I.1.3.3 Capacité d'échange cationique

Les liaisons entre les particules des sols formant les minéraux argileux sont influencées par la magnitude de la charge négative résiduelle des minéraux (dues aux substitutions isomorphiques) dans le réseau cristallin, de la concentration et de la distribution des cations disponibles pour équilibrer cette charge.

La capacité d'échange représente donc, la charge (sous forme de cations attirés à la surface de la particule) nécessaire pour l'électro-neutralité. La capacité d'échange cationique est exprimée en milliéquivalents par 100g d'argile.

Les mesures expérimentales de cette capacité d'échange effectuées pour la montmorillonite (Olphen, 1971) et pour la Kaolinite par (Samson, 1954) ont mis en évidence l'influence du pH de l'eau du sol sur cette propriété (cité par Hafsi, 1993).

Le tableau I.4 regroupe, les valeurs de surface spécifique et de la capacité d'échange des différentes familles d'argile pour une solution neutre (pH=7).

Tableau I.4: Capacité d'échange de cations (C.E.C) et surface spécifique totale (Sst) de quelques argiles

Argiles	C.E.C (meq/100gr)	Sst (m ² /g)
Montmorillonite Na ⁺	150	800
Montmorillonite Ca ⁺⁺	80	300
Illite	10-40	40-60
Kaolinite	3-15	5-20
Elément non argileux	-	1-3

I.1.3.4 Activité des argiles

Skempton (1953), a considéré que les valeurs des limites d'Atterberg sont liées à la quantité d'eau retenue à la surface des particules et donc à la quantité d'argile présente dans le sol. Cet auteur a défini l'activité d'une argile par le rapport de l'indice de plasticité (Ip) et du pourcentage des éléments inférieurs à deux microns (C₂<2 μm).

$$A_1 = I_p / C_2$$

- Skempton a proposé la nomenclature suivante ([24] C.208) :
- Argile inactives : les argiles qui ont une activité inférieure à 0,75. Ces argiles sont à base de Kaolinite, ou des argiles contenant peu de minéraux argileux.
 - Argile normale : qui ont une activité comprise entre 0,75 et 1,25.
 - Argile active : qui ont une activité comprise entre 1,25 et 2.
 - Argile très actives : qui ont une activité supérieure à 2.
- En ce qui concerne les argiles compactées, Seed et al (1962, [12]), a introduit une modification à la définition de Skempton sous la forme suivante :

$$A_2 = I_p / (C_2 - n)$$

$n = 5$ cas des sols naturels ; $n = 10$ cas des sols reconstitués

Le tableau I.5 présente le minéral prédominant dans la matrice argileuse basant sur l'activité, proposé par Skempton et al (1953).

L'activité d'un sol dépend essentiellement de sa composition minéralogique : le type et la quantité du minéral argileux, de la teneur d'argile et des ions échangeables (El Sohby et al 1986, [11]). Les deux définitions citées ci dessus indiquent que l'activité est proportionnelle à l'indice de plasticité et inversement proportionnelle à la teneur en éléments inférieurs à deux microns (Figure II.11).

Tableau I.5 : Activité de différents minéraux (Skempton, (1953) et Mitchell, (1976))

Minéral	Activité
Montmorillonite Na^+	4 - 7
Montmorillonite Ca^+	1,5
Illite	0,5 - 1,3
Kaolinite	0,3 - 0,5
Calcite	0,2
Quartz	0

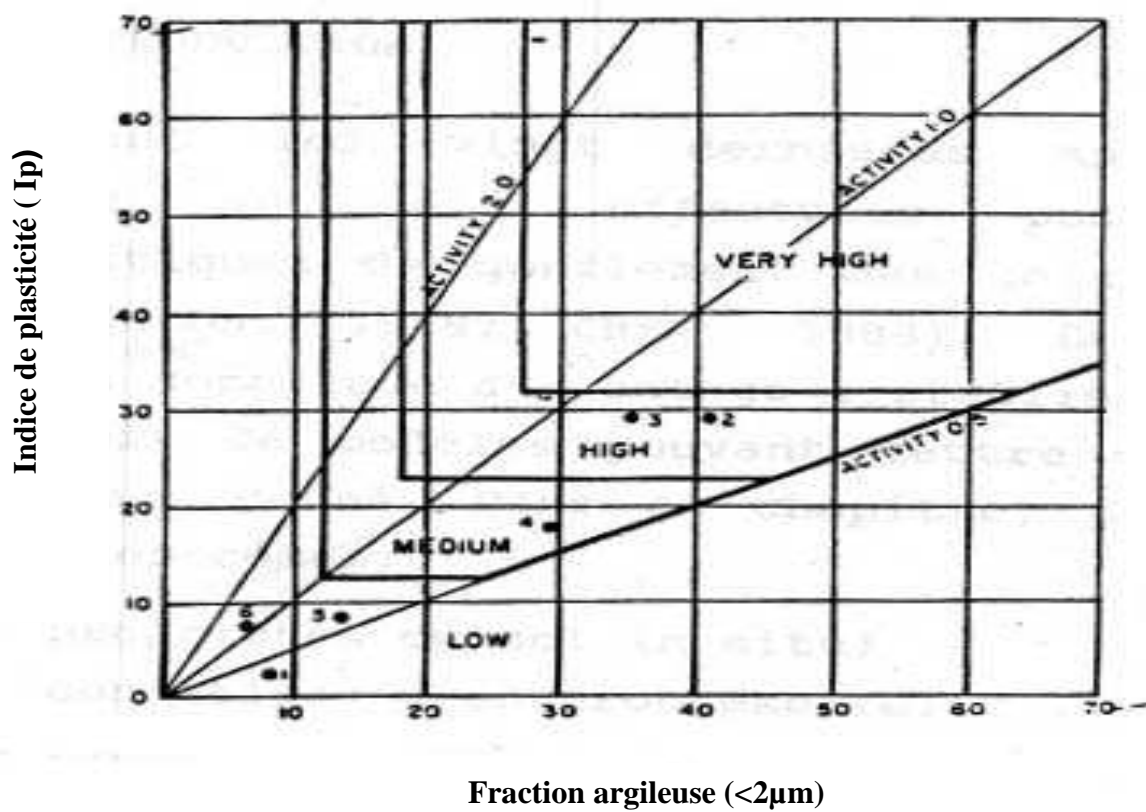


Figure I.11 : Abaque pour identification des sols gonflants
(D'après Williams et Donaldson, 1980 cité par Djedid et al, 2001, [10])

I.2 PHENOMENE DU GONFLEMENT

I.2.1 Introduction

Le gonflement des argiles a fait l'objet de très nombreuses études qui font apparaître des domaines d'intérêt particuliers, parmi les principales préoccupations des chercheurs dans l'étude des sols expansifs, c'est de comprendre et de déterminer les facteurs responsables de ce phénomène.

Dans cette partie, on s'attachera à présenter les différents mécanismes de gonflement et de mettre en évidence les facteurs influant sur ce phénomène.

I.2.2 Mécanisme du gonflement

Le gonflement représente l'extension des doubles couches entourant les particules argileuses. Les principaux facteurs régissant le gonflement des argiles peuvent être classés en deux catégories, les facteurs mécaniques et les facteurs physico-chimiques (Seed et al 1961; Mitchell, 1973).

I.2.2.1 Composantes mécaniques du gonflement

Dans la masse du sol gonflant, sous l'action d'un chargement, certaines particules se trouvent déformées selon deux chemins de déformations :

- la compression volumétrique des particules solides, souvent négligeables.
- la courbure des particules a un effet sur le changement de volume souvent appréciable.

L'approche mécanique du gonflement est analogue à l'extension mécanique et est reliée à l'énergie emmagasinée dans la structure solide (Terzaghi, 1941), dans cette approche l'imbibition par l'eau est attribuée à un gradient hydrostatique induisant un écoulement de l'eau à travers l'échantillon, ce qui provoque une diminution de la succion matricielle et par conséquent un déchargement de la masse du sol

I.2.2.2 Composantes physico-chimiques du gonflement

L'approche physico-chimique est basée sur la théorie de la double couche de Gouy-Chapman, 1910, [15], cette approche tient compte des forces interparticulaires qui sont fonction :

- des forces électriques
- de la texture de la surface des particules.
- de la composition du fluide interstitiel.

Les effets physico-chimiques sont fonctions des propriétés d'hydratation et de l'absorption des cations. En effet, les particules d'argiles ont une texture de surface qui permet une forte liaison à l'eau. Cette affinité à l'eau est responsable du gonflement du sol.

De plus, la surface des particules argileuses possède une charge négative non compensée afin d'assurer une neutralité électrique des charges, les cations sont attirés vers la surface de ces particules, ce qui va conduire à une concentration en cation dans la couche adsorbée (au voisinage des particules) qui est supérieure à celle de l'eau libre du sol. Cette différence dans la concentration ionique conduit à l'apparition d'une succion osmotique, engendrant un écoulement de l'eau de la zone de faible concentration vers la zone à forte concentration. Les cations et les molécules d'eau prennent place entre les particules d'argiles et provoquent l'expansion de la masse du sol.

I.2.3 Description du phénomène de gonflement

Plusieurs auteurs ont expliqué le phénomène du gonflement de diverses manières :

- Selon Norrish (1954) le gonflement se développe selon deux processus distincts, le gonflement cristallin dans le premier stade et le gonflement osmotique dans le deuxième stade
 - le gonflement cristallin dépend de l'énergie d'hydratation des cations intercouches. La distance entre les feuillets atteint à ce stade 30Å , à ce niveau la double couche n'est pas encore complètement formée.
 - au deuxième stade, le gonflement osmotique est normal au plan des particules, selon les mesures, le gonflement est proportionnel à la distance entre particules, cette dernière passe de 30Å à 130Å et même plus, suite au gonflement.
- Seed et al (1961) travaillant sur les argiles reconstituées, ont attribué le gonflement à deux phases, une phase mécanique et une phase physico-chimique. Ces auteurs ont observé que les échantillons d'argile reconstituée à la même densité par le compactage statique ont donné un gonflement approximativement le double de celui donné par les échantillons reconstitués par malaxage. Donc les différences dans le mode de préparation des échantillons résultent en des structures différentes (contribution des effets mécaniques).
- Van Olphen (1963) a expliqué le processus de gonflement par deux étapes :
 - la première étape serait due à la capacité d'absorptions monocouche successives d'eau à la surface des particules.
 - la seconde étape serait quant à elle due aux forces de répulsion qui sont dominants dans ce stade.

➤ Chang et Warkentin (1966, cité par Tas, 1992, [23]) ont divisé le gonflement en deux composantes

- Un gonflement structural, les pores ne sont pas totalement remplis d'eau.
- Un gonflement normal, l'échantillon est totalement saturé (lorsque l'affinité à l'eau de la double couche est satisfaite, cette couche est dite normale).

➤ Wong et Yong (1973) ont montré expérimentalement que l'évolution de la pression de gonflement est rapide au début de l'essai et s'atténue avec le temps.

L'accroissement rapide est dû à l'hydratation des feuillets d'argiles et des cations échangeables (cas du gonflement cristallin de Norrish) et à la tendance des feuillets d'argiles à se redresser (gonflement mécanique de Terzaghi). Après obturation des pores capillaires, l'accroissement devient graduel, lequel est attribué au gonflement osmotique.

➤ Popescu (1986) a suggéré deux types de gonflement, un gonflement intercrystallin (interparticule) et un gonflement intracrystallin.

- le gonflement intercrystallin peut affecter tous les types de minéraux argileux, ce gonflement est engendré par relâchement des tensions capillaires, après mouillage d'un sol non saturé.
- le gonflement intracrystallin est une caractéristique des minéraux de type montmorillonite, dans ce cas de gonflement, l'eau pénètre non seulement entre les cristaux mais aussi entre les couches individuelles qui forment le cristal.

➤ Mouroux et al (1988) ont distingué deux gonflements, un gonflement intraparticulaire (interfoliaire) et un gonflement interparticulaire (figure I.12)

- Le gonflement interfoliaire résulte de la cassure des faibles liaisons entre les feuillets des particules d'argile, et permettant ainsi l'acquisition d'eau au sein de la structure des particules, quoique ce gonflement est assez rapide, dont l'amplitude est en revanche très notable.
- Le gonflement interparticulaire résulte de l'apport d'eau supplémentaire en écartant les plaquettes (assemblage de feuillets) les unes des autres. Sa réaction est lente (peut durer des années, même lorsque la succion devient nulle). Contrairement au gonflement interfoliaire, le gonflement interparticulaire a une ampleur assez limitée et affecte toutes les argiles.



Figure I-12 : Mécanismes de gonflement des argiles par hydratation.
D'après Popescu (1986) (cité par Bengraa 2004, [9] p 11)

➤ Alonso et al (1989) ; Gens et al (cité par Serratrice et al, 1996) ; ont subdivisé le gonflement en deux phases qui peuvent exister simultanément et agir l'une sur l'autre, le gonflement primaire et le gonflement secondaire.

- le gonflement primaire est relativement rapide et commence immédiatement au contact du sol avec l'eau, ce gonflement est dit macroscopique et est contrôlé par la perméabilité, il est lié au degré de saturation (Sr). Ce premier processus est associé avec l'écoulement de l'eau au sens de la loi de Darcy.
- La seconde phase du gonflement dite microscopique, résultant de l'hydratation progressive des minéraux actifs, est lente. Ce gonflement est affectée par le type des minéraux présents dans le fluide interstitiel, et il est influencé par la pression de confinement.

➤ Fleureau et al (1990) ont noté que l'existence simultanée de ces deux mécanismes qui interagissant l'un sur l'autre rend l'étude de la cinétique du phénomène de gonflement très complexe.

Au vu de ces considérations, l'examen des différentes approches initiées plus haut indique l'existence de deux types de gonflement, le gonflement mécanique et le gonflement physico-chimique, bien que ces deux gonflements agissent simultanément, le gonflement mécanique (cristallin, structural, macroscopique, interfoliaire) semble être dominant dans le premier stade tandis que le gonflement physico-chimique (osmotique, interparticule, microscopique, normal) l'est dans le deuxième stade.

Arbitrairement, le gonflement est divisé en un gonflement primaire et un gonflement secondaire (Holtz et Gibbs, 1956, [16] ; Chen, 1988, [5]). La courbe de la figure I.13, représente la variation relative de la hauteur en fonction du logarithme du temps, dans laquelle on distingue les deux phases de gonflement :

- **Gonflement primaire** : Qui prend place très tôt, sa fin est caractérisée par un point d'inflexion permettant le changement de l'allure de la courbe.
- **Gonflement secondaire** : Qui est caractérisé par la portion linéaire de la courbe ($\Delta h/h_0 - \text{Log}(t)$).

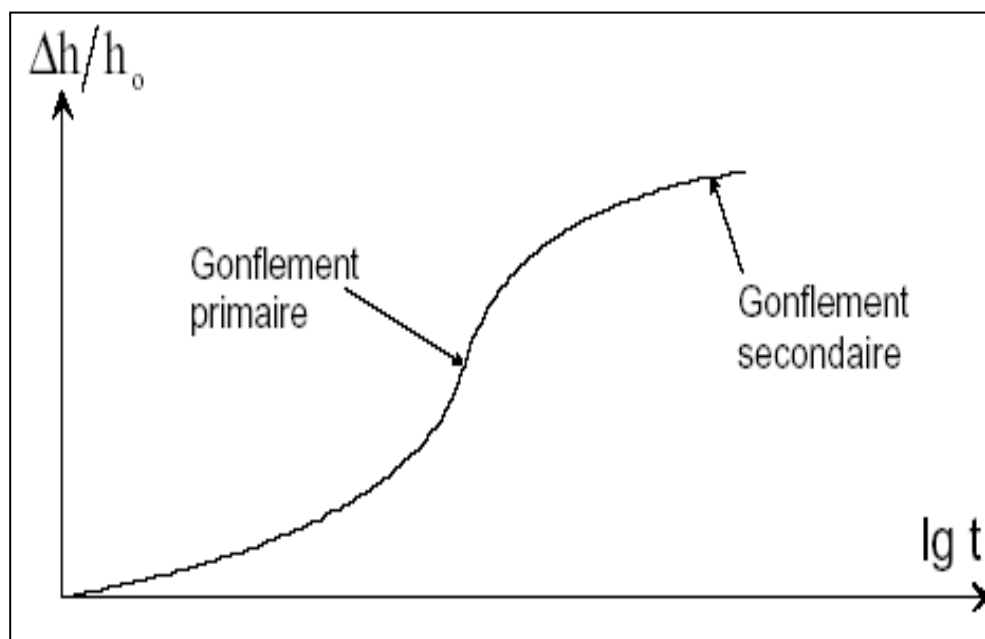


Figure I.13 : Courbe du gonflement en fonction du temps (Selon Chen, 1988, [5])

I.3 RESISTANCE AU CISAILLEMENT

I.3.1 Généralités et définitions

La résistance d'un matériau est définie comme étant sa capacité de supporter des charges sans céder à la rupture (Funk et Wagnalls, 1982 ; Gillot, 1987). Sous l'action des charges extérieures, le matériau développe une réaction interne, qui dépend de la nature de la charge appliquée.

Cependant pour le cas très particulier du sol, la résistance est généralement considérée en terme de résistance au cisaillement (Gillot, 1987), ceci parce que le phénomène de déformation et de rupture d'un sol dans le domaine plastique s'accompagne d'un réarrangement de sa texture (Vyalov, 1979). Les particules commencent à glisser l'une par rapport à l'autre, en formant ainsi des défauts de texture, qu'on peut assimiler à des fissures, ce qui conduit enfin à une rupture totale du sol suivant un plan de cisaillement bien apparent.

I.3.2 Critère de rupture de Mohr-Coulomb

Il existe plusieurs critères de rupture dont la plupart ne s'appliquent pas aux sols, le critère de rupture le plus souvent appliqué aux sols s'appelle le critère de Mohr- Coulomb (figure I.14).

Otto Mohr est le chercheur qui a développé le cercle des contraintes et Coulomb s'est fait connaître par ses études sur le phénomène de friction, d'attraction et de répulsion électrostatique. Mohr (1900), a énoncé pour les matériaux réels un critère de rupture, selon lequel, la contrainte de cisaillement à la rupture est fonction unique de la contrainte normale. Ce critère peut être formulé de la manière suivante : $\tau_{ff} = f(\sigma_{ff})$, où τ est la contrainte tangentielle de cisaillement ,et σ la contrainte normale, le premier indice f désigne le plan sur lequel agit la contrainte (le plan de rupture) et le deuxième indice signifie « à la rupture ».

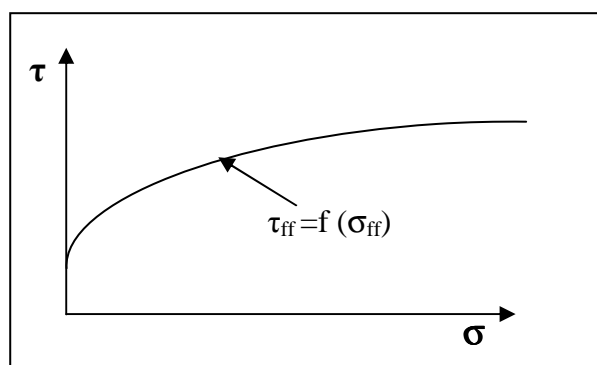


Figure I.14 : Critère de rupture de Mohr

Ce critère délimite deux domaines bien distincts, un domaine interne où le matériau reste stable et résistant, et un domaine externe où le matériau se met en rupture. Cette courbe est appelée « courbe intrinsèque ».

D'après la littérature (Caquot, 1964 ; Sanglérat ,1981) les courbes intrinsèques de la plupart des matériaux suivent l'équation (cités par Costet et al, [6]) : $\tau = \pm (\mathbf{a+b.\sigma})^{3/2}$ I.1

Pour le cas très particulier de la mécanique des sols, c'est coulomb, qui, le premier a proposé une relation de la forme linéaire telle que : $\tau = \pm (\mathbf{a+b.\sigma})$ I.2

Cette relation s'écrit habituellement : $\tau = \mathbf{C+ \sigma \text{ tg } (\varphi)}$ I.3

Où, **C** représente un paramètre de résistance appelé cohésion, φ est l'angle de frottement interne, σ est la contrainte normale appliquée au plan de rupture et τ est la résistance au cisaillement (figure I.15).

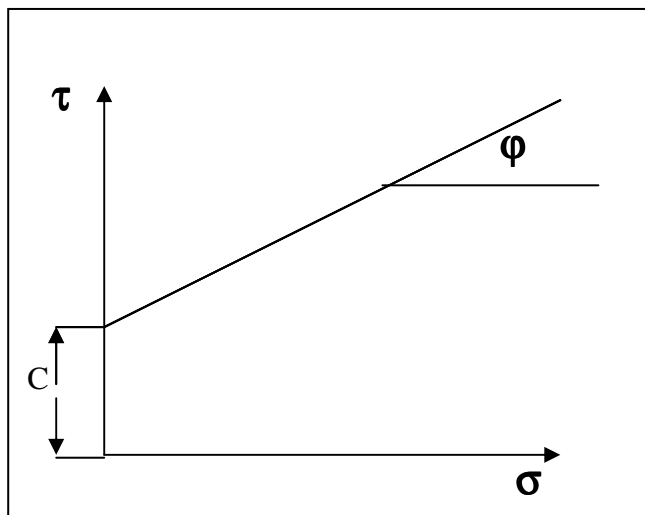


Figure I.15 : Représentation graphique de l'équation de résistance au cisaillement de Coulomb

Cette relation a été généralisée par Mohr, d'où l'appellation de la loi de Mohr –Coulomb. Les deux facteurs, **C** et φ sont définis comme étant les paramètres intrinsèques de la résistance au cisaillement des sols. Ces deux paramètres dépendent de plusieurs facteurs et ont fait l'objet de nombreuses investigations qui ont permis d'apporter certaines modifications à l'équation de Mohr-Coulomb. Cependant la modification la plus importante résulte de l'introduction du concept de la contrainte effective de Terzaghi (1936) dans l'équation de la résistance au cisaillement :

$$\tau_{ff} = \mathbf{C' + (\sigma_f - u_w)_f \text{ tg } (\varphi')}$$
.....I.4

Dans laquelle, C' et φ' représentent respectivement la cohésion effective et l'angle de frottement effectif interne et u_w la pression interstitielle à la rupture.

I.3.3 Paramètres de résistance au cisaillement pour les sols saturés :

Comme il a été montré dans la loi de Mohr-Coulomb, la résistance au cisaillement est liée principalement à la contrainte normale appliquée au plan de rupture par deux paramètres. Ces derniers sont généralement considérés comme étant des paramètres intrinsèques au sol, la cohésion C et le frottement φ .

En mécanique des sols, le comportement des sols saturés est régi par la théorie de Terzaghi (1926,1948), qui divise la contrainte totale appliquée au sol, en une contrainte effective, relative au squelette solide et une pression interstitielle du fluide présent entre les particules solides du sol.

$$\sigma = \sigma' + u \qquad \tau = \tau' \dots \dots \dots I.5$$

On peut aussi définir la résistance de cisaillement, en terme de contrainte totale (C , φ) et en terme de contrainte effective (C' , φ'). Ces deux formes de résistances représentent respectivement la résistance au cisaillement à court terme et la résistance au cisaillement à long terme :

$$\tau = C + \sigma \operatorname{tg}(\varphi) \qquad \tau' = C' + \sigma' \operatorname{tg}(\varphi') \dots \dots \dots I.6$$

Le comportement mécanique du sol, tant en ce qui concerne les déformations que la résistance au cisaillement, est liée d'après Terzaghi aux variations des contraintes effectives et non pas à celle des contraintes totales.

Au cours du cisaillement, pour le cas des sols pulvérulents (sable), à forte perméabilité l'écoulement plus ou moins rapide de l'eau favorise la dissipation totale des pressions interstitielles, et tous les efforts sont repris par le squelette solide, qui est caractérisé par ses paramètres de résistances effectives C' et φ' . Par contre pour le cas des sols cohérents (argileux) qui possèdent une faible perméabilité, les pressions interstitielles apparaissent en cours du cisaillement. Cette apparition dépend des contraintes dans lesquelles le cisaillement se produit, c'est à dire de la manière dont le drainage du sol est assuré et du temps pendant lequel la consolidation peut se produire. La détermination expérimentale de C' et φ' nécessite alors la connaissance de la valeur de la pression interstitielle.

I.4 COMPORTEMENT THERMIQUE

I.4.1 Introduction

La majorité des produits céramiques sont obtenus par frittage, généralement entre 900 et 1200°C. L'étape du frittage, essentielle au procédé de fabrication des céramiques, s'accompagne de la transformation des minéraux initiaux. Il s'agit de processus complexes, difficiles à appréhender en raison du caractère progressif et/ou transitoire de certaines transformations.

I.4.2 Modifications minéralogiques lors du chauffage

Le comportement des argiles prises individuellement est mal connu, il existe peu de données sauf pour la kaolinite (Figure I.16). La kaolinite subit différentes transformations en fonction de l'augmentation de température. Entre 400 et 700°C, il y a perte d'eau et formation de métakaolinite (phase anhydre $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$). Vers 900-1000°C, la métakaolinite se transforme à son tour en mullite ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$) et en spinelle Al-Si. A des températures > 1000°C et pour des durées de chauffe longue, il y a cristallisation de la silice sous forme de cristobalite.

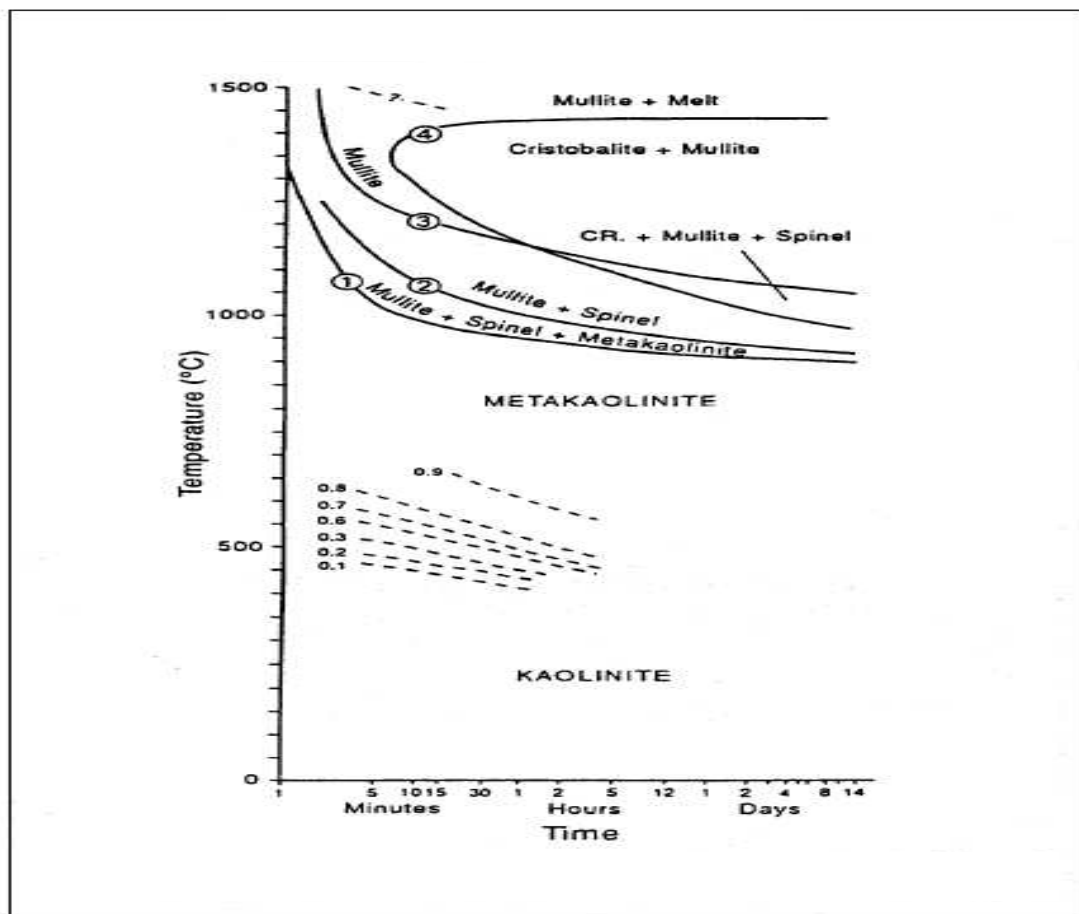


Figure I.16 : Evolution de la minéralogie des argiles lors du chauffage
(Fagel, 2005, [20])

I.4.3 Analyse thermique différentielle (ATD)

L'analyse Thermique Différentielle (ATD) est basée sur l'étude de la chaleur dégagée ou absorbée par la matière pendant les transformations physiques ou chimiques. On enregistre la différence de température entre l'échantillon et un corps de référence thermiquement inerte, du moins dans le domaine de température exploré. Tous les changements de phase, cristallisations ou réactions chimiques qui consomment ou libèrent de la chaleur au sein de l'échantillon font naître une différence de température entre celui-ci et son environnement. Cette différence atteint son maximum quand la vitesse de production ou de consommation de la chaleur par l'échantillon cesse d'être supérieure à la vitesse d'échange de chaleur entre l'échantillon et son environnement.

Elle diminue ensuite plus au moins lentement, jusqu'à ce que l'équilibre des températures soit de nouveau atteint.

L'ATD est une technique de choix pour caractériser les phénomènes endothermiques ou exothermiques caractéristiques des minéraux argileux. La forme des courbes d'ATD est typique de celle obtenue avec des matières contenant des minéraux argileux [18] (Annexe I). On y distingue essentiellement deux pics:

Un pic endothermique entre 400 et 600°C correspondant à la déhydroxylation des minéraux argileux.

Un second pic exothermique entre 900 et 1000°C correspond à la réorganisation structurale des minéraux argileux.

I.4.4 Analyse thermo gravimétrique (ATG)

La chauffe d'une matière argileuse entraîne l'élimination des matières organiques, le départ de l'eau de constitution de certaines espèces minérales comme la kaolinite, la décomposition des carbonates, etc. Il est donc possible de suivre l'influence de la température sur les pertes de masse de la matière étudiée. Ceci constitue le principe de l'Analyse thermo gravimétrique (ATG).

L'ATG consiste donc à déterminer en fonction de la température les quantités de constituants volatils adsorbés ou combinés dans la matière. Les valeurs de température correspondant aux pertes de masses apportent des informations complémentaires à celles obtenues par ATD.

I.5 ARGILES ET INDUSTRIE

I.5.1 Introduction

L'exploitation des minéraux remonte à plusieurs milliers d'années. Les argiles pour fabriquer les briques, par exemple, sont utilisées depuis au moins 5000 ans et sont toujours utilisées actuellement, même si les techniques de production ont changé.

Les argiles sont fréquemment utilisées comme minéraux industriels (kaolin, bentonite, vermiculite, argiles réfractaires).

I.5.2 Kaolin et bentonites

Le kaolin et les bentonites constituent la famille principale parmi les argiles industrielles. Le tableau I.6 résume leurs applications principales.

Tableau I.6 : Principales utilisations des kaolins, «Ball Clay» et bentonites (Fagel, 2005, [20])

Kaolins (China Clay)

- Enduits pour papier
 - Liants dans les peintures, plastiques, produits pharmaceutiques
 - Composants des céramiques

Ball Clay

- Composant dans les céramiques pour la production d'équipement sanitaire, vaisselle, briques...
- Argiles de mauvaise qualité utilisées pour sceller les décharges

Bentonite

- Boue de forage
- Barrière d'étanchéité dans les décharges

- Le kaolin où China Clay est une kaolinite presque pure. Chimiquement inerte, elle est utilisée pour donner de la blancheur et de l'éclat dans les céramiques, les peintures et les papiers de haute qualité.
- Les Ball clays sont des argiles plastiques constituées principalement de kaolinite avec une contribution mineure d'illite. Ces argiles donnent force et malléabilité à des céramiques avant le chauffage. Elles jouent également un rôle de ciment entre des composés réfractaires lors du chauffage. On les retrouve également dans les céramiques de vaisselle, les poteries, les équipements sanitaires et les briques.
- Les bentonites au sens industriel du terme se composent d'un mélange de smectites (principalement montmorillonites) et d'illite. Ces argiles présentent, vu leur composition riche en smectites, une forte réactivité physique et chimique. En particulier, leurs propriétés d'adsorption les rendent utiles dans la réalisation de barrières hydrauliques par exemple, dans le stockage de déchets. Les propriétés de gonflement varient selon le cation interfoliaire présent : les bentonites sodiques sont plus gonflantes que les bentonites calciques.

I.5.3 Argiles pour la construction

Dans la construction, les argiles sont un constituant essentiel pour la production de briques et tuiles. Les argiles et sédiments argileux utilisables pour les manufactures de briques sont dispersés dans le monde entier. Ils contiennent des argiles comme constituants essentiels et des fragments de roche. Le comportement de la brique dépend des réactions qui se produisent quand la matière argileuse hétérogène est chauffée. La décomposition thermique des argiles est critique lors du chauffage et les minéraux se comportent individuellement. La composition en éléments majeurs d'argiles de construction est globalement Si et Al qui dominent avec un pourcentage variable de Fe, Mg, Na, Ca et K. L'abondance de certains composés peut altérer la qualité du produit fini. Par exemple, la calcite altère la couleur de la brique, des oxydes de Ca peuvent s'hydrater lors du refroidissement, le gypse peut se déshydrater puis s'hydrater à nouveau en créant une pellicule à la surface de la brique, la pyrite peut s'oxyder en sulfates ou dioxydes de S qui peuvent émettre des gaz.

I.5.4 Matériaux réfractaires

Les matériaux réfractaires (Figure I.17) sont utilisés dans les processus de production qui impliquent un contact avec des substances corrosives à haute température. Les substances doivent être inertes avec les matériaux avec lesquels ils sont en contact, ils doivent être résistants mécaniquement et stables thermiquement ($T > 1500^{\circ}\text{C}$).

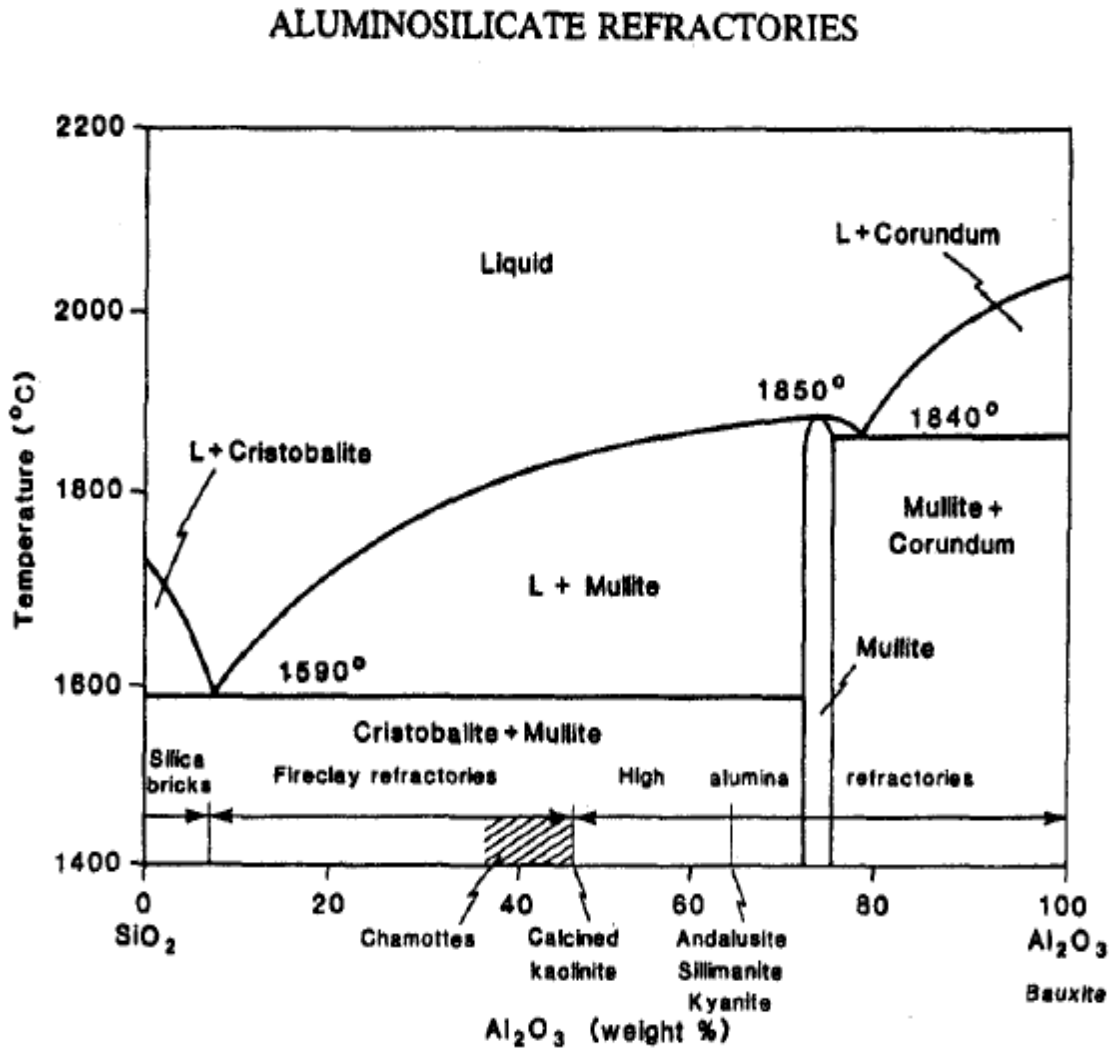


Figure I.17 : Argiles réfractaires (Fagel, 2005, [20])

I.5.5 Composition des pâtes céramiques

Les produits céramiques silicatés tels que les tuiles, les carreaux, les porcelaines, les faïences, les grès à usage domestique, et certains réfractaires sont essentiellement composés de matières premières argileuses (tableau I.7).

Tableau I.7: Compositions de mélanges de matières premières utilisées en technologie céramique (Karfa, 2003, [18])

Produits	Température de cuisson (°C)	Kaolin %	Argile réfractaire %	Argile kaolinitique blanche %	Argile kaolinitique %	Argile à grès et poteries %	Chamotte %
Réfractaires	1400-1600		50-90				10-50
Porcelaine	1300-1400	30-50					
Carreaux	1000-1250				40-80		
Sanitaire	1200-1280				10-30	10-30	20-50
Vitreous	1200-1280	15-25		20-30			
Faïence	900-1200	0-25			20-60		
Poterie	900-1100				0-25	20-60	0-50

Le mélange argile-eau donne une pâte plastique, malléable et facile à mettre en forme. Cette pâte se contracte fortement pendant le séchage. Pour limiter les effets du retrait sur les produits finaux, des produits non plastiques sont souvent ajoutés à la pâte. La résistance mécanique de la préforme se trouve ainsi améliorée et l'élimination de l'eau au cours du séchage est favorisée; parmi les ajouts communément utilisés, on peut citer le sable, certains carbonates et des tessons de poterie broyés, [18].

L'apparition d'une phase liquide lors du frittage est souvent amplifiée par les interactions entre minéraux argileux et associés. C'est le cas des feldspaths alcalins. Dans certaines conditions de température et de composition, les oxydes de fer et certains composés riches en calcium comme la craie peut aussi contribuer à la formation d'une phase liquide. De façon générale, la formation d'une phase liquide diminue la porosité de la pièce et augmente ses propriétés mécaniques.

En technologie céramique, les argiles kaolinitiques sont recherchées du fait de leurs propriétés assez bien connues, leurs plasticités appréciables, leurs faibles retraits au séchage, l'absence de gonflement inter foliaire et la coloration peu marquée des tessons. A l'état naturel, la kaolinite pure n'existe pas, mais certaines matières premières naturelles en sont proches. Il est toutefois difficile de séparer les minéraux par des méthodes physiques ou chimiques au delà d'une pureté dépassant les 97%.

La composition d'une pâte céramique est variable. En général, elle contient:

- de l'argile kaolinitique contenant plus de 50% de kaolinite.
- jusqu'à 25% en masse de quartz.
- des feldspaths alcalins et des minéraux du groupe illite/mica; leur teneur peut atteindre 25% en masse dans le cas d'applications qui nécessitent l'apparition d'une phase liquide à basse température.
- des argiles très plastiques comme les smectites et l'halloysite. Elles améliorent les propriétés rhéologiques des pâtes et la tenue mécanique des pièces crues; leur teneur peut atteindre 5% en masse.
- des adjuvants organiques utilisés pour faciliter la mise en forme.
- des éléments colorants qui sont souvent le fer et le titane contenus dans les argiles.

I.6 LES MATIERES PREMIERES DURES (OU MATERIAUX NON PLASTIQUES)

I.6.1 Introduction

Les matériaux non plastiques peuvent être divisés en deux classes :

1. Les dégraissants, ce sont essentiellement :
 - * Les argiles cuites ou chamottes
 - * La silice (quartz)
 - * Les rebuts de cuisson.
2. Les fondants, ce sont essentiellement :
 - * Les fondants alcalins ou alcalino-terreux.

Il est à noter que les fondants ont également la propriété d'être dégraissants.

I.6.2 Rôle des dégraissants et des fondants

I.6.2.1 Les dégraissants

La fabrication de produits composés, uniquement de matériaux plastiques (argiles et kaolins) présente un grave inconvénient. Nous savons qu'une argile a la propriété de fixer une quantité d'eau d'autant plus grande que l'argile est composée de particules fines, donc elle subit une augmentation de volume proportionnelle à cette quantité. Ce phénomène est réversible et se déroule en sens inverse lors du séchage.

L'adjonction de matières dégraissantes aux argiles diminue la plasticité et les rend moins grasses. Mais elle a aussi pour effet de réduire le retrait de séchage et de faciliter le façonnage des produits. Les ajouts de dégraissantes aux argiles ont généralement pour effet d'augmenter la porosité des pâtes crues, sèches, de faciliter le séchage des produits en diminuant la quantité d'eau à évacuer et en facilitant la diffusion de l'eau au cours du séchage, de donner un squelette à la pâte en cru et en cuit. Les avantages d'un ajout de dégraissant varient avec la nature du dégraissant. On constate, par exemple, qu'un dégraissant poreux (chamotte) absorbera de l'eau et risque ainsi d'entraîner une moindre diminution de la proportion d'eau nécessaire au façonnage qu'un dégraissant non poreux (sable).

L'efficacité des dégraissants dépend, non seulement, de leur proportion dans les pâtes, mais aussi de leur granularité.

Il ne faut pas oublier que c'est l'argile qui donne de la cohésion aux pâtes et qu'un ajout trop important de dégraissants peut réduire les résistances mécaniques des produits.

I.6.2.2 Les matériaux fondants

Les fondants ont les propriétés des dégraissants à froid. La fonction principale du fondant c'est former une phase vitreuse seule ou en réagissant avec les autres composants de la pâte. De cette façon, la cohésion en cuit, la densification sont facilitées et la température de cuisson réduite.

Les meilleurs fondants sont ceux qui permettent d'abaisser le point de vitrification sans abaisser le point de fusion.

I.6.3 Les principaux matériaux non plastiques utilisés dans la fabrication des céramiques

Ils sont constitués des produits réfractaires à base de silice tel que:

I.6.3.1 Les rebuts de cuisson

La cuisson des chamottes étant onéreuse, on a essayé de récupérer des dégraissants, soit à partir de produits hors d'usage (débris de réfractaires provenant de démolition des fours), soit à partir de déchets de fabrication de produits céramiques, (rebut de faïence non émaillée par exemple).

Il faut veiller à ce que ces tessons ne contiennent pas de composés nuisibles à la qualité des produits fabriqués.

I.6.3.2 Les feldspaths

Les feldspaths sont des roches dures constituées par des silico-aluminates de sodium, de potassium et de calcium. Leur action vitrifiant varie suivant la nature de l'élément fondant. Le palier de vitrification des pâtes contenant des sodiques et potassiques est assez étendu et commence vers 1200°C. Le feldspath calcique fond à plus haute température et son palier de vitrification est très court.

Chapitre II

Techniques

Expérimentales

II.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, sont exposées les méthodes et les techniques expérimentales utilisées, et qui peuvent être divisées en :

- Caractérisation chimique
 - Analyses minéralogiques.
 - Analyses chimiques.
 - Essai au bleu de méthylène
- Caractérisation physique
 - Analyses granulométriques.
 - Limites d'Atterberg
- Caractérisation mécanique
 - Mesure du potentiel de gonflement
 - Caractéristiques mécaniques aux cisaillements (angle de frottement interne et cohésion).

Ces analyses seront employées dans la partie expérimentale.

II.2 CARACTERISATION CHIMIQUE

II.2.1 Diffraction des rayons X

Les argiles sont formées d'empilements de feuillets eux-mêmes constitués de séries de couches de cristaux. La distance entre les feuillets et le nombre de couches formant ceux-ci est caractéristique de chaque minéral.

Chaque minéral est caractérisé par une série de pics en des places bien déterminées du diffractogramme. Le diffractogramme d'un échantillon réel est la somme de ceux de ses constituants.

La diffractométrie est applicable à la détermination de n'importe quel composant cristallin. Les applications majeures sont l'étude des argiles et des céramiques. La détermination des différents composants d'une argile peut permettre de résoudre le problème de la provenance du sédiment. La céramique est un mélange d'argile et de dégraissant incorporé volontairement, ou présent initialement dans la "terre", aux fins de limiter le retrait au séchage et à la cuisson. Le potier est donc amené à rechercher de façon empirique le matériau ou la composition représentant le meilleur compromis pour atteindre le but qu'il s'est fixé (plasticité de la pâte, aptitude à la cuisson...).

La diffraction des rayons X consiste à appliquer un rayonnement de la longueur d'onde des rayons X ($0,1 < \lambda < 10\text{nm}$) sur un échantillon argileux. Le rayonnement pénètre le cristal, où il y a absorption d'une partie de l'énergie et excitation des atomes avec émissions de radiations dans toutes les directions. Les radiations émises par des plans atomiques qui sont en phases vont engendrer un faisceau cohérent qui pourra être détecté, [20]. La condition pour que les radiations soient en phase s'exprime par la loi de Bragg:

$$n\lambda = 2d \sin\theta \dots\dots\dots\text{II.1}$$

Où

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

λ : longueur d'onde du rayonnement utilisé(μm)

d : espace basal (synonyme:espace atomique , ou inter-réticulaire), en angströms(\AA)

θ : angle de diffraction, en degré

II.2.2 Spectrométrie d'émission atomique (SEA)

Après séchage et broyage, l'échantillon (tesson) est tamisé pour retirer tout "corps" étranger et ne retenir que la fraction fine. Une masse de 0,1g de cette poudre est fondue à 1000°C avec du métaborate de lithium (flux). Ensuite, ce mélange est dissous dans du HNO_3 dilué. L'échantillon est alors volatilisé dans un arc électrique à une température de 6000°C . Cette énergie thermique excite les électrons des atomes qui, revenus à leur état originel, libèrent l'excès d'énergie accumulé lors de l'excitation. Elle est émise avec une longueur d'onde propre à chaque élément et est dispersée par un système de fentes. L'intensité de chaque longueur d'onde est donc mesurée et comparée à des solutions standard. Les éléments sont alors identifiés et quantifiés, [20].

Les éléments majeurs habituellement analysés sont les suivants : SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , MnO , CaO , P_2O_5 , TiO_2 .

II.2.3 Essai au bleu de méthylène

Le principe de l'essai consiste à maintenir en permanence sous agitation un mélange [échantillon + eau] puis à introduire des quantités croissantes de bleu de méthylène par doses successives, jusqu'à ce que les particules argileuses en soient saturées, il apparaît alors un excès qui marque la fin de l'essai et qui est détecté par le test de la tache. Ce dernier consiste à former avec une goutte de la suspension sur du papier filtre normalisé, une tache qui est un dépôt de sol coloré en bleu, entouré d'une zone humide incolore. L'excès de bleu se traduit par l'apparition dans cette zone d'une auréole d'un bleu clair (annexe III).

Le test est alors positif; (NF P 94-068) [25]. La surface spécifique totale (Sst) est la surface des grains solides sur laquelle le bleu de méthylène se fixe, [27]. Elle est donnée par :

$$\mathbf{Sst} = (\mathbf{V_B} / \mathbf{100}) \times (\mathbf{N} / \mathbf{373}) \times \mathbf{130} \cdot \mathbf{10}^{-20} \dots\dots \text{II.2}$$

$$\Rightarrow \mathbf{Sst} = \mathbf{21} \mathbf{V_B} (\mathbf{m}^2/\mathbf{g})$$

En sachant que la masse moléculaire du bleu de méthylène = 373g et la surface occupée par une molécule de bleu de méthylène est de $130 \cdot 10^{-20} \text{m}^2$, N est le nombre d'Avogadro.

II.3 CARACTERISATION PHYSIQUE

II.3.1 Analyse granulométrique des sols

L'analyse granulométrique s'obtient par deux opérations successives et complémentaires :

- Le tamisage sous l'eau (par voie humide) pour les particules de dimensions $\geq 80 \mu\text{m}$ (0.08mm), l'essai est effectué selon la norme NF P94-056, [1].
- La sédimentométrie pour les particules de dimensions $< 80 \mu\text{m}$ qui complète la première, elle est effectuée selon la norme NF P94-056, [1]. Le principe de cet essai est fondé sur la loi de Stokes ou la vitesse de sédimentation des particules en suspension dans un milieu dépend de leurs diamètres.

Loi de Stokes
$$U = \frac{H_r}{t} = g \frac{\rho_s - \rho_w}{18 \eta} D^2 \dots\dots \text{II.3}$$

$$D = \sqrt{\frac{18 \eta}{g (\rho_s - \rho_w)} \frac{H_r}{t}} \dots\dots \text{II.4}$$

$$P\% = 8R_c \dots\dots \text{II.5}$$

Où :

$$H_r = H_1 + \frac{1}{2} \left(h - \frac{v}{s} \right)$$

$$\frac{1}{2} \left(h - \frac{v}{s} \right) = 6.93 \text{ cm}$$

$$H_1 = (40 - R) 0.26$$

$$R_c = R + C_t + C_m - C_d = R + 0.25$$

Avec:

$$C_m = 0.0005$$

$$C_d = 0.00025$$

$$C_t = 0 \text{ à } T = 23^\circ\text{C}$$

$$h = 14,30\text{cm}$$

$$V = 50\text{cm}^3$$

$$S = \pi r^2 = 3,14 \cdot 36 = 113,04\text{cm}^2$$

$$\rho_s = 2700 \text{ Kg/m}^3 \quad \rho_w = 998 \text{ Kg/m}^3$$

$$\eta = 9.465 \times 10^{-4} \text{poiseuilles.}$$

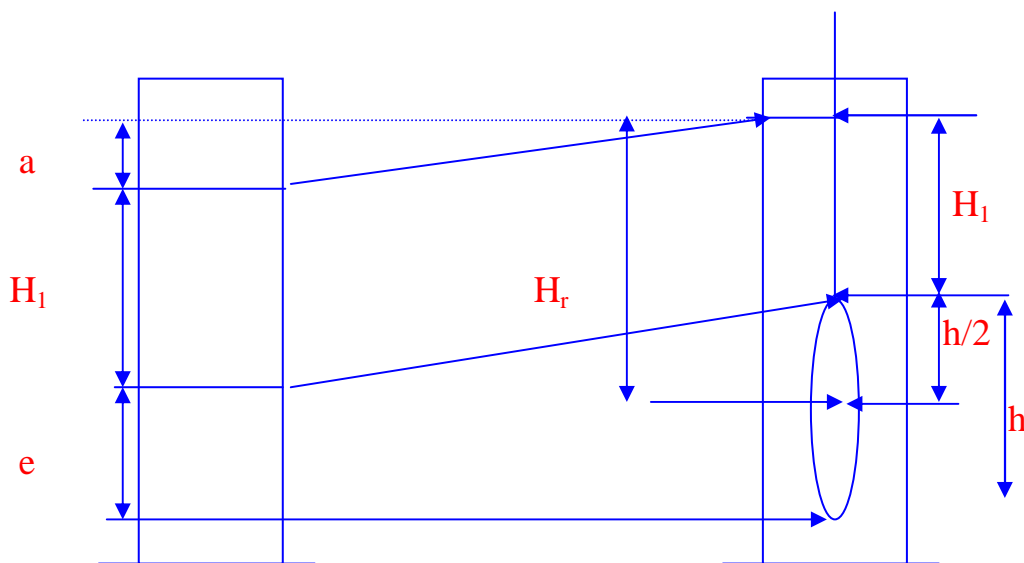


Figure II.1: éprouvette de mesure avant et après introduction du densimètre

II.3.2 Limites d'Atterberg

Alors que les sables fins se présentent sous l'aspect de poudre – d'où leur nom de sols pulvérulents – les argiles par contre forment des pâtes dans lesquelles chaque grain est relié aux grains voisins par des forces de cohésion dues à la présence des couches adsorbées. La consistance qui en résulte dépend en grande partie de la teneur en eau du matériau. Une argile complètement détrempée est liquide; à l'opposé on trouve des argiles desséchées qui se comportent comme des solides, on en rencontre également des argiles qui sont de véritables pâtes à modeler, [6].

C'est pourquoi, on distingue trois états dans la consistance des argiles : les états liquide, plastique et solide. A l'état liquide, les grains sont indépendants les uns des autres, leurs mouvements relatifs sont aisés.

A l'état plastique, les grains se sont rapprochés et ont mis en commun leur couche adsorbée si bien qu'ils sont reliés par des chaînes de molécules d'eau qui s'accrochent à leurs deux extrémités sur chaque grain. Lorsqu'il y a mouvement, les grains restent attachés les uns aux autres, sans s'éloigner. Enfin, à l'état solide, les grains sont encore plus près les uns des autres, ils arrivent même au contact en quelques points, en chassant l'eau adsorbée. Les frottements internes sont alors importants. La transition d'un état à l'autre est très progressive, c'est pourquoi toute tentative pour fixer la limite entre deux états comporte une part d'arbitraire.

Néanmoins, on utilise très généralement les limites définies en 1911 par Atterberg et précisées ensuite par Casagrande.

II.3.2.1 Limite de liquidité

Par définition, la limite de liquidité W_L est la teneur en eau (exprimée en %) d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état liquide (le sol est humide et déformable) et un état plastique qui correspond à une fermeture en 25 chocs.

Si l'on étudie expérimentalement la relation qui lie le nombre de chocs N à la teneur en eau W , on constate que la courbe représentative de cette relation est une droite en coordonnées semi-logarithmiques (échelle arithmétique pour les teneurs en eau, logarithmiques pour le nombre de chocs) lorsque le nombre de chocs est compris entre 15 et 35, [6].

Pour le même intervalle des valeurs de N , la formule approchée [6].

$$w_L = w \left(\frac{N}{25} \right)^{0,121} \dots\dots\dots \text{II.6}$$

Cette formule représente également assez bien les résultats expérimentaux. On peut donc employer cette dernière formule qui permet de déterminer la limite de liquidité à l'aide d'une ou deux mesures seulement. On peut également construire point par point. Il est nécessaire pour cela de réaliser plusieurs essais qui s'échelonnent régulièrement entre 15 et 35 ou mieux 20 et 30 chocs.

II.3.2.2 Limite de plasticité

Par définition, la limite de plasticité W_P est la teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide, [6].

A partir de ces définitions, on peut déterminer un autre paramètre qui est :

- Indice de plasticité noté : I_P . $I_P = W_L - W_P$

II.4 CARACTERISATION MECANIQUE

II.4.1 Mesure du potentiel de gonflement

Les différentes méthodes employées pour l'estimation et la mesure du potentiel de gonflement sont :

- Les méthodes indirectes basées sur l'évaluation des caractéristiques physiques (teneur en eau, densité sèche, limites d'Atterberg, valeur de bleu, succion...) permettent d'estimer la sensibilité du matériau vis-à-vis du gonflement.
- La méthode directe.

II.4.1.1 Mesure indirecte du potentiel de gonflement

II.4.1.1.1 Généralités

Un nombre considérable d'approches empiriques introduites par différents auteurs, Skempton (1953); Holtz et Gibbs (1956, [16]); Ranganathan et Satyanaryana (1965); Vijayverjya et Ghazzaly (1973); Mouroux et al (1988); basées sur des caractéristiques du sol, qui sont faciles à déterminer en laboratoire, sont utilisées pour l'évaluation du potentiel de gonflement.

Certaines approches sont basées sur un seul paramètre, et d'autres sur la combinaison de deux ou trois paramètres, plus le nombre combiné est grand, plus l'évaluation du potentiel de gonflement est meilleure.

Dans ce qui suit, nous allons présenter trois classifications établies par différents auteurs, et utilisées pour évaluer le potentiel de gonflement des sols expansifs, pour les autres classifications, voir (Annexe II).

II.4.1.1.2 Classifications

a) Classifications selon un seul paramètre

Tableau II.1 : Evaluation du potentiel de gonflement à partir de l'indice de plasticité (D'après Mouroux et al ,1988)

Potentiel de gonflement	Indice de plasticité (%)
Bas	0-15
Moyen	15-35
Haut	35-55
Trés haut	>55

b) Combinaison de deux paramètres

Tableau II.2 : Degré d'expansion en fonction de limite de liquidité et l'indice de plasticité (D'après Snethen et al ,1977)

I_p	$W_L(\%)$	Classification
<25	<50	Faible
25-35	50-60	Moyen
> 35	> 60	Très élevé

II.4.1.2 Mesure directe du potentiel de gonflement

Les essais de gonflement sont usuellement effectués dans un odomètre (Annexe III). Le potentiel de gonflement étant défini comme la déformation volumétrique totale :

$\Delta V/V_0 = \Delta H/H_0$, (V_0 : volume initial de l'échantillon ; H_0 : hauteur initiale de l'échantillon), suite à une inondation.

Plusieurs méthodes ont été suggérées dans la littérature pour estimer le potentiel de gonflement des sols, on peut citer :

- Laad et Lambe (1961), ont suggéré une méthode d'approximation du potentiel de gonflement appelée P.V.R (Potentiel Vertical Rise). Cette méthode se base sur les mesures des variations de la hauteur sous chargement d'environ 0,1 bar.
- Travaillant sur des échantillons compactés à l'optimum Proctor, Seed et al (1962) ont mesuré le gonflement par la variation de volume suite à l'inondation sous une surcharge de 0,07 bar, dans ce cas, la teneur en eau initiale correspond à l'optimum de Proctor.
- Pour les argiles intactes, Snethen et al (1977) ont défini le potentiel de gonflement comme le changement total de volume par inondation, sous une charge équivalente à la pression des terres, dans ce cas, la teneur en eau initiale est la teneur en eau naturelle.
- Les normes A.S.T.M de 1986, déterminent le pourcentage de soulèvement d'une colonne de sol in situ, comme le rapport de l'accroissement de la hauteur sur la hauteur initiale.

Selon ces définitions, on peut conclure qu'une méthode universelle permettant de mesurer le potentiel de gonflement n'est pas encore établie. Toutefois, la procédure expérimentale de détermination du potentiel de gonflement doit nécessairement reproduire les conditions in situ (teneur en eau, densité sèche, surcharge, taille de l'échantillon) et les conditions du déroulement des essais (palier de chargement et de déchargement) (Snethen et al, 1977).

Dans cette étude, la mesure directe du gonflement des sols est effectuée en utilisant un odomètre classique. L'échantillon est soumis au seul poids du piston, et mis en contact d'un réservoir d'eau à charge nulle. La variation de la hauteur de l'échantillon est mesurée en fonction du temps jusqu'à ce qu'elle se stabilise, la valeur finale permet de calculer la variation relative du volume de l'échantillon noté G, que l'on exprime souvent en pourcentage.

$$G\% = (\Delta H/H_0) \times 100 \dots \dots \dots \text{II.7}$$

Avec : $\Delta H = H_f - H_0$

H_0 : hauteur initiale.

H_f : hauteur finale après stabilisation.

II.4.2 Essais de résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement des sols constitue l'aspect le plus important, elle peut être déterminée de plusieurs façons (au laboratoire ou in situ).

Les essais les plus fréquemment utilisés au laboratoire, sont l'essai de cisaillement direct et l'essai triaxial. Dans cette étude, l'essai de cisaillement direct est utilisé pour mener cette investigation, pour cela on décrira brièvement l'essai triaxial. Les essais ont été effectués au laboratoire national de l'habitat et de la construction (LNHC) de DJELFA.

II.4.2.1 Essai de cisaillement direct

Cet essai est probablement le plus ancien puisque Coulomb a utilisé une boîte de cisaillement, il y'a plus de 200 ans (Holtz et Gibbs, 1991, [17]), pour déterminer expérimentalement les paramètres utilisés dans son équation.

L'essai est relativement simple. On confine l'échantillon dans une boîte formée de deux parties divisées par un plan horizontal. Une partie est fixe tandis que l'autre peut se mouvoir horizontalement. On applique une charge normale constante sur l'échantillon à l'aide d'un capuchon de chargement et on mesure, en cours d'essai, la force de cisaillement de même que les déformations horizontales et verticales (Figure II.2). On peut ensuite calculer la contrainte de cisaillement et la contrainte normale. On ne doit pas oublier qu'avec cet appareil le plan de rupture est prédéfini.

La résistance mobilisée par l'échantillon augmente jusqu'à atteindre une valeur limite où l'échantillon commence à se rompre. Cette valeur représente la résistance au cisaillement maximale ou de pic

L'essai de cisaillement direct comporte des avantages et des inconvénients. Essentiellement, l'essai est économique, rapide et simple, en particulier avec les matériaux granulaires.

Cependant il est difficile de contrôler les conditions de drainages, en particulier dans le cas des sols à grains fins. Un autre inconvénient de cet essai réside dans la concentration des contraintes aux extrémités de la boîte, soit à l'endroit même où sont transmises des contraintes externes très peu homogènes à l'intérieur de l'échantillon (répartition non uniforme). En dernier lieu, il se produit une rotation des plans principaux et des contraintes entre le début de l'essai et la rupture et que la surface de rupture est imposée.

Comme remarque, il est impossible de séparer les frottements des demi boîtes l'une de l'autre du frottement de l'échantillon.

Trois types d'essais pourront être utilisés :

a) Essai consolidé - drainé (C.D)

L'essai C.D est toujours réalisable et permet de mesurer les paramètres ϕ_d et C_d . L'échantillon est consolidé sous un effort N constant, dans des conditions similaires à celle de l'œdomètre. La vitesse de cisaillement est de l'ordre de micron par minute, doit être choisie en fonction de la perméabilité du sol testé. L'essai peut, dans les cas les plus défavorables, durer jusqu'à une semaine. La saturation est assurée par immersion de la boîte, dès la phase de consolidation.

b) Essai consolidé-non drainé (C.U)

Comme l'essai précédent, et pour les mêmes raisons, l'essai C.U ne convient que pour les sols de faibles perméabilités. La phase de consolidation est identique à celle de l'essai C.D.

c) Essai non consolidé-non drainé (U.U)

Cet essai ne peut convenir que pour étudier les sols peu perméables. Si ce n'est pas le cas, le drainage a le temps de s'effectuer partiellement pendant la phase de cisaillement, et les résultats obtenus ont tendance à se rapprocher de ceux de l'essai drainé. Même pour les matériaux peu perméables, il est important d'opérer très vite, et de choisir une vitesse de cisaillement élevée, de l'ordre de 1 mm/mn.

Les vitesses des trois types d'essais sont reportés dans le tableau II.3 (Costet et Sanglérat, [6]; Hachichi, [13]).

Tableau II.3 : Vitesses des essais de cisaillement

Type d'essai	vitesse
Essai U.U	0,25-0,5 (mm/mn)
Essai C.U	2-20 ($\mu\text{m}/\text{mn}$)
Essai C.D	0,5-2($\mu\text{m}/\text{mn}$)

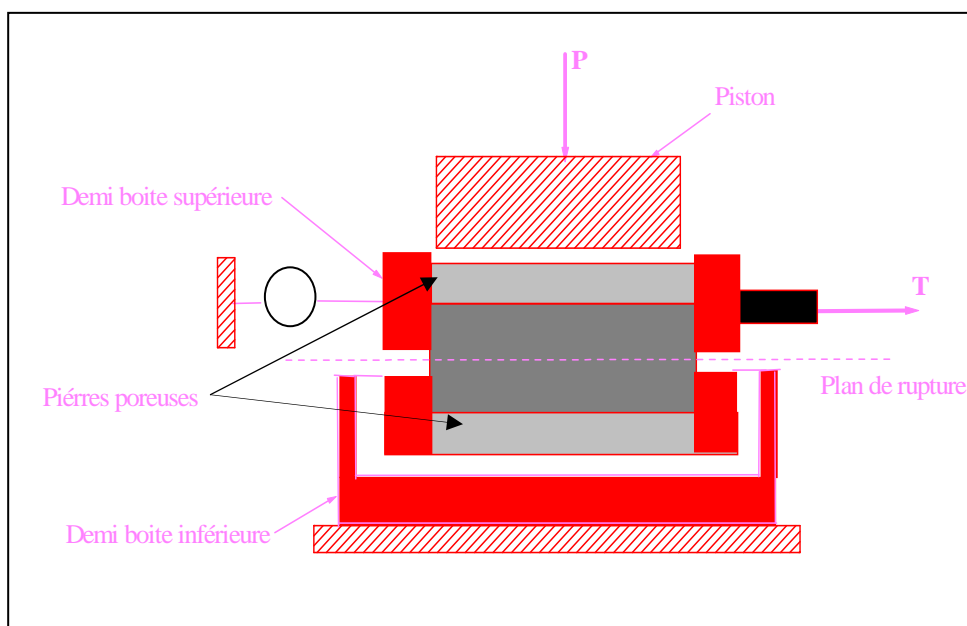


Figure II.2 : Coupe transversale de l'appareil de cisaillement direct, [12]

Chapitre III

Caractérisation Des sols utilisés

III.1 IDENTIFICATION DES SOLS

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

III.2 CARACTERISATIONS DES MATERIAUX

III. 2.1 Echantillonnage

III. 2.1.1 Argile

Pour mener cette investigation, on a procédé à étudier trois types de sol: Le premier sol (TG) est l'argile locale de Touggourt, en vue de son intégration comme matière première dans le procédé de fabrication de la céramique, le deuxième sol (GA) est l'argile de Gare Aomar (région de Bouira) et le troisième sol (TM) est l'argile de Timgad (région de Batna). Ces deux argiles sont déjà utilisées dans le procédé de fabrication de la céramique.

III.2.1.2 Matières non plastiques

Les matériaux non plastiques utilisées dans notre étude peuvent être divisés en deux classes:

- le dégraissant: Sable de Boussaâda.
- Les fondants: Le feldspath et Tufs de Thénia.

III. 2.1. 3 L'eau

L'eau utilisée dans cette étude est une eau qui provient de la nappe albienne de Touggourt. Elle est utilisée pour assurer la bonne dispersion de la barbotine; l'eau douce est utilisée pour l'émaillage.

III. 2. 2 Caractérisation physico-chimique des matériaux

Le programme expérimental consiste à effectuer une série d'essais pour déterminer un bon nombre de paramètres et d'indices permettant l'identification des matériaux.

- Concernant l'identification des argiles, l'étude expérimentale comprend les analyses et les essais suivants :
 - Analyses minéralogiques.

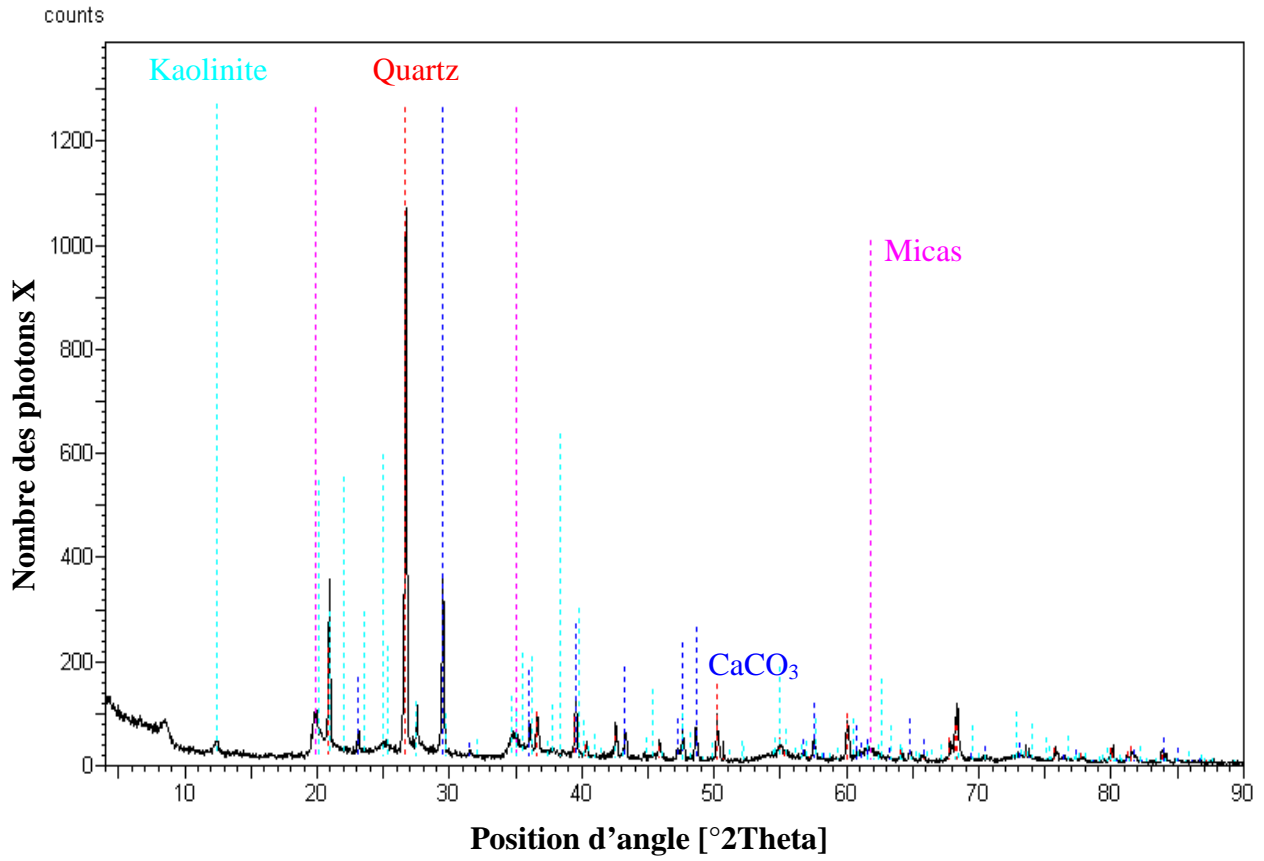
- Analyses chimiques.
 - Essais au bleu de méthylène
 - Analyses granulométriques.
 - Les limites d'Atterberg.
- Concernant l'identification des fondants et dégraissants, l'étude expérimentale comprend les analyses suivantes :
- Analyses minéralogiques.
 - Analyses chimiques.
- Les essais menés sur les biscuits avant et après séchage sont d'ordre minéralogique.
- Les résultats d'une analyse chimique de l'eau utilisée, effectué par E.P.D.E.M.I.A de Laghouat (Annexe IV).
- Enfin, on donne les résultats de la caractérisation mécanique.

III. 2.2.1 Les argiles

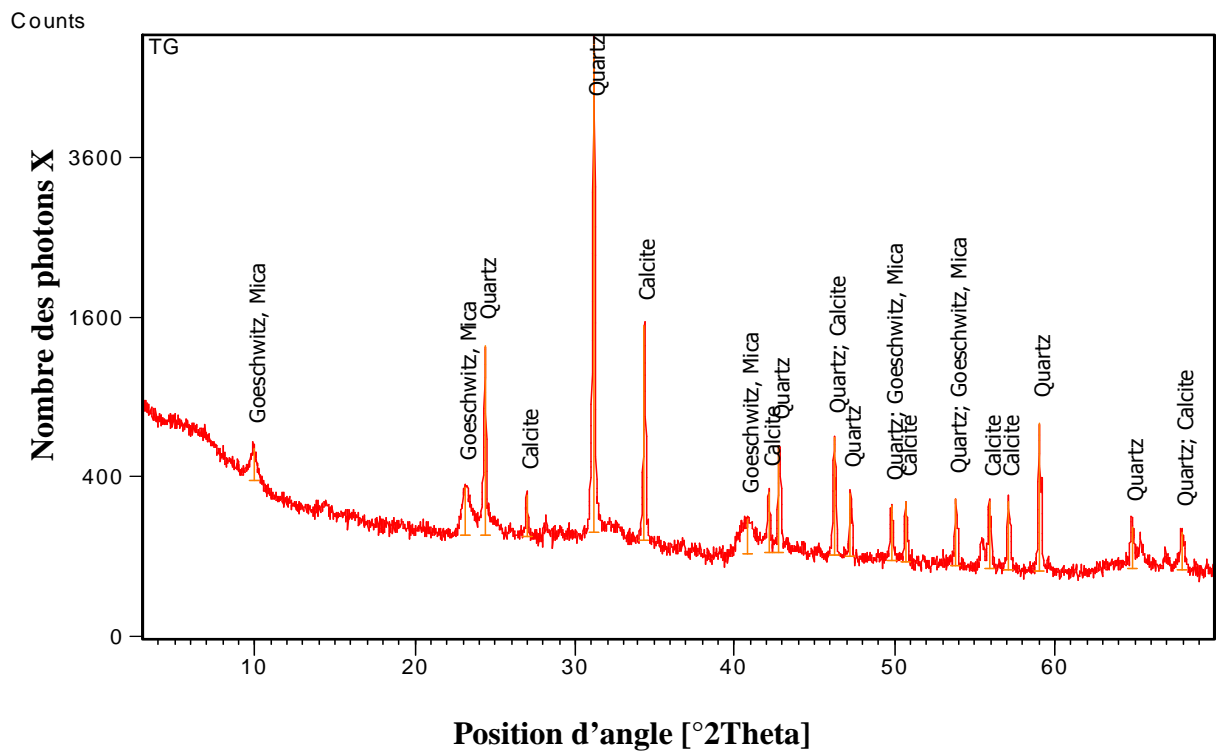
Pour les argiles, on peut citer les analyses suivantes :

III. 2.2.1.1 Analyse minéralogique

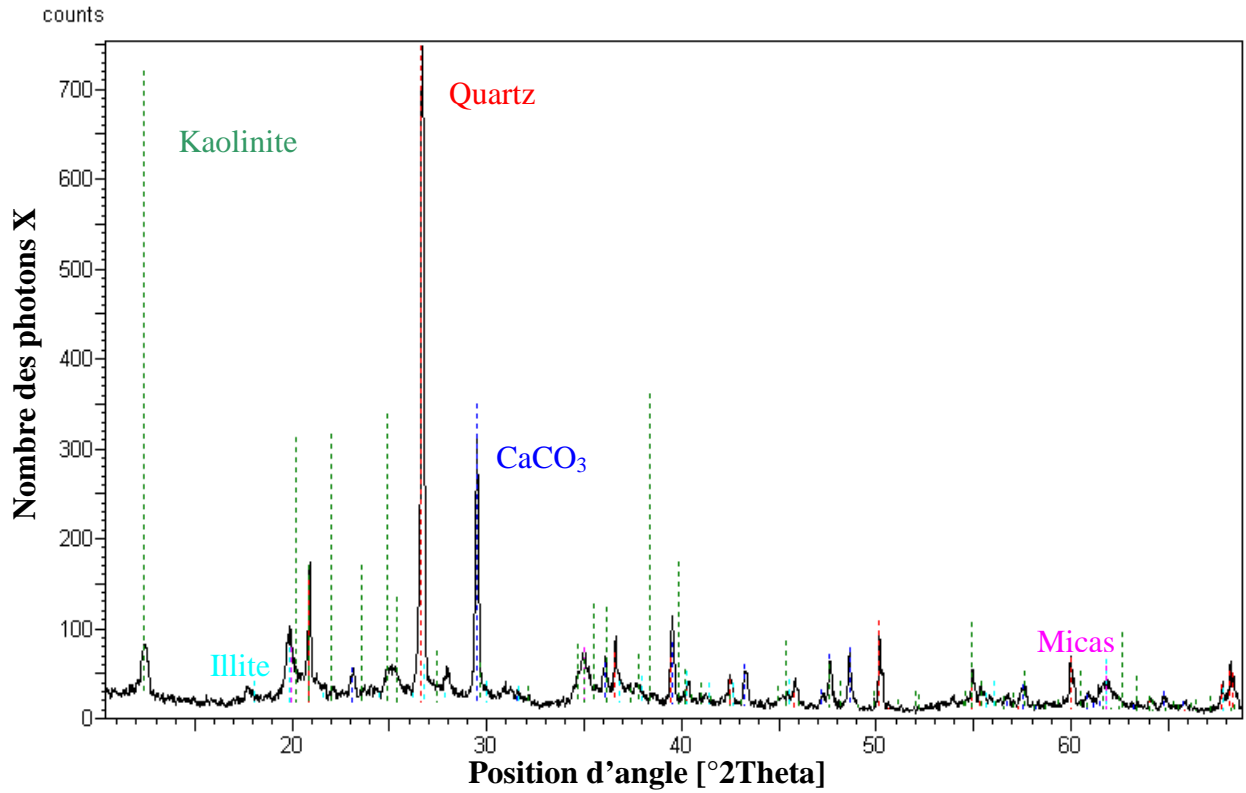
Un diffractomètre aux rayons X a été utilisé pour déterminer les différents minéraux constituant l'échantillon. L'appareil utilisé est un diffractomètre (X'PERT PRO de l'université Laghouat et PHILIPS-binary de INRST Tunis) couplé à un système informatique, permettant le traitement des résultats obtenus ainsi que le tracé des spectres. Les premières analyses en lieu au laboratoire de physique de l'université Amar Thlidji Laghouat, les résultats sont représentés par les spectres du figure III.1 (A1, B1, C1), une deuxième analyse au laboratoire des procédés physico-chimique INRST Tunis, les résultats de cette deuxième analyse sont représentés dans la figure III.1 (A2, B2, C2). On aussi procédé a l'analyse minéralogique des argiles après cuisson, Les résultats de ces analyses sont présentés dans la figure III.2 (A, B, C).



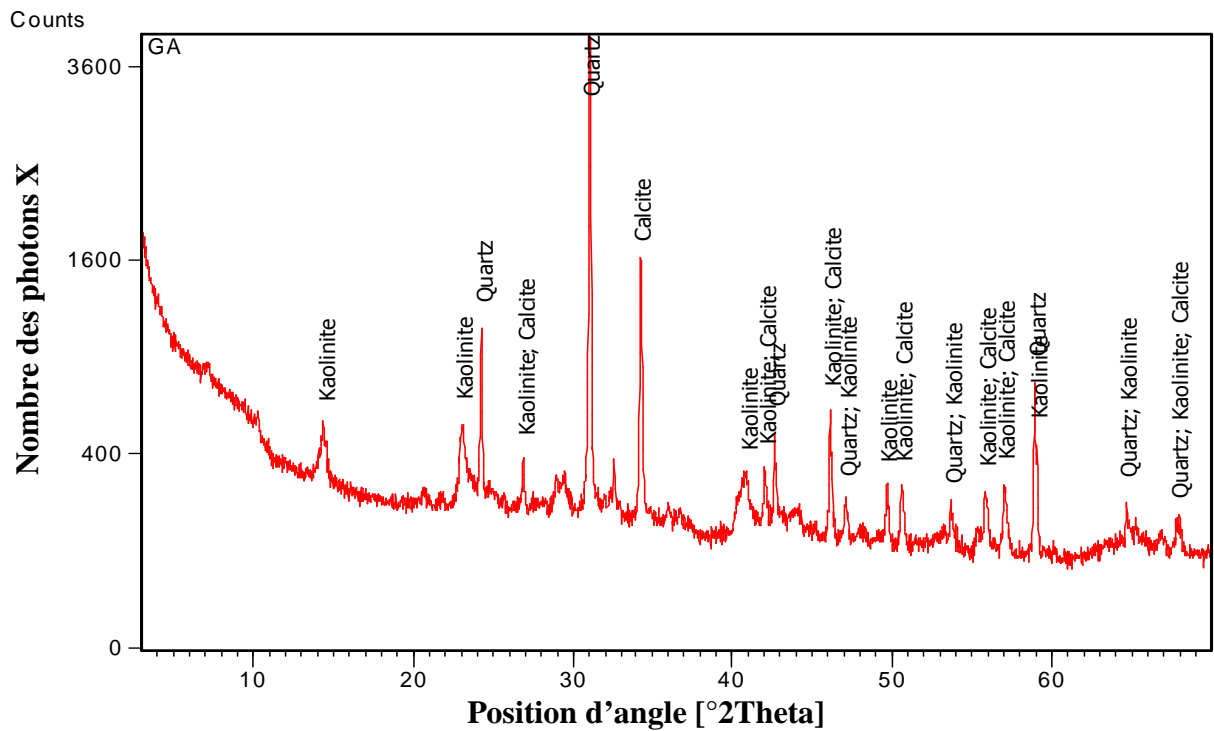
A1) Sol TG



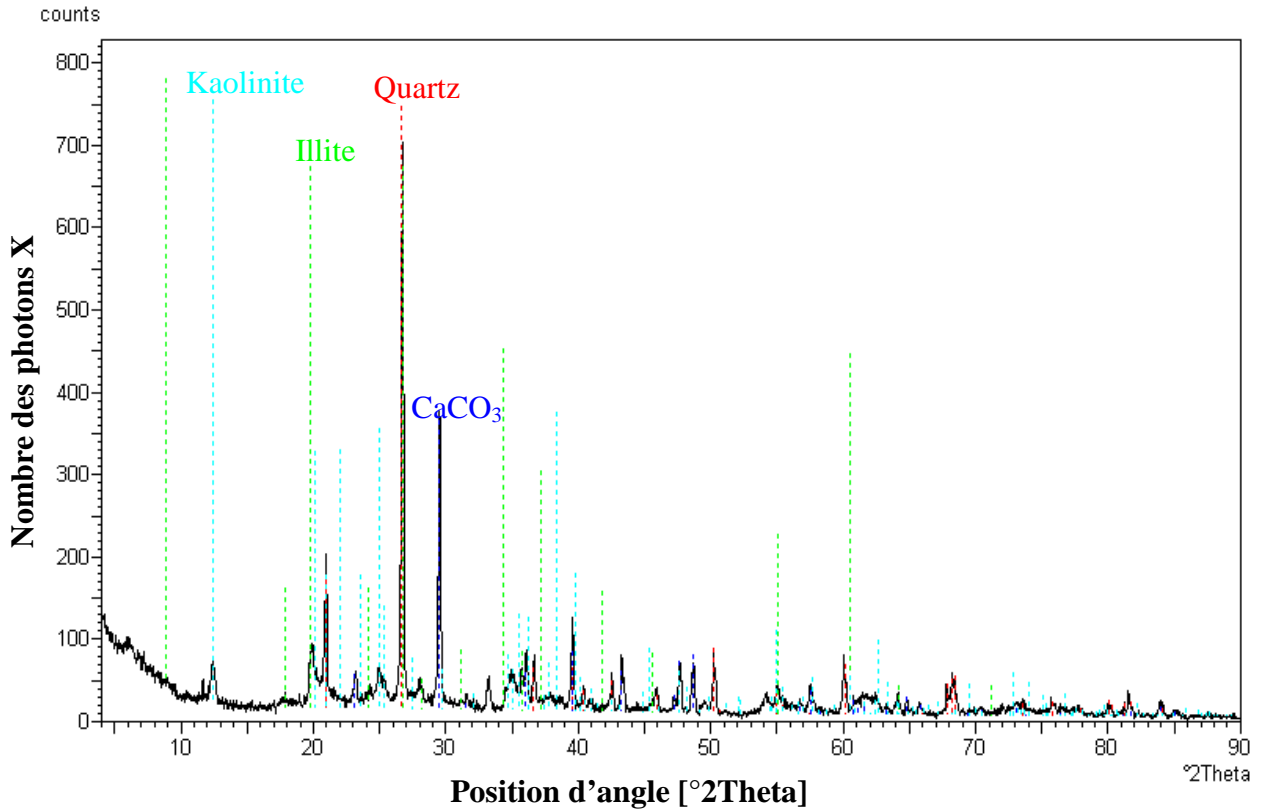
A2) Sol TG



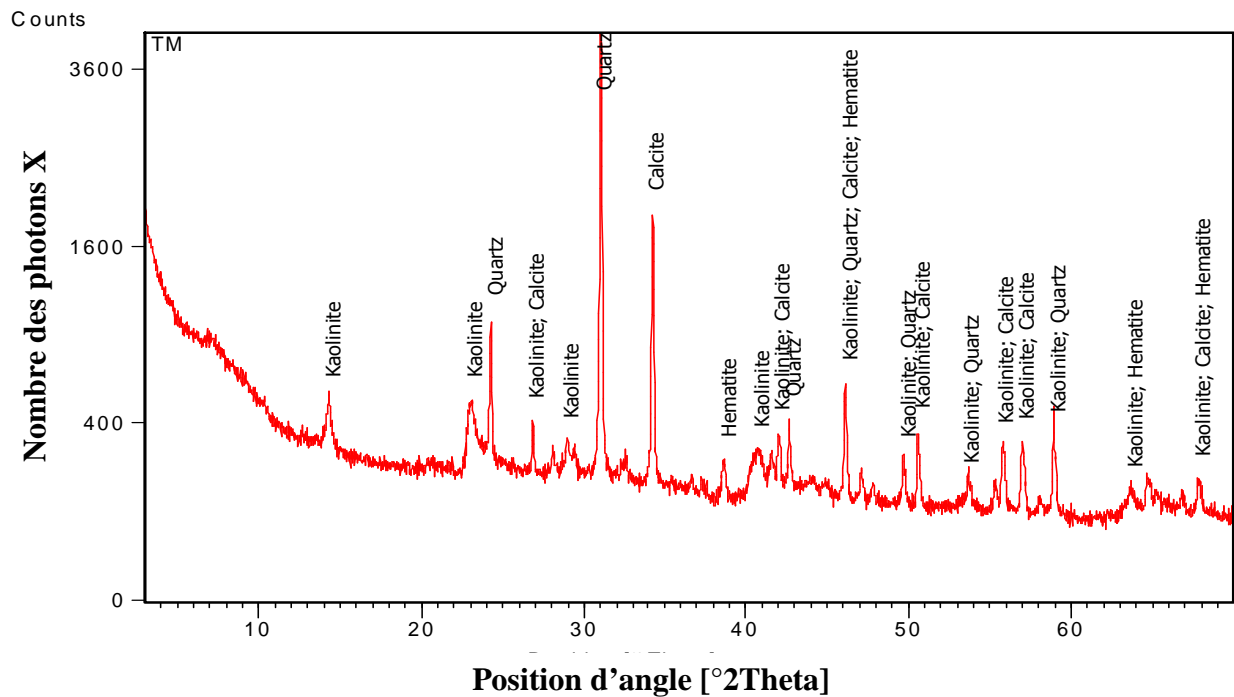
B1) Sol GA



B2) Sol GA



C1) Sol TM



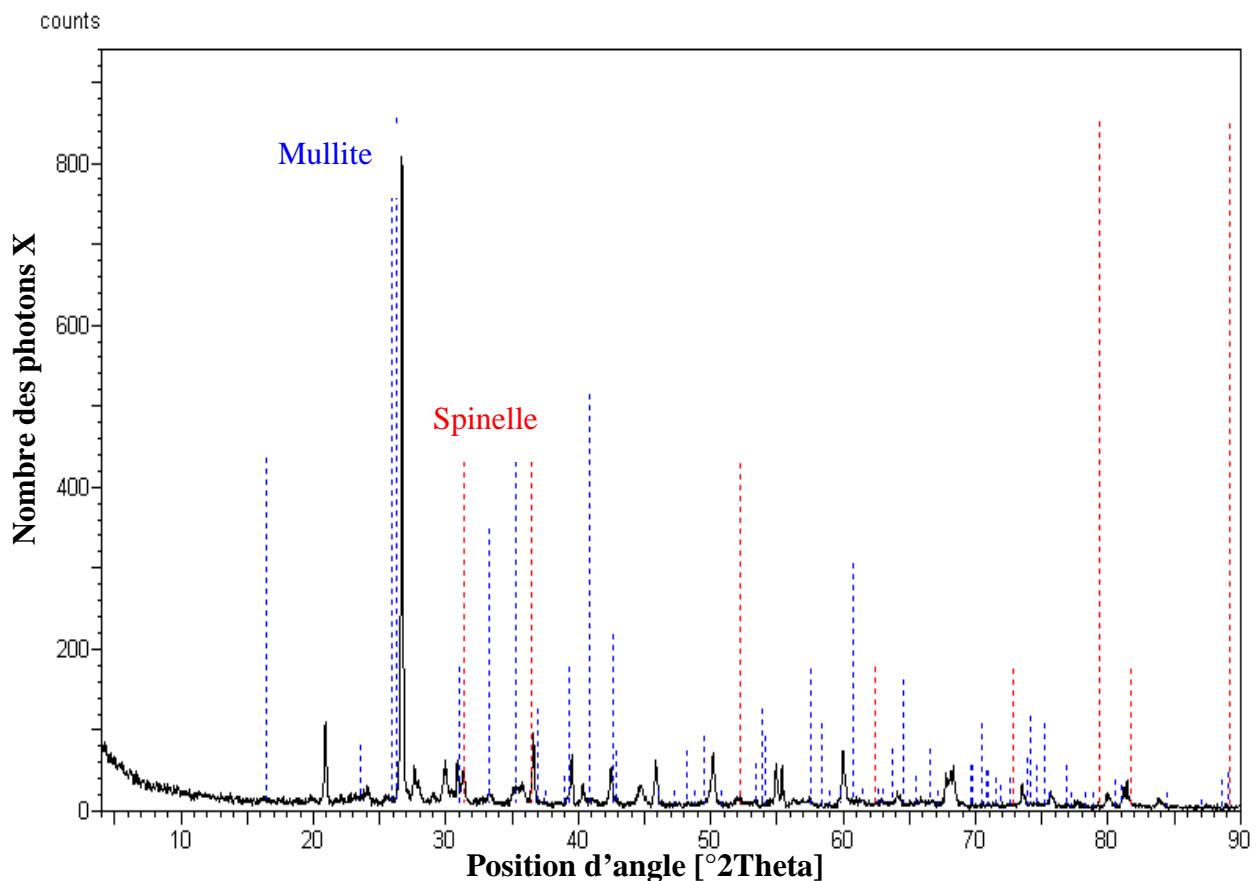
C2) Sol TM

Figure III.1 : Analyse minéralogique des argiles

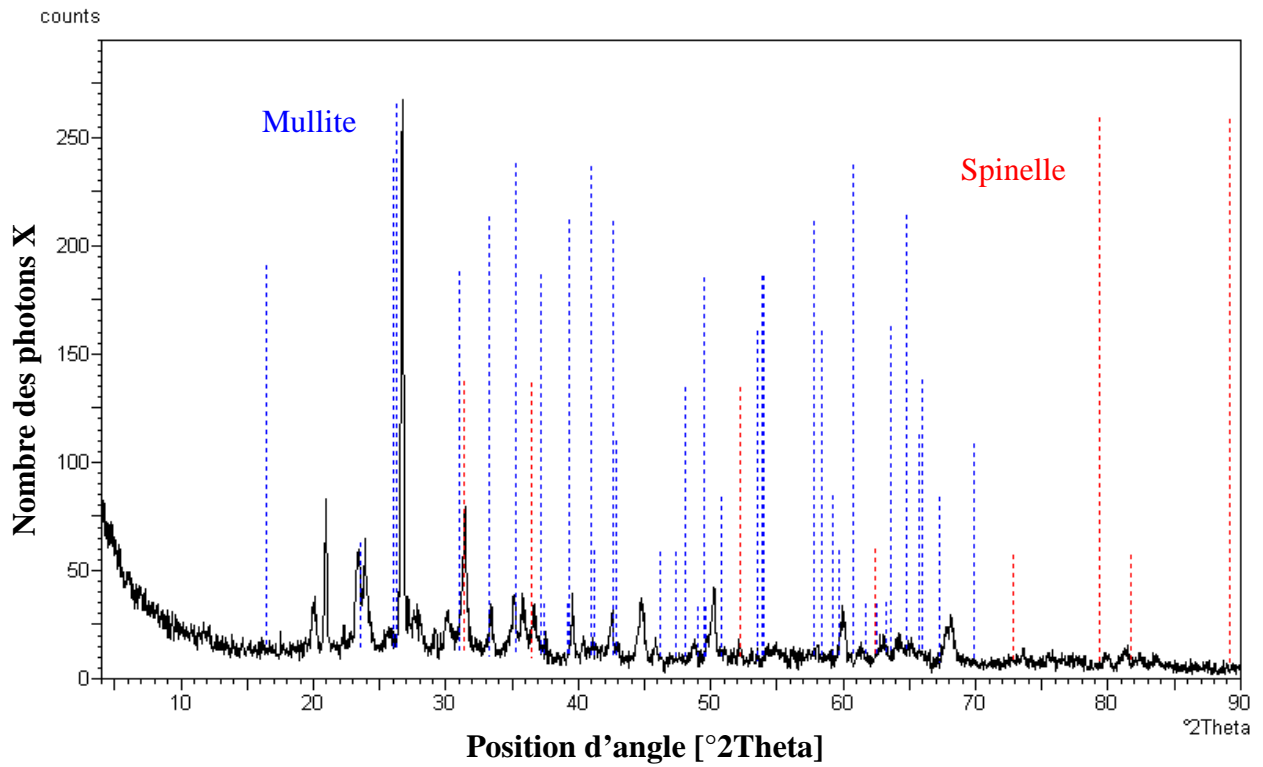
Kaolinite: $Al_2Si_2O_5(OH)_4$; **Illite:** $2K_2O.3MgO.Al_2O_3.24SiO_2.12H_2O$; **Quartz:** SiO_2 ; **Calcite:** $CaCO_3$; **Micas:** $K.Mg.Fe.Al.Si.O.H_2O$; **Geoschwitz, Mica :** $K.Mg.Fe.AlSiO_2.H_2O$; **Hématite :** Fe_2O_3 .

❖ Discussion

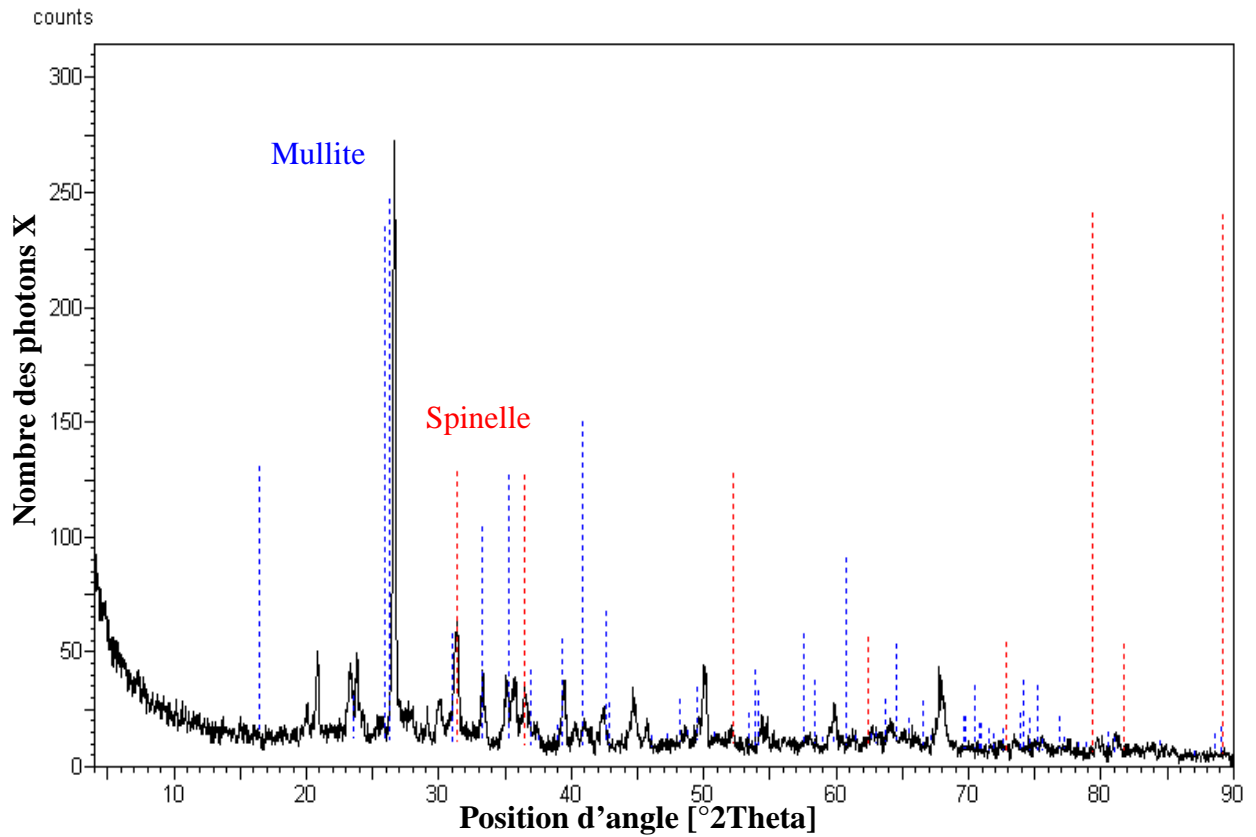
Les analyses diffractométriques par X'PERT PRO faites à Laghouat révèlent que les argiles de gare Aomar et Timgad présentent des mélanges d'illite- kaolinite, avec la présence de calcite et du quartz, en plus, cette analyse montre que l'argile de Gare Aomar contient un pourcentage de Micas. L'argile de Touggourt présente un fort pourcentage en Kaolinite avec l'absence de l'illite et la présence des traces de Micas, en quartz et de calcite. Tandis que les analyses diffractométriques faites à Tunis par PHILIPS-binary donnent les mêmes résultats pour les argiles de Gare Aomar et Timgad avec l'absence de l'illite, pour ce qui concerne l'argile de Touggourt on a trouvé de la Goeschwitz au lieu du Kaolinite. Les argiles de Gare Aomar et Timgad ont tendance de gonfler plus que l'argile de Touggourt, ceci est dû à présence de l'illite. Ces résultats devront être confirmés par d'autres analyses plus détaillées.



A) sol TG cuit



B) sol GA cuit



C) sol TM cuit

Figure III.2 : Analyse minéralogique des argiles cuites (920°C)

Mullite : $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$; Spinelle : Al_4Si .

❖ Discussion

Les analyses diffractométriques révèlent que les argiles après cuisson, présentent des mélanges de mullite-spinelle, ceci est dû à la transformation de la kaolinite lors du chauffage.

III. 2.2.1.2 Analyse chimique

L'analyse chimique des échantillons effectués au niveau du laboratoire SETIM de Boumerdes, a donné les résultats qui sont regroupés dans le tableau III.1

Tableau III.1 : Analyse chimique des argiles

Composition (%) sols	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Perte au feu
	TG	68,02	11,44	4,26	2,94	0	1,83	0,75	0,34	
GA	49,96	15,35	6,11	9,86	0,76	2,15	0,08	0,34	2,01	12,88
TM	49,65	15,32	6,27	8,87	0,84	2,31	0,49	0,66	3,24	11,56

Remarque:

Perte au feu = matière organique + eau de combinaison.

❖ Discussion

D'après ces résultats, les principaux constituants minéralogiques sont : la silice et l'alumine: ces deux éléments constituent la structure des argiles. En plus, on remarque que le pourcentage de SiO₂ pour les trois sols est supérieur ou égal à 50%, ce qui montre la présence du sable dans ces argiles. Ce pourcentage est largement inférieur à 80%, vis à vis des sols non gonflants qui ont une teneur en silice supérieure à 80% [14]: ces argiles ont donc une tendance au gonflement. La présence du potassium K dans les trois types de sol montre que les sols contiennent de l'illite.

III. 2.2.1.3 Essai au bleu de méthylène

Une relation entre la surface spécifique totale (Sst) et la valeur de bleu de la phase argileuse V_B a été mise en évidence par Gaillabaud et Cinot (1982) [12] :

$$Sst=21 V_B \dots \dots \dots III.1$$

La figure III.3 représente le mode opératoire de l'essai au bleu de méthylène.

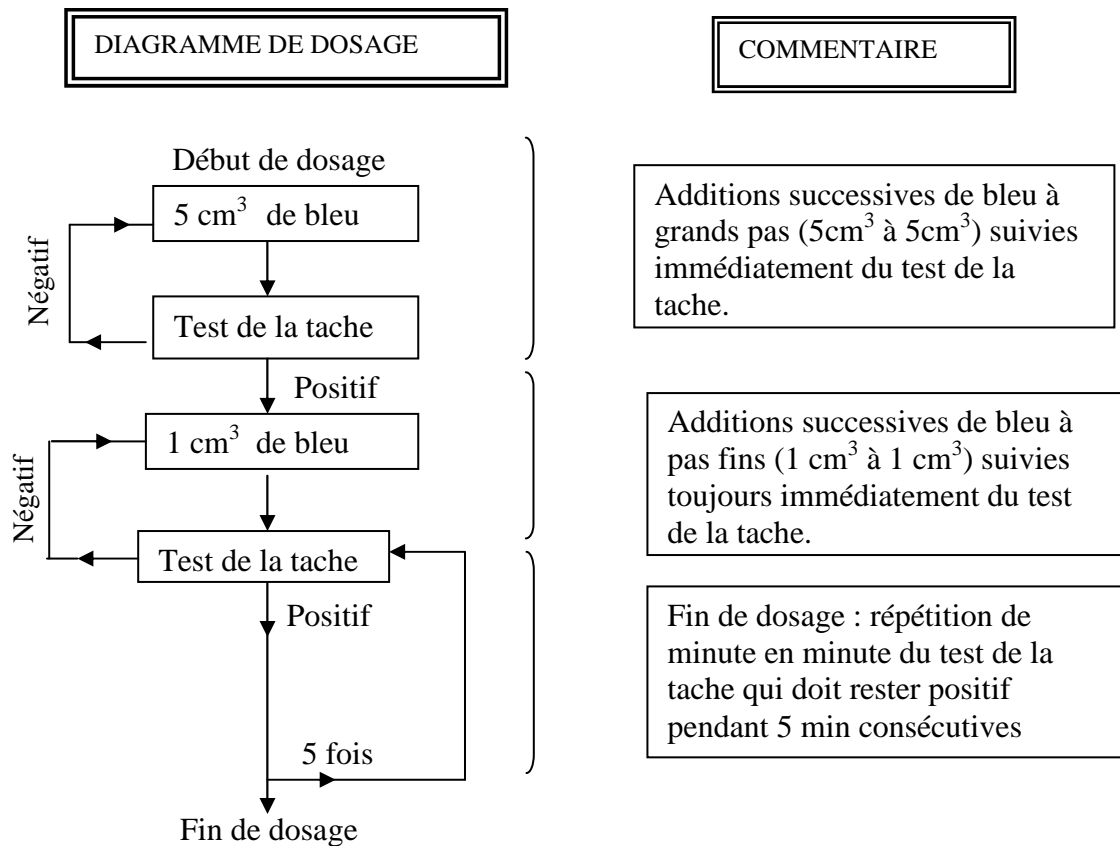


Figure III.3 : Schéma synoptique du processus opératoire de l'essai du bleu à la tâche (Shaeffner.1989 ; cité par Bengraa 2004, [2])

Les résultats de cet essai sont regroupés dans le tableau III.2

Tableau III.2 : Résultats de l'essai au bleu de méthylène et surface spécifique totale

sols	V _B	Sst (m ² /g)
TG	< 1	< 21
GA	2	42
TM	3	63

❖ Discussion

D'après la classification de Lautrin(1987, [12]) (chapitre I, tableau I.2), basée sur la surface spécifique totale, les argiles de Timgad et celles de Gare Aomar présentent un mélange entre les minéraux Illite et Kaolinite, tandis que l'argile de Touggourt contient un fort pourcentage en Kaolinite.

III. 2.2.1.4 Analyse granulométrique

L'essai a pour but de déterminer en poids, la distribution des particules des sols suivant leurs dimensions. Les résultats de l'analyse granulométrique des sols sont regroupés dans la figure III.4.

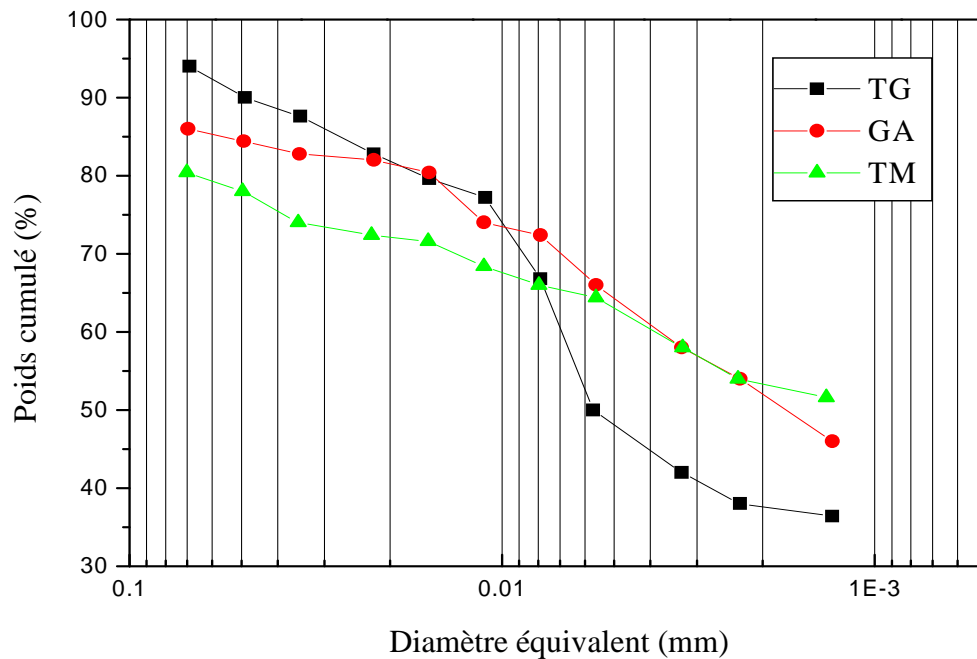


Figure III.4 : Courbes granulométriques des trois sols

A partir de ces courbes, on peut en déduire le pourcentage des particules dont le diamètre est inférieur à $2\mu\text{m}$ (tableau III.3).

Tableau III.3: pourcentage des particules $< 2\mu\text{m}$

Sols (Argiles)	% de grains $< 2\mu$
TM	53,30
GA	51,91
TG	37,61

❖ Discussion

L'analyse granulométrique révèle que le sol de Touggourt est moins argileux que ceux des autres sols. Ces résultats vont être confirmés par la classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande.

III. 2.2.1.5 Les limites d'Atterberg

Par définition, les limites d'Atterberg sont des teneurs en eaux pondérales caractéristiques du sol, elles correspondent à des comportements particuliers. Ces limites déterminées sur la fraction du sol passant à travers des tamis de 400 μ m.

Les limites utilisées sont :

- a) Limite de liquidité notée w_L (norme NF P 94-050) [1])
- b) Limite de plasticité notée w_P (NF P 94-054) [1])
- c) Indice de plasticité.

Les résultants sur les limites de consistances des sols sont regroupés dans le tableau III.4.

Tableau III.4 : Paramètres physiques des argiles étudiées

Paramètres Sols	w_L (%)	w_P (%)	I_P
TG	32,06	17,92	14,14
GA	44,81	19,36	25,45
TM	52	22,68	29,32

Pour déterminer les états des argiles utilisées, portant les résultats obtenus sur le diagramme de Casagrande (Figure III.5) en fonction de la limite de liquidité et l'indice de plasticité (tableau III.5)

Tableau III.5 : Présentation des résultats portés sur le diagramme de Casagrande

Sols	Etat de l'argile
TG	Peu Plastique, Moyennement argileux
GA	Plastique, argileux
TM	Très plastique, argileux

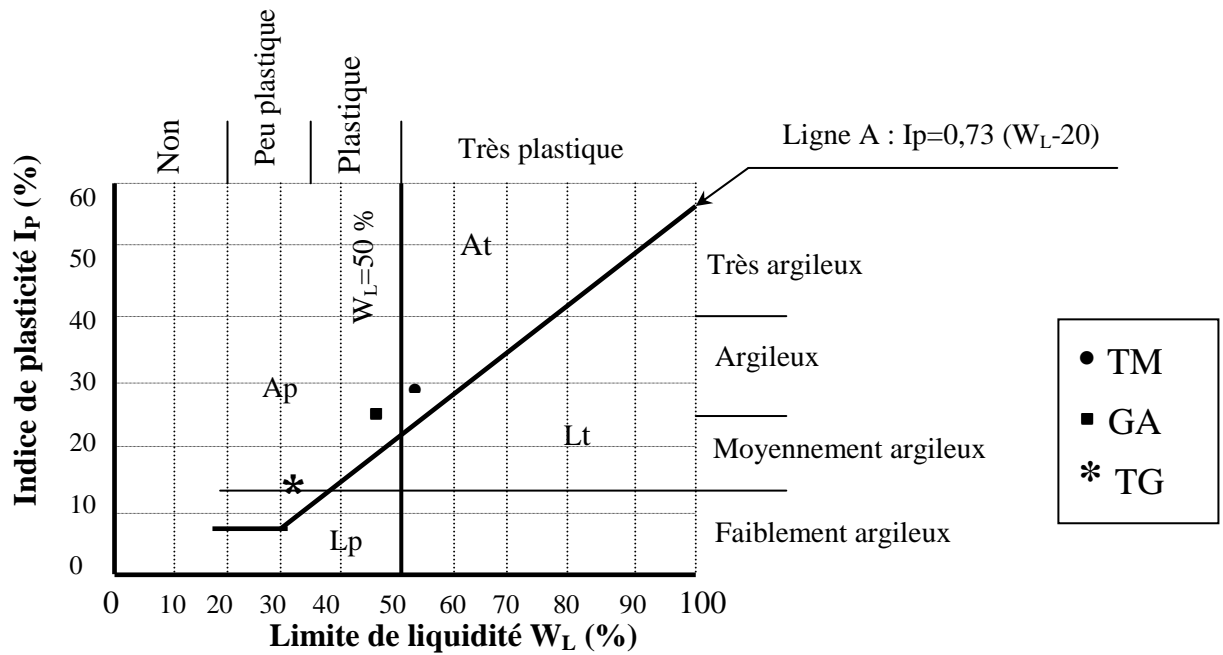


Figure III.5 : Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande (Philipponnat et Hubert.1997, [22])

Avec :

At : argiles très plastiques.

Ap : argiles peu plastiques.

Lt : limons très plastiques.

Lp : limons peu plastiques.

D'après les définitions citées dans le chapitre I, paragraphe I.1.3.4, on peut déterminer l'activité des échantillons suivant les deux formules proposées par Skempton (1953) et Seed (1962) [12].

Les résultats sont présentés dans le tableau III.6.

Tableau III.6 : Activités des argiles étudiées

Sols	A1 (Skempton)	A2 (Seed)
TG	0,37	0,43
GA	0,49	0,54
TM	0,55	0,60

Sur la base de ces résultats, et d'après la classification de Skempton, on peut déterminer le minéral prédominant dans la matrice argileuse.

Tableau III.7 : Nature des sols d'après la classification de Skempton

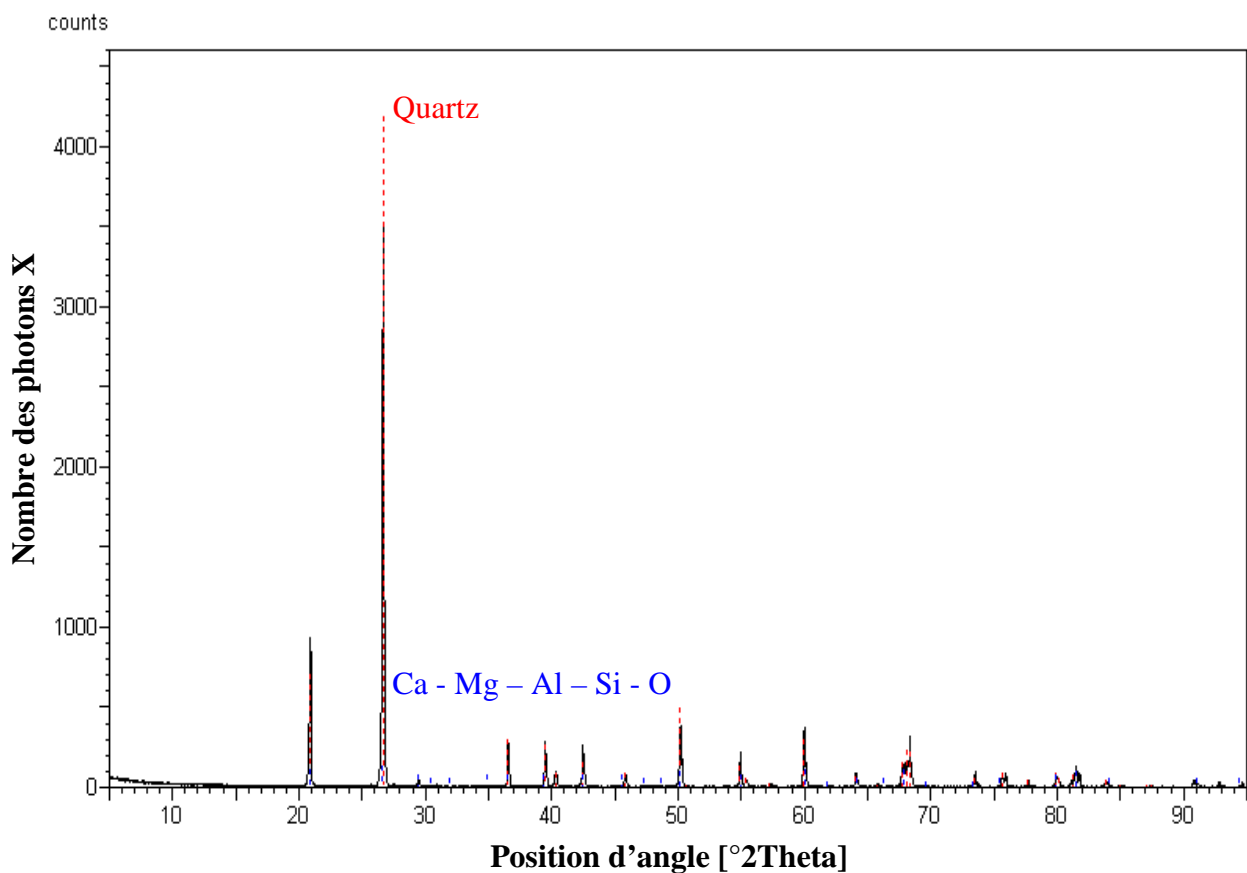
Sols	Minéral
TG	Kaolinite
GA	Kaolinite
TM	Illite

D'après la classification de Skempton, le minéral prédominant dans l'argile de Touggourt et celle de Gare Aomar est la Kaolinite tandis que pour l'argile de Timgad le minéral prédominant est l'illite

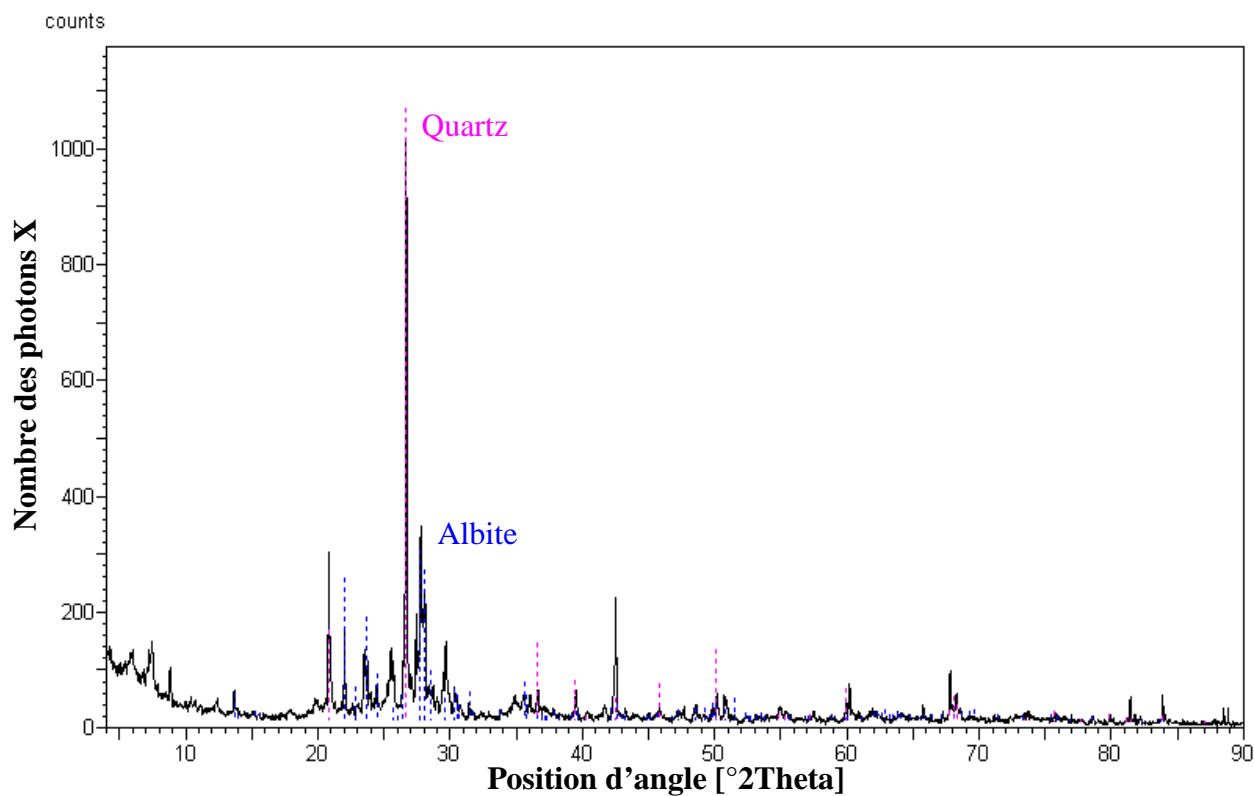
III.2.2.2 Matériaux non plastiques

III. 2.2.2.1 Analyse minéralogique

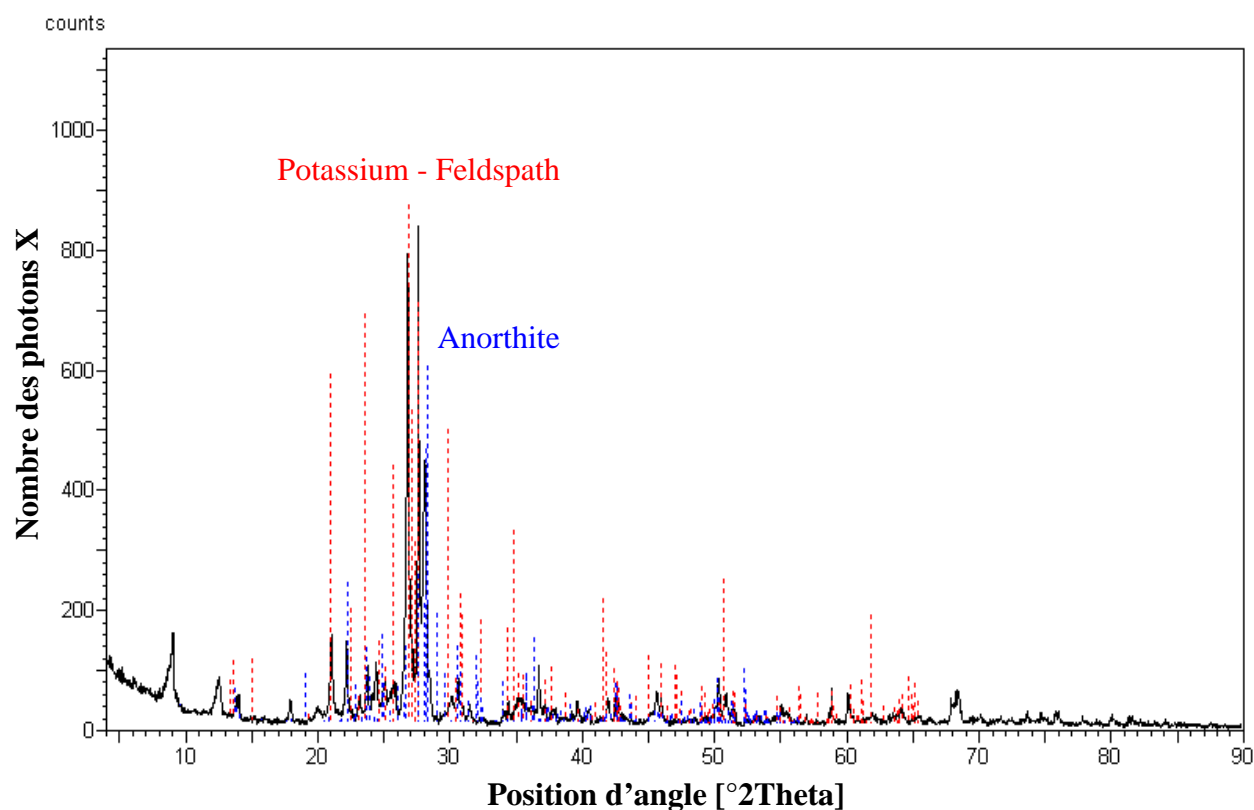
De même que les argiles, l'analyse au diffractomètre à rayons X a été utilisée pour déterminer les différents minéraux constituant les matériaux non plastique. Ces analyses sont présentées dans la figure III.6.



a) **Sable de Boussaâda**



b) Tufs de Thénia



c) Feldspath

Figure III.6 : Analyse minéralogique des matériaux non plastiques

Quartz: SiO_3 ; Albite: $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$; Anorthite: $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$; Potassium – Feldspath: KAlSi_3O_3 .

❖ Discussion

Les analyses diffractométriques révèlent que, le feldspath présente des mélanges de potassium- feldspath, avec la présence d'orthoclase, en plus, cette analyse montre que le tufs de Thénia contient un mélange de quartz et d'allite, on constate aussi que le tufs de Thénia appartient à la famille de feldspath. Le sable de Boussaâda contient du quartz avec la présence de traces des éléments Ca, Mg, Al, Si et O.

III. 2.2.2.2 Analyse chimique

L'analyse chimique des échantillons est regroupée dans le tableau III.8.

Tableau III.8 : Analyse chimique des matériaux non plastiques

Composition (%) Composés	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Perte au feu
	Feldspath	72,43	14,36	2,05	0,48	0,36	0,2	0	2,5	
Sable de Boussaâda	95,1	1,34	0,41	0,95	0,12	0,12	0	0,04	0,45	1,22
Tufs de Thénia	63,36	16,4	4,24	3,25	0	1,45	1,03	2,34	3,28	3,19

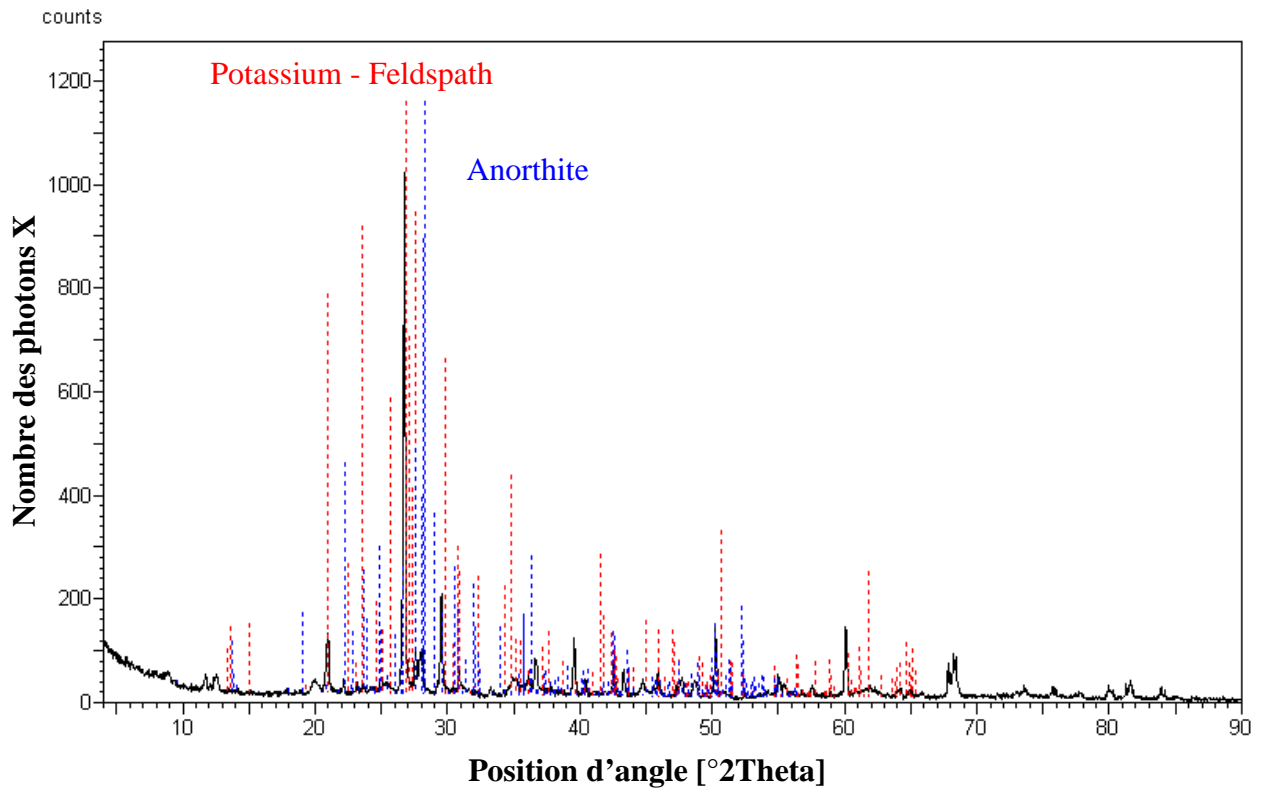
❖ Discussion

D'après ces résultats, les principaux constituants minéralogiques sont : la silice et l'alumine. Pour le feldspath et tufs de Thénia, on remarque que le pourcentage en SiO₂ est supérieur à 50%, ceci montre la présence du sable. En plus, le pourcentage de SiO₂ pour le sable de Boussaâda est supérieur à 80%, ce qui nous permet d'affirmer que le sable de Boussaâda est un sable siliceux.

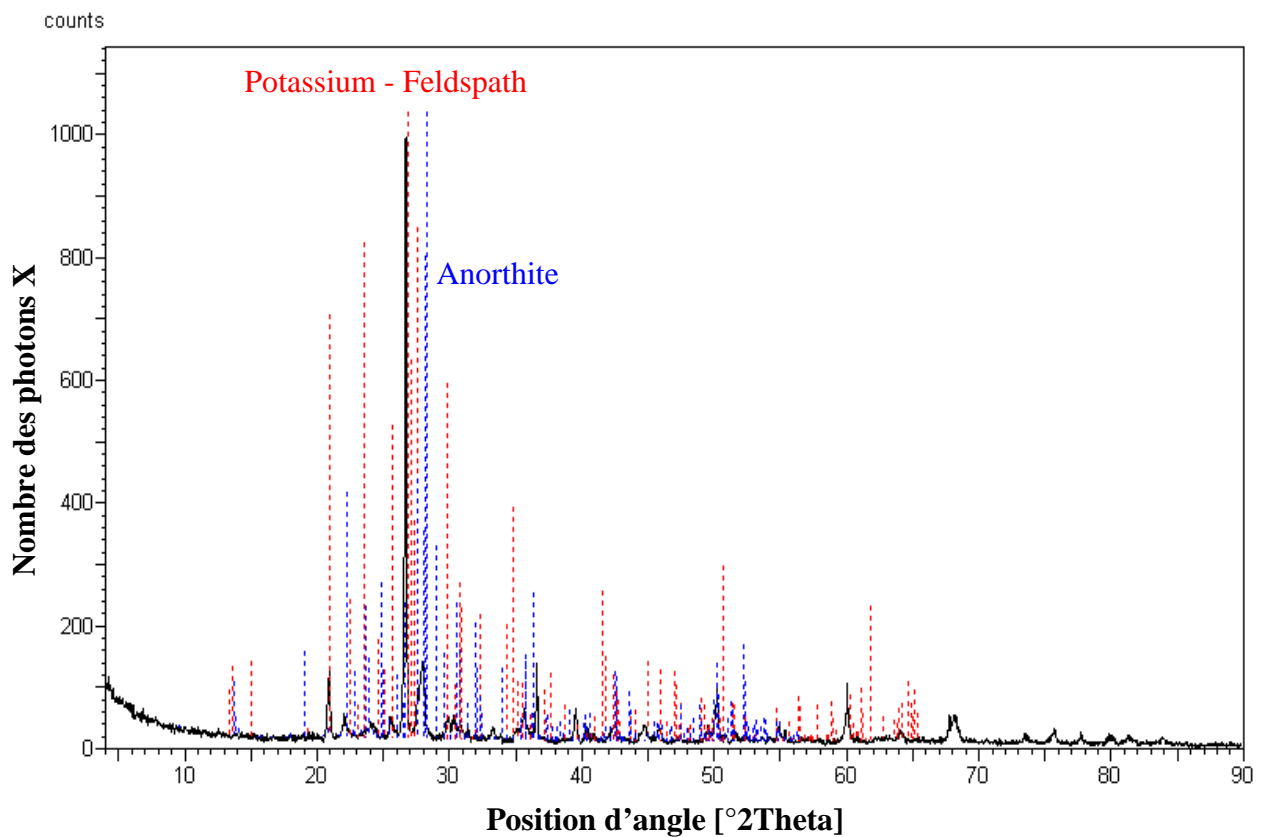
III.2.2.3 Carreaux céramiques

III. 2.2.3.1 Analyse minéralogique

Les résultats de ces analyses sont présentés dans la figure III.7.



a) Carreau avant séchage



b) Carreau après séchage

Figure III.7 : Analyse minéralogique des carreaux céramiques

❖ Discussion

On constate d'après les analyses diffractométriques que le feldspath est toujours présent dans les carreaux céramiques.

III.2.3 Caractérisation mécanique

III.2.3.1 Potentiel de gonflement

III.2.3.1.1 Mesure indirecte du potentiel de gonflement

Après avoir effectué les essais d'identifications qui représentent des paramètres et indices de classification selon plusieurs auteurs, les trois sols considérés dans cette étude sont classés comme suit :

- Classifications selon un seul paramètre.
- Classifications selon deux paramètres.

III.2.3.1.2 Classifications selon un seul paramètre

Tableau III.9 : Classification du potentiel de gonflement selon un seul paramètre

Les auteurs	Paramètres	TG	GA	TM
Snethen et al (1977) [12]	I_p	BAS	MOYEN	MOYEN
Snethen et al (1977) [12]	W_L	FAIBLE	MOYEN	ELEVE

III.2.3.1.3 Classifications selon deux paramètres

Tableau III.10 : Classification du potentiel de gonflement selon deux paramètres

Les auteurs	Paramètres	TG	GA	TM
Snethen et al (1977) [12]	I_p, W_L	FAIBLE	MOYEN à ELEVE	MOYEN
Snethen et al (1977) [12]	$R_p = I_p / W_p$	MOYEN	ELEVE	ELEVE
O'neil et Poormoayed (1980)	W_L, I_p	FAIBLE à MOYEN	MOYEN à ELEVE	ELEVE

❖ Discussion

D'après ces classifications, nous pourrions donner les interprétations suivantes :

- Les argiles de Timgad et de Gare Aomar ont un potentiel de gonflement supérieur à celui de l'argile de Touggourt.
- Les sols de Gare Aomar (GA) et de Timgad (TM), présentent un potentiel de gonflement moyen.
- Les classifications ne donnent pas la même identification pour la même argile, car elles ne sont pas basées sur les mêmes paramètres.

III.2.3.1.5 Présentation des résultats des potentiels de gonflement

Les résultats de gonflement en fonction du temps, pour les trois argiles, sont présentés sur la figure III.8.

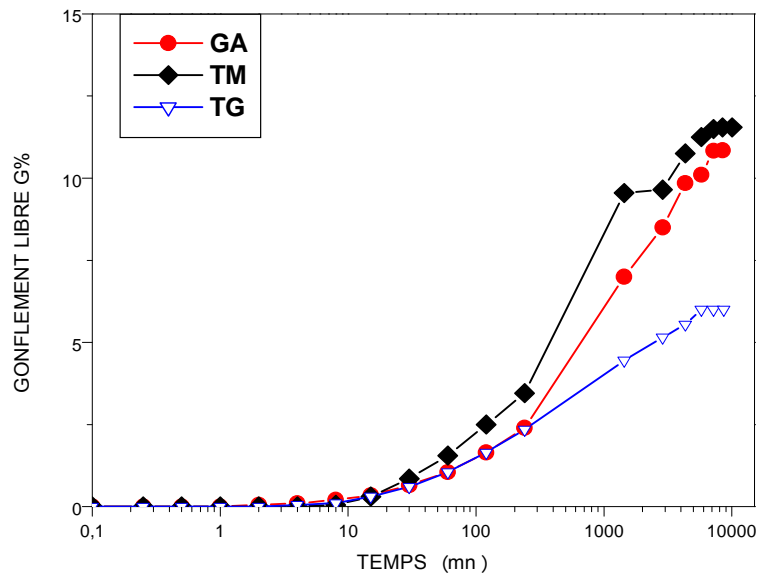


Figure III.8 : Evolution du gonflement en fonction du temps

❖ Discussion

D'après ces résultats des essais de gonflement sur les trois sols testés, on peut conclure :

- Les résultats de la mesure directe du taux de gonflement pour les trois sols, montrent que, le sol TM a présenté un taux de gonflement élevé. Les sols GA et TM, présentent un potentiel de gonflement total presque le même; ce qui est en accord avec les mesures indirectes basées sur les paramètres d'identification.
- Les courbes de gonflement libre présentent deux phases distincts, la première où le gonflement est rapide (gonflement primaire), la deuxième phase, où le gonflement est lent (gonflement secondaire), ce qui est en accord avec les résultats présentés par différents auteurs dans la littérature [16], [5].

III.2.3.2 Résistance au cisaillement

L'objectif de cette partie expérimentale est la détermination des paramètres de résistance aux cisaillements pour les différents sols, qui sont l'angle de frottement interne et la cohésion.

L'essai utilisé pour la détermination de ces paramètres est l'essai de cisaillement direct, cas d'essai non consolidé non drainé noté par U.U (non consolidé non drainé).

III.2.3.2.2 Mesure des paramètres de cisaillement

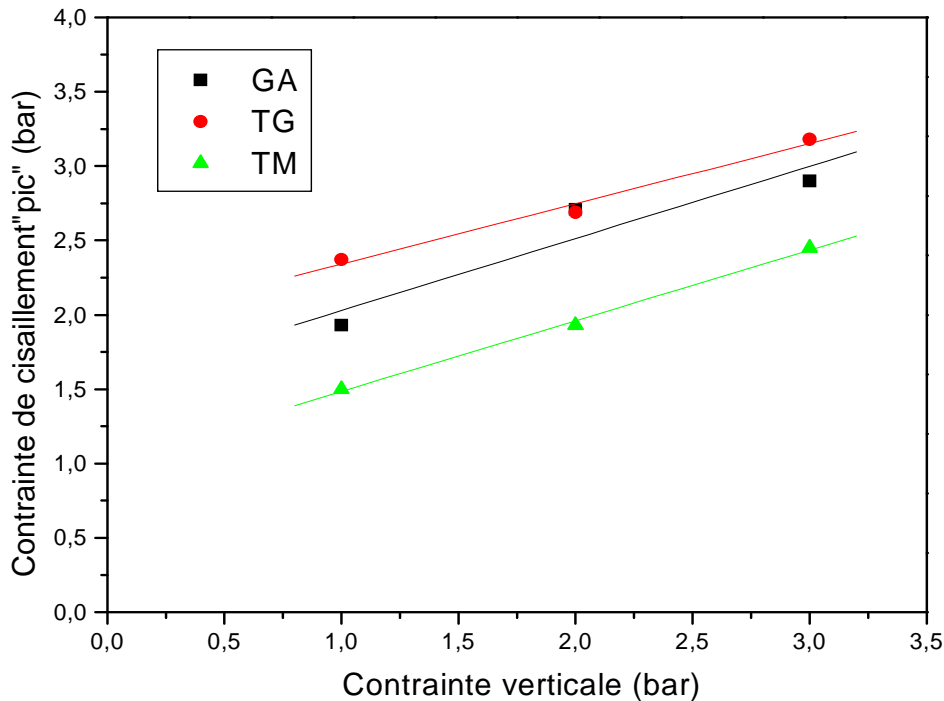


Figure III.9 : Courbe intrinsèques pour les argiles

A partir des courbes de la figure III.9, les valeurs des paramètres de résistance aux cisaillements (angle de frottement ϕ et cohésion C) pour les trois argiles sont résumés dans le tableau III.11.

Tableau III.11 : Paramètres de résistance aux cisaillements des argiles

Paramètres \ Argile	τ_{1pic} (bar)	τ_{2pic} (bar)	τ_{3pic} (bar)	ϕ°_{pic}	C_{pic} (bar)
TG	2,37	2,69	3,18	22	1,9
GA	1,93	2,71	2,90	25	1,5
TM	1,50	1,93	2,45	25	1,0

❖ Discussion

D'après les résultats obtenus, on peut constater que l'argile de Touggourt est plus résistante que les autres argiles.

III.3 CONCLUSION

Plusieurs conclusions ont été tirées de ce travail :

➤ Caractéristiques physiques

- D'après les résultats trouvés, on remarque que la limite de liquidité (w_L) de l'argile de Touggourt est plus petite que celle des autres types de sol, ce qui nous indique que le taux de particules fines ($C_2 < 2\mu\text{m}$) est plus petit que des autres types d'argiles. Ceci a été confirmé par la granulométrie (sédimentométrie) où l'on trouve $C_2 = 37,61\%$.
- Sur la base des résultats des essais des limites d'Atterberg, le sol de Timgad est classé parmi les sols argileux très plastiques, et par conséquent ce sol a tendance à gonfler plus que les autres sols. Ce résultat a été confirmé par l'analyse mécanique (potentiel de gonflement).

➤ D'après les caractéristiques chimiques :

- L'essai au bleu de méthylène a confirmé les résultats de limite de liquidité (w_L), ce qui nous indique que la surface spécifique total (Sst) et la limite de liquidité sont proportionnelles l'une à l'autre.
- De même pour l'analyse minéralogique, qui nous a montré que le minéral prédominant dans le sol de Touggourt est la Kaolinite. Ceci nous informe que les grains sont plus grands que ceux des autres types de sol (Timgad et Gare Aomar) dû à la présence d'Illite.
- D'après les résultats de l'analyse chimique, le rapport entre SiO_2 et Al_2O_3 ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) dans l'argile de Touggourt est plus grand que celui des autres sols, ce qui montre la présence d'une énorme quantité de sable dans le sol de Touggourt.
- L'analyse minéralogique des matériaux non plastiques a montré que le feldspath et le tuf de Thénia appartiennent à la même famille (fondant), et sable de Boussaada est un dégraissant, en plus le feldspath est toujours présent dans les carreaux céramiques.

➤ Caractéristiques mécaniques

- Pour les essais œdométriques (détermination du potentiel de gonflement) on a remarqué que le sol de Touggourt est moins gonflant que les autres types de sols, ce qui est en accord avec le minéral le plus dominant qui est la Kaolinite.
- Concernant la résistance au cisaillement, le sol de Touggourt est plus résistant, ceci est en accord avec l'analyse minéralogique qui montre la présence du sable dans le sol.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Ce travail une contribution à l'amélioration de l'argile locale en vue de son intégration dans le procédé de fabrication de la céramique. Une étude de la caractérisation des sols argileux de Touggourt, de Timgad et de Gare Aomar a été effectuée chimiquement, physiquement et mécaniquement. Cette caractérisation présente un intérêt important pour l'amélioration de la qualité du produit de point de vue économique (Transport et temps), et qualité (propriétés d'argile).

A l'issue de cette étude, plusieurs conclusions ont été tirées de ce travail :

- L'analyse minéralogique et la classification de Skempton (Activité) révèlent que l'argile de Touggourt est composée majoritairement de Kaolinite. Ce type de minéral est le plus utilisé dans l'industrie de céramique.
- Chimiquement l'argile de Touggourt est un constituant alumino-silicate, et qui est la base de composition des argiles. On peut dire alors que l'argile de Touggourt est admise chimiquement pour le procédé de fabrication de la céramique.
- Le rapport de $\text{Si O}_2 / \text{Al}_2 \text{O}_3$ de l'argile de Touggourt est plus grand que celui des autres types d'argiles, montre qu'il contient du sable, ce qui donne une amélioration globale de la résistance mécanique. La même constatation est obtenue par mesure des paramètres de cisaillement.
- Le comportement thermique de l'argile de Touggourt après cuisson est semblable à celui des argiles de type kaolinite, ceci a été prouvé par l'analyse minéralogique.
- Le potentiel de gonflement obtenu par les deux méthodes indirecte et directe sont très proches, et nous montre que l'argile de Touggourt a le potentiel de gonflement le plus faible que celui des autres argiles. Ceci est dû aux différentes structures de chaque argile, ce qui a été prouvé par l'analyse minéralogique et granulométrique.

- Des essais des limites d'Atterberg, révèlent que le sol de Touggourt est classé parmi les sols argileux peu plastiques, est par conséquent ce sol a tendance à la fusibilité plus que les autres sols.
- Les Feldspath qui a été utilisé comme fondant n'a pas joué son rôle, ce qui a été prouvé par l'analyse minéralogique, car la température de cuisson utilisée par l'unité Maghreb céramique est petite.

Ces résultats sont encourageants, et nous pouvons dire, pour que l'argile de Touggourt peu être intégré dans la fabrication de la céramique, il faut amélioré leur plasticité. Sa faible plasticité est la cause de sa fusibilité au cours de la cuisson, et qu'on peut l'améliorer par une combinaison avec une autre argile très plastique de type halloysite.

Recommandations :

- Il serait intéressant de mener une étude sur les transformations des argiles lors de la cuisson par une analyse thermique différentielle (ATD), et une analyse thermo gravimétrique (ATG).
- Il serait souhaitable d'effectuer des études complémentaires sur l'influence de la salinité (eau de Broyage) sur les propriétés des argiles.
- De point de vue économique, il serait souhaitable, d'éliminer le Feldspath au lieu d'augmenter la température de cuisson.
- Il serait aussi préférable de mener une étude sur le cycle thermique de fabrication de la céramique du point de vue temps de cuisson, et température de cuisson.

*Références
Bibliographiques*

Bibliographie

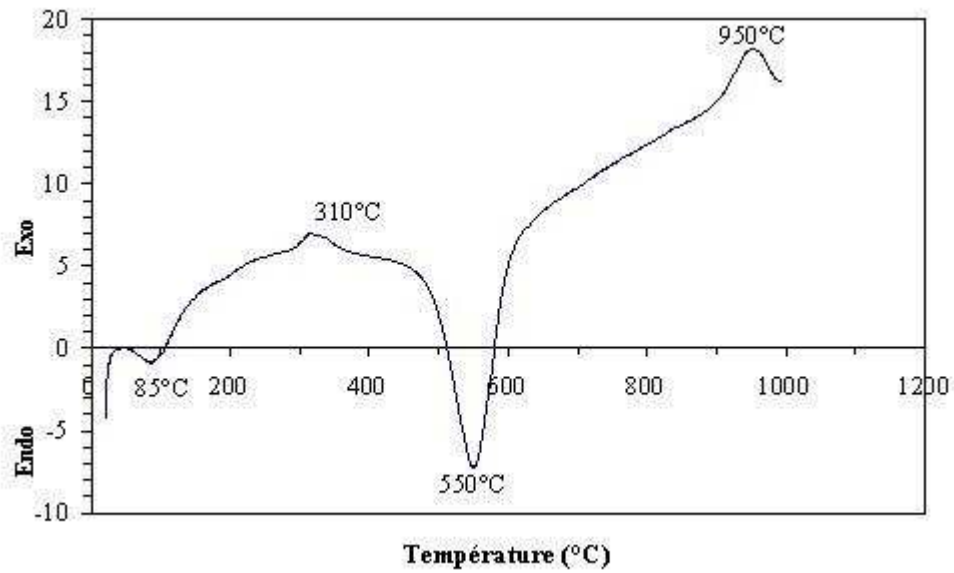
- [1]. **AFNOR.** " Géotechnique, T1. Essais de reconnaissance des sols ".Recueil de normes françaises.1995.
- [2]. **Bengraa, L. (2004).** " Contribution à l'étude de la stabilisation du gonflement par ajout de sable, application aux sols d'Oran " . Mémoire de magistère .U.S.T.Oran, soutenue le 21.06.2004, 102p.
- [3]. **Bengraa, L. Hachichi, A. Bourokba, S. Benaissa, A. (2005).** " Etude de la stabilisation des argiles gonflants de sable de carrière ". 2^{ème} journée d'études sur les sols gonflant, Telemcen le 13.11.2005, pp101-112.
- [4]. **Chaillers, S. Hennin, S. Rautuream, M. (1982).** " Minéralogie des argiles:structure et propriétés Physico-chimique, T1 " P.184. Edition Masson et INRA, Paris.
- [5]. **Chen, F. H. (1988).** " Foundations on expansive soils ".Developments in Geotechnical Engineering, Vol. 54, Elsevier Puplicing Co.Amsterdam, 464 pages.
- [6]. **Costet, J. Sanglérat, G.** " Cours pratique de mécanique des sols ".T1, Plasticité et calcul des tassements, 3^{ème} édition, Dunod, 1983.
- [7]. **Cuisinier, O. (2002).** " Comportement hydromécanique des sols gonflants compactés ".Thèse de Docteur de l'I.N.P.L, France, soutenue le 31.10.2002. 172p.
- [8]. **Cuisinier, O. Masrouri, F. (2003).** " Comportement hydromécanique d'un sol gonflant compacté sous très forte succion "compte rendu mecanique 331,pp203-210.
- [9]. **Derriche, Z. Kebaili, M. (1998).** " Prévision du gonflement des argiles d'In-Aménas ". Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Vol.218, novembre – décembre 1998- Réf..3865-pp.15-23
- [10]. **Djedid, A. Bekkouche, A., et Aissa Mamoune, S. M. (2001).** " Identification et prévision du gonflement de quelques sols de la région de Tlemcen (Algérie) ".Bulletin .LCPC, N° 233, Réf 4375, Juillet – Août 2001, pp. 67-75, Paris, France.
- [11]. **Gras, R. (1988).** " Physique des sols pour l'aménagement ". Edition Masson. Paris. 1988.
- [12]. **Gueddouda, M. K. (2004).** " Stabilisation des argiles gonflants par ajout du sable de dune, cas : région de Laghouat ". Mémoire de magistère .U.S.T.Oran, soutenue Juin 2004.136p.
-

- [13]. **Hachichi, A. (2004).** " Rhéologie des sols ".Cours post-graduation, U.S.T.Oran, 2004.
- [14]. **Hachichi, A. Benaissa, A. Bourokba, S et Boudia, M. (2003).** " Etude de la stabilisation chimique des sols gonflants de la région d'Oran ". Proc. 13th C.R.A. L'implication de la géotechnique dans le développement des infrastructures en Afrique. Marrakech. Maroc. 8-11 Dec 2003. pp. 371-379.
- [15]. **Hafsi, A. (1993).** " Théorie de la double couche et gonflement des argiles non saturées ".Euromech colloquium N°209 : Mechanics of swelling, Rhodos , Greece, August 23-27 .1993.
- [16]. **Holtz, W. G et Gibbs, H. J. (1956).** " Engineering properties of expansive soils ". Trans of ASCE, Vol. 121, pp 641-679.
- [17]. **Holtz, W. G et Gibbs, H.J. (1991).** " Introduction à la géotechnique ".Traduit par Lafleur, J, édition de l'école de polytechnique de Montréal, Canada, 794p.
- [18]. **Karfa, T. (2003).** " Frittage à basse température d'une argile Kaolinitique du Burkina Faso, transformations thermiques et réorganisations structurales ". Thèse de Doctorat. Université de Limoges (France).
- [19]. **Lamara, M. Gueddouda, M. K. Goual, T. (2005).** " Stabilisation des argiles gonflants par ajout du sable de dune ". 2^{ème} journée d'études sur les sols gonflant, Telemcen le 13.11.2005, pp129-139.
- [20]. **Fagel, N. (2005).** " Cours Géologie des argiles ", Département Géologie, Université de Liège. Belgique.
- [21]. **Ould Hamadouche, N. (2002).** " Etude de la montmorillonite avec la matière organique par la C.P.G et le modèle HSAB ". Mémoire de Magister centre Universitaire de Tiaret, soutenue le 15.01.2002.100p.
- [22]. **Philipponnat, G., Huber, B. (1997).** " Fondations et ouvrages en terre ". Edition Eyrolles. 548p.
- [23]. **Tas, M. (1992).** " Influence des procédures expérimentales sur l'estimation en laboratoire des paramètres de gonflement des argiles expansives " .Thèse de magistère ENP Alger, soutenue le 15.07.1992, 148p.
- [24]. **Technique de l'ingénieur (1996).** Construction C2. [C301 (1-20), C 208 (1-15)].
- [25]. **Tran Ngoc Lan. (1981).** " Utilisation de l'essai au bleu de méthylène en terrassements routiers ". Bulletin de Liaison .Labo .P. et Ch. 111.pp 5-16.
-

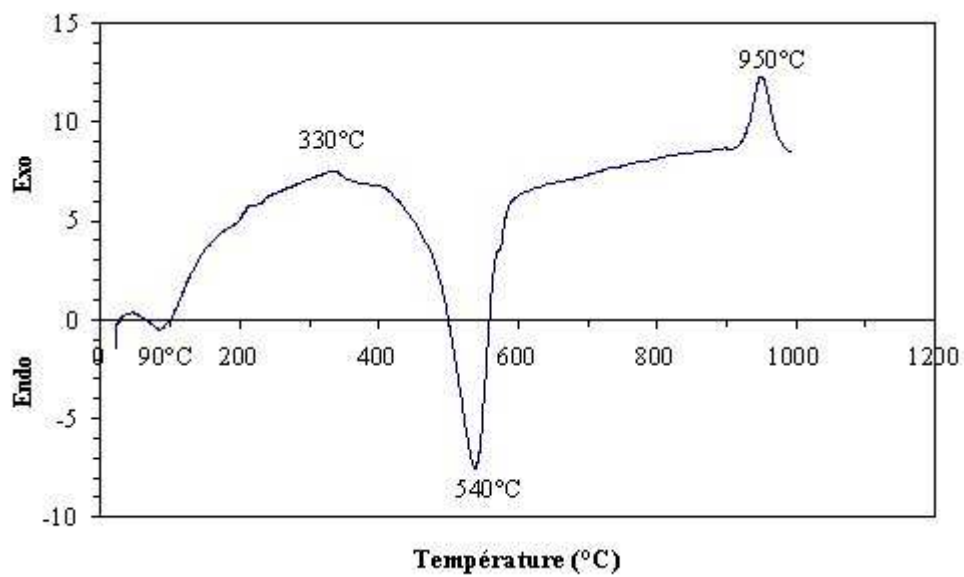
Annexes

Annexe I

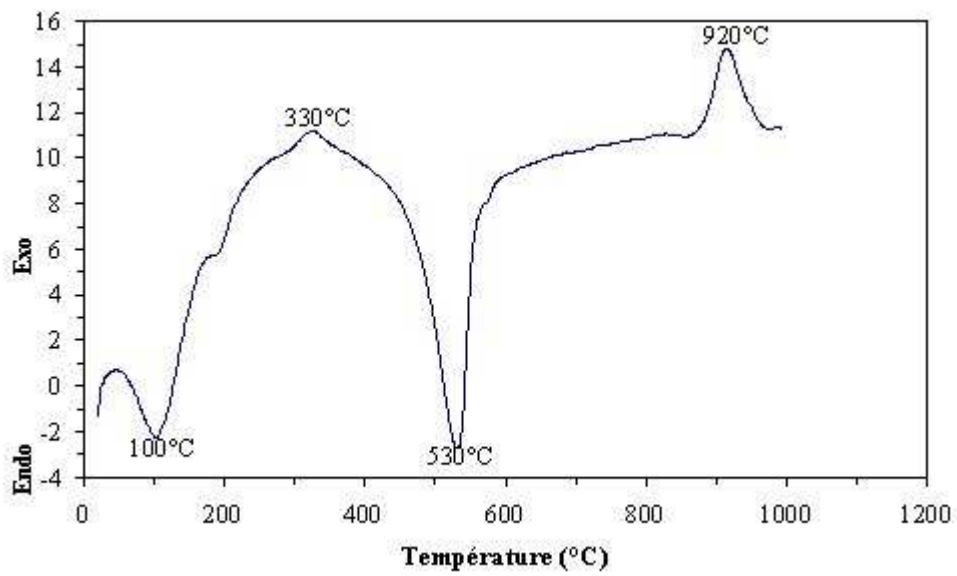
Les courbes ATD de quelques échantillons d'argiles



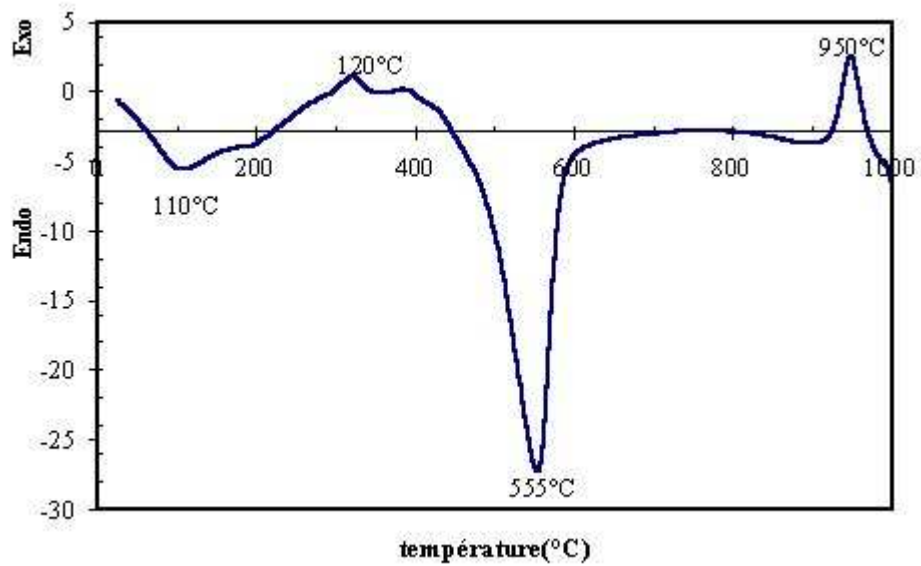
Argile 1



Argile 2



Argile 3



Argile 4

Annexe II

Mesure indirecte du potentiel de gonflement

➤ Classification selon un seul paramètre

Tableau 1: Evaluation du potentiel de gonflement à partir de l'indice de plasticité (D'après Snethen et al, 1977)

Potentiel de gonflement	Indice de plasticité I_p (%)
Bas	<15
Moyen	15-35
Haut	>35

Tableau 2: classification du taux de gonflement suivant la limite de liquidité (D'après Snethen et al, 1977)

Limite de liquidité w_L (%)	0-20	20-35	35-50	50-70	70-90	>90
Potentiel de gonflement (%)	Non gonflant	Faible	Moyen	Elevé	Très élevé	Extrêmement élevé

➤ Classification selon de deux paramètres

Tableau 3: classification du potentiel de gonflement à partir de la limite et de l'indice de plasticité (d'après Snethen et al, 1977)

w_L %	I_p	Potentiel de gonflement	Classification
<50	<25	<0.5	faible
50-60	25-35	0.5-1.5	moyen
>60	>35	>1.5	élevé

Tableau 4: classification du taux de gonflement à partir du rapport de plasticité $R_p = I_p/w_p$ d'après (Snethen et al, 1977)

$R_p = I_p/w_p$	% de gonflement	classification
<0.6	<3	faible
0.06-1	3-10	moyen
1.0-2.0	10-50	élevé
>3	>50	Très élevé

Tableau 5: classification du taux de gonflement à partir de la limite de liquidité de plasticité (d'après O'nell et Poormoayed, 1980)

w_L %	I_p	Classification
20-49	15-24	Faible à moyen
50-70	24-46	élevé
>70	>46	Très élevé

Annexe III

Appareils utilisés



Appareil de Casagrande



Étuve

Photo 1 : appareillage de l'essai des limites d'Atterberg

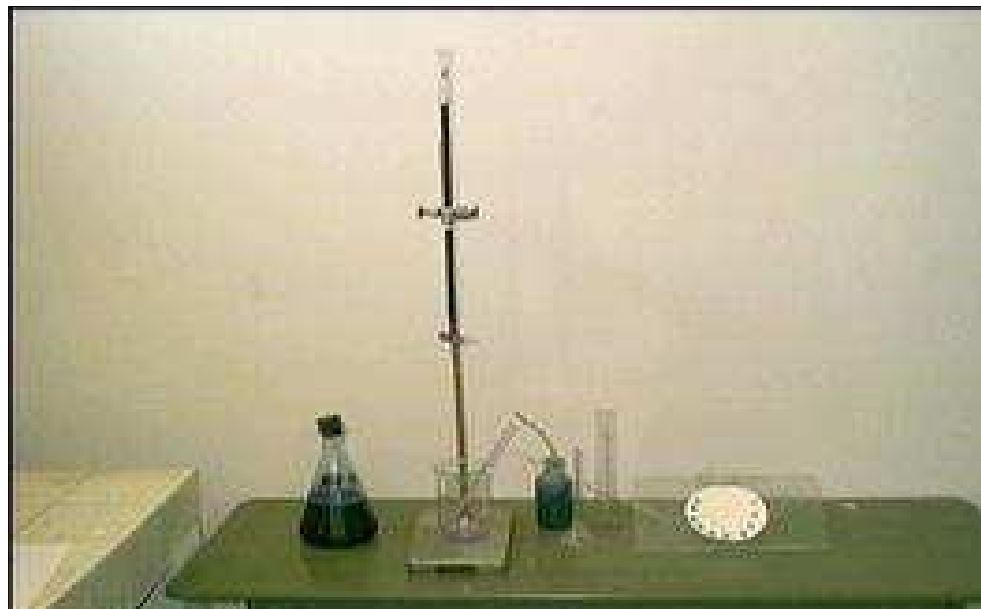


Photo 2 : appareillage de l'essai au bleu de méthylène.



Photo 3: Diffractomètre X'PERT PRO statique



Photo 4: Presse utilisée pour compactage



Photo 5: Odomètre



Photo 6: Appareillage de cisaillement direct

Annexe IV

Bulletin d'analyse chimique des eaux

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

E.P.D.E.M.I.A.

48 Route de Djelfa BP 299 LAGHOUAT

Tél:(029) 90.48.32 - Fax:(029) 92.70.53

N°50/A/2005



ANALYSE D' EAU D'EMAILLAGE

Demandeur		Harrat Mohamed			Lieu: Touggourt Ourgla	
Nature point d'eau	Forage	Profondeur	/		BACTERIOLOGIE	
Date de prélèvement	06/03/2005	T°C	/		Numérotation des germes totaux	Colonies pour 100 ml
Date d'envoi	06/03/2005	N° Ect	326			
Ca en mg/litre (Calcium)	14,7	Balance cations	0,74		Coliformes	
Mg en mg/litre (Magnésium)	4,5		0,36		Escherichia coli	
Na en mg/litre (Sodium)	10,4	mé/l	0,45		Streptocoques	
K en mg/litre (Potassium)	3,12		1,635	0,08		
Cl en mg/litre (Chlorures)	34,7	Balance anions	0,98		Sulfito-réducteurs	
SO ₄ en mg/litre (Sulfates)	22,6		0,45		Bactériophage	
CO ₃ en mg/litre (Carbonate)	/	mé/l	/		fécaux	
HCO ₃ en mg/litre (Bicarbonate)	15,7		0,258		Autres germes	
NO ₃ en mg/litre (Nitrates)	0,16	1,710	0,0025		Turbidité en NTU	0,53
Conductivité en 1/10 ms/cm à 25°C	2,15	Minéralisation		TDS en mg/Litre	102,9	
		133,3 mg/l		Salinité ‰	0,1	
Résidu sec à 105°C	161 mg/L	Somme des ions		TEST CHLORE en mg/l	/	
		105,88 mg/l		Couleur 436nm	4,5 m-1	
T.H	T.A.C	T.A	S.A.F	I.S	T= 16,3 °C	PH= 6,8
8,17°F	1,29°F	/	7,25 °F	4,05 °F	RSA = 0,60	
Nitrite NO ₂	/	Eléments toxiques ou indésirables mg/litre	Cu lib		INTERPRETATION DE L'ANALYSE Potabilité chimique : Bonne . Eau non javellisée. (normes:0,2 - 0,4 mg/ Litre) Laghouat le: 13 / 03/ 2005 Service laboratoire A. Abdellaoui	
Ammonium NH ₄	/		Cu comb			
CO ₂ Libre			Cu total			
CO ₂ Total			Zinc			
Pourcentage de saturation en O ₂ %			Mn			
Oxygène dissous O ₂	14,46		Aluminium			
Fer total			Iode			
Matières en suspension			Brome			
Fer dissous			SiO ₂ dissoute			
pH (Laboratoire)	6,8		Sulfite			
Cations	Ca=13,88%	Mg= 4,25 %	Na=9,82%	K=2,94%		
Anions	Cl=32,77%	SO ₄ =21,34%	HCO ₃ =14,82%	NO ₃ =0,15 %		
Faciés de l'eau:	Chlorurée-calcique.					
Potabilité chimique	Bonne .					

* Prélèvement par le demandeur.

E.P.D.E.M.I.A.

48 Route de Djelfa BP 299 LAGHOUAT

Tél:(029) 90.48.32 - Fax:(029) 92.70.53

N°50/A/2005

****ANALYSE D' EAU DE BROYAGE****

Demandeur		Harrat Mohamed			Lieu: Touggourt Ourgla	
Nature point d'eau	Forage	Profondeur	/		BACTERIOLOGIE	
Date de prélèvement	06/03/2005	T°C	/		Numérotation des	Colonies pour 100 ml
Date d'envoi	06/03/2005	N° Ect	327		germes totaux	
Ca en mg/litre (Calcium)	229	Balance cations mé/l	11,45		Coliformes	
Mg en mg/litre (Magnésium)	85		7,01		Escherichia coli	
Na en mg/litre (Sodium)	263		11,44		Streptocoques	
K en mg/litre (Potassium)	37,06	31,04	0,95		fecaux	
Cl en mg/litre (Chlorures)	513	Balance anions mé/l	14,48		Sulfito-réducteurs	
SO ₄ en mg/litre (Sulfates)	748,8		15,59		Bactériophage	
CO ₃ en mg/litre (Carbonate)	/		/		fécaux	
HCO ₃ en mg/litre(Bicarbonate)	109,4	1,79		Autres germes		
NO ₃ en mg/litre (Nitrates)	0,12	31,86	0,0019		Turbidité en NTU	0,25
Conductivité en 1/10 ms/cm à 25°C	20,98	Minéralisation		TDS en mg/Litre	1527	
		1847,6 mg/l		Salinité ‰	1,6	
Résidu sec à 105°C	2284 mg/L	Somme des ions		TEST CHLORE en mg/l	/	
		1985,38 mg/l		Couleur 436nm	0,8 m-1	
T.H	T.A.C	T.A	S.A.F	I.S	T= 16,3 °C	PH= 7,5
92,3°F	8,95°F	/	150,35 °F	92,25 °F	RSA = 3,77	
Nitrite NO ₂	/	Eléments toxiques ou indésirables mg/litre	Cu lib		INTERPRETATION DE L'ANALYSE Potabilité chimique : Mediocre à mauvaise . Eau non javellisée. (normes:0,2 - 0,4 mg/ Litre) Laghouat le: 13 / 03/ 2005 Service laboratoire A. Abdellaoui	
Ammonium NH ₄	/		Cu comb			
CO ₂ Libre			Cu total			
CO ₂ Total			Zinc			
Pourcentage de saturation en O ₂ %			Mn			
Oxygène dissous O ₂	14,26		Aluminium			
Fer total			Ozone			
Matières en suspension			Iode			
Fer dissous			Brome			
pH (Laboratoire)	7,5		SiO ₂ dissoute	15,2		
		Sulfite				
Cations	Ca=11,53%	Mg= 4,28 %	Na=13,24%	K=1,86%		
Anions	Cl=25,83%	SO ₄ =37,71%	HCO ₃ =5,51%	NO ₃ =0,006%		
Faciés de l'eau:	Sulfatée-sodique.					
Potabilité chimique	Mediocre à mauvaise . .					

* Prélèvement par le demandeur.