

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET METALLURGIE
ENSMM-Annaba-



DÉPARTEMENT GÉNIE MINIER
Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention
du diplôme master en contrôle des terrains
avancé

**THEME : LES ARGILES MIOCENES DE LA BRIQUETTERIE
DE ZAAROURIA (Souk Ahras, Algérie) :**
Conditions géologiques et Caractérisations physiques, Mécanique et

Présenté par : RAIS Salah Eddine

Encadré par :

Dr.CHABBI Abdallah

Membres du jury :

Président : Dr. CHENNITI

Rapporteur : Mme. MAHTALI

Septembre 2018

REMERCIEMENTS

*Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à monsieur
Chabbi*

*Abdallah, mon encadreur, pour l'aide qu'il m'a fournie
pendant la*

*Préparation de ce mémoire, pour ses avis toujours éclairés,
pour sa*

*Grande disponibilité ainsi que son dynamisme et son
ouverture*

*D'esprit. J'ai beaucoup appris de lui durant toute la période de
L'élaboration de ce projet.*

*Mes plus vifs remerciements s'adressent à.....,
Enseignant au département de Génie Minier, de m'avoir fait
L'honneur d'accepter la présidence de ce jury. Que
monsieur.....,*

*Accepte ma profonde reconnaissance d'avoir examiné ce
travail.*

*Mes remerciements vont particulièrement à Monsieur
Soukehal*

*Samir du laboratoire ENSMM pour son accompagnement au
Laboratoire durant la réalisation des essais*

*Mon collègue Lakehal Hocine pour son accompagnement dans
le*

Terrain.

*J'adresse mes vifs remerciements à tous les responsables de
l'école*

*Nationale supérieure des mines et métallurgie d'Annaba, en
Particulier Messieurs son directeur et chef de département.*

DEDICACES

Je dédié ce modeste travail :

*A mes parents qui m'ont beaucoup aidé pour
Terminer mes études, et qui m'ont tellement
Encouragé moralement et psychiquement, et qui se
Sont sacrifiés pour moi.*

Mes très chers frères, mes sœurs, et toute la famille

RAIS et ALLOUI.

*A tous les enseignants du département de Génie
Minier.*

A tous mes amis de l'école sans précise leur nom.

*A tous mes amis de la promotion Mines et
Métallurgie sans préciser leurs noms.*

A tous ceux qui m'ont aidé durant ma formation

CHAPITRE 1

Figure 1: cadre géographique de la région d'étude.....	2
---	---

CHAPITRE 2

Figure 2.1: représentation schématique de l'octaèdre et le tétraèdre des minéraux argileux (Cojan et al. 2013)	5
---	---

Figure 2.2: structure des principaux minéraux argileux.....	6
--	---

Figure 2.3: roche de Kaolin.....	7
---	---

CHAPITRE 3

Figure 3.1: le site d'étude dans son cadre géologique régional.....	16
--	----

Figure 3.2: carte schématique de la géologie du site d'étude.....	19
--	----

Figure 3.3: Log stratigraphique de l'unité para-autochtone de dj. Graout (Chabbi, 2017).	20
---	----

Figure 3.3 : coupe géologique montrant le site d'étude	20
---	----

CHAPITRE 4

Figure 4. 1: pycnomètre à air.....	25
---	----

Figure 4.2: l'Abaque Gérâte NR-239.....	25
--	----

Figure 4.3 : récupération de la fraction 0/400 μm et décantation du mélange.....	30
--	----

Figure 4.4 : séchage dans l'étuve avec température 65°C.....	30
---	----

Figure 4.5: homogénéisation de la pâte par malaxage.....	30
---	----

Figure 4.6: Limite de liquidité avec l'appareil de Casagrande.....	31
---	----

Figure 4.7 : Détermination de limite de plasticité.....	33
--	----

Figure 4.8: schémas de l'appareillage de l'essai de cisaillement.....	38
--	----

Figure 4. 9: courbes expérimentales obtenues dans un essai de cisaillement « direct » τ en fonction de ε_1	39
--	----

Figure 4.10: résultats d'un essai de cisaillement direct dans le plan de Mohr Coulomb.	40
---	----

Figure 4.11 : résultats d'un essai de cisaillement direct dans le plan de Mohr Coulomb en utilisant les valeurs de la résistance maximale de l'échantillon 01.....	42
---	----

Figure 4.12: Résultats d'un essai de cisaillement direct dans le plan de Mohr Coulomb en utilisant les valeurs de la résistance maximale de l'échantillon 02.	42
Figure 4. 13: Résultats d'un essai de cisaillement direct dans le plan de Mohr Coulomb en utilisant les valeurs de la résistance maximale de l'échantillon 03.	43
Figure 4.14 : les équipements pour mesurer l'équivalent de sable.	45

Figure 4.12: Résultats d'un essai de cisaillement direct dans le plan de Mohr Coulomb en utilisant les valeurs de la résistance maximale de l'échantillon 02.	42
Figure 4. 13: Résultats d'un essai de cisaillement direct dans le plan de Mohr Coulomb en utilisant les valeurs de la résistance maximale de l'échantillon 03.	43
Figure 4.14 : les équipements pour mesurer l'équivalent de sable.	45

CHAPITRE 2

Tableau 2.1: seuils granulométriques optimaux des matériaux en céramique (El Ouahabi, 2013)	11
Tableau 2.2: les principales conséquences liées a la minéralogie de l'argile (El Ouahabi, 2013).	11
Tableau 2.3: Limites admissibles d'utilisation des argiles en céramique (Kornmann, 2005; Wetshondo, 2012).	12

CHAPITRE 4

Tableau 4.1 : détermination de la masse volumique absolue.	26
Tableau 4.2: résultats de d'évaluation de la teneur en eau naturelle des argiles miocènes de Zaarouria.	27
Tableau 3 : les teneurs en eau pour limite de liquidité après séchage.	32
Tableau 4.4 : les teneurs en eau pour limite de plasticité après séchage.	34
Tableau 4.5: indice de plasticité	35
Tableau 4.6: indice de plasticité (inspiré d'Atlan, 1978).	36
Tableau 7: résultats de l'essai de cisaillement.	41
Tableau 4. 8 : détermination de la cohésion.	43
Tableau 9: détermination de l'angle de frottement interne.	43
Tableau 4.10 : résultats d'équivalent de sable des trois échantillons.	46
Tableau 11: résultats d'analyses chimiques des échantillons prélevés du site d'étude (rapport de l'entreprise).	47

Résumé

Le présent travail s'articule autour d'une analyse de l'ensemble des paramètres mécaniques, physiques et chimiques des argiles Miocène à moyen inférieur du Zaarouria situées au sud de la ville de Souk Ahras.

L'objectif de la présente étude est de réaliser une évaluation des conditions géologiques et des propriétés physico-chimiques de ces argiles.

Ce travail est basé sur des essais expérimentaux réalisés au niveau du laboratoire l'école nationale supérieure des mines et métallurgie (**ENSMM**), et complètes par des travaux réalisés par (laboratoire **BEGAS-ANALYSES**) pour le compte de l'entreprise de la briqueterie de Taghast.

Les résultats des essais sur les échantillons prélevés des argiles du Miocène inférieur à moyen de Zaarouria, en vue d'évaluer ses caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques sont les suivants :

- L'ensemble des essais de caractérisation tel que la masse volumiques, la teneur en eau moyenne, Limite d'Atterberg, ainsi que le cisaillement direct montre les résultats suivants :

Les argiles du site de Zaarouria sont des argiles moyennement plastiques.

L'équivalent de sable montre que la fraction argileuse ($<2\mu\text{m}$) a un pourcentage dépassant les 41%, qui nous permet d'orienter ces argiles vers d'autres domaine tel que : (fabrication de ciment, travaux de remblai, matériaux de construction tel que : tuile, brique rouge ...).

Abstract

The present work is based on an analysis of all the mechanical, physical and chemical parameters of Miocene clays in the lower middle Zaarouria south of the city of Souk Ahras.

The objective of the present study is to carry out an evaluation of the geological conditions and the physicochemical properties of these clays.

This work is based on experimental tests carried out at the laboratory of the National School of Mines and Metallurgy (ENSMM), and completed by work done by (BEGAS-ANALYZES laboratory) on behalf of the company of the Brick factory in Taghast.

The results of the tests on samples taken from the Middle to Lower Miocene clays of Zaarouria to assess its physical, mechanical and chemical characteristics are as follows:

- The set of characterization tests such as density, average water content, Atterberg limit, as well as direct shear show the following results:

The clays of the Zaarouria site are moderately plastic clays.

The equivalent of sand shows that the clay fraction (<2micron) has a percentage exceeding 41%, which allows us to direct these clays to other areas such as: (cement manufacturing, embankment work, building materials such as: tile, red brick ...).

ملخص

يعتمد هذا العمل على تحليل جميع العوامل الميكانيكية والفيزيائية والكيميائية لطين الميوسين في المنطقة الوسطى السفلى من الزعرورية جنوب مدينة سوق أهراس.

الهدف من هذه الدراسة هو إجراء تقييم للظروف الجيولوجية والخصائص الفيزيائية الكيميائية لهذه الأطياف.

ويستند هذا العمل على الاختبارات التجريبية أجريت في مختبر المدرسة الوطنية للمناجم والمعادن، والكامل من العمل الذي يقوم به (تحليل مختبر باقاص) نيابة عن الشركة مصنع للطوب في تاغاست.

تائج الاختبارات على عينات مأخوذة من طين الميوسين الأوسط إلى الأسفل من الزعرورية لتقييم خصائصها الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية هي كما يلي

مجموعة من اختبارات التوصيف مثل الكثافة ومحتوى الماء المتوسط وحد اتبيرغ- وكذلك القص المباشر تظهر النتائج التالي

الصلصال من موقع الزعرورية هي طين بلاستيكية معتدلة.

يظهر ما يعادل الرمال التي جزء الطين (ميكرون <) يحتوي على نسبة تزيد على 41٪، والذي يسمح لنا لتوجيه هذه الطين إلى منطقة أخرى مثل (صناعة الإسمنت، وملء، ومواد البناء مثل: قرميد، قرميد أحمر)

Chapitre 1 : GENERALITES

1.1. Situation géographique	1
1.2. Relief	1
1.3. Hydrographie.....	3
1.4. Problématique et objectifs de l'étude	3
1.5. Plan de mémoire	4

Chapitre 2 : Synthèse Bibliographique

2.1. Introduction.....	5
2.2. Minéralogie, structure et propriétés des argiles	5
2.3. Types structuraux et classification des argiles.....	6
2.4. Propriétés des argiles.	8
2.4.1. Couleurs	8
2.4.2 Absorbante et Adsorbante	8
2.4.3 La plasticité.....	8
2.4.4 Retrait/Gonflement	8
2.5 L'argile dans l'industrie de la production des briques.....	10
2.5.1. Exigences technologiques :	10
2.5.2. Techniques de fabrication :	
2.5.3.1. L'extraction des matières premières (argiles et limons) :	12
2.3.5.2. La préparation de l'argile :	12
2.3.5.3. Le façonnage :	12
2.5.3.4. Le séchage :	12
2.5.3.5. La cuisson :	12
2.5.4. Phénomènes physico-chimiques qui peuvent se produire lors de la cuisson :	13
2.6. Conclusion	14

Chapitre 3 : Conditions géologiques du site d'étude

3.1. Cadre géologique de la région de Souk Ahras	15
3.1.1. L'unité para-autochtone de la Haute Medjerda :.....	15
3.1.2. L'unité des Sellaoua :.....	15
3.1.3. La nappe tellienne méridionale à Nummulites :.....	15
3.1.4. Les nappes telliennes septentrionales à Globigérines :.....	17
3.1.5. La nappe numidienne. :.....	17
3.1.6. Le Trias :.....	17
3.1.7. Les formations post nappes :.....	17
3.2. Condition géologiques du site d'étude :.....	17
3.2.1. Stratigraphie :	17
3.2.1.1 Trias allochtone :.....	17
3.2.1.2. Santonien - Campanien inférieur (C ³⁻⁴) :.....	17
3.2.1.3 Campanien moyen à supérieur (C ⁵) :.....	18
3.2.1.4 Maastrichtien (C ⁶) :.....	18
3.2.1.5 Paléocène :.....	18
3.2.1.6 Miocène inférieur à moyen (m ¹⁻²) :.....	18
3.2.1.7 Les formations plio-quadernaires.....	19
3.2.2. Structure du site d'étude :.....	19
3.2.3. Description des argiles du miocène de Zaarouria :.....	21

CHAPITRE 04 : CARACTERISATION PHYSIQUE, MECANIQUE ET CHIMIQUE DES ARGILES MIOCENE DE ZAAROURIA

4.1. Introduction :	22
4.2. Echantillonnage :	22
4.3. Analyse des échantillons au laboratoire :	23
4.4. Caractérisations physiques des argiles miocènes de Zaarouria	23
4.4.1. Evaluation de la masse volumique absolue :	24
4.4.1.1. But de l'essai :	24
4.4.1.2. Mode opératoire de l'essai :	24
4.4.1.3. Résultat :	26
4.4.2. Teneur en eau naturelle $w\%$:	26
4.4.3. Limite d'Atterberg :	28
4.4.3.1. But d'essai:	28
4.4.3.2. Matériel utilisée :	29
4.4.3.2.1 Limite de liquidité :	29
4.4.3.2.2 Limite de plasticité :	29
4.4.3.3. Mode opératoire :	29
4.4.3.3.1 Détermination de la limite de liquidité :	31
4.4.3.3.2 Détermination de limite de plasticité (w_p) :	32
4.4.3.3.3 L'indice de plasticité :	34

4.5. Caractérisation des propriétés mécaniques des argiles miocène de Zaarouria :.....	36
4.5.1. Essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande :.....	36
4.5.1.1. Introduction :.....	36
4.5.1.2. But de l'essai :.....	36
4.5.1.3. L'équipement nécessaire pour réaliser un essai de cisaillement :	37
4.5.1.4. Mode opératoire de l'essai de cisaillement direct :.....	38
4.5.1.5. Déroulement d'essai :.....	40
4.5.1.5. Resultas :.....' »	
4.6. Equivalent de sable (NF EN 933-8) :.....	44
4.6.1. But de l'essai :.....	44
4.6.2. Mode opératoire :.....	44
4.6.3. Résultat :.....	45
4.7. Caractérisation chimique des argiles miocènes de Zaarouri...	46
4.8. Conclusion générale	48

CHAPITRE 01 : GENERALITES

1.1. Situation géographique

Le secteur d'étude (Argiles du miocène moyen de dj. Zaarouria) est situé dans la commune de Zaarouria Wilaya de Souk Ahras (nord - Est algérien) à environ 100 km au sud de la ville d'Annaba (fig.01).

Le secteur étudié est recoupé par la route nationale reliant la ville de souk Ahras par la ville de Tébessa en passant par le village de Zaarouria. La voie ferrée reliant djebel el Onk (gisement de Phosphate) par le complexe ASMIDAL (Annaba) passe à quelques Kilomètres au nord du secteur.

1.2. Relief

La région de Souk Ahras est caractérisée par un relief accidenté avec des altitudes dépassant 1200m. D'après Chabbi (2017) la région de souk Ahras est caractérisée par deux parties :

La partie septentrionale, au Nord d'Oued Medjerda, appartient à l'Atlas tellien. Elle est caractérisée par un relief montagneux très accidenté avec d'Ouest vers l'Est et du Nord au Sud, on distingue: Dj. Rezgoune, Dj. Boubakouch, Koudiet ben Ahmed, Dj. Boualek, Dj. Medjene, Dj. M'Cid, Dj. El Hammam, Dj. Guern Djedi, Dj. Amra, Dj. El Azreg, Dj. Ain Zana. La partie sud, appartient à l'Atlas saharien, son relief s'organise autour d'un anticlinal de direction (NE-SO), que l'on appelle « Anticlinal de Dj. Graouet » qui s'étend de Sidi Lehmissi à l'Est à dj. Zaarouria à l'Ouest. La barre campano-maestrichtienne qui forme ses flancs nord et sud, constituent des crêtes de part et d'autre de son axe. De l'Est vers l'Ouest il s'agit de : Dj. Graouet, Dj. Mesla, Dj. Bou Rzine, Dj. Abibat, Dj. Ouled Soltane et Dj. Boukebch, Dj. Zaarouria. Au Nord et au Sud de l'Anticlinal de Dj. Graouet, s'étalent successivement les synclinaux d'O. Berriche – Oued Medjerda et de Merahna Taoura.

GENERALITES

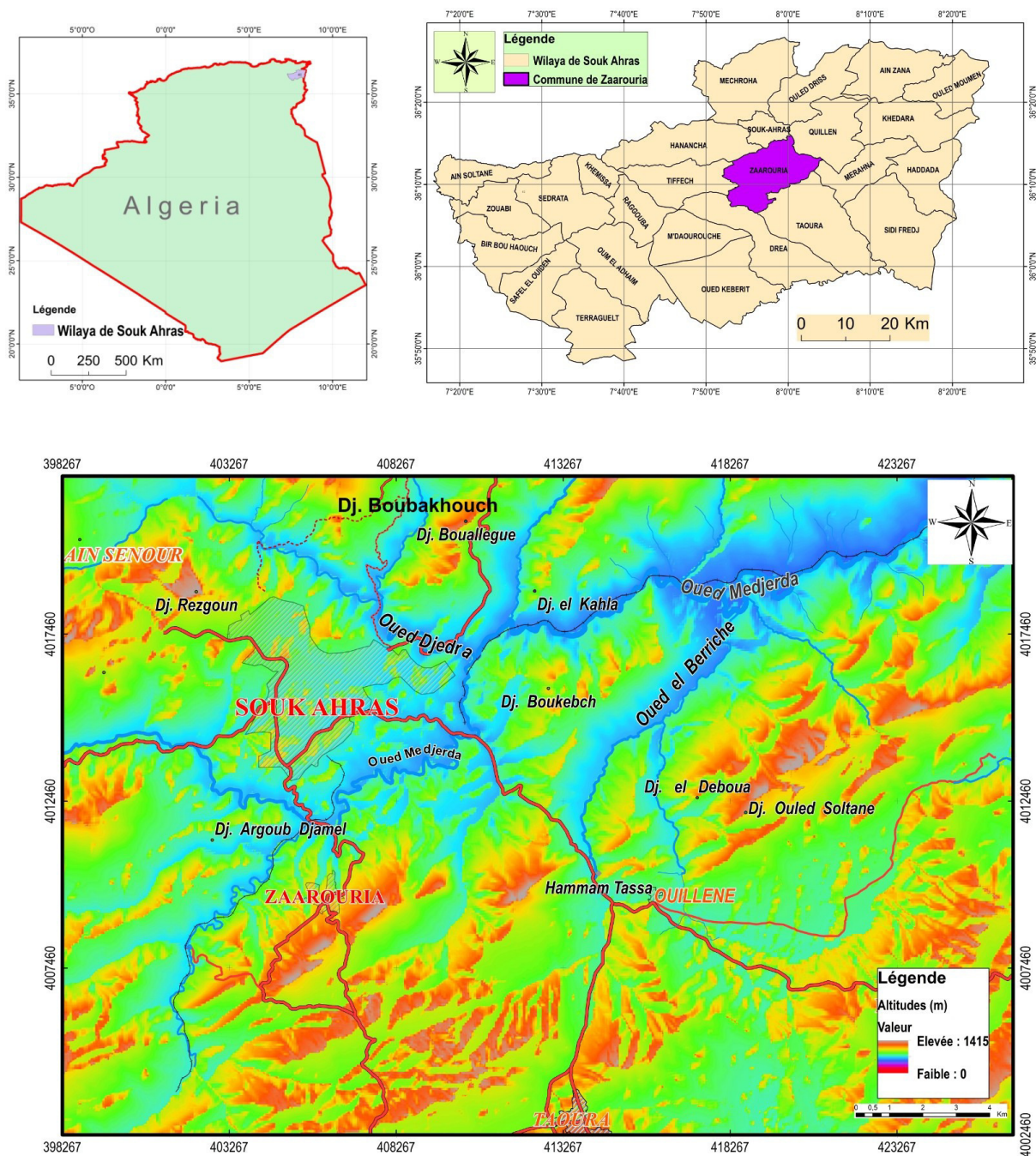


Figure 1: cadre géographique de la région d'étude.

1.3. Hydrographie

La région d'étude appartient à un seul bassin versant : le bassin d'Oued Medjerda. Il est alimenté par de nombreux affluents dont les principaux sont (O. Chouk, O. Djedra, O. el Hammam, O. el Maaden, O. el Berriche, O. Berda, O. er Rennem, O. Mougras).

1.4. Problématique et objectifs de l'étude

Les argiles sont considérées depuis longtemps comme des minéraux nobles. Elles recèlent des intérêts qui restent énigmatiques à ce jour. Leur intérêt s'est révélé dès la création du père de l'humanité « Adam », Allah a créé Adam à partir d'argiles (Saint Coran). Au cours des temps, les domaines d'utilisations des argiles sont diversifiés: matière première dans la fabrication des matériaux de constructions (brique rouge, tuile), des vaisselles et des produits réfractaires,...etc. La diversité d'utilisations des argiles est due à leurs propriétés physico-chimiques et mécaniques.

Ces dernières années, les besoins en argiles augmentent rapidement, cependant la caractérisation et l'évaluation des réserves géologiques en argiles restent limitée. La conduite des travaux miniers assurant la production en toute sécurité imposent une bonne connaissance des propriétés physiques, mécaniques et chimique des produits exploités.

D'autre part la nécessité commerciale impose à l'exploitant à respecter certain nombre de paramètre d'argile destinées à des usages précis (construction de brique, fabrication de ciment, travaux de remblai).

Le Miocène moyen de dj. Zaarouria constitue un des réserves d'argiles utilisées dans la fabrication des briques rouges (en cours d'exploitation par la briqueterie de Tagast). Ce modeste travail sera consacré à l'évaluation des conditions géologiques et des propriétés physico-chimiques et mécaniques de ces argiles.

1.5. Plan de mémoire :

En vue de répondre aux objectifs signalés ci-dessus, on a adopté le plan de mémoire suivant :

- Chapitre 01 : Généralité.
- Chapitre 02 : Synthèse bibliographique.
- Chapitre 03 : Conditions géologiques du site d'étude
- Chapitre 04 : Caractérisation physico-chimique et mécanique des argiles miocènes de Zaarouria.
- Conclusion générale.

CHAPITRE 02

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1. Introduction

Les argiles résultent de la décomposition des roches siliceuses, par désagrégation physique et mécanique puis par altération chimique. L'argile brute contient généralement des particules élémentaires de diamètre inférieur à deux micromètres ($2\mu\text{m}$), appelées minéraux argileux. Ces particules (cristaux de minéraux argileux) sont responsables de ses propriétés telles que le gonflement, la plasticité et les propriétés d'adsorption. La connaissance de ces propriétés est une nécessité techno-économique et commerciale.

2.2. Minéralogie, structure et propriétés des argiles

2.2.1. Définition

Les argiles sont des phyllosilicates (Renard et al. 2015) qui sont formés de couche de tétraèdres unis par trois de leur sommets et formant un réseau plan à maille hexagonale ($\text{Si}_4\text{O}^{10}{}^{4-}$) (structure en feuillet). Elles se présentent en très petits cristaux (quelques micromètres) et dont la structure est caractérisée par la superposition de feuillets composés de couches tétraédriques (tétraèdre d'atomes d'oxygène avec un atome de silice au centre) et de couches octaédriques (octaèdre d'atomes d'oxygène avec un atome d'aluminium au centre) (Kherfi, 2012) (fig.2.1). Les cations de la couche octaédrique sont soit Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} soit, Al^{3+} , Fe^{3+} .

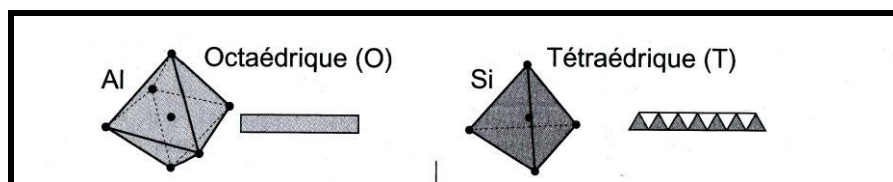


Figure 2.1: représentation schématique de l'octaèdre et le tétraèdre des minéraux argileux (Cojan et al. 2013)

Chapitre 2 : synthèse bibliographique

2.2.2. Les grands types de minéraux argileux

Les types de minéraux argileux sont définis par le type de motif d'association, du remplissage interfoliaire et de l'occupation des sites octaédriques. On distingue les minéraux argileux suivants (fig. 2.2) :

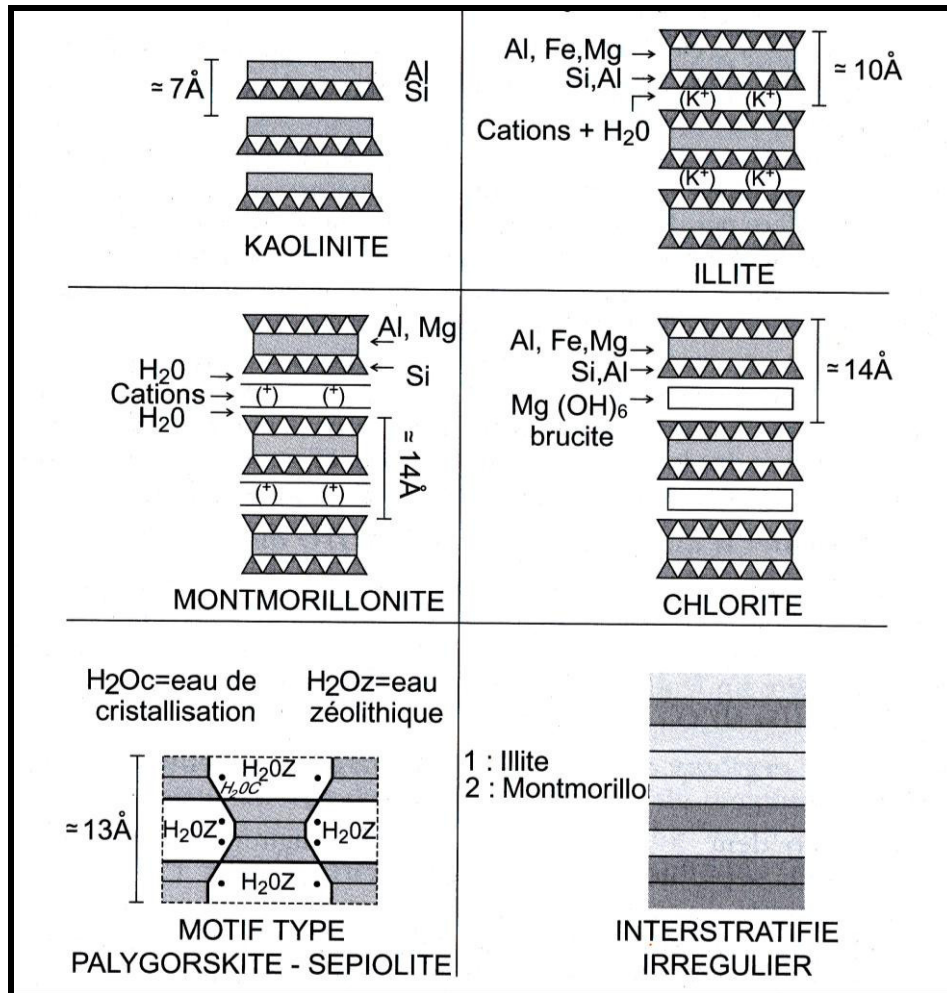


Figure 2.2: structure des principaux minéraux argileux.

2.2.2.1. La Kaolinite (Si_2O_5) $\text{Al}_2(\text{OH})_4$

La kaolinite fait partie des phyllosilicates à deux couches (TO), dans laquelle les substitutions sont très limités (fig.2.2). La cohésion de structure est assurée par les liaisons hydrogènes, l'espacement basal est de 7Å (Cojan et al. 2013).

La Kaolinite offre des gisements de Kaolin (fig.) qui résultent de l'altération de roches feldspathiques potassiques (granites, Pegmatites) de couleur blanche, friable, imperméable, réfractaire.



Figure 2.3: roche de Kaolin.

2.2.2.2. Les smectites

Les smectites sont des phyllosilicates à trois couches (TOT). Dans ce type de minéraux argileux, les substitutions sont assurées par Al/Si qui entraîne une charge négative des feuilles qui favorise la pénétration de l'eau et des cations hydratés (fig.2.2). La distance interfoliaire est variée de 10 à 17.5Å).

2.2.2.3. La montmorillonite $\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{Al}_{1.7}\text{Mg}_{0.3})(\text{OH})_2 \cdot n(\text{H}_2\text{O})$

La montmorillonite est un minéral argileux des phyllosilicates à trois couches. C'est une argile dioctaédrique sans substitution tétraédriques. Du fait des substitutions octaédriques, il subsiste une charge négative et s'hydrate par deux molécule d'eau, ce qui donne un espacement basal de 14Å.

2.2.2.4. La vermiculite $(\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x)\text{O}_{10}(\text{Mg}_{3-y}\text{Fe}^{3+}_y)(\text{OH})_2 \cdot \text{M}_{x+y}$

C'est une argile trioctaédrique dont les feuillets ont une structure voisine des micas biotite. Elle en diffère par des substitutions tétraédriques d'ions Al par des ions Fe ou Mg et par une couche presque entièrement magnésienne. Le déficit de charge des feuillets est compensé par les cations interfoliaires Ca, Mg plus ou moins hydratés. La distance interfoliaire est de 14.36Å (Cojan et al. 2013).

2.2.2.5. L'illite

L'illite possède une structure proche de celle de la muscovite (micas blanc), sa formule générale est de forme $(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10} (\text{Al, Fe, Mg})_2 \text{M}_x$, avec $1.4 < x < 1.8$. La distance interfoliaire est de 10Å.

Ils existent d'autres minéraux argileux tels que les chlorites, la palygorskite (attapulgite), glauconites.

2.3. Propriétés des argiles

Les propriétés sont définies par la constitution chimique, l'épaisseur et l'écartement des feuillets de l'argile.

- **La couleur** des argiles est définie par le type d'argile, les impuretés et le type d'oxydation.
- **L'absorption** correspond à l'internalisation d'un liquide ou d'un gaz. L'exemple typique est celui de l'éponge s'imbibant de liquide. Au niveau de l'argile ce phénomène est passif, il se produit par capillarité, contrairement à l'absorption au niveau du tube digestif.
- **La plasticité** est définie par les limites d'Atterberg qui sont des paramètres géotechniques destinés à identifier un matériau et à caractériser son état au moyen de son indice de consistance. Elles permettent de fournir des données essentielles sur la mécanique des matériaux. Les limites d'Atterberg consistent à estimer l'étendue du domaine de plasticité et éventuellement de cohésion des matériaux plus ou moins argileux, tels que limons, glaises et sable argileux

Retrait et Gonflement : Les matériaux argileux possèdent la curieuse propriété de voir leur consistance se modifier en fonction de leur teneur en eau. Ainsi, en contexte humide, les matériaux argileux se présentent comme souples et malléables, tandis que ce même matériau desséché sera dur et cassant, Ainsi lorsque la teneur en eau augmente dans un matériau argileux, on assiste à une augmentation du volume de ce matériau - on parle alors de "gonflement des argiles". Un déficit en eau provoquera un phénomène inverse de rétractation ou "retrait des argiles".

2.4. Domaines d'utilisation des argiles

L'argile est utilisée dans plusieurs domaines (El Yakoubi 2006 et Kherfi, 2012) :

- **Matériaux de construction** : l'argile calcinée est la matière première principale avec quelques additions de sable, de chamotte comme fondant dans la fabrication des briques, tuiles et céramiques, Les argiles peu fusibles sont réfractaires entre 1350 à 1580°C et servent pour la fabrication des briques, des carreaux de sol et les tuyaux d'évacuations.
- **Ciment composé CPJ** : l'argile peut être utilisée comme ajout pouzzolanique dans la fabrication des ciments avec additions minérales à un taux de substitution de 30% environ.
- **Utilisation générale** : la composition d'une solution saline est modifiée au contact d'argile, des cations "disparaissent" et sont remplacés par d'autres empruntés à l'origine elle-même; c'est le phénomène d'échange de cations. Les argiles, servent aussi à diluer les pesticides utilisés en agriculture lors de leur épandage. Le pesticide, doit atteindre sa cible sans être décomposé par l'argile pendant les étapes suivantes : production, transport, stockage et application. Les argiles du groupe des smectites ou encore la sépiolite et la palygorskite sont utilisées dans l'industrie pour leur propriété d'absorption et d'adsorption, ex. : (a) absorption des huiles et graisses (sols des garages; d'usines,), (b) décoloration des huiles et usage comme liant pour les aliments du bétail, (c) usages pharmaceutiques (excipients, pansements gastro-intestinaux...). (d) boues de forage en milieu salin, engrais en suspensions.
- **D'autres domaines d'utilisation**
 - Les argiles kaolinitiques non modifiées ont un caractère semi -renforteur des gommés naturelles, ce pouvoir est d'autant plus grand que les argiles utilisées sont

pures et bien cristallisées. La teneur en kaolinite est favorable au semi-renforcement tandis que les teneurs en quartz et en mica lui sont défavorables.

- L'industrie papetière a connue depuis une cinquantaine d'années, un développement considérable qui a la place au premier rang des consommateurs de kaolins. En papeterie l'utilisation se répartit entre les kaolins de masse, servant à améliorer les propriétés optiques de la trame cellulosique et les kaolins de couchage qui assurent la qualité et l'aspect esthétique de l'impression. Plus récemment sont apparus les cartons couchés dans la fabrication d'emballages supports publicitaires.

- Les industries céramiques du bâtiment sont utilisatrices d'argiles kaolinitiques; les carreaux de grés céramique pare exemple sont soumis à des conditions d'utilisation particulières, on recherche alors une résistance mécanique élevée et une bonne régularité des produits.

2.5 L'argile dans l'industrie de la production des briques et céramiques.

a. Exigences technologiques

Bien que des normes d'utilisation des argiles dans les divers secteurs de la fabrication de brique varient d'un pays a un autre, les exigences technologiques reposent souvent sur la granulométrie, la plasticité la composition chimique et/ou minéralogique (Blanco Garcia et al. 2005 ; Celik, 2010; Khalfaoui et al., 2009).

▪ La granulométrie :

L'étude granulométrique d'un matériau naturel, terre ou sol, devant servir dans le secteur de la céramique est d'une importance capitale car c'est d'elle que dépendent les caractéristiques des produits finis qui en dérivent. La composition granulométrique des argiles intervient donc pour une part importante dans leurs aptitudes au façonnage, au séchage et a la cuisson. Le tableau suivant (tab.2.1) présente la composition granulométrique idéale de la terre et les limites recommandées pour une stabilisation adéquate et une obtention des produits finis de qualité acceptable.

Chapitre 2 : synthèse bibliographique

Tableau 2.1: seuils granulométriques optimaux des matériaux en céramique (El Ouahabi, 2013)

Produits finis	Fractions granulométriques	Stabilisants (principaux)
Briques crues stabilisées	15 % argile et limon 30 % sable fin 30 % sable grossier 25 % gravier fin	Ciment (4 – 6 % ou 8 %)
	35 % argile 25 % sable fin 25 % sable grossier 15 % gravier fin	Chaux (5 – 8 % ou 12 %)
Briques cuites	40 % argile	-
Tuiles	40 % argile ou 70 % sable (0.2 – 0.5 mm)	-
Céramique fine	Diamètre (d) < 50 µm	-

▪ La composition minéralogique

La composition minéralogique de l'argile peut avoir certaines conséquences sur les propriétés du produit final et sur le procédé de fabrication. Le tableau suivant (tab.2.2) présente les principales conséquences liées à la minéralogie de l'argile.

Tableau 2.2: les principales conséquences liées à la minéralogie de l'argile (El Ouahabi, 2013).

Minéral	Plasticité, cohésion,	susceptibilité	aux feuilletages
Kaolinite	Augmente la plasticité	Limitée	Rend plus réfractaire, élargit la zone de vitrification
Illite	possède une bonne plasticité	Moyenne	Agit comme flux grésant/fondant
Smectites	possèdent une très grande plasticité et grande cohésion	Grande, retrait important et rétention capillaire	Améliore la compacité
Muscovite	réduit la plasticité, favorise les feuilletages, effet dégraissant	limité	-
Quartz	réduit la plasticité et la cohésion, effet dégraissant, favorise les feuilletages	limité	Rend plus réfractaire, apport sensibilité au refroidissement (point de quartz)
Feldspath	réduit la plasticité, effet dégraissant	limité	Agit comme flux grésant au-dessus de 1000 °C
Carbonates	Effet dégraissant	limité	Action sur la couleur, augmente la porosité
Oxyde de fer	limité	limité	Action sur la couleur, agit comme flux grésant

Chapitre 2 : synthèse bibliographique

▪ La composition chimique

La composition chimiques et les proportions des éléments chimiques des argiles jouent un rôle primordial dans la qualité des produits fini.

Parmi les éléments à éviter dans la matière première, surtout si celle-ci est destinée à la production des briques et tuiles, on peut citer notamment:

- la craie en gros grains qui se transforme après cuisson en chaux vive; ces nodules font éclater le produit en présence de l'humidité ;
- les sulfates qui cristallisent en surface, diminuent de volume à la cuisson et déforment la surface des produits finis suite à l'échappement du gaz sulfurique (Gonzalez et al., 2006; Sokolar and Vodova, 2011 in El Ouahabi, 2013);
- la matière organique qui brule à la cuisson, laissant des vides dans la masse et créant des produits poreux et des taches sombres.

Les limites admissibles d'utilisation des matières premières argileuses en céramique sont mentionnées dans le tableau suivant (2.3).

Tableau 2.3: Limites admissibles d'utilisation des argiles en céramique (Kornmann, 2005; Wetschondo, 2012).

Nature des éléments	Formulation	Tolérances (%)	Effets sur produits finis
Silice	SiO ₂	35 – 85	Réfractaire, contraction de la masse,...
Alumine	Al ₂ O ₃	9 - 45	Réfractaire, résistance mécanique, couleur blanche
Magnésie	MgO	0 - 5	Porosité
Chaux	CaO	0 - 25	Porosité
Oxyde de manganèse	MnO	-	Couleur noire
Sesquioxyde de fer	Fe ₂ O ₃	0 - 10	Couleur rougeâtre ; fondant
Oxyde de titane	TiO ₂	0.3 - 2	Couleur jaune
Oxydes alcalins	Na ₂ O + K ₂ O	1 - 5	Fondants
Gaz carbonique	CO ₂	0 - 13	Volume
Anhydride sulfurique	SO ₃	0 - 4	Volume/Toxicite
Eau de combinaison	H ₂ O	5 – 11	Volume/Poids

b. Techniques de fabrication

Chapitre 2 : synthèse bibliographique

Le processus de production de la terre cuite se compose de différentes étapes :

- **L'extraction** des matières premières (argiles et limons)
- **La préparation** de l'argile : elle comprend deux opérations principales : le broyage et le malaxage d'une part, le dosage et le mélange des matières premières d'autre part. Le but est d'obtenir une masse argileuse bien homogène et plastique qui sera facilement transformée en produit fini.
- **Le façonnage** : on distingue divers produits de la terre cuite, en fonction de la forme du produit fini, l'argile sera mise en forme (brique rouge, tuiles, Faïence, assiettes, etc.)
- **Le séchage** : avant d'être cuites, les briques crues doivent encore perdre une grande partie de leur teneur en eau du moins en est-il ainsi pour la plupart des argiles. Le séchage se poursuit jusqu'à ce que les briques ne contiennent plus qu'environ 2% d'eau
- **La cuisson** : c'est la dernière étape que doit subir la brique d'argile façonnée et séchée, avant de pouvoir devenir une brique de terre cuite à proprement parler, on augmente graduellement la température jusqu'à l'obtention de la température de cuisson (comprise entre 850 et 1200°C, en fonction du type d'argile) ; on diminue ensuite progressivement la température jusqu'au refroidissement complet.

d. Phénomènes physico-chimiques qui peuvent se produire lors de la cuisson.

Plusieurs phénomènes physiques et chimiques peuvent se produire lors de la cuisson

Jusqu'à 450 °C, il se produit un dégagement de l'eau résiduelle de séchage et de l'eau d'hydratation. La matière organique est détruite suite à l'oxydation par l'air circulant dans les pores, De 400 à 680 °C des minéraux argileux sont détruits (kaolinite à 550 °C) avec le départ d'eau de structure (de hydroxylation) (Cultrone et al. 2001). Des composés très fins et désordonnés (metakaolin) se forment. Un début de retrait de cuisson est observé à ce stade, A 573 °C le quartz change de forme cristallographique. De 750 à 850 °C, le carbonate CaCO_3 se décompose en chaux vive (CaO) avec dégagement de CO_2 .

Chapitre 2 : synthèse bibliographique

Au-delà de 850 °C, deux phénomènes sont observés selon la minéralogie des argiles. Les argiles non-calcaires développent un frittage liquide donnant aux produits finaux une structure liée par une phase vitreuse (Khalifaoui et al. 2006). En revanche, les argiles calcaires ne développent pratiquement pas de phase vitreuse et la cristallisation des produits céramique s'effectue en phase solide (Riccardi et al. 1999, Cultrone et al. 2001)

2.6. Conclusion :

La synthèse bibliographique que nous avons faite sur les argiles nous a permis de connaître les principales propriétés des argiles et leurs domaines d'utilisation. Nous avons vu les différentes études effectuées sur les argiles dans l'Algérie et dans le monde et comment ils ont abordé les différents problèmes liés à leurs exploitations.

Il ressort que les argiles ont des propriétés physico-chimiques et mécaniques liées aux types et granulométrie de minéraux des qui leurs composent et aux impuretés qu'elle contient.

L'utilisation des argiles dans un tel domaine, exige des paramètres adéquats au procédé et à la qualité des produits finis.

CHAPITRE 03

CONDITIONS GEOLOGIQUES DU SITE D'ETUDE

3.1. Cadre géologique de la région de Souk Ahras

Du point de vue géologique le site de Zaarouria appartient à la région de Souk Ahras, une région située dans le front du domaine externe de la chaîne des Maghrébides. Elle est caractérisée par une structure géologique très complexe qui montre l'empilement de plusieurs unités structurales. De bas en haut on distingue : l'unité para-autochtone de Dj. Graout – Dj. Zaarouria, l'unité écaillée de type Sellaoua de Dj. Boubakhouch, les unités de la nappe tellienne, la nappe numidienne et les formations post-nappes (fig.3.1).

a. L'unité para-autochtone de la Haute Medjerda (Dj. Graout – Dj. Zaarouria) caractérisée par un faciès marin de plateforme continentale. Le Crétacé inférieur est essentiellement constitué par des marnes noires riches en matière organique, avec quelques intercalations de grès. Le Crétacé supérieur est dominé par des calcaires blancs crayeux surtout au Campanien et au Maastrichtien. Le Paléocène est représenté par des marnes noires qui font suite aux calcaires du Crétacé supérieur. L'Yprésien est néritique, représenté par des calcaires à nummulites.

b. L'unité des Sellaoua qui englobe les écaillés de Dj. Boubakhouch, de Dj. Bouallegue, de Chaabet el Ballout, de Kef Bou Amira et d'el Khanga. Il est d'âge allant du Turonien au Paléocène. Le Crétacé est représenté par des marnes et des calcaires de plateforme distale. Le Paléocène est marneux. Le domaine est couvert par une formation transgressive d'âge Miocène inférieur à moyen, avec des argiles, grès et glauconie.

c. La nappe tellienne méridionale à Nummulites affleure à Dj. Boukebch et Oued Djedra. Elle est d'âge Paléocène - Lutétien et représentée par des calcaires à Nummulites, des marnes et calcaires à Gastéropodes et coquilles de Lamellibranches, traduisant un milieu de dépôt néritique proche du littoral.

Chapitre 03 : conditions géologiques du site d'étude

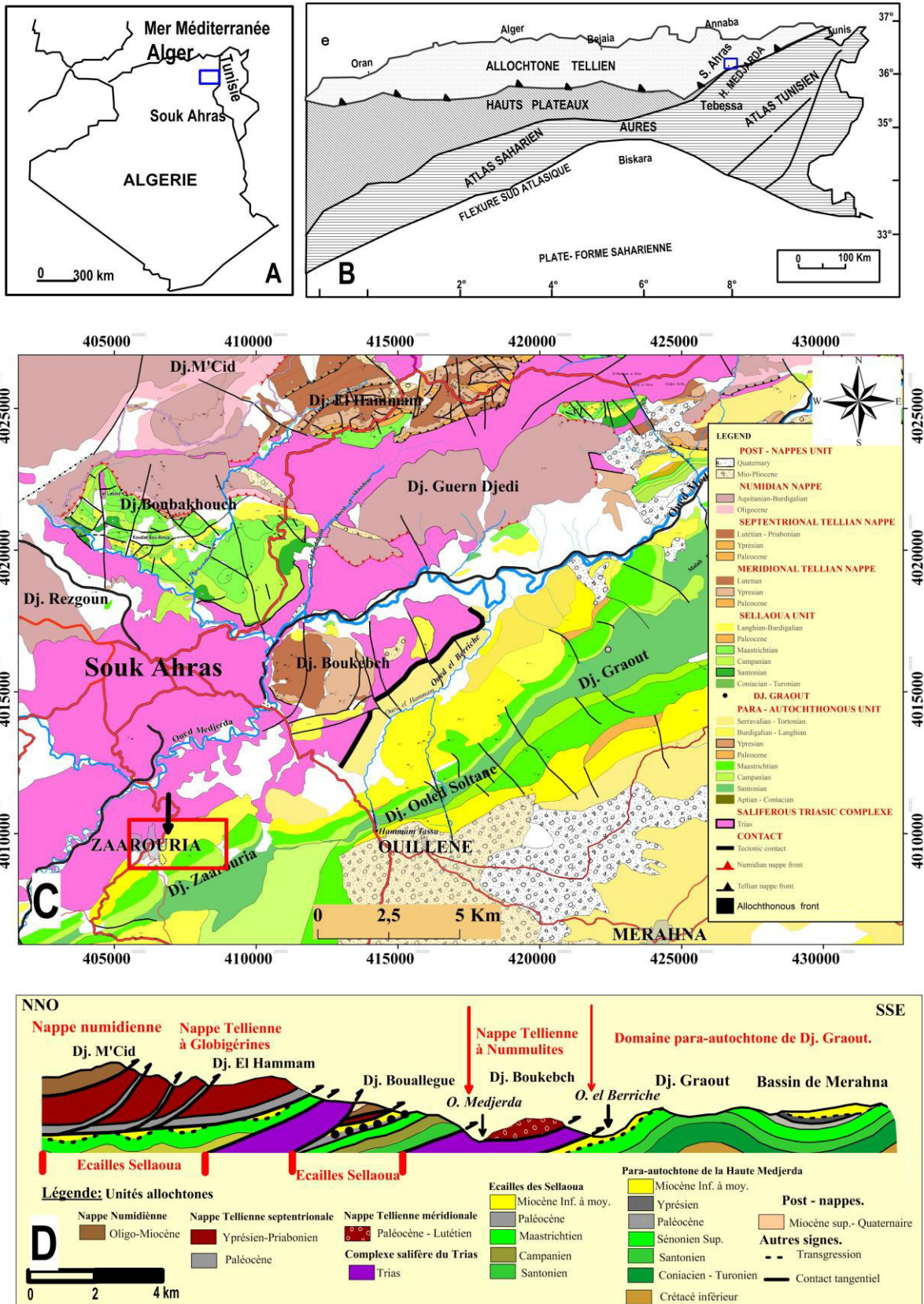


Figure 3.1: le site d'étude dans son cadre géologique régional.

d. Les nappes telliennes septentrionales à Globigérines : s'étalent de Fedj Nouicer à l'Ouest à Kef ed Dardja à l'Est. Elles sont représentées par des formations carbonatées sombres à Globigérines. Le Paléocène est à marnes noires, l'Yprésien est formé de calcaires à silex et à phosphates, le Lutétien est constitué de marnes à boules jaunes. Le Priabonien basal est à marnes et grès à glauconie.

e. La nappe numidienne : Elle affleure en position structurale élevée au Djebels Boubakhouch, M'Cid, Ain Zana et Sidi Lehmissi. Elle est d'âge Oligo – Miocène inférieur et englobent des argiles « sous numidiennes », des grès à grains moyens et à dragées de quartz, numidiens et des argiles à blocs de silex « supra – numidiennes ».

f. Le Trias argilo - gypseux et calcaro – dolomitique s'intercale entre les différentes unités.

g. Les formations post nappes sont continentales et reposent sur les unités précédentes.

3.2. Condition géologiques du site d'étude

Les argiles miocènes de dj. Zaarouria font partie de l'unité parautochtone de la haute Medjerda (dj. Graout – dj. Zaarouria) qui domine dans la partie Sud et Sud – Est de la région de Souk Ahras. Elle possède une structure anticlinale de direction NE-SO recoupé par des failles de direction N-S à NO-SE.

3.2.1. Stratigraphie

Le site de Zaarouria est caractérisé par des formations d'âge Santonien, Campanien, Maastrichtien, Paléocène, Miocène et Plio-quaternaire en plus d'un Trias allochtone. (fig3.2 et fig.3.3).

a) Trias allochtone

Il est en contact anormal avec les autres formations et occupe une partie très importante du secteur d'étude. Il est représenté par argiles rouges, gypse, anhydrite, brèches argilo-gypseuses, calcaires, calcaires dolomitiques et de grès.

b) Santonien - Campanien inférieur (C³⁻⁴)

Chapitre 03 : conditions géologiques du site d'étude

Il affleure au cœur de l'anticlinal de dj. Ouled Soltane – dj. Zaarouria. Il est représenté par des marnes grises à quelques niveaux de marnocalcaires.

b) Campanien moyen à supérieur (C⁵)

Il constitue les flancs sud et nord de l'anticlinal de dj. Ouled Soltane – dj. Zaarouria et forme avec le Maastrichtien une corniche bien marquée à dj. Zaarouria. Il est représenté par une série de marnes grises alternant avec des bancs de calcaires marneux surmontés par une barre (100 m environ) de calcaires blancs crayeux.

c) Maastrichtien (C⁶)

Il surmonte le Campanien et est constitué par :

- une alternance de marnes grises et de calcaires blancs crayeux, épaisse de 80m.
- une barre de 100 m d'épaisse constituée de calcaires blancs crayeux en bancs décimétriques à métriques.
- une alternance de marnes grises et des bancs décimétriques de calcaires crayeux à Inocérames.

d) **Paléocène** est recouvert par les formations paléocènes, plus à l'Est, il affleure dans le synclinal de Merahna au niveau de Lakhdara. Il est constitué par des marnes sombres.

e) Miocène inférieur à moyen (m¹⁻²)

Il s'étend en direction NE-SO sur une dizaine de kilomètres de long sur environ 500m de large en transgression sur le Paléocène et le Maastrichtien du flanc nord de l'anticlinal de dj. Zaarouria. Il est composé d'une série marine détritique (argiles, grès et grès glauconieux) qui commence par une alternance de bancs décimétriques de grès glauconieux avec des argiles jaunâtres surmontées par une épaisse série de d'argiles noires. L'épaisseur de la série dépassant les 300m. C'est à cette formation qu'appartient le gisement d'argiles de Zaarouria qui constitue l'objectif de la présente étude.

f. Les formations **plio-quaternaires** couvrent par endroits les formations précédentes, elles sont représentées par des conglomérats, des brèches, des argiles rouges et des sols arables.

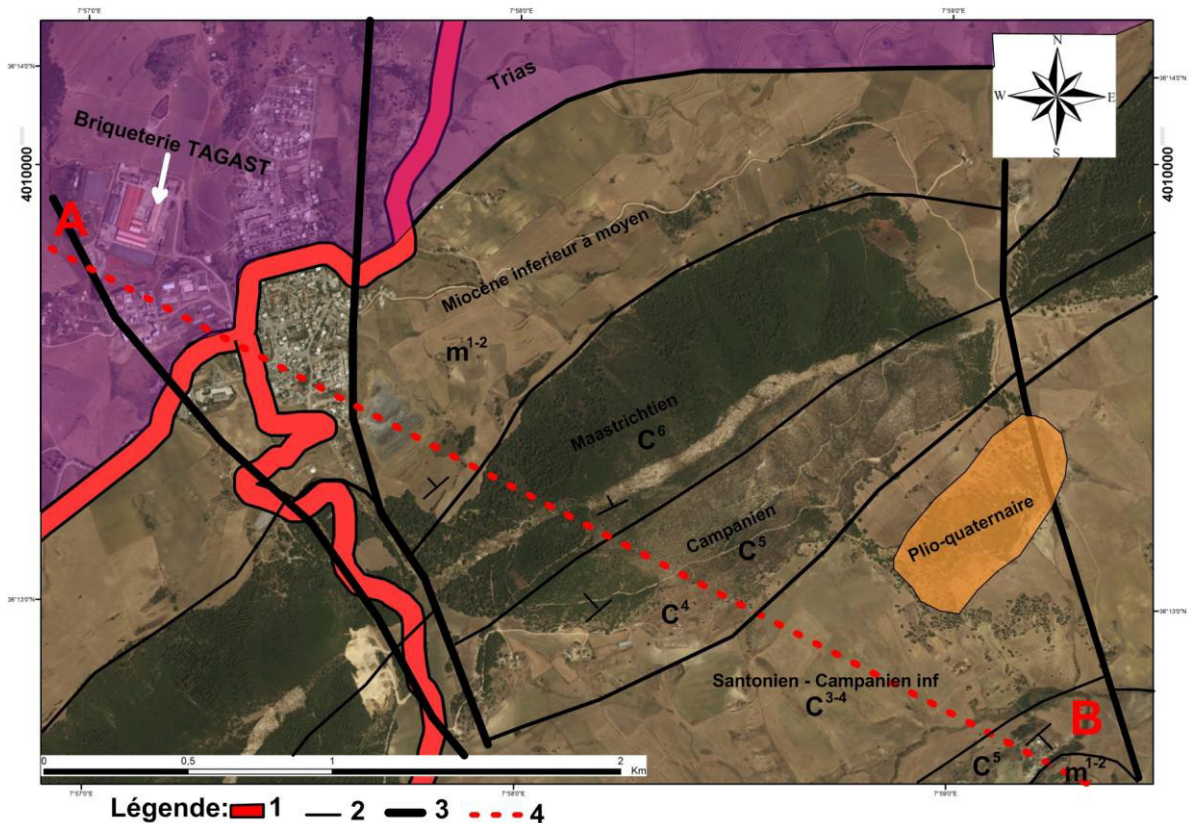


Figure 3.2: carte schématique de la géologie du site d'étude

Légende : 1. Route goudronnée, 2. Limite stratigraphique, 3. Contact anormal et faille, 4. Tracé de la coupe géologique.

3.2.2. Structure du site d'étude

Le site d'étude fait partie du flanc nord de l'anticlinal à cœur érodé de dj. Zaarouria qui constitue la terminaison Ouest de l'anticlinal de Dj. Graout. La coupe A-B représentée sur la figure (3.4) montre un anticlinal de direction NE-SO avec un flanc nord redressé presque à la verticale, les calcaires maastrichtiens forment une corniche surmontant topographiquement les argiles du Miocène. Le site d'étude est situé sur le flanc nord de cet anticlinal. Les argiles du Miocène concernées par l'étude sont transgressives sur les marnes paléocènes et les formations du Maastrichtien (marnes grise et calcaires blanc crayeux), le Trias les chevauche au nord (fig. 3.4).

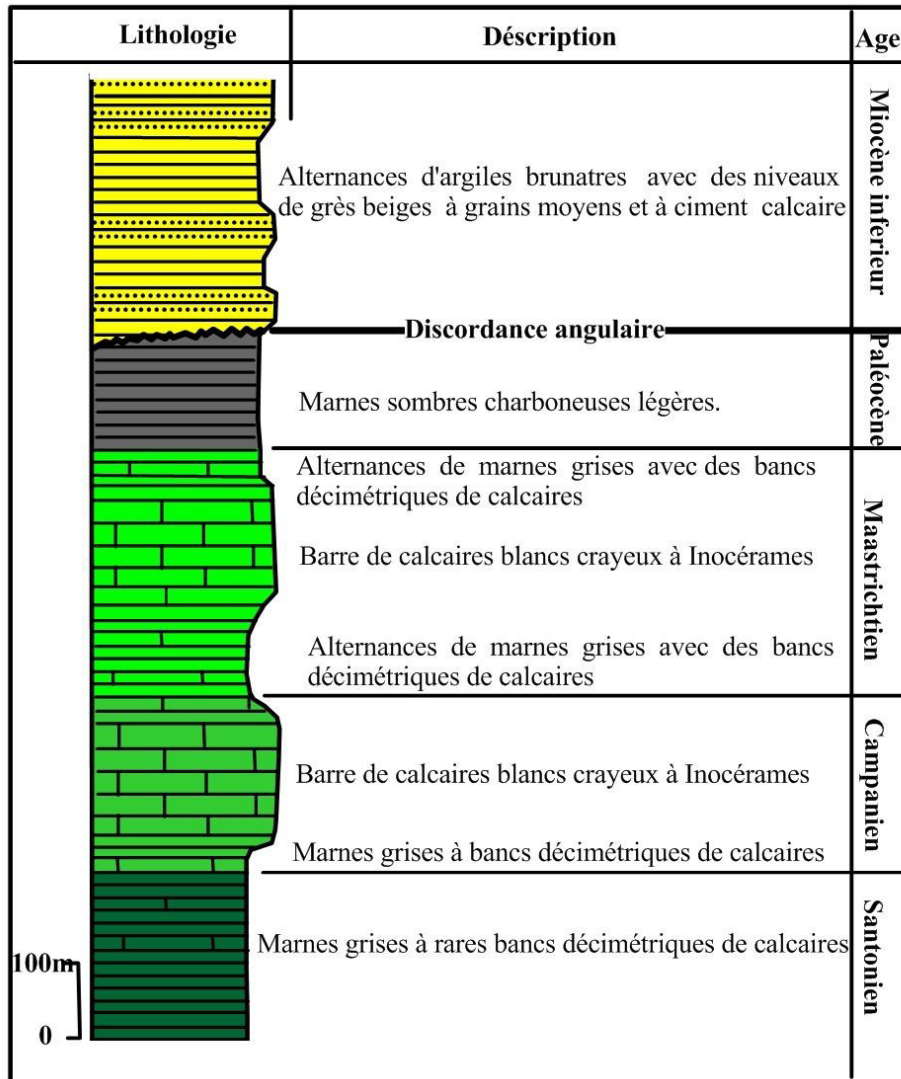


Figure 3.3: Log stratigraphique de l'unité para-autochtone de dj. Graout (Chabbi, 2017).

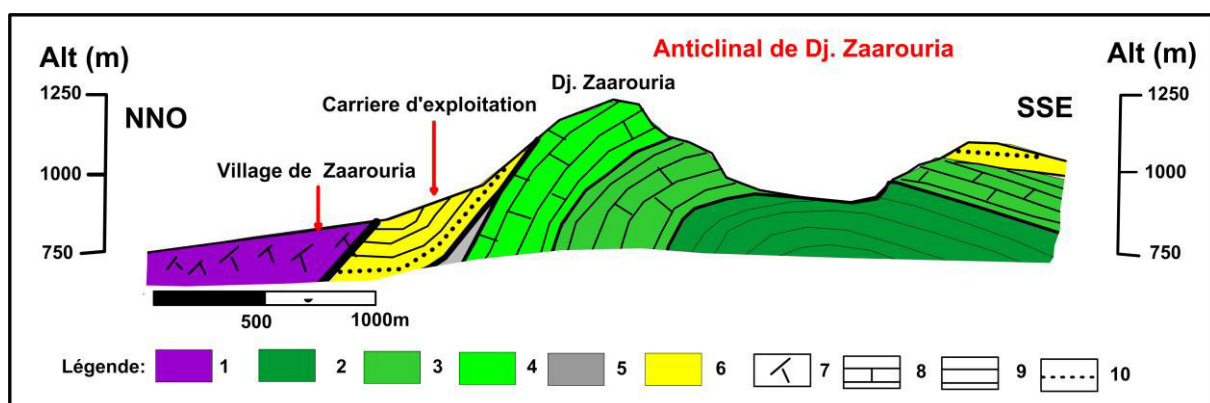


Figure 3.4 : coupe géologique montrant la structure géologique du site d'étude.

Légende : 1. Trias, 2. Santonien-Campanien inférieur, 3. Campanien, 4. Maastrichtien, 5. Paléocène, 6. Miocène inférieur à moyen, 7. Formations laguno-continentales, 8. Calcaires, 9. Argiles et marnes, 10. Grès et grès glauconieux.

3.2.3. Description des argiles du miocène de Zaarouria

Les argiles du Miocène de Zaarouria affleurent sur le flanc nord de l'anticlinal de dj. Zaarouria et s'étalent de Zaarouria à l'Ouest à Hammam Tassa à l'Est. Elles sont d'âge Miocène inférieur à moyen (David 1956 et Chabbi 2017) et recouvrent en discordance les formations paléocènes et maastrichtiennes. Elles sont sous une faible couverture quaternaire (terre arable). La partie inférieure de ces argiles, à proximité des calcaires crayeux du Maastrichtien sont de couleur jaunâtre et renferment des niveaux décimétriques de grès et grès glauconieux (fig.3.5), ces argiles livrent des briques de mauvaise qualité (d'après le responsable de production de TAGAST). La partie supérieure des argiles (stratigraphiquement) qui affleurent vers le bas, sont froissées, de couleur sombre et produisent des briques de très bonne qualité.

Ce gisement d'argiles est exploitable à ciel ouvert selon des gradins de 5 à 10 m de hauteur.

CHAPITRE 04

CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE ET MECANIQUE DES ARGILES MIOCENES DE ZAAROURIA

4.1. Introduction

Ce chapitre constitue la partie expérimentale de présente étude. Il est focalisé sur l'évaluation de certains paramètres Physiques, chimique et mécaniques des argiles miocènes de Zaarouria.

La caractérisation physico-chimique des argiles miocènes de Zaarouria est passée par deux étapes principales : échantillonnage au terrain, analyse des échantillons au laboratoire, traitement des données, résultats et discussions et conclusions.

4.2. Echantillonnage

Cette opération consiste une sortie de terrain pour la récupération manuelle de trois échantillons (trois sacs d'argiles) à partir de différents niveaux (carrière, dépôt de stockage, après broyage).

Echantillon 01 : cet échantillon est prélevé au niveau de la carrière au niveau des argiles jaunes à intercalation de bancs de grès et grès glauconieux.

Echantillon 02 : cet échantillon est prélevé au niveau de dépôt de stockage (argiles noires compact).

Echantillon 03 : cet échantillon est prélevé au niveau de la chaîne de broyage (argiles grises).

4.3. Analyse des échantillons au laboratoire

Elle englobe l'ensemble d'opérations effectuées sur les échantillons en vue d'évaluer les paramètres physiques, mécaniques et chimiques, des échantillons étudiés.

La présente étude a tenu compte de vingt (20) autres échantillons qui ont été prélevés du terrain par l'équipe de laboratoire (BEGAS-ANALYSES) pour le compte de l'entreprise TAGAST).

L'étude nécessite une réalisation des essais mécanique et physiques telle que : la masse volumique absolue, l'analyse granulométrique, l'indice de plasticité et l'indice de liquidité, la teneur en eau moyenne et la résistance au cisaillement.

4.4. Évaluation des paramètres physiques des argiles miocènes de Zaarouria

Avant d'analyser le comportement mécanique des sols ou roches, il est nécessaire de définir certains paramètres qui se rapportent aux diverses proportions dans lesquelles se trouvent le squelette solide, l'eau et l'air les constituant, notamment la teneur en eau naturelle, la masse volumique absolue, l'analyse granulométrique et les limites d'Atterberg...etc.

Pour manque de matériels au laboratoire de l'école nationale supérieure des mines et pour quelques difficultés rencontrées dans la réalisation de certains essais hors école, seule quelques essais ont été réalisés dans notre laboratoire.

Pour la réalisation de ces essais nous avons utilisé le matériel suivant :

- Une balance électrique.
- Une éprouvette (1000 ml).
- Une étuve.

4.4.1. Evaluation de la masse volumique absolue

4.4.1.1. But de l'essai

Le but de l'essai est de déterminer la masse volumique absolue des argiles ainsi que leur teneur en eau. Dans cet essai nous avons utilisé le pycnomètre à l'air.

4.4.1.2. Mode opératoire de l'essai

- Peser la cuve vide et noter sa masse.
- Introduire l'échantillon dont on veut mesurer les caractéristiques dans la cuve (remplir complètement la cuve).
- Peser l'ensemble cuve + matériau, afin de déterminer la quantité de matériau utilisé : m_{gs} .
- Ouvrir les soupapes (7) et (9) de l'ensemble pompe + manomètre afin d'éviter toute surpression.
- Placer l'ensemble sur la cuve et lui faire subir une rotation de 99°.
- Serer les vis de blocage en appliquant le même nombre de tour à chacune des deux, aligner également les repères convenablement de sorte que le volume de la cuve reste le même entre 2 essais.
- Fermer les soupapes.
- Avec la pompe manuelle (4), appliquer une pression d'environ 2,35 bars dans la chambre à air (3).
- Cette pression est lue directement sur le manomètre (5), bloquer le piston en le vissant de quelques tours sans forcer, dans le corps de la pompe.
- Ouvrir délicatement la soupape (7) pour réduire la pression de la chambre (3) à 23 mWs, en tapotant le plexiglas du manomètre si la pression tombe sous 2,3 bars, recommencer les opérations de pompage et de dépressurisation.
- Pour réaliser effectivement la mesure, ouvrir la soupape (6) : la chambre de pressurisation et la cuve sont alors en liaison. La pression s'égalise dans les 2 volumes au bout de 5 secondes environ.
- Lorsque la pression reste constante, noter sa valeur. Ouvrir la soupape (9) et reprendre les opérations pour obtenir finalement 3 résultats voir figure (4.1).

- La masse volumique est déterminée à partir du point d'intersection entre la pression et la quantité du matériau utilisée par projection sur l'abaque Gérâte-NR 239 (fig. 4.2).

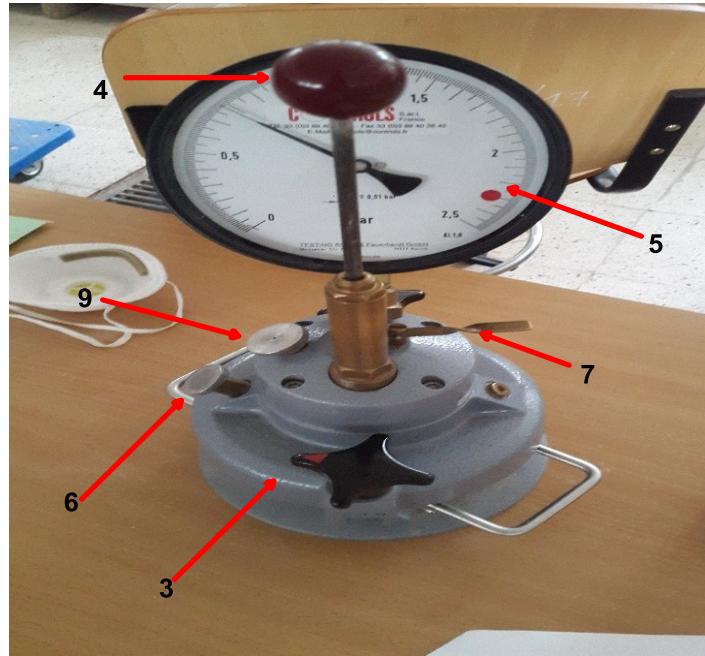


Figure 4. 1: pycnomètre à air.

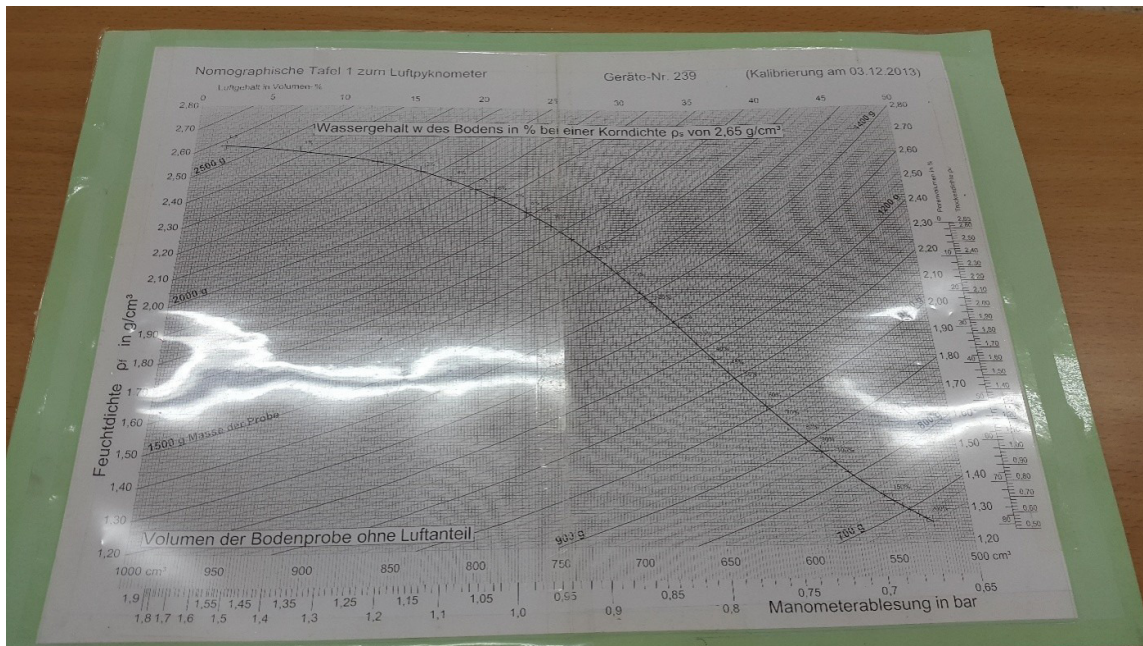


Figure 4.2: l'Abaque Gérâte NR-239.

4.4.1.3. Résultat :

Les résultats obtenus pour les trois échantillons testés sont présentés sur tableau 4.1.

.Tableau 4.1 : détermination de la masse volumique absolue.

Echantillon	Essai n°	Masse (cuve vide) (g)	Masse (cuve + matériau) (g)	Masse matériau(g)	Pression (bars)	M. volumique Absolue	M. volumique moyenne absolue						
01	1	1868	3518	1650	0.95	2,485	2.480						
	2				0.94	2.479							
	3				0.91	2.477							
02	1				1868	3518	1650	0.88	2,472	2.470			
	2							0.88	2.471				
								0.86	2.469				
03	1							1868	3518	1650	0,9	2,477	2.476
	2										0.91	2.472	
	3										0.93	2.480	

Nous constatons que la masse volumique des trois échantillons va de 2.47 à 2.48 (g/cm³), inférieur de la masse volumique moyenne de la croûte continentale qui nous renseigne sur la présence des vides (porosité).

4.4.2. Teneur en eau naturelle w% :

C'est le rapport du poids d'eau que le matériau contient au poids de ses éléments secs, après séchage à l'étuve à 65 °C dans le cas des matériaux contenant des éléments organiques. Elle est calculée avec l'équation suivante :

$$W\% = \frac{\text{Poids d'eau dans le matériau}}{\text{Poids du matériau sec}} \times 100$$

Le principe de l'essai est simple, il consiste à prélever des échantillons de la mine, puis de peser chaque échantillon dans leur état naturel. Puis après séchage pendant 24 à l'étuve à 65 °C., les échantillons seront de nouveau pesés.

Après la réalisation d'une série d'essai nous avons obtenu les résultats enregistrés dans le tableau suivant (tab. 4.2).

Tableau 4.2: résultats de d'évaluation de la teneur en eau naturelle des argiles miocènes de Zaarouria.

Echantillon	Essai n°	Masse de l'échantillon à l'état naturel (g)	Masse de l'échantillon après séchage (g)	Teneur en eau de l'échantillon %	teneur en eau moyenne %
Echantillon 01	1	252	222	13.51	12.91
	2	250	220	13.63	
	3	250	224	11.60	
Echantillon 02	1	150	132	13.63	14.62
	2	154	131	17.55	
	3	149	132,2	12.70	
Echantillon 03	1	151	136	11.02	11.27
	2	150,4	135	11.40	
	3	149,3	134	11.41	

Nous constatons que l'échantillon 2 prélevé des argiles noires présente une teneur en eau (14.62%) supérieure à celle de l'échantillon 01 et de l'échantillon 3. Ce qui explique la présence d'une humidité au niveau du lieu du stockage.

4.4.3. Limites d'Atterberg :

Les limites d'Atterberg sont les teneurs en eau présentant les limites de passage du matériau argileux d'un état à un autre : la limite de plasticité et la limite de liquidité.

La limite de plasticité (W_P) est la teneur en eau correspondante au passage de l'état solide à l'état plastique. Cependant, la limite de liquidité (W_L) présente le passage de l'état plastique à l'état liquide (El Fgaier, 2013). La détermination de ces deux limites est effectuée suivant la norme [NF P94- 051, 1993].

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau caractéristiques des matériaux fins permettant entre autre d'établir leur classification et d'évaluer leur consistance. Ces valeurs de teneurs en eau permettent de caractériser également les différents états des matériaux : liquide, plastique solide et solide sans retrait de ces matériaux. C'est un essai relativement long à réaliser (plus de deux jours en général et la durée augmente avec la proportion d'argile). Bien que rudimentaire dans sa préparation, les résultats obtenus sont répétables et reproductibles. Les limites d'Atterberg comprennent :

- la limite de liquidité W_L .
- la limite de plasticité W_P .
- L'indice de plasticité (I_p) correspond à l'écart entre la limite de liquidité et la limite de plasticité. Pour toutes les teneurs en eau comprises entre ces deux bornes, le matériau sera dans un état plastique. Plus l'écart est grand, plus la plasticité du sol est élevée.

- $I_p = w_L - w_P$

4.4.3.1. But d'essai:

Les limites d'Atterberg permet de prévoir le comportement des sols fins pendant les phases de terrassement ainsi l'argilosité du sol.

4.4.3.2. Matériel utilisé

Le matériel utilisé est très simple, il s'agit d'un :

- appareil de Casagrande et cône de pénétration.
- calle de pénétration de 10mm
- Outil a rainuré.

Pour l'évaluation de la limite de plasticité et d'une plaque de marbre et une capsule de pesée pour l'évaluation de limite de la liquidité.

4.4.3.3. Mode opératoire

Ces essais sont réalisés sur un mortier d'argiles composé de la fraction granulométrique 0/400 μm . Pour cela, l'échantillon homogénéisé au départ est au préalable humidifié dans un bac. La quantité de sol initial est environ de 200x le diamètre en mm des plus gros éléments. Une fois le matériau ameubli, il est tamisé sous eau au tamis de 400 μm dans un bac de récupération suffisamment grand (fig. 4.3). Il faut ensuite laisser le mélange décanter pour éliminer l'excès d'eau. Dès que l'eau devient claire, une première étape peut consister à siphonner l'excédent. Pour réduire ensuite plus finement la quantité d'eau, un passage à l'étuve à des températures inférieures à 50°C peut être réalisé (figure 4.4). On peut également laisser évaporer doucement jusqu'à atteindre la teneur en eau la plus proche de la liquidité. Il convient d'être très vigilant afin de ne pas trop sécher le matériau car cela oblige à recommencer l'opération. Après séchage, le mortier est récupéré et malaxé sur une table en marbre pour homogénéiser autant que possible la pâte et éliminer les éventuelles boulettes qui auraient pu se former (fig. 4.5). Ce mélange doit être le plus lisse possible. Le mortier est enfin prêt pour commencer les essais.



Figure 4.3 : récupération de la fraction 0/400 μm et décantation du mélange.



Figure 4.4 : séchage dans l'étuve avec température 65°C.



Figure 4.5: homogénéisation de la pâte par malaxage.

Les limites sont réalisées sur une plaque de marbre poreux ce qui aide à faire baisser doucement les teneurs en eau du matériau.

4.4.3.4. Détermination de la limite de liquidité :

La limite de liquidité (w_l) caractérise la transition entre un état plastique et un état liquide. C'est la teneur en eau pondérale, exprimée en pourcentage, au-dessus de laquelle le matériau s'écoule comme un liquide visqueux sous l'influence de son propre poids. L'argile est mélangée à une quantité d'eau. La pâte obtenue est placée dans une coupelle (Appareil de Casagrande) de 100 mm de diamètre environ.



Figure 4.6: Limite de liquidité avec l'appareil de Casagrande.

On trace sur la pâte lissée une rainure normalisée avec un outil spécial. À l'aide d'une came, on fait subir une série de chocs à la coupelle. On observe en fin d'expérience le contact des deux lèvres de la rainure.

La limite de liquidité est la teneur en eau en % qui correspond à une fermeture en 25 chocs.

Alors la limite de liquidité est la valeur de la teneur en eau moyenne pour chaque échantillon

Tableau 3 : les teneurs en eau pour limite de liquidité après séchage.

Echantillon	Essai n°	Masse de l'échantillon à l'état naturel (g)	Masse de l'échantillon après séchage (g)	Teneur en eau de l'échantillon %	Limite de liquidité %
Echantillon 01	1	7.7	4.9	57.14	56.13
	2	7.6	4.8	58.33	
	3	7.8	5.1	52.94	
Echantillon 02	1	15.8	10.6	49.05	52.19
	2	15.5	10	55	
	3	15.1	9.9	52.52	
Echantillon 03	1	21.2	14.3	48.25	49.66
	2	21	14.1	48.93	
	3	20.8	13.7	51.82	

Nous constatons que la limite de plasticité des trois échantillons est de 49.66% pour l'échantillon 03, 52.19% pour l'échantillon 02 et de 56.13% pour l'échantillon 01. Ces résultats nous permettent de dire que le passage de l'état liquide l'état plastique est acceptable.

4.4.3.5. Détermination de limite de plasticité (w_p)

La limite de plasticité (w_p) caractérise la transition entre un état solide et un état plastique. Cette limite indique la teneur en eau pondérale, en pourcentage, optimale

pour travailler un matériau et favoriser le compactage. En dessous de cette limite, le matériau est friable. La limite de plasticité est déterminée par le modelage d'un petit fil avec la partie fine d'un matériau sur une surface plane, non poreuse. La procédure est définie dans la norme ASTM D 4318. Si le matériau est plastique, ce petit fil conserve sa forme jusqu'à un diamètre très étroit. L'échantillon peut alors être reformulé et l'essai est répété. Comme la teneur en humidité diminue à cause de l'évaporation, le fil commence à se briser à grands diamètres.



Figure 4.7 : Détermination de limite de plasticité.

La limite de plasticité est définie comme étant la teneur en eau, où le fil se casse à un diamètre de 3 mm (environ 1/8 "). Un matériau est considéré comme non-plastique, si un fil ne peut pas rouler jusqu'à 3 mm, quel que soit le taux d'humidité de la partie fine du matériau.

Tableau 4.4 : les teneurs en eau pour limite de plasticité après séchage.

Echantillon	Essai n°	Masse de l'échantillon à l'état naturel (g)	Masse de l'échantillon après séchage (g)	Teneur en eau de l'échantillon %	Limite de plasticité %
Echantillon 01	1	0.8	0.6	33.33	38.88
	2	0.7	0.5	33.33	
	3	0.9	0.6	50	
Echantillon 02	1	1.2	0.9	33.33	40.73
	2	1.1	0.9	22.22	
	3	1	0.6	66.66	
Echantillon 03	1	1.5	1.1	66.66	36.86
	2	1.4	1.2	16.66	
	3	1.4	1.1	27.27	

La limite de plasticité est correspondante à la moyenne des valeurs des teneurs en eau de les 03 échantillons présentées dans le tableau.

Les résultats obtenus montrent des valeurs moyennes de plasticité vont de 36.86% à 38.88%.

4.4.3.6. L'indice de plasticité :

La plasticité est une propriété caractéristique des éléments très fins ou argileux d'un matériau, en relation avec l'existence de couches d'eau adsorbée avec ou sans électrolytes dissociés. On conçoit donc que les limites d'Atterberg et l'indice de

plasticité d'un matériau varient non seulement avec l'importance de sa fraction argileuse mais également avec la nature des minéraux argileux et des cations adsorbés. À titre d'exemple, les valeurs les plus fortes de cet indice sont obtenues avec les montmorillonites et plus particulièrement celles chargées du cation sodium (Na⁺).

L'indice de plasticité mesure l'étendue de la plage de teneur en eau dans laquelle le matériau se trouve à l'état plastique. Suivant la valeur de leur indice de plasticité, les matériaux peuvent se classer comme suit :

$$I_p = W_L - W_p$$

On calcul l'indice de plasticité à partir des moyennes des teneurs en eau calculés au part avant de les limites de liquidité et plasticité pour les trois échantillons :

$$W_{ll} = 56.13\% \quad W_{pl} = 38.88\%$$

Alors :

$$I_p = 56.13 - 38.88 = 17,25 \%$$

Tableau 4.5: indice de plasticité

Echantillon	Indice de plasticité %
Echantillon 1	17.25
Echantillon 2	11.46
Echantillon 3	12.8

Tableau 4.6: indice de plasticité (inspiré d'Atlan, 1978).

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

Nous constatons que l'indice de plasticité est de 17.25% pour l'échantillon 1, de 11.46% pour l'échantillon 2 et de 12.8% pour l'échantillon 3.

On peut déduire de cette étude que les argiles miocènes de Zaarouria sont moyennement plastiques si on se réfère au tableau d'interprétation de l'indice de plasticité (tab.4.6).

4.5. Caractérisation des propriétés mécaniques des argiles miocènes de Zaarouria

4.5.1. Essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande

4.5.1.1. Introduction

L'étude de la résistance au cisaillement d'un matériau constitue un problème complexe. La résistance au cisaillement dépend du type de matériau rencontré, suivant qu'il est cohérent ou non, que le matériau est grossier ou fin, mais aussi l'intensité des efforts exercés et la manière dont ces efforts sont appliqués.

4.5.1.2. But de l'essai :

Il s'agit de déterminer les caractéristiques mécaniques en procédant au cisaillement rectiligne d'un échantillon sous charge constante.

L'essai de cisaillement permet de tracer la courbe intrinsèque du matériau étudié et de déterminer son angle de frottement interne (ϕ) et sa cohésion (C).

4.5.1.3. L'équipement nécessaire pour réaliser un essai de cisaillement :

Un ensemble d'essai à la machine de cisaillement direct conforme à la norme **NF P94-071-1** se compose de :

- Un bâti de chargement : la machine elle-même et son dispositif de chargement vertical.

La machine de cisaillement est constituée d'un bâti support comportant un moteur pas à pas permettant de pousser la demi - boîte inférieure montée dans un chariot mobile guidé tandis que la demi - boîte supérieure est reliée au dispositif de mesure de la force horizontale, cette partie restant fixe.

Le chariot doit être étanche car il reçoit l'eau pour la saturation de l'échantillon. Le mode de chargement vertical permettant d'appliquer les contraintes de consolidation soit conventionnel à poids, c'est-à-dire qu'on dépose les poids nécessaires sur le plateau du bras de levier prévu à cet effet. Le bâti est alors de type châssis à cadre acier et les pieds doivent être fixés au sol. Un jeu de 32 kg est livré en standard avec la machine car le bras de levier (x10) permet l'application de 320kg soit plus de 3kN sur l'échantillon. En cas de besoin, des poids supplémentaires peuvent être ajoutés jusque 50kg. La capacité de cisaillement est de 5kN. Ces bâtis possèdent une liaison RS 232 de série permettant de les piloter à distance (démarrage, arrêt, vitesse régulée de 0,01pm à 10mm/min) tandis que leur écran et clavier permettent de les utiliser simplement en mode local.

- Une boîte de cisaillement, elle est de forme carrée, et de dimension de 60mm. Un dispositif de mesure est relié pour le tassement vertical, la force de cisaillement développée et le déplacement horizontal du chariot supportant les 2 demi-boîtes. La

force est mesurée à l'aide d'un capteur de force (capteur aveugle analogique permettant l'acquisition automatique).

Le tassement vertical est mesuré à l'aide d'un capteur de déplacement de l'ordre de 10mm, suffisant pour une hauteur d'échantillon de 20mm.

Le déplacement horizontal est mesuré avec un capteur de 25mm, suffisant pour mesurer la course totale du chariot (Programmé à 15 mm dans notre étude) ainsi que la déformation maximale à atteindre pour l'arrêt du cisaillement.

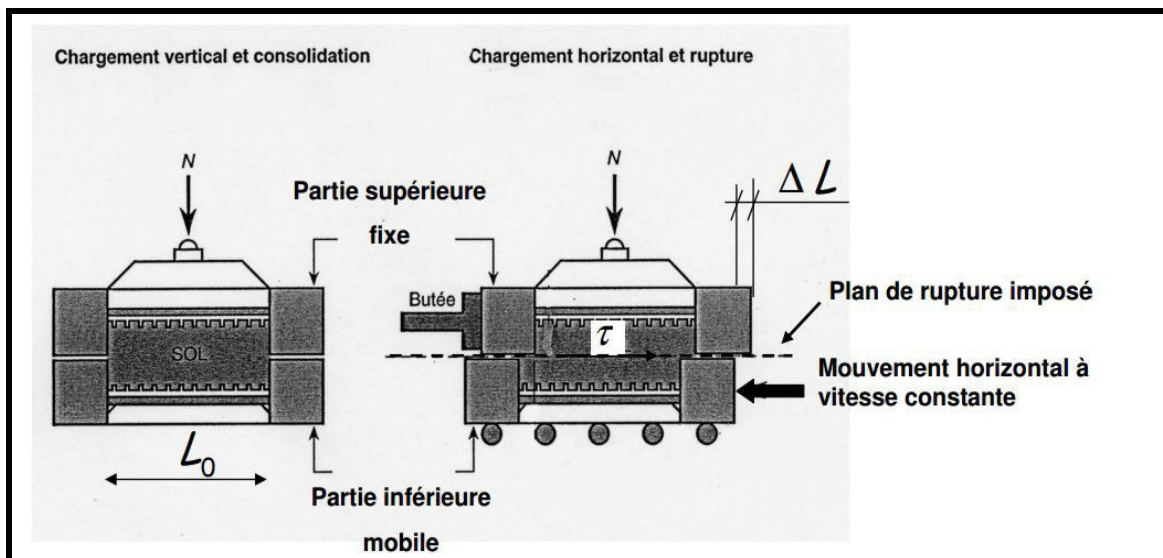


Figure 4.8: schémas de l'appareillage de l'essai de cisaillement.

4.5.1.4. Mode opératoire de l'essai de cisaillement direct

Le mode opératoire de cet essai selon la norme NF P94-071-1 consiste à :

- Consolider l'éprouvette de section (s) dans une première phase en appliquant sur la face supérieure un effort vertical constant maintenu pendant tout l'essai (contrainte $\sigma_n = N/S$).
- La phase de consolidation permet de calculer la vitesse à laquelle doit être cisailé l'échantillon.

- Cisailer ensuite le long du plan de séparation des 2 demi-boîtes en leur imposant un déplacement relatif à vitesse constante.
- L'effort de cisaillement horizontal (T) est mesuré et la contrainte ($\tau = T/s$) est calculée.

De plus, on mesure le déplacement vertical de l'éprouvette (Δh) et le déplacement horizontal (Δl) à l'aide de deux capteurs de mesure de déplacement.

A partir de là, on peut déterminer en fonction du temps :

- la contrainte normale σ_n ;
- la contrainte tangentielle τ ;
- la déformation verticale $\frac{\Delta h}{h} = \varepsilon_h$
- la déformation horizontale $\frac{\Delta l}{l} = \varepsilon_l$

Pour un effort vertical donné, c'est à dire pour une contrainte normale σ_n , on construit deux types de courbes $\tau = f(\varepsilon_l)$ (fig. 4.9) et $\tau = f(\sigma_n)$ (fig. 4.10)

- τ en fonction de ε_l

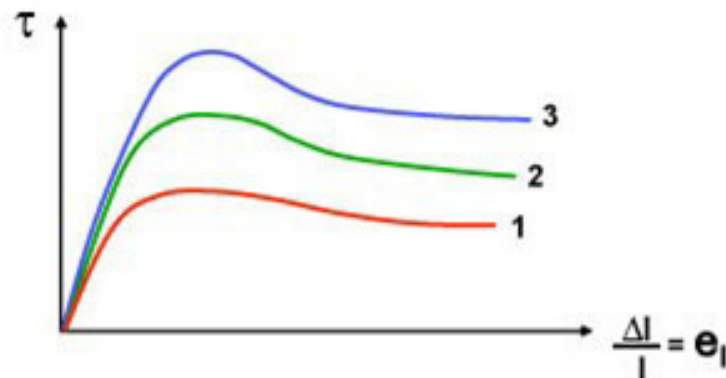


Figure 4. 9: courbes expérimentales obtenues dans un essai de cisaillement « direct » τ en fonction de ε_l .

Sur ce graphe, les trois séries de courbe (1, 2 et 3) sont fonction de la contrainte normale imposée.

- τ en fonction de σ_n

Il s'agit ensuite de déterminer sur la courbe ($\tau ; \varepsilon_h$) de la figure 9 le point qui correspond à la rupture (τ_{max}), en fonction du critère choisi.

Ceci permet d'obtenir pour chaque couple de valeurs (τ, σ_n) un point dans le plan de Mohr. Pour déterminer une courbe intrinsèque, il est nécessaire de réaliser l'essai avec plusieurs valeurs de σ_n , ce qui donne les points dans le plan de Mohr. Voir Figure 10.

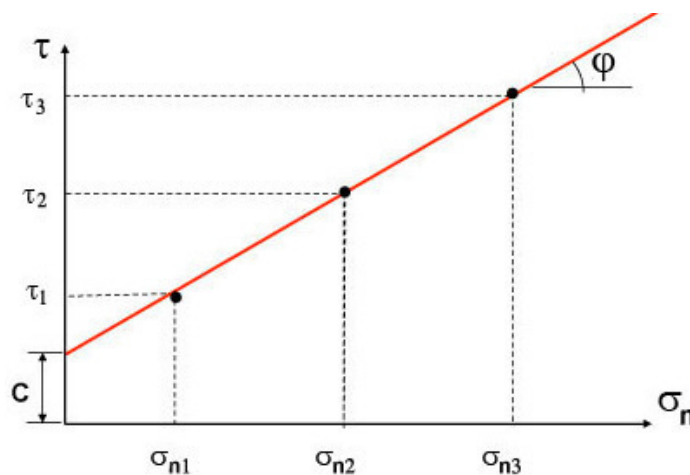


Figure 4.10: résultats d'un essai de cisaillement direct dans le plan de Mohr Coulomb.

4.5.1.5. Déroulement d'essai

L'échantillon a été placé dans le bâti dans les conditions drainé et consolidé. Quatre essais à la boîte de Casagrande ont été effectués avec différentes forces N verticales au sommet de l'éprouvette qui crée une contrainte normale sur le plan horizontal de l'éprouvette (100 KN ; 200 KN ; 300KN ; 400 KN). La vitesse de déplacement horizontal de la demi-boîte inférieure a été fixée à 0.1 mm/mn.

4.5.1.6. Résultats :

Les résultats des essais de cisaillement direct effectués sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 7: résultats de l'essai de cisaillement.

Echantillon	Essai n°	Type d'échantillon	Dimension de l'échantillon (mm)	Charge normale (N)	Contrainte normal (kPa)	Charge de cisaillement (N)	Contrainte de cisaillement (kPa)
Echantillon 01	1	Carré	59	100.0	28.7	429,9	123,5
	2	Carré	60	200.0	55.6	556,2	154,5
	3	Carré	60	300.0	83.3	653,4	181,5
Echantillon 02	1	Carré	59	100	28,7	426	122,4
	2	Carré	60	200	56,6	536,1	156,4
	3	Carré	60	300	83,3	651,9	183,1
Echantillon 03	1	Carré	59	100	28,7	421,1	121
	2	Carré	60	200	56,6	557,6	154,9
	3	Carré	60	300	83,3	648,9	180,25

La construction des couples de points ($\tau=f(\sigma_n)$) dans le plan de Mohr-Coulomb que ce soit en valeur maximale est illustrée en figures 4.11, 4.12, 4.13 .

En traçant la courbe intrinsèque dans le plan de Mohr coulomb ($\tau = \tan\varphi * \sigma_n + C$), les résultats de trois échantillons ont obtenu un segment de fonction :

Segment de la résistance maximale :

$$Y1= 30,35x + 93,267, \quad Y2 = 30,35x + 93,267, \quad Y3= 29,625x + 92,8$$

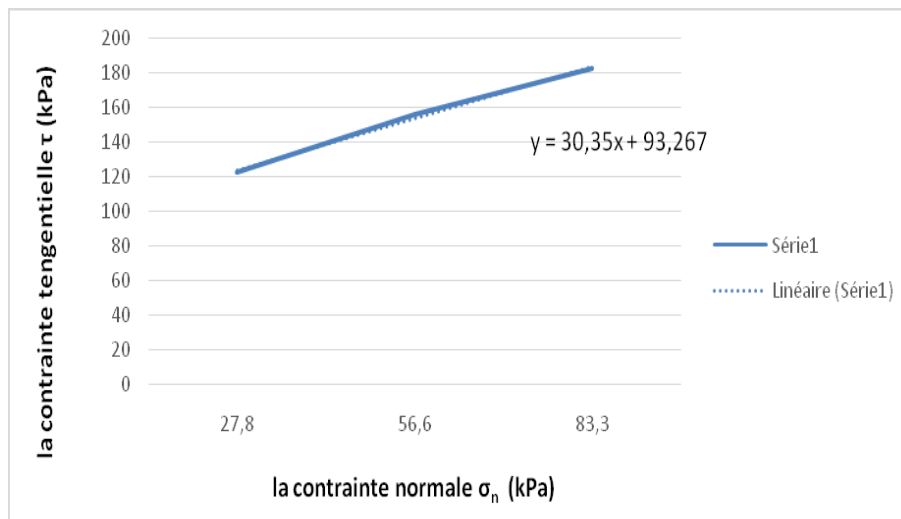


Figure 4.11 : résultats d'un essai de cisaillement direct dans le plan de Mohr Coulomb en utilisant les valeurs de la résistance maximale de l'échantillon 01.

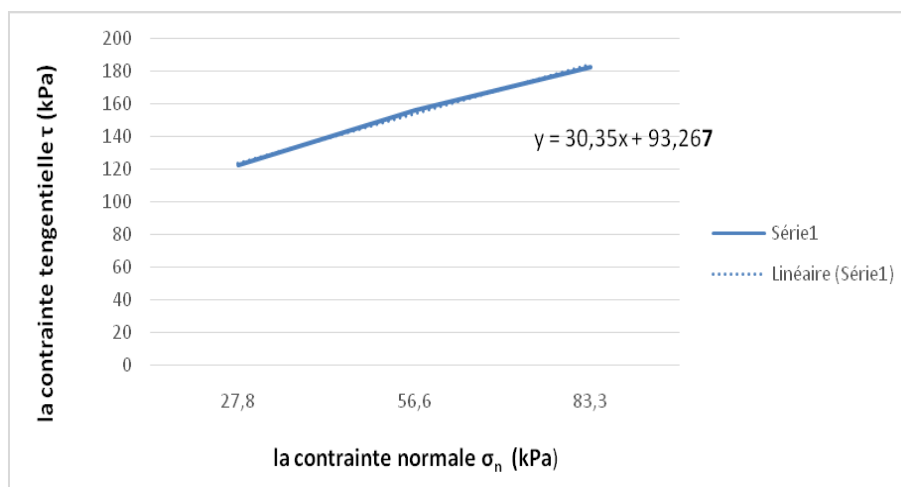


Figure 4.12: Résultats d'un essai de cisaillement direct dans le plan de Mohr Coulomb en utilisant les valeurs de la résistance maximale de l'échantillon 02.

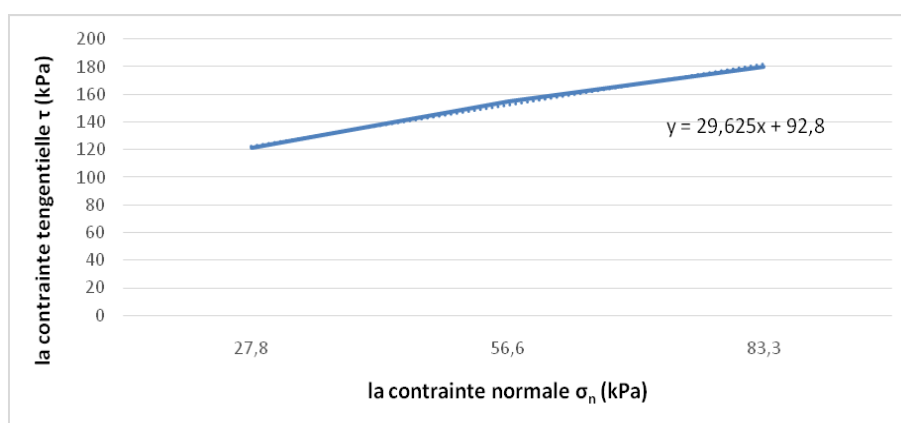


Figure 4. 13: Résultats d'un essai de cisaillement direct dans le plan de Mohr Coulomb en utilisant les valeurs de la résistance maximale de l'échantillon 03.

On utilise les valeurs de la résistance maximale pour obtenir les cohésions des trois échantillons :

La Cohésion de l'échantillon 01 (kPa) : 93,267

La Cohésion de l'échantillon 02 (kPa) : 93,267

La Cohésion de l'échantillon 03 (kPa) : 92, 8

Tableau 4. 8 : détermination de la cohésion

	Echantillon 01	Échantillon 02	Échantillon 03
Cohésion (kPa)	93,267	93,267	92, 8

L'angle de frottement interne est déterminé en faisant la moyenne de trois valeurs obtenues à partir de la tangente des trois courbes :

L'angle de frottement interne 01 (Degré) : 3,75°

L'angle de frottement interne 02(Degré) : 3,83°

L'angle de frottement interne 03(Degré) : 3,89°

Tableau 9: détermination de l'angle de frottement interne.

	Echantillon 01	Echantillon 02	Echantillon 03
$\varphi(^{\circ})$	3,75°	3,83°	3,89°

4.6. Equivalent de sable (NF EN 933-8)

4.6.1. But de l'essai :

L'essai équivalent de sable permet de mettre en évidence la proportion de poussière fine nuisible dans un matériau. Et surtout utilisé par les matériaux routiers et les sables à béton. Car il permet de séparer les sables et graviers des particules fines comme les limons et argiles.

L'essai équivalent de sable révèle très intéressant au laboratoire et sur chantier grâce à sa simplicité, sa rusticité, son faible coût et sa rapidité.

4.6.2. Mode opératoire

- 1- Déterminer la teneur en eau du matériau. et le sécher afin d'obtenir une humidité inférieure à 2 % pour les sables 0/2 et inférieure à 8% pour les sables 0/4.
- 2- Tamiser le matériau ou le sable au tamis 2 mm.
- 3- Emplir les éprouvettes avec la solution lavante jusqu'au premier trait.
- 4- Verser la quantité du sable ou du matériau m (g) qui est $m = \frac{120(100+W)}{100}$ en veillant à éliminer les bulles d'air.
- 5- laisser reposer 10 min.
- 6- Boucher les éprouvettes et les agiter : mouvement rectiligne et horizontale de 20 cm d'amplitude, 90 aller et retour en 30s
- 7- Laver et remplir les éprouvettes, avec le tube laveur, pour cela rincer le bouchon au-dessus de l'éprouvette faire descendre le tube laveur en le faisant tourner entre les doigts : on lave ainsi les parois intérieures de l'éprouvette. Laver le sable en faisant descendre et remonter l'entement le tube laveur dans la masse du sable pour faire remonter les particules fines dans la solution supérieure.
- 8- Sortir le tube laveur lorsque le niveau du liquide atteint le trait supérieur puis laisser reposer 20 min.

9- Mesurer à vue les hauteurs h_1 ; h_2 .

10-Descendre lentement le piston taré dans le liquide à travers le floculat, le manchon prenant appui sur le bord supérieur de l'éprouvette, et l'immobiliser au contact du sable. Mesurer h



Figure 14 : les équipements pour mesurer l'équivalent de sable.

4.6.3. Résultat :

$M=120$ g, avec

$$\text{Esp \% (Esp= } h_2'' / h_1 * 100)$$

$$\text{Esv \% (Esv= } h_2 / h_1 * 100)$$

h_1 : la hauteur du floculat

h_2 : la hauteur du sable (visuelle)

h_2'' : la hauteur de sable (piston)

Tableau 4.10 : résultats d'équivalent de sable des trois échantillons.

Echantillon	Essai n°	h1 (cm)	h2 (cm)	h2'' (cm)	Esp (%)	Moyenne (%)	Esv (%)	Moyenne (%)
Echantillon 01	1	17.8	7.8	6.5	36.51	36.7	43.82	43.16
	2	17.7	7.6	6.6	37.28		42.93	
	3	17.9	7.65	6.5	36.31		42.73	
Echantillon 02	1	17.2	7.2	6.2	36.04	37.98	41.86	41.19
	2	17	7	6.4	37.64		41.17	
	3	17.5	7.1	6	34.28		40.57	
Echantillon 03	1	16.8	7	6.9	41.07	40.75	41.66	41.74
	2	16.9	7	6.9	40.82		41.42	
	3	16.6	7	6.7	40.36		42.16	

Du tableau 4.10 nous constatons que les valeurs de l'équivalent de sable vont de 41.19% à 43.16%. Ceci montre que la fraction argileuse (< 2 micron) a un pourcentage dépassant 41%.

4.7. Caractérisation chimique des argiles miocènes de Zaarouria

Cette opération est été réalisée au laboratoire du Briqueterie de TAGHASTE

Les échantillons ont été scindés en cinq groupes, selon les critères suivants :

- Même apparence et aspect (couleur, granulométrie)
- Disposition sur le diagramme de plasticité
- Compacité et dureté

Pour chaque groupe nous avons reconstitué, après broyage, un mélange représentatif que nous avons soumis à une série d'analyses chimiques (c'est le cas actuel de l'entreprise) :

Tableau 11: résultats d'analyses chimiques des échantillons prélevés du site d'étude (rapport de l'entreprise)

Echantillons Paramètres	E1	E2	E3	E4	E5	Moyenne
SiO ₂ (%)	53.8	57.2	54.6	50.2	53.7	53.9
MgO (%)	2.17	2.08	2.12	2.18	2.18	2.15
Al ₂ O ₃ (%)	18.2	18.7	18.6	18.3	18.4	18.44
Fe ₂ O ₃ (%)	6.3	5.8	5.5	6.2	5.8	5.92
CaO (%)	8.05	7.18	7.25	6.83	6.88	7.24
SO ₃ (%)	2.34	1.89	1.58	2.02	1.81	1.92
PF (%)	14.3	10.2	10.8	11.7	12.1	11.82
MO (%)	0.88	0.63	0.95	1.03	1.05	0.91

La comparaison des résultats de ce tableau avec les résultats publiés par Kornmann, 2005; Wetshondo, 2012 (voire chapitre 02, page 12), nous permet de sortir ce qui suit :

- une teneur moyenne en SiO₂ de 53.9% rend ces argiles réfractaires.
- une teneur moyenne en Al₂O₃ de 18.44% rend ces argiles réfractaires et possèdent résistance mécanique élevé et couleur blanche
- une teneur moyenne en Fe₂O₃ de 5.92 % rend ces argiles de couleur rougeâtres et se fondent facilement.
- une teneur moyenne en CaO de 7.24 % rend ces argiles poreuses.
- une teneur moyenne en SO₃ de 1.92 % est acceptable dans la production mais génère une faible toxicité.

CONCLUSIONS GENERALES

L'argile présente des propriétés et des qualités : plasticité, teneur en eau, retrait/gonflement, couleur, etc. qui en font un matériau de construction recherché et utilisé comme pierre de taille que sous forme de broyés et de granulats. Les différentes caractérisations physico-mécaniques des argiles varient à partir de leur mode de formation dans la nature.

L'évaluation des propriétés physiques, chimiques et mécaniques des argiles nous permet de connaître leur domaine d'utilisation après ce broyage dans l'industrie.

D'après les résultats des différents paramètres physiques, chimiques et mécaniques obtenus au sein de notre laboratoire de l'ENSM nous a permis d'évaluer les propriétés physiques et mécaniques des argiles du Miocène inférieur de site de Zaarouria de willaya de Souk Ahras.

La valeur de l'essai de la masse volumique absolue sont successivement (2.480, 2.470, 2.476 (g/cm³),) qui indique une présence de porosité (vides) dans les molécules d'argile, l'essai de cisaillement direct a donné les résultats suivants : pour la cohésion ((93,267 93,267 92,8(kpa)) et pour l'angle de frottement (3,75°, 3,83°, 3,89°).

L'essai de teneur en eau moyenne a donné les résultats suivants (12.91%, 14.62% 11.27%) Ce qui explique la présence d'une humidité au niveau du lieu du stockage, l'essai de limite d'atberg présentent ces résultats (13.25% pour l'échantillon 1, de 11.46% pour l'échantillon 2 et de 12.8% pour l'échantillon 3) alors on peut déduire de cette étude que les argiles miocènes de Zaarouria sont moyennement plastiques.

L'essai de l'équivalent de sable nous a permis de constater que les valeurs de l'équivalent de sable vont de 41.19% à 43.16%. Ceci montre que la fraction argileuse (<2 micron) a un pourcentage dépassant 41%.

L'ensemble de ces résultats obtenus du site de Zaarouria montre que la nature de ces argiles sont de nature sable-argileux Risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité.

Ces résultats montrent que les grés de Zaarouria sont favorables pour l'utilisation dans l'industrie de brique à cause de son indice de plasticité et aussi vers d'autres utilisations tel que : additif dans la fabrication de ciment du à sa composition chimique.

CONCLUSIONS GENERALES

Recommandations :

D'après les résultats des essais on a trouvé une la présence d'une humidité au niveau du lieu du stockage avec un pourcentage de 14,62% (qui est acceptable dans le processus de cuisson) ce qui implique la différence de masse entre l'entrée et la sortie de production.

On peut déduire de cette étude que les argiles miocènes de Zaarouria sont moyennement plastiques Du tableau 4.10 nous constatons que les valeurs de l'équivalent de sable vont de 41.19% à 43.16%. Ceci montre que la fraction argileuse (< 2 micron) a un pourcentage dépassant 41%, ce qui oriente son utilisation de préférence vers la fabrication de brique.

- **Kherfi Samira 2012** : caractérisation physico-chimique des géomateriaux, mémoire de master, université Constantine Algérie. 92 p.
- **El Yakoubi nadia (2006)** : Potentialités d'utilisation des argiles marocaines dans l'industrie céramique : cas des gisements de Jbel Kharrou et de Benhmed, (Meseta marocaine occidentale). Thèse de doctorat universite mohammed v-agdal faculte des sciences Rabat Maroc. 212p.
- **Fgaier Faycal 2013**: Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue. Thèse doctorat, l'école centrale de Lille, France, 123p. <NNT : 2013ECLI0023>. <tel-01242549>.
- **El ouahabi Mariem 2013** : valorisation industrielle et artisanale des argiles du maroc, thèse de doctorat université de liège. 189 pages. valorisation industrielle et artisanale des argiles du maroc, thèse de doctorat université de liège. 189 pages.
- **Khalfaoui, A., and Hajjaji, M., 2009**, A Chloritic-illitic clay from Morocco: Temperature-time-transformation and neof ormation: Applied Clay Science, v. 45, no. 1-2, p. 83-89.
- **Vila J.M., Feinberg H., Lahondère J.C., Gourinard Y., Chouabbi A., Magné J. et Durand-Delga M. (1995)** : Le chenal gréseux de l'Oligocène terminal et le Miocène de Sidi Afif dans leur cadre structurale nord est- algérien, origine saharienne du Numidien et calendrier des charriages miocènes. *C.R. Acad. Sci. Paris. t. 320 série II a, pp1001- 1009*
- **Chabbi A. (2017)** : Les nappes telliennes de la région Nord de Souk Ahras (NE algérien) : Etude géologique et structurale. *Thèse de doctorat en science, UBM Annaba, Algérie.137 p.*
- **David, L. (1956)** : Etude géologique de la haute Medjerda. *Bulletin du Service de la carte géologique de l'Algérie, n° 11, Algérie. 304P.*