

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار- عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE LA TERRE DEPARTEMENT DE GEOLOGIE

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat en sciences

Identification et analyse de la relation entre
les flyschs numidiens et
les mouvements de terrain- cas du tell oriental, NE Algérie

Présentée par :

Melle BOURAGBA Nadjat

Soutenu le : 23 Mai 2024, devant le jury composé de:

Mr KHANCHOUL Kamel	Professeur à l'Université Badji Mokhtar Annaba	Président
Mr HADJI Riheb	Professeur à l'Université Ferhat Abbas, Sétif 1	Rapporteur
Mr CHOUABBI Abdelmadjid	Professeur à l'Université Badji Mokhtar Annaba	Co-Rapporteur
Mr BOUGHERIRA Nabil	Professeur à l'Université Badji Mokhtar Annaba	Examineur
Mr ZIGHMI Karim	Docteur à l'Université Ferhat Abbas, Sétif 1	Examineur
Mr ZAHRI Farid	Docteur à l'Université Ferhat Abbas, Sétif 1	Examineur

2023/2024

"Science is not about being right or wrong, it's about being willing to ask the right questions and follow the evidence wherever it leads."

Neil de Grasse Tyson





Remerciements

Tout d'abord, je remercie Dieu, le tout puissant, qui me guide toujours vers la bonne voie, qui me donne la volonté et la patience afin de réaliser mes objectifs, et qui m'aide à surmonter tous les obstacles rencontrés sur le chemin du savoir.

Je tiens aussi à remercier tout le staff de l'université Badji Mokhtar Annaba, notamment le chef de département monsieur **Bougerra Hamza** et monsieur **Sayade Liamine**.

Un très grand remerciement que j'adresse à Monsieur **CHOUABBI Abdelmadjid** pour avoir accepté de diriger aussi ce travail avec patience durant cette période, pour sa disponibilité et pour ses précieux conseils.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mon directeur de thèse, le professeur **HADJI Riheb**, pour sa guidance, son soutien indéfectible, sa patience et ses précieux conseils avisés tout au long de cette recherche. Son expertise et sa disponibilité ont été déterminantes dans la réalisation de ce travail.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers les membres du jury pour leur précieuse contribution à l'évaluation de ce travail de recherche. Leurs commentaires, suggestions et critiques constructives vont grandement enrichir cette thèse et vont me permettre de perfectionner mes arguments et de consolider mes conclusions.

Je voudrais remercier chaleureusement le professeur monsieur **KHANCHOUK Kamel** pour avoir présidé la soutenance avec rigueur et bienveillance.

Mes remerciements vont également au professeur Monsieur **BOUGHERIRA Nabil**, le docteur **ZIGHMI Karim** et le docteur **ZAHRI Farid** pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour leurs remarques pertinentes qui vont contribuer à son amélioration. Leurs expertises respectives seront une aide précieuse pour orienter mes recherches dans la bonne direction.

Je voudrais exprimer ma profonde gratitude envers **mes parents** pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices qui ont fait de moi la personne que je suis aujourd'hui. Leur encouragement et leur exemple ont été une source d'inspiration tout au long de mon parcours académique.

Je suis consciente que je ne pourrai jamais assez leur remercier pour tout ce qu'ils ont fait pour moi, mais je suis reconnaissante pour tout ce qu'ils ont sacrifié pour moi.

Je tiens à prendre un moment pour exprimer ma profonde gratitude à mes chères sœurs **Ismahan, Naoual, Meriem** et **Zahira** pour tout ce qu'elles ont fait pour moi. Leur amour, leur soutien et leur présence ont été des éléments essentiels dans ma vie.

Je suis reconnaissante pour les moments où elles m'ont soutenue dans les moments difficiles et pour les moments de joie que nous avons partagés ensemble. Si je réussis c'est grâce à elles.

Un très grand remerciement va également au gérant du laboratoire de géologie et de géotechnique Monsieur **BOUIBAOUNE Lakhdar**. Avec qui j'ai eu de longues discussions et je reste enthousiaste devant la qualité de ses réflexions et de son ouverture d'esprit.



Je le remercie de tout mon cœur pour le soutien moral et matériel qu'il m'a apporté durant la préparation de mon mémoire de magistère et ma thèse de doctorat en mettant à ma disposition son bureau et un matériel couteux. Je le remercie aussi pour ses idées originales et ses nombreuses connaissances qu'il n'a pas hésitées à me faire partager. Son influence positive restera avec moi tout au long de ma vie.

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à monsieur **KACIMI Mohamed** pour le soutien qu'il m'a apporté tout au long de mon cursus universitaire. Sa patience et ses encouragements ont été des éléments essentiels dans mon parcours. Grâce à lui, j'ai acquis de nouvelles compétences et une meilleure compréhension des sujets.*

*Je tiens à remercier et de façon spéciale Monsieur **LAMOURI Bachir** de m'avoir fait bénéficier de son expérience scientifique notamment pour l'interprétation des résultats des analyses minéralogiques, ainsi pour sa disponibilité et pour les précieux conseils qu'ils me ont prodigués.*

*Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance pour l'équipe de l'entreprise COSIDER notamment pour son directeur monsieur **BOUMEZZOUD Nadjib**, pour son soutien inconditionnel envers ma recherche. Son leadership inspirant et sa vision claire ont été des éléments cruciaux dans la réalisation de mes objectifs. Encore une fois, je tiens à lui remercier chaleureusement pour tout ce qu'il fait pour moi.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour l'équipe de l'unité de recherche Argiles, Géochimie et Environnement Sédimentaires Département de Géologie Ulg Belgique particulièrement pour Madame **Nathalie FAGEL** pour l'accueil chaleureux et la collaboration fructueuse que j'ai eu le privilège de vivre au sein de son équipe. Son expertise, et son ouverture d'esprit ont grandement contribué à l'avancement de nos travaux de recherche.*

Votre hospitalité et votre générosité m'ont permis de me sentir pleinement intégré au sein de votre unité et de vivre une expérience enrichissante sur le plan professionnel et personnel. Je suis reconnaissante pour cette opportunité unique de partager nos connaissances et de travailler ensemble.

Je suis convaincue que notre collaboration continuera à porter ses fruits et à contribuer de manière significative à l'avancement de la science. Je suis honoré d'avoir eu l'opportunité de travailler avec vous et je suis impatient de poursuivre notre collaboration à l'avenir

*Je tiens à remercier également tous les enseignants du département des sciences de la terre particulièrement monsieur le directeur d'institut d'architecture et des sciences de la terre monsieur **Chabou Molley Charaf** et le chef de département de géologie monsieur **Laghaoug Mohamed yacine**.*

*Un très grand remerciement va également à **Athmane Nassim** et **Dib Yamina** pour leur aide leur disponibilité tout au long de cette recherche.*

*Je tiens à remercier aussi mes collègues **CHOUAF Ibtissem**, **MAOU Amel**, **SOUADNIA Sabrina** et **BOUBAZINE Laïla** pour leur aide, leur soutien et leur encouragement.*

Enfin j'adresse mon chaleureux remerciement à l'ensemble des organismes et des personnes de différentes formations qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, je tiens à les remercier tous.



DEDICACE

Je dédie ce travail au prophète Mohamed que la prière et le salut soient sur lui qui nous a exhorté et imité à demander le savoir et la science où qu'ils se trouvent.

- *Tout spécialement : A mes très chers parents **ROUABAH Djamila** et **BOURAGBA Belgacem**; pour leur tendre soutien de tous les instants, et pour leur amour indéfectible en toutes circonstances à **EUX**, pour **EUX** et surtout grâce à **EUX** j'ai accompli ce labeur que j'ai dédié affectueusement à **EUX** ma mère et mon père.*
- *A mes chères sœurs **Ismahen, Nawel, Meriem et Zahira**. Dans les moments de joie et de peine, vous avez toujours été là pour moi. Votre amour, votre soutien et votre présence ont été des piliers inébranlables dans ma vie. À travers nos rires, nos larmes et nos aventures, vous avez été mes compagnes fidèles. Que cette dédicace soit le témoignage de mon amour et de ma gratitude envers vous. Vous êtes des étoiles brillantes dans ma vie, et je suis infiniment reconnaissante de vous avoir comme sœurs.*
- *A mes chers neveux : **Abd El RAhmene, Amine, Iade et Yazen** et mes belles nièces : **Ritége, Alaa et Roua**. vous apportez une lumière éclatante dans nos vies. Chacun de vos sourires est un rayon de soleil qui illumine nos journées. Vos rires et vos câlins sont les trésors les plus précieux.*
- *A mes beaux frères : **Farouk, Marouan et Khaled**.*
- *Au gérant du laboratoire LGG monsieur **BOUIBAOUNE Lakhdar**, cette dédicace est un témoignage de ma reconnaissance pour tout ce que vous avez fait pour moi. Vous êtes un modèle exceptionnel de leadership et de professionnalisme, et je suis honorée d'avoir eu l'opportunité de travailler sous votre direction*
- *Enfinement à tous ceux qui de près ou de loin m'ont assisté, encouragé, soutenu durant mon cursus universitaire, je leur exprime ma plus profonde et sincère gratitude.*

BOURAGBA Nadjet



Résumé

Cette thèse se penche sur les différents aspects liés à l'effondrement du tunnel T1 de Djebel El Ouahch wilaya de Constantine.

Le tunnel T1 de Djebel El Ouach est composé de deux tubes dont la distance entre eux est de 17.36m.

Le 1er janvier 2014 à 16h30, il y a eu un effondrement dans le tube Ouest (gauche) du PK 206+136 au PK 206+265, soit une distance de 129m. Cela a causé des désordres au niveau du tube Est (droit) mise en service quelques mois avant l'effondrement, il s'agit d'une rupture de revêtement définitif du PK 206+182.25 et le PK 206+300 ce qui a entraîné la fermeture de ce dernier de la circulation.

Dans ce travail, nous exposons les données de terrains, les résultats des analyses géochimiques et géotechniques tout en abordant une nouvelle approche qui n'a pas été adoptée par aucune étude.

De point de vue géologique, le tunnel traverse les argilites sous numidiennes, elles sont schisteuses plissées et fracturées de couleur grisâtre dont les plans de schistosité et de fractures sont marqués par la présence de la kaolinite.

Les essais géotechniques et les analyses minéralogiques et géochimiques ont été réalisés sur des échantillons prélevés des sondages carottés à différentes profondeurs.

Les essais géotechniques (essais physiques) ont montré qu'il s'agit des argiles limoneuses peu plastiques.

Les analyses minéralogiques DRX faites sur l'échantillon total ont fait ressortir que ces argilites sont composés de 43.75% de l'argile totale, de 41.37% de quartz et enfin, il y a les minéraux accessoires tels que feldspath, calcite, dolomite et oxydes de fers (hématite) et sidérite en traces. Ces analyses ont été complétées par les lames orientées qui ont montré un cortège argileux composé de la kaolinite, l'illite, la chlorite, la smectite et les inter- stratifiés.

La fluorescence X a confirmé ces résultats en révélant que les principaux composants sont la Silice et l'Aluminium, ce qui peut être expliqué par la présence de quartz (SiO_2) et de phyllosilicates (la kaolinite, l'illite, la chlorite et la smectite).

Les images obtenues du MEB aussi ont montré la présence de la kaolinite en forme hexagonale ainsi que le quartz sous forme de grains.

Selon l'étude de la tectonique et la miro-tectonique qui consiste en la réalisation d'une carte linéamentaire avec une rosace directionnelle, il est évident que la partie effondrée est située au cœur d'une zone fragile, qui représente un point nodal de faille où le matériau a été

Résumé

complètement désintégré. Par conséquent, les caractéristiques de ces argilites sont dégradées à ce niveau.

Cet endroit est propice à l'effondrement en raison de tous ces facteurs, auxquels s'ajoutent les facteurs anthropiques tels que le retard de soutènement pendant six mois.

Donc, l'effondrement du tunnel a été provoqué par la combinaison de ces facteurs naturels de prédisposants, auxquels se sont ajoutés les facteurs anthropiques.

Mots-clés : Djebel El Ouahch ; Effondrement du tunnel ; Argilites sous numidiennes ; analyses minéralogiques, Carte linéamentaire.

Abstract

This thesis looks at the different aspects linked to the collapse of the T1 tunnel in Djebel El Ouahch wilaya of Constantine.

The Djebel El Ouach T1 tunnel is made up of two tubes whose distance between them is 17.36m.

On January 1, 2014 at 4:30 p.m., there was a collapse in the west (left) tube from PK 206+136 to PK 206+265, a distance of 129m. This collapse caused problems at the level of the East tube (right) put into service a few months before the collapse, it was a rupture of the final coating of PK 206+182.25 and PK 206+300 which led to the closure of the latter from traffic.

In this work, we present the field data, the results of the geochemical and geotechnical analyzes while tackling a new approach which has not been adopted by any study.

Geologically, the tunnel crosses the under-Numidian argillites, they are folded and fractured schistose of grayish color whose planes of schistosity and fractures are marked by the presence of kaolinite.

Geotechnical tests and mineralogical and geochemical analyzes were carried out on samples taken from core drilling at different depths.

The geotechnical tests (physical tests) have shown that these are silty clays which are not very plastic.

XRD mineralogical analyzes carried out on the total sample showed that these argillites are composed of 43.75% of the total clay, 41.37% of quartz and finally, there are accessory minerals such as feldspar, calcite, dolomite and oxides of iron (hematite) and siderite in traces. These analyzes were supplemented by oriented blades which showed a clayey procession composed of kaolinite, illite, chlorite, smectite and regular interstrata.

X-ray fluorescence confirmed these results by revealing that the main components are Silica and Aluminum, which can be explained by the presence of quartz (SiO₂) and phyllosilicates such as kaolinite, Illite, chlorite and smectite.

The images obtained from the SEM also showed the presence of kaolinite in hexagonal shape as well as quartz in the form of grains.

According to the study of tectonics and miro-tectonics which consists of the production of a linear map with a directional rose shown, it is obvious that the collapsed part is located at the heart of a fragile zone, which represents a nodal point fault where the material has been completely disintegrated. Consequently, the characteristics of these claystones are degraded at this level.

Abstract

This location is prone to collapse due to all these factors, plus anthropogenic factors such as the delay in support for six months.

Therefore, the collapse of the tunnel was caused by the combination of these natural predisposing factors, to which were added anthropogenic factors.

Keywords: Djebel El Ouahch; Collapse of the tunnel; Under-Numidian claystones; mineralogical analyzes, Lineamental map.

المخلص

تتناول هذه الأطروحة الجوانب المختلفة المرتبطة بانهييار النفق الأول بمنطقة جبل الوحش الواقع بولاية قسنطينة. يتكون نفق جبل الوحش من أنبوبين تبلغ المسافة بينهما 17.36 م، كل أنبوب له مسار بطول 18 م بمتوسط تغطية من السطح 128 م.

في 1 جانفي 2014 الساعة 4:30 مساءً، حدث انهيار في الأنبوب الغربي (الأيسر) من النقطة الكيلومترية 206+136 إلى النقطة الكيلومترية 206+265، على مسافة تقدر بـ 129 متراً. وقد تسبب ذلك في مشاكل على مستوى الأنبوب الشرقي (يمين) الذي تم وضعه في الخدمة قبل بضعة أشهر من الانهيار، و تسبب في تشقق الدعامة النهائية للنفق و تدهور حالتها و هذا اعتباراً من النقطة الكيلومترية 206+182.25 إلى النقطة الكيلومترية 206+300 ما أدى إلى إغلاق النفق نهائياً.

منذ هذا التاريخ، تم إجراء العديد من الدراسات الاستقصائية من أجل: (1) تقييم منطقة الانهيار والأضرار الناجمة، و(2) فهم آلية الانهيار، لإيجاد حلول لتعزيز الجزء المنهار ومواصلة أعمال الحفر. في هذا العمل نقدم جميع البيانات الميدانية ونتائج التحليلات الجيوكيميائية والجيوتقنية مع تناول منهج جديد لم تعتمد أي دراسة في إطار الدراسات والخبرات التي تمت قبل حفر النفق ولا بعد انهياره. من الناحية الجيولوجية، يعبر النفق تكوينات جيولوجية تتمثل في الغضار تحت النوميدي، وهي عبارة عن تكوينات ذات لون رمادي تتميز بوجود طيات و شقوق يتخللها الكاولينيت. تم إجراء الاختبارات الجيوتقنية والتحليلات الجيوكيميائية على العينات المأخوذة من عمليات الحفر الأساسية على أعماق مختلفة.

فيما يتعلق بالاختبارات الجيوتقنية (الاختبارات الفيزيائية) فقد أظهرت أن هذه الطينات عبارة عن طين غريني و غير بلاستيكي. كما أظهرت التحاليل المعدنية التي أجريت على العينة الكلية بتقنية الأشعة السينية أن هذا الغضار يتكون من 43.75% من الطين الكلي، و41.37% من الكوارتز، وأخيراً هناك معادن ثانوية مثل الفلسبار والكالسيت والدولوميت وأكاسيد الحديد (الهيماتيت و السبيديريت).

وأكد مضاد الأشعة السينية هذه النتائج من خلال الكشف عن أن المكونات الرئيسية هي السيليس والألمنيوم، وهو ما يمكن تفسيره بوجود الكوارتز والفيلوسيليكات مثل الكاولينيت والإيليت والكلوريت والسمكتيت. كما أظهرت الصور التي تم الحصول عليها من المسح المجهر الإلكتروني وجود الكاولينيت على شكل سداسي وكذلك وجود الكوارتز على شكل حبيبات.

وفقاً للدراسة التكتونية والتي تتمثل في انجاز خريطة خطية مع إرفاقها بوردة الاتجاهات، فمن الواضح أن الجزء المنهار يقع في قلب منطقة هشة، والتي تمثل نقطة عقدية أين تم تفكيك المادة تماماً بفعل الفوالق. وبالتالي تتدهور خصائص هذه الأحجار الطينية عند هذا المستوى.

لذلك فإن انهيار النفق كان نتيجة لتضافر هذه العوامل الطبيعية المؤهبة، والتي أضيفت إليها العوامل البشرية المتمثلة في عدم تدعيم النفق وبقاءه على حاله لمدة ستة أشهر. **الكلمات المفتاحية:** جبل الوحش؛ انهيار النفق، الغضار تحت النوميدي؛ التحاليل المعدنية، خريطة خطية.

Remerciement	01
Dédicace	03
Résumé	04
Abstract.....	06
المخلص.....	08
Tables des matières	09
Liste des figures	13
Liste des tableaux	19
INTRODUCTION GENERALE.....	21
CHAPITRE I : GENERALITES	
I.1 Introduction	25
I.2 Situation géographique	25
I.3 Géomorphologie	27
I.4 Climat et végétation	30
I.5. Hydrologie et Hydrogéologie	31
I.6 Sismicité de la région	34
I.7 Généralités sur les argiles	36
I.7.1 Introduction.....	36
I.7.2 Définition	36
I.7.3 Structure des minéraux argileux	36
I.7.4 Origines et formation des argiles.....	38
I.7.5 Classification des minéraux argileux.....	40
I.7.6 Types des argiles.....	42
I.7.7 Propriétés des argiles	49
I.7.7.1 la surface spécifique.....	49
I.7.7.2 Capacité d'échange cationique	50
I.7.7.3 La capacité d'adsorption d'eau et de gonflement	50
I.8 Conclusion.....	51
CHAPITRE II : CONTEXTE GEOLOGIQUE	
II.1 Aperçu sur la géologie du nord Algérien	53
II.1.1 Introduction.....	53
II.1.2 Le domaine interne ou Kabyle	53
a. Le socle Kabyle.....	53
b. Le Dorsale Kabyle ou chaîne calcaire.....	53
II.1.3 Domaine des flyschs	55
II.1.3.1 Le flysch mauritanien	56
II.1.3.2 Le flysch massylien.....	56
II.1.3.3 Le domaine ou le flysch numidien	56
II.1.4 Domaine externe.....	57
a. Les séries ultra-telliennes.....	57
b. Les séries telliennes sensu stricto.....	57
c. Les séries péni-telliennes et leur couverture Eocènes à Nummulites (J.M.Villa, 1977)	58
II.1.5 L'avant- pays allochtone	58
II.1.5.1 L'organisation Sétifienne	58

II.1.5.2 L'organisation constantinoise	58
II.1.6 L'avant pays autochtone	59
II.2 Aperçu sur la géologie de la chaîne numidienne.....	60
II.2.1 Introduction.....	60
II.2.2 les différents termes du numidien	63
II.2.2.1 Les argilites sous numidiennes (à Tubotomaculum)	63
II.2.3.2 Les grès numidiens	63
II.2.3.3 Les formations supra-numidienne	63
II.2.3 Origine (provenance) des sables numidiens	64
II.2.3.1 Origine Septentrionale	65
II.2.3.2: Origine méridionale.....	67
II.3 Aperçu sur la géologie de la région de Constantine	73
II.3.1 Introduction	73
II.3.2 Les formations post nappes	74
II.3.2.1 Le Quaternaire	74
II.3.2.2- Le Mio-Pliocène continental	77
II.3.3 Les séries allohtones	77
II.3.3.1 La nappe numidienne.....	77
II.3.3.1.a- les grès numidiens	79
II.3.3.1.b- les argilites sous numidiennes à Tubotomaculum	80
II.3.3.2- unités à affinité massylienne	81
II.3.3.3- Les nappes telliennes.....	82
II.3.3.a- Priabonien.....	82
II.3.3.b- Ensemble écaillé ultra-tellien.....	82
II.3.3.c- Unité tellienne sensu stricte.....	82
II.3.4 L'autochtone ou parautochtone	82
II.3.4.1- La nappe néritique Constantinoise.....	82
II.3.5 Le Trias	83
II.4 Géologie de Djebel El Ouach	84
II.4.1 Description des argilites	85
II.4.2 Description des grés.....	86
II-5 Aperçu tectonique.....	88
II.5.1 Introduction.....	88
II.5.2 Les phases tectoniques	88
II.6 Conclusion	91
CHAPITRE III : HYDROCLIMATOLOGIE	
III.1 Introduction	93
III.2 Les facteurs climatiques	95
III.2.1 Les précipitations	95
III.2.1.1 Les précipitations mensuelles	95
III.2.1.2 Les précipitations annuelles	96
III.2.2 Coefficient pluviométrique	97
III.2.3 : La température	99

TABLE DES MATIERES

III.2.4 Diagramme ombrothermique	100
III.2.5 Détermination du type du climat	101
III.2.5.1 Indice de Martonne (1926)	101
III.3 Bilan d'eau	102
III.3.1 L'évapotranspiration	102
III.3.1.1 Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)	103
III.3.1.2 Estimation L'évapotranspiration potentielle ETP (ou évapotranspiration de référence) :	104
III.3.2 Formule de Thornthwaite (bilan d'eau)	104
III.3.2.1 : Représentation graphique du bilan hydrique	106
III.3.2.2 Interprétation du bilan hydrique	106
III.3.3 Le ruissellement	107
III.3.4 L'infiltration	107
III.4 Conclusion	108
CHAPITRE IV : MATERIELS ET METHODES	
IV.1 Introduction.....	110
IV.2 L'historique des travaux et description du phénomène.....	110
IV.3 Description des échantillons	117
IV.4 Méthodes analytiques.....	119
IV.4.1 Les essais géotechniques	119
IV.4.2 Analyses minéralogiques et géochimiques.....	125
IV.4.2.1: Introduction.....	125
IV.4.2.2 Diffractométrie des rayons X (DRX)	126
IV.4.2.3 Fluorescence X	131
IV.4.2.4 Microscope électronique à balayage (MEB)	131
IV.5 Etude géologique structurale.....	132
IV.5.1 Introduction	132
IV.5.2 Etude des linéaments	133
IV.5.2.1 Origine du mot et Historique.....	133
IV.5.2.2 Définition	134
IV.5.2.3 Origine des linéaments.....	135
IV.5.2.4 Exploitation des photos aériennes et extraction manuelle des linéaments.....	135
IV.5.2.5 Critères de déchiffrement	135
IV.6 Conclusion	137
CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION	
V.1 Introduction.....	139

TABLE DES MATIERES

V.2 Résultats et discussion.....	139
V.2.1 Essais géotechniques	139
V.2.2 Analyses minéralogiques et géochimiques.....	144
V.2.2.1 Diffraction des rayons X (DRX).....	144
V.2.2.2 Fluorescence X	149
V.2.2.3 Microscope électronique à balayage (MEB)	150
V.2.3 L'étude géologique structurale.....	152
V.2.3.1 Introduction.....	152
V.2.3.2 Objectif assigné	152
V.2.3.3 Etablissement de la carte linéamentaire.....	153
V.2.3.4 Analyse statistique des linéaments.....	155
V.2.3.5 Comparaison du réseau de fractures à la carte géologique	158
V.3 Conclusion	162
Conclusion générale.....	165
Références bibliographiques.....	168

PREMIER CHARITRE : GENERALITES	
Figure I.1 : situation géographique de la région d'étude.....	26
Figure I.2 : les lacs célèbres de Djebel El Ouahch.....	26
Figure I.3 : carte hypsométrique de la région d'El Haria (<i>Benyazid. Y et al, 2014</i>).....	27
Figure I.4 : carte hypsométrique de la région d'étude.....	28
Figure I.5 : la carte des pentes de la région d'étude.....	29
Figure I.6 : secteur de la répartition des surfaces de la commune de Constantine selon les pentes.....	29
Figure I.7 : histogramme de la répartition des surfaces de la commune de Constantine selon les pentes.....	30
Figure I.8 : Extrait de la carte pluviométrie de l'Algérie du Nord (<i>ANRH 1993</i>).....	31
Figure. I.9 : carte des réseaux hydrographiques de la commune de Constantine.....	32
Figure I.10 : localisation des bassins hydrographiques de l'est Algérien (<i>A. Mebarki, 2007</i>)...	33
Figure I.11 : réseau hydrographique et stations hydrométriques (<i>A. Mebarki et C. Thomas, 1988</i>).....	34
Figure I.12 : carte de zonage sismique du territoire national (<i>RPA 99 version 2003</i>).....	35
Figure I.13 : carte de la sismicité de la région de Constantine de 1900 à 2002 (<i>BOUEDJA.F, 2010</i>).....	35
Figure I.14 : la couche tétraédrique du feuillet élémentaire des argiles.....	36
Figure I.15 : la couche octaédrique du feuillet élémentaire des argiles.....	37
Figure I.16 : la structure générale des phyllosilicates (<i>White, 1999</i>).....	37
Figure I.17 : évolution des minéraux primaires et formation des argiles (<i>Landry et Mercier, 1992</i>).....	38
Figure I.18 : processus de formation des minéraux argileux (<i>modifié de Thorez, 1998</i>).....	39
Figure I.19 : conditions de formation et de stabilité des minéraux argileux (<i>Velde, 1995</i>).....	40
Figure I.20 : classification des minéraux argileux type T/O (1/1) (<i>Caillière et al., 1982</i>).....	41
Figure I.21 : représentation schématique d'une argile type T/O/T ou 2/1.....	41
Figure I.22 : classification des minéraux argileux type T/O /T (2/1) (<i>Caillière et al., 1982</i>)....	42
Figure I.23 : structure de la kaolinite (<i>Duchaufour, 1988</i>).....	43

Figure I.24 : formation de l’halloysite (<i>Manning, 1995</i>).....	43
Figure I.25 : structure de l’illite (<i>Duchaufour, 1988</i>).....	44
Figure I.26 : représentation schématique de la structure de smectite.....	44
Figure I.27 : structure de la smectite (<i>Duchaufour, 1988</i>).....	45
Figure I.28 : Représentation schématique de la structure d’une montmorillonite.....	45
Figure I.29 : structure du chlorite (<i>Duchaufour, 1988</i>).....	47
Figure I.30 : modèle de la structure de la varmiculite.....	47
Figure I.31 : types des minéraux interstratifiés (<i>Velde 1995</i>).....	48
Figure I.32 : Surfaces interne et externe des particules argileuses (<i>Eslinger & Peaver, 1988</i>).....	49
DEUXIEME CHAPITRE: CONTEXTE GEOLOGIQUE	
Figure II.1 : Position des différentes unités géologiques des Magrébides (<i>Wildi, 1983 ; Domzig et al., 2006</i>).....	54
Figure II.2 : Coupe Nord – Sud du Nord de l’Algérie montrant les différentes unités de la chaîne des Maghrébides (<i>Durand Delga, 1969</i>).....	54
Figure II.3 : Position des nappes de flysch par rapport aux unités de la chaîne des Maghrébides (<i>Durand-Delga, 1969</i>).....	56
Figure II.4 : Carte-schématique-illustrant-la-répartition-des-différents-domaines-paléogéographiques en détaillant le domaine externe (<i>Lahondère. J.C, 1977</i>).....	57
Figure II.5 : coupe générale synthétique des Magrébides de l’Est Algérien (région de Constantinois) (<i>Lahondère. J.C, 1977</i>).....	59
Figure II.6 : carte de la répartition des flyschs dans le bord Sud de la méditerranée occidentale (<i>Hoyez. B, 1989 cité en Menzoul. B, 2023</i>).....	60
Figure II.7 : reconstitution paléogéographique du Paléocène au Burdigalien supérieur avec coupe simplifiée du bassin Magrèbin A : Paléogène (60-55 Ma), B : Oligocène supérieur – Miocène inférieur (25-21 Ma) C : Burdigalien supérieur Langhien (17-14 Ma) (<i>Lepretre et al., 2018 modifié, cité en Menzoul. B, 2023</i>).....	62
Figure II.8 : chrono-stratigraphie des principales successions numidiennes en Méditerranée (<i>Guerrera, 2012 modifié Menzoul. B, 2023</i>).....	64
Figure II.9 : A : sens de courants dans le numidien de Sicile et de Tunisie B : provenance du matériel gréseux dans le numidien de la Tunisie septentrional (<i>Parize. O et al., 1986</i>).....	65
Figure II.10 : Carte montrant les directions des pléocourants basées sur les flûtes et les ondulations enregistrées à partir de différents affleurements du Flysch numidien dans le nord de la Tunisie (<i>Riahi. S et al., 2009</i>).....	66
Figure II.11 : rosettes de courants établies d’après les mesures relevées dans les grès	68

numidiens grossiers. L'intervalle de classe est de 20 degrés. Les flèches indiquent la direction de la moyenne vectorielle. A : figure relative aux figures avec polarité B : figures sans polarité (<i>Hoyez. B, 1975</i>).....	
Figure II.12 : coupe synthétique interprétative du sud de la chaîne Alpine d'Algérie orientale (<i>Vila. J.M et al, 1995</i>).....	69
Figure II.13 : (A) esquisse paléogéographique Oligocène supérieur-Miocène inférieur de la région méditerranéenne centre occidentale (<i>Guerrera. F et al., 2012</i>).....	70
Figure II.14 : coupe synthétique (située en A) montrant le modèle tectono-sédimentaire à travers le bassin des flyschs magrébin et ses marges interne et externe (microplaque méditerranéenne et marge africaine respectivement) au cours de l'Oligocène et Miocène inférieur (<i>Guerrera. F et al., 2012</i>).....	71
Figure II.15 : Carte géologique de la commune de Constantine (Extrait des cartes géologiques 1/50.000 de Constantine, El Haria et El Khroub) (Réalisée sous l'Arcgis).....	75
Figure II.16 : la légende de la carte géologique	76
Figure II.17 : les calcaires lacustres blancs de Mansourah.....	76
Figure II.18 : colonne stratigraphique synthétique de la série numidienne du douar Khorfan (<i>J.F. Raoul, 1974</i>).....	78
Figure II.19 : les grès Medjanien dans la région Nord Ouest de Bordj Bou Arreridj.....	79
Figure II.20 : les dragées de quartz dans les grès Medjanien de la région Nord Ouest de Bordj Bou Arreridj.....	80
Figure II.21 : les Tubotomaculum en tribu et individuel dans les argilites sous numidiennes dans la région de Tamentout.....	80
Figure II.22 : les argilites sous numidiennes de la région Nord Ouest de Sétif (Megress).....	81
Figure II.23 : les grès numidiens de Djebel Ouahch.....	84
Figure II.24 : schéma structural simplifié de la carte géologique d'El Haria, feuille n°74 échelle 1/50 000.....	85
Figure II.25 : les argilites sous numidiennes (a : argilite schisteuse grise avec la Kaolinite, b : argilite schisteuse de couleur rougeâtre à verdâtre, c : caisses des sondages carottés réalisés par laboratoire TREVI au profit de l'entreprise Cosider en 2017).....	86
Figure II.26 : caisse montre les niveaux gréseux.....	
Figure II.27 : a : le quartz en LPNA, b : le quartz en LPA grossissement objectif X10	86
Figure II.28 : a : l'aspect de la biotite en LPNA, b : la biotite en LPA, grossissement objectif	87

X10.....	
Figure II.29 : l’aspect de la biotite altérée en LPNA, grossissement objectif X40.....	88
Figure II.30 : carte structurale dans le constantinois central (<i>Aris. Y, 1994</i>).....	90
CHAPITRE III : HYDROCLIMATOLOGIE	
Figure III.1 : carte des précipitations annuelles moyennes de l’Est Algérien (établie d’après A.R.N.H 1993, données de 60 ans, période du 1 ^{er} septembre 1921 au 31 Aout 1989).....	94
Figure III.2 : Variations des précipitations moyennes mensuelles (en mm) à la station de Constantine (1999-2018).....	96
Figure III.3 : Variations des précipitations annuelles (en mm) pour la station de Constantine (1999-2019).....	97
Figure III.4 : Les variations du coefficient pluviométrique à la station de Constantine (1999-2018).....	99
Figure III.5 Variations des températures moyennes mensuelles (°C) pour la station de Constantine (1999-2018).....	100
Figure III.6 : Diagramme ombrothermique à la station de Constantine (1999-2018).....	101
Figure III.7 : Représentation schématique du bilan évapotranspiration/alimentation de la nappe/ruissellement.....	103
Figure III.8 : Représentation graphique du bilan hydrique d’eau selon la méthode de Throntwaite à la station de Constantine (1999-2018).....	106
CHAPITRE IV : MATERIELS ET METHODES	
Figure IV.1 : tracé de l’autoroute Est Ouest.....	110
Figure IV.2 : le tracé du tunnel T1 avec les deux tubes du tunnel de Djebel El Ouahch (coté Sud).....	111
Figure IV.3 : la distance entre les deux tubes du tunnel T1.....	112
Figure IV.4 : coupe transversale dans le tunnel T1.....	112
Figure IV.5 : l’effondrement au niveau du tube gauche.....	113
Figure IV.6 : les dégâts causés par l’effondrement au niveau du tube (Est) droit.....	114
Figure IV.7 : condition de la section du tunnel effondré entre les Pk 206+148 et 206+272 du tube gauche et les Pk 206+176 et 206+301 du tube droit.....	115
Figure IV.8 : confortement de la zone endommagée de l’effondrement au niveau du tube droit par le remplissage en béton massif (butée en béton).....	115

Figure IV. 9 : ouverture du tube gauche en 30/04/2023.....	116
Figure IV.10 : photo Google earth montre l’implantation des sondages carottés réalisés par le laboratoire Italien TREVI au profit de l’entreprise Cosider en 2017.....	117
Figure IV.11 : logs de sondages carottés réalisés à Djebel El Ouahch le long du tunnel T1 (S1, S2 et S3).....	118
Figure IV.12 : la série des tamis pour l’essai granulométrique.....	120
Figure IV.13 : analyse granulométrique méthode par sédimentation.....	121
Figure IV.14 : détermination de la limite de liquidité à l’aide de l’appareil de Casagrande....	122
Figure IV.15 : détermination de la limite de plasticité.....	122
Figure IV.16 : étapes de l’essai bleu de méthylène.....	123
Figure IV.17 : détermination du taux de carbonate à l’aide du calcimètre de Bernard.....	124
Figure IV.18 : l’appareil oedométrique.....	125
Figure IV.19 : l’appareil de cisaillement à la boîte.....	125
Figure IV.20 : The USGS XRD protocol Shemes (<i>Cullity, 1956</i>).....	126
Figure IV.21 : préparation des poudres pour analyse DRX.....	127
Figure IV.22 : protocole de préparation des lames orientées.....	128
Figure IV.23 : préparation des lames orientées (fraction argileuse).....	129
Figure IV.24 : préparation des échantillons pour le MEB.....	131
Figure IV.25 : analyse EDX des échantillons.....	132
Figure IV.26 : expression d’un linéament en surface (<i>tiré de Fraipont et Hirsch, 1984</i>).....	134
CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION	
Figure V.1 : triangle pour classification des sols selon la granularité.....	140
Figure V.2 : variation des pourcentages des argiles, limons et sables pour tous les échantillons.....	141
Figure V.3 : représentation des résultats de la limite d’Atterberg des différents échantillons...	141
Figure V.4 : classification des sols en fonction de la valeur de bleu de méthylène.....	142
Figure V.5 : diffractogrammes des échantillons poudres du sondage S01 (47.00-47.47m), S2 (43-43.50m) et S3 (58-59.00m).....	144
Figure V.6 : diffractogramme de l’échantillon poudre du sondage carotté S2017-2 (43.00-43.50 m).....	145
Figure V.7 : diffractogramme de l’échantillon poudre du sondage carotté S2017-3 (58.00-59.00 m).....	145

Figure V.8 : composition minéralogique de l'argile totale.....	146
Figure V.9 : diffractogramme de la lame orientée du sondage S01 (47.00-47.47m).....	147
Figure V.10 : diffractogramme de la lame orientée du sondage S02 (43-43.50 m).....	147
Figure V.11 : diffractogramme de la lame orientée du sondage S03 (91-92m).....	148
Figure V.12 : composition minéralogique de la fraction argileuse.....	149
Figure V.13 : répartition des oxydes dans chaque échantillon.....	150
Figure V.14 : (a) : image MEB montrant la Kaolinite (b) analyse EDX de la Kaolinite.....	150
Figure V.15 : (a) : image MEB montrant la Kaolinite (b) analyse EDX de la Kaolinite.....	151
Figure V.16 : (a) : image MEB montrant le quartz (b) analyse EDX du quartz.....	151
Figure V.17 : Trame dense des linéaments avec maillage d'après l'étude des photos aériennes, au 1/20 000.....	153
Figure V.18 : photos aériennes utilisées pour l'établissement de la carte linéamentaire.....	154
Figure V.19 : Histogramme de fréquence en nombre des directions des linéaments.....	155
Figure V.20 : Diagramme en rosace directionnelle des linéaments.....	156
Figure V.21 : directions des fractures dans les argilites.....	157
Figure V.22 : les stries dans les surfaces de fractures des argilites.....	157
Figure V.23 : le miroir de faille dans les formations gréseuses.....	158
Figure V.24 : la superposition de la carte géologique d'El Haria, feuille n°74 (échelle 1/50 000) avec la carte linéamentaire et le tracé du tunnel T1.....	159
Figure V.25 : vue en plan des deux tubes du tunnel avec le développement des désordres en surface.....	160
Figure V.26 : les désordres apparus en surface à l'endroit de l'effondrement du tunnel près du grand lac.....	161
Figure V.27 : les fissures de tension et de compression apparues en surface à l'endroit de l'effondrement du tube gauche du tunnel : a : fissure de tension, b : fissure de compression....	161

PREMIER CHARITRE : GENERALITES	
Tableau I.1 : types des smectites (<i>Clauer et Chaudhuri, 1995</i>).....	46
Tableau I.2 : surface spécifique et C.E.C. de quelques minéraux argileux (<i>Eslinger & Peaver, 1988</i>).....	50
CHAPITRE III : HYDROCLIMATOLOGIE	
Tableau III.1 : les coordonnées géographiques de la station météorologique de Constantine et la période d'observation.....	94
Tableau III.2 : précipitations moyennes mensuelles à la station de Constantine (1999-2018).....	95
Tableau III.3 : Précipitations annuelles (mm) et coefficients pluviométriques de la station de Constantine (1999/2000-2018/2019).....	98
Tableau III.4 : Température moyenne mensuelle (°C) à la station de Constantine (1999-2018).....	99
Tableau III.5 : Valeur de l'indice d'aridité annuel à la station de Constantine.....	102
Tableau III.6 : Le bilan hydrique selon C. W. Thornthwaite (1955) à la station de Constantine (1999-2018).....	105
Tableau III.7 : Détermination des paramètres de la formule du bilan.....	108
CHAPITRE IV : MATERIELS ET METHODES	
Tableau IV.1 : coordonnées UTM des sondages réalisés par COSIDER en 2017 et les profondeurs des échantillons.....	119
Tableau IV. 5 : Liste des minéraux non argileux identifiés avec les facteurs correctifs associés (<i>Thorez, 1976</i>).....	127
Tableau IV.6 : Comportement des minéraux argileux suivant les différents traitements (<i>Thorez, 1986</i>).....	130
Tableau IV.7 : comportement des minéraux interstratifiés suivant les différents traitements (<i>Thorez, 1986</i>).....	130
Tableau IV.8 : Liste des minéraux argileux identifiés avec les facteurs correctifs associés (<i>Fagel et al., 2007</i>).....	130
CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION	
Tableau V.1 : résultats de la valeur de bleu de méthylène (VBS).....	142
Tableau V.2 : qualification des sols en fonction de l'activité de leur fraction argileuse.....	142
Tableau V.3 : résultats essais mécaniques (essai de cisaillement) faits par LTPEst.....	143
Tableau V.4 : résultats essais mécaniques (essai de cisaillement rectiligne CD) réalisés par LTPEst.....	144
Tableau V.5 : résultats d'analyse semi quantitative des trois échantillons.....	146
Tableau V.6 : pourcentage des minéraux argileux.....	148
Tableau V.7 : résultats des analyses chimiques de la fluorescence X des échantillons des argilites.....	149

INTRODUCTION GENERALE

Les accidents de chantier sont généralement la conséquence de l'accumulation d'erreurs successives (*Rat, M., 2010*) ayant des conséquences dramatiques sur la population malgré les efforts fournis avant et durant la réalisation des différents ouvrages.

Toutefois, le risque fait toujours partie de chaque étape pour la réalisation des projets notamment les ouvrages souterrains comme le cas des tunnels où l'instabilité est une cause principale d'accidents soit durant la réalisation de l'ouvrage ou après sa mise en service.

A cet effet, ce type de projet nécessite des études géologiques et géotechniques et des analyses très approfondies pour assurer leur stabilité où la construction des tunnels rencontre souvent les problèmes de stabilité dus aux mauvaises conditions géologiques et à la présence d'eau (*cité en Jamal. I., 2007*).

Ainsi, l'ingénieur doit faire face à deux sérieux problèmes : d'un côté, il doit garantir le bon déroulement des travaux tout en préservant la stabilité de l'ouvrage, et de l'autre côté, il doit contrôler les déformations du massif afin de prévenir toute interaction avec les constructions limitrophes.

Les tunnels qu'ils soient utilisés pour le transport routier, ferroviaires, ou même pour les réseaux d'approvisionnement en eau, d'assainissement ou de télécommunication, sont essentiels à notre vie quotidienne.

Le creusement des tunnels et la création d'une cavité dans un terrain donné vont forcément modifier l'état des contraintes dans le massif autour de la zone excavée (*Janin, J.P., 2012*).

Toutefois en raison de divers facteurs géologiques ou des catastrophes naturelles, ces structures souterraines peuvent parfois subir des effondrements inattendus.

L'effondrement des tunnels est un phénomène complexe et potentiellement dangereux qui peut avoir des conséquences dévastatrices sur les infrastructures souterraines et la sécurité publique.

Ces événements tragiques posent des défis considérables aux autorités responsables de leur gestion et soulèvent des questions cruciales en matière de sécurité et de préparation aux catastrophes.

Les causes des effondrements de tunnels sont multifactorielles : les effondrements de tunnels ne sont généralement pas le résultat d'une seule cause, mais plutôt d'une combinaison de facteurs. Ces facteurs peuvent inclure des défauts de conception, des problèmes de construction, des caractéristiques géologiques défavorables, maintenance inadéquate, et d'autres variables.

Dans les régions montagneuses de la chaîne de l'Atlas Algérien, les tunnels jouent un rôle crucial pour assurer la mobilité et favoriser le développement socio-économique.

Le tunnel de Djebel El Ouahch, situé dans la région orientale du Tell en Algérie, au sein de la chaîne numidienne, traverse une formation lithologique instable comprenant de l'argilite.

Cette région est particulièrement sujette aux perturbations gravitationnelles dues aux formations chaotiques au sein de la nappe numidienne (*Kimour et al., 2023*). Le 1er janvier 2014, lors des opérations de creusement, un effondrement brutal s'est produit dans le tube gauche (Ouest) du tunnel T1, partie de l'autoroute A1 entre le PK 206+136 au PK 206+265, sur une distance de 129 m.

Cet effondrement a non seulement endommagé les deux tubes, mais a également entraîné de graves fissures dans le revêtement final le long des PK 206+199 à 262, sur une distance de 63 m (*Kitchah et al., 2021*). Cet incident alarmant a donné lieu à de vastes travaux de géo-ingénierie pour étudier les causes profondes et les origines des désordres locaux observés lors de la traversée des argiles sous numidiennes.

Afin de relier les deux extrémités du tronçon de tunnel effondré et d'assurer la durabilité du trafic, une solution hâtive a été initiée par la construction d'une déviation sinueuse temporaire de 12,41 km sur un relief abrupt entre le PK 205+393.000 et le PK 207+284.500.

Cette déviation a nécessité un investissement public de plus de 10 millions USD, confié à des entreprises nationales suite au retrait du consortium japonais.

L'objectif principal de cette thèse est d'examiner le problème de l'effondrement du tunnel de Djebel El Ouahch et les causes de cet effondrement tout en détaillant les conditions géologiques de la région, mettant en lumière l'importance cruciale de la gestion et de la surveillance continues de ces infrastructures souterraines pour prévenir des incidents similaires à l'avenir.

Afin d'accomplir cette étude, la thèse est structurée en cinq chapitres selon la manière qui suit :

- ❖ Le premier chapitre est consacré aux généralités sur la région d'étude,
- ❖ Le deuxième chapitre aborde d'une part le contexte géologique de l'Algérie du Nord et d'autre part la géologie de la région de Constantine avec une synthèse bibliographique sur les flyschs numidiens.

- ❖ Le troisième chapitre traite la partie hydroclimatologie tout en mettant l'accent sur le rôle de l'eau dans l'effondrement du tunnel.
- ❖ Le quatrième chapitre se base essentiellement sur les différentes méthodes et matériels utilisées pour répondre aux questions formulées préalablement.
- ❖ Le cinquième (le dernier) chapitre est consacré à l'interprétation des différents résultats obtenus de cette étude.

Le travail se termine par une conclusion générale qui regroupe les différents résultats obtenus.

PREMIER CHAPITRE

Généralités

I.1 Introduction :

Ce chapitre constitue la porte d'entrée de ce travail offrant une vision d'ensemble sur la région d'étude avant d'entamer les détails des chapitres à suivre. Il posera aussi les bases nécessaires pour une exploration approfondie de la région d'étude.

La présente étude se focalise sur une région qui offre un terrain propice à l'exploration de divers phénomènes géologiques et géotechniques qui marquent son histoire. Donc avant d'entrer dans le détail, il est essentiel de comprendre la géographie physique qui a façonné cette région au fil des siècles, sa morphologie, le climat et végétation, la sismicité ...etc.

Dans ce chapitre, nous nous pencherons aussi sur les caractéristiques générales des argiles, leur formation, leurs types et leurs propriétés.

I.2 Situation géographique :

La wilaya de Constantine est l'une des plus importantes wilayas du pays, d'une part, il s'agit d'un carrefour entre l'Est et le Centre du pays et d'autre part entre le Tell et les hauts plateaux dans l'Est du pays. Elle est située au Nord Est de l'Algérie, à 350 km environ d'Alger (Fig. I.1).

La commune de Constantine est la capitale de la wilaya de Constantine et est située sur un plateau rocheux, surplombant les gorges du Rhumel. La ville est connue pour son pont suspendu, ses anciennes fortifications et son histoire riche remontant à l'époque romaine. Constantine est également surnommée "la ville des ponts" en raison de ses nombreux ponts qui enjambent les gorges.

L'autoroute Est Ouest passe à l'Est de la ville de Constantine, elle traverse une région montagneuse accidentée boisée représentée par Djebel El Ouahch situé au Nord Est de la ville de Constantine.

Djebel El Ouahch se situe à 7 km de la ville de Constantine à 1200 m d'altitude, c'est un forêt riche par la flore et la végétation très dense. Il est considéré comme l'un des endroits les plus attractifs de la région de Constantine grâce à la beauté de son paysage naturel, ses lacs célèbres (Fig I.2) et son parc d'attraction.

Il s'agit d'une chaîne de montagnes qui s'étend dans la région environnante qui offre des panoramas pittoresques et est souvent appréciée des randonneurs et des amoureux de la nature pour ses sentiers de randonnée et ses vues panoramiques sur la ville de Constantine et ses environs.

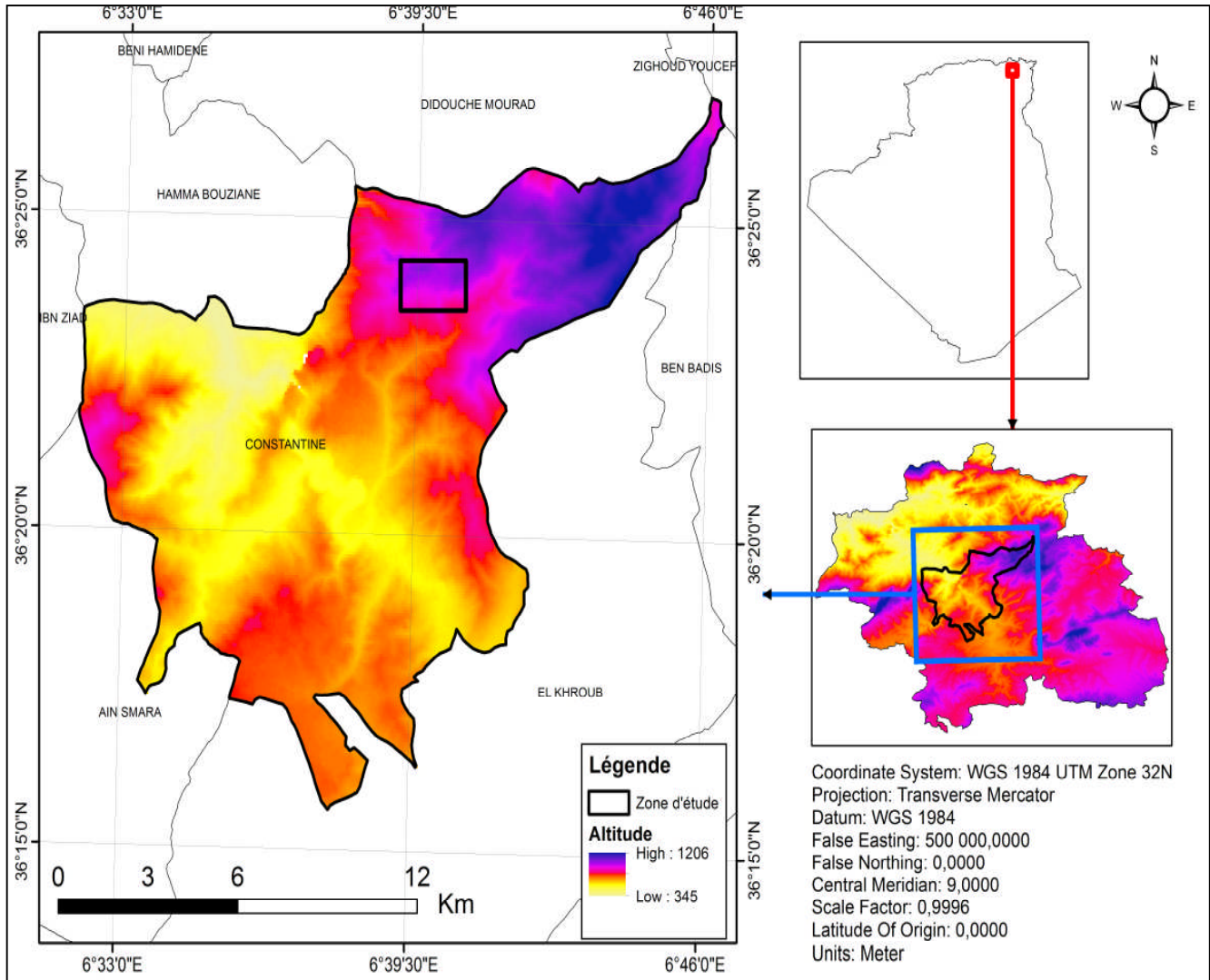


Figure I.1 : situation géographique de la région d'étude.



Figure I.2 : les lacs célèbres de Djebel El Ouahch

I.3 : Géomorphologie :

Le relief de la région de Constantine est assez compliqué, c'est la conséquence de plusieurs phases tectoniques. La présence de plusieurs nappes de charriage (nappe numidienne, flysch massylien, nappe tellienne, nappe néritique Constantinoise) a un rôle assez important dans le façonnement de ce dernier.

L'analyse de la carte hypsométrique a montré que la région est caractérisée par des altitudes variant de 326m à 1223m (Fig. I.3) avec deux zones distinctes : i une zone haute avec des altitudes variant de 800m et 1223m, il s'agit de la partie montagneuse qui occupe la partie Nord Est, ii une zone basse avec des altitudes comprises entre 150m et 600m, c'est la zone des vallées et des plaines (Fig. I.4).

La wilaya de Constantine est subdivisée en trois zones géographiques : i la zone montagneuse qui est située au Nord de la wilaya, elle est représentés essentiellement par Djebel El Ouahch et Djebel Chettaba, ii les bassins intérieurs composés d'une série de dépressions d'étendant de Ferdjioua à Zighoud Youcef, iii les hautes plaines situées au Sud de la wilaya.

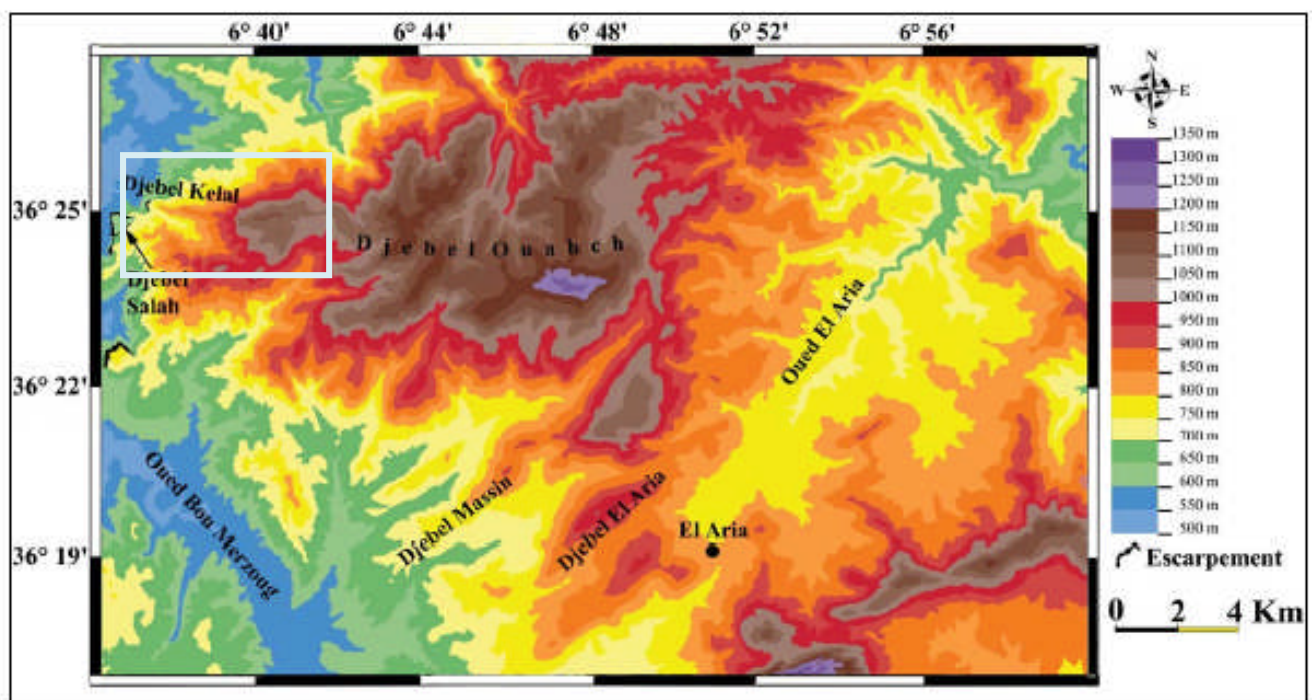


Figure I. 3 : carte hypsométrique de la région d'El Haria (*Benyazid. Y et al, 2014*)

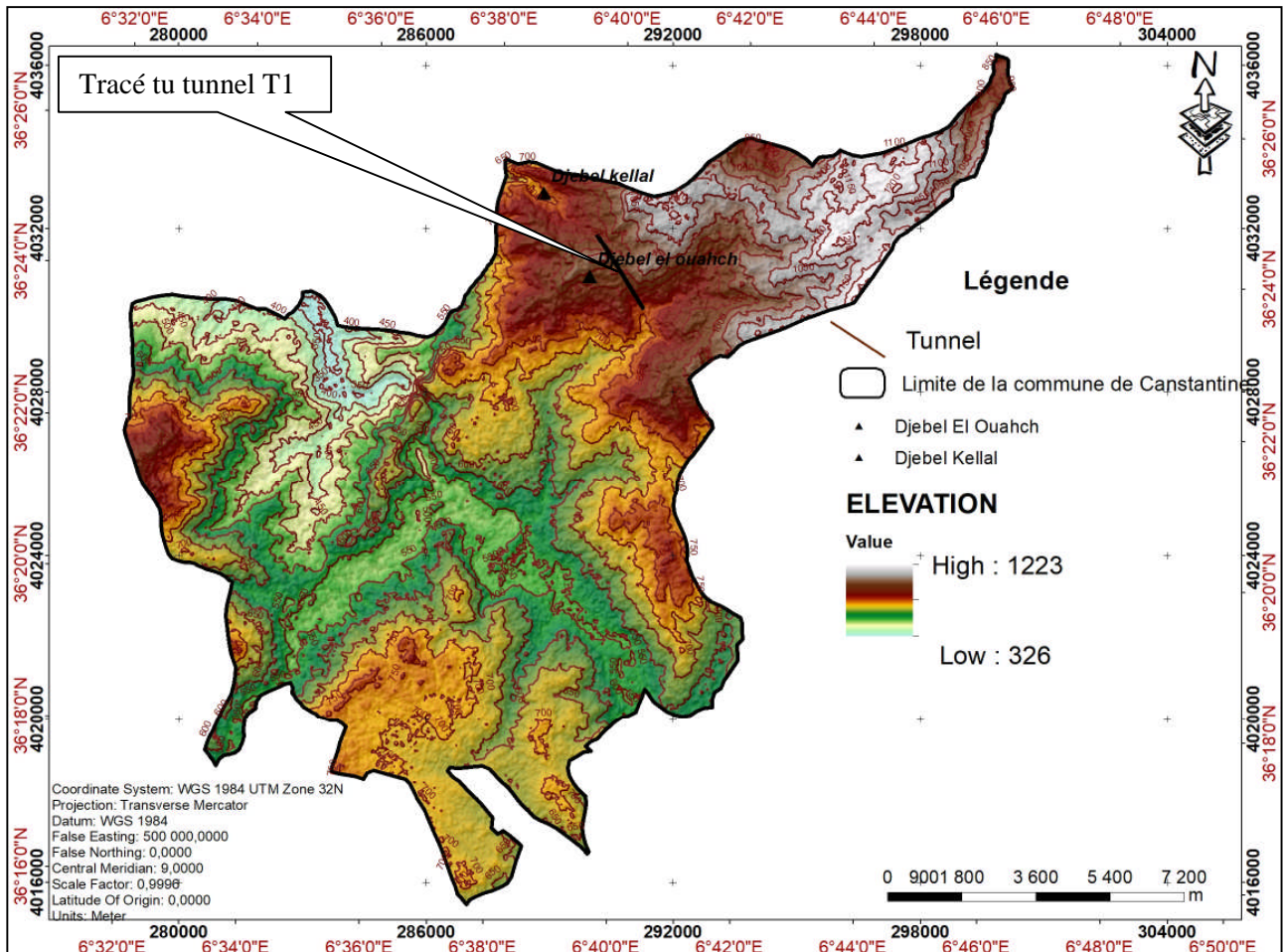


Figure I.4 : carte hypsométrique de la région d'étude réalisée sur la base de MNT n° ASTGTM28N36E006 sous Arcgis.

La région de Constantine s'étale sur un terrain caractérisé par une topographie très accidentée, marquée par une juxtaposition de plateaux, de collines, de dépressions et de ruptures brutales de pentes donnant ainsi un site hétérogène (Boussouf, 2012).

La carte des pentes (Fig. I.5) révèle une variabilité de la pente, allant de 0 à 80%. Plus de 60% des terrains présentent une pente comprise entre 30% et 60%, tandis que les pentes supérieures à 60% ne représentent que 10.61% de la région étudiée.

Ces terrains sont associés aux crêtes et aux versants abrupts des Djebel El Ouahch et Djebel Kellal, les falaises du rocher de Constantine et une partie de l'Est du massif montagneux de Chettaba qui forme une ceinture montagneuse qui s'étale de l'Est à l'Ouest et limite la ville de Constantine du côté Nord.

Les pentes inférieures à 15%, qui incluent les plaines alluviales, les terrasses et les replats, représentent 6.89% de la surface (Fig. I.6 et I.7).

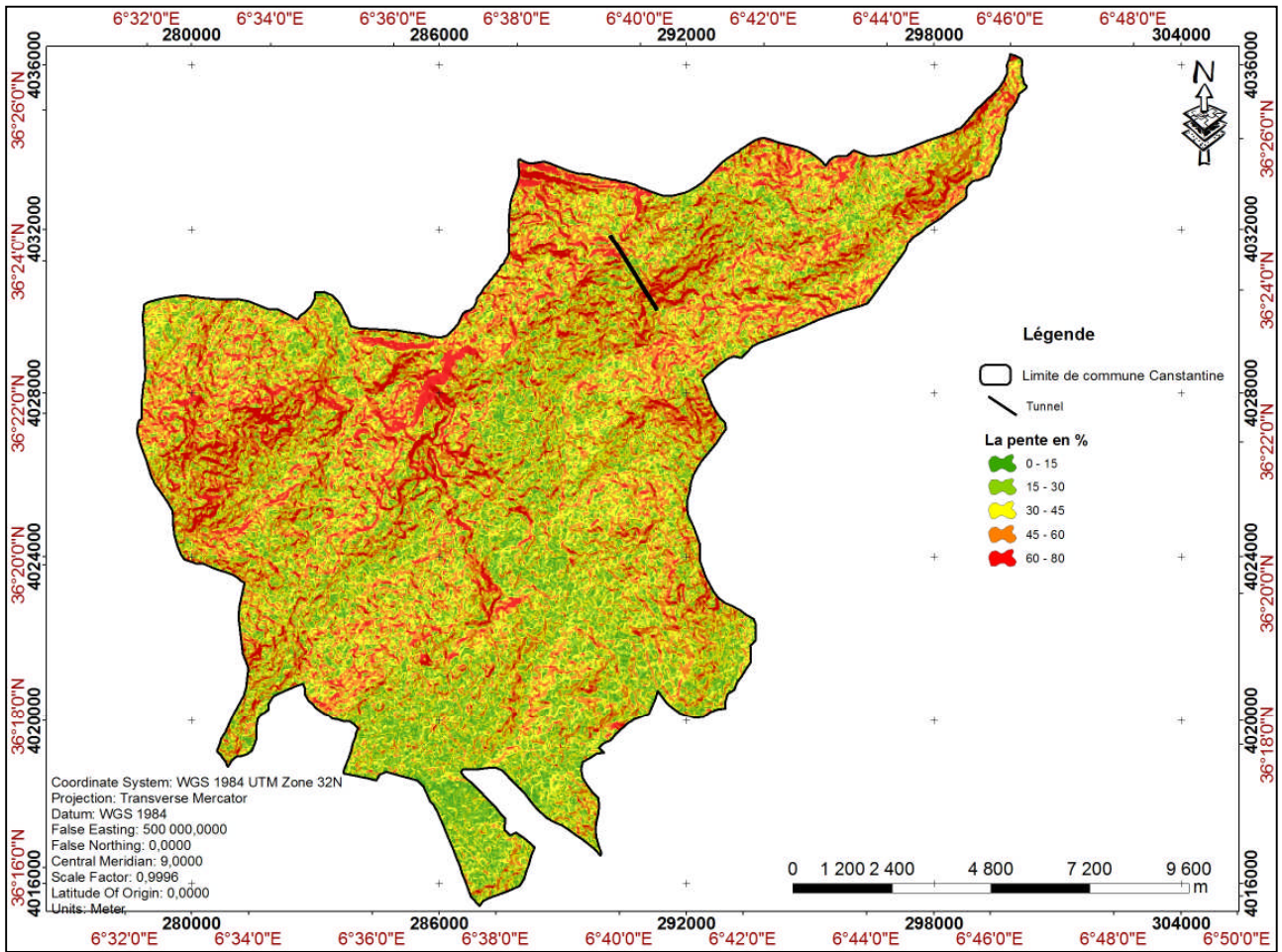


Figure I.5 : la carte des pentes de la région d'étude sur la base de MNT n°ASTGTM28N36E006 sous Arcgis.

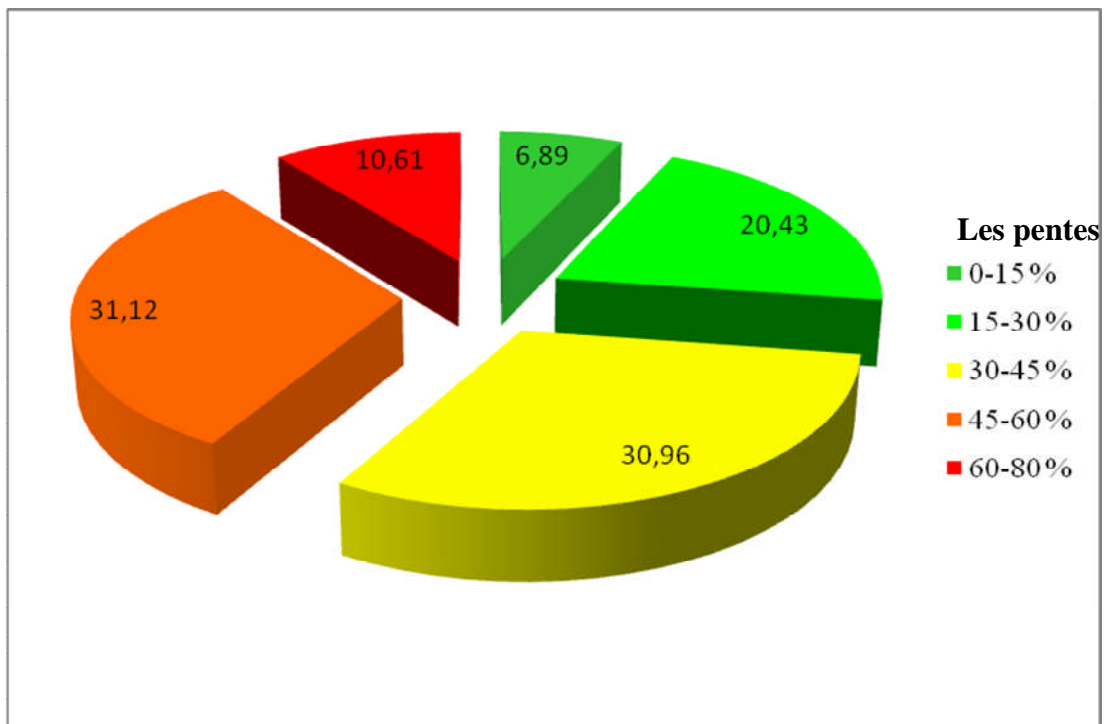


Figure I.6 : secteur de la répartition des surfaces de la commune de Constantine selon les pentes.

I.4 Climat et végétation :

Le climat de la région de Constantine peut être défini comme méditerranéenne avec un hiver froid et humide dont la ville est parfois exposée aux chutes de neige, et un été sec et chaud.

La ville est située dans le Nord de l'Algérie, à 770 mètres d'altitude et à environ 80 km de la cote méditerranéenne (Fig. I.8).

Les précipitations annuelles moyennes sont de 469 mm dont le mois le moins pluvieux est le mois de juillet et les mois les plus pluvieux sont Janvier et décembre.

La moyenne pluviométrique annuelle varie de 500 à 800 mm/an, les précipitations sont très variables en allant du Nord au Sud.

La végétation est en rapport avec la nature des sols et la quantité d'eau que reçoit cette région. Elle possède de magnifiques endroits forestiers qui subsistent au Nord principalement dans les deux massifs de Djebel El Ouahch, et Chettaba sans oublier le forêt de chênes des Mouïss au pied de Djebel Sidi Idriss. A cet effet, la couverture végétale est dense et variée caractérisée par une grande diversité d'arbres. On y trouve notamment des espèces telles que : pin d'Alep, chênes lièges, chênes verts, chênes zeen, chênes Afares, l'Eucalyptus, cyprès (*Djouadi et al. 2000*), des oliviers, raisins, figuiers, broussailles... etc. Ce type de végétation contribue à la richesse et à la beauté naturelle de la région. Quant au bassin de Constantine, il correspond essentiellement à des terrains agricoles caractérisés par la céréaliculture.

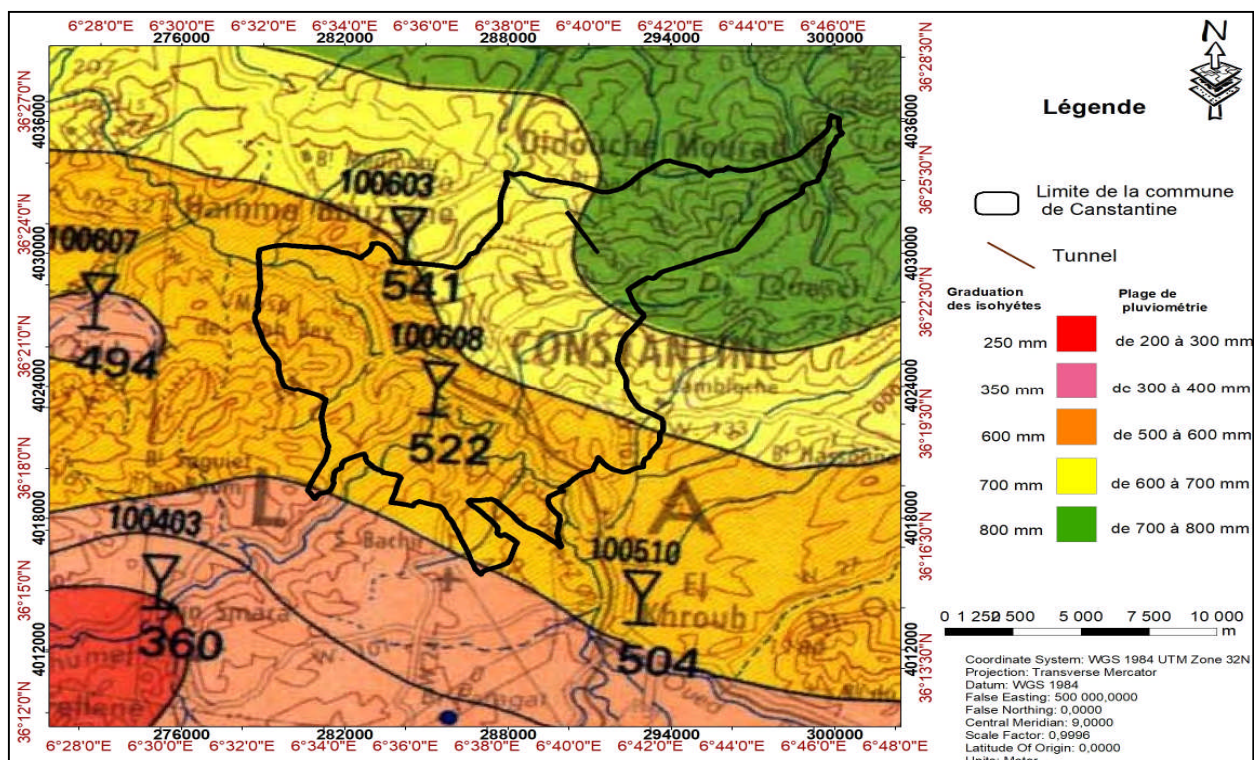


Figure I.8 : Extrait de la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord (*ANRH 1993*).

I.5 Hydrologie et Hydrogéologie:

La région de Constantine est caractérisée par un réseau hydrographique relativement dense, dont la ville de Constantine elle-même est le point de confluence de deux principaux cours d'eau, Oued Bou Merzoug d'une direction N-S en amont puis il devient NW-SE en aval, il prend naissance de la commune de Sigus sous le nom Oued Kelb, et Oued Rhumel avec une direction qui varie le long de son parcours, qui traverse les hautes plaines Constantinoises avec une direction Nord Est Sud Ouest jusqu'à il se rencontre avec Oued Boumerzoug ensuite il continue son parcours en traversant les gorges de Constantine en arrivant au bassin de Constantine où il change sa direction vers le Nord Ouest jusqu'à son confluent avec Oued Endja (le Nord de Mila), à partir duquel il prend le nom d'Oued el Kebir (Fig. I.9).

Ces deux cours d'eau principaux sont marqués par des affluents qui ravinent la région profondément, ce sont Oueds Athmènia, Seguin, Ziad et Smendou qui convergent tous vers Oued Rhumel, et Oueds El Klab, Melah, Berda et Oued Hamimine qui affluent Oued Bou Merzoug (Fig. I.10 et I.11).

Dans la région d'El Haria (est de Constantine), aucun niveau aquifère notable n'a pu être reconnu sur la région (*Coiffait, 1975*), seulement l'abondance de petites sources à la base des grès numidiens.

Dans le nord de la région d'El Haria (région de Zighoud Youcef ex Smendou), les principales sources du Numidien, telles que celles du pied de Djebel Halloufa existent suivant la ligne d'affleurements des argiles numidiennes. De nombreuses sources se forment dans les grès de l'Aquitaniens au dessus des lits d'argile limoneuses qui y sont intercalés tel est le cas Koudiat Aouria et du vallon d'oued Kranga.

Par suite de la disposition tectonique du synclinal, du Smendou et des petits synclinaux secondaires situés au Nord de Bizot, l'existence de nappes d'eau artésiennes semble assez probables dans le sud Ouest dans la région (L. Goleaud, 1907). Concernant les sources thermales, plusieurs sources se trouvent en rapport avec les failles signalées. Parmi eux, celle de Sidi M'Cid qui se trouve à la lèvre de la faille de Constantine, la source minérale de Salah Bey ...etc (*Jacob. M.et Ficheur. E,1901*). Une exurgence un peu thermale prend naissance entre les deux Toumiettes. Elle est en relation avec des failles qui affectent les calcaires nummilitiques (*Goleaud. L, 1907*).

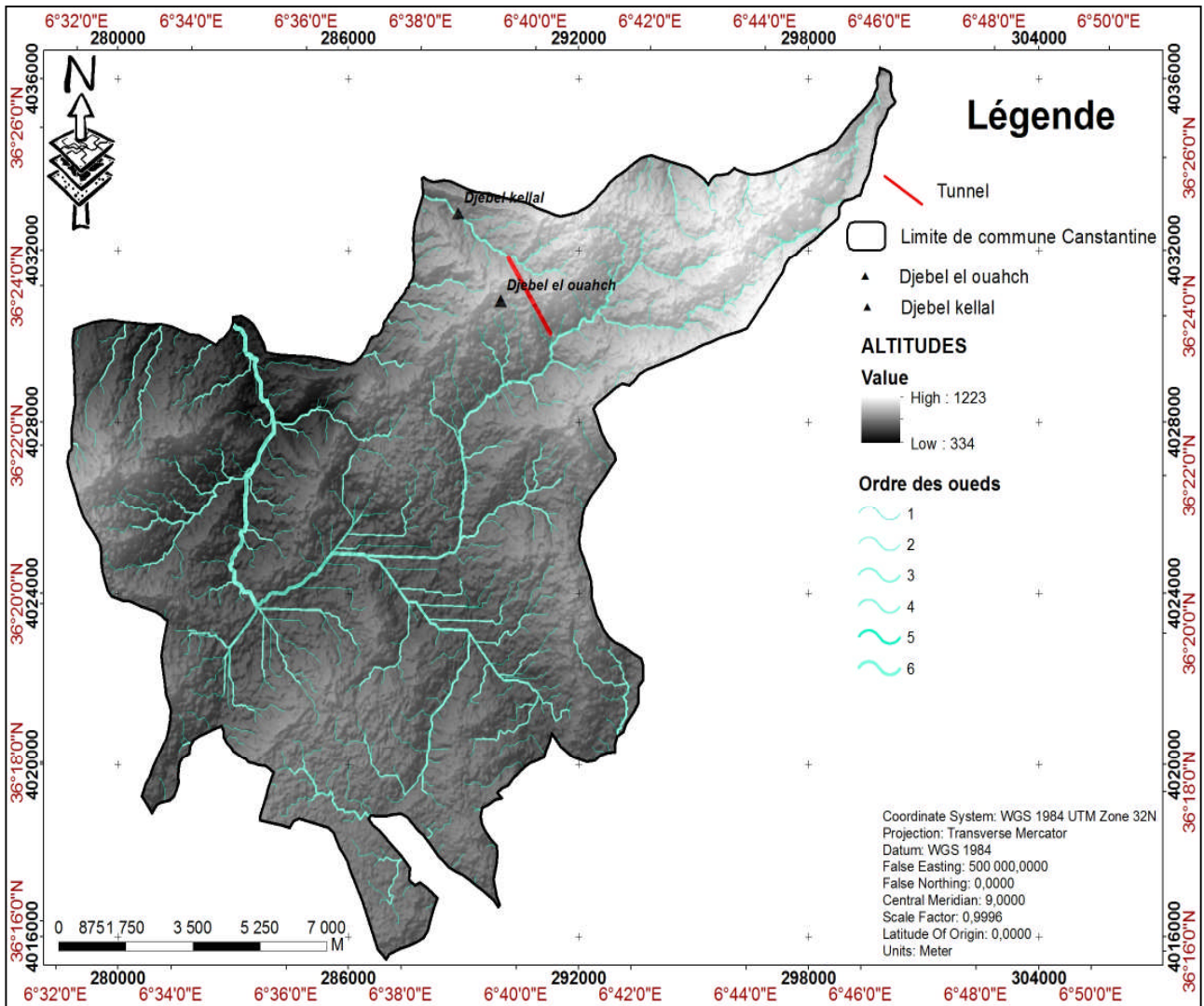


Figure. I.9 : carte des réseaux hydrographiques de la commune de Constantine

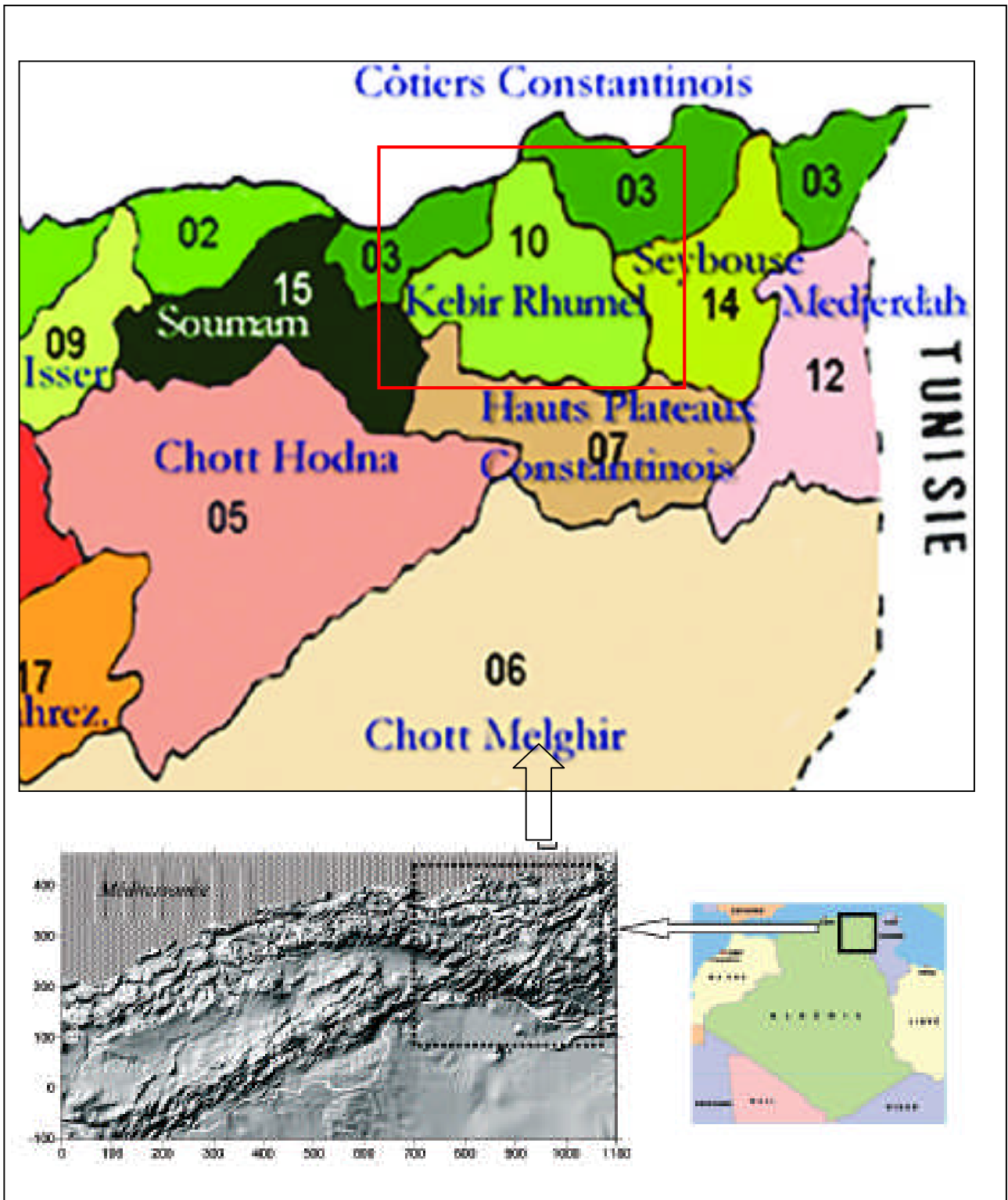


Figure I.10 : localisation des bassins hydrographiques de l'est Algérien (Mebarki, A, 2007)

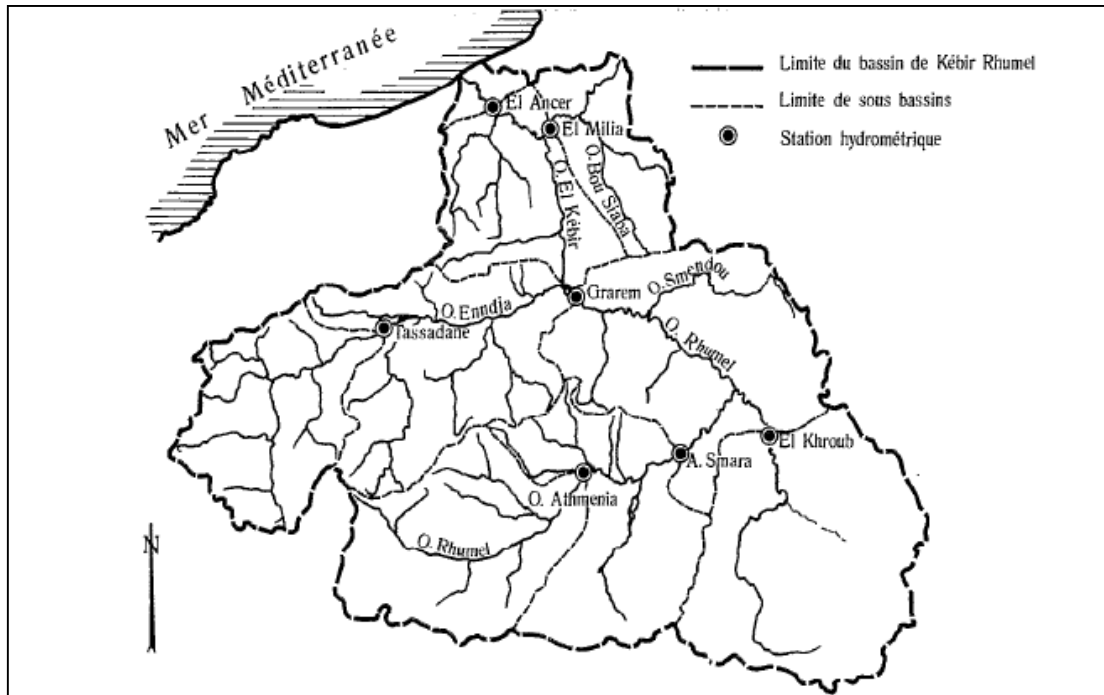


Figure I.11 : réseau hydrographique et stations hydrométriques (*Mebark. Ai et Thomas. C, 1988*)

I.6 Sismicité de la région :

La plupart des villes du nord de l'Algérie se trouvent dans des zones sismiques. Alger, Constantine, Oran, Guelma, Chlef (anciennement El Asnam) et M'Sila et d'autres villes importantes qui ont été touchées par des séismes dévastateurs au cours des deux derniers siècles (*Harbi. A., et al, 2004*).

La réduction du risque sismique, nécessite un micro-zonage détaillé des zones urbaines ce qui doit être précédé d'une évaluation réaliste de l'aléa sismique (*Harbi. A., et al, 2004*).

D'après le document RPA 99 version 2003, le territoire national est divisé en cinq zones de sismicité croissante (Fig. I.12), on a :

- ✚ Zone 0 : sismicité négligeable.
- ✚ Zone I : sismicité faible.
- ✚ Zone IIa et IIb : sismicité moyenne.
- ✚ Zone III : sismicité élevée.

La région de Constantine est classée dans la zone (IIb) caractérisée par une sismicité moyenne (Fig. I.13).

D'après l'histoire sismique de la région, elle a connu trois événements importants qui ont atteint ou dépassé la magnitude de 5 qui se sont produits près de la ville de Constantine (*BOUADJA. F, 2010*).

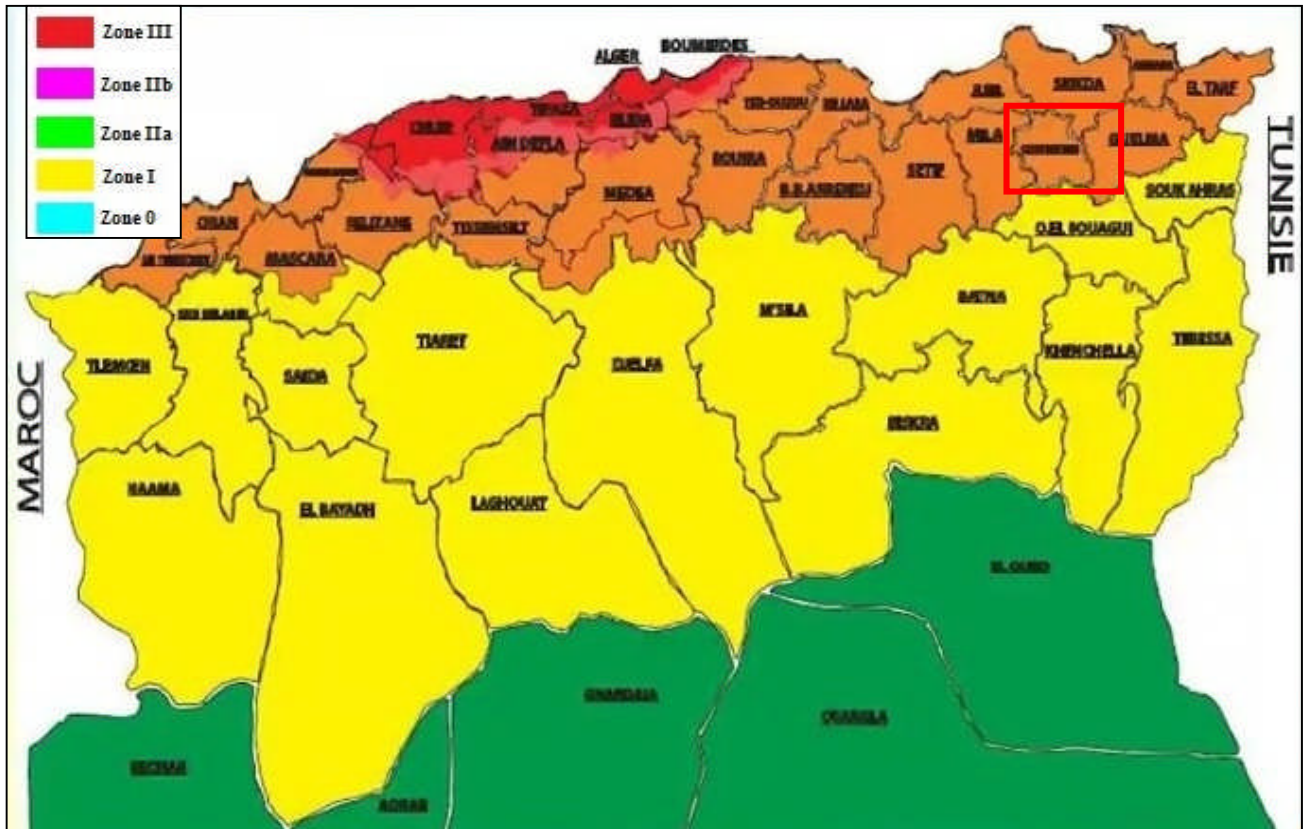


Figure I.12 : carte de zonage sismique du territoire national (*RPA 99 version 2003*).

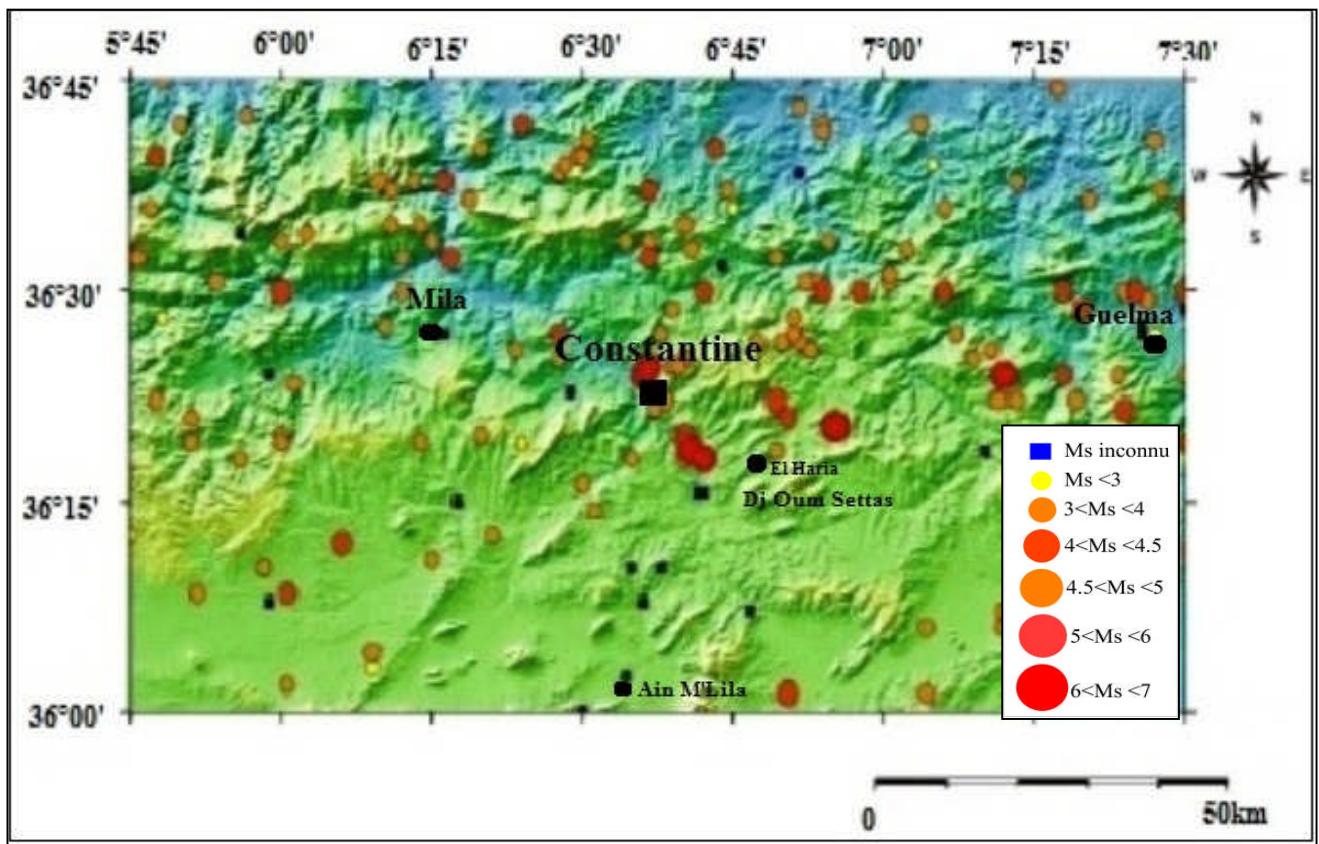


Figure I.13 : carte de la sismicité de la région de Constantine de 1900 à 2002 (*BOUEDJA.F, 2010*).

I.7 Généralités sur les argiles:

I.7.1: Introduction:

Le tunnel T1 de Djbel El Ouahch traverse une épaisse couche des argilites sous numidiennes, à cet effet, nous consacrons cette partie pour les généralités sur les argiles où, nous allons explorer plus en détail les différentes caractéristiques des argiles, leur classification et leur formation.

I.7.2 Définition:

Les argiles sont des roches sédimentaires détritiques qui constituent la grande majorité des roches sédimentaires et elles se trouvent aussi dans les sols, les sédiments et les zones d'altération hydrothermale. Elles sont absentes dans les roches de haute température comme les roches magmatiques et les roches métamorphiques à des températures supérieures à 500 °C.

A travers les différentes études faites sur les argiles, il n'existe pas une définition unique pour les argiles, d'une part, elle est liée à leur utilisation et au discipline (géologie, géotechnique, pédologie etc), d'autre part, elle liée à la taille des grains et à la minéralogie.

Selon le dictionnaire géologique 7^{ème} édition, les argiles sont définies comme étant une roche composée pour l'essentiel de ces minéraux.

Il ne faut pas confondre entre les argiles comme une roche et les minéraux argileux.

La définition des argiles en géologie ne correspond pas exactement à celle en géotechnique.

De point de vue géologique, les argiles sont des roches sédimentaires composées des minéraux argileux et d'autres minéraux associés (quartz, oxydes de fer... etc).

En mécanique des sols par exemple, elles sont couramment définies par rapport à la taille des particules inférieures à 2 µm.

I.7.3 Structure des minéraux argileux :

Les minéraux argileux sont des phyllosilicates hydratés de petite taille, leur structure est caractérisée par la superposition de feuilles composées de couches tétraédriques (SiO_4^{4-}) (Fig. I.14) et des couches octaédriques $\text{AlO}_2(\text{OH})$ (Fig. I.15).

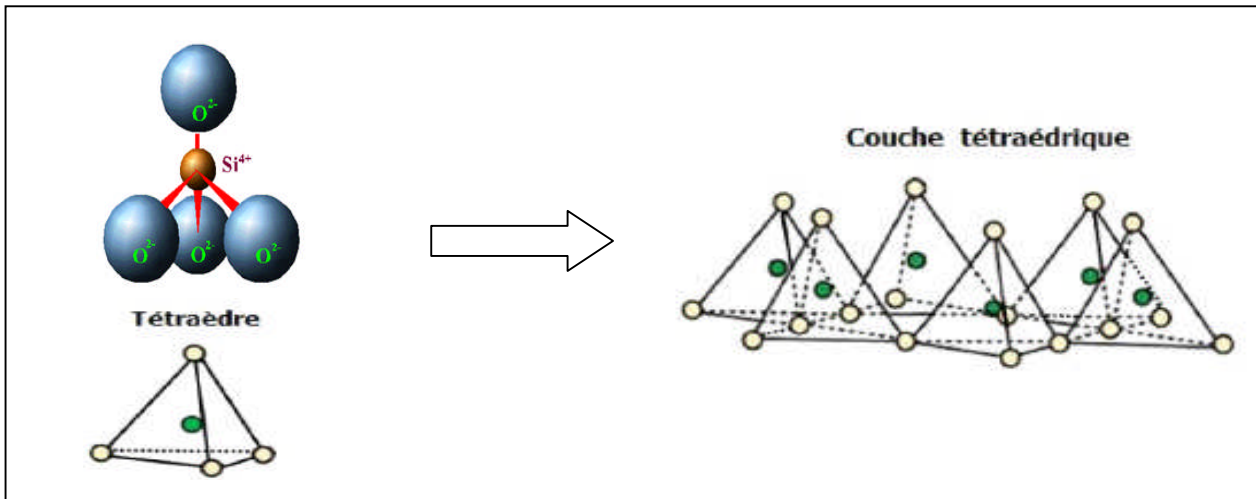


Figure I. 14 : la couche tétraédrique du feuillet élémentaire des argiles

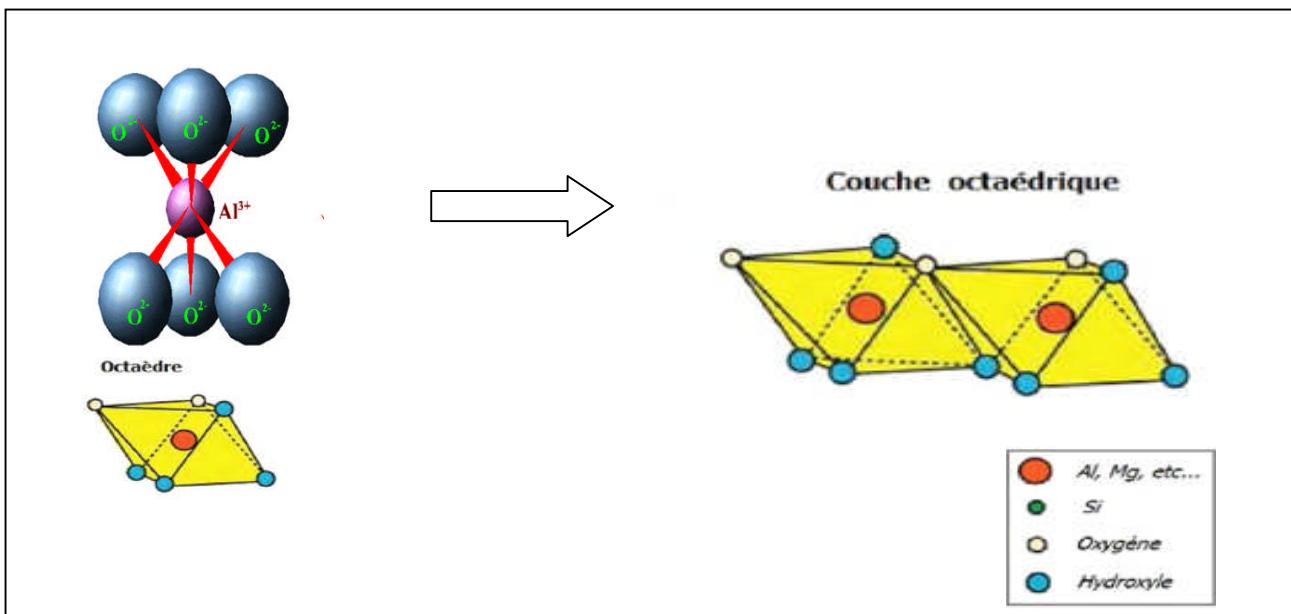


Figure I.15 : la couche octaédrique du feuillet élémentaire des argiles

La structure des argiles peut être définie en se basant sur la figure 02 où on distingue quatre niveaux d'organisation (Fig. I16):

- ❖ Les plans qui sont constitués par les atomes.
- ❖ Les feuillets : c'est la combinaison de plusieurs plans tétraédriques ou octaédriques.
- ❖ Les couches : correspondent à des combinaisons de feuillets.
- ❖ Le cristal : c'est le résultat de l'empilement de plusieurs couches.

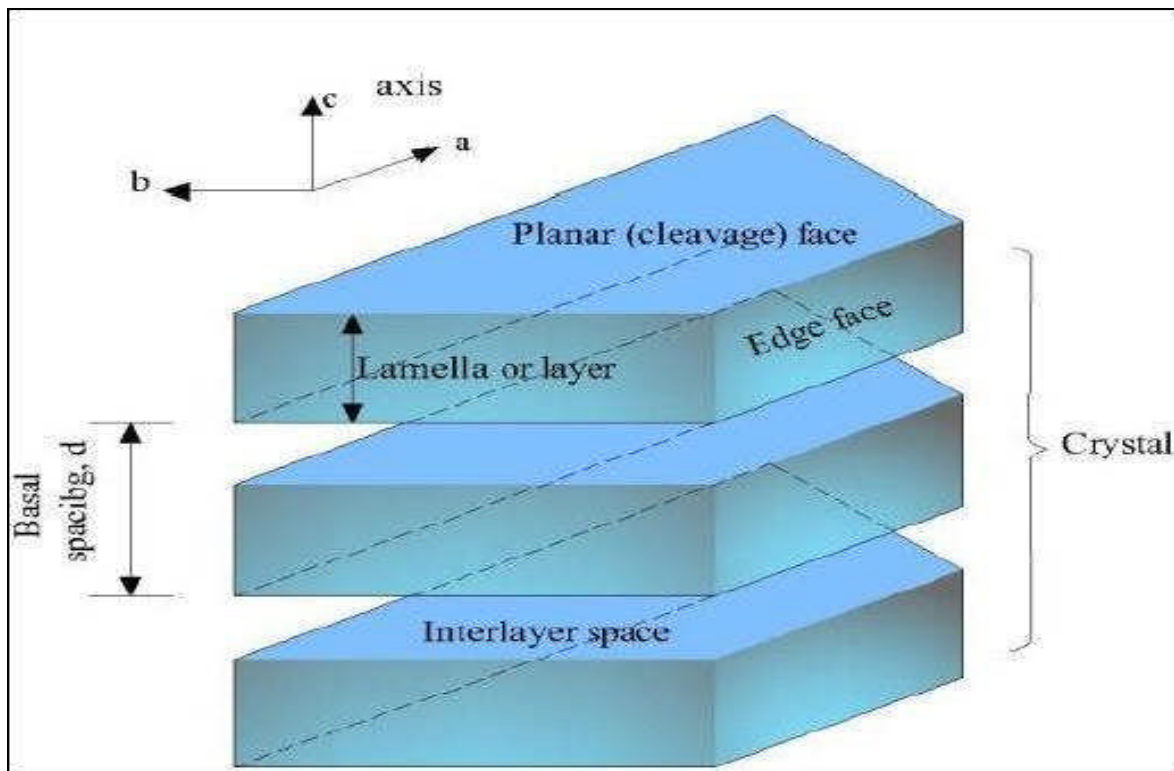


Figure I.16 : la structure générale des phyllosilicates (*White, 1999*)

Les minéraux argileux sont traités par des différentes méthodes afin d'étudier leur répartition dans la roche, leur structure moléculaire ainsi la composition minéralogique.

Généralement, les lames minces donnent une aperçue générale sur leur approche micromorphologique, mais le microscope électronique à balayage (MEB), le microscope électronique de transmission (MET), la diffraction aux rayons X (DRX) ainsi l'infrarouge (IR) permettent une étude plus détaillée et plus précise (la morphologie et l'agencement des particules, la structure moléculaire et la composition minéralogique des assemblages argileux).

Une autre technique est utilisée aussi pour déterminer le degré d'hydratation des assemblages argileux, c'est l'analyse thermique différentielle (ATD) et l'analyse thermogravimétrique (ATG).

I.7.4 Origines et formation des argiles :

Les minéraux argileux résultent de l'altération physique par la désagrégation des roches préexistantes en donnant naissance à des minéraux primaires et par l'altération chimique ce qui conduit à la formation des minéraux secondaires soit à partir des minéraux transformés ou bien à partir de la précipitation d'une solution (Fig. I.17). Le processus de dissolution et de recristallisation conduisent à la formation ou transformation des minéraux argileux (*Fagel, N, 2015*).

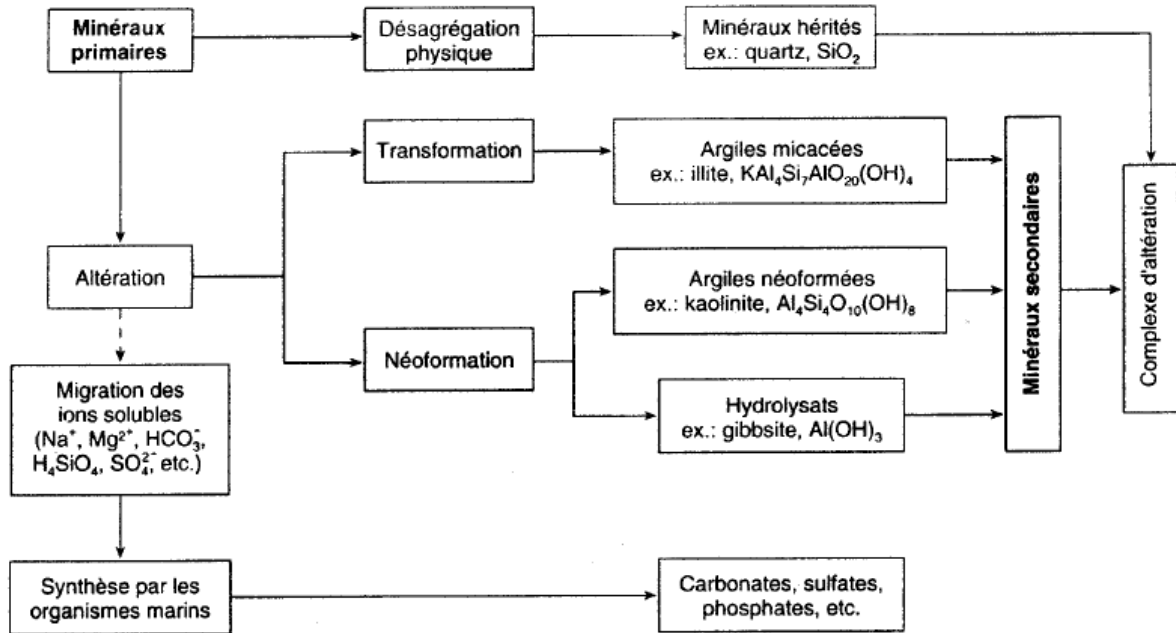


Figure I.17 : évolution des minéraux primaires et formation des argiles (*Landry et Mercier, 1992*).

Le mode de formation des argiles peut être expliqué par trois processus (Fig. I.18), le minéral peut être formé directement à partir de la roche mère sans aucune modification minéralogique ou chimique en donnant naissance à des minéraux hérités.

Les conditions d'altération peuvent entraîner des modifications chimiques et minéralogiques tout en conservant la structure initiale des cristaux, ces modifications sont accompagnées de pertes de certains ions (dégradation) ou gains (aggradation) ce qui conduit à la formation des minéraux transformés.

Les minéraux argileux peuvent être formés à partir des ions qui se trouvent dans les solutions résultantes de la dissolution des minéraux primaires contenant dans la roche mère, c'est les minéraux néoformés.

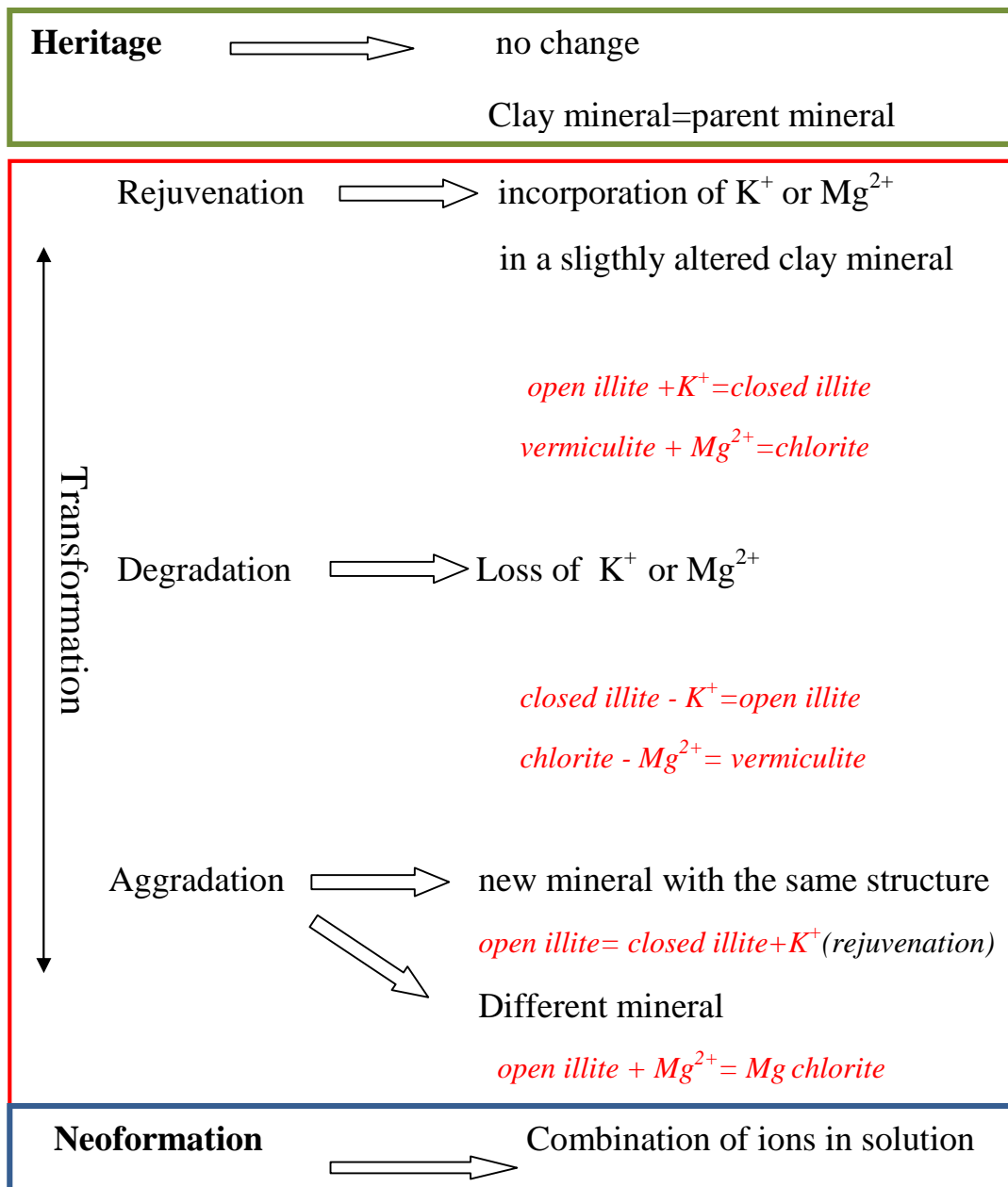


Figure I.18 : processus de formation des minéraux argileux (*modifié de Thorez, 1998*).

Les argiles sont des minéraux en continuelle évolution minéralogique pour atteindre un état d'équilibre thermodynamique selon l'agent d'altération. Ces mutations modifient la présence, l'abondance et la composition minéralogique des minéraux argileux (*Thorez, 1986*).

La formation et la stabilité des argiles sont conditionnées par la température et le temps, à cet effet, elles ne sont présentes qu'à proximité de la surface terrestre. Par exemple, dans des conditions de faibles températures, il est nécessaires des longues périodes de temps pour changer la minéralogie des argiles, en revanche, pour courte durée, une température élevée peut accélérer la réaction sachant que l'évolution de la température dans les phénomènes géologiques est très variables (intrusion magmatique, percolation de fluides ...) (*Fagel, N, 2015*) (Fig. I.19).

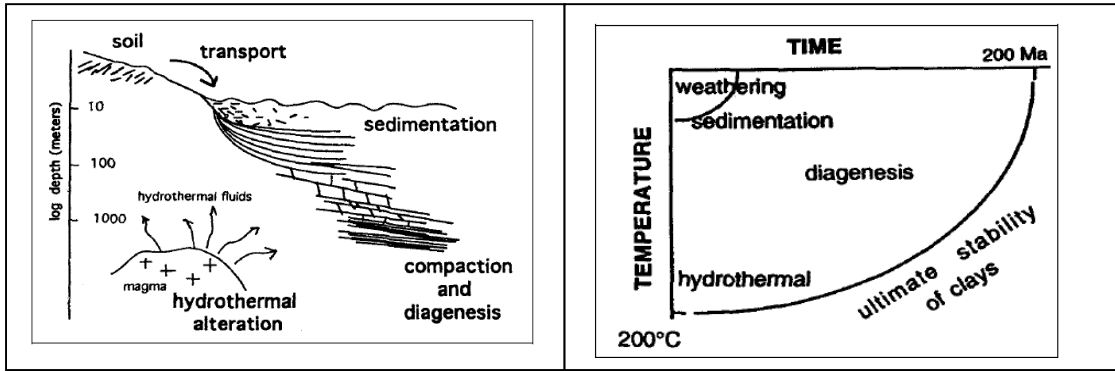


Figure I.19 : conditions de formation et de stabilité des minéraux argileux (Velde, 1995)

I.7.5 Classification des minéraux argileux :

Plusieurs critères de classification des argiles ont été adoptés par plusieurs scientifiques (Eslinger et Peaver 1988) recommandé par l’association internationale pour l’étude des argiles (AIPEA).

Les minéraux argileux sont divisés en deux grandes familles, les minéraux simples et les minéraux interstratifiés.

Les minéraux simples sont classés selon la combinaison des feuillets trois types :

- **Les minéraux argileux type T/O ou 1/1 :** les minéraux de cette famille sont composés d’un empilement de couche tétraédrique (T) et couche octaédrique (O). ils sont caractérisés par une taille de 7Å et représentés par le groupe des kaolinites.

La nature de la couche octaédrique permet de distinguer deux classes des minéraux 1/1, les minéraux dioctaédriques et trioctaédriques (Fig. I.20).

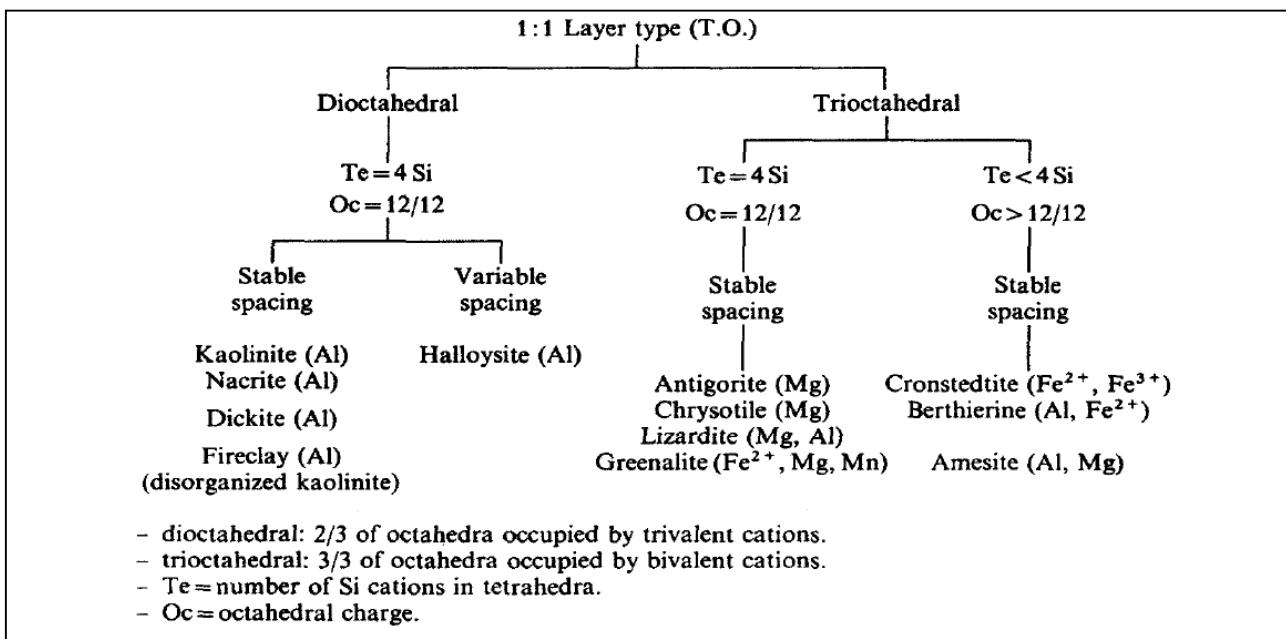


Figure I.20 : classification des minéraux argileux type T/O (1/1) (Caillière et al., 1982).

➤ **Les minéraux argileux type T/O/T ou 2/1** : ces minéraux sont composés d'une couche octaédrique (O) entourée par deux couches tétraédrique (T) où la seconde couche t est renversée para rapport à la première (Fig. I.21). Leur taille varie de 10 à 18Å°.

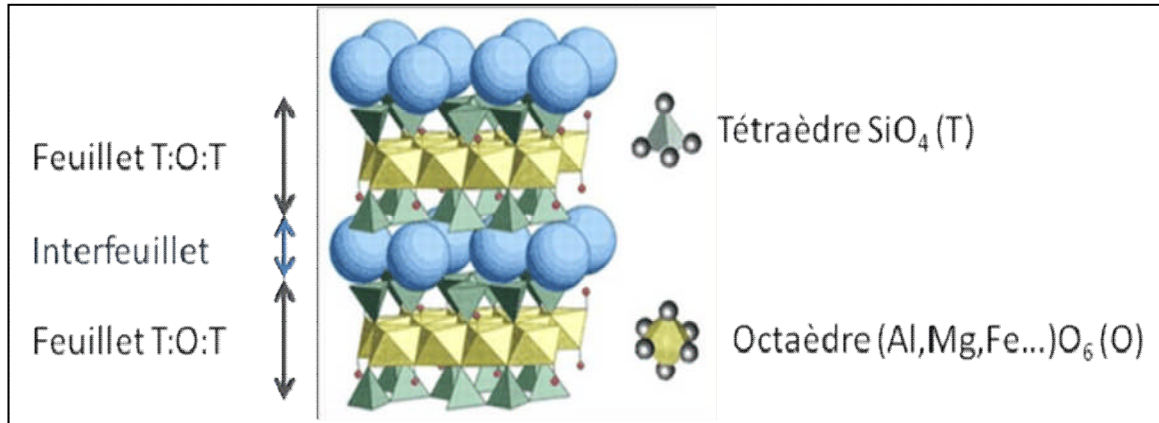


Figure I.21 : représentation schématique d'une argile type T/O/T ou 2/1

Comme la famille T/O, Les minéraux T/O/T sont aussi classés selon la nature de la couche octaédrique en deux groupes ; les minéraux dioctaédriques et trioctaédriques (Fig. I.22).

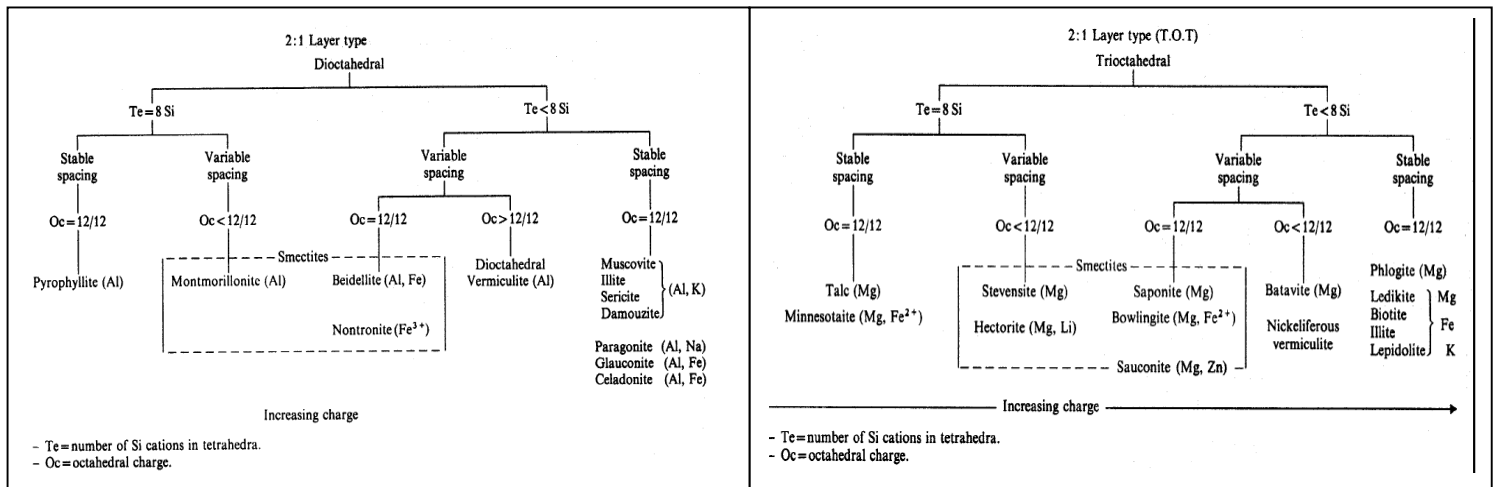


Figure I.22 : classification des minéraux argileux type T/O /T (2/1) (Caillière et al., 1982).

✓ **Les minéraux argileux type T/O/T/O ou 2/1/1** : ces minéraux sont constitués d'une couche octaédrique entourée par deux couches tétraédriques où l'espace interfoliaire est rempli par une couche octaédrique. Ils sont caractérisés par une taille de 14Å° et représentés par la grande famille des chlorites.

I.7.6 Types des argiles:

I.7.6.1 Groupe de la kaolinite : est un minéral argileux ayant une formule chimique $Al_2Si_2O_5(OH)_4$. Le mot kaolin provient du Gaoling (du chinois), lieu où on l'extrait cette argile, de Gao, élevée et ling colline. Il fait partie de la famille T/O ou 1/1 composée d'un empilement de couche tétraédrique (T) et couche octaédrique (O) avec une distance interréticulaire 7\AA .

Le groupe comprend des polymorphes kaolinite, dickite, nacrite et halloysite qui ont la même composition chimique mais une structure cristalline différente.

✓ **Kaolinite** : d'une formule chimique $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ à feuillet de taille 0.7 nm composé de deux couches, tétraédrique (T) et couche octaédrique (O) (Fig. I.23). elle ne présente aucune substitution isomorphique, puisque les charges disponibles pour la fixation de cations hydratés ne se trouvant qu'en bordure de la feuille élémentaire. Donc les liaisons entre feuillets sont très stables et ne laissent aucune possibilité de passage aux molécules d'eau (*Plumelle. C et al., 2013*). La kaolinite est fréquente dans les roches sédimentaires argileuses résiduelles ou détritiques provenant de l'altération des roches acides riches en feldspaths.

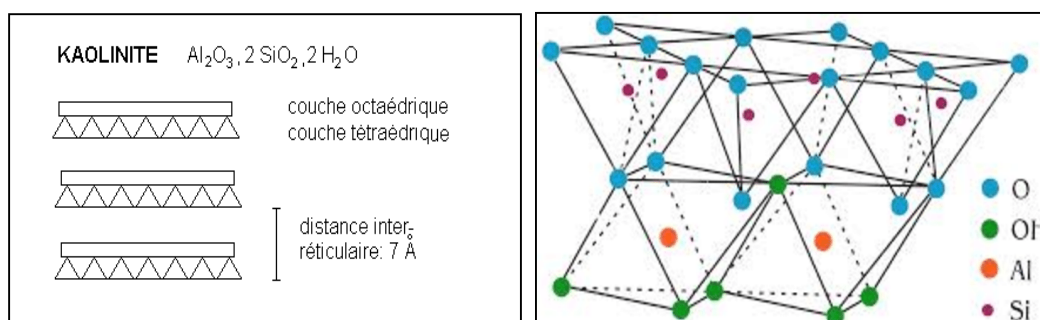


Figure I.23 : structure de la kaolinite (*Duchaufour, 1988*).

✓ **Dickite** : c'est un polytype de la kaolinite mais il est beaucoup moins répandu que la kaolinite, il le remplace à une profondeur d'enfouissement de l'ordre de 3.1 à 3.2 km et pour des températures $>110-130\text{C}^\circ$. Le nom dickite rend hommage au chimiste et métallurgiste écossais Allan Brugh Dick.

✓ **Nacrite** : il s'agit d'un polymorphe de la kaolinite ayant la même composition chimique que la kaolinite, dickite et l'halloysite mais avec un système de cristallisation monoclinique.

✓ **Halloysite** : ce minéral se présente sous forme de spirale (Fig. I.24), il se forme par l'altération de la kaolinite après l'addition des couches d'eau entre les feuillets, lorsque il se chauffe, il déshydrate irréversiblement en kaolinite.

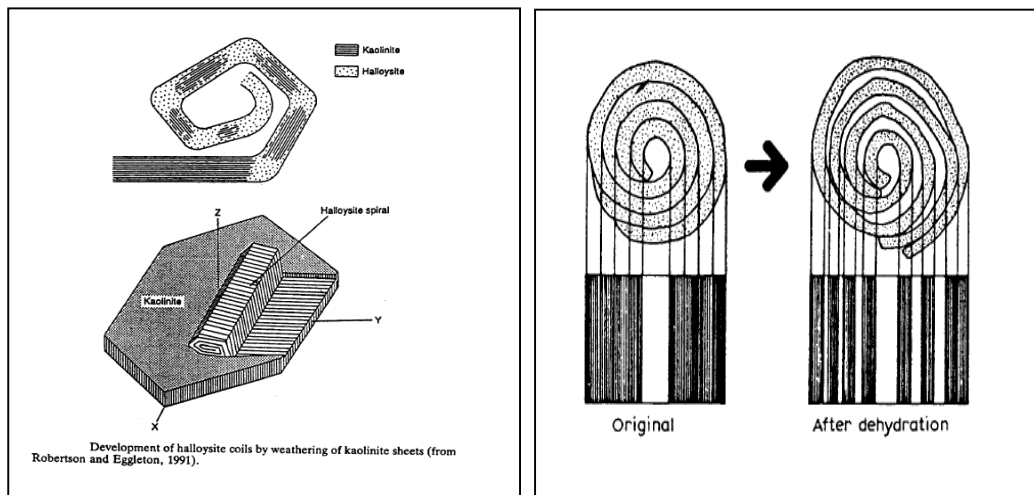


Figure I.24 : formation de l’halloysite (Manning, 1995)

I.7.6.2 Illite : c’est le minéral le plus commun des argiles, il fait partie de la famille T/O/T où le feuillet élémentaire est d’une taille de 1nm, composé de trois couches, une couche octaédrique au centre du feuillet et deux couches tétraédriques qui la recouvrent de part et d’autre (Fig. I.25). Il possède des caractéristiques minéralogiques proches de celles des micas.

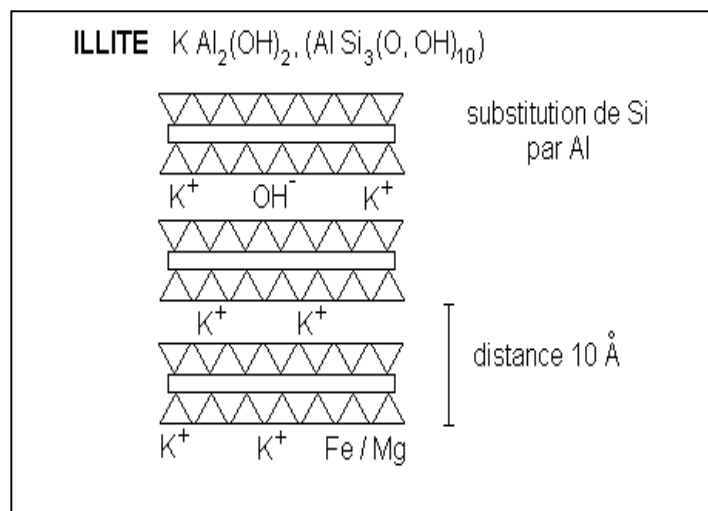


Figure I.25 : structure de l’illite (Duchaufour, 1988).

I.7.6.3 Smectite : le groupe des smectites est le plus diversifié des minéraux de la famille T/O/T, il est caractérisé par une couche octaédrique entourée par deux couches tétraédriques avec un espace interfoliaire rempli d’eau (Fig. I.26), le feuillet élémentaire a une taille de 1.4nm, valeur qui varie en fonction de la teneur en eau (Fig. I.27).

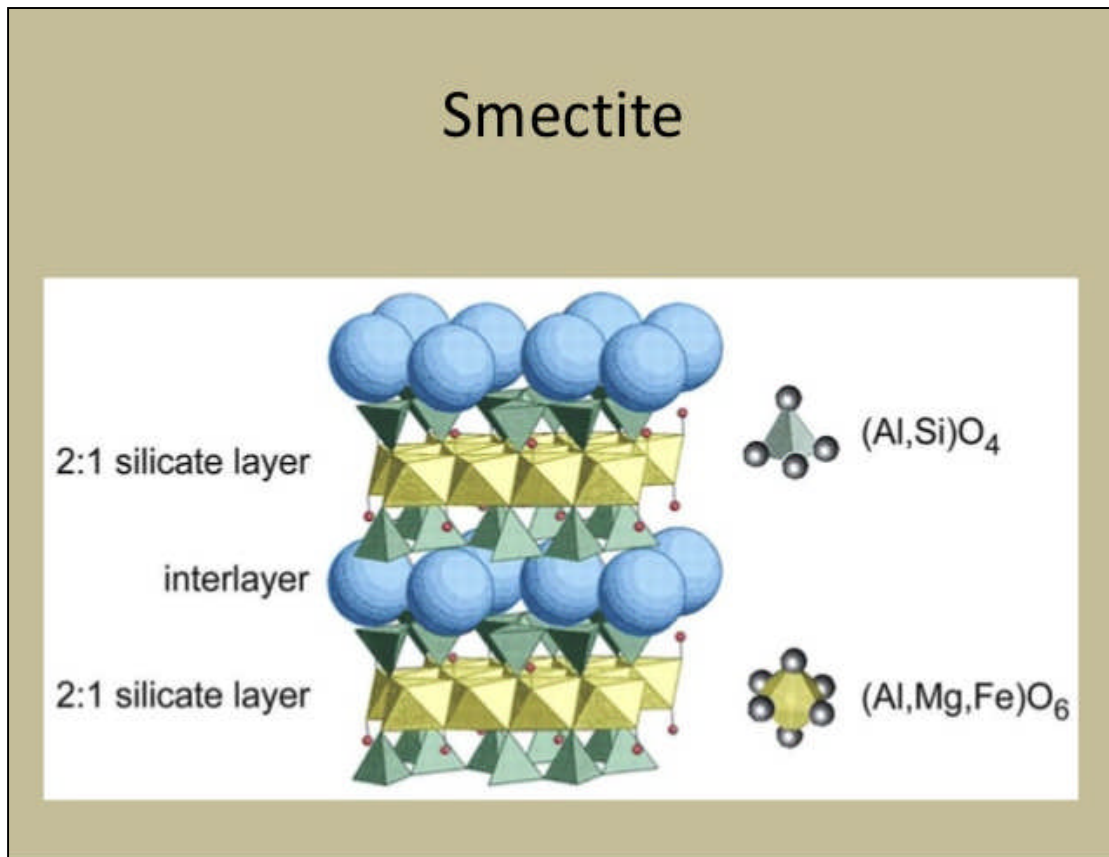


Figure I.26 : représentation schématique de la structure de smectite (*d'après* <https://www.slideshare.net/LeahBrueggeman/phyllsilicate-clays>)

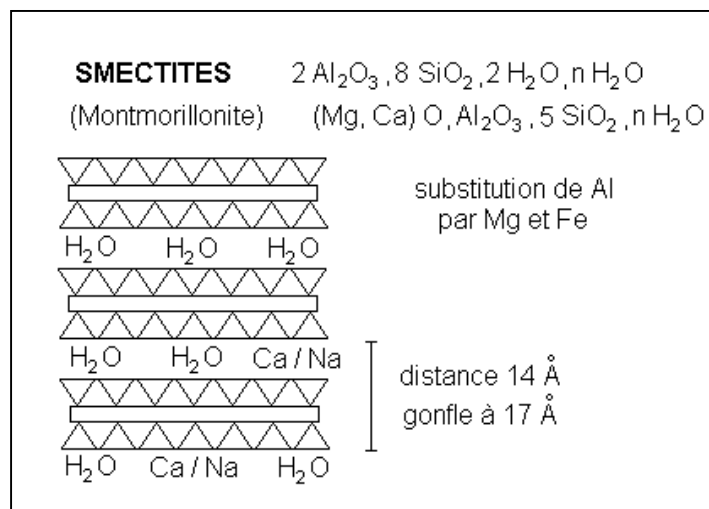


Figure I.27 : structure de la smectite (*Duchaufour, 1988*).

Les smectites se divisent en deux sous groupes et on distingue, les smectites dioctaédriques représentés essentiellement par la montmorillonite (Fig.I.28) et les smectites trioctaédriques présentés par saponite (tableau. I.1).

Pour la montmorillonite, le déficit de charge interne aux feuillets est provoqué par des substitutions de cations Al^{+3} en couche octaédrique par des cations de Mg^{+2} . Le déficit résultant est compensé par des cations hydratés échangeables tels que Na^{+2} ou Ca^{+2} qui se situent entre les feuillets, à cet effet, l'épaisseur des feuillets dépend de l'état d'hydratation (*Plumelle. C et al., 2013*).

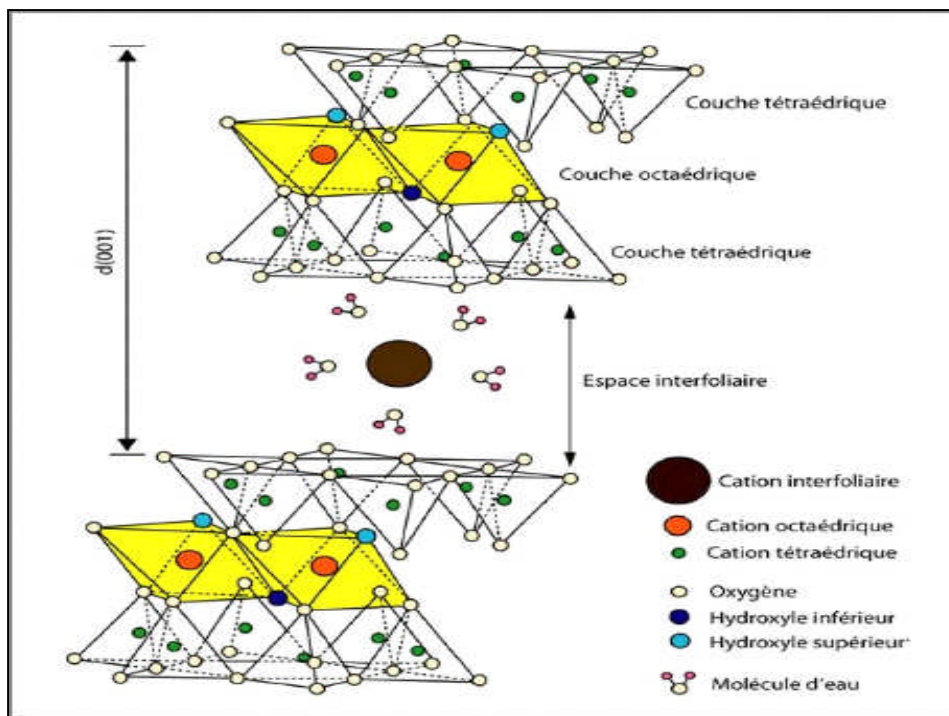


Figure I.28 : Représentation schématique de la structure d'une montmorillonite

(https://www.memoireonline.com/06/15/9140/m_Argile-et-mineraux-argileux-proprietes-physico-chimiques-et-proprietes-et-proprietes-collo4.html)

Types	Octahedral occupancy	Groups
Diocahedral smectites	Al dioctahedral type	Montmorillonite (octahedral charge), Beidellite (tetrahedral charge)
	Fe dioctahedral type	Nontronite (tetrahedral charge)
Triocahedral smectites	Al Triocahedral type	Saponite (octa and tetra charge)
	Li and F Triocahedral type	Hectorite (octahedral charge).
	Mg (Li) Triocahedral type	Stevensite (octahedral charge).
Smectites with uncommon elements	Li di-triocahedral type	Swinefordite
	Cr	Volkhonskoite
	Zn	Sauconite

Tableau I.1 : types des smectites (*Clauer et Chaudhuri, 1995*).

I.7.6.4 Chlorite : le terme chlorite ne désigne pas un minéral précis mais un ensemble des minéraux formant groupe des chlorites ayant une formule chimique $(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Al})_6 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10}(\text{OH})_8$. Les chlorites font partie de la famille T/O/T/O ou 2/1/1 avec une distance 14\AA (Fig. I.29). Ils sont caractérisés par une composition semblable à celle des serpentines mais leur structure est complètement différente. Les chlorites sont des minéraux qui se trouvent dans les roches magmatiques se produisant par l'altération de nombreux silicates ferromagnésiens particulièrement la biotite, ils sont fréquents dans les roches faiblement métamorphiques et ils font également partie des minéraux argileux.

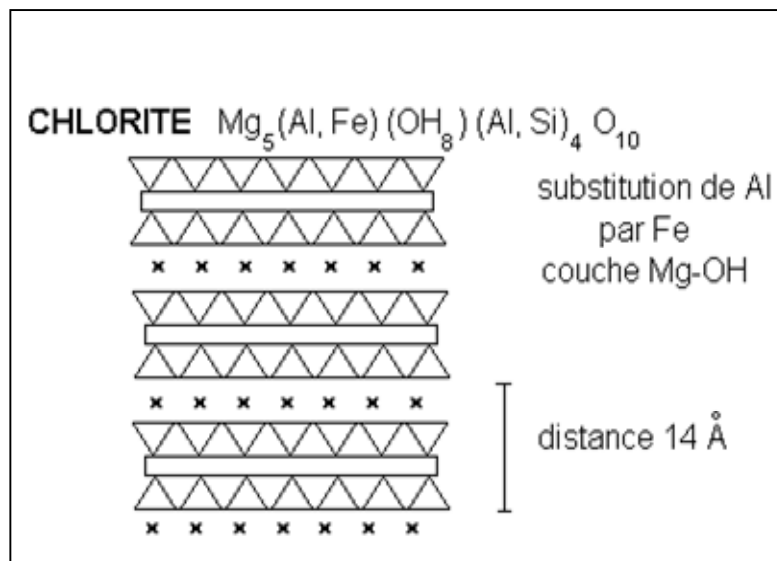


Figure I.29 : structure du chlorite (Duchaufour, 1988).

I.7.6.5 Vermiculite : c'est un minéral naturel ayant une formule chimique $(\text{Mg}, \text{Ca})_{0.7} (\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_6 (\text{Al}, \text{Si})_8 \text{O}_{22} (\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, il fait partie de la famille T/O/T ou 2/1, il est caractérisé par la présence de cations hydratés dans l'espace interfoliaire où il comprend deux couches de molécules d'eau avec la présence généralement des cations Mg ou Ca (Fig. I.30).

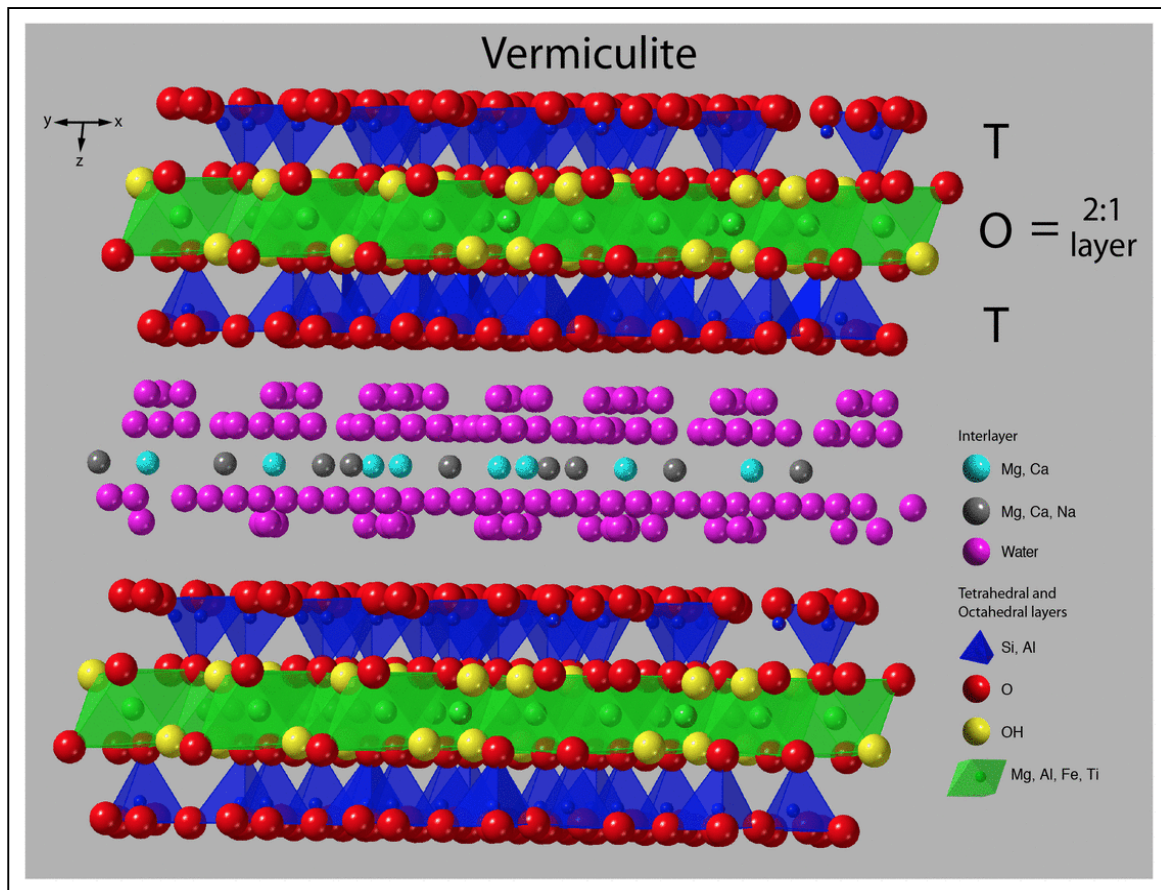


Figure I.30 : modèle de la structure de la varmiculite (*d'après*

<https://www.usgs.gov/media/images/atomic-structure-model-a-vermiculite>)

Les vermiculites sont divisés en deux sous groupes comme tous les minéraux de la famille T/O/T, les dioctaédriques qui sont généralement le résultat de l'altération des micas et les vermiculites trioctaédriques qui se produisent par l'altération des chlorites ou néoformés.

I.7.6.6 Les minéraux interstratifiés : sont formés par l'alternance plus ou moins régulière de feuillets de nature différente. Il ne s'agit pas d'un simple mélange physique des différents composés mais d'un minéral à part entière. Ces minéraux sont fréquents dans les milieux naturels mais souvent négligés car ils sont difficiles à détecter et à quantifier par la méthode DRX.

Les minéraux interstratifiés sont classés selon plusieurs critères, type de couches impliquées, le pourcentage de chaque couche et la séquence verticale d'empilement (régulier ou non) et selon ce dernier critère on distingue deux types (Fig. I.31):

- a- Les minéraux interstratifiés réguliers : ils sont constitués par des séquences répétitives des différents types de feuillets.
- b- Les minéraux inetrstratifiés aléatoires : il s'agit d'un empilement aléatoire des différents types de feuillets.

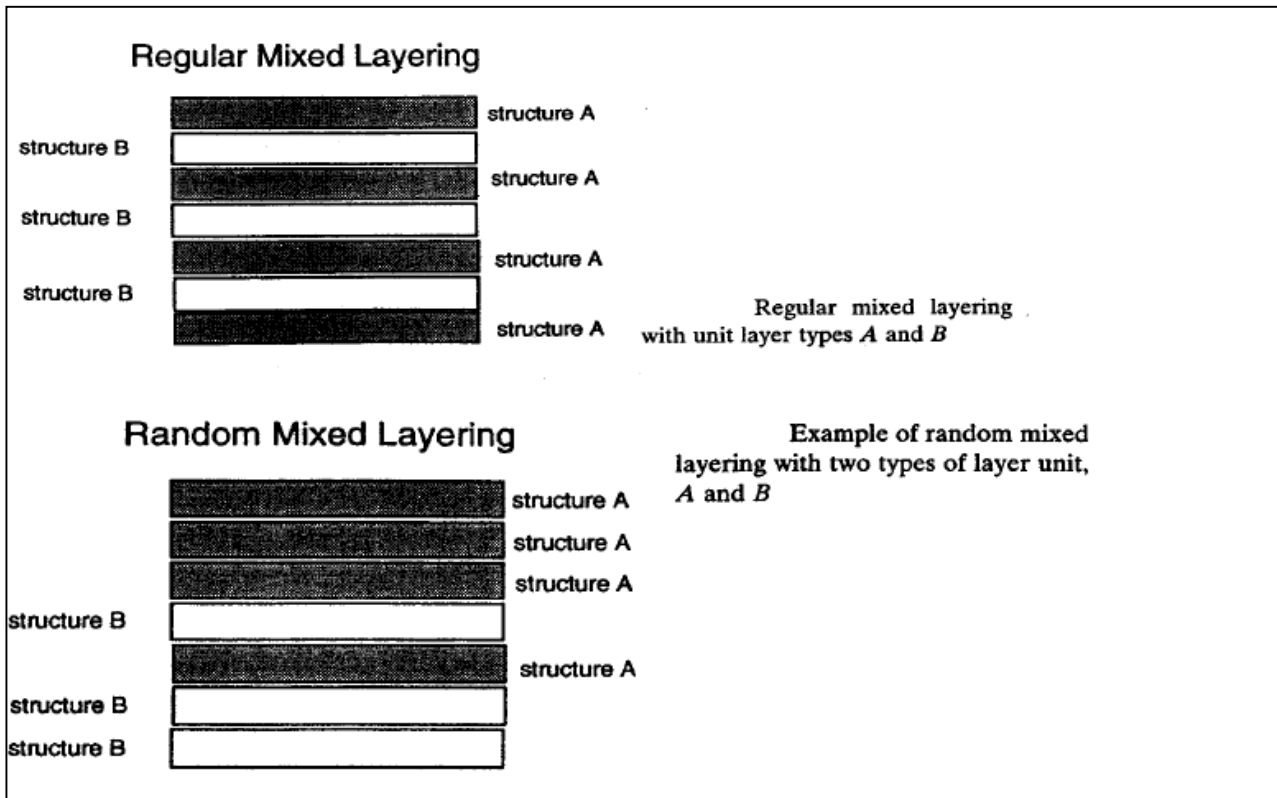


Figure I.31 : types des minéraux interstratifiés (Velde 1995).

I.7.7 Propriétés des argiles :

Les minéraux argileux sont caractérisés par des propriétés bien particulières qui sont dues à la petite taille, la structure en feuillets et la charge négative des particules (Thorez, 2003).

I.7.7.1 la surface spécifique : elle est composée de la surface externe comprise entre les particules argileuses, et la surface interne correspondant à l'espace interfoliaire (Fig. I.32).

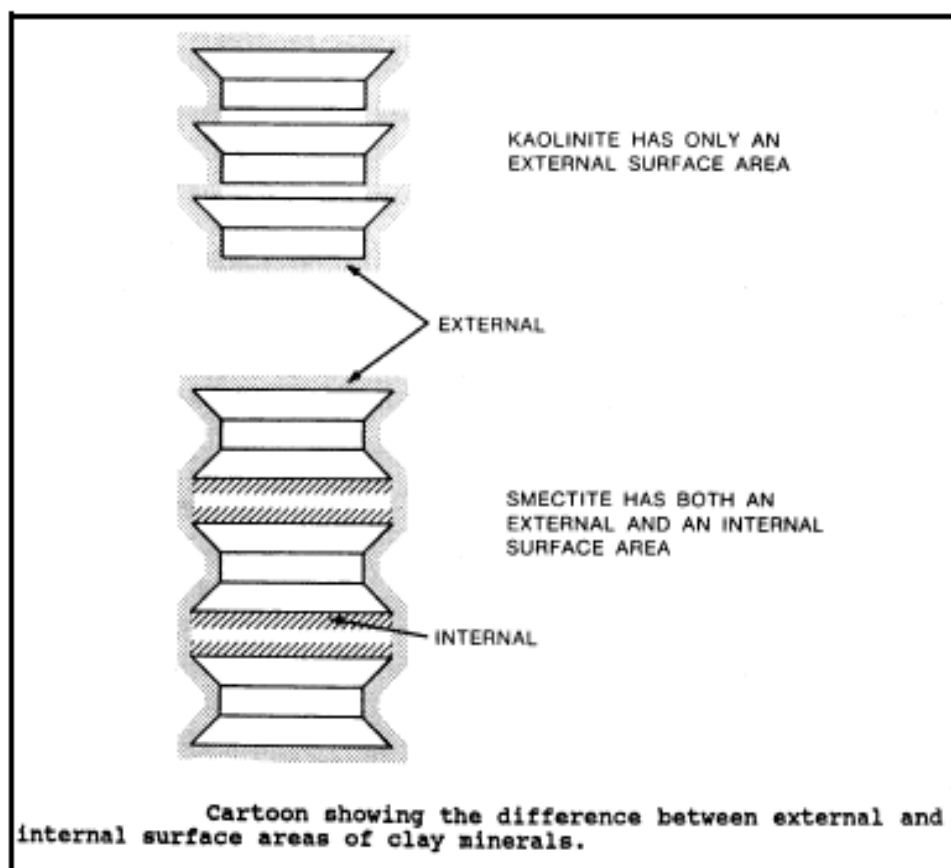


Figure I.32 : Surfaces interne et externe des particules argileuses (*Eslinger et Peaver, 1988*).

I.7.7.2 Capacité d'échange cationique : c'est la propriété des argiles de fixer certains cations contenus dans les solutions environnantes. Elle mesure la capacité d'une argile à échanger des cations et elle est exprimée en milliéquivalent par 100 grammes d'argiles (tableau. I.2).

Minéral	Surface interne (m ² /g)	Surface externe (m ² /g)	Surface totale (m ² /g)	C.E.C. (milliéquivalent/100g)
Kaolinite	0	15	15	1-10
Illite	5	25	30	10-40
Smectites	750	50	800	80-150
Vermiculite	750	<1	750	120-200
Chlorite	0	15	15	<10

Tableau I.2: surface spécifique et C.E.C. de quelques minéraux argileux (*Eslinger et Peaver, 1988*).

I.7.7.3 La capacité d'adsorption d'eau et de gonflement : c'est la capacité de certains minéraux d'incorporer dans leur structure des molécules d'eau qui vont provoquer une augmentation sensible

du volume par rapport à l'épaisseur fondamental à sec (*Thorez, 2003*), ce sont les minéraux gonflants comme les smectites. Au contact de l'eau, les smectites passe d'une valeur de 14-15 Å à une valeur de 17Å.

I.8 Conclusion:

En conclusion de ce premier chapitre dédié aux généralités sur la région d'étude, il est évident que cette zone géographique présente un éventail riche et diversifié de caractéristiques naturelles, culturelles et économiques.

L'examen de la géographie physique a mis en lumière les variétés des reliefs, des climats et des ressources naturelles qui définissent le paysage régional.

La wilaya de Constantine occupe une place prépondérante en Algérie, étant à la fois un point de convergence entre l'Est et le Centre du pays, ainsi qu'entre le Tell et les hauts plateaux de l'Est. Elle se trouve dans le nord-est de l'Algérie, à environ 350 km d'Alger.

Le relief de la région de Constantine est complexe, résultant de plusieurs phases tectoniques. La présence de plusieurs nappes de charriage, telles que la nappe numidienne, le flysch massylien, la nappe tellienne et la nappe néritique Constantinoise, joue un rôle majeur dans sa formation.

Le climat de la région de Constantine peut être défini comme méditerranée avec un hiver froid et humide dont la ville est parfois exposée aux chutes de neige, et un été sec et chaud.

Les précipitations annuelles moyennes sont de 469 mm dont le mois le moins pluvieux est le mois de juillet et les mois les plus pluvieux sont Janvier et décembre.

La moyenne pluviométrique annuelle varie de 500 à 800 mm/an, les précipitations sont très variables en allant du Nord au Sud.

Par ailleurs, l'analyse pluviométrique a mis en évidence la variabilité saisonnière des précipitations, soulignant l'importance de comprendre ces variations pour la gestion durable des ressources en eau et l'atténuation des risques liés aux événements climatiques extrêmes (inondation).

Les conditions topographiques particulières ont également une incidence notable sur la distribution de la végétation, créant des écosystèmes diversifiés d'où la région abrite de superbes zones boisées, principalement au nord, dans les massifs de Djebel El Ouahch et Chettaba, ainsi que la forêt de chênes des Mouïss au pied de Djebel Sidi Idriss.

En ce qui concerne la sismicité, la région se trouve dans une zone soumise à une activité tectonique notable dont elle a connu trois événements importants qui ont atteint ou dépassé la magnitude de 5 qui se sont produits près de la ville de Constantine ce qui souligne l'importance cruciale de la prise en compte de ces risques dans tout projet d'aménagement ou de développement.

DEUXIEME CHAPITRE

CONTEXTE GEOLOGIQUE

II.1. Aperçu sur la géologie du nord Algérien:

II.1.1-Introduction:

La zone d'étude fait partie de la chaîne des Magrébides qui constitue un tronçon de l'orogénèse Alpin périméditerranéen datant du Tertiaire. Cette chaîne s'étend d'Ouest en Est sur 2000Km, depuis l'Espagne du Sud à l'arc calabro-sicilien (*Durand-Delga 1969*).

En Algérie du Nord, la chaîne des Magrébides est structurée en trois grands domaines : le domaine interne au Nord, le domaine des flyschs, et le domaine externe au Sud (*Durand Delga et Frontboté, 1980*) (Fig. II.1 et II.2).

II.1.2. Le domaine interne ou Kabyle :

Il est représenté par les massifs anciens ou cristallins appelé socle Kabyle ou Kabylide, formés principalement de roches métamorphiques (gneiss, marbres, phyllades et amphibolites) bordés à leurs partie méridionale par les formations de couverture en écailles appelée chaîne calcaire ou Dorsale Kabyle (*Durand Delga, 1967*).

Au cours de l'orogénèse alpine, le socle et la dorsale kabyle ont été largement charriés vers le sud sur le domaine des flyschs.

a. Le socle Kabyle:

C'est l'essentiel du domaine interne. Il affleure d'Ouest en Est dans les massifs du Chenoua (à l'ouest d'Alger), d'Alger, de Grande Kabylie et de Petite Kabylie (entre Jijel et Skikda) où il constitue le plus large affleurement du socle kabyle en Algérie avec 120 km de long et 30 km de large.

Le complexe métamorphique de grande Kabylie est une entité formée d'un ensemble de noyaux gneissique recouvert par une série schisteuse (*Bossière, 1980*).

La série schisteuse présente deux zones :

- ✚ une zone à chlorite sommitale ;
- ✚ une zone à séricite basale.

Les massifs de socle sont revêtus d'une couverture sédimentaire Paléozoïque fossilifère souvent peu ou pas métamorphique et par endroits recouvert en discordance par des dépôts détritiques (principalement mollassique) d'âge Oligocène supérieur – Miocène inférieur, appelés Oligo-Miocène Kabyle.

b. Dorsale kabyle ou chaîne calcaire :

Elle est représentée par des terrains variés principalement carbonatés (calcaire) d'âge Liasique à Eocène moyen (*Raoult. J.F, 1975*).

En général, la dorsale kabyle est caractérisée par un style tectonique en écaille. Ces écailles comprennent également des formations paléozoïques ainsi que des terrains de l’Eocène supérieur et de l’Oligocène. Cette chaîne calcaire est subdivisée du nord vers le sud en trois unités plus ou moins individualisées et caractérisées par leur lithostratigraphie respective (*Raoult. J.F, 1974 ; Villa. J.M, 1980*) :

- la dorsale interne ;
- la dorsale médiane ;
- la dorsale externe.

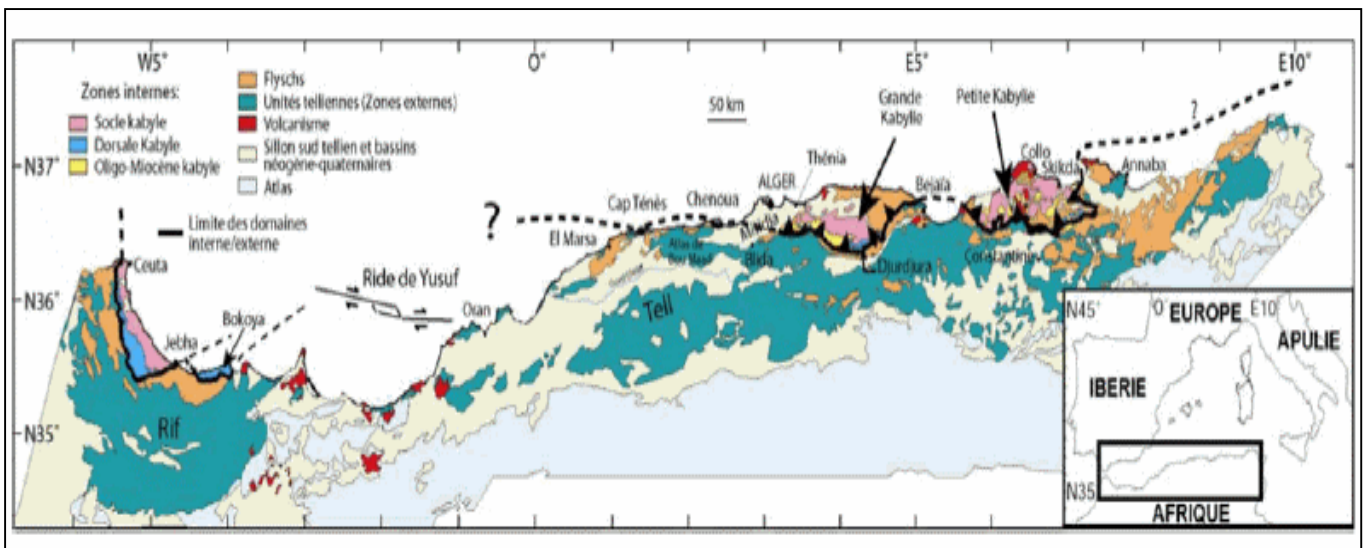


Figure II.1 : Position des différentes unités géologiques des Maghrébides (*Wildi, 1983 ; Domzig et al., 2006*).

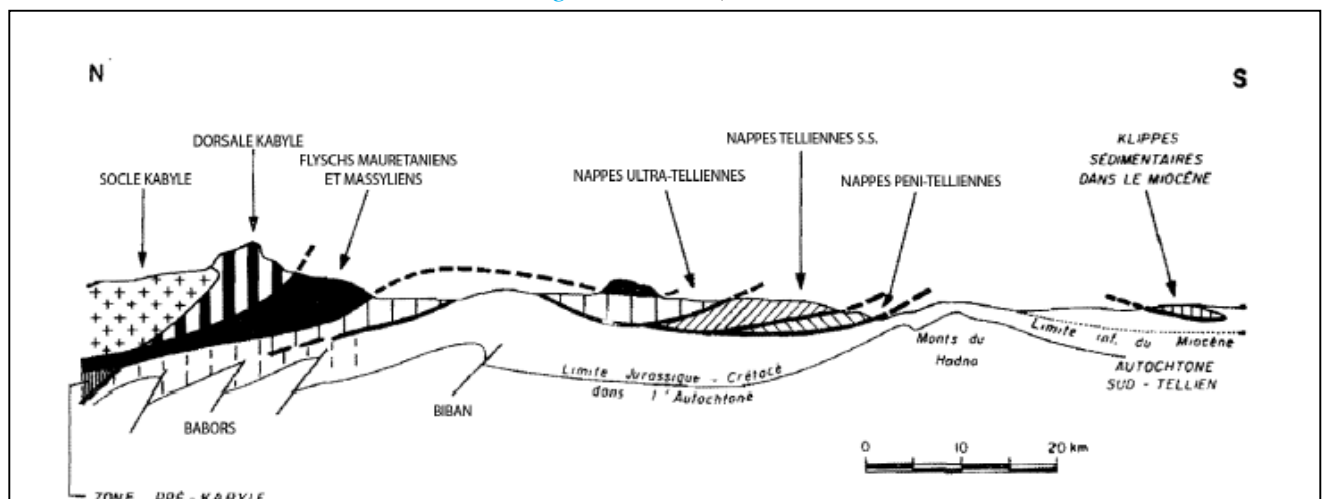


Figure II.2 : Coupe Nord – Sud du Nord de l’Algérie montrant les différentes unités de la chaîne des Maghrébides (*Durand Delga, 1969*).

- **Dorsale interne :**

La dorsale interne occupe une place importante dans l'évolution tectono-sédimentaire, elle est considérée comme une paléo-plate forme littorale kabyle. Elle est très souvent condensée et montre nettement du sud au nord un amincissement de ces séries ou lacunes.

Cette dorsale est caractérisée par une série transgressive sur le substratum paléozoïque, elle débute par des microconglomérats du Permo-Trias, un Trias supérieur et un lias basal à calcaire néritiques et des calcaires Néocomiens suivi par une lacune jusqu'au Sénonien supérieur et un Paléocène – Yprésien formé de calcaires du Nummulitique II.

- **Dorsale médiane :**

C'est la plus développée de la dorsale kabyle (*Flandrin. J 1952*) et occupe une position centrale dans le dispositif structural du Djurdjura.

Elle est particulièrement déformée et limitée au nord par le socle cristallin et les terrains primaires de la dorsale interne par l'intermédiaire d'une zone tectonique importante, Au sud elle chevauche les formations de la dorsale externe. Elle est aussi caractérisé par un Lias inférieur très développé et ne montre pas en générale de différence avec celui de la dorsale interne.

- **Dorsale externe :**

Elle est chevauchée par les formations de la dorsale médiane. Elle se caractérise par une série, du Crétacé à l'Eocène, détritique et lacuneuse avec un faciès intermédiaire entre la dorsale interne et médiane.

II.1.3. Domaine des flyschs :

Il se compose de nappes de flyschs avec une dominante carbonatée plissées, écaillées et décollé de son substratum initial (*Bouillin J.P, 1986*).

Il se présente en position soit supra kabyle sur les massif des socles, soit infra kabyle le long d'une bande continue au sud des massifs des socles qui les chevauchent (Fig. II.3).

Cet ensemble est d'âge allant du Néocomien à l'Eocène, il chevauche largement le domaine externe, du Nord au Sud on distingue deux types principaux de flyschs : le flysch mauritanien et le flysch massylien (*Bouillin et al, 1970*).

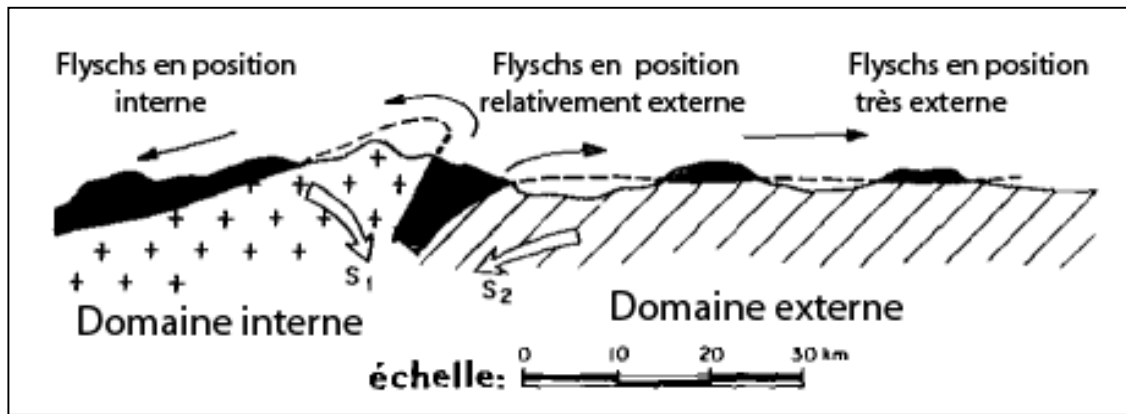


Figure II.3: Position des nappes de flysch par rapport aux unités de la chaîne des Maghrébides (*Durand-Delga, 1969*).

II.1.3.1 Le flysch mauritanien :

Relativement épais et occupe une position interne dans le domaine des flyschs, il présente de bas en haut (*Bouillin J.P, 1986*):

- des marnes grises et de turbidités calcaires allant du Thitonique au Néocomien.
- Un ensemble de grés, c'est le faciès Guérrouch, attribué à l'Albo-Aptien,
- Un Cénomanién microbréchiqúe à bandes silicifiées blanches et localement des passés de phtanites rouges attribuées au Cénomanién supérieur ;
- Un Sénonien à calcaire microbréchiqúe riches en quartz ;
- Des conglomérats puis des grés d'âge Eocène à Oligocène au sommet.

II.1.3.2 Le flysch massylien :

Il occupe une position externe dans le domaine des flyschs, il s'agit d'un ensemble de formations allant du Crétacé inférieur au Lutétien (*Raoult. J.F, 1969*) :

- Périto-quartzitique à niveau de phtanite d'âge Crétacé inférieur ;
- périto-microbréchiqúe d'âge Cénomanién- Sénonien ;
- des marnes rouges Lutétiennes.

II.1.3.3 Le domaine ou le flysch numidien :

Il constitue une nappe indépendante d'âge Oligocène supérieur à Miocène inférieur et recouvre indifféremment toutes les unités de cet édifice et comprend (*Coiffait P.E. ; 1992*):

- des argiles sous-numidiennes (Oligocène supérieur) ;
- des grés numidiens en bancs (Aquitanién -Burdigalién inférieur) ;
- des argiles et des marnes claires à silexite « supra-numidienne » (Burdigalién inférieur).

Ce flysch constitue structurellement la nappe la plus haute de l'édifice Alpin (*Lahonder, 1987*).

II.1.4 Domaine externe:

Segment de la marge septentrionale de l'Afrique caractérisé par des nappes superficielles Crétacé-Paléogènes à matériel marno-calcaire (Fig. II.4), charriés pendant le Miocène inférieur vers le sud sur un parautochtone représenté par des calcaires du Jurassique.

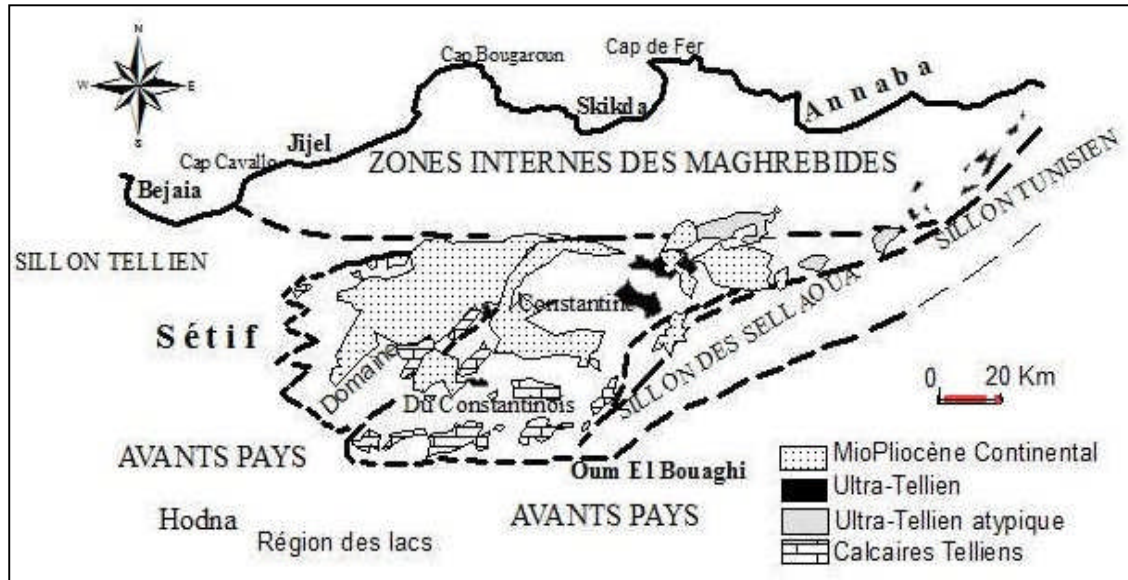


Figure II.4 : Carte-schématique-illustrant-la-repartition-des-différents-domaines-paléogéographiques en détaillant le domaine externe (*Lahondère. J.C, 1977*).

Paléogéographiquement du Nord vers le Sud, on distingue (*Delga. D, 1969; Raoult J.F., 1974; Bouillin, 1977; Villa. J.M., 1980*):

- Les séries ultra-telliennes ;
- Les séries telliennes sens strict ;
- Les séries pénitelliennes.

a. Les séries ultra- telliennes :

Elles forment un ensemble particulièrement homogène qui comporte un Crétacé marneux et un Eocène caractérisé par des marnes sombres avec intercalations de calcaire à silex noir. Ces séries n'affleurent de façon notable qu'à l'Est du Djebel Sidi Driss (*Raoult. J.F., 1968*) puis se développent au djebel Bou Sbaa au nord du Guelma (*Villa J.M., 1968*).

Dans ces unités, y est représenté le socle cristallin du Djebel Edough « massif cristallin externe » de l'Est de l'Algérie alpine.

b. Les séries telliennes sensu stricto :

Elles vont du Trias au lutétien avec des variations de facies. A un Lias de plateforme succèdent un Dogger et Malm marneux, le Cétacé d'abord détritique devient marneux à

argilo-calcaire, l'Eocène se caractérise par des marnes épaisses et l'yprésien est calcaire. Ces séries sont groupées en cinq unités :

- les nappes Baboriennes (*Obert. D., 1981*) ;
- les unités Bibaniques (*Caire. A., 1957; Leikine, 1971*);
- les nappes de Djemila, béni Abdallah, Barbacha, Dra el Arba.
- les unités Gouraya, Arablou, Brek (*Obert. D, 1981*).
- les nappes Sétifiennes à matériel Éocène (*Leikine. M., 1971; Obert. D., 1981*).

c. Les séries péni-telliennes et leur couverture Eocènes à Nummulites (*J.M.Villa, 1977*) :

Les formations péni-telliennes, sont à faciès néritique prépondérant, d'âge Crétacé supérieur à Eocène. Dans l'Est algérien ces séries montrent de grandes affinités avec l'unité néritique constantinoise et les unités Sud-Sétifiennes.

Les séries péni-telliennes assureraient la transition entre le faciès néritique constantinois et les faciès septentrionaux plus profonds d'affinité Bibanique (*Kazi Tani. M.N., 1986*).

II.1.5 - L'avant- pays allochtone :

Il présente plusieurs types de séries différenciées, allant du Trias supérieur au Crétacé et à l'Eocène. Ces séries localement écaillées supportent les nappes telliennes au Nord et surmontent l'autochtone Nord Aurésien. Selon (*Villa. J.M, 1980*) on distingue deux organisations :

II.1.5.1- L'organisation Sétifiienne :

Ensemble assez homogène formé de séries qui ont un caractère « de plate forme subsidente » datés du Jurassique inférieur jusqu' à l'Eocène. Ce sont les massifs qui apparaissent en fenêtre sous les nappes telliennes septentrionales ; situés au Nord-Ouest (Dj.Guergour et Dj. Annini) et au Sud de Sétif (Dj. Zdimm, Dj. Yousef et Dj. Braou), et en demi-fenêtre sur la bordure Nord des Monts du Hodna (Dj. Sékrine, Dj. Kalaoun...) et au Nord des Monts de Bellezma (Dj. Zana, Dj. Mestaoua, Dj. Guedmane...).

II.1.5.2- L'organisation constantinoise :

Elle regroupe le môle néritique constantinois et le sillon écaillé de Sellaoua situé plus au sud (Fig. II.5).

*** Le môle néritique constantinois :**

C'est un ensemble de formations carbonatées du Mésozoïque, chevauchant les écaillés de Sellaoua et les unités Sud-sétifiennes (*Vila. J.M, 1980*). Seules des cassures et des

plissements à grand rayon de courbure ont caractérisé les déformations de ces reliefs calcaires lors des phases tectoniques alpines. Ces derniers constituent l'essentiel des massifs de Tadjenanet, d'Oued Athménia, de Constantine, d'Ain M'lila, d'Hammam Meskhoutine et de Guelma.

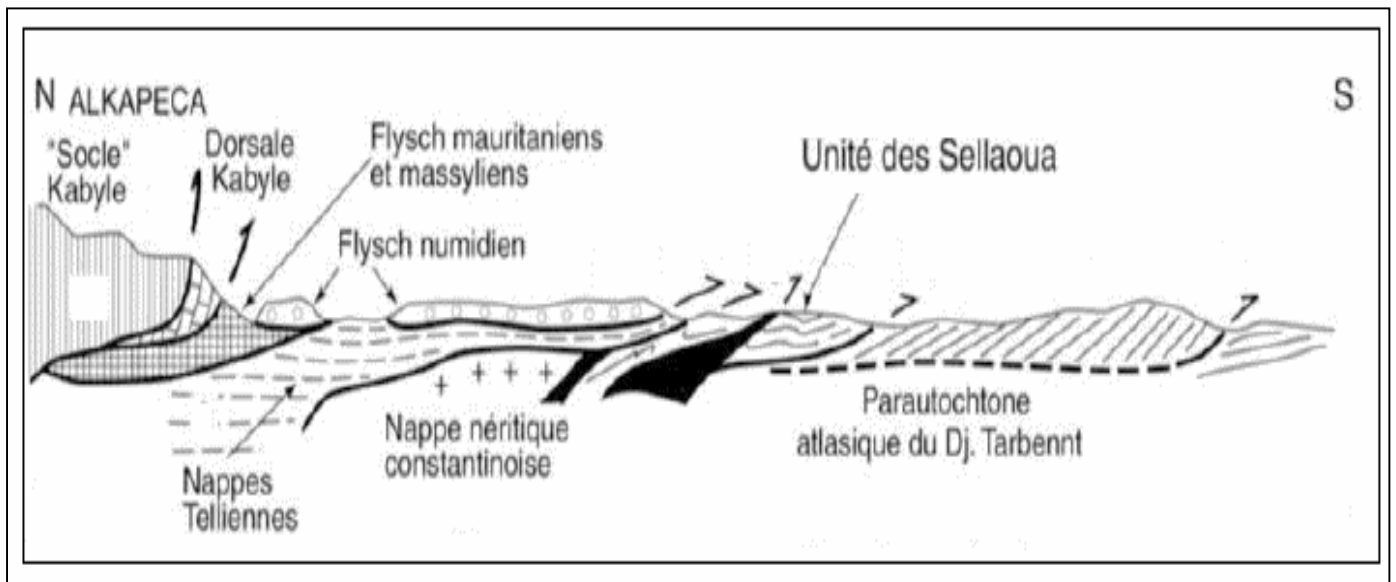


Figure II.5 : coupe générale synthétique des Magrébides de l'Est Algérien (région de Constantinois) (*Lahondère. J.C, 1977*).

*** Le sillon écaillé de Sellaoua :**

Il est représenté par des formations allochtones à sédimentation argilo-marneuse et marno-calcaires allant du Valanginien à la fin du Maestrichtien. Les plissements dateraient de l'Eocène supérieur, les écaillages et les chevauchements du Tortonien. Les contacts de base des écailles sont injectés par des évaporites.

II.1.6 L'avant pays autochtone :

C'est un vaste domaine comprenant d'Ouest en Est les monts du Hodna, de Belezma, des Aurès et du Mellègue et plus au Sud, la vaste zone de diapirs représentée par les djebels d'El Ouasta, d'Ouenza-Boukhadra, de Mesloula, etc...

La sédimentation y est resté homogène à faciès de plate forme subsidente envahie par une sédimentation gréseuse qui débute au Berriasien et se termine à l'Albien (*Villa. J.M, 1980*). Les formations ont conservé des structures plissées acquise de la tectonique fini-éocène ou «Phase atlasique»: Cet autochtone est bordé au Nord par une marge particulièrement accidenté marquée par des phénomènes tectoniques alpins importants (écaillage, renversement de séries...) définissant ainsi des éléments parautochtones et délimitant le « front sud Sétifien» de l'édifice Alpin.

II.2 Aperçu sur la géologie de la chaîne numidienne:

II.2.1 Introduction:

Le numidien constitue pour divers géologues une énigme géologique, d'une part par la masse et la répartition considérable des grès numidiens et d'autre part sur sa provenance en Méditerranée occidentale où il reste un sujet controversé qui est considéré comme un obstacle sur la compréhension de ce système de dépôt répandu dans la région (*Thomas. M.F.H, 2010*) notant la difficulté d'expliquer l'hétérogénéité de la séquence numidienne (*Moretti. E et al, 1991*) représenté par l'alternance des argiles (formation fine) et des grès (formation grossière).

De nombreuses études multidisciplinaires sur les formations numidiennes ont été menées dans la région méditerranéenne mais très peu en Algérie, où elles se réfèrent principalement à la géologie régionale et se limitent généralement aux données géologiques générales (*Menzoul. B, 2023*).

Bernard HOYEZ (1989) dans sa thèse (le numidien et les flyschs Oligo-Miocènes de la bordure sud de la méditerranée occidentale) a donné une grande importance à ce domaine où il a détaillé les flyschs numidiens des cordières Bétiques jusqu'au Apennins passant par le Rif, Tell Algéro-tunisien et la Sicile septentrionale (Fig. II.6).

Cette étude inclue aussi des résultats sur la paléo-environnement et la provenance du matériel détritique (*Menzoul. B, 2023*).

L'étude réalisée par Moretti et al, 1991, est considérée comme la première étude sédimentologique en Algérie concernant le numidien (dans la région de Constantine) y compris les résultats détaillés sur la pétrographie et les processus de dépôts.

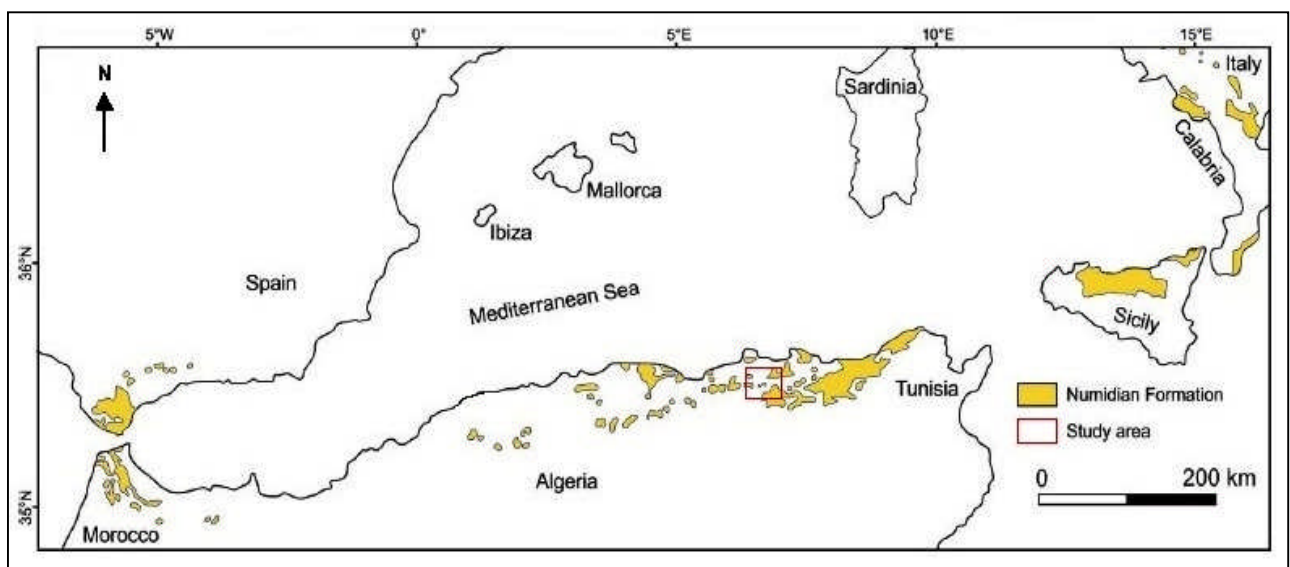


Figure II.6 : carte de la répartition des flyschs dans le bord Sud de la méditerranée occidentale (*Hoyez. B, 1989 cité en Menzoul. B, 2023*).

Le numidien est considéré comme une pierre angulaire sur laquelle se fonde toute reconstitution de l'histoire de la méditerranée occidentale (*Hoyez, B, 1980*).

Le numidien a été utilisé pour la première fois et baptisé par *E. Ficheur 1890*, d'après lui, le terme numidien désigne une chaîne qui s'étend sur plus de 2500 km de long de l'Andalousie jusqu'à la Calabre passant par le Rif, le tell Algérien, la Tunisie septentrional et la Sicile, cette chaîne est située au sud des zones internes et superposée aux zones externes (*Chouabbi, A, 1987*).

Les flyschs numidiens en Algérie est constitués principalement de dépôts de grès et de mudstone turbiditiques de la mer profonde, d'âge Oligocène supérieur à Burdigalien inférieur (*Raoult, 1974 ; Hoyez, 1989 ; Moretti et al., 1991*). Ces flyschs font partie du domaine magrébin qui est considéré comme un orogène de type alpin résultant de la fermeture de la partie magrébine de l'océan Thétys (*Wildi, 1983*).

Ce dernier qui est considéré comme un bassin d'avant pays (Fig. II.7), vestige de l'océan néo-Thétys dans la partie occidental du bassin méditerranée (Thomas et al.2010).

Donc il était situé dans le domaine paléo-Thétys occidental qui est bordé au nord par un prisme d'accrétion et au Sud par la marge passive africaine (*cité en Menzoul, B, 2023*).

Le bassin des flyschs magrébin (MFB) a été ouvert après l'éclatement de la Pangée lors de la transition Jurassique –Crétacé (*Wildi, 1983*). La sédimentation des flyschs numidiens a été arrêtée à la fin du Burdigalien (16-15 Ma) hormis pour les Apennins et la Sicile où elle a continué jusqu'au Langhien (*cité en Menzoul, B, 2023*).

Le premier événement tectonique compressif ne s'est produit qu'à la fin de l'Eocène (*Raoult, 1968 ; Boullin, 1977 ; Wildi, 1983*). Traditionnellement, cet événement tectonique a été interprété comme c'est le résultat de la collision des terrains d'ALKAPECA et la marge africaine (*cité en Frizon De Lamotte et al., 2000*). Par contre, *Vergés et Sàbat (1999)* ont considéré que l'accrétion d'ALKAPECA en Afrique est beaucoup plus tardive (*cité en Frizon De Lamotte et al., 2000*). C'est qu'au début de Langhien (15Ma), où les kabyliques ont commencé leur accrétion vers l'Afrique.

Donc la sédimentation du numidien présente l'évolution de la partie externe du bassin magrébin contemporaine de l'ouverture de la méditerranée occidentale (*Chouabbi, A, 1987*).

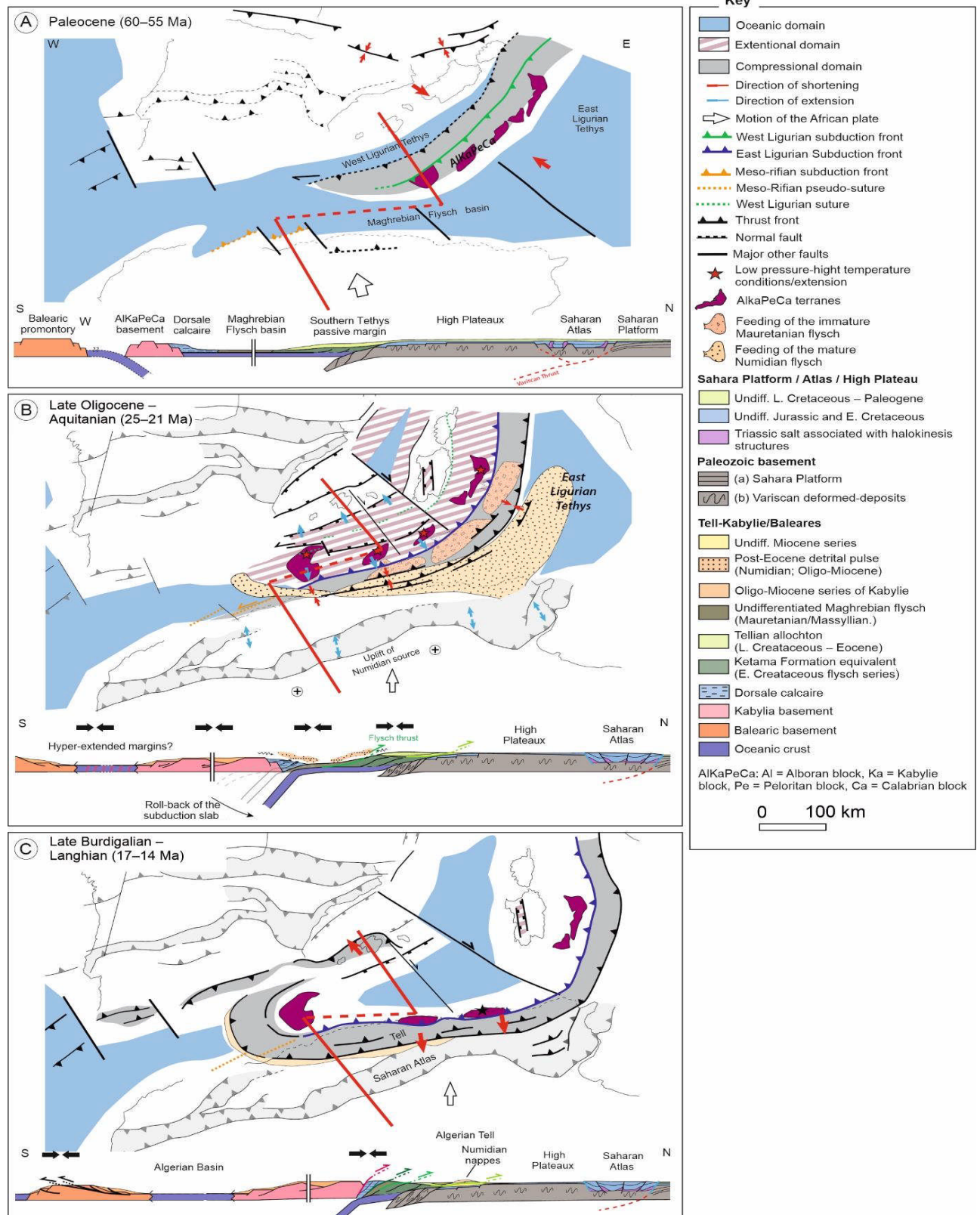


Figure II.7 : reconstitution paléogéographique du Paléocène au Burdigalien supérieur avec coupe simplifiée du bassin Magrébin. A : Paléogène (60-55 Ma), B : Oligocène supérieur – Miocène inférieur (25-21 Ma) C : Burdigalien supérieur Langhien (17-14 Ma) (*Lepretre et al., 2018 modifié, cité en Menzoul. B, 2023*).

II.2.2 les différents termes du numidien:

Les formations numidiennes ont été déposées dans un grand sillon orienté E-W, cette série a été considérée comme discordante sur les niveaux antérieurs (*Raoult, J.F, 1974*) et elle comporte l'ensemble des termes appelés d'après Hoyez trois membres (membre basal, membre médiane et membre sommital) (Fig. II.8), stratigraphiquement liés de bas en haut : des argiles à Tubotomaculum dites sous numidiennes d'âge Oligocène supérieur (*Coiffait, 1992., Raoult, 1974*) puis une épaisse formation gréseuses d'âge Aquitanien-Burdigalien et enfin des argiles et des marnes claires à silexite « supra-numidienne » (Burdigalien inférieur).

Le style tectonique de l'unité numidienne est avant tout le reflet de sa composition lithologique : une puissante masse gréseuse repose sur un matelas plastique d'argiles sous numidienne (*cité en Wildi, 1983*).

II.2.2.1 Les argilites sous numidiennes (à Tubotomaculum) :

Ce sont des argiles varicolores, le plus souvent avec une teinte gris-verdâtre mais parfois elles se trouvent avec une teinte rouges et violacé dans la région de Constantine (*Coiffait, 1992*). La chose remarquable est l'aspect schisteux qui caractérise fréquemment ces formations d'où vient le terme argilite.

II.2.2.2 Les grès numidiens :

Ils sont considérés comme l'élément fondamental de la série (*Raoult, 1974*), il s'agit des grès massifs en bancs métriques, à grains grossières, et une couleur blanc-jaunâtre. Ils se trouvent parfois à dragées de quartz. Cette série est presque identique et ne présente aucune variation de la Calabre à l'Est à l'Andalousie à l'Ouest (*Coiffait, 1992*). Dans la région de Sidi Affif, à l'Est de Constantine, la barre de grès grossiers de faciès numidien est datée de l'Oligocène terminal (*Vila. J.M et al., 1995*).

II.2.2.3 Les formations supra-numidienne :

Il s'agit du terme terminal de la série numidienne, elles sont représentées par des argiles, marnes et silexites « supra-numidienne » et localement à Hammam Meskhoutine par des grès grossiers à dragées de quartz (*Chouabbi. A, 1987*).

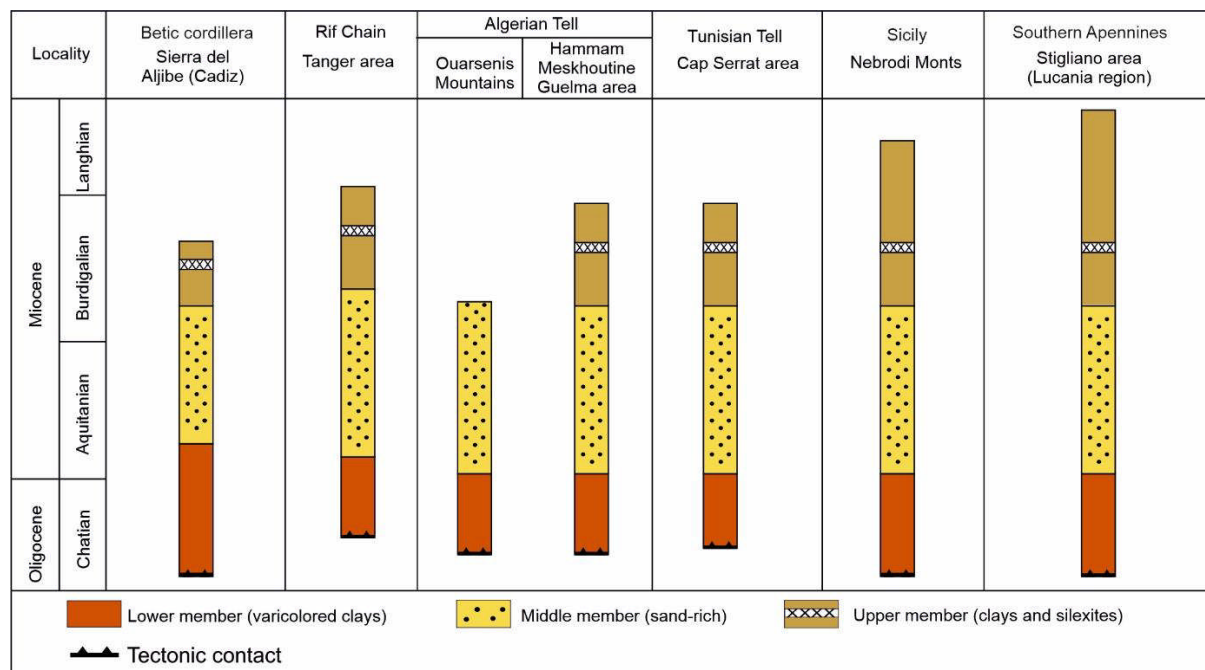


Figure II.8: chrono-stratigraphie des principales successions numidiennes en Méditerranée
(*Guerrera, 2012 modifié Menzoul. B, 2023*).

II.2.3 Origine (provenance) des sables numidiens:

Comme on a dit précédemment que le numidien est considéré comme une énigme pour divers géologues qui a suscité l'intérêt de beaucoup d'entre eux où ils sont parfois arrivés à des résultats contradictoires (*Parize, O et al., 1986*) particulièrement concernant : (1) sa colonne lithostratigraphique ; (2) ses relations avec les terrains sous jacents ; (3) la paléogéographie de son bassin.

Il y a eu consensus sur les deux premiers points mais le troisième point concernant l'alimentation du bassin numidien a fait l'objet de deux hypothèses.

Au fil des décennies, l'origine des sables des grès numidiens a suscité un intérêt croissant au sein de la communauté scientifique des géologues. Les travaux antérieurs ont jeté les fondations nécessaires en explorant divers aspects de ce domaine complexe (flyschs numidiens) et en ouvrant la voie à de nouvelles questions et opportunités de recherche.

Des pionniers tels que *Flandrin, 1948 ; Caire, 1957 ; Gottis, 1962 ; Broquet, 1968* ont posé des premières pierres de la recherche dans ce domaine, en se penchant sur l'origine des sables numidiens et en jetant les bases conceptuelles qui ont depuis évolué où ils ont adopté l'hypothèse d'une provenance septentrionale à partir des Tyrrhénide.

De manière concomitante, les travaux de (*Wezel, 1970, Hoyez, 1975*) ont apporté des perspectives novatrices, en mettant en lumière l'origine méridionale des sables numidiens où

ils ont montré que ce matériel est parvenu du remaniement de sable ou de grès saharien du socle africain.

Plus récemment (2023), l'étude menée par Menzoul Bouabdellah a élargi le champ d'investigation en Algérie en se penchant sur l'étude des formations numidiennes dans la région des Monts Ouarsenis (Nord Ouest d'Algérie).

A la lumière de ces antécédents, nous allons donner brièvement les différents travaux réalisés qu'on a pu collecter avec une succession chronologique.

II.2.3.1 Origine Septentrionale :

a- Parize. O, Beaudoin. B, Burollet. P.F, Cojan. I, Fries. G, Pinault, M., 1986 : La provenance du matériel gréseux numidien est septentrional (Sicile et Tunisie).

En 1986, une étude sur le numidien de la Sicile et le Nord de la Tunisie depuis Bizerte à l'Est jusqu'à la frontière Algéro-Tunisienne à l'Ouest, a montré que la provenance du matériel gréseux du numidien est septentrionale. L'étude est basée sur l'analyse des figures de base de bancs (flute-cast) où les données directionnelles (Fig. II.9) acquises à partir de ces figures attestent une provenance septentrionale du matériel gréseux numidien.

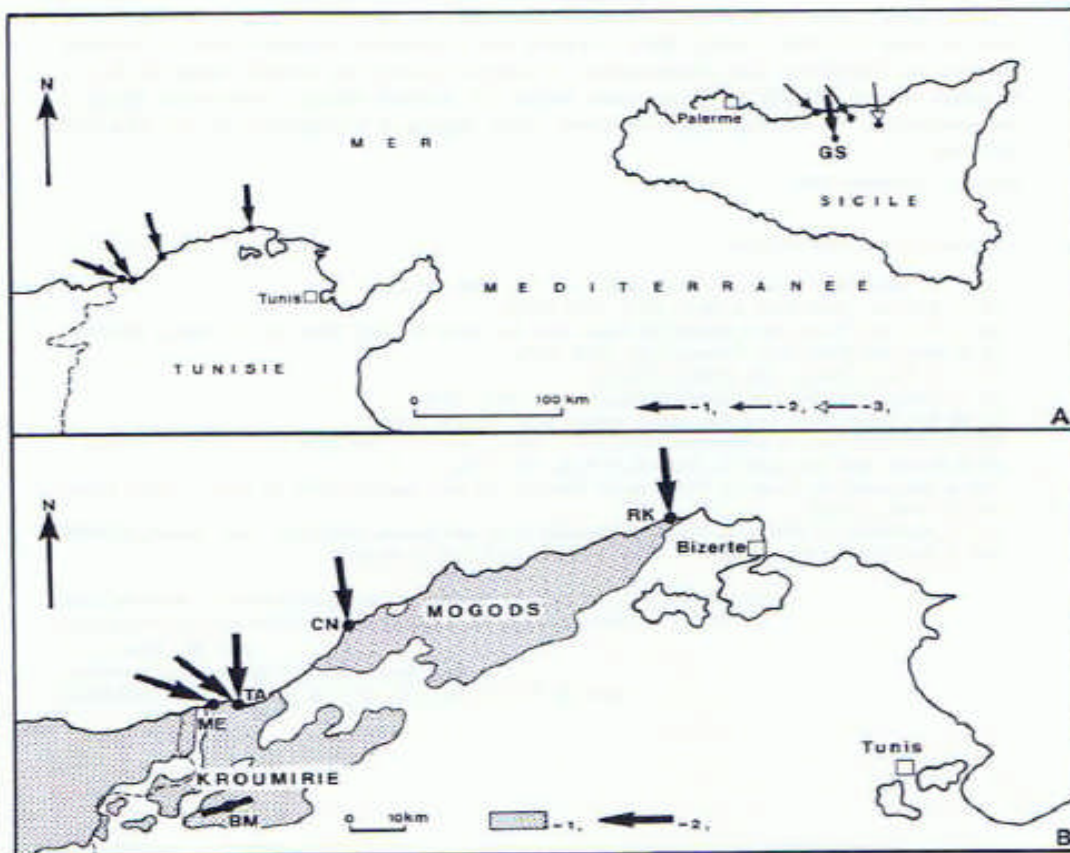


Figure II.9 : A : sens de courants dans le numidien de Sicile et de Tunisie B : provenance du matériel gréseux dans le numidien de la Tunisie septentrional (*Parize. O et al., 1986*).

b- Yaich. C, Hooyberghs. H.J.F, Durletc. C, Renard. M, 2000 : *corrélation stratigraphique entre les unités Oligo-Miocènes du Tunisie centrale et le Numidien.*

La conclusion de l'étude a aboutit que le matériel détritique gréseux pour le numidien est d'origine septentrional contrairement à ce qui a été dit que le sable des grès numidiens est d'origine de la remobilisation des grès à dragées de quartz du domaine saharien car ils ont apparus dès plus tardivement à la fin de l'Aquitaniens, alors que les sables grossiers à dragées de quartz apparaissent dès le Rupélien supérieur.

c- Riahi. S, Soussi. M, Boukhalfa. K, Ben Ismail Lattrache. K, Stow. D, Khomsi. S, Bedir. M, 2009 : *Stratigraphie, sédimentologie et structure de la ceinture de charriage du Flysch numidien au nord de la Tunisie.*

Dans son article publié en 2009, [Riahi](#) et al ont soutenu la théorie de provenance septentrionale en se basant sur l'étude des données des paléo-courants où les mesures effectuées sur les affleurements du littoral (tronçons Melloula-Tabarka, Citadelle et Cap Negro) donnent des débits corrigés du pendage allant de 120 à 170 vers le SSE et SE (Fig. II 10).

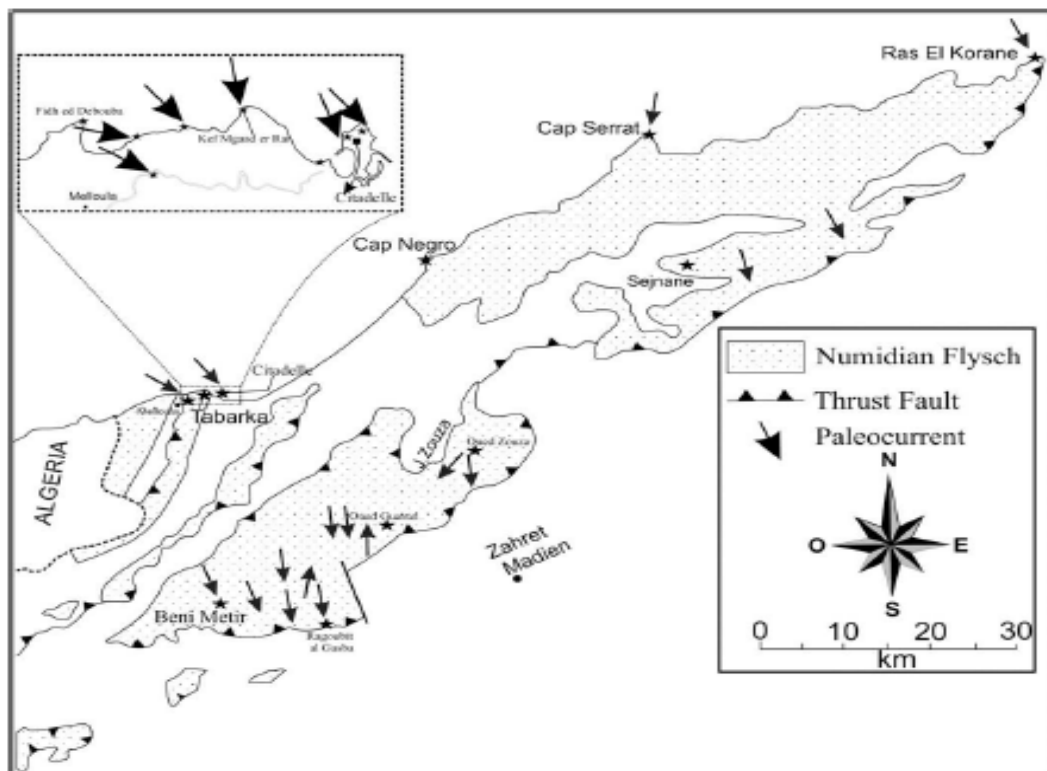


Figure II.10 : Carte montrant les directions des pléocourants basées sur les flûtes et les ondulations enregistrées à partir de différents affleurements du Flysch numidien dans le nord de la Tunisie ([Riahi. S et al., 2009](#)).

d- Fildes. C, Stow. D, Riahi. S, Soussi. M, Patel. U, Milton. J. A, Marsh. S, 2010 : *Provenance européenne du Flysch numidien dans le nord de la Tunisie.*

En 2010, un article a été publié sur l'origine des sables des grès numidiens, où 100 échantillons de grès ont été collectés le long du Nord de la Tunisie avec deux échantillons supplémentaires du Flysch numidien de la Sicile à titre de comparaison.

Ces échantillons ont été destinés à une analyse pétrographique, analyse des minéraux lourds et une géochronologie du zircon.

L'analyse géochronologique faite sur les zircons ont été séparés des grès riches en quartz a montré un âge du zircon de 514 ± 19 Ma pour les échantillons ramenés du nord de la Tunisie et de 550 ± 28 Ma pour ceux de la Sicile donc les quartzs des grès du flysch numidien ne peuvent provenir que des roches d'affinité européenne.

II.2.3.2: Origine méridionale:

a- Forese C. Wezel, 1970: Numidian flysch: an Oligocen early miocene continental rise deposit off the african platform : un dépôt de remontée continentale oligocène-miocène inférieur au large de la plate-forme africaine.

Le Flysch numidien est un dépôt alterné épais (1 000–3 000 m) de schistes bruns et de grès grossiers très quartzeux d'âge Oligocène-Miocène inférieur qui occupe la partie externe de la ceinture Riff-Tellien Atlas-Apennins méridionaux dans le sud de la Méditerranée. La composition minéralogique, la configuration des faciès et les paléo-courants indiquent que ce large coin étendu de dépôts d'écoulement de grain et d'affaissement représente d'anciens sédiments de remontée continentale au pied de la pente cratonale de la plate-forme africaine.

b- Hoyez. B, 1975: dispersion du matériel quartzeux dans les formations aquitaniennes de Tunisie septentrionale et l'Algérie Nord Orientale.

Une analyse sédimentologique a été faite sur les grès numidiens le long de l'axe Cherichira cap bon (nord de la Tunisie), dont elle montre que le bassin numidien a été alimenté par des apports deltaïques et fluviaux de provenance méridionale.

Dans le cadre de cette étude, un relevé systématique des figures directionnelles de dépôt a été effectuée depuis l'Ouest de Guelma jusqu'à Bizerte.

Sur la base des résultats, deux rosaces de courant (Fig. II.11) ont été établies, l'une pour les figures avec polarité, et l'autre pour les figures sans polarité.

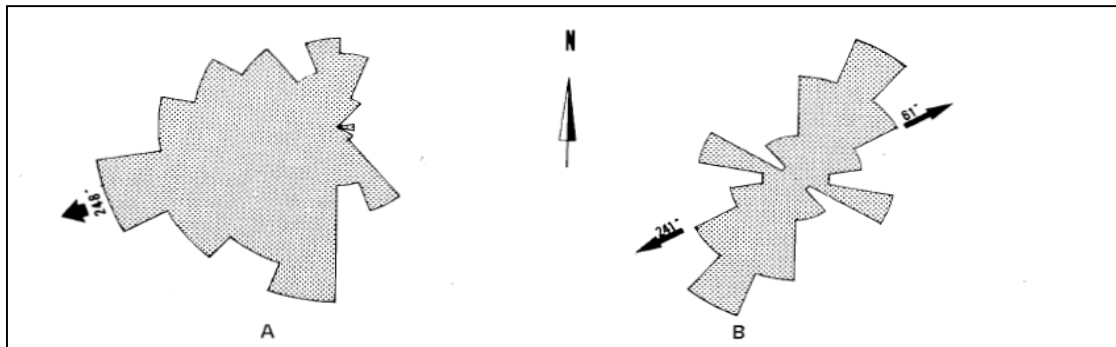


Figure II.11 : rosettes de courants établies d'après les mesures relevées dans les grès numidiens grossiers. L'intervalle de classe est de 20 degrés. Les flèches indiquent la direction de la moyenne vectorielle. A : figure relative aux figures avec polarité B : figures sans polarité (Hoyez. B, 1975).

D'après Hoyez, les classes modales dans les deux cas sont voisines où le mode et la moyenne vectorielle s'ordonnent autour d'une orientation Sud Ouest. Mais pour lui, cette représentation ne tient pas compte ni la nature, et la position géographique ou la tectonique de ces figures.

c- Moretti. E, Coccioni. R, Guerrera. F, Lahondere. J.C, Loiacono. F, Puglisi. D, 1991: *La séquence numidienne entre Guelma et Constantine (Nord Est, Algérie) The Numidian Sequence between Guelma and Constantine (Eastern Tell, Algeria).*

Cette étude a abouti à trois principaux résultats :

- ✚ dans les monts Constantinois, la séquence numidienne recouvre tectoniquement les nappes telliennes et que le contact de chevauchement a une vergence sud.
- ✚ Suite à des études micropaléontologiques antérieures et récentes portant sur les communautés de foraminifères et de nannofossiles, la séquence numidienne des monts Constantinois a été reclassée comme datant de la fin de l'Oligocène au début du Burdigalien.
- ✚ Cette étude soutient fortement l'hypothèse de la provenance saharienne du quartz des grès numidiens où il convient de souligner la présence de séquences sédimentaires plus anciennes, riches en quartz, affleurant le long du flanc sud du Sahara algérien et présentant les mêmes caractères pétrographiques que les « Grès nubiens ». Ces dépôts représentent probablement les sources sédimentaires des grès numidiens dans le secteur étudié (Algérie) et probablement aussi dans les zones les plus occidentales (Cordillère du Rif et Bétique).

d- Vila. J.M, Feinberg. H, Lahondère. J.C, Gourinard. Y, Chouabbi. A, Magné. J et – Delga. M. D, 1995. *Le chenal gréseux de l'Oligocène terminal et le Miocène de Sidi Affif dans leur cadre structural Est Algérien : origine saharienne du numidien et calendrier des charriages du Miocène.*

Dans le débat de l'origine du matériel gréseux de la nappe numidienne, Vila. J.M et al, ont apporté un important argument dans l'Est Algérien dans la région de Sidi Affif, où ils ont étudié les barres gréseuses à faciès numidien qui se trouvent en couverture normale de l'Eocène d'une unité tellienne méridionale.

Ainsi, la nappe numidienne se trouve en lambeaux dispersés en superstructure au Nord et au Sud de Sidi Affif (Fig. II.12) qui est expliqué par les serrages Miocène successifs.

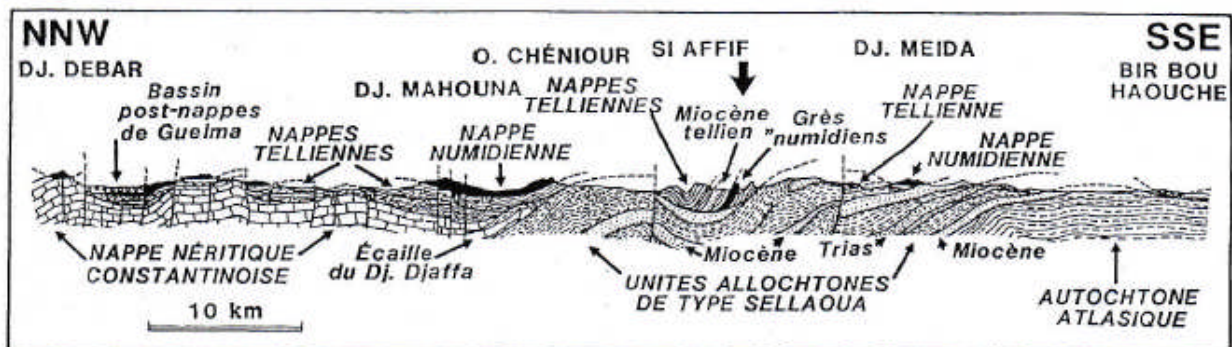


Figure II.12 : coupe synthétique interprétative du sud de la chaîne Alpine d'Algérie orientale (Vila. J.M et al, 1995)

e- Johanson. M, Braakenburg. N.E, Stow Dorrik. A.V et Faugères. J.C, 1998 : *Sables massifs d'eau profonde : faciès, processus et géométrie des canaux dans le Flysch numide, Sicile.*

Dans ce travail, la reconstruction paléogéographique et la chronologie n'est pas bien détaillée seulement les points les plus saillants c'est que le bassin numidien a été intensément déformé au cours de son histoire tectonique complexe et les dépôts du bassin se sont segmentés en différentes unités structurales. Le Flysch d'âge Oligo-Miocène comprend principalement des grès quartzarénitiques et des mudstones interstratifiés, tous deux d'affinités turbiditiques et très probablement dérivés d'une source Nord-Ouest africaine.

Il n'est pas possible de déterminer la taille du bassin avec précision, mais la dimension N-S était probablement limitée à, disons, quelques dizaines à 100 km et la dimension EW pourrait avoir été beaucoup, mais le flysch sicilien dérive très probablement du craton africain.

f- Thomas. M.F.H, S. Bodin 1, J. Redfern, D.H.B. Irving, 2010: *A constrained African craton source for the Cenozoic Numidian flysch: implications for the paleogeography of the western Mediterranean basin.*

Les données obtenues pour cette étude, suggèrent que le craton africain est la seule région source appropriée de matériel pour le Flysch numidien. Les analyses pétrologiques et la datation des zircons qui se trouvent dans les grès numidiens montrent des âges éburnéens et

panafricains, non affectés par des événements hercyniens et/ou alpins ce qui suggèrent une provenance des zones cratoniques nord-africaines.

Les théories qui soutiennent les paléo-courants qui pointent vers une source septentrionale, ne sont pas fiables compte tenu de leurs analogues du bassin d'avant pays et les complications structurales observées.

g- Guerrero. F, Martin Alagrra. A et Martin-Martin. M, 2012: *tectono-sedimentary evolution of the numidian formation and lateral facies (southern branch of the western Thetys): constraints for central western Mediterranean geodynamics.*

D'après lui, l'origine des sables des grès numidiens est méridionale, il est lié à l'érosion des zones cratoniques africaines riches en arénites quartzites.

Pour lui, le bassin des flyschs magrébins représente un bassin unique avec deux principaux systèmes d'alimentation, par l'érosion de marges opposées (Fig. II.13 et II.14) : la microplaque méso-méditerranéenne interne (marge active) pour les dépôts de flysch immatures (légers) et (2) la plaque africaine externe (marge passive) pour les dépôts super mature tels que les formations numidiennes.

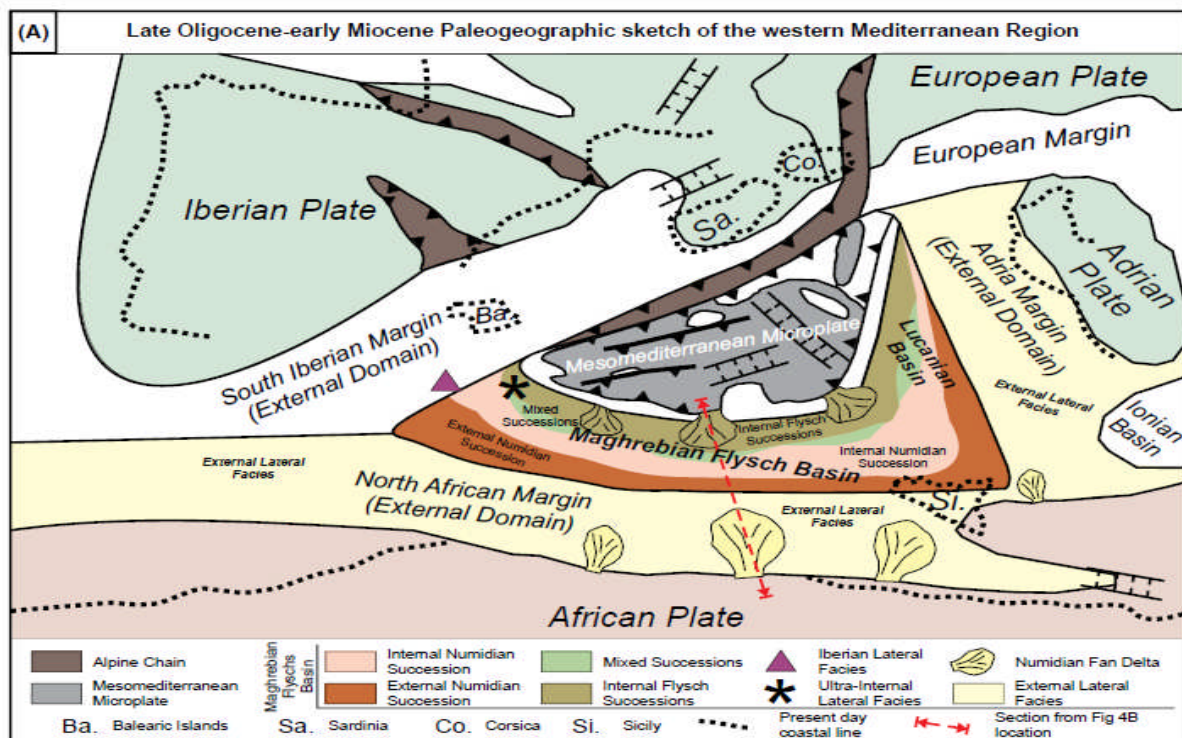


Figure II.13 : (A) esquisse paléogéographique Oligocène supérieur-Miocène inférieur de la région méditerranéenne centre occidentale (Guerrera. F et al., 2012).

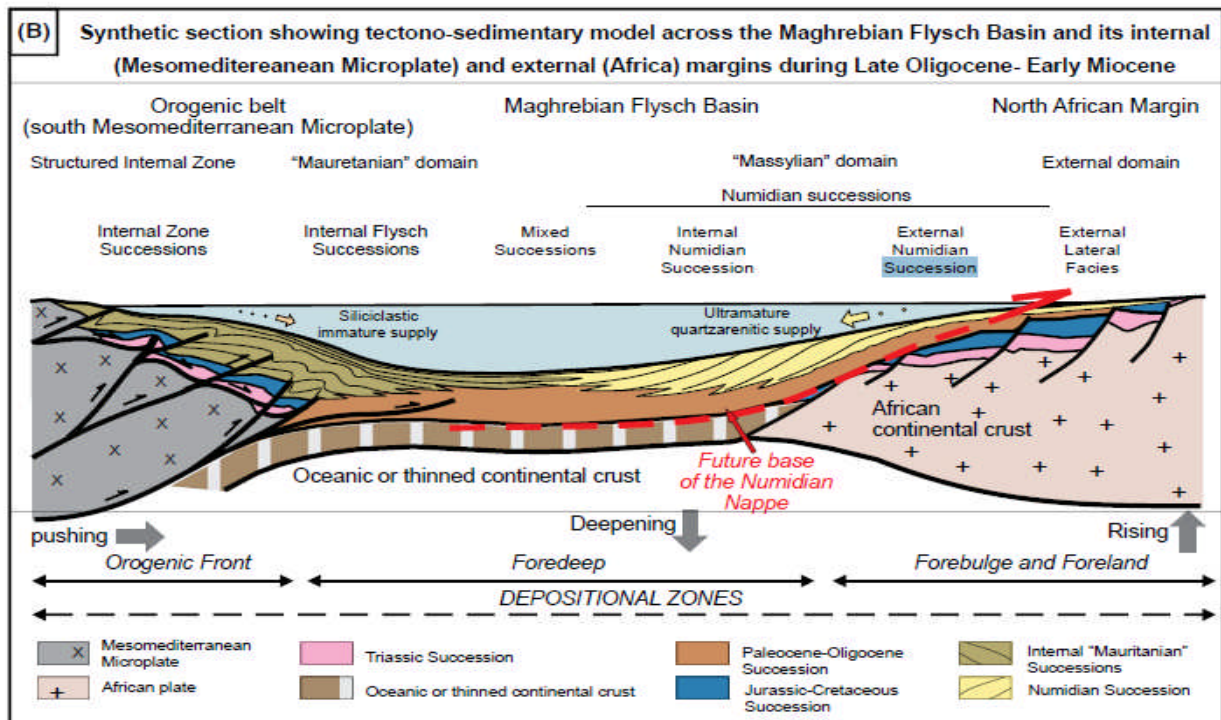


Figure II.14 : coupe synthétique (située en A) montrant le modèle tectono-sédimentaire à travers le bassin des flyschs magrébin et ses marges interne et externe (microplaque méditerranéenne et marge africaine respectivement) au cours de l'Oligocène et Miocène inférieur (*Guerrera. F et al., 2012*).

Pour argumenter sa théorie, il a appuyé sur plusieurs arguments :

1. Aucune source en Europe n'a une surface suffisante pour fournir l'énorme quantité de siliciclastiques ultra-matures et polycycliques (quartz partiellement éolienisé + argiles kaoliniques) nécessaires à la formation numidienne.
2. L'existence de faciès latéraux externes numides composés d'arénites quartzueuses ultramatures recouvrant les unités externes de la Marge Africaine.
3. Données sur les minéraux lourds et le zircon par Fildes et al. (2010) comme principal support d'une provenance européenne de l'offre numide a été rejetée par Thomas et al. (2010b). Nous sommes d'accord avec Thomas et al. (2010b) puisque les âges hercyniens et alpins sont systématiquement présents dans les zones européennes (en plus des âges panafricains et plus anciens) alors que le détachement alpin de telles roches s'est produit après le dépôt de la formation numidienne.
4. Les observations dans les Apennins du Sud indiquent que l'épaisseur du numidien diminue vers le nord, indiquant également un apport méridional et un déplacement vers le nord des sables numidiens le long du bassin.

5. Les paléocourants numides doivent être considérés avec une extrême prudence dans les systèmes clastiques marins profonds, car ils indiquent fréquemment la réorientation de l'écoulement turbiditique et sa distorsion par des processus tectoniques de charriage et de décrochement.

h- Fornelli. A, Micheletti. F, Langone. A, Perrone. V, 2015 : *Premiers âges des zircons détritiques U–Pb des grès numidiens du Sud Apennins (Italie): Preuves de provenance africaine.*

En 2015, une étude basée sur la datation des zircons qui se trouvent dans les grès numidiens a été faite sur des échantillons ramenés du sud des Apennins (Italie) dont les âges U–Pb des zircons (n = 47) varient de 3047 ± 13 Ma (Mésoproterozoïque) à 516 ± 19 Ma (Cambrien). La prédominance des âges paléo-protérozoïques (2500–1600Ma) et l'absence d'âges hercyniens et alpins suggèrent une provenance des zones cratoniques nord-africaines.

D'après cette étude, un groupe d'âges à 773 ± 24 Ma et 668 ± 12 Ma dans un échantillon et à 664 ± 17 Ma dans l'autre échantillon, calculé sur des domaines de zircons magmatiques zonés, témoignent d'un apport important des roches « granitiques » néo-protérozoïques affleurant largement dans le craton nord-africain ([Fornelli, 2015](#)).

La comparaison des âges des zircons des grès numidiens du Sud des Apennins avec ceux du Cordillère bétique et de la chaîne maghrébine du sud de l'Espagne à la Sicile montre une coïncidence ce qui amène à dire que toute la zone de dépôt dans laquelle le Flysch numidien s'est déposé, a été alimentée par une source représentée par le craton africain où affleurent largement les roches archéennes, protérozoïques et cambriennes de la côte atlantique aux massifs du Hoggar et du Tibesti ([Fornelli, 2015](#)).

i- Azdimousa. A, Jabaloy-Sánchez. A, Talavera. C, Asebriy. L, González-Lodeiro. F, J. Evans. N, 2019 : *Detrital zircon U-Pb ages in the Rif Belt (northern Morocco): Paleogeographic implications*

Ils ont confirmé la provenance méridionale des sables des grès numidiens, dont plusieurs échantillons ramenés du Rif externe (Nord du Maroc) ont été soumis aux analyses de géochronologie avec la méthode U-Pb.

Les résultats obtenus montrent la présence des rares grains de zircon Paléozoïque qui montre l'influence du bloc Sehouli.

Les distributions d'âge U-Pb des zircons détritiques dans les roches mésozoïques et cénozoïques du Rif externe et du Flysch maghrébin (y compris les unités dites de flysch

interne maurétanien) sont très similaires, ce qui suggère fortement que le Rif externe et l'ensemble du Flysch maghrébin faisaient partie de la même paléomarge nord-ouest africaine.

Le transport des grains mésoprotérozoïques vers la paléomarge africaine nord-ouest nécessite des systèmes fluviaux dirigés vers le nord parallèlement à la marge continentale de l'Atlantique central de l'Afrique. En revanche, les échantillons du Rif interne ou du Domaine d'Alborán sont différents de ceux du Rif externe et du Complexe du Flysch maghrébin, en particulier par la rareté des zircons mésoprotérozoïques, ce qui suggère que le Domaine d'Alborán n'était pas une zone source pour les zircons trouvés dans la paléomarge nord-ouest africaine.

j- Menzoul. B, 2023: *Sedimentology and ichnology of the Numidian Formation in the Ouarsenis Mountains, northwestern Algeria :*

Une étude récente (2023) dans le cadre de l'obtention de diplôme de doctorat a été faite sur les grès des formations numidiennes des monts de l'Ouarsenis, nord ouest de l'Algérie (B. Manzoul, 2023) dont 205 grains de zircon ont été soumis aux analyses géochronologiques U/Pb.

La méthode de géochronologie du Zircon utilisée dans ce travail est appliquée pour la première fois sur les formations numidiennes du Nord Algérien, elle est soutenue par des données d'orientation du paléo-écoulement mesurée à partir des structures sédimentaires.

Premièrement, les résultats obtenus de ces analyses ont montré que les grains de Zircon les plus dominants dans les échantillons sont d'origine magmatique.

Secondo, ils ont mis en évidence la présence de trois groupes d'âges qui caractérisent ces formations : (i) 563-992 Ma, (ii) 1007-1527 Ma (iii) 1684-2470 Ma.

Tous ces âges appartiennent aux orogénèses éburnéenne et panafricaine, notant que l'orogénèse hercynienne et alpine n'ont aucune preuve.

A cet effet, tous les résultats obtenus de cette étude sur les formations gréseuses du numidien des monts de l'Ouarsenis visent vers une origine africaine.

II.3 Aperçu sur la géologie de la région de Constantine:

II.3.1 Introduction :

La région de Constantine présente un intérêt dans l'histoire de la géologie Algérienne, tant au point de vue paléontologique que stratigraphique (*Coiffait, 1992*).

D'après les cartes géologiques de Constantine, feuille n°73, el Haria feuille n°73 et El Khroub, feuille n°97, avec une échelle de 1/50 000, la région de Constantine est caractérisée par des formations géologiques allant du secondaire au Quaternaire (Fig. II.15 et II.16).

II.3.2- Les formations post nappes :

Les formations post nappes regroupent l'ensemble de dépôts postérieurs au Burdigalien (*Aris Y., 1994*), ce sont des formations continentales et marines transgressives et discordants sur les formations et les structures Burdigaliennes (*Aris Y., 1994*).

II.3.2.1- Le Quaternaire :

Le quaternaire est très développé dans la région, dans la vallée d'Oued Boumerzoug, il constitue des terrasses emboîtées.

Il est constitué essentiellement, des éboulis, des terres arables, des alluvions actuelles et récentes, et des calcaires lacustres.

Les éboulis récents sont bien développés au pied des massifs de grès numidiens, il s'agit des éboulis à blocs et parfois ce sont des coulées boueuses à matériel emprunté au Quaternaire ancien (*Coiffait. P.E et Vila. J.M., 1977*). En revanche, les éboulis anciens, sont observables uniquement dans la vallée d'Oued Boumerzoug rapporté à l'Amirien, il s'agit des blocs plus ou moins roulés et des galets de calcaires au sein d'une matrice limoneuse.

Quant aux terres arables et les formations de pente, elles correspondent à des sols bruns installés sur les anciens glacis qui sont maintenant découpés par l'érosion. Elles recouvrent souvent de vastes affleurements marneux des formations telliennes (*Coiffait. P.E et Vila. J.M., 1977*).

Les alluvions récentes sont particulièrement développées dans la vallée d'Oued El Haria, elles sont représentées par des limons, des graviers et des galets roulés.

Concernant les glacis anciens, il s'agit d'un vaste épandage occupant l'actuelle vallée de l'Oued Boumerzoug sur un glacis d'érosion en pente douce vers le sud. Ils sont constitués exclusivement des blocs de grès numidiens bien roulés ayant un diamètre de 80 cm et de cortex ferrugineuses noyées dans une matrice limoneuse d'une couleur rouge vif.

Le Pliocène supérieur-Villafranchien est représenté par des calcaires lacustres de Mansourah, ce sont des calcaires blanchâtres ou rosés présentant parfois des cavités (Fig. II.17).

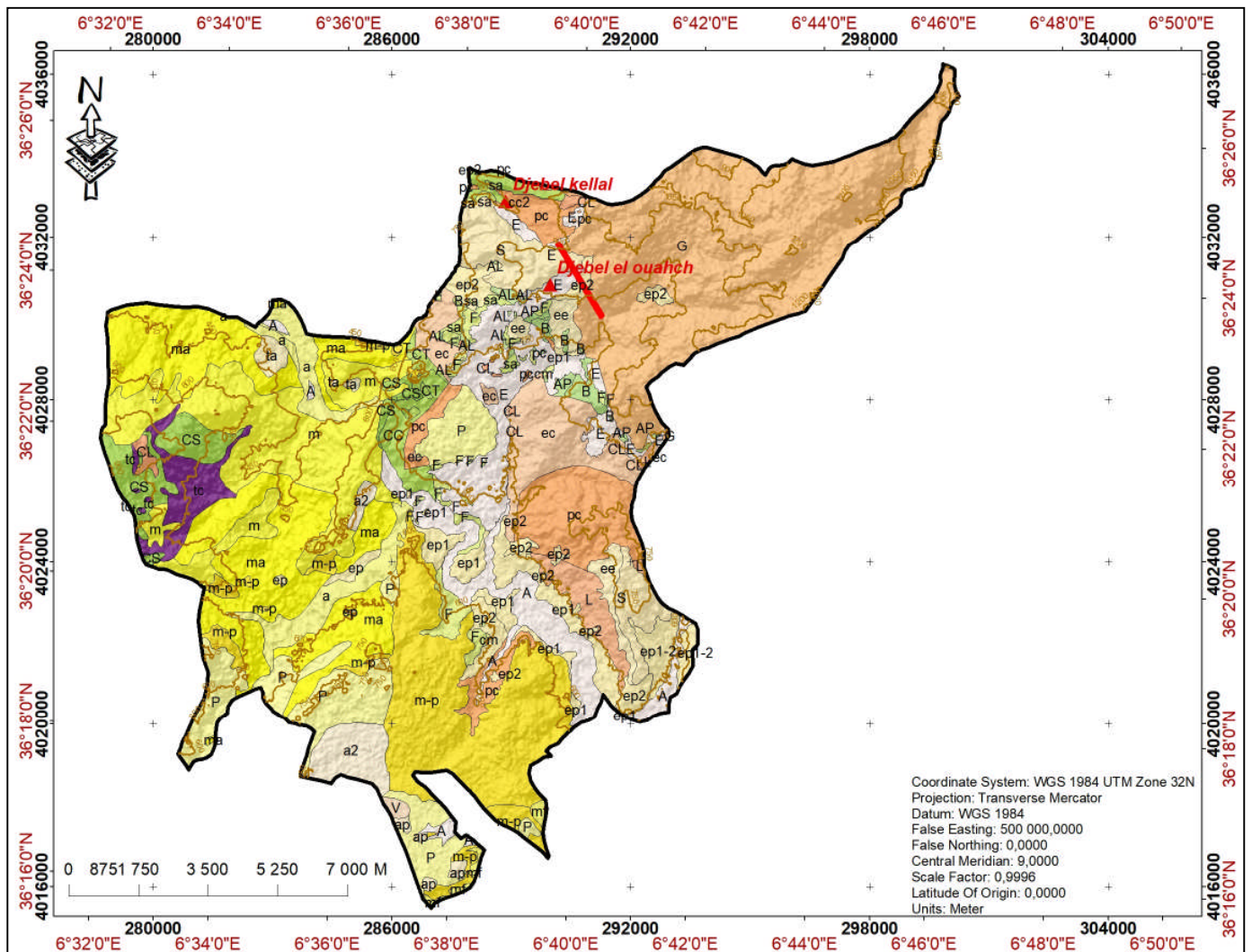


Figure II.15 : Carte géologique de la commune de Constantine (Extrait des cartes géologiques 1/50.000 de Constantine, El Haria et El Khroub) (Réalisée sous l'Arcgis).



Figure II.16 : la légende de la carte géologique



Figure II.17: les calcaires lacustres blancs de Mansourah

II.3.2.2- Le Mio-Pliocène continental :

Ce sont des formations postérieures à la mise en place des nappes de charriages (*Coiffait. P.E et Vila. J.M., 1977*), elles sont constituées essentiellement des argiles sableuses rouges dans la partie Nord Est de la région et des argiles rouges et conglomérats dans la partie Sud Ouest. Les conglomérats sont constitués des blocs des grès numidiens bien roulés noyés dans une matrice limoneuse de teinte rouge, ces formations se distinguent des glaciens anciens du Salténien par l'absence de cortex ferrugineuses (*Coiffait. P.E et Vila. J.M., 1977*).

II.3.3- Les séries allohtones :

Dans le Constantinois, l'édifice allochtone est subdivisé en deux ensembles distingués entre eux par le type et l'âge du matériel ; un ensemble composé de l'unité ultra-tellienne et un second constitué des flyschs crétacés-Paléogènes (le flysch massylien et le flysch maurétanien) et des flyschs Oligo-Miocène comprenant la nappe numidienne (*Aris Y., 1994*).

Ces séries reposent sur le môle néritique constantinois qui forme un autochtone relatif (*Vila, 1980; Lahondere, 1987*).

II.3.3.1- La nappe numidienne :

Le numidien participe abondamment au substratum du bassin. Il constitue la chaîne du Zouara (Au Nord Est de Sidi Merouane), c'est un massif numidien orienté Est Ouest et qui relie au Djebel Ouahch vers l'Est, en passant au pied des massifs des Djebels M'cid Aïcha et Sidi Dris (*Coiffait. P.E., 1992*).

Une étude détaillée de la série numidienne au niveau de Douar Khorfan a été faite par Raoult, 1974 en où il a établi une colonne stratigraphique (Fig. II.18) en se basant sur leurs anciens travaux avec quelques corrections.

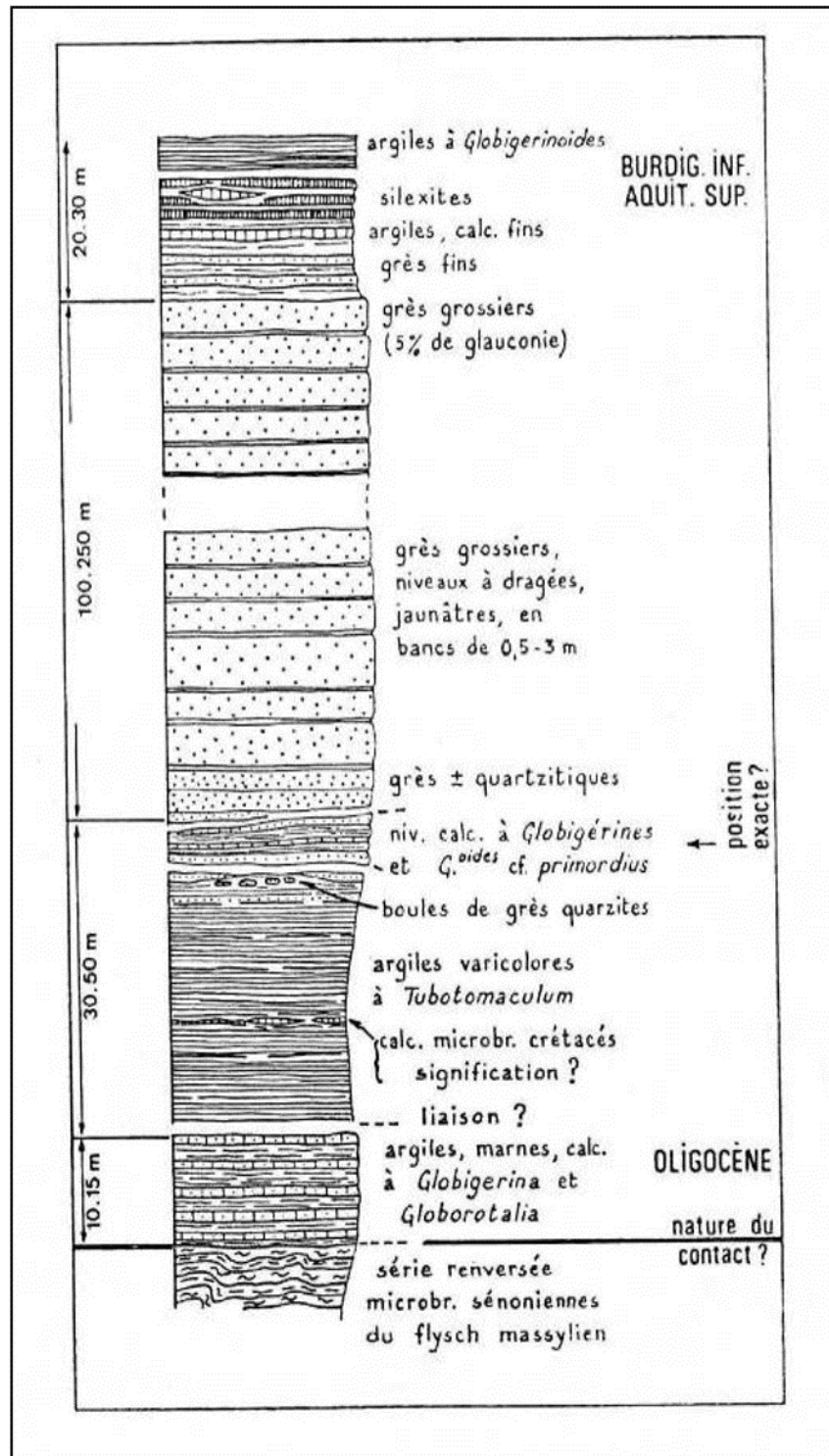


Figure II.18 : colonne stratigraphique synthétique de la série numidienne du douar Khorfan

(Raoul. J.F, 1974)

II.3.3.1.a- les grès numidiens :

Ce sont des grès massifs avec une teinte claire à la cassure et brun fauve en patine d'où vient le nom de Djebel Ouahch.

Ils se trouvent en bancs métriques parfois décamétriques alternent souvent avec des niveaux d'argiles gris vert. Vers le haut de la série, on observe parfois des niveaux à dragées de quartz centimétriques (région de Constantine) (*Coiffait. P.E, 1992*). Au Djbel Ouahch, cette série atteint 400m de puissance. Pour les grès numidiens et d'après *P.E. Coiffait, 1992*, ils sont post Oligocènes.

Dans la région de Medjana (Nord Ouest de Bordj Bou Areridj), les grès se trouvent avec un aspect un peu différent, ils constituent une puissance masse. Les bancs gréseux sont d'épaisseur métrique où le niveau supérieur possède une granulométrie fine (Fig. II.19) et le niveau inférieur présente dragées de quartz centimétriques (Fig. II.20).

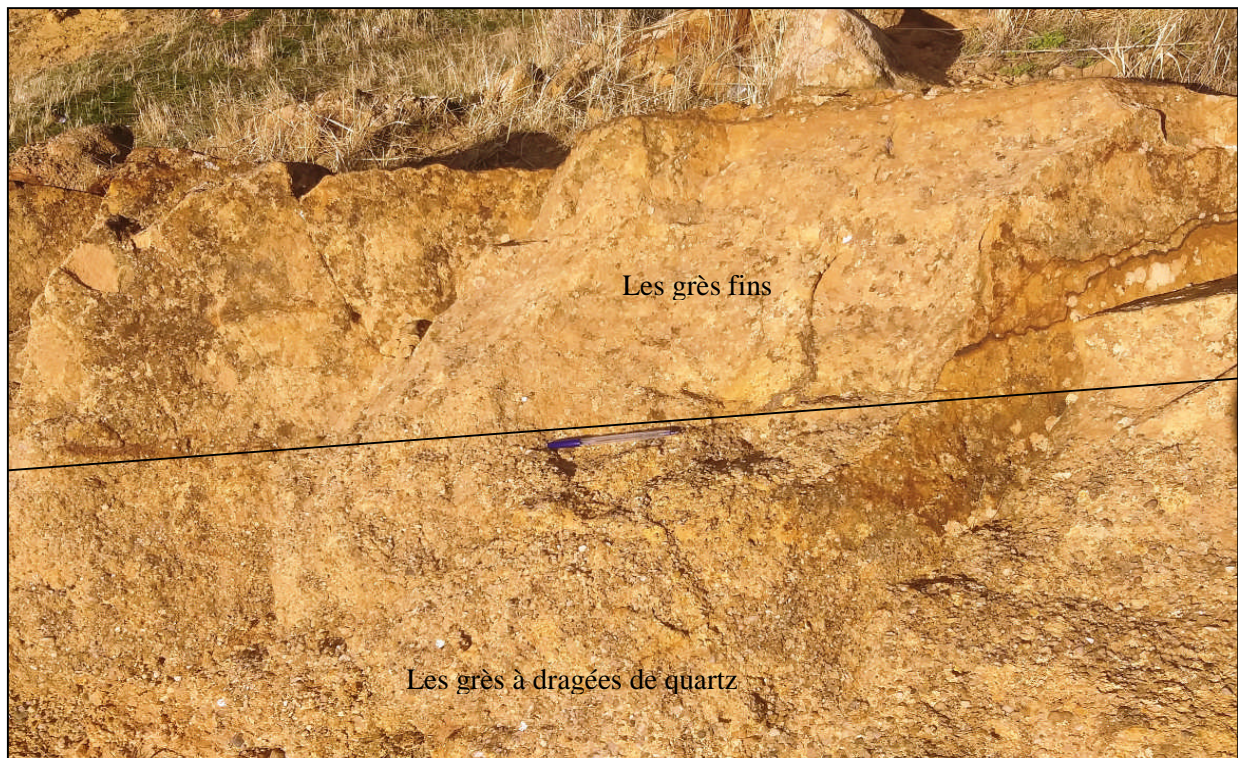


Figure II.19 : les grès Medjanien dans la région Nord Ouest de bordj Bou Areridj

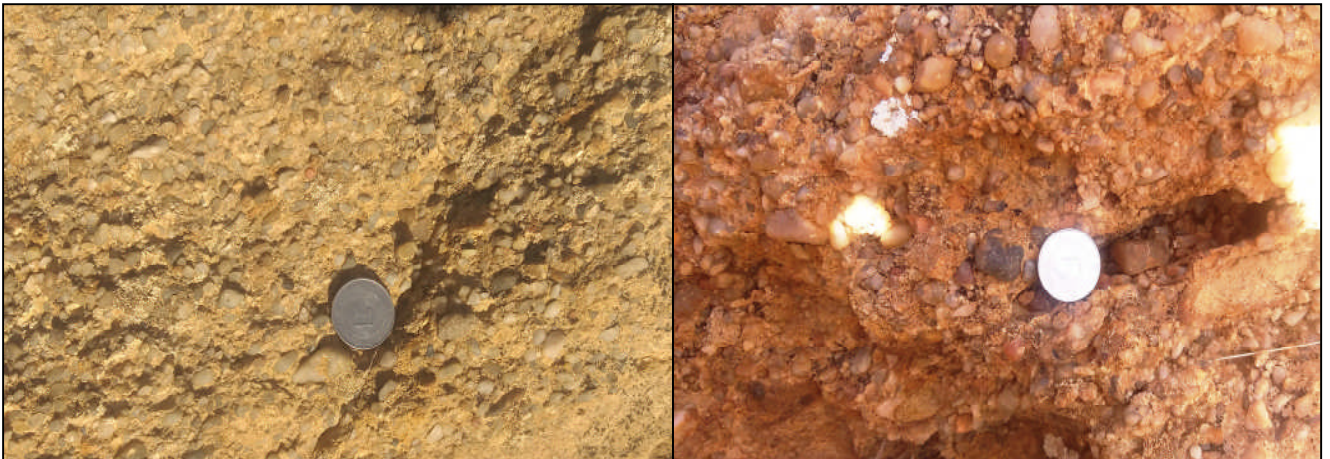


Figure II.20 : les dragées de quartz dans les grès Medjanien de la région Nord Ouest de bordj Bou Arreridj

II.3.3.1.b- les argilites sous numidiennes à *Tubotomaculum* :

Les argilites sous numidiennes sont situées systématiquement sous les grès numidiens, elles possèdent une teinte vert-grisâtre, dans la région de Constantine, les teintes rouges et violacées sont fréquentes et exceptionnelles (*Coiffait P.E., 1992*). Ces argilites contiennent parfois (à l'Est de Constantine) des bancs de quartzites verts.

Sur le revers Sud de Djebel Ouahch où la puissance de ces argilites peut atteindre une vingtaine de mètres, elles sont plus ou moins masquées par les éboulis gréseux provenant des barres gréseuses sus jacentes.

Dans la région de Tamentout (limite de la wilaya de Jijel vers le sud), sur le talus de terrassement de la pénétrante Djen Djen –El Eulma, les *Tubotomaculum* sont fréquents dans les argilites sous numidiennes (Fig. II.21) qui ont été mises en évidence grâce aux travaux de terrassement.



Figure II.21 : les *Tubotomaculum* en tribu et individuel dans les argilites sous numidiennes dans la région de Tamentout

Dans la région Nord Ouest de Sétif (flanc Ouest de djebel Megress), les argilites sous numidiennes sont caractérisée toujours par une couleur grisâtre avec un aspect schisteux (Fig. II.22).

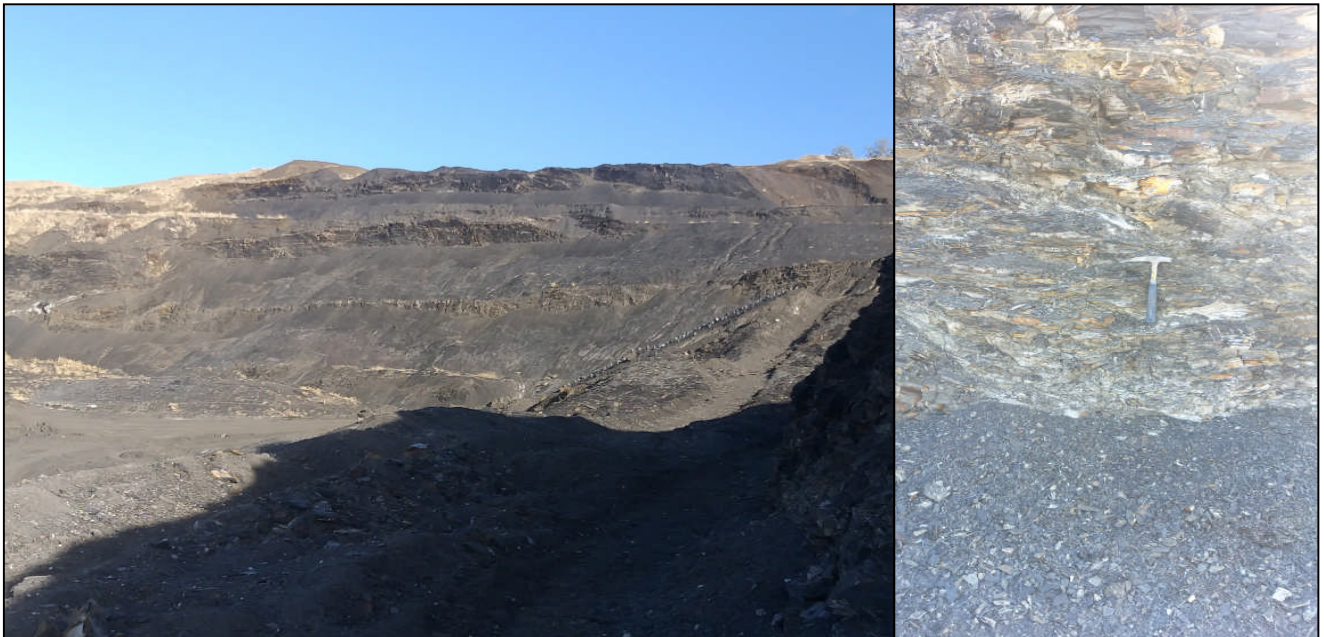


Figure II.22 : les argilites sous numidiennes de la région Nord Ouest de Sétif (Megress)

II.3.3.2- unités à affinité massylienne :

Il s'agit de terme de base d'une série de flysch à affinité massylienne contenant des éléments de type ultra-tellien (*Coiffait P.E., 1992*). Il comprend:

- ✚ Campanien à Maestrichien : il s'agit des flyschs à microbrèches d'âge Campanien à Maestrichien (*Busnardo. R., 1967*), qui constitue la partie sommitale de la série massylienne (*Boullin et al., 1970*). C'est la série type flysch calcaire à bancs centimétrique réguliers qui se débitent en plaquettes très caractéristiques. Il constitue une série d'affleurements discontinue peu épais sous la nappe numidienne (*Coiffait. P.E et Vila. J.M., 1977*).

- ✚ Campanien supérieur : il est caractérisé par des marnes vertes claires renfermant des blocs de calcaires bien roulés de ayant un diamètre variable, elle varie du galet à des blocs.

Ces blocs sont de nature très variées et ils sont parfois noyés dans un ciment conglomératique de couleur verte à rouge sachant que dans ce ciment, ont été observées des Globigérines et des Globotruncana datant le Sénonien. Les niveaux à blocs de calcaires sont associés latéralement à des niveaux gréseux (*Coiffait. P.E et Vila. J.M., 1977*).

- ✚ Cénomano-Turonien : il s'agit des bancs marneux blanchâtres qui affleurent dans la région du Bordj Sidi El Mekki sous les argiles à Tubotomaculum (*Coiffait. P.E et Vila. J.M.,*

1977). Elles sont à rapprocher à celles connues dans la série massyenne datée du cénoomanien supérieur –Turonien basal.

II.3.3.3- Les nappes telliennes:

II.3.3.a- Priabonien:

Les formations Priaboniennes ont été identifiées dans les faubourgs de Constantine et dans la région de Bordj Sabath en 1978 par Vila et al.

Ce sont des marnes schisteuses grises ou brunes avec des blocs de calcaires à silex attribués au Lias (*Joleaud, 1908*), mais ces attributions sont erronées, il s'agit des blocs de calcaires à silex et à patine blanche de l'Eocène (Yprésien à Lutétien inférieur).

Ces formations reposent sur des marnes sombres sans blocs du Dano-Paléocène ou du lutétien et elles sont surmontées par un ensemble écaillé complexe de type ultra-tellien (*Vila, 1980*).

II.3.3.b- Ensemble écaillé ultra-tellien:

Les formations ultra telliennes du substratum du bassin de Constantine sont connues du Néocomien au Lutétien (*Coiffait P.E., 1992*).

Les séries ultra-telliennes sont bien développées dans le Constantinois et affleurent sur plus de 100km d'est en Ouest (*Raoult J.F., 1974*), elles sont essentiellement marneuses ou marno-calcaires à l'exception de l'Yprésien qui est caractérisé par des calcaires clairs à rares niveaux de silex (*Coiffait P.E., 1992*) et le Barrémien représenté par des calcaires fins à Ammonites pyriteuses (*Raoult J.F., 1974*).

II.3.3.c- Unité tellienne sensu stricte:

Ces formations sont connues du Maestrichien au Lutétien supérieur, elles sont caractérisées par des marnes noires à boules jaunes hormis Hyprésien-Lutétien inférieur qui est connue par des calcaires clairs à cassure noire et silex noirs.

II.3.4- L'autochtone ou parautochtone :

II.3.4.1- La nappe néritique Constantinoise:

Elle constitue l'autochtone relatif de la région (*Coiffait. P.E et Vila. J.M., 1977*).

La néotectonique a dispersé les affleurements des séries néritiques Constantinoises en massifs isolés de taille variable étudiés par plusieurs géologues (*Vila, 1980*).

Dans ces massifs, plusieurs groupes peuvent être séparés, (i) un groupe nord oriental autour de hammam Meskhoutine et de Guelma, (ii) un groupe central autour de Constantine, (iii) un groupe méridional autour de Ain M'Lila (*Vila, 1980*).

Pour les massifs du groupe central, elle apparaît à la faveur des fractures récentes qui délimitent le Djebel Kellal, le rocher de Constantine et le Nord de Djebel Oum Settas.

Au niveau de Djebel Oum Settas, on distingue :

- ✓ Le Barrémien : il s'agit des calcaires massifs graveleux souvent riches en Orbitolines (*Coiffait. P.E et Vila. J.M., 1977*).
- ✓ L'Aptien : il est représenté généralement par des calcaires relativement homogènes comprenant une série épaisse de calcaires gris clairs en bancs réguliers à Miliolidés (*Aris Y., 1994*).
- ✓ Le Cénomaniens : il est représenté par une épaisse série de calcaires blancs massifs à Rudistes (*Coiffait. P.E et Vila. J.M., 1977*).

Quant au rocher de Constantine et Djebel Kellal , on distingue :

- ✓ Le Cénomaniens supérieur à Turonien : c'est au niveau du rocher de Constantine que la coupe soit complète et visible, elle comporte de bas en haut (*Coiffait. P.E et Vila. J.M., 1977*) : (i) 8m de calcaires massifs cristallins avec des débris de Rudistes (ii) 90m alternance entre les calcaires cristallins parfois dolomitiques jaunâtres et des calcaires fins blancs rubanés (iii) 15m de calcaires cristallins jaunâtres massifs (iv) 30m de calcaires massifs noirs fétides à foraminifères.
- ✓ Le Sénonien transgressif : il forme quelques placages au Djebel Kellal mais au niveau du rocher de Constantine que son étude est la plus intéressante où il fossilise une tectonique de failles à faibles rejet (*Vila, 1980*), il est caractérisé par quelques décimètres de calcaires fins ou cristallins à interclasts, d'allure microbréchique.

II.3.5- Le Trias :

Il est essentiellement évaporitique et se présente en pointements diapiriques et en lames éjectées le long des accidents (*Aris Y., 1994*).

Parmi les affleurements observés dans la région de Constantine :

- ✓ Les affleurements de des massifs des massifs de Keneg et Akral au Nord Ouest et à l'Ouest de Constantine.
- ✓ Les affleurements de la dépression du Chettaba-Djebel ech Chebka-Ain el Kebch à l'Ouest et au SW de Constantine.
- ✓ Les affleurements liés aux terrains tertiaires situés au sud des massifs de Felten et Oum Settas.
- ✓ Aux environs d'Ouled rahmoune.

De point de vue faciès, le trias est composé des argiles bariolées de teintes vives qui contiennent le plus souvent des blocs calcaro-dolomitiques, des amas de gypses, des cargneules et des blocs de roches volcaniques (*Aris Y., 1994*). Parfois, ces formations sont associées à des quartz bipyramides.

II.4 Géologie de Djebel El Ouach :

Dans la région de la petite Kabylie et d'après leur position structurale, les massifs numidiennes sont regroupés schématiquement en deux groupes, le numidien supra kabyle et un numidien péri kabyle lui-même subdivisé en deux sous groupes (en position interne et externe) (*Hoyez. B, 1989*).

Djebel El Ouahch fait partie du groupe 3 (en position externe) où le numidien repose sur les flyschs massyliens et sur les terrains telliens (*Hoyez. B, 1989*).

La géologie de dj El Ouahch ne se résume pas mieux qu'on s'appuyant sur la cartographie de la région d'El Aria faite par *Coiffait et Vila (1977)*.

Il est composé des grès numidiens massifs (Fig. II.23). Le sud de ce massif est marqué par des lambeaux de flysch massylien à microbrèches, tout cet ensemble repose sur les formations écaillées ultra-telliennes allant du Barrémien au Lutétien inférieur.



Figure II.23: les grès numidiens de Djebel Ouahch

D'après B. Hoyez 1989 en se basant sur les coupes faites par Coiffait, les lambeaux massyliens recouvrent les contacts tectoniques affectant l'ultra-tellien où il a envisagé

plusieurs hypothèses sur la succession des événements de la plus autochtoniste à la plus allochtoniste :

- 1- Recouvrement tectonique du massylien sur l'Ultra-tellien écaillé-dépôt du numidien-glissement modeste et écaillage de la superstructure.
- 2- Recouvrement tectonique de l'ensemble numidien et son substratum stratigraphique massylien sur l'ultra tellien écaillé.
- 3- La même que la seconde mais en postulant pour le numidien une origine encore plus lointaine et le massylien ne constituant que des copeaux tectoniques arrachés lors de son déplacement.

Pour *B. Hoyez*, il adopte la première hypothèse mais il ne dispose pas d'argument pour la soutenir.

II.4.1 Description des argilites :

Au niveau de Dj El Ouahch, les argilites sous numidiennes (à Tubotomaculum) se situent au dessous des massifs gréseux et elles affleurent au Nord Est du massif gréseux (Fig. II.24).

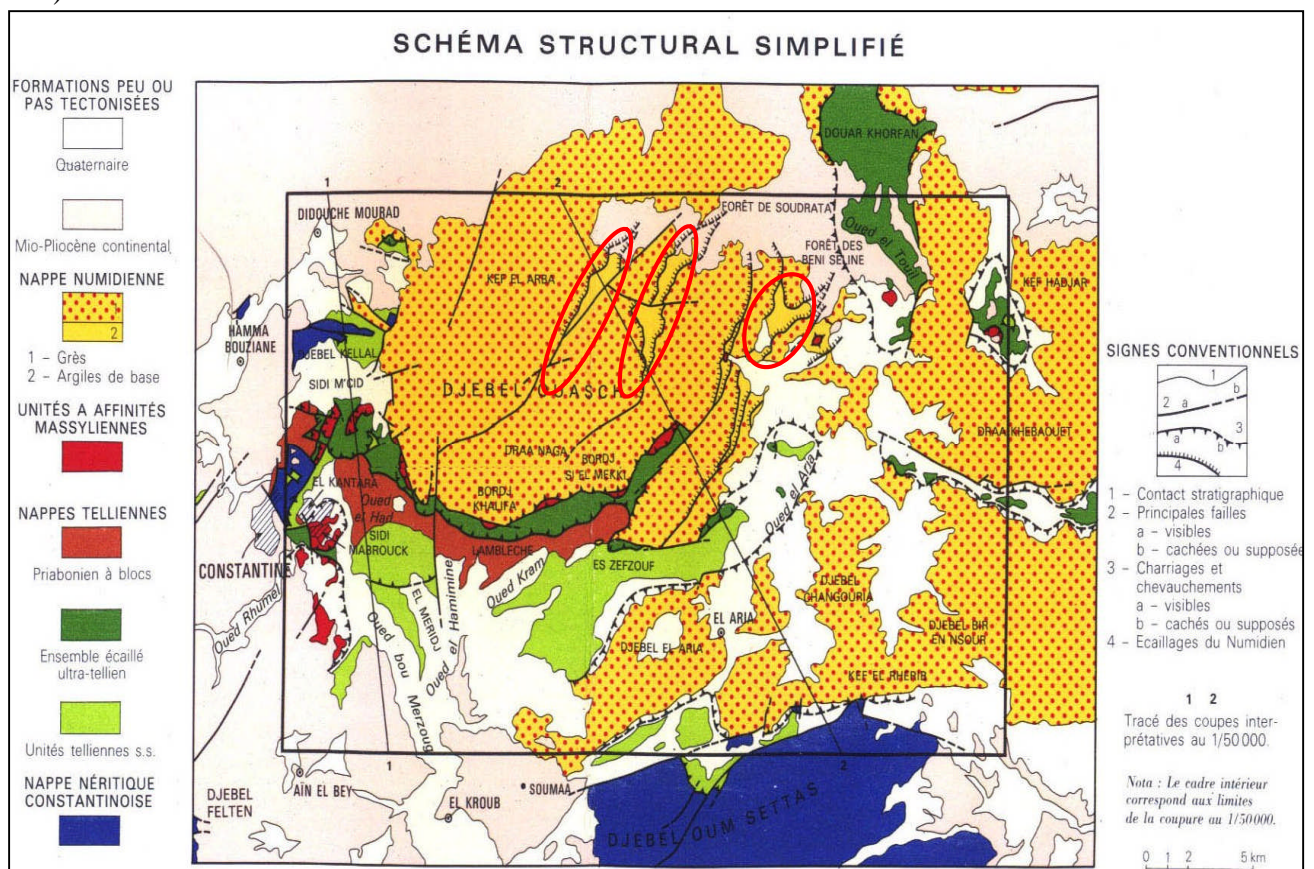


Figure II.24 : schéma structural simplifié de la carte géologique d'El Haria, feuille n°74 échelle 1/50 000

Grace aux sondages carottés réalisés par TREVI (laboratoire Italien) au profit de l'entreprise Cosider en 2017 à différentes profondeurs (comprise entre 107m et 128m), nous avons pu décrire ces formations de près. Elles possèdent une teinte grisâtre parfois verdâtre avec un aspect schisteux. Les plans de schistosité sont marqués par la présence d'un matériau fin blanc, il s'agit de la Kaolinite (d'après les analyses minéralogiques). Parfois ces argilites ont une couleur rougeâtre et verdâtre (Fig. II.25).

Ces argilites ne sont pas carbonatées où les analyses chimiques ont montré un taux de carbonate (CaCO_3) très faible.

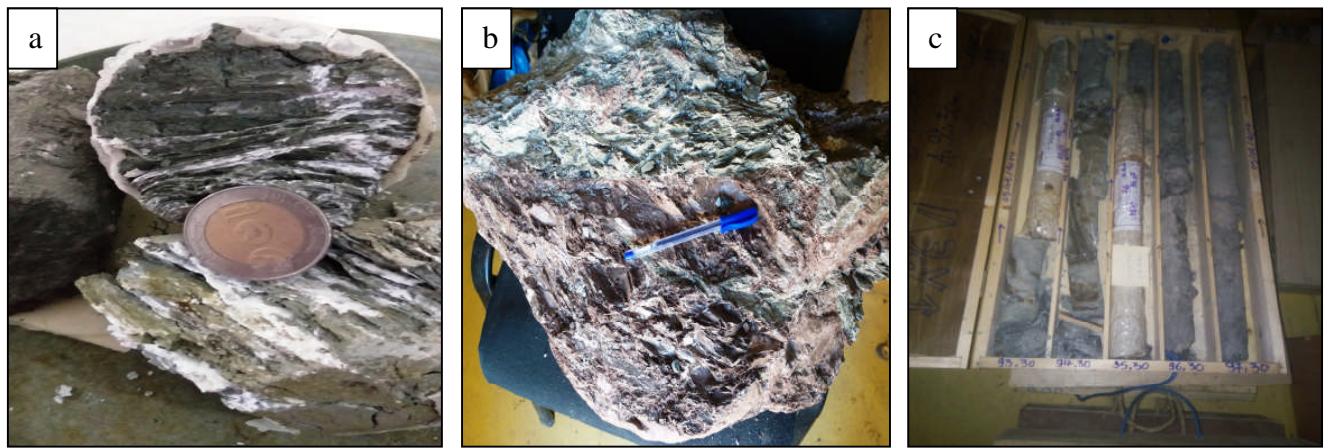


Figure II.25 : les argilites sous numidiennes (a : argilite schisteuse grise avec la Kaolinite, b : argilite schisteuse de couleur rougeâtre à verdâtre, c : caisses des sondages carottés réalisés par laboratoire *TREVI* au profit de l'entreprise *Cosider* en 2017)

II.4.2 Description des grès:

Des échantillons de grès ont été prélevés également des niveaux gréseux (Fig. II.26) pour faire des lames minces afin d'étudier sa composition minéralogique.



Figure II.26 : caisse montre les niveaux gréseux

L'observation des lames minces au microscope polarisant a montré que ces grès sont composés essentiellement des grains de quartz (95 % environ), ils sont sub arrondis (Fig. II.27), les clastes sont caractérisés par un classement moyen parfois mal classé.

Notant la présence de la biotite mais avec un pourcentage très faible, parfois elle se trouve à l'intérieur du quartz (Fig. II.28). Elle est automorphe avec une couleur brune foncée, elle présente les traces fines et régulières des plans de clivages, la biotite se trouve altéré en chlorite verte (Fig. II.29).

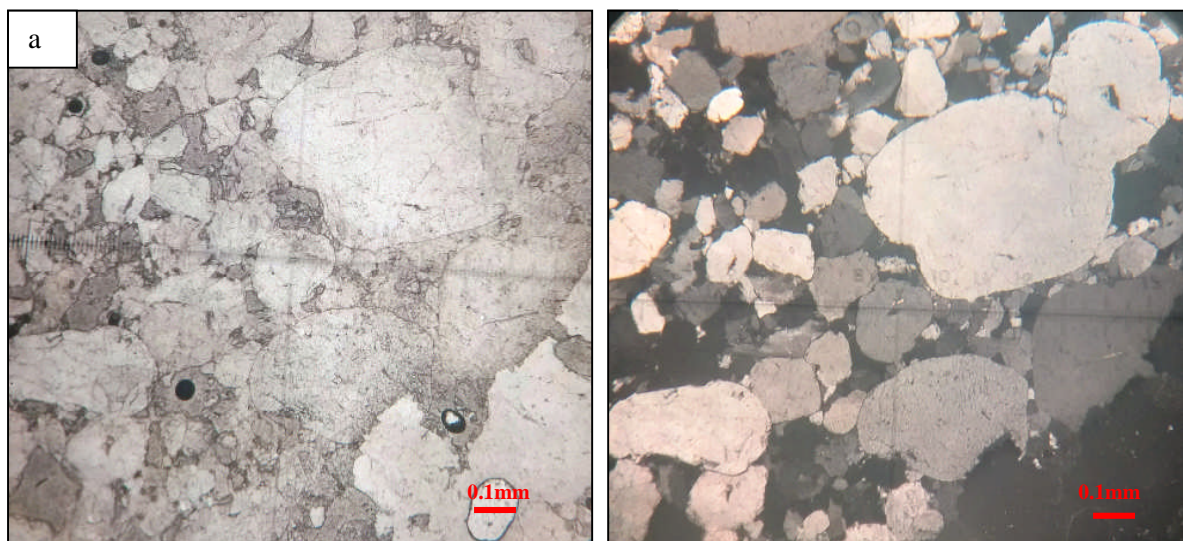


Figure II.27 : a : le quartz en LPNA, b : le quartz en LPA grossissement objectif X10

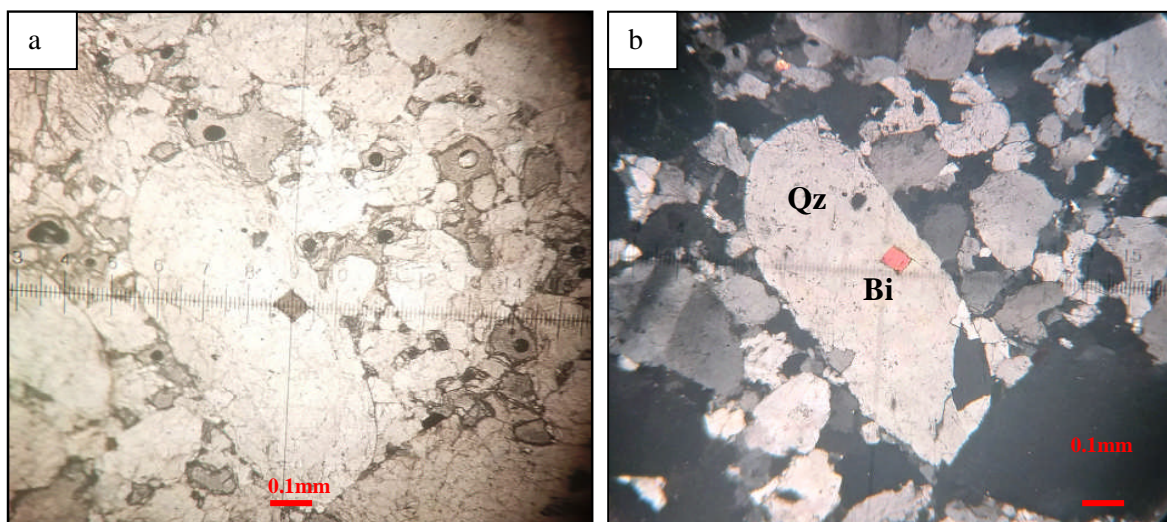


Figure II.28 : a : l'aspect de la biotite en LPNA, b : la biotite en LPA, grossissement objectif X10

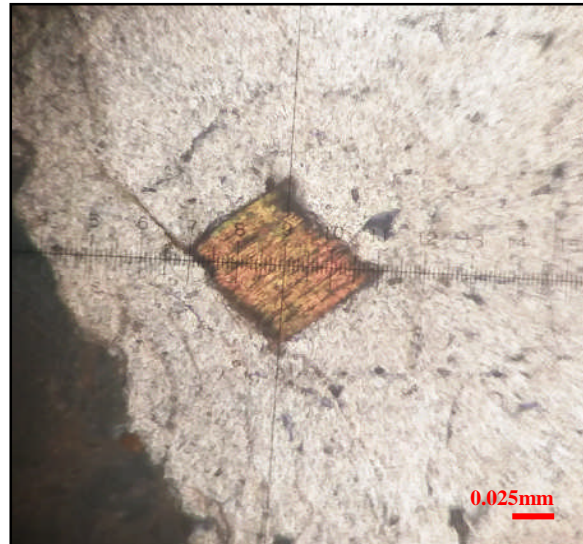


Figure II.29 : l'aspect de la biotite altérée en LPNA, grossissement objectif X40

II-5 Aperçu tectonique:

II.5.1 Introduction:

Le constantinois central appartient aux zones externes de la chaîne des Magrébides d'Algérie Nord Orientale. L'édifice orogénique de la chaîne des Magrébides est le résultat des effets cumulés de plusieurs phases tectoniques tertiaires (*Aris. Y, 1994*). Cette structuration est rattachée à la fermeture du sillon des flyschs dont le contenu est largement charrié au dessus des zones externes (*Aris. Y, 1994*). Ces dernières du fait de leur appartenance africaine enregistrent des déformations influencées par l'héritage structural anté tertiaire (*N. Kazi tani, 1986, cité in Aris. Y, 1994*).

II.5.2 Les phases tectoniques :

➤ **Au trias :** cette période correspond à une période de distension généralisée accompagnée d'un volcanisme basique contemporain à une sédimentation argilo-gypseuse dominante (*Burau. D, 1970 ; Guirau. R, 1973 cité en Aris. Y, 1994*).

➤ **Au Jurassique inférieur :**

Une subsidence différentielle a été provoquée par la distension du Trias où elle se poursuit au crétacé inférieur lors de la structuration générale Est Ouest qui caractérise les bassins magrébins (*in Aris. Y, 1994*).

Concernant la plate forme constantinoise, elle se différencie à partir de la fin du Lias comme un haut fond à sédimentation calcaire dominante (*in Aris. Y, 1994*).

➤ **Au Jurassique moyen et supérieur :**

A cette période ainsi qu'au crétacé, la tectonique mésozoïque a été apparue par des changements latéraux de faciès, des lacunes de dépôts et des discordances angulaires (*Aris.*

Y, 1994). La phase du Jurassique supérieur est marquée par des modifications paléogéographiques majeures concernant le régime sédimentaire (*Benet. B, 1981 in Aris. Y, 1994*). Dans la plate forme Constantinoise, plusieurs auteurs tels que : *Deleau. P (1938)* ont décrit une organisation Crétacée en haut fonds et dépression suivant une direction Nord Est-Sud Ouest qui serait attachée à la structuration du soubassement Jurassique.

En allant vers le Sud, au niveau de l'avant pays, cette phase est manifestée par une sédimentation type continental au cour du Néocomien, cette sédimentation ne présente aucune discordance angulaire notable (*Laffitte. R, 1939 in Aris. Y, 1994*).

➤ **Phase anté Sénonienne :** Il s'agit de la phase de compression accompagnée à des plis Est Ouest (*in Aris. Y, 1994*). Dans la partie Nord du Constantinois, ces structures sont alignées suivant l'accident N100°E qui se suit du massif du M'Cid Aicha au massif Debbar situés au nord de Constantine (*Aris. Y, 1994*) (Fig. II.30).

➤ **Phase priabonienne :** c'est la phase compressive qui contribue à la fin d'un grand cycle sédimentaire ayant débuté dès le Trias (*Aris. Y, 1994*). Elle correspond aux formations à blocs de Constantine dont l'équivalent est maintenant connu dans tout le constantinois (*Coiffait. P.E. et Vila. J.M, 1977*). Ces formations faisant partie du domaine tellien renferment des éléments appartenant au domaine ultra tellien ce qui témoigne de l'existence d'événements structuraux ayant rapproché largement les domaines paléogéographiques (*Coiffait. P.E. et Vila. J.M, 1977*).

➤ **La tectonique alpine:** il s'agit d'une phase compressive, durant le Miocène, elle affecte tout l'orogénie magrébin. Elle est caractérisée dans toute l'Algérie Nord orientale par un raccourcissement Nord Sud (*en Aris. Y, 1994*).

Cette tectonique est responsable du déplacement en masse des épaisses séries néritiques constantinoise d'où les termes « mole d'Ain Mila, mole néritique constantinois et dalle néritique constantinoise » ont été abandonnés. Donc, il est préférable de le remplacer : de point de vu paléogéographique, c'est le domaine néritique constantinois, et de point de vue structural, la nappe néritique constantinoise (*Vila en Bassetto et al, 1972*).

➤ **La tectonique récente :** il s'agit de la phase post nappes, à l'échelle du constantinois, les structures attribuées à cette tectonique évoquent une tectonique polyphasée manifestée par des plis, des failles inverses, parfois décrochantes ou chevauchantes et par des failles normales plus tardives (*en Aris. Y, 1994*).

Vila J.M et Coiffait. P. E ont considéré que les déformations post-nappes aux environs de Constantine sont indiquées par des failles normales orientées suivant des directions variables, ces failles sont localisées en périphéries des massifs calcaires Jurassico-Crétacé.

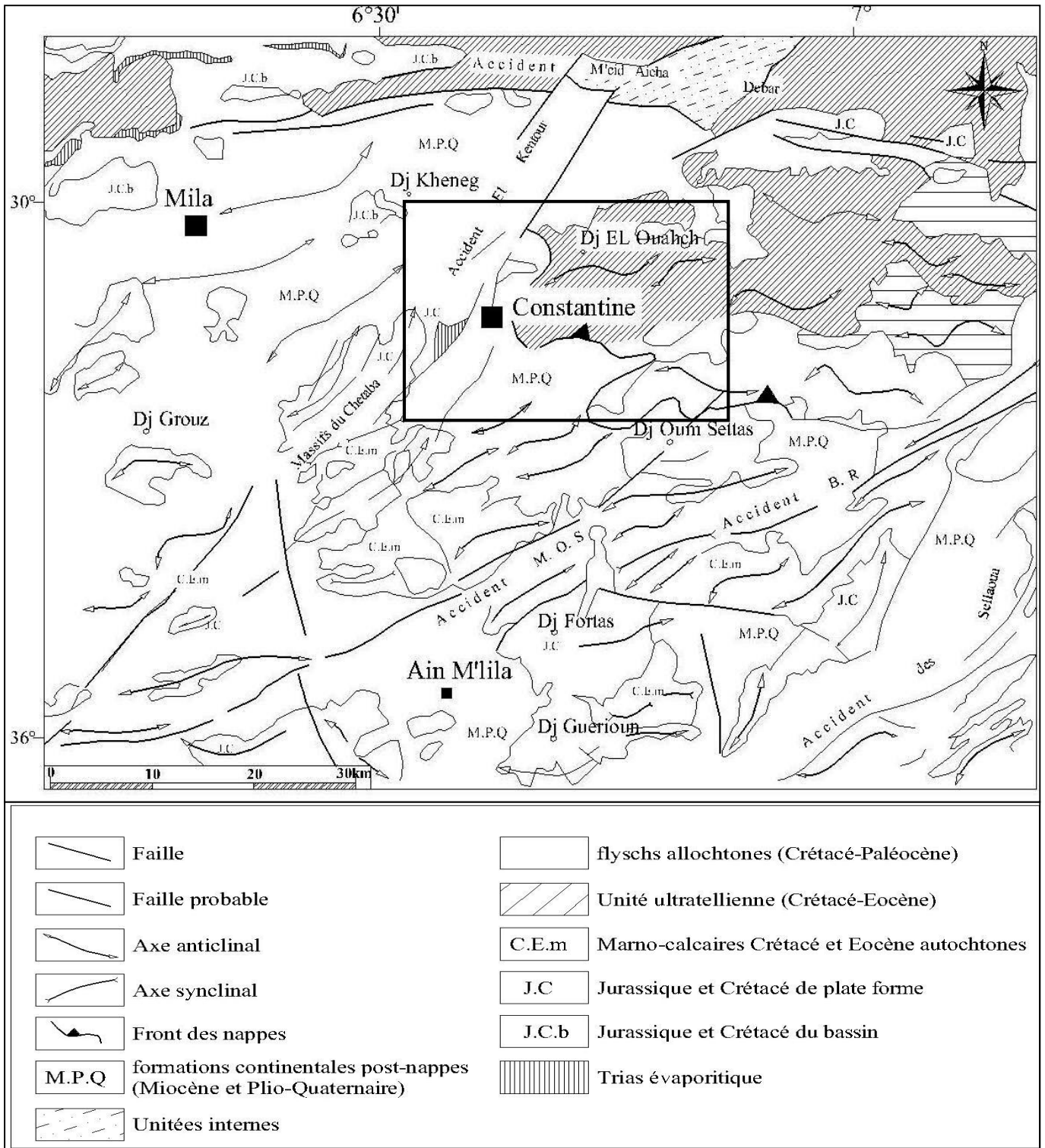


Figure II.30 : carte structurale dans le constantinois central (Aris. Y, 1994).

II.6 Conclusion :

L'exploration approfondie du contexte géologique présentée dans ce chapitre a permis de jeter une lumière significative sur les processus dynamiques qui ont façonné la région étudiée ainsi que les différentes formations géologiques qui la constituent.

La région de Constantine fait partie de la chaîne des Magrébides qui est une partie intégrante de la chaîne Alpine. Elle est caractérisée par des formations géologiques allant du secondaire au Quaternaire.

Le bassin de Constantine s'étend de l'Ouest à l'Est entre la chaîne de Mouïa et du Sidi Driss au nord, et les chaînons de Chettaba au Sud. Le système orographique est assez complexe, le massif montagneux de Chettaba est composé d'une crête principale (Djebel Zouaoui) et une crête secondaire (Djebel Karkara).

Le rocher du Kheneg est un compartiment isolé au milieu du bassin tertiaire de la chaîne créacé entaillée par la gorge profonde du Rhumel. Quant au rocher de Constantine, il constitue un pilier calcaire au flanc du massif gréseux de Djebel El Ouahch (*Jacob. H, Ficheur. E, 1899*).

Djebel El Ouahch fait partie de la nappe numidienne où le numidien repose sur les flyschs massyliens et sur les terrains telliens (*Hoyez. B, 1989*).

Il est composé des grès numidiens massifs dont le sud de ce massif est marqué par des lambeaux de flysch massylien à microbrèches, tout cet ensemble repose sur les formations écaillées ultra-telliennes allant du Barrémien au Lutétien inférieur.

Au niveau de Dj El Ouahch, les argilites sous numidiennes (à Tubotomaculum) se situent au dessous des massifs gréseux et elles affleurent au Nord Est du massif gréseux.

Elles possèdent une teinte grisâtre parfois verdâtre avec un aspect schisteux où les plans de schistosité sont marqués par la présence de la kaolinite. Parfois ces argilites se présentent en couleur rougeâtre et verdâtre.

TROISIEME CHAPITRE

ETUDE HYDRO-CLIMATOLOGIE

III.1 Introduction :

Pour l'étude du mécanisme des instabilités souterraines, il est impératif d'étudier les données climatiques à fin de pouvoir déterminer les termes du bilan hydrologique, à savoir les précipitations, l'évapotranspiration, le ruissellement et surtout les infiltrations, car cette dernière est le facteur essentiel pour la saturation des sols en profondeur ce qui conduit à la dégradation de leurs caractéristiques mécaniques.

L'étude hydrologique d'une région dépend d'abord de son climat, de sa topographie et surtout de sa géologie. D'où l'étude des paramètres climatiques joue un rôle important dans l'établissement d'un bilan hydrologique afin de comprendre les différents mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux de surface et souterraines dont les phénomènes météorologiques et surtout pluviométriques jouent un rôle fondamental dans toute l'étude d'aménagement.

La région de Constantine est caractérisée par un climat méditerranéen avec des précipitations irrégulières (Fig. III.1) et une longue période de sécheresse estivale.

Le climat s'identifie par des hivers froids et des étés chauds, dus essentiellement à l'influence de la continentalité.

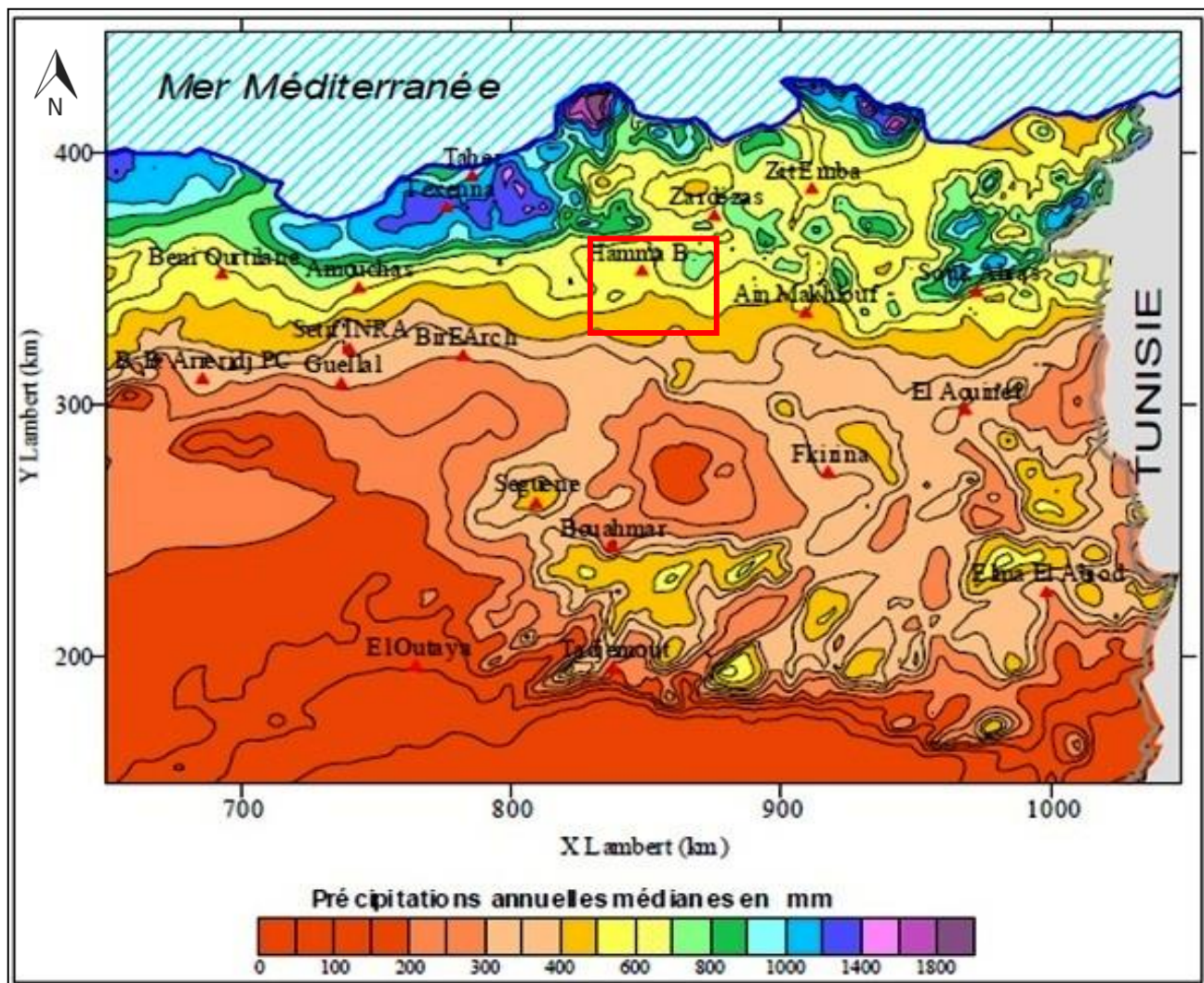


Figure III.1 : carte des précipitations annuelles moyennes de l’Est Algérien (*établie d’après A.R.N.H 1993, données de 60 ans, période du 1^{er} septembre 1921 au 31 Aout 1989*).

Pour la région d’étude, nous disposons des données climatiques pour une période de 20ans (1999/2000 – 2018/2019) de la station de Constantine, le tableau III.1 montre les coordonnées géographiques de cette station.

Station météorologique	Code de la station	Longitude	Latitude	Altitude	Période d’observation
Constantine	60417	6.62°E	36.28°N	694m	1999-2018

Tableau III.1 : les coordonnées géographiques de la station météorologique de Constantine et la période d’observation

III.2 Les facteurs climatiques :

III.2.1 Les précipitations :

Les précipitations constituent une composante essentielle du cycle de l'eau. Elles permettent de renouvellement total ou partiel des nappes par le biais des infiltrations et elles conditionnent l'écoulement saisonnier et le régime des cours d'eau.

En général, quatre aspects ont été discutés, il s'agit du coefficient pluviométrique et des répartitions saisonnières, mensuelles et annuelles.

III.2.1.1 Les précipitations mensuelles :

Les valeurs des précipitations moyennes mensuelles de la station de Constantine durant la période allant de 1999 jusqu'au 2018 sont données dans le tableau ci-dessous :

Mois	sept	Octo	Nove	Déce	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout	Totale
P (mm)	33.82	39.12	49.56	62.71	55.25	51.01	57.68	46.85	37.04	12.58	7.60	26.02	479.22

Tableau III.2 : précipitations moyennes mensuelles à la station de Constantine (1999-2018).

D'après les résultats des valeurs des précipitations moyennes mensuelles (Fig. III.2) on constate que :

- Le mois le plus pluvieux est le mois de Décembre avec une précipitation moyenne mensuelle égale à 62.71mm.
- Tandis que le mois le plus sec est celui de Juillet avec une valeur de précipitations moyennes mensuelle égale à 7.6mm.
- La hauteur moyenne mensuelle est de 39.93mm

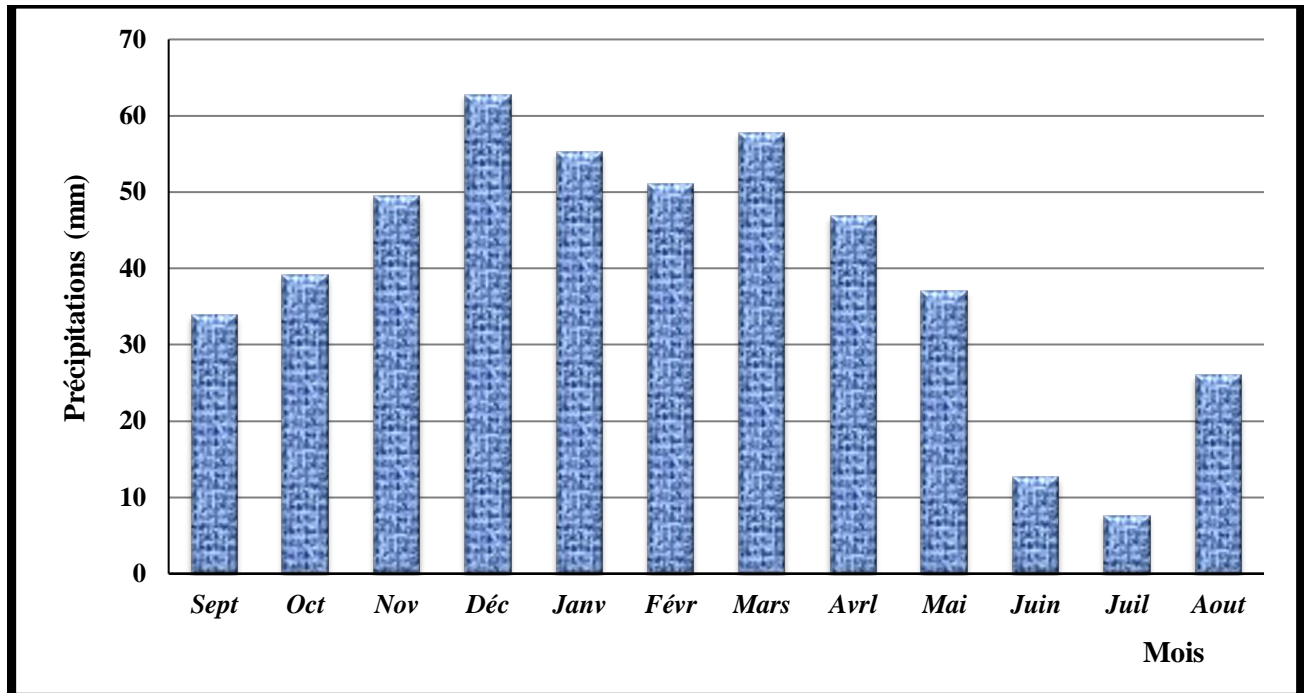


Figure III.2 : Variations des précipitations moyennes mensuelles (en mm) à la station de Constantine (1999-2018).

III.2.1.2 Les précipitations annuelles :

D'après les données des précipitations annuelles, on remarque que la valeur moyenne est égale à 479.22mm.

L'analyse de la courbe des variations interannuelle des précipitations (Fig. III.3) durant les 20ans allant de 1999 au 2018 montre une irrégularité dont l'année (2003/2004) est la plus arrosée avec une valeur de précipitation égale à 767.6mm tandis que l'année la plus sèche est celle 2017/2018 ayant une valeur de précipitation égale à 300.8mm.

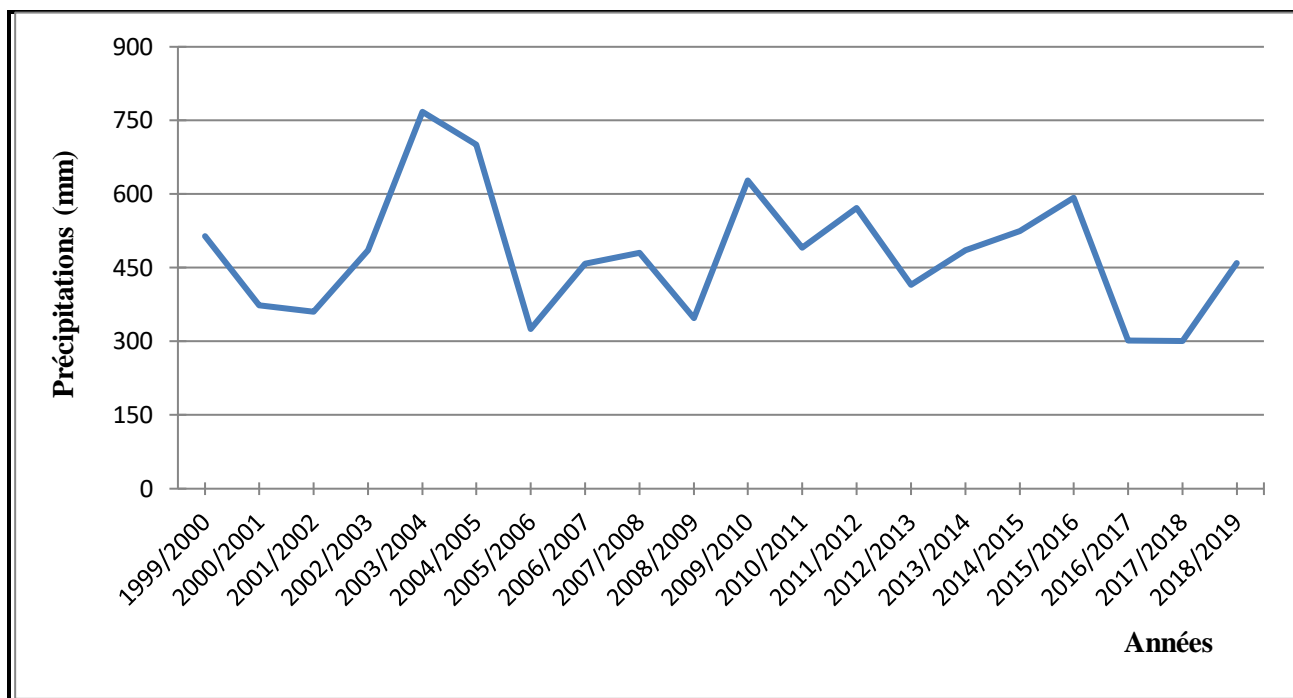


Figure III .3 : Variations des précipitations annuelles (en mm) pour la station de Constantine (1999-2019).

III.2.2 coefficient pluviométrique :

La variabilité interannuelle des précipitations est exprimée par le coefficient pluviométrique (CP). Ce paramètre est très important dans la détermination des années excédentaires et des années déficitaires. Il est obtenu par le rapport de la pluviométrie d'une année à la pluviométrie moyenne d'une série à une station donnée :

$$CP = \frac{P}{\bar{P}}$$

Avec :

- CP : coefficient pluviométrique.
- P : hauteur des pluies annuelles (mm).
- \bar{P} : Moyenne annuelle pluviométrique (mm).

Nous avons deux cas :

- ✚ Si $CP > 1$: année excédentaire.
- ✚ Si $CP < 1$: année déficitaire.

Remarque : la pluviométrie annuelle moyenne (\bar{P}) de la station de Constantine est **479.22mm**.

Année	P (mm)	CP	Type de l'année
1999/2000	514,2	1,07	An. Exc
2000/2001	373,5	0,78	An. Défi
2001/2002	360,1	0,75	An. Défi
2002/2003	485,2	1,01	An. Exc
2003/2004	767,6	1,60	An. Exc
2004/2005	701	1,46	An. Exc
2005/2006	325,5	0,68	An. Défi
2006/2007	458,3	0,96	An. Défi
2007/2008	480,7	1,00	An. Exc
2008/2009	347,9	0,73	An. Défi
2009/2010	627,6	1,31	An. Exc
2010/2011	490,6	1,02	An. Exc
2011/2012	571,8	1,19	An. Exc
2012/2013	415,6	0,87	An. Défi
2013/2014	485,5	1,01	An. Exc
2014/2015	524,3	1,09	An. Exc
2015/2016	592,4	1,24	An. Exc
2016/2017	301,7	0,63	An. Défi
2017/2018	300,8	0,63	An. Défi
2018/2019	460	0,96	An. Défi

Tableau III.3 : Précipitations annuelles (mm) et coefficients pluviométriques de la station de Constantine (1999/2000-2018/2019).

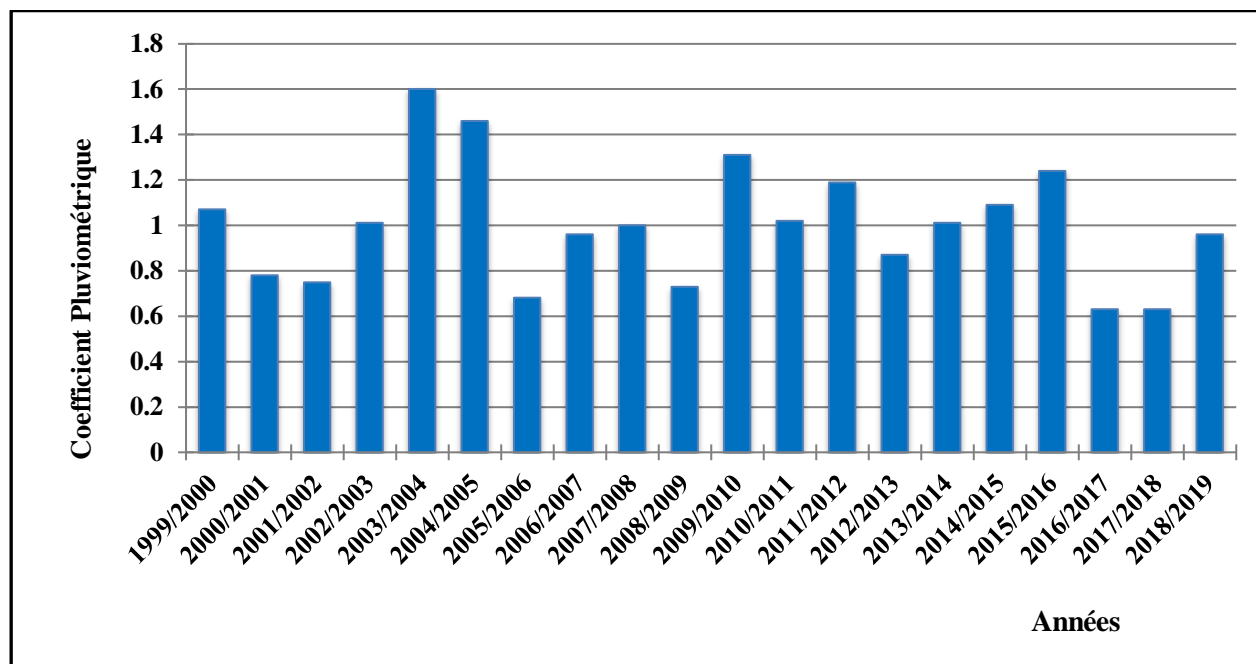


Figure III.4 : Les variations du coefficient pluviométrique à la station de Constantine (1999-2018).

D'après le tableau III.3 et la figure III.4, on constate une évolution alternative entre les années déficitaire et excédentaire avec un maximum et un minimum de l'ordre de 700mm (2003/2004: $P=767,6\text{mm}$) et 300 mm (2001/2002 : $P=300,8\text{mm}$) respectivement et une limite de 600 mm qui différencier les années déficitaires ($P<500$ mm) des années excédentaires ($P>500$ mm).

III.2.3 La température :

La température de l'air est un paramètre ayant une grande influence sur le bilan hydrologique, elle agit directement avec les autres facteurs météorologiques (précipitation, insolation, etc....) sur le climat d'une région. C'est par ces mesures qu'on essaye de montrer le rôle important de l'évapotranspiration sur l'écoulement et de déterminer les saisons.

Elle constitue un facteur essentiel et déterminant dans l'étude de l'évaporation et l'évapotranspiration.

Les observations des températures extrêmes dont on dispose, sont prises au niveau de la station de Constantine (1999-2018) (Tableau III.4).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moy/an
T (°C)	20.77	16.83	10.79	7.84	7.61	8.4	11.2	14.55	18.28	22.79	25.84	27.77	15.80

Tableau III.4 : Température moyenne mensuelle (°C) à la station de Constantine (1999 2018)

A partir des données enregistrées à la station de Constantine, l'histogramme représentatif (Fig. III.5) des variations de températures moyennes mensuelles sur une période de 20 ans (1999-2018) montre que les mois les plus froids sont les mois de Décembre et Janvier avec une minimale des températures de l'ordre 07.84°C et 07.61 °C respectivement.

En revanche, les mois les plus chauds sont les mois de Juillet et d'Août avec une maximale des températures de 25.84°C et 24.77 °C respectivement. Notant que la moyenne mensuelle est de 15.80°C.

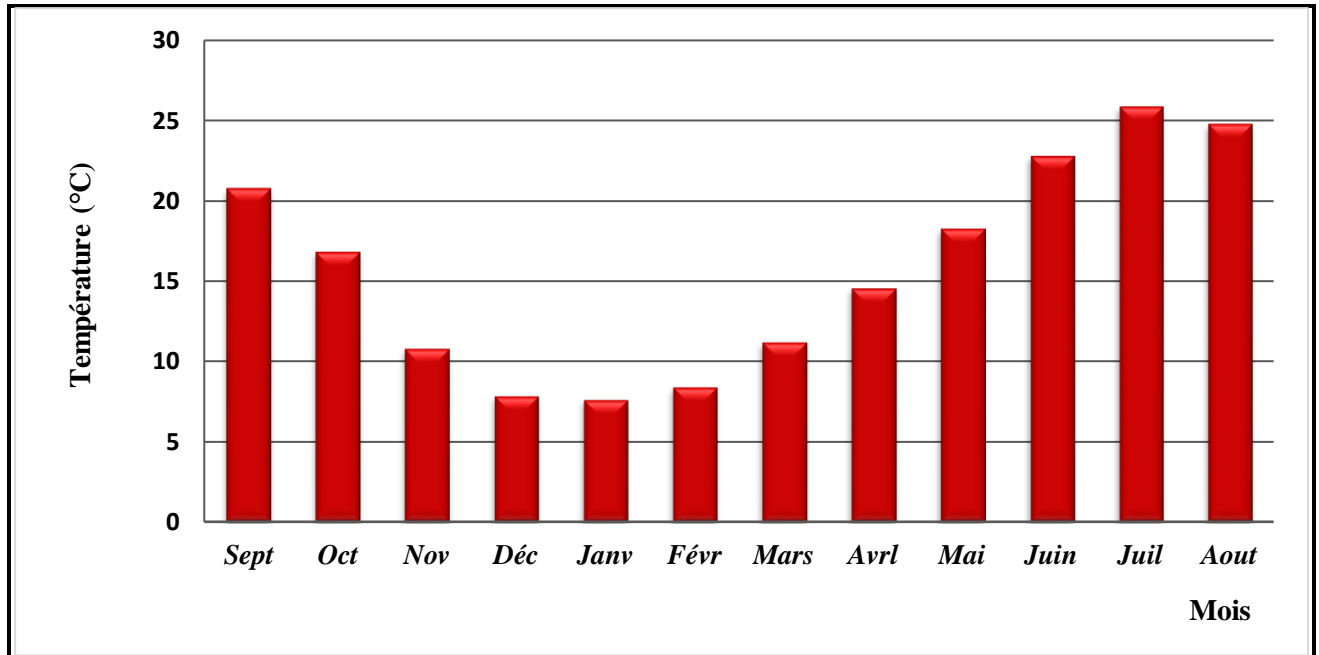


Figure III.5 Variations des températures moyennes mensuelles (°C) pour la station de Constantine (1999-2018).

III.2.4 Diagramme ombrothermique :

D'après le diagramme ombrothermique (Fig. III.6), on distingue deux périodes :

- Une période humide caractérisée par des précipitations relativement élevées (62,71mm), qui s'étale du début de mois d'Octobre jusqu'au mois de Mai.
- Une période sèche qui s'étend du la fin du mois de Mai jusqu'au début du mois d'Octobre avec une température maximale de l'ordre 25.84°C au mois de Juillet.

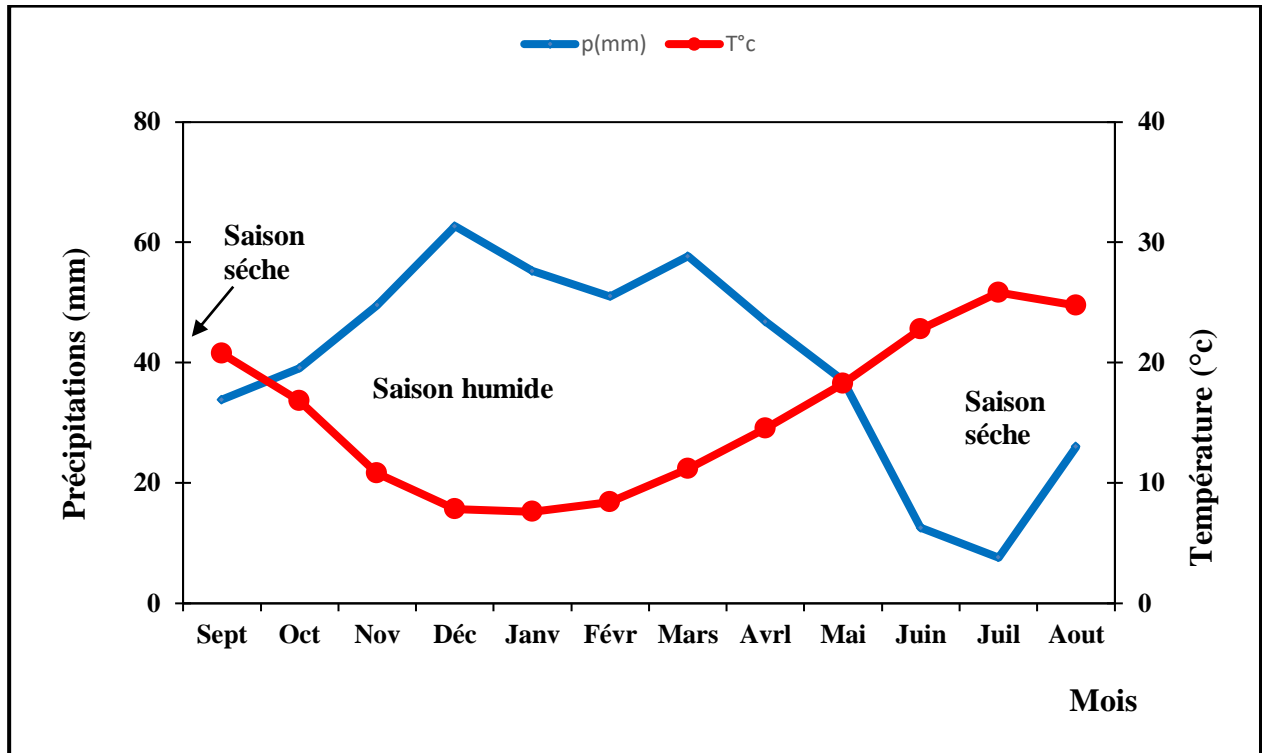


Figure III.6 : Diagramme ombrothermique à la station de Constantine (1999-2018).

III.2.5 Détermination du type du climat :

III.2.5.1 Indice de Martonne (1926) :

La connaissance des caractéristiques et le type du climat basé sur l'indice d'aridité qui sont étudiés par la méthode qui est proposée par De Martonne. Cet indice est défini en fonction de la température et de la précipitation, et donné par la formule suivant :

$$A = P / (T + 10)$$

Avec :

- **A** : Indice d'aridité annuelle
- **P** : Précipitations moyennes annuelles en mm.
- **T** : Températures moyennes annuelles en °C.

Selon Martonne E. De : Pour

- ❖ $30 < IA < 55$: climat humide.
- ❖ $20 < IA < 30$: climat tempéré.
- ❖ $10 < IA < 20$: climat semi-aride.
- ❖ $7.5 < IA < 10$: climat steppique.
- ❖ $5 < IA < 7.5$: climat désertique.
- ❖ $IA < 5$: climat hyperaride.

L'application de cette formule, donne les résultats récapitulés dans le tableau n°05.

Station	\bar{P} (mm)	T (°C)	I_A
Constantine	479.22	15.80	18.57

Tableau III.5 : Valeur de l'indice d'aridité annuel à la station de Constantine.

Selon la valeur obtenue, nous pouvons affirmer que le climat de la région d'étude est de type **semi-aride**.

III.3 Bilan d'eau :

L'établissement du bilan hydrique pour une région et dans une période donnée se fait par la comparaison entre les apports et les pertes en eau dans cette région et pour cette période.

Les apports d'eau sont effectués par les précipitations ; les pertes sont essentiellement dues à la combinaison de l'évaporation et la transpiration, que l'on désigne sous le terme d'évapotranspiration.

Le bilan hydrique (Fig. III.7) englobe l'étude des paramètres suivants :

- ✚ L'évapotranspiration.
- ✚ Les écoulements de surface ou ruissellement.
- ✚ L'infiltration.

III.3.1 L'évapotranspiration :

L'évapotranspiration est le terme le plus important du bilan hydrologique après les précipitations. L'évapotranspiration réunit l'ensemble de deux phénomènes :

- L'évaporation : c'est l'ensemble des phénomènes qui transforme l'eau en vapeur par un processus spécifiquement physique ; le principale facteur régissant l'évaporation est la radiation solaire.
- La transpiration : la transpiration est un phénomène biologique lié à la couverture végétale ; à son de développement et à sa nature.

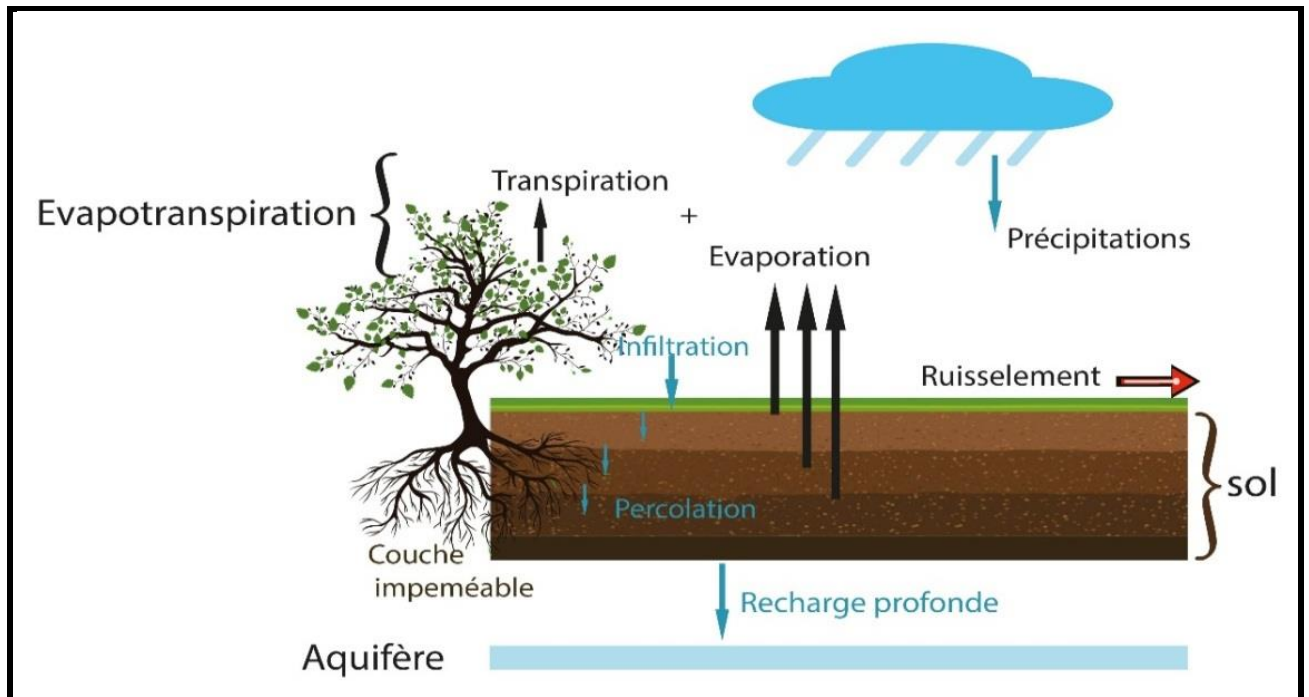


Figure III.7 : Représentation schématique du bilan évapotranspiration/alimentation de la nappe/ruissellement.

III.3.1.1 : Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) :

L'évapotranspiration réelle correspond à la somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et par les plantes quand le sol est à une certaine humidité et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire spécifique. L'ETR peut être déterminé par plusieurs formules :

a/ Formule de L .Turc (1954) : Elle permet d'évaluer directement l'ETR annuelle à partir de la hauteur annuelle de la pluie et de la température moyenne annuelle :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Avec :

- ETR : évapotranspiration réelle en mm/an.
- P : hauteur annuelle de pluie en mm.
- L : pouvoir évaporant : c'est une limite vers laquelle tend l'ETR lorsque P devient grand.
- $L = 300 + 25t + 0.05t^3$.
- t : température annuelle en °C.

On a pour la station de Constantine :

$P=479.22\text{mm}$; $t=15.80^\circ\text{C}$.

$L = 300 + 25(15.80) + 0.05 (15.80)^3 = 892.22$

$$\text{ETR} = \frac{479.22}{\sqrt{0.9 + \frac{(479.22)^2}{(892.22)^2}}}$$

ETR=439.58mm selon la formule de Turc.

III.3.1.2 Estimation L'évapotranspiration potentielle ETP : (ou évapotranspiration de référence) :

C'est la quantité maximale d'eau susceptible d'être perdue en phase vapeur, sous un climat donné, par un couvert végétal continu spécifié (gazon) bien alimenté en eau et pour un végétal sain en pleine croissance. Elle comprend donc l'évaporation de l'eau du sol et la transpiration du couvert végétal pendant le temps considéré pour un terrain donné.

Plusieurs formules permettent d'évaluer l'ETP à partir de différentes mesures climatologiques.

III.3.2 Formule de Thornthwaite (bilan d'eau) :

La formule de C.W. Thornthwaite (1948), qui utilise la température de l'air et la latitude de la station est donnée par l'expression suivante :

$$ETP = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a K$$

Avec :

- ETP : évapotranspiration potentielle du mois (en mm).
- T : température moyenne mensuelle de la période (en °C).
- I : indice thermique annuel qui représente la somme des indices mensuels (i) :

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad \text{Avec : } i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.5}$$

$$a = \left(\frac{1.6}{100} \right) I + 0.5$$

K : coefficient d'ajustement mensuel lié à la latitude.

a = l'exposant climatique donné par la formule.

Les valeurs obtenues sont corrigées par un coefficient de correction k qui dépend de la latitude du bassin.

La méthode du bilan d'eau selon *C.W. Thornthwaite (1955)* est basée sur la notion de réserve en eau facilement utilisable (RFU). On admet que le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau (RFU), cette eau peut être reprise par l'évaporation par l'intermédiaire des plantes. Pour notre cas, la région de Constantine, on prend $RFU = 100$ mm.

La satisfaction de l'ETP est prioritaire sur l'écoulement, c'est-à-dire avant qu'il y ait écoulement il faut satisfaire ce qu'on appelle le pouvoir évaporant ($ETP = ETR$). Par ailleurs le remplissage de la RFU est également prioritaire sur l'écoulement.

On établit ainsi un bilan à l'échelle mensuelle à partir de la pluie du mois, de l'ETP et de RFU. Les résultats sont montrés dans le tableau n°06.

paramètres mois	P (mm)	T (°C)	I	K	ETP (mm)	ETR (mm)	EX (mm)	DA (mm)	RFU (mm)	BH
S	33,82	20,77	8,6	1,03	94,3	33,8	0,0	60,5	0,0	-60,5
O	39,12	16,83	6,3	0,97	62,5	39,1	0,0	23,4	0,0	-23,4
N	49,56	10,79	3,2	0,86	26,4	26,4	0,0	0,0	23,1	23,1
D	62,71	7,84	2,0	0,81	14,6	14,6	0,0	0,0	71,2	48,1
J	55,25	7,61	1,9	0,87	14,9	14,9	11,6	0,0	100,0	40,3
F	51,01	8,4	2,2	0,85	17,2	17,2	33,8	0,0	100,0	33,8
M	57,68	11,2	3,4	1,03	33,7	33,7	24,0	0,0	100,0	24,0
A	46,85	14,55	5,0	1,10	55,6	55,6	0,0	0,0	91,2	-8,8
M	37,04	18,28	7,1	1,21	89,5	89,5	0,0	0,0	38,7	-52,5
J	12,58	22,79	9,9	1,22	130,4	51,3	0,0	79,1	0,0	-117,8
J	7,6	25,84	12,0	1,24	163,4	7,6	0,0	155,8	0,0	-155,8
A	26,02	24,77	11,3	1,16	142,5	26,0	0,0	116,4	0,0	-116,4
Total	479,22	15,80	73,0	/	845,1	409,9	69,4	435,2	/	-365,8

Tableau III.6 : Le bilan hydrique selon C. W. Thornthwaite (1955) à la station de Constantine (1999-2018).

III.3.2.1 : Représentation graphique du bilan hydrique :

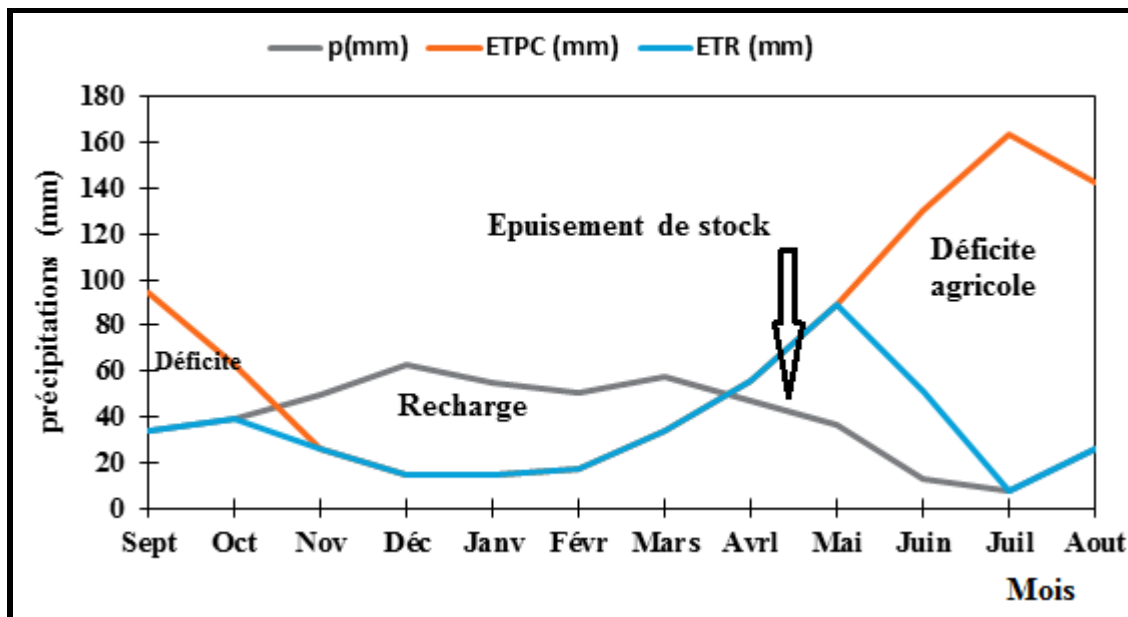


Figure III.8 : Représentation graphique du bilan hydrique d'eau selon la méthode de Thornthwaite à la station de Constantine (1999-2018).

III.3.2.2 Interprétation du bilan hydrique :

Le bilan hydrique de la zone d'étude établi par la méthode de (*Thornthwaite, 1948*) permet de ressortir les traits suivants (Fig. III.8):

- l'évapotranspiration potentielle (ETP) prend son maximum au mois de Juillet (163.4 mm), ce qui provoque un déficit agricole nécessitant une irrigation. Elle se minimise au mois de Janvier avec 14.6mm.
- l'évapotranspiration réelle (ETR) atteint son maximum au mois de Mai 89.5 mm et se minimise au mois de Juillet avec 7.6 mm
- La réserve facilement utilisable (RFU) commence à se reconstituer à partir du mois de Novembre pour atteindre son maximum (100 mm) au mois de Janvier jusqu'au mois d'Avril période pendant laquelle apparaît un excédent (ECX) max de l'ordre de 33.8mm.
- La RFU décroît à partir du mois d'Avril jusqu'à l'épuisement totale du stock au mois de Juin d'où l'apparition du déficit agricole (DA) qui s'étale jusqu'à la fin du mois d'Octobre, une période qui traduit un déficit agricole ce qui nécessite une irrigation par drainage.

III.3.3 : Le ruissellement

Le ruissellement de surface est la quantité d'eau, qui au cours d'une précipitation, échappe à l'infiltration et à l'évapotranspiration.

Le ruissellement est calculé par la formule de Tixeront-Berkaloff :

$$\text{Si : } P < 600 \text{ mm } R = \frac{P^3}{3(ETP)^2}$$

$$\text{Si : } P > 600 \text{ mm } R = P^3/3$$

Avec :

R : ruissellement en m.

P : précipitation moyenne annuelle en m.

ETP : évapotranspiration potentielle en m.

Et comme $P < 600$ mm, on va utiliser la première formule :

Le ruissellement pour la station de Constantine:

$$R = (0.47922)^3 / 3 * (0.8451)^2 = 0.05136 \text{ m}$$

$$\boxed{R = 51.36 \text{ mm}}$$

III.3.4 L'infiltration

L'infiltration permet de déterminer quelle fraction de la pluie va alimenter les écoulements souterrains et participer aussi à la recharge des nappes souterraines.

L'infiltration est calculée par la formule suivante :

$$I = P - (R + ETR)$$

P : Précipitation moyenne annuelle en mm.

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle en mm.

R : Ruissellement annuelle en mm.

I : Infiltration efficace moyenne annuelle en mm

Les résultats sont récapitulés dans le tableau n°07 :

P (mm)	R (mm)	ETR (mm)	I (mm)
479.22	51.36	409.9	17.96
100%	10.71%	85.53%	3.75%

Tableau III.7: Détermination des paramètres de la formule du bilan

III.4 Conclusion :

Les résultats obtenus de ce chapitre (étude hydro-climatologie) ont montré que la région d'étude est soumise à un climat semi-aride, caractérisé par deux saisons distinctes :

- Une première saison allant du mois d'Octobre jusqu'au mois de Mai caractérisée par une précipitation et une température moyennes mensuelles de 49.90 mm et 11.93 °C respectivement.
- La deuxième saison débute de la fin du mois de Mai en se terminant au début du mois d'Octobre avec une précipitation et température moyennes mensuelles de 20 mm et 23.54 °C respectivement avec une précipitation et température moyennes annuelles de l'ordre de 479.22mm et 15.80 °C respectivement.

Le calcul du bilan hydrique relatif au bassin de Constantine, selon la méthode de Thornthwaite, a permis d'apprécier la part respective de chacun des principaux termes du bilan (précipitation, écoulement et déficit d'écoulement), ce qui a permis de conclure ce qui suit :

- Le bilan, dans son ensemble est déficitaire, mais il est excédentaire du mois de Novembre jusqu'au mois de Mars.
- L'évapotranspiration réelle est de l'ordre de 409.9mm/an, ce qui présente 85.53% des précipitations ;
- Le déficit agricole est important (435.2mm), alors que la recharge interannuelle est relativement faible ce qui nécessite une irrigation par drainage.
- Un ruissellement est de l'ordre de 51.36 mm, soit 10.71% des précipitations.
- L'infiltration est de l'ordre de 17.96 mm/an soit 3.75% des précipitations. Cela, traduit une alimentation directe de la nappe par les eaux de pluie à travers les alluvions de la terrasse qui reste faible.

QUATRIEME CHAPITRE

METHODES ET MATERIELS

IV.1 Introduction:

Ce chapitre constitue le pilier méthodologique de cette thèse, il offre une vue détaillée sur les procédures et les instruments employés pour collecter et analyser les échantillons.

La rigueur méthodologique est essentielle pour garantir la validité et la fiabilité des résultats obtenus ainsi que pour répondre aux objectifs de cette étude.

Tout d'abord, nous expliquerons les procédures d'échantillonnage, c'est à dire comment les échantillons ont été collectés sur le terrain. Ensuite, nous fournirons une description des échantillons collectés, y compris leurs coordonnées géographiques et leurs profondeurs de prélèvement.

La partie instrumentation abordera les outils et les équipements qui ont été utilisés pour analyser les échantillons. Dans la partie des méthodes et d'analyse, nous décrirons les techniques et les logiciels employés pour analyser les échantillons et présenter les résultats.

En résumé, ce chapitre vise à fournir une vue d'ensemble complète des méthodes et du matériel utilisés pour mener à bien cette étude. Il permettra aussi de juger la solidité de notre démarche méthodologique et de la fiabilité des résultats présentés dans le chapitre suivant.

IV.2 L'historique des travaux et description du phénomène:

L'autoroute Est Ouest d'Algérie relie la frontière tunisienne d'El Kala à la frontière marocaine près de Maghnia sur une distance de 1216 Km qui divisée en trois parties : Est, centre et la partie Ouest (Fig. IV.1).

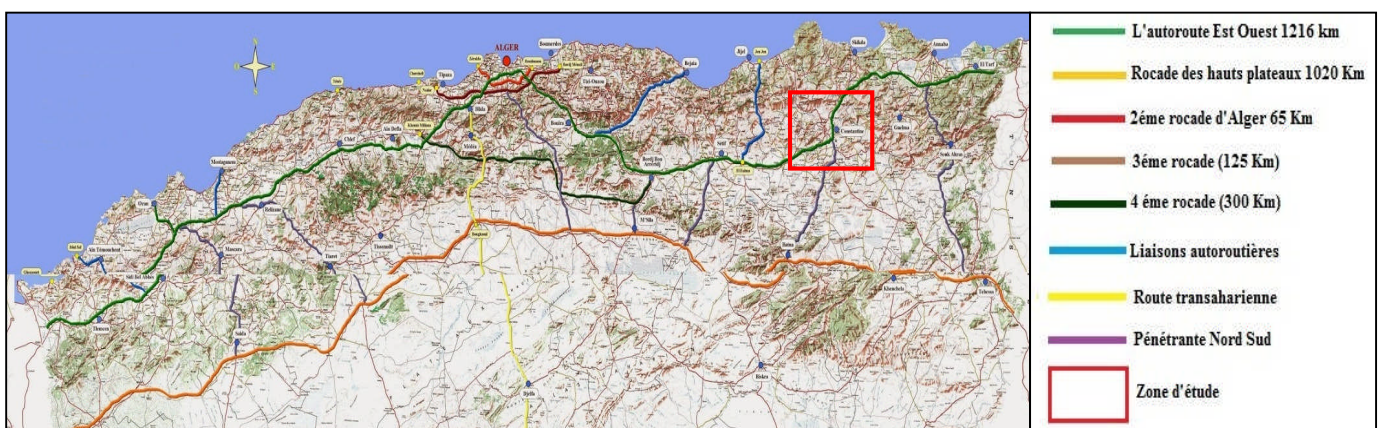


Figure IV.1 : tracé de l'autoroute Est Ouest

L'autoroute Est Ouest passe à l'Est de la ville de Constantine, elle traverse une région montagneuse accidentée boisée représentée par Djebel El Ouahch situé au nord Est de la ville de Constantine par un tunnel en deux tubes du PK 205+393.000 jusqu'au PK 207+284.500 sur une distance de 1.8915 km (Fig. IV.2).

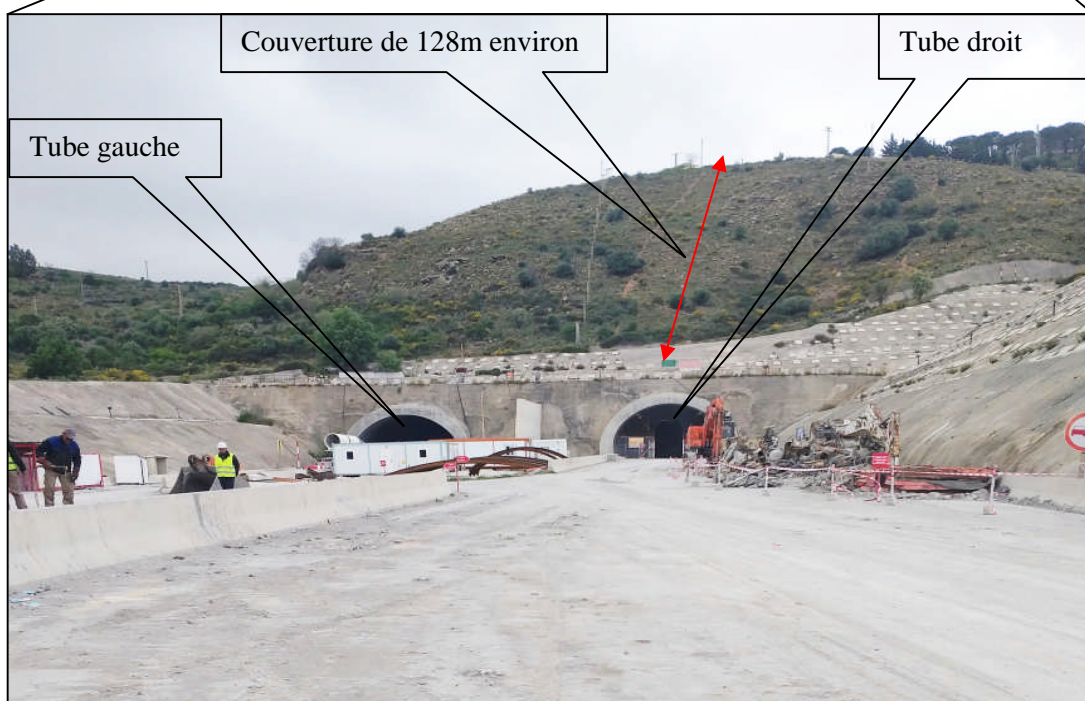
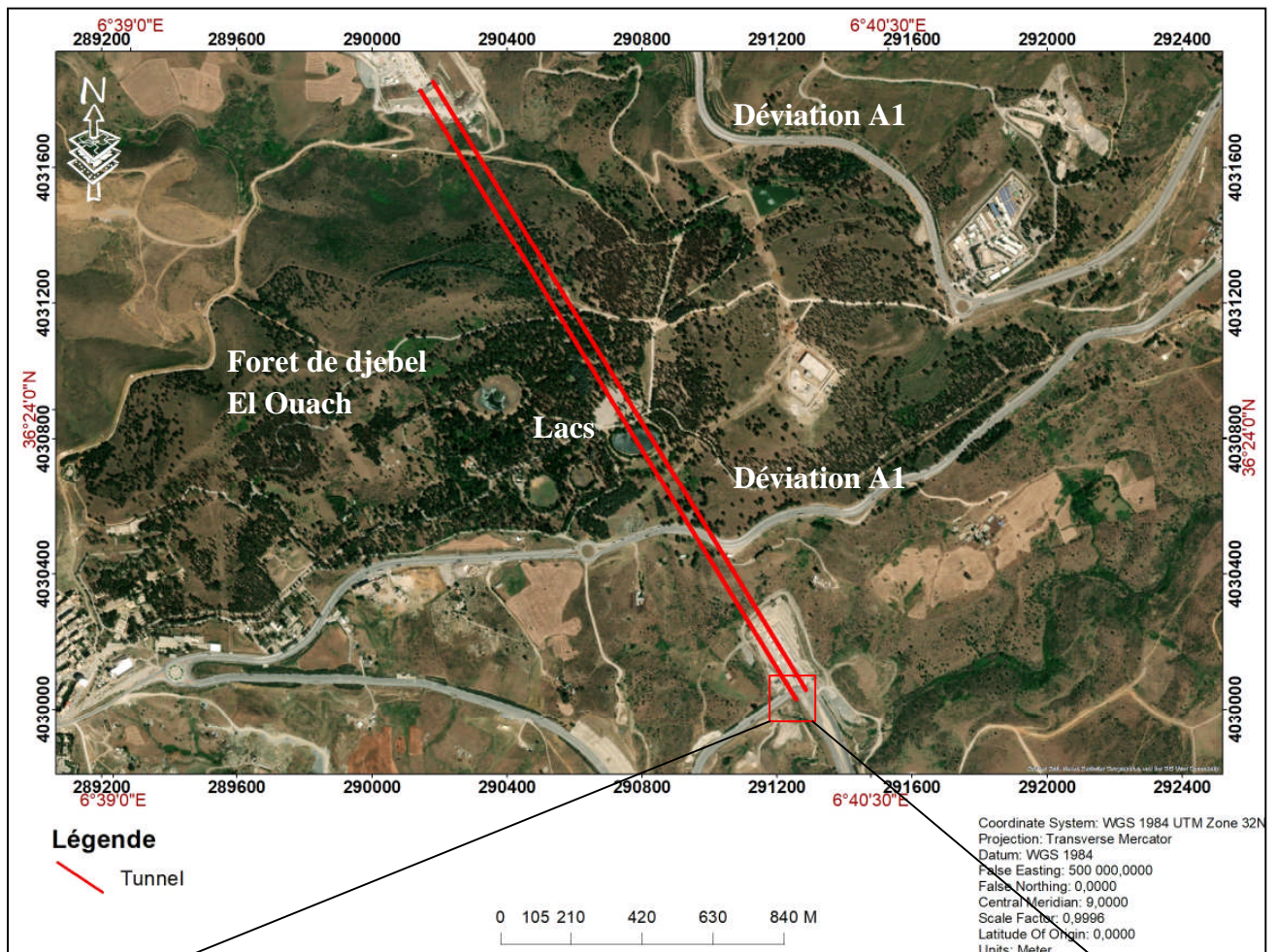


Figure IV.2 : le tracé du tunnel T1 avec les deux tubes du tunnel de Djebel El Ouahch (coté Sud)

L'excavation du tube droit a été entamée en Novembre 2010 avec la réalisation d'un revêtement provisoire mais il y a eu un éboulement au décembre 2010 au niveau du PK 206+258 ce qui a conduit à l'arrêt des travaux qui ont été repris au Février 2011 où les travaux de creusement du tube gauche ont été débutés.

Vers la fin de l'année 2012, les travaux pour le tube Est (droit) ont été achevés, quant aux travaux pour le tube Ouest (gauche), ils ont été interrompus et en Avril 2013, le tube Est (droit) est livré à la circulation.

En Aout 2013, et après une longue durée d'arrêt, les travaux pour le tube Ouest (gauche) ont été repris où COAJAL ont recommandé l'utilisation de double cintre.

Le 26/11/2013, apparition des fissures dans le béton projeté du tube au PK 206+222 où le COAJAL a insisté sur le double cintre.

Le 08/12/2013, accélération des déformations par l'apparition des fissures au niveau du PK 206+232 de la galerie pilote et dans le béton projeté de la galerie pilote.

Le 26/12/2013, accélération de l'augmentation de vitesse de convergences du tunnel où la valeur seuil de décision étant dépassé dont il y a eu un déplacement horizontal de 50mm pour un coté.

Le 29/12/2013, des bruits anormaux ont été entendus à plusieurs reprises pendant les travaux dans le tunnel.

Le 01/01/2014, à 16.30h, l'apparition de l'effondrement dans le tube Ouest (gauche) du PK 206+136 au PK 206+265 soit une distance de 129m provoquant des désordres sur le tube Est (droit) mise en service quelques mois avant l'effondrement (Fig. IV.5 et IV.6), il s'agit d'une rupture de revêtement définitif du PK 206+182.25 et le PK 206+300 (Fig. IV.7) ce qui a conduit à sa fermeture à la circulation.

Figure IV.5 : l'effondrement au niveau du tube gauche





Figure IV.6 : les dégâts causés par l'effondrement au niveau du tube (Est) droit

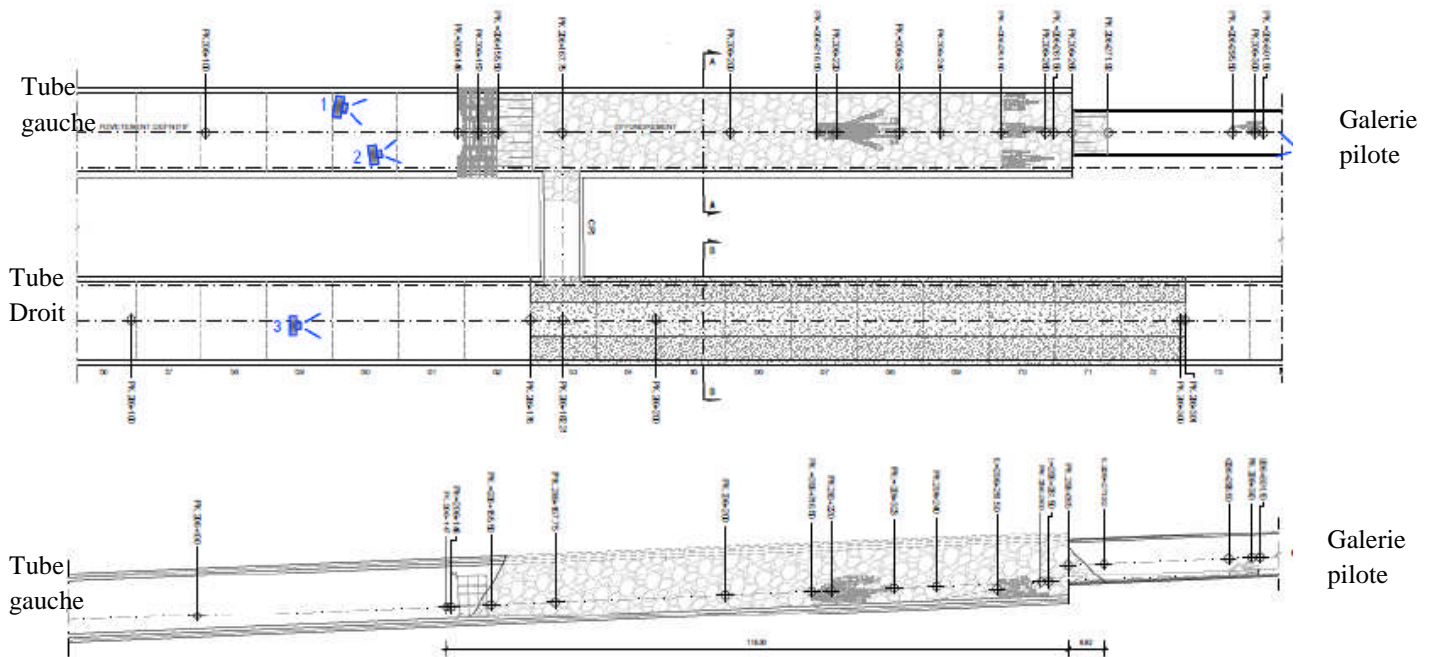


Figure IV.7 : condition de la section du tunnel effondré entre les Pk 206+148 et 206+272 du tube gauche et les Pk 206+176 et 206+301 du tube droit

Après l'effondrement, et dans le but de limiter les dégâts causés dans le tube droit et pour ne pas aggraver la situation, des mesures d'urgence ont été prises qui consiste en la réalisation d'une butée en béton (le remplissage de la section endommagée en béton massif) du PK 206+176 au PK 206+301 (Fig. IV.8). Le tube gauche a été également sécurisé par un remplissage latéral en béton massif.



Figure IV.8 : confortement de la zone endommagée de l'effondrement au niveau du tube droit par le remplissage en béton massif (butée en béton)

Devant cette situation qui présente un risque sur les usagers du tube Est (droit), le tunnel a été fermé complètement le temps de stabiliser la partie effondrée et de continuer les travaux de creusement.

A cet effet, une route temporaire sinusoïdale (contournement) a été réalisée au début du tunnel du côté Sud à une altitude de 787m en grim pant les hauteurs de Djebel El Ouahch ayant une altitude de 989m jusqu'à sa sortie du côté Nord sur un linéaire de 12.41 Km qui a été mis en service le 29/11/2015 et qui présente un risque majeur notamment pour le poids lourd.

Après l'effondrement, plusieurs études d'investigation ont été réalisées dans le but de :
i) évaluer la zone de décompression ainsi que les dégâts causés ii) comprendre le mécanisme de l'effondrement et de trouver les solutions pour consolider la partie effondrée et continuer les travaux de creusement.

En 2017, l'étude a été confiée à l'entreprise COSIDER où elle a repris les travaux de creusement après la réalisation des expertises et plusieurs études d'investigation approfondies.

Pour la zone effondrée, ils ont adopté la méthode d'injection des coulis de ciment à partir du tube (Est) droit, il s'agit de la méthode Grout Intensity Number (GIN) où un mémoire de master réalisé par BENKINIOUAR Abderahim (2023) a détaillé cette méthode.

Pour le reste du tunnel, chaque travée est caractérisé par un type de consolidation selon la stabilité et la réaction du sol (béton projeté, fibre en verre) où l'entreprise COSIDER a pu traverser la zone effondrée dont l'ouverture a eu lieu le 30/04/2023 (Fig. IV. 9).



Figure IV. 9 : ouverture du tube gauche en 30/04/2023

IV.3 Description des échantillons :

Plusieurs sorties sur terrain ont été effectuées pour but de prélever des échantillons des argilites qui se trouvent à des grandes profondeurs sous les formations gréseuses épaisses, à cet effet, nous avons contacté l'entreprise Cosider pour exploiter les sondages carottés réalisés par le laboratoire Italien TREVI au profit de l'entreprise COSIDER après l'effondrement du tube gauche du tunnel T1 lors de la réalisation des expertises.

Sur les trois sondages carottés poussés à une profondeur comprise entre 107m et 128m, réalisés le long du tunnel à l'emplacement de la zone effondré (Fig. IV.10), plusieurs échantillons intacts ont été prélevés de la couche des argilites à différentes profondeurs (Tableau IV.1).

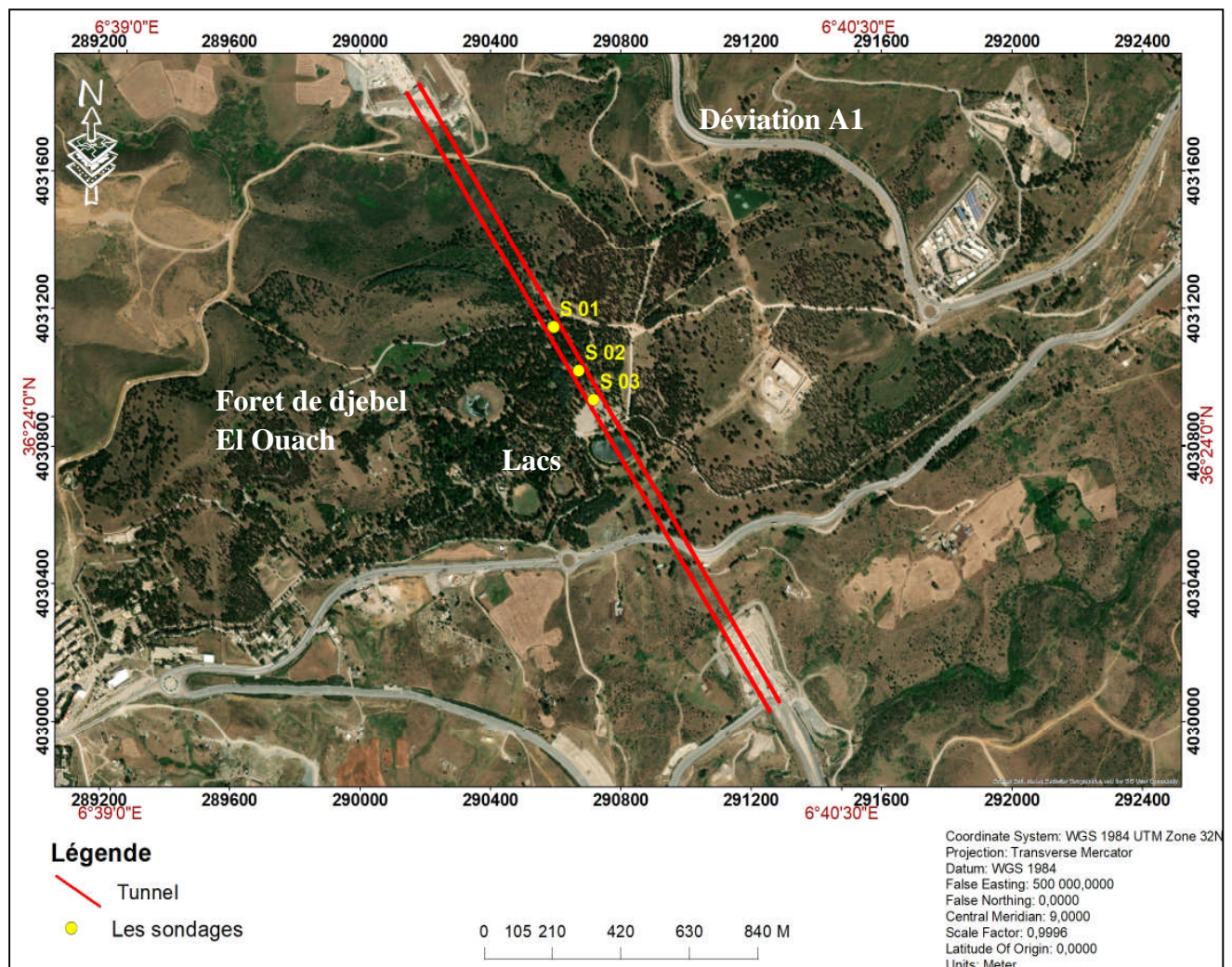


Figure IV.10 : photo Google earth montre l'implantation des sondages carottés réalisés par le laboratoire Italien TREVI au profit de l'entreprise Cosider en 2017.

L'examen des coupes lithologiques fournies par ces sondages a montré presque une même lithologie pour les trois sondages, une formation superficielle (de 0 à 18m) composée des argiles sableuses et limoneuses, sables limoneux argileux et des bancs gréseux ensuite une lithologie monotone jusqu'au 128m composée des argilites (Fig. IV.11).

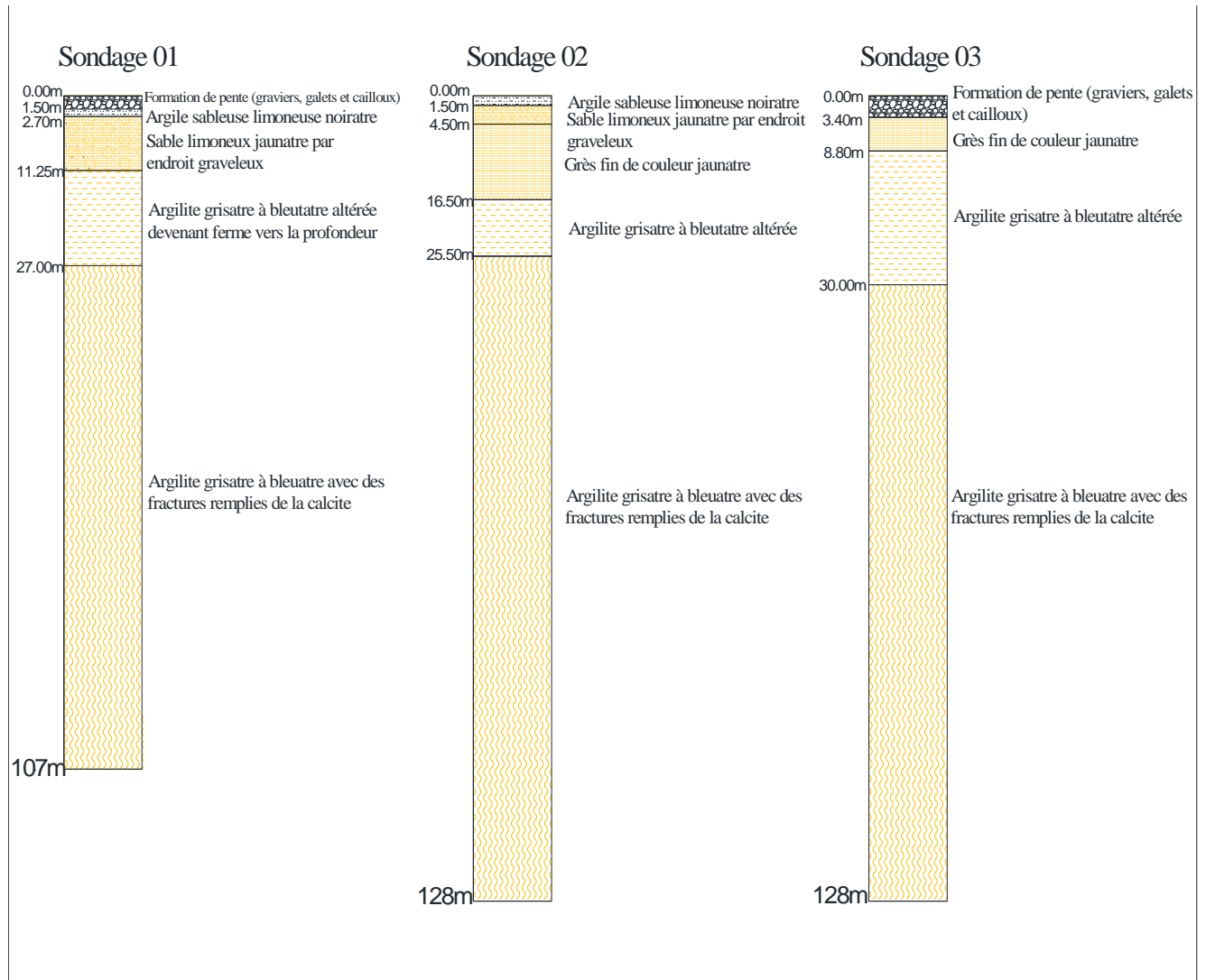


Figure IV.11 : logs de sondages carottés réalisés à Djebel El Ouahch le long du tunnel T1 (S1, S2 et S3)

Sondage	Coordonnées UTM			Profondeur de l'échantillon (m)
	X (m)	Y (m)	Z (m)	
S 1-2017	290715.44	4030937.49	941.806	47.00-47.47
				52.40-52.91
				95.30-96.07
S 2-2017	290671.163	4031017.115	866.001	43.00-43.50
				93.00-94.00
				115.50-116.50
S 3-2017	290589.9310	4031146.359	960.6060	58.00-59.00
				80.29-83.00
				91.00-92.00

Tableau IV.1 : coordonnées UTM des sondages réalisés par le laboratoire Italien TREVI au profit de l'entreprise COSIDER en 2017 et les profondeurs des échantillons

IV.4 Méthodes analytiques:

IV.4.1 Les essais géotechniques :

L'influence de l'argile sur le comportement des sols dépend essentiellement de deux paramètres, la proportion de l'argile dans le sol et sa minéralogie. A cet effet, des bons essais peuvent répondre à plusieurs critères.

Des essais physiques (granulométrie y compris la sédimentométrie, VBS, limite d'atterberg) ont été réalisés sur des échantillons paraffinés prélevés des trois sondages carottés.

a. La teneur en eau, poids volumique et degré de saturation :

Pour mesurer les caractéristiques pondérales d'un sol, il est nécessaire de préserver l'échantillon tel qu'il existe in situ (structure du squelette et teneur en eau) (*Philliponat, G., Hubert, B., 2002*).

La teneur en eau naturelle est déterminée au laboratoire par passage d'un échantillon d'une masse humide connue à l'étuve à 105C°.

C'est le rapport entre le poids d'eau évaporée sur le poids de l'échantillon sec $W_n = (P_w/P_s) * 100$. Elle ne se détermine que sur des échantillons intacts.

La détermination du poids volumique total s'effectue à la balance hydrostatique sur les sols ayant une cohésion suffisante $\gamma = m/V$.

Le degré de saturation est un rapport entre le volume de l'eau sur le volume des vides, il est compris entre 0 (sol sec) et 100% (sol saturé).

b. Granulométrie :

L'analyse granulométrique a été réalisée selon la norme XP CEN ISO/TS 17892-4 Aout 2005 et NF P 94-057-1992.

La granularité a été faite par tamisage par voie humide pour la fraction supérieure à 80 μm .

L'essai consiste à séparer les grains d'une masse de sol connue par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol. Une fois, le sol est séché, il est passé à travers une série des tamis (Fig. IV.12) en pesant successivement la masse du refus cumulé sur chaque tamis, dont cette masse est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon analysé.



Figure IV.12 : la série des tamis pour l'essai granulométrique

Concernant les particules inférieures à 80 μm séparées du reste de sol par tamisage, elles sont mises en suspension dans l'eau distillée additionnée d'un défloculant.

Les particules sont sédimentées à différentes vitesses en fonction de leurs dimensions. A l'aide d'un densimètre (Fig. IV.13), on a mesuré l'évolution dans le temps de la masse volumique de la solution et la profondeur d'immersion de l'appareil. La loi de Stokes donne la relation entre les diamètres des grains et leur vitesse de sédimentation.

Les résultats obtenus des deux essais sont exprimés par une courbe granulométrique en donnant la répartition dimensionnelle des grains constituant chaque échantillon.

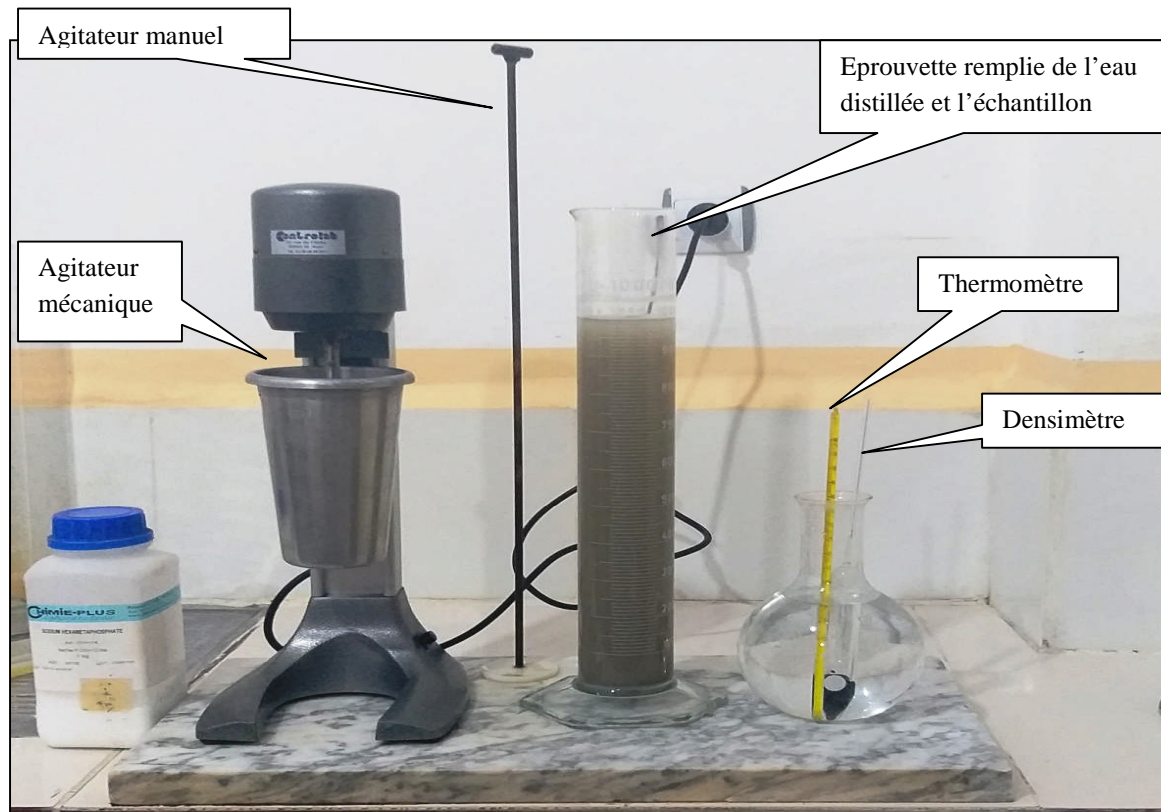


Figure IV.13 : analyse granulométrique méthode par sédimentation

c. Limite d'Atterberg :

L'essai de la limite d'Atterberg a été réalisé selon la norme NF P 94-051, il est pour but de caractériser la consistance des sols fins, il permet de mesurer la limite de liquidité (sépare l'état liquide de l'état plastique) et la limite de plasticité (sépare l'état plastique de l'état solide). Donc les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques destinés à identifier un sol tout en caractérisant son état en fonction de son indice de consistance.

L'essai s'effectue en deux étapes, la première consiste à la recherche de la teneur en eau qui correspond à la fermeture de 1 cm d'une rainure faite sur une patte de sol préalablement malaxée et placée dans coupelle soumise à des chocs répétés (Fig. IV.14). Il s'agit de la limite de liquidité.

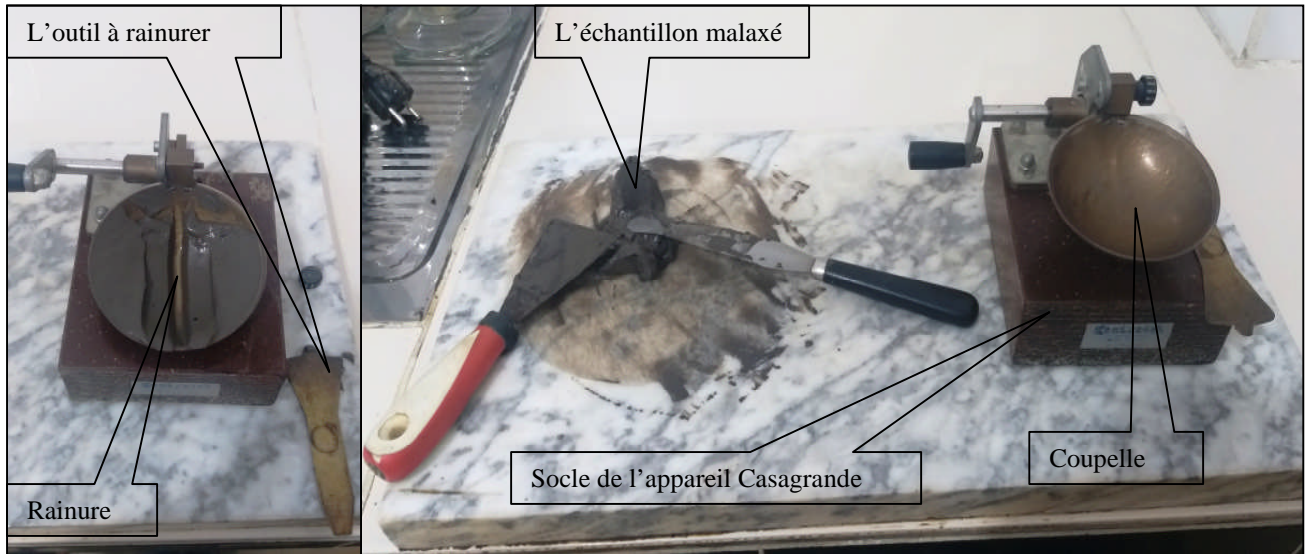


Figure IV.14 : détermination de la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande.

Quant à la deuxième (la limite de plasticité), c'est de chercher la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol de $3\text{mm} \pm 0.5$ de diamètre et de 10cm de longueur se fissure (Fig. IV.15). Les résultats obtenus sont représentés dans le diagramme de Casagrande.

Lorsque on a obtenu les valeurs de la limite de liquidité (W_L) et la limite de plasticité (W_P), on calcule l'indice de plasticité qui est la différence entre les valeurs des limites de liquidité et de plasticité ($I_p = W_L - W_P$).

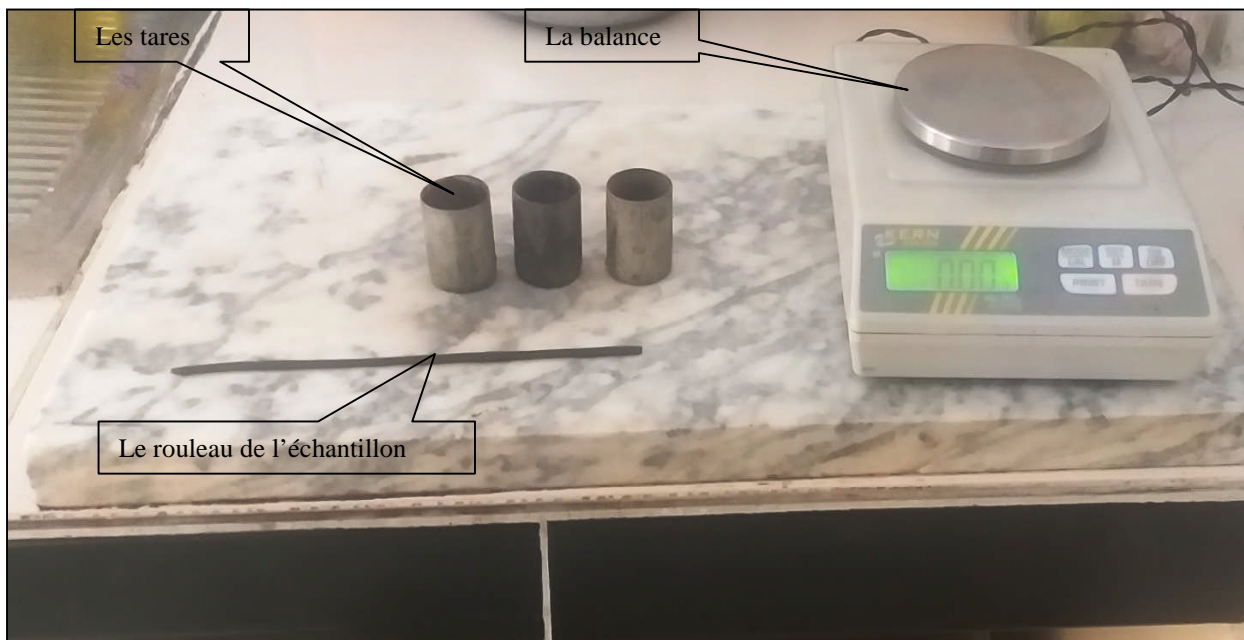


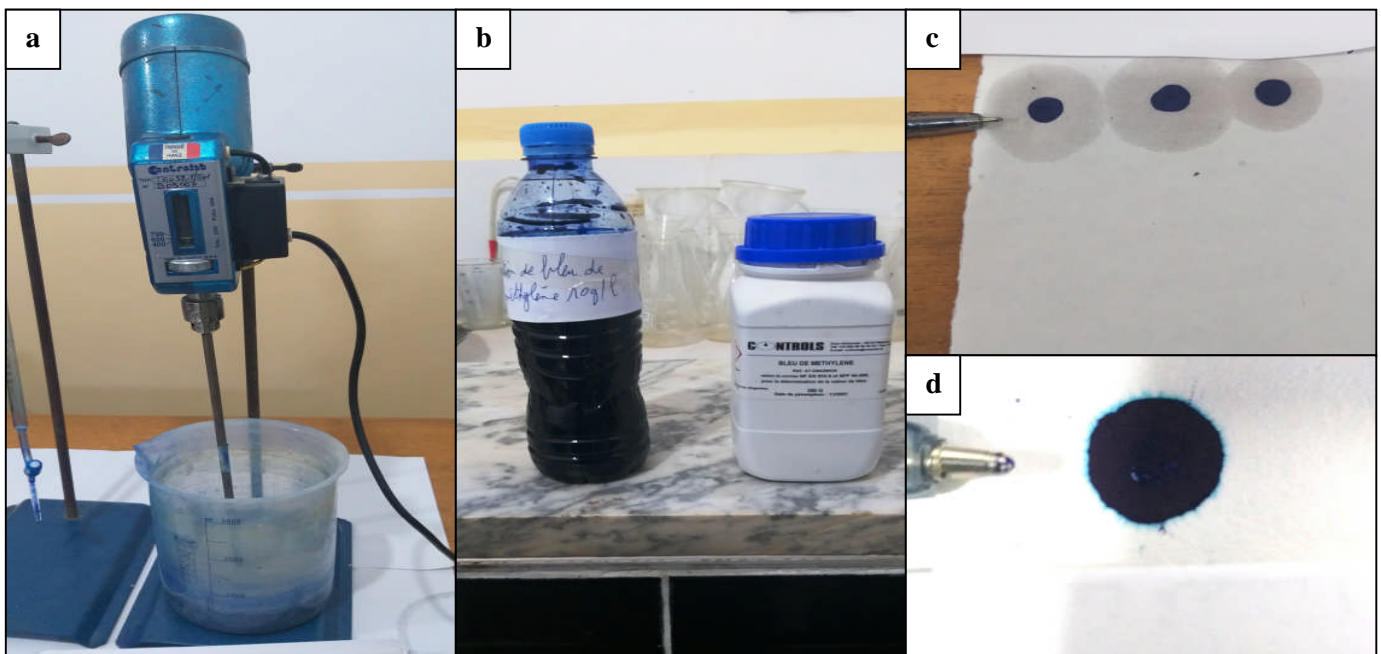
Figure IV.15 : détermination de la limite de plasticité

d. Valeur de bleu de méthylène (VBS) :

Cet essai a été réalisé conformément à la norme NF P 94-068, il consiste à mesurer la capacité d'absorption des molécules de bleu de méthylène par les particules argileuses mises en suspension et en agitation durant tout l'essai.

A l'aide du dispositif de dosage introduit dans la suspension, on ajoute de 5cm^3 à 10cm^3 (selon l'argilosité du matériau) de la solution de bleu de méthylène, après une minute, on procède au prélèvement d'une goutte sur un papier filtre en contrôlant l'absorption après chaque ajout.

L'essai est terminé (l'absorption maximale est atteinte) lorsqu'une auréole bleu clair persistante apparaît à la périphérie de la tache (Fig. IV.16). La VBS est exprimée en grammes de bleu de méthylène par 100g de matériau sec.



a : agitation de l'échantillon avec l'eau distillée durant 5mn à 600tr/mn, b : préparation de la solution de bleu de méthylène 10g/l, e : ajout de 5ml de la solution de bleu de méthylène, c : prise d'une goutte après une minute (dépôt central en bleu entouré d'une zone humide incolore), d : apparition de l'auréole périphérique en bleu clair.

Figure IV.16 : étapes de l'essai bleu de méthylène

e. Les analyses chimiques :

Ces analyses sont effectuées suivant la norme NF P 94-048, elles comportent le taux de carbonate, taux des insolubles et taux des gypses.

Le taux de carbonate a été fait à l'aide du calcimètre de Bernard (Fig. IV.17), le carbonate de calcium (CaCO_3) fait effervescence en contact de l'acide chlorhydrique HCl qui correspond à un dégagement du gaz CO_2 selon la formule :

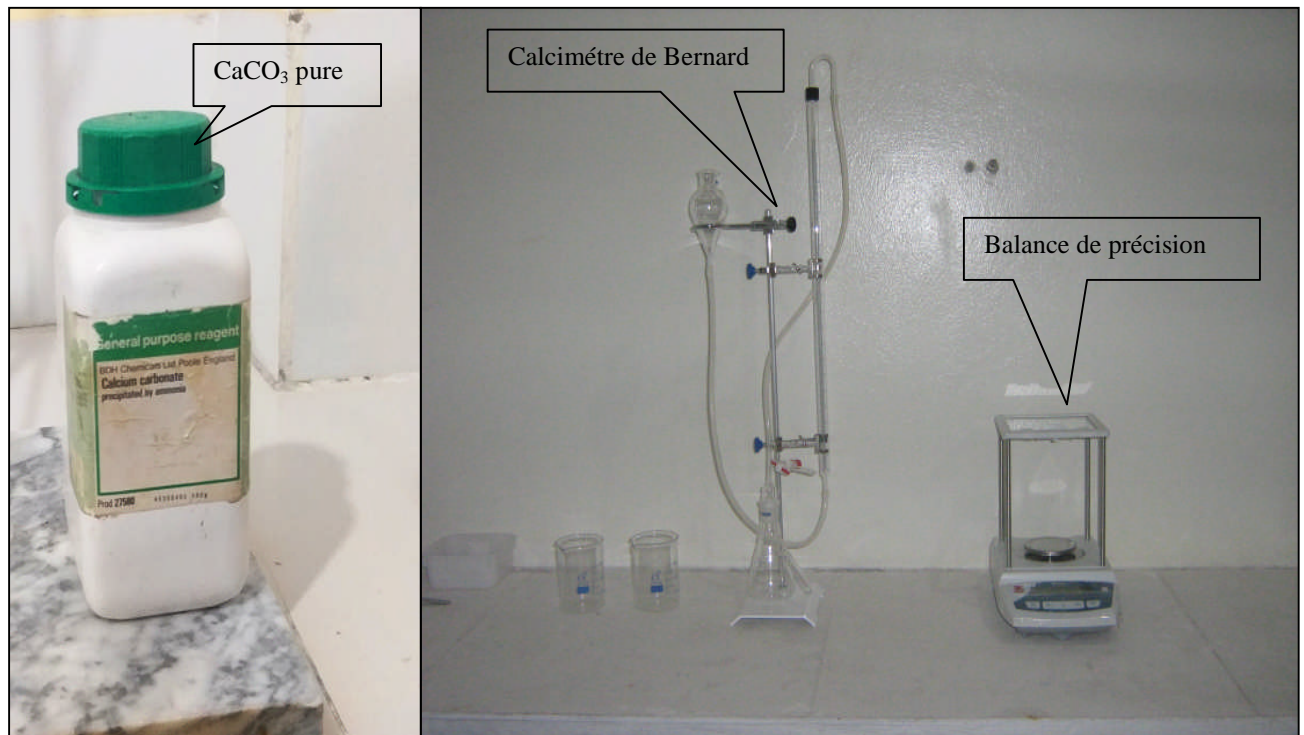
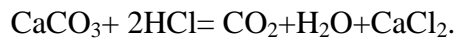


Figure IV.17: détermination du taux de carbonate à l'aide du calcimètre de Bernard

f. Essais mécaniques :

Il s'agit de l'essai oedométrique et l'essai de cisaillement (essai de cisaillement rectiligne à la boîte et essai de cisaillement à l'appareil triaxial). L'essai oedométrique (Fig. IV.18) permet de déterminer l'état initial du sol, l'ordre de grandeur des tassements sous consolidation (*Plumelle, C et al., 2013*).

Quant à l'essai de cisaillement (Fig. IV.19), il permet de déterminer les paramètres intrinsèques du sol, c'est la cohésion C et l'angle de frottement interne φ .



Figure IV.18 : l'appareil oedométrique



Figure IV.19 : l'appareil de cisaillement à la boîte

IV.4.2 Analyses minéralogiques et géochimiques:

IV.4.2.1: Introduction:

Les analyses minéralogiques des argiles sont des outils et des techniques utilisés pour étudier la composition minéralogique des argiles. Les argiles sont des minéraux constitués de particules fines, principalement composées de phyllo-silicates d'aluminium hydratés.

Elles permettent de déterminer la composition et la structure des minéraux présents dans les échantillons d'argile. Ces analyses sont essentielles pour comprendre les propriétés physiques et chimiques des argiles, ainsi que pour évaluer leur aptitude à être utilisées dans différentes applications.

Les techniques couramment utilisées pour les analyses minéralogiques des argiles comprennent la diffraction des rayons X (DRX), la spectroscopie infrarouge (IR) et la microscopie électronique à balayage (MEB). La DRX permet d'identifier les minéraux présents dans les échantillons d'argile en analysant les motifs de diffraction des rayons X qui sont caractéristiques de chaque minéral. La spectroscopie infrarouge permet d'identifier les groupes fonctionnels présents dans les minéraux d'argile, tandis que la MEB permet d'observer la morphologie et la structure des minéraux à une échelle microscopique.

Les analyses minéralogiques des argiles sont également utilisées pour étudier les transformations minéralogiques qui se produisent dans les argiles en réponse à des changements de conditions environnementales, tels que l'altération chimique, la dessiccation ou la cuisson. Ces analyses permettent de mieux comprendre les mécanismes de formation et d'évolution des argiles, ainsi que leur rôle dans les processus géologiques et environnementaux.

IV.4.2.2 Diffraction des rayons X (DRX) :

IV.4.2.2.1 Principe :

La conception fondamentale d'un diffractomètre à rayons X (DRX) consiste en une source de rayonnement monochromatique et un détecteur de rayons X positionnés sur un cercle gradué au centre d'un échantillon de poudre. Des ouvertures divergentes sont placées entre la source de rayons X et l'échantillon, ainsi qu'entre l'échantillon et le détecteur. Ces fentes servent à plusieurs raisons, notamment pour limiter le rayonnement diffusé (non diffracté), réduire le bruit de fond et pointer le rayonnement. Pour assurer un mouvement synchronisé, le détecteur et le porte-échantillon sont connectés mécaniquement à un goniomètre. Cette configuration permet au détecteur de tourner de $2x$ degrés tandis que l'échantillon tourne de x degrés, en maintenant un rapport fixe de 2:1 (Fig. IV.20).

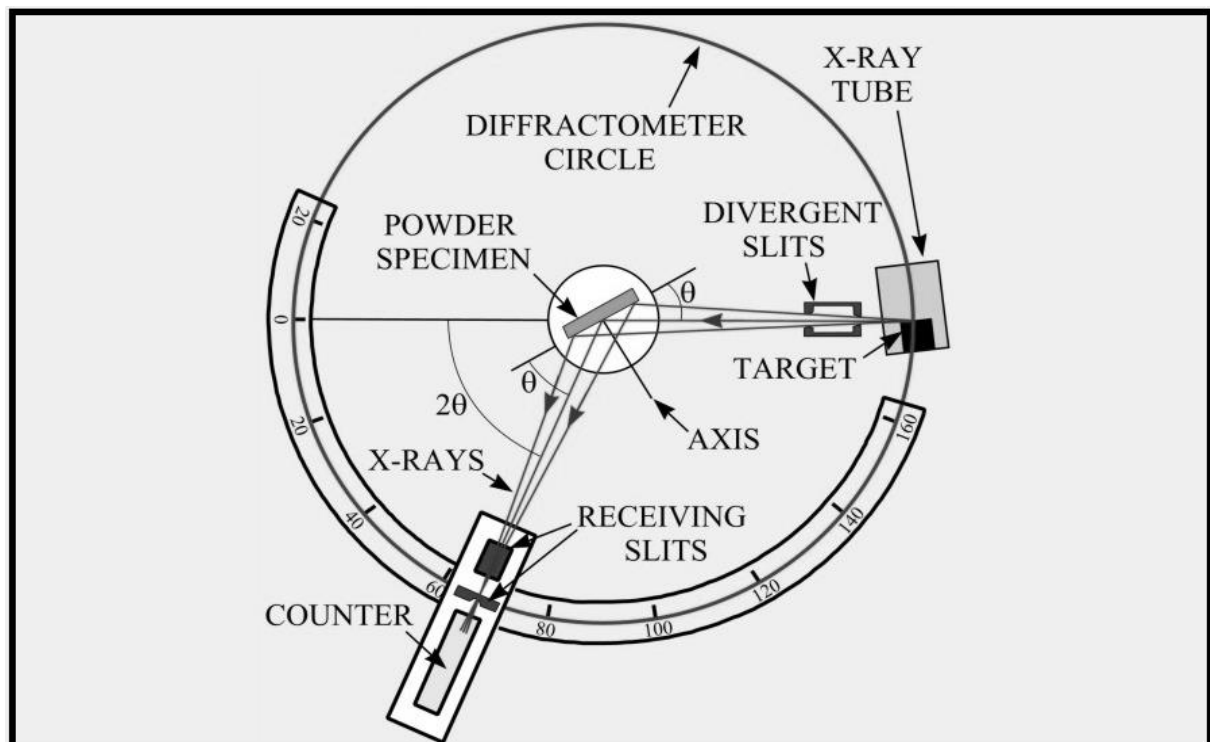


Figure IV.20: le schéma du protocole du DRX du service géologique Américain (Cullity, 1956).

Nous signalons qu'il y avait deux campagnes pour l'analyse des échantillons par la diffraction aux rayons X, la première datée du 2019, au niveau du laboratoire de l'université d'El Manar Tunis (faculté des sciences) et la seconde datée du 2023 au niveau du laboratoire des Argiles, Géochimie et Environnements sédimentaire, université de Liège (Laboratoire AGEs, ULg). Les résultats exploités dans cette thèse sont issus de la première campagne, le reste va être le sujet de recherches complémentaires dont les résultats vont être publiés dans nos recherches futures.

a- Minéralogie totale :

L'analyse minéralogique de l'échantillon total se fait sur une poudre broyée au broyeur à mortier d'agate mécanique à partir d'un échantillon brut préalablement séché durant 24h et tamisée à travers le tamis 250 μ m. Les poudres sont placées sur les portes échantillons en appuyant légèrement sur ces poudres (Fig. IV.21). Ensuite, les poudres sont passées pour une analyse diffractométrique à l'aide d'un diffractomètre PANalytical.



Figure IV.21: préparation des poudres pour analyse DRX.

Les résultats bruts obtenus, sont traités à l'aide du logiciel Heigt-score afin d'obtenir les diffractogrammes.

Le calcul des pourcentages des minéraux contenant dans chaque échantillon se fait par la multiplication de l'intensité de chaque minéral par un coefficient correcteur (tableau. IV.5).

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

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

b- Minéralogie de la fraction argileuse :

L'analyse par Diffraction des Rayons X (DRX) des minéraux argileux est basée sur la connaissance des distances réticulaires (001). On cherche donc à renforcer les réflexions (001) en orientant les particules selon l'aplatissement des particules qui est le plan (001) (*Thiry.M, et al, 2013*). A cet effet, nous avons réalisé des lames orientées, ce sont des dépôts de particules inférieures à $2\mu\text{m}$ sur une lame de verre (Moore et Reynolds, 1989).

Pour ce faire, les poudres d'argile sont mises dans l'eau distillée avec une agitation pendant une demi-heure ensuite toute la solution est passée à travers le tamis $63\mu\text{m}$ dans une bouteille qui est laissée décantée durant 50 minutes (Fig. IV.22).

L'extraction de la fraction argileuse (inférieure à $2\mu\text{m}$) se fait à partir de la suspension à la profondeur de 1 cm à l'aide d'une pipette.

La quantité tenue est posée sur une lame de verre de 25 x 25 mm et laissée sécher pendant 24 heures.

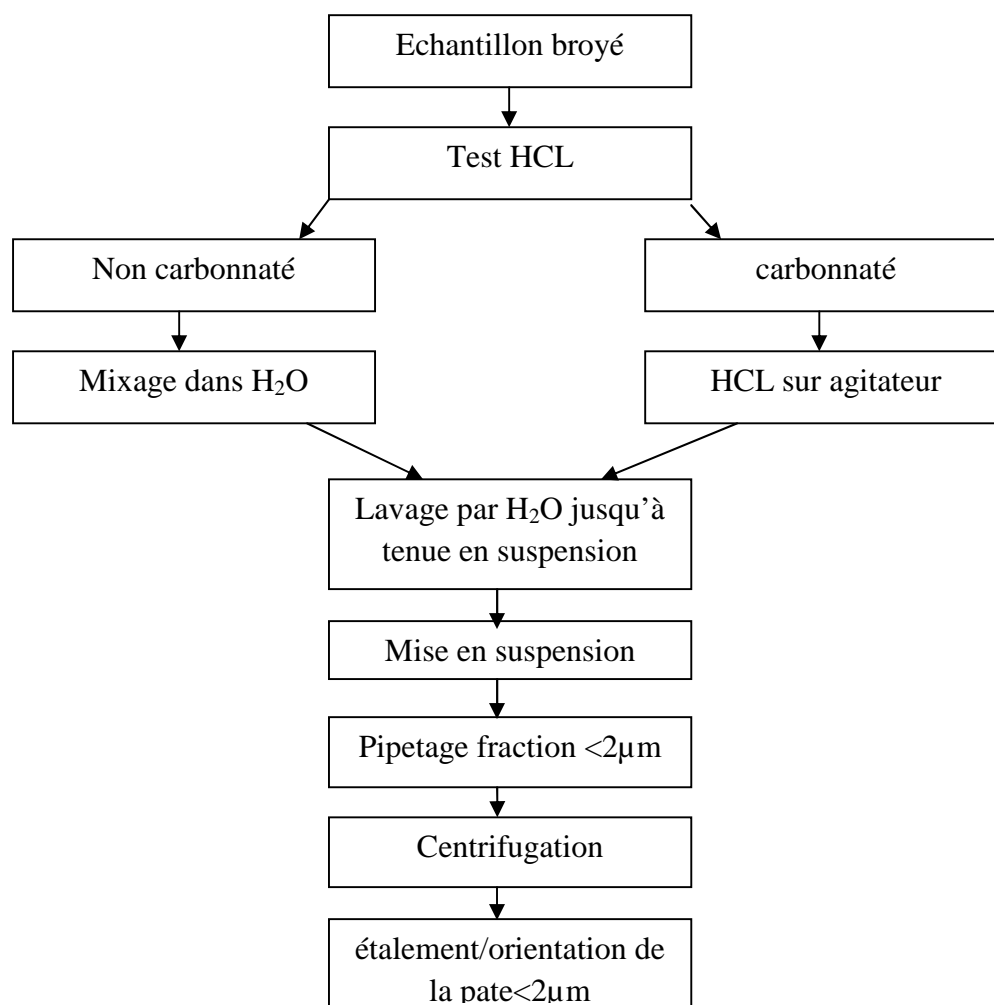


Figure IV.22 : protocole de préparation des lames orientées

Pour permettre la mise en suspension ultérieure des particules argileuses, il est nécessaire que l'échantillon soit dépourvu de carbonate. Par ailleurs, pour les échantillons riches en carbonates, les particules argileuses sont incluses entre les cristaux de carbonate et il faut dissoudre ceux-ci pour les libérer et ultérieurement les extraire (*Médard Thiry et al, 2013*).

A cet effet, il est nécessaire de traiter les échantillons contenant de la calcite par l'acide chlorure hydrique (HCl) dilué à 10% qui est éliminé par un lavage par l'eau distillée et à l'aide de la centrifugeuse (Fig. IV.23).

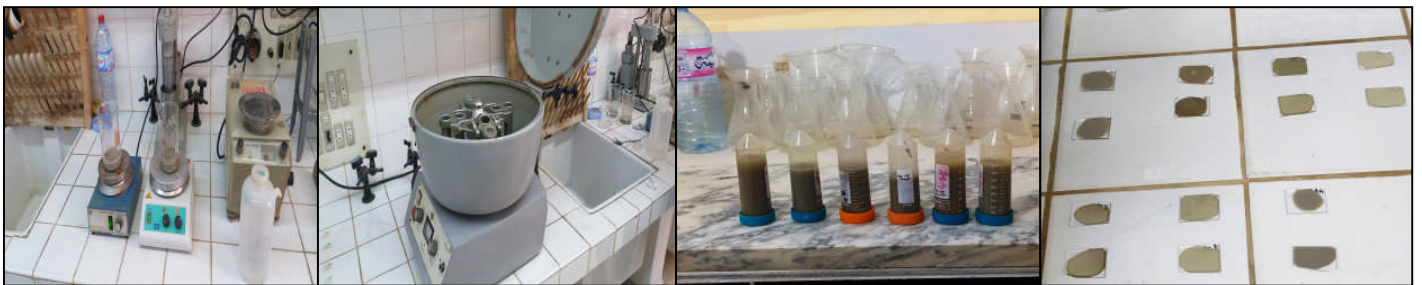


Figure IV.23 : préparation des lames orientées (fraction argileuse), a : traitement des échantillons contenant du calcaire par HCl dilué, b : lavage par la centrifugeuse c : l'extraction de la suspension sur une lame de verre.

Toutes les lames préparées sont soumises aux trois types de traitement :

- ✚ Dans les conditions naturelles (à l'air libre).
- ✚ Saturation par l'éthylène glycol durant 12 heures pour but de faire gonfler les smectites.
- ✚ Le chauffage à 490° pendant 4 heures, afin de caractériser les minéraux sensibles à la chaleur (détruire les kaolinites tout en conservant les chlorites).

Les deux derniers traitements modifient l'espace inter-foliaire de manière spécifique et permettent de différencier les espèces argileuses entre elles (*Fagel. N, 2010*).

Enfin, les lames ont été passées pour une analyse diffractométrique à l'aide d'un diffractomètre PANalytical.

L'identification des minéraux argileux est faite en superposant les trois spectres obtenus (N, EG et C°) (tableau IV.6 et IV.7).

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

Tableau IV.6 : Comportement des minéraux argileux suivant les différents traitements
(Thorez, 1986)

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

Tableau IV.7 : comportement des minéraux interstratifiés suivant les différents traitements
(Thorez, 1986)

L'analyse semi-quantitative des minéraux argileux se fait toujours en multipliant l'intensité de chaque minéral argileux par un coefficient correcteur (tableau IV.8).

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

Tableau IV.8 : Liste des minéraux argileux identifiés avec les facteurs correctifs associés

IV.4.2.3 Fluorescence X :

La technique d'analyse par spectrométrie de fluorescence X est basée sur le bombardement de la surface d'un échantillon par un rayonnement primaire X, de faible longueur d'onde et donc de forte énergie.

L'analyse chimique élémentaire des différents échantillons prélevés ont été réalisée à l'office national des mines Tunis- Tunisie en utilisant l'appareil Perkin-Elmer à flamme à l'acétylène ou protoxyde d'azote-acétylène.

IV.4.2.4 Microscope électronique à balayage (MEB) :

La microscopie électronique à balayage (M.E.B.) permet d'obtenir à fort grossissement des images contrastées en fonction de la masse atomique des éléments constituant les phases minérales, et de réaliser sur de très faibles volumes (quelques μm^3) des analyses chimiques qualitatives ponctuelles à l'aide d'un détecteur EDS (Energy Dispersive Spectrum) (*TAJEDDINE. L, 2008*).

Elle donne deux types d'informations, une information qualitative (la morphologie et la taille des différents minéraux contenant dans les échantillons) et une information semi quantitative par analyse EDS (à l'aide d'un rayonnement X caractéristique).

L'analyse des échantillons au microscope électronique à balayage (MEB) a été réalisée au niveau de l'entreprise Tunisienne des activités pétrolières (ETAP) sur des petits morceaux des argilites fraîches, l'analyse a été faite à l'aide d'un microscope marque thermoscientific modèle Q250 (Fig. IV.24 et 25).

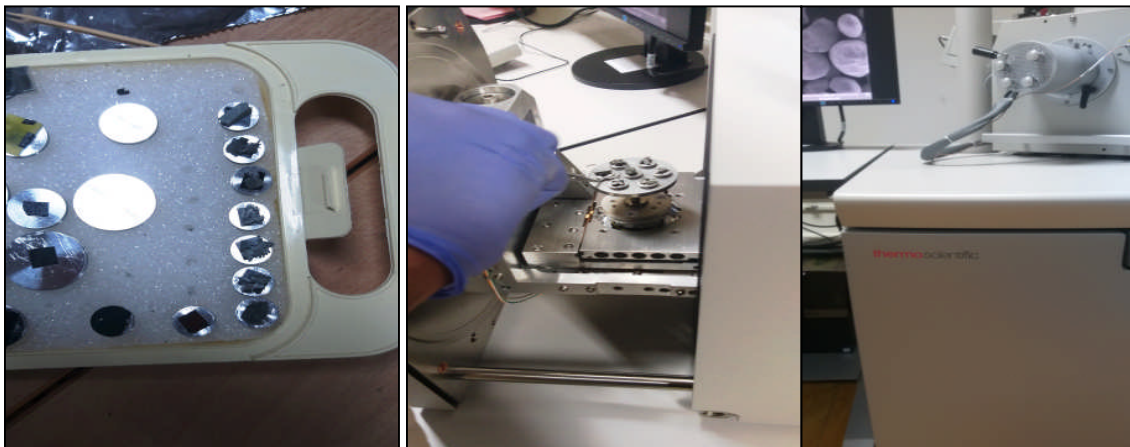


Figure IV.24 : préparation des échantillons pour le MEB

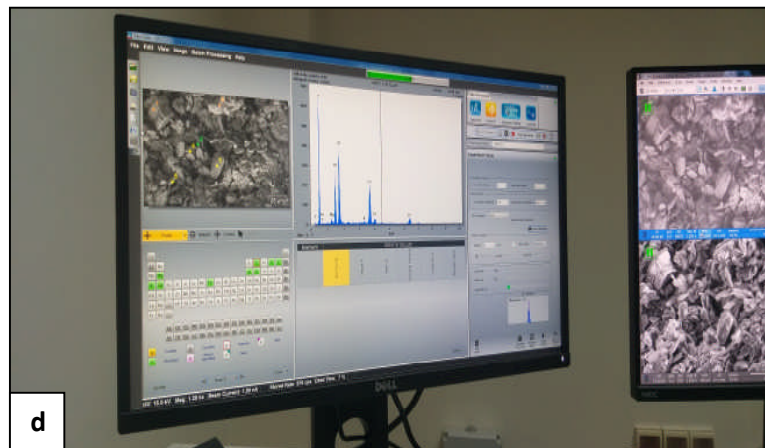


Figure IV.25 : analyse EDX des échantillons

IV.5 Etude géologique structurale:

IV.5.1 Introduction :

La reconnaissance de l'organisation des linéaments géologiques dans une zone donnée est un besoin réel (*Desjardins, R et al, 2014*).

En effet, selon *Roy et Boily (1993)*, ce type d'information est très nécessaire pour : i) le développement d'indices minéralisés servant à la détection de nouveaux sites miniers ii) la détection des zones fissurées (d'un coté pour détecter le réseau de drainage pour l'eau, de l'autre coté, pour suivre la matière liquide potentiellement polluantes) iii) une meilleure reconnaissance des risques de tremblement de terre à l'échelle locale (*Desjardins, R et al, 2014*).

Il est très difficile de rechercher des indicateurs directs de linéaments sur le terrain, notamment dans les endroits montagneux et forestiers où les fortes pentes et la végétation intense présentent un obstacle devant leur détection.

A cet effet, le recours aux photos aériennes s'est avéré une démarche importante pour la cartographie des linéaments dans les zones inaccessibles. Mais la vérification sur le terrain et la confrontation avec la carte géologique reste le moyen le plus fiable pour valider la carte linéamentaire.

Dès l'apparition des photos aériennes, l'étude des structures et des formations géologiques fut en mesure de profiter grandement de cet outil apportant une vision d'ensemble et permettant la perception de phénomènes presque complètement invisibles par un observateur au sol (*Gilbert. L, 1999*).

IV.5.2 Etude des linéaments :

IV.5.2.1 Origine du mot et Historique :

La notion de linéament a été introduite par *Hobbs W.H en 1904* dans l'article intitulé « lineament of Atlantic border region » publié dans le bulletin de la société géologique d'Amérique 15, 483-506. Pour lui, un linéament n'est qu'un trait généralement rectiligne caractéristique de la surface terrestre. Il reflète des éléments de la physionomie terrestre comme les lignes de partages des eaux, les lignes de crêtes, les limites de relief et des formations géologiques (*O'Leary, D.W et al, 1976*).

L'historique du mot linéament et son évolution a été faite en se basant sur l'ouvrage : *Lineament, linear, Lineation, Some proposed new standars for old terms* réalisé par *O'Leary et al en 1976*.

✚ **Hobbs (1912)** : *en cette année, Hobbs a complété sa définition en ajoutant les ravins, les vallées et les éléments d'origine structural tels que : les failles, limite d'effondrement ... etc (les linéaments sont des lignes significatives du paysage qui révèlent l'architecture caché du socle).*

✚ **Sonder (1938)** : *il a utilisé le terme pour designer les caractéristiques individuelles que Hobbs appelait linéaments, il a proposa aussi que le linéament soit utilisé dans un sens régional « le linéament d'une région montre alors une direction définie qui est contenue dans la tectonique, la jointure et le relief ».*

✚ **Wilson (1941)** : *les linéaments sont des lignes droites et légèrement incurvées formées par les grands escarpements et les creux qui traversent toutes les roches Précambriennes.*

✚ **Kaiser (1950)** : *un linéament est une caractéristique (phénomène) droite et linéaire qui est au moins d'une longueur de plusieurs centaines de pieds mais généralement il est de plusieurs milles de longueurs.*

✚ **Gross (1951)** : *les lignes droites ou légèrement incurvées dans la surface de la terre sont appelées linéation. Pour lui, il a éliminé complètement le terme linéament et il a utilisé le terme linéation pour se référer implicitement à la tendance générale des « linéaires ». d'après lui, il est absurde de tirer des conclusions structurales à partir d'une étude physiographie seule. Il a tiré quelques conclusions mais il paraît qu'il a confondu entre la cause et l'effet.*

✚ **Kelly (1955)** : *en termes généraux, un linéament est une caractéristique rectiligne d'une étendue considérable à la surface de la terre. Une tectonique linéament.... est un*

alignement général des phénomènes structuraux ou bien c'est la limite entre deux phénomènes structuraux.

✚ **Lattman (1958)** : un linéament est « une caractéristique linéaire naturelle constituée d'alignements topographiques (y compris des segments de cours d'eau rectilignes), de végétation ou de tonalité de sol, visibles principalement sur des photos aériennes et exprimés de manière continue ou discontinu sur plusieurs de kilomètres.

✚ **Parkinson in Luder (1959)** : tout élément linéaire du paysage qui procède une degré de régularité anormal qu'il soit droit ou légèrement incurvé est généralement considéré comme l'expression de la surface de quelques phénomènes qui se produisent à l'intérieur de la terre.

IV.5.2.2 Définition :

Au latin, **linea** : ligne, et **mentum** : semblable à....

Un linéament est un trait linéaire simple ou composé, décelé en surface, dont les différentes parties alignées selon une droite ou une courbe, ressortent distinctement de leur environnement et indiquent éventuellement un phénomène engendré sous la surface (*O'Leary et al, 1976*).

Généralement, ces linéaments présentent des alignements d'objets géologiques et ils s'associent à des éléments structuraux comme les failles, les fractures, les axes de plissements et les contacts lithologiques.

Ils s'expliquent par des dépressions topographiques, par le réseau hydrographique et par des anomalies de végétation (*Yatabe and Howarth, 1984 ; Soesilo and Hoppin, 1986*) (Fig IV.26).

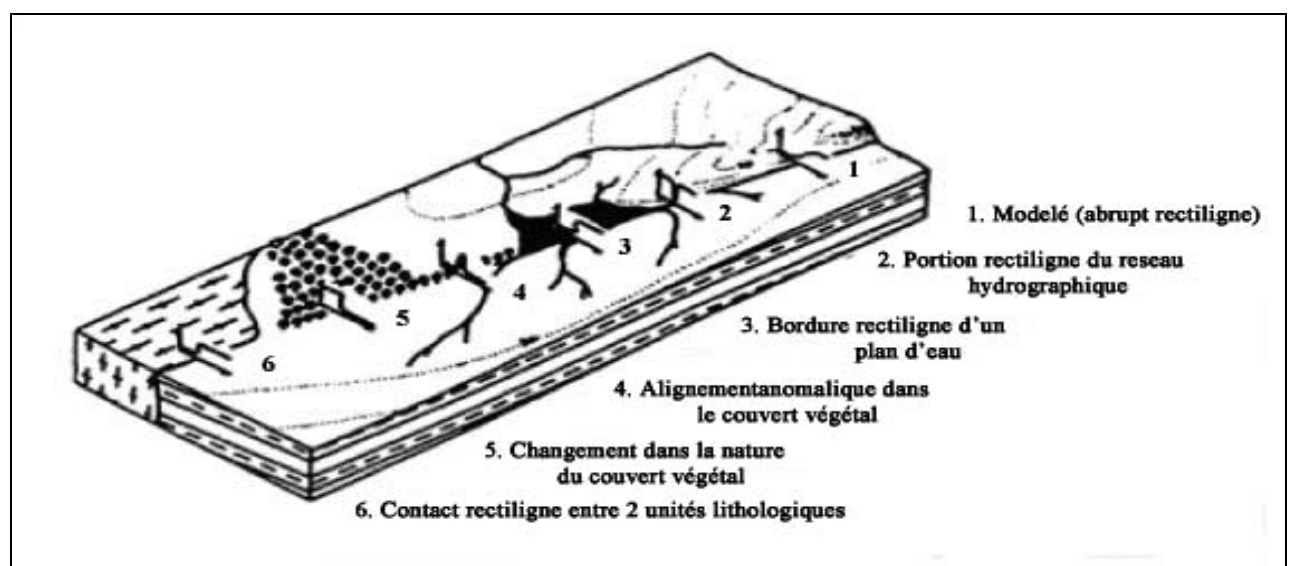


Figure IV.26 : expression d'un linéament en surface (*tiré de Fraipont et Hirsch, 1984*)

IV.5.2.3 Origine des linéaments :

Il peut exister plusieurs causes naturelles à l'origine d'un linéament : ligne de crêtes topographiques, contact entre formations de lithologie différentes, ligne de fracture ou de failles... etc. ils peuvent être identifiés visuellement par leur effet sur le paysage.

On peut citer, entre autres, un changement ou une anomalie dans le couvert végétal, la géométrie des rives d'un plan d'eau, la forme du réseau de drainage ou des coudes inexplicables dans les cours d'eau principaux. On peut repérer les linéaments dans l'image en cherchant les frontières linéaires entre deux zones de brillance différente ou de texture différents. On peut aussi chercher les ombres linéaires ou les inclusions linéaires (*Nguyen and Ho, 1988 ; Fraipont et Hirsch, 1984*).

Les linéaments peuvent aussi avoir des causes d'origine humaine comme les limites de cultures, les routes et autres constructions. Dans ce cas, ils ne sont pas, en principe, liés à la géologie mais ils peuvent l'être dans certains cas.

IV.5.2.4 Exploitation des photos aériennes et extraction manuelle des linéaments:

Les linéaments sont déduits suivants des critères bien précis : l'étude linéamentaire consiste à identifier et relever tous les alignements vus sur les images (photo aérienne, photo satellitaire) en traçant directement les structure linéaires.

Pour les photos aériennes, l'extraction des linéaments consiste à placer deux photos aériennes et à l'aide du stéréoscope on les immobilise jusqu'à la superposition des limites des deux photos, ensuite on fixe cette position et on procède au traçage des linéaments sur le papier calque toujours en mobilisant le stéréoscope.

IV.5.2.5 Critères de déchiffrement :

Les critères utilisés dans l'analyse de ces photos sont appelés critères de déchiffrement et se subdivisent en trois groupes :

- ✚ **Le critère photo-tons :** le contraste de teinte de quelque chose avec son environnement est un bon critère de déchiffrement.
- ✚ **Le critère végétation :** les limites brusques et le changement de la nature du couvert végétal ont parfois une signification géologique et où certains sols donnent lieu à des associations végétales typiques donc les anomalies de végétation peuvent être expliquées par des anomalies géochimiques du sous sol (*Lefèvre, 1979*).
- ✚ **Les critères morphologiques :** ce sont les plus rencontrés dans les paysages et les plus importants.

- **Réseaux hydrographiques** : ils s'analysent par leur densité, leur orientation (leur contrôle), leur hiérarchisation et leur angularité. Les formes du réseau hydrographique constituent un caractère fondamental en géologie en général notamment en tectonique.
- **Forme de relief** : la variété des facteurs d'érosion conduit à la création des formes de relief diverses, chaque forme est caractéristique d'un contexte géologique bien précis et sous un climat donné.

Cependant, les critères de déchiffrement des linéaments sont généralement basés sur :

❖ **La direction et la longueur des linéaments** : Les linéaments peuvent être classés en fonction de leur orientation (nord-sud, est-ouest, diagonal, etc.) et de leur longueur. Ces caractéristiques peuvent aider à identifier les structures géologiques sous-jacentes.

❖ **La densité des linéaments** : La densité des linéaments peut être utilisée pour déterminer la présence de structures géologiques, comme des failles ou des fractures.

❖ **La continuité des linéaments** : La continuité des linéaments peut être utilisée pour identifier les zones de rupture dans les structures géologiques.

❖ **La relation des linéaments avec d'autres caractéristiques géologiques** : Les linéaments peuvent être associés à d'autres caractéristiques géologiques, telles que des contacts de roche, des zones de cisaillement ou des intrusions magmatiques. Cette relation peut aider à comprendre la géologie régionale.

❖ **La corrélation des linéaments avec des données géophysiques** : Les données géophysiques, telles que la gravité et la magnétométrie, peuvent être utilisées pour corréler les linéaments avec des structures géologiques sous-jacentes.

IV.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons détaillé de manière exhaustive les outils, les équipements et les procédures utilisés tout au long de notre étude.

La sélection rigoureuse du matériel a été motivée par la nécessité d'assurer la fiabilité des résultats. Les méthodes expérimentales ont été minutieusement élaborées afin de répondre aux objectifs spécifiques de notre recherche, en tenant compte des normes et des protocoles établis dans notre domaine.

L'approche méthodologique adoptée a été justifiée en tenant compte des forces et des limites des techniques utilisées.

Afin de répondre aux questions formulées préalablement, plusieurs échantillons ont été prélevés du site d'étude particulièrement de la formation des argilites sous numidiennes.

Ces échantillons ont été soumis aux divers essais d'identification (granulométrie, limite d'Atterberg, valeur au bleu de méthylène) au niveau du laboratoire de géologie et de géotechnique *Bouibaoune Lakhdar (LGG Sétif)*.

Les analyses minéralogiques et géochimiques ont été réalisées au niveau de l'université d'El Manar, Entreprise Tunisienne des activités pétrolières (*ETAP*) et office nationale des mines Tunis.

L'analyse minéralogique a été réalisée par la diffraction aux rayons X sur la poudre totale (échantillon brut) et sur la fraction inférieure à 2 μ m (lame orientée) pour identifier les différents minéraux constituant chaque échantillon.

La détermination des teneurs en oxydes est réalisée grâce à une analyse géochimique basée sur la fluorescence X (XRF).

Une étude structurale a été également réalisée afin de compléter ces analyses, elle se base sur l'étude linéaire à partir des photos aériennes. Le résultat de cette étude est la réalisation d'une carte linéaire avec une rosace directionnelle pour la confronter avec la carte géologique d'El Haria et la compléter par les travaux de terrain.

Le chapitre suivant se concentra sur la présentation et l'analyse des résultats obtenus grâce à cette méthodologie rigoureuse.

CINQUIEME CHAPITRE

RESULTATS ET DISCUSSION

V.1 Introduction:

Ce chapitre marque le cœur même de cette thèse, où les résultats obtenus sont présentés, analysés et interprétés.

Après avoir examiné en détail la méthodologie et les procédures dans le chapitre précédent, ce chapitre offre un aperçu approfondi des observations et des conclusions tirées de cette étude.

Les résultats obtenus dans ce chapitre sont le produit d'une analyse rigoureuse et d'une interprétation critique des résultats obtenus.

Les analyses et les essais ont été faits avec soin en utilisant des méthodes précises et des outils spécifiques dans le but de répondre aux questions de recherche formulées au début de cette thèse.

Donc, ce chapitre offre une opportunité cruciale pour examiner en profondeur les résultats obtenus, pour les situer dans un contexte académique et pour explorer les pistes pour de futures recherches.

V.2 Résultats et discussion:

V.2.1 Essais géotechniques :

Les essais géotechniques sont des tests effectués pour évaluer les propriétés mécaniques et physiques des sols et des roches. Ils sont essentiels pour comprendre le comportement des sols et des roches, pour prendre des décisions éclairées lors de la conception et de la construction de structures et pour évaluer les risques géotechniques. Ils jouent un rôle crucial dans le domaine de l'ingénierie géotechnique et contribuent à garantir la sécurité et la durabilité des infrastructures.

a- La teneur en eau, densité sèche et degré de saturation :

Vu l'état des échantillons prélevés des sondages carottés réalisés en 2017, et le prélèvement a été fait en 2018, les mesures de la teneur en eau, densité et degré de saturation n'a aucun sens (échantillons secs malgré ils sont paraffinés).

D'après la première étude réalisée par Dar Al Handasah en décembre 2007, les résultats des essais physiques réalisés sur les argilites sont présentés ci-dessous à titre indicatif:

- $1.80 < W_n < 16.10\%$
- $1.73 < \gamma_d < 2.53 \text{ t/m}^3$
- $50.20 < S_r < 115 \%$

D'après les résultats de la mesure de la teneur en eau faites par Coojal et Cosider, la teneur en eau varie de 5% à 12% reflétant un sol sec.

b- Granulométrie :

Les courbes granulométriques des différents échantillons analysés montrent qu'ils sont des argiles limoneuses et limons argileux (Fig. V.1) avec un pourcentage de limon (0.060mm – 0.002 mm) très important variant de 30 à 55 % avec une moyenne de 45%.

Le pourcentage des argiles (< 0.002mm) est compris entre 35 et 60% avec une moyenne de 45.00%. Quant au sable (2 mm- 0.060mm), il est de l'ordre de 10% (Fig. V.2).

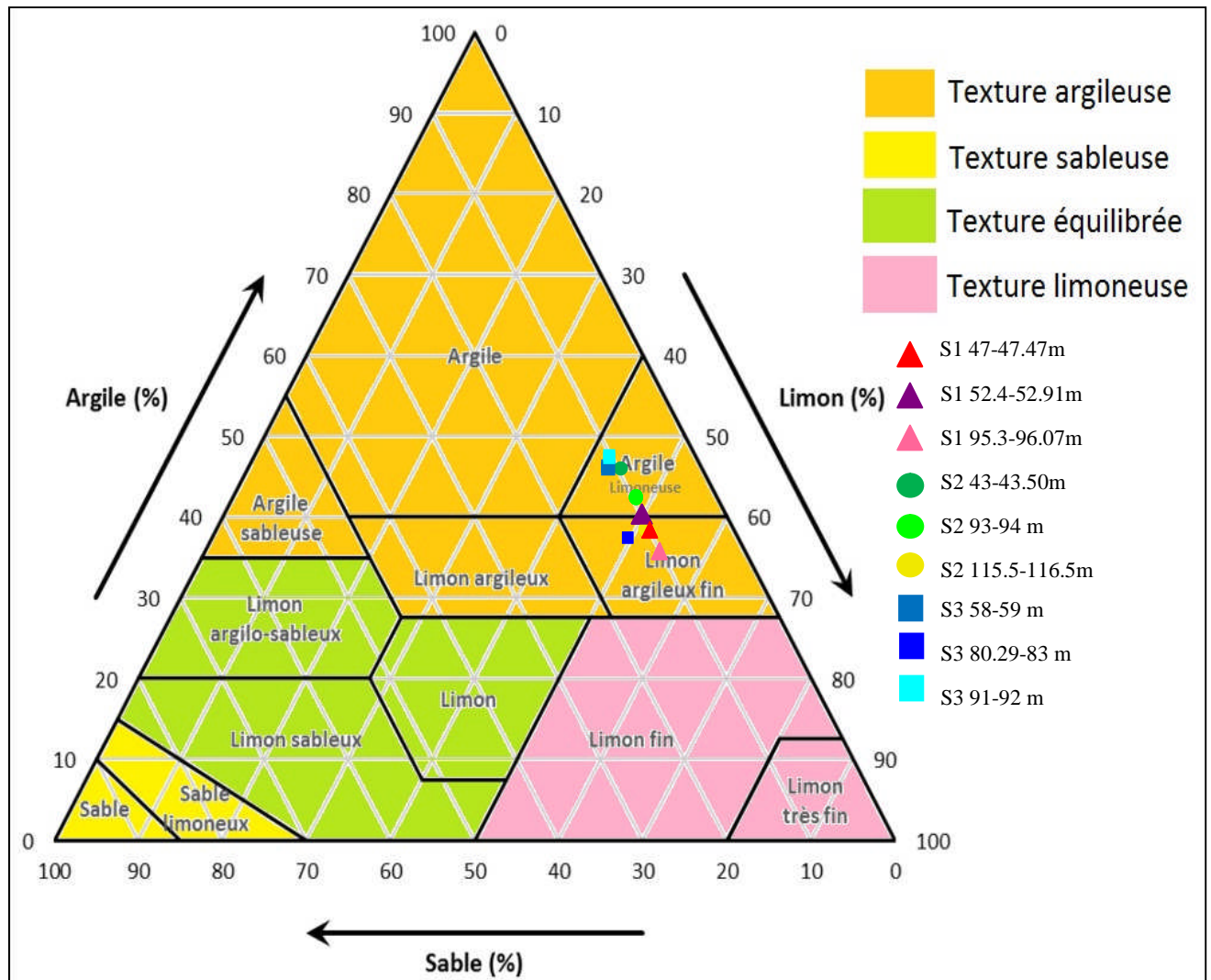


Figure V.1 : triangle pour classification des sols selon la granularité.

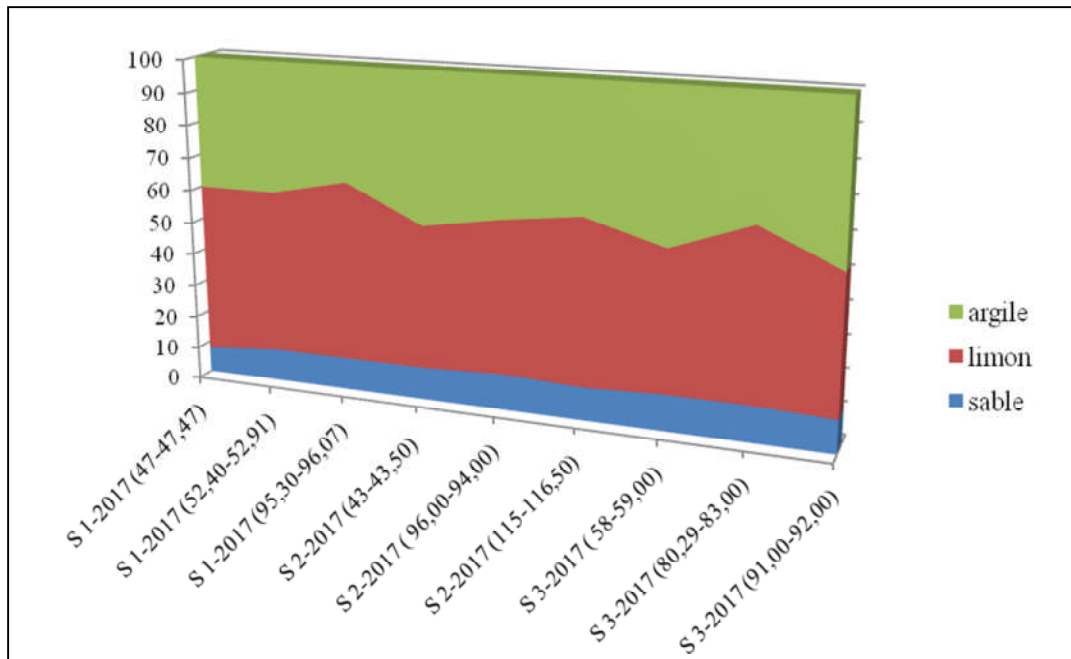


Figure V.2 : variation des pourcentages des argiles, limons et sables pour tous les échantillons

c- Limite d’Atterberg :

Le diagramme de Casagrande montre que la totalité des échantillons sont présentés dans les limons peu plastiques (Fig. V.3), cela est confirmé par la granulométrie qui a montré un pourcentage de limon très important. Une limite de liquidité est comprise entre 41.88 et 54.91% avec un indice de plasticité variant entre 14.11 et 23.53%.

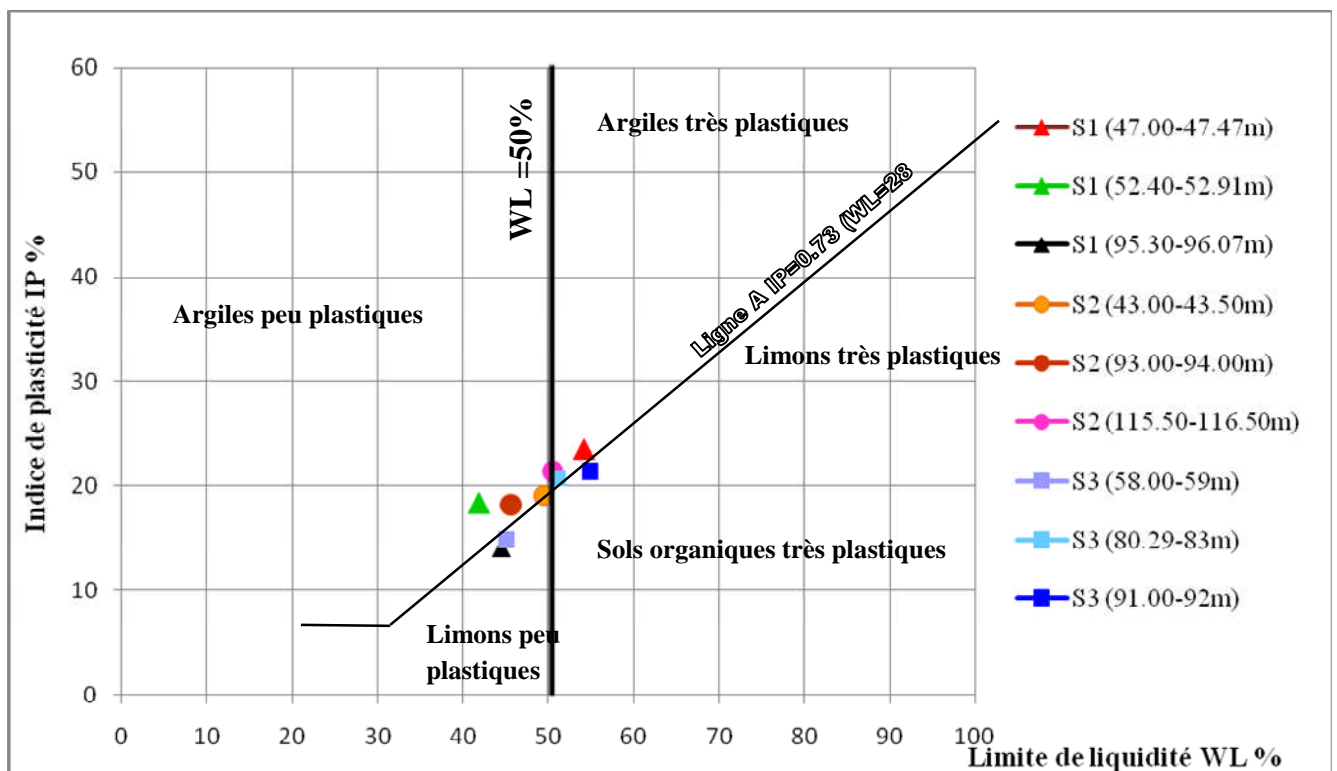


Figure V.3 : représentation des résultats de la limite d’Atterberg des différents échantillons

d- Valeur de bleu de méthylène (VBS) :

Les résultats obtenus de cet essai ont montré que la VBS varie de 1.40 à 2.23 (tableau V.1 et Fig. V.4) avec une valeur moyenne égale à 1.85 ce qui reflète un matériau limoneux.

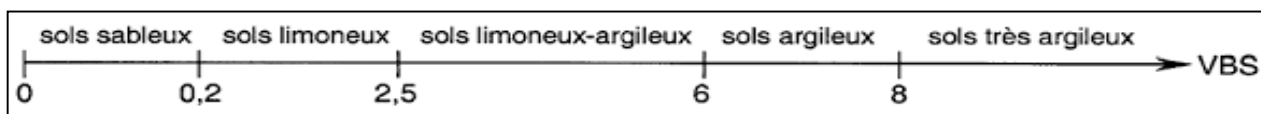


Figure V.4 : classification des sols en fonction de la valeur de bleu de méthylène

Sondage	Profondeur	VBS	C ₂	ACB
S 1-2017	47.00-47.47	2,08	40	5,20
S 2-2017	43.00-43.50	2,05	46	4,46
S 3-2017	80.29-83.00	1,67	37	4,51

Tableau V.1: résultats de la valeur de bleu de méthylène (VBS)

➤ **Activité de la fraction argileuse :**

L'activité argileuse (A_{CB}) est considérée comme étant le rapport entre la valeur de bleu (VBS) et la teneur en particules inférieures à $2\mu\text{m}$ (C_2).

$$A_{CB} = \text{VBS}/C_2$$

Activité de la fraction argileuse du sol	Qualificatif
$0 \leq A_{CB} \leq 3$	Inactive
$3 \leq A_{CB} \leq 5$	Peu active
$5 \leq A_{CB} \leq 13$	Moyenne
$13 \leq A_{CB} \leq 18$	Active
$18 < A_{CB}$	Très active

Tableau V.2 : qualification des sols en fonction de l'activité de leur fraction argileuse.

D'après les résultats obtenus (tableau V.2), on constate que tous les échantillons sont peu actifs hormis deux échantillons du sondage 01 ayant montré une activité moyenne.

e- Les analyses chimiques :

L'examen des résultats obtenus montre que les échantillons analysés ne sont pas carbonatés dont le taux de carbonate varie entre 1.63 et 13.33%.

Ces argilites contiennent des traces de gypses où le pourcentage est compris entre 2.49 et 3.59%.

f- Essais mécaniques :

Vu la nature des échantillons prélevés des sondages carottés réalisés en 2017 conservés dans la base de vie de l'entreprise *Cosider* (argilite schisteuse et friable), les essais mécaniques n'ont pas pu être réalisés car les échantillons s'effritent le long des plans de schistosité lors de la préparation des essais, même l'entreprise *Cosider*, n'a pas pu aussi réaliser ces essais, et d'après les anciennes études faites en 2011 et 2012, des essais mécaniques tels que le cisaillement direct et l'essai triaxial ont été effectués sur quelques échantillons mais les résultats présentent quelques anomalies qui sont dus probablement à la difficulté des essais dans ces argilites.

Deux interventions du laboratoire des travaux publics de l'Est (*LTPEST*) au profit de l'entreprise *COOJAL* pour but de la reconnaissance géotechnique du site, deux rapports ont été établis, le premier en date du : 20/03/2011 où ils ont réalisé des essais de cisaillement dont les résultats sont présentés à titre indicatif comme suit (tableau V.3):

Sondage	Profondeur (m)	Cu bar	Φ °
01	32 - 32.47	1.129	5
	33.10 - 33.40	0.501	1
	34 - 34.60	1.323	15
	35.50 - 35.90	0.924	7

Tableau V.3 : résultats essais mécaniques (essai de cisaillement) réalisés par LTPEST

Quant aux essais triaxiaux, d'après le rapport du laboratoire *LTP EST*, ils n'ont pas été réalisés à cause de la friabilité des échantillons.

Une deuxième intervention du laboratoire *LTP EST* en date du : 02/07/2012 pour but de la reconnaissance géotechnique du tube gauche (tube Ouest), où il a réalisé un sondage

horizontal sur la paroi du tube, les résultats de l'essai de cisaillement rectiligne CD sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Sondage	Profondeur (m)	Cu bar	Φ°
T01	32 - 32.47	0.464	30

Tableau V.4 : résultats essais mécaniques (essai de cisaillement rectiligne CD) réalisés par LTPEST

V.2.2 Analyses minéralogiques et géochimiques:

V.2.2.1 Diffractométrie des rayons X (DRX) :

L'analyse des différents diffractogrammes a indiqué la présence du quartz en abondance (Fig. V.5, 6 et 7) ainsi que la Kaolinite en deuxième ordre, ce qui est confirmé par la fluorescence X dont le pourcentage de l'élément le plus élevé est le SiO_2 (quartz) ensuite Al_2O_3 .

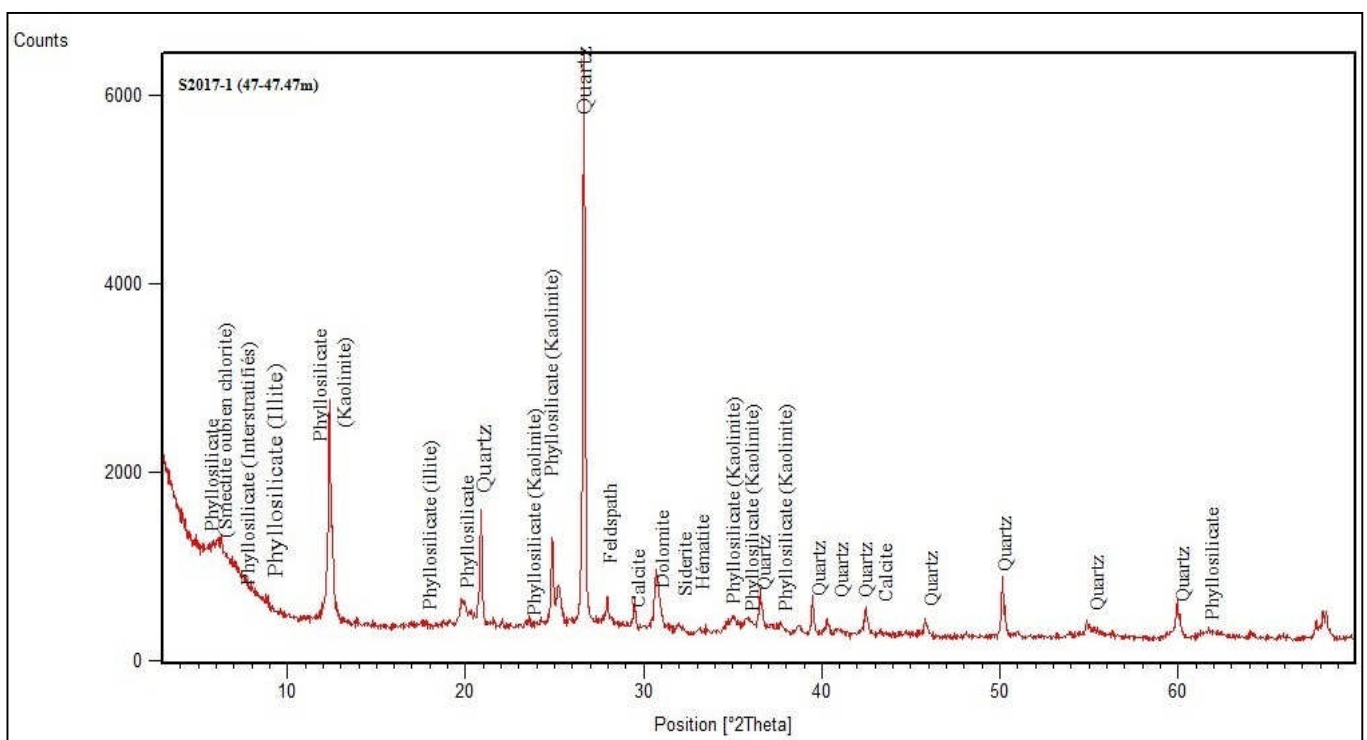


Figure V.5 : diffractogrammes de l'échantillons poudre du sondage S01 (47.00-47.47m).

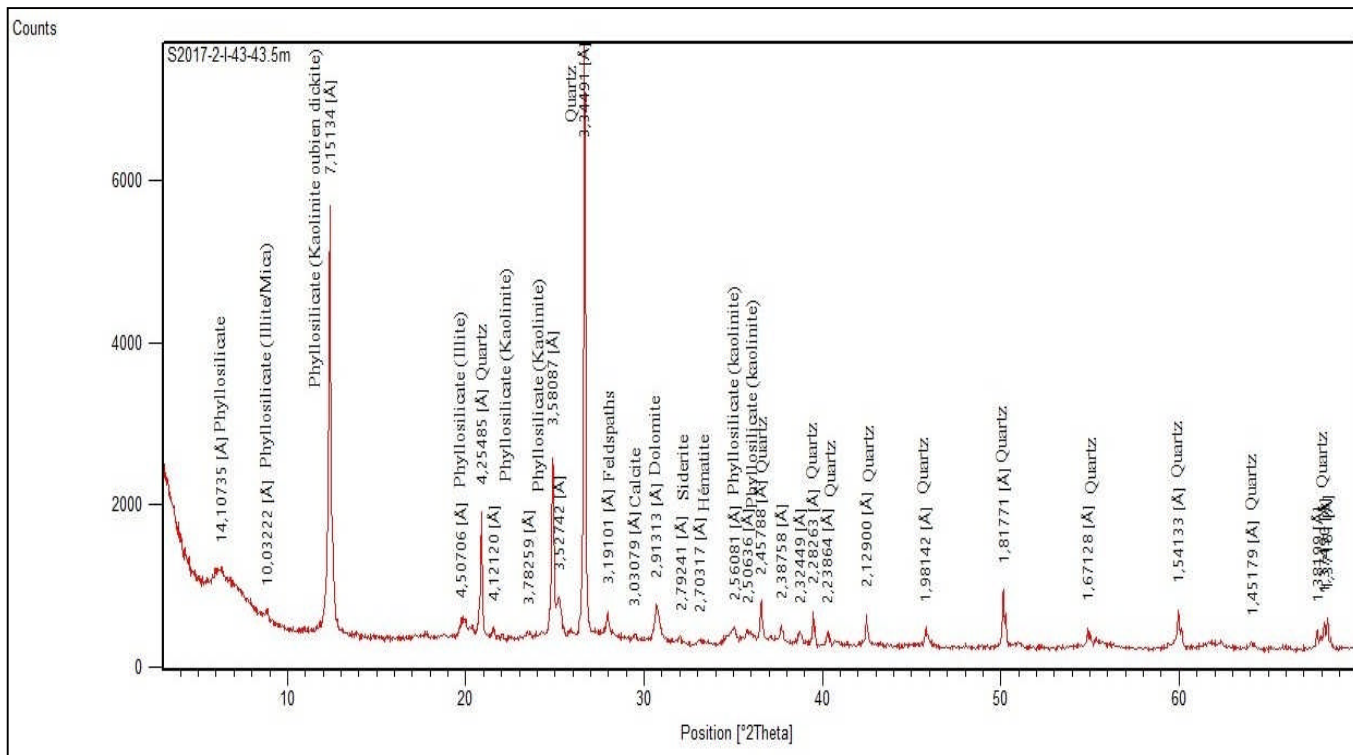


Figure V.6 : diffractogramme de l'échantillon poudre du sondage carotté S2017-2 (43.00-43.50 m)

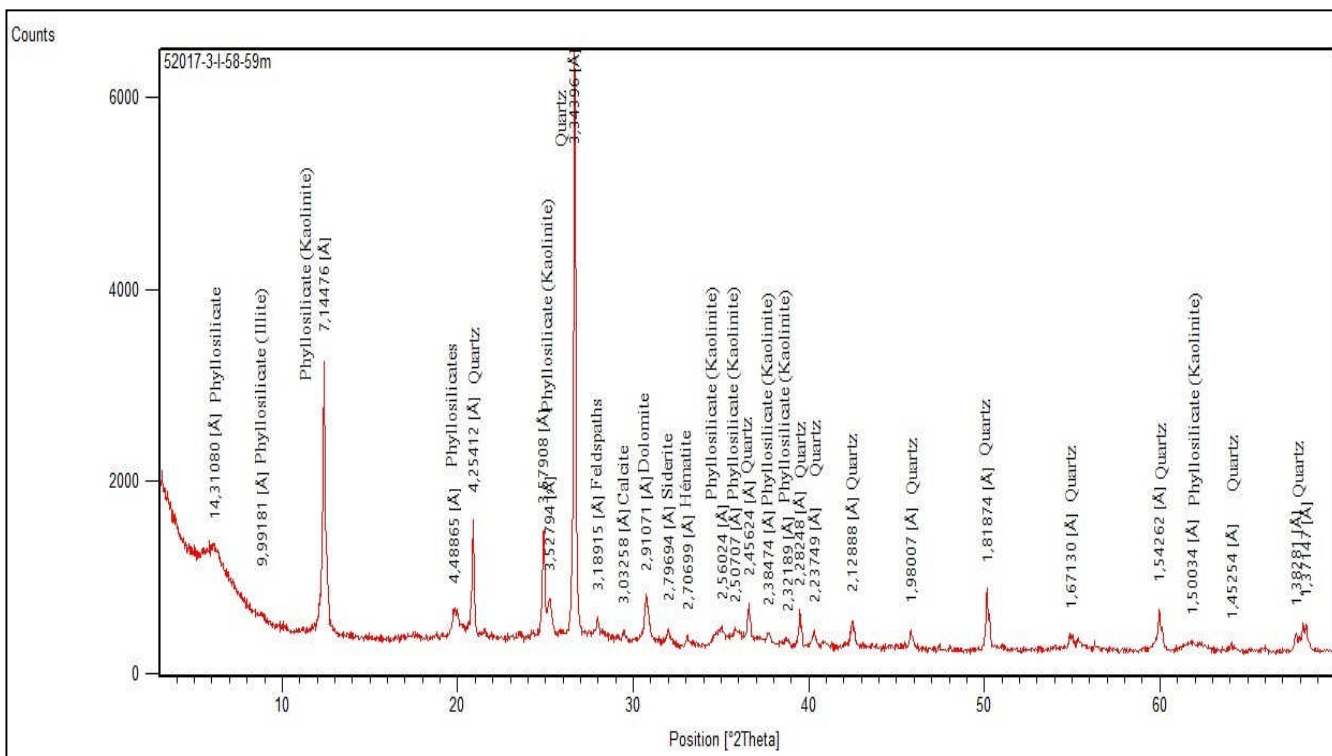


Figure V.7 : diffractogramme de l'échantillon poudre du sondage carotté S2017-3 (58.00-59.00 m)

L'analyse semi quantitative des échantillons totaux montre une distribution minéralogique presque identique dans tous les échantillons avec une proportion élevée des argiles totales dont le pourcentage moyen est de 43.75% (tableau V.5) avec une dominance du quartz qui arrive en second lieu avec un pourcentage moyen de 41.37% et enfin, il y a les minéraux accessoires tels que feldspath, calcite, dolomite et oxydes de fers (hématite) et sidérite en traces (Fig. V.8).

Échantillon	S1.I (47-47,47m)	S1.II (52,4-53,2m)	S1.III (95-96m)	S2.I (43-43,5m)	S2.II (94-96m)	S2.III (115.-116,5m)	S3.I (58-59m)	S3.II(80,29-83m)	S3.III (91-92m)
Les minéraux									
Argile totale	41	43	43	38	40	54	44	55	36
Quartz	39	37	49	45	47	36	40	36	42
Feldspath	7	7	5	7	6	4	5	4	10
Calcite	3	3	0	2	2	2	1	0	0
Dolomite	6	6	0	4	2	2	5	0	1
Sidérite	1	1	1	1	1	1	2	2	1
Hématite	2	3	2	3	2	1	3	3	9

Tableau V.5 : résultats d'analyse semi quantitative des trois échantillons

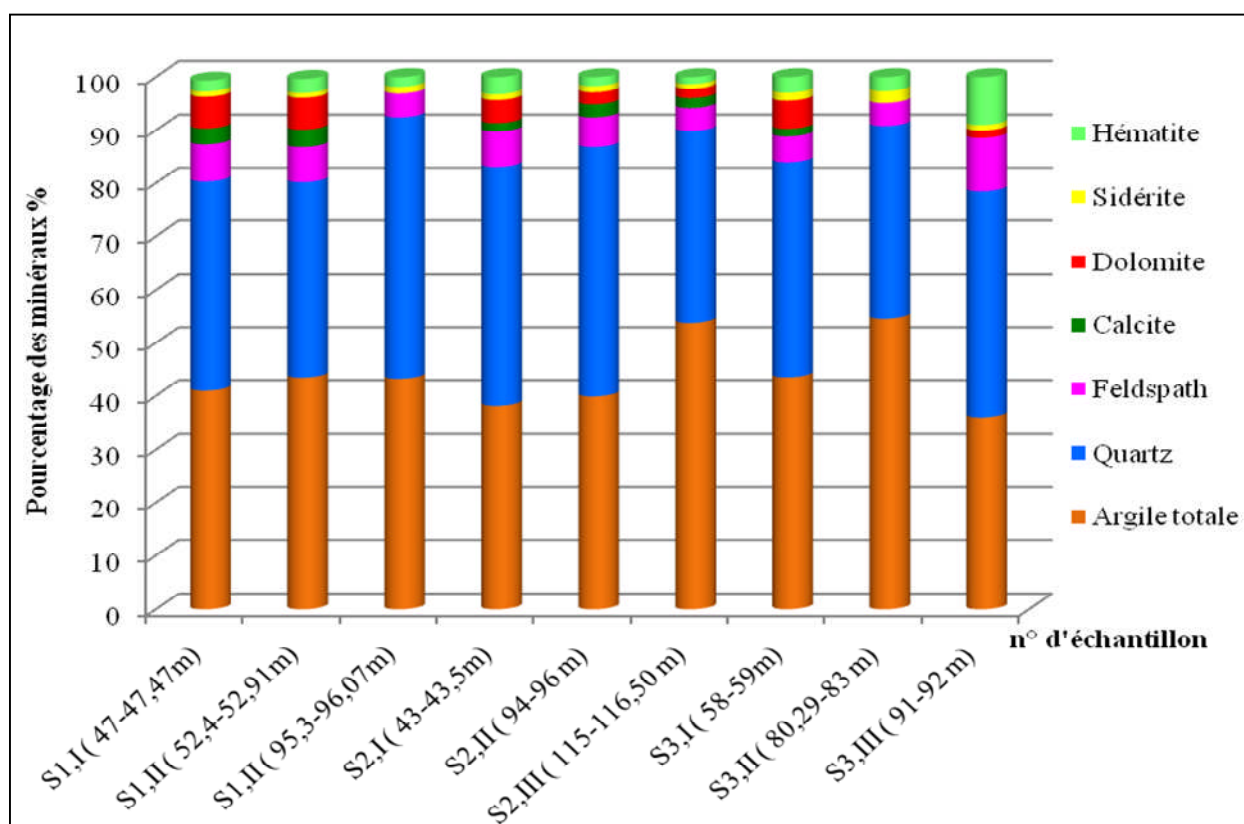


Figure V.8 : composition minéralogique de l'argile totale

Les diffractogrammes des lames orientées ont montré un cortège argileux composé de la Kaolinite, l'illite et la chlorite, la smectite et les interstratifiés réguliers (Fig. V.9, 10 et 11).

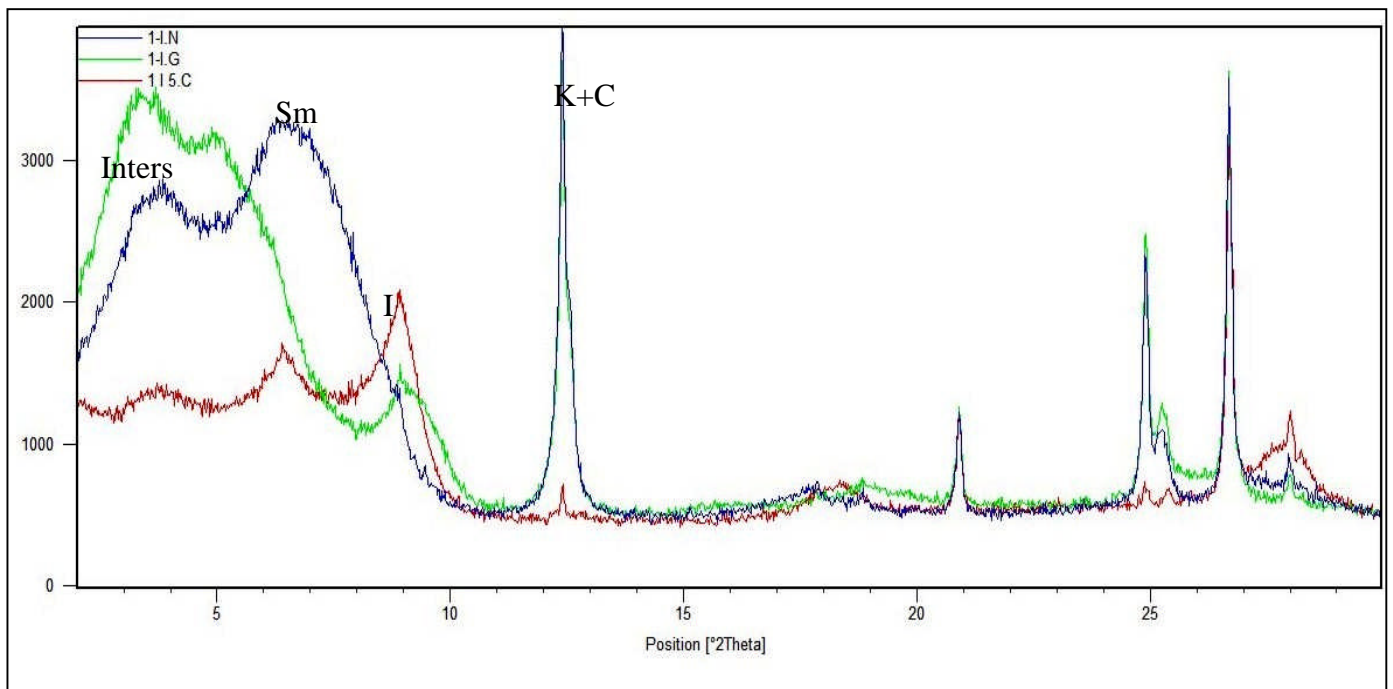


Figure V.9 : diffractogramme de la lame orientée du sondage S01 (47.00-47.47m).

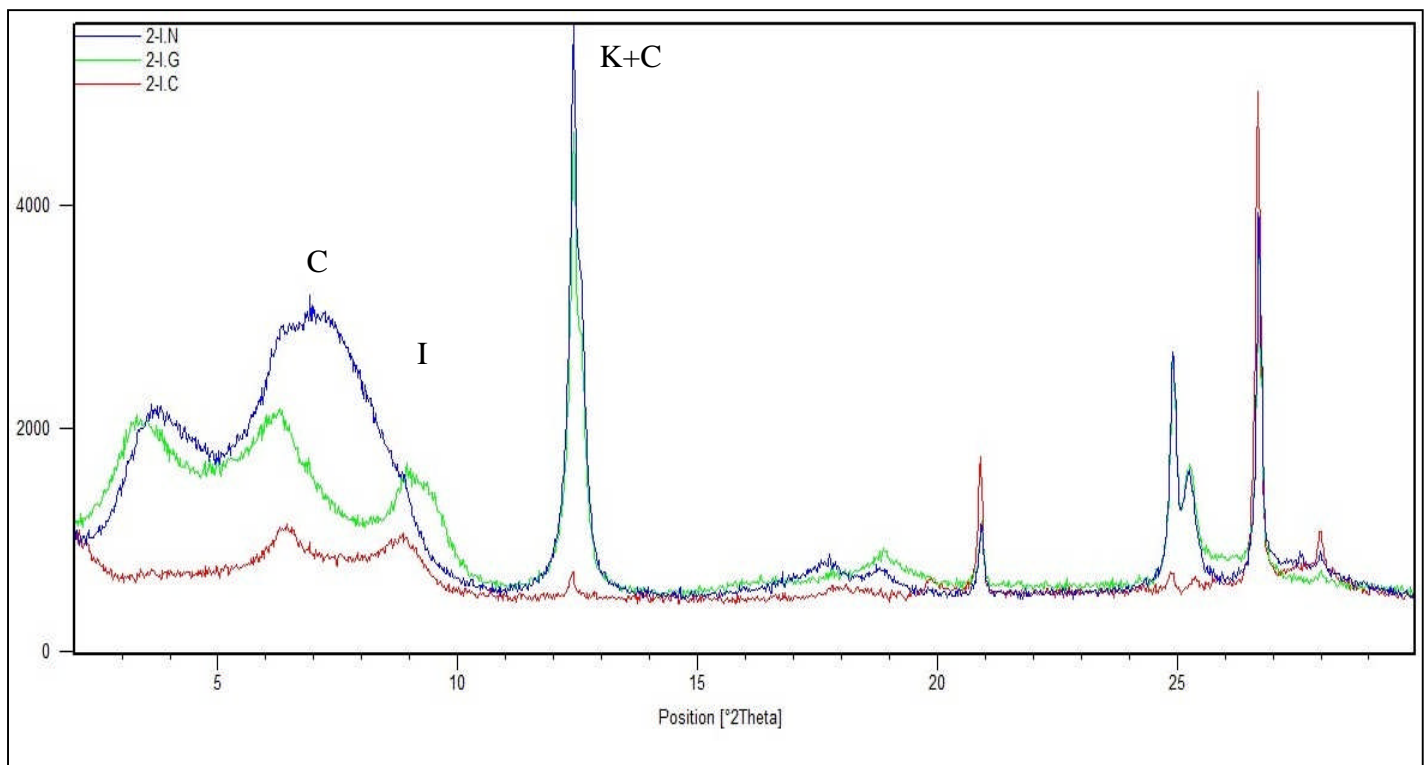


Figure V.10 : diffractogramme de la lame orientée du sondage S02 (43-43.50 m)

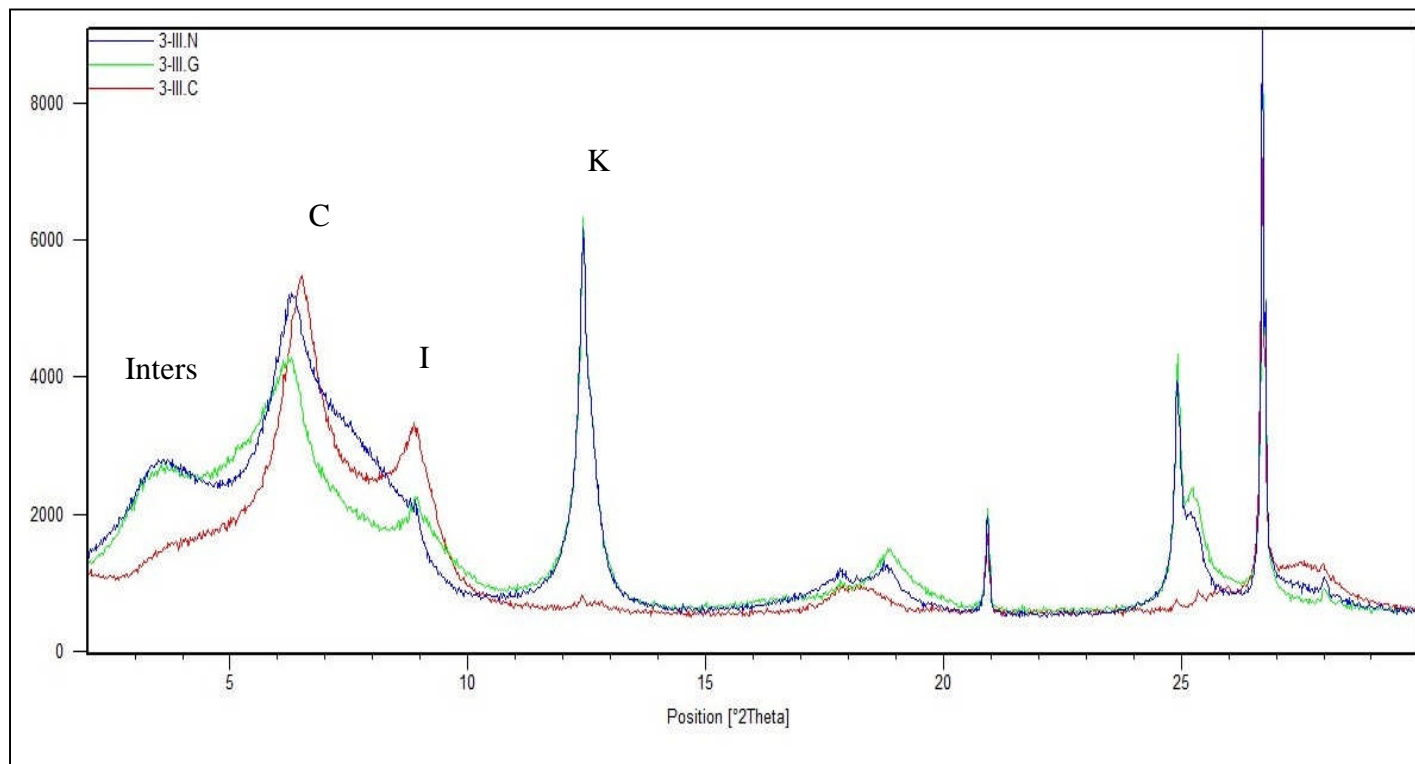


Figure V.11 : diffractogramme de la lame orientée du sondage S03 (91-92m).

L'analyse semi quantitative de la fraction argileuse montre une dominance de la Kaolinite (Fig. V.12) avec un pourcentage de 37.92%, la smectite avec un pourcentage 20.51%, la chlorite (18.88%), l'illite (13.70%) et enfin les interstratifiés avec un pourcentage moyen de 8.99% (tableau V.6).

Échantillon	S1.I (47-47.47m)	S1.II (52,4-53,2m)	S1.III (95-96m)	S2.I (43-43,5m)	S2.II (94-96m)	S2.III (115.-116,5m)	S3.I (58-59m)	S3.II(80,29-83m)	S3.III (91-92m)
Les minéraux									
Smectite	34	14	4	10	0	33	30	43	17
Chlorite	18	11	11	21	14	17	22	24	32
interstratifiés	4	14	4	13	11	10	11	6	9
illite	17	21	11	19	14	10	8	10	13
kaolinite	27	40	71	38	62	30	28	17	29

Tableau V.6: pourcentage des minéraux argileux

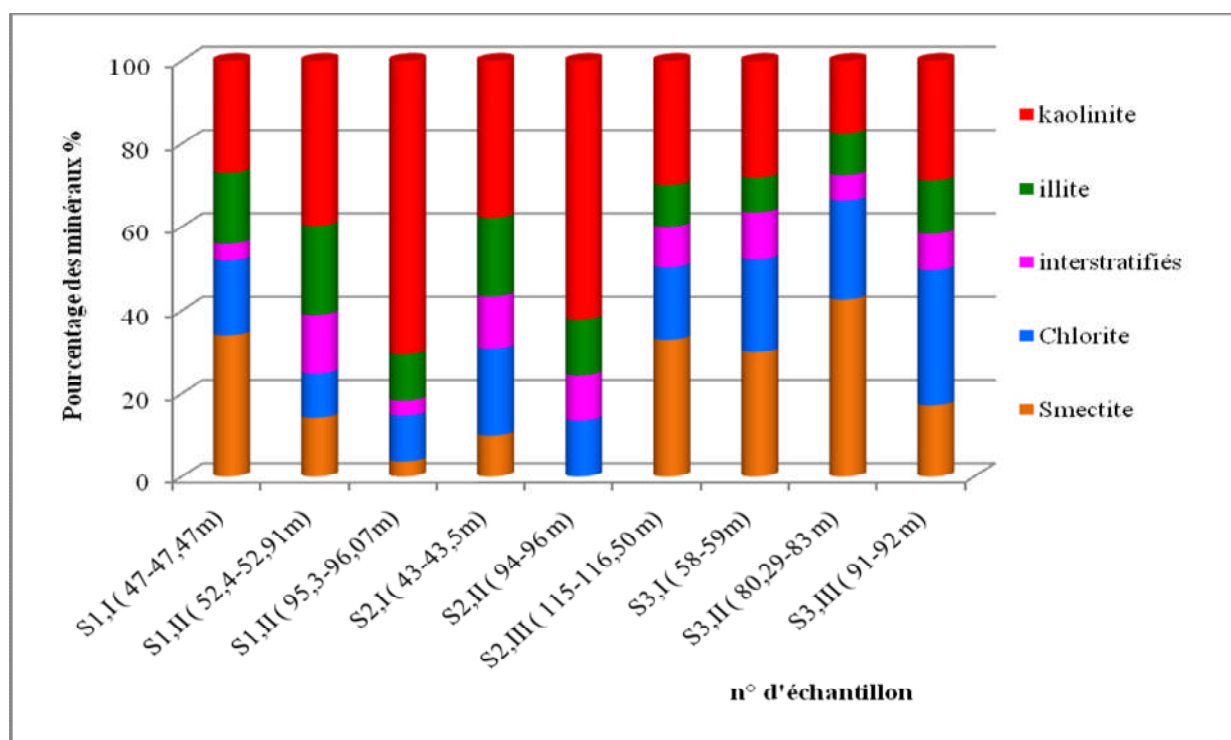


Figure V.12 : composition minéralogique de la fraction argileuse

V.2.2.2 Fluorescence X :

D'après le tableau 07, les résultats indiquent que les constituants les plus dominants sont la Silice et l'Aluminium qui est expliqué par la présence du quartz (SiO_2), et les phyllosilicates représentées par la kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), l'illite $[(\text{K}, \text{H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH}_2)]$ et la chlorite $(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Al})_6 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_8$ (Fig. V.13). Le calcium et le magnésium liés à la calcite et la dolomite, sont présentés par des faibles pourcentages dont le taux de carbonate a montré des faibles valeurs de CaCO_3 . Quant au fer, il est lié à la sidérite (FeCO_3) et hématite (Fe_2O_3).

N°échantillon élément chimique	S1.I (47- 47,47m)	S1.II (52,40- 53,20m)	S1.III (95- 96m)	S2.I (43- 43,5m)	S2.II (94- 96m)	S2.III (115.- 116,5m)	S3.I (58- 59m)	S3.II(80,29- 83m)	S3.III (91-92m)
% Al_2O_3	15,3	14,09	21,6	16,18	17,52	16,39	14,35	16,66	18,84
% MgO	2,52	2,82	2,67	2,48	2,14	2,37	2,44	3,27	3,32
% CaO	2,66	3,14	0,86	2,4	1,66	2,27	1,94	0,92	0,64
% Na_2O	0,62	0,69	0,53	0,59	0,58	0,69	0,52	0,4	0,49
% K_2O	1,81	1,36	1,24	1,3	1,27	1,18	1,13	1,44	1,19
% Fe_2O_3	6,55	7,21	6,46	6,45	6,61	6,46	6,62	6,58	6,57
% SiO_2	57,97	57,98	54,46	57,38	57,00	57,38	59,84	57,4	56,74
% PF	9,94	10,25	9,75	10,77	10,66	10,86	10,44	10,64	10,45
% TiO_2	0,88	0,68	0,79	0,81	0,79	0,97	0,74	0,7	0,75

Tableau V.7 : résultats des analyses chimiques de la fluorescence X des échantillons des argilites

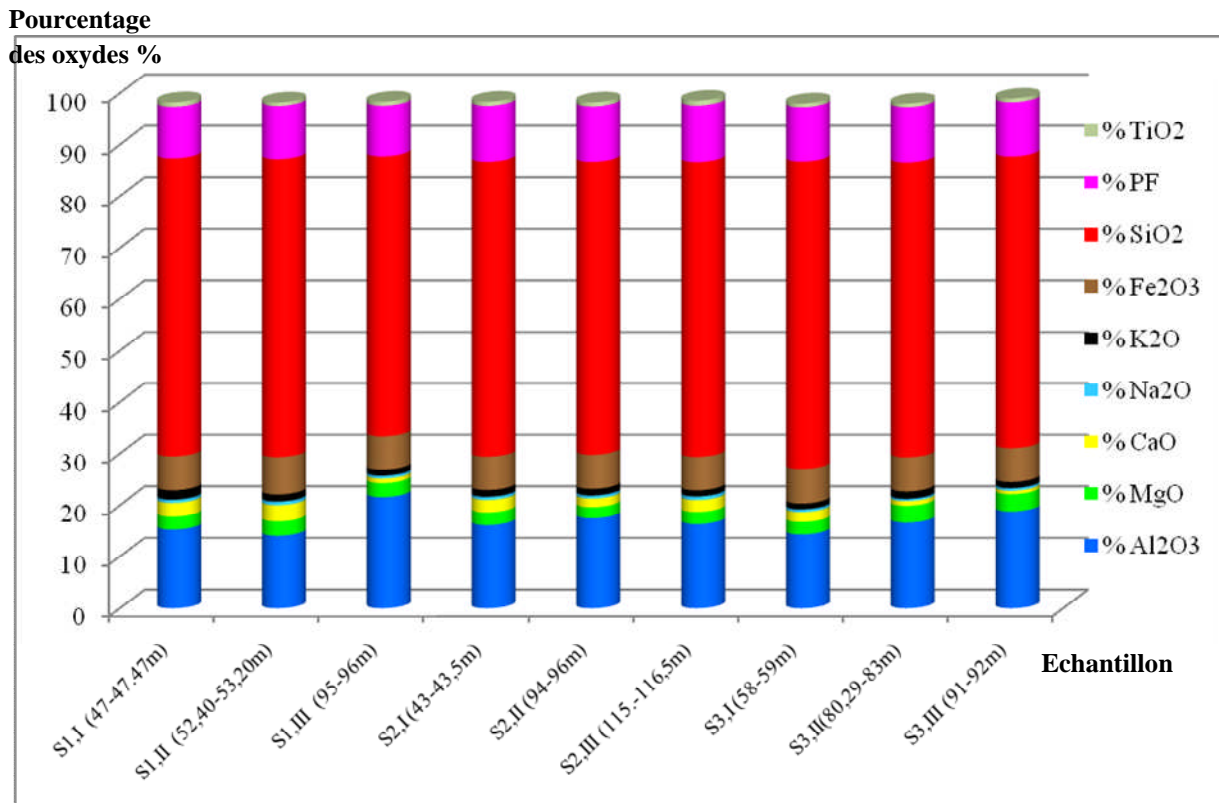


Figure V.13 : répartition des oxydes dans chaque échantillon

V.2.2.3 Microscope électronique à balayage (MEB) :

Les images obtenues d'un agrandissement différent montrent la présence de la Kaolinite sous forme de plaquettes hexagonales (Fig. V.14 et 15), le quartz sous forme de grains (Fig. V.16).

Des analyses quantitatives par EDX de l'échantillon a été faite également pour la détermination de la composition chimique de l'argile analysée.

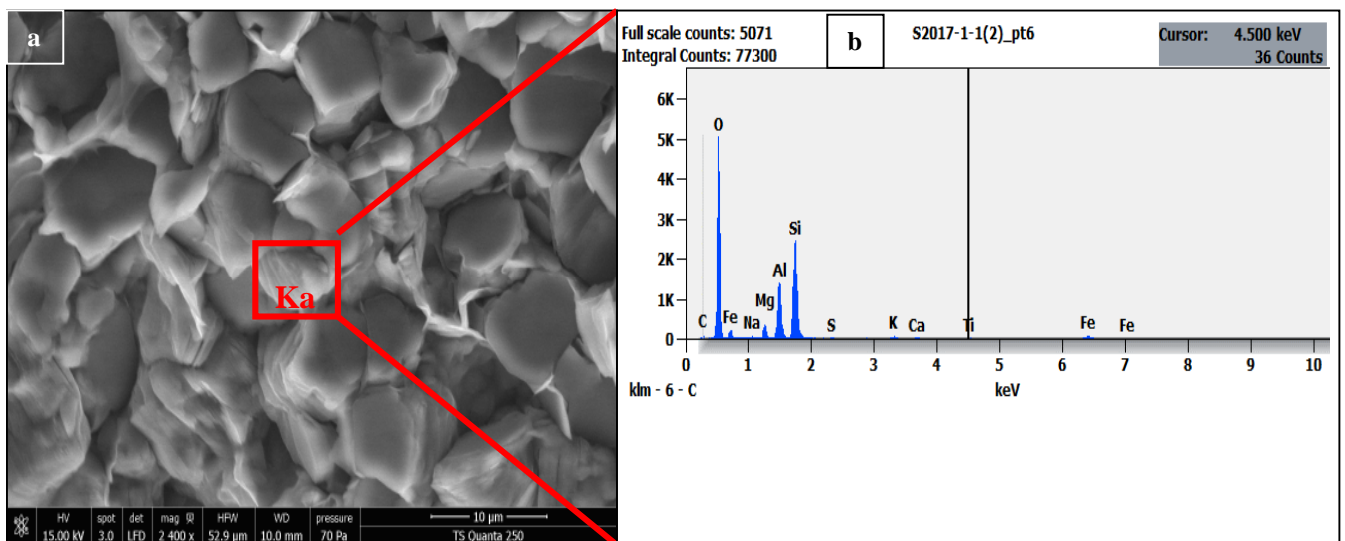


Figure V.14 : (a) : image MEB montrant la Kaolinite (b) analyse EDX de la Kaolinite

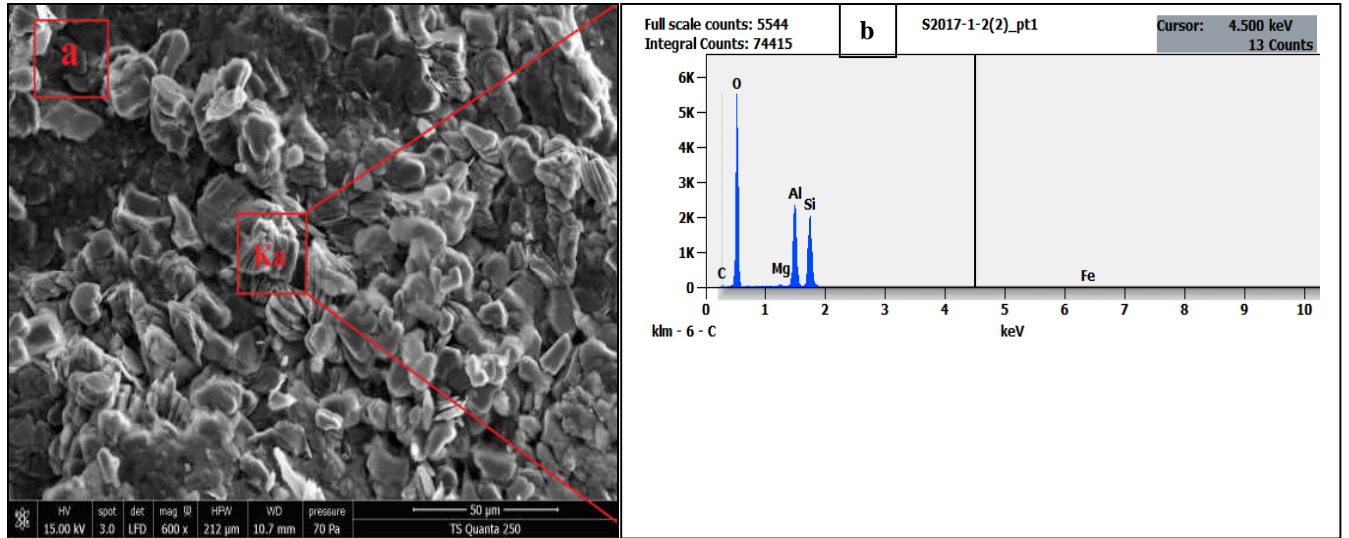


Figure V.15 : (a) : image MEB montrant la Kaolinite (b) analyse EDX de la Kaolinite

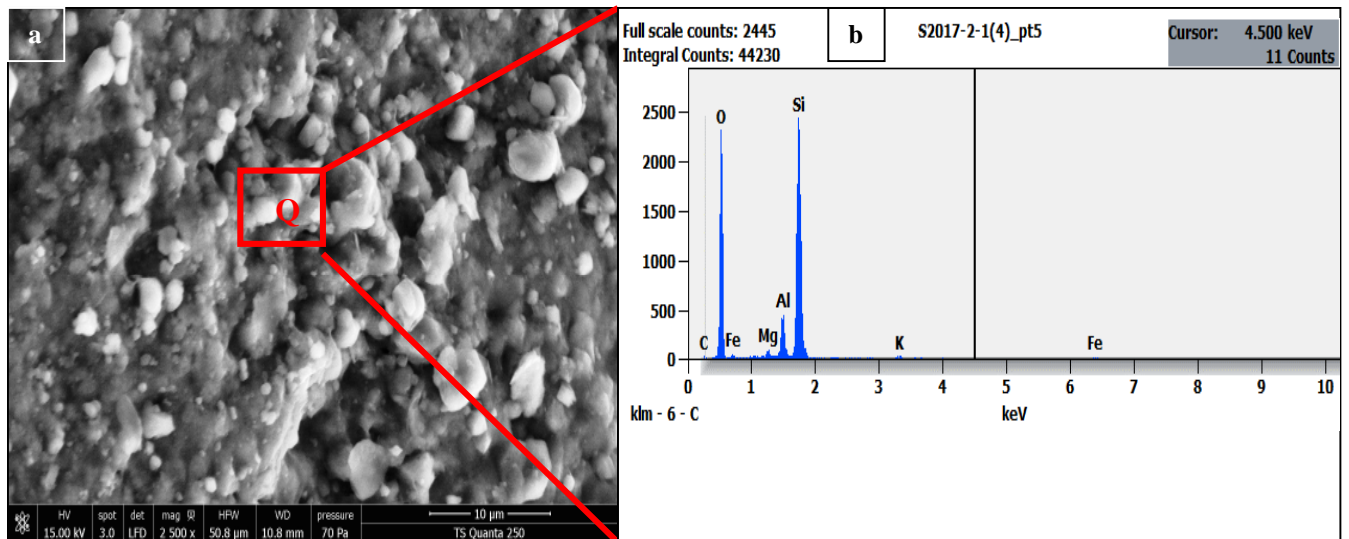


Figure V.16 : (a) : image MEB montrant le quartz (b) analyse EDX du quartz

V.2.3 L'étude géologique structurale:

V.2.3.1 Introduction:

La fracturation d'un massif peut jouer un rôle important dans l'effondrement des tunnels. Lorsque des tunnels sont creusés, ils créent des perturbations dans la structure de la roche environnante. Ces perturbations peuvent provoquer des fractures et des fissures dans le massif.

Lorsque le massif est fracturé, sa stabilité est compromise, ce qui peut entraîner un affaissement ou un effondrement des tunnels. Les fractures peuvent se propager le long des plans de faiblesse dans le massif, tels que les joints de roche ou les failles préexistantes, et les plans de schistosité ce qui peut également affaiblir la résistance de la roche en conduisant à un effondrement progressif des tunnels.

Il est donc essentiel de prendre en compte la fracturation du massif lors de la conception et de la construction des tunnels. Des mesures de soutènement, bien étudiées peuvent être nécessaires pour renforcer et stabiliser la roche fracturée.

Des études géotechniques approfondies et des méthodes de surveillance régulières sont également nécessaires pour détecter et évaluer les fractures existantes ou potentielles afin de prévenir les effondrements des tunnels et assurer la sécurité des personnes et des infrastructures.

A cet effet, et pour compléter les essais géotechniques et les analyses minéralogiques, nous avons procédé à la réalisation d'une carte linéamentaire en se basant sur les photos aériennes en noir et blanc avec une échelle de 1/20 000 prises en 1973 ainsi que la carte géologique d'El Haria feuille n°74 échelle 1/50 000.

Néanmoins, nous avons besoins de plusieurs photos aériennes pour couvrir la région d'étude.

Cette étude a été complétée par les travaux de terrain qui consiste en l'observation, la description et des mesures sur les différents éléments structuraux (failles, plissement, fracture ...etc) en surface et à l'intérieur du tube Ouest (tube effondré) sur les flancs latéraux.

V.2.3.2 Objectif assigné :

L'objectif de cette partie est la détection de toutes les structures linéamentaires qui peuvent influencer sur l'ensemble de la fracturation de notre secteur d'étude afin de voir s'il existe une étroite relation entre la tectonique et l'effondrement du tube Ouest du tunnel T1.

Afin de mieux cerner la répartition des linéaments, l'analyse de l'information se fera en plusieurs étapes :

✚ Dans une première étape, nous précéderons à la localisation et à l'extraction par report directe sur un calque en respectant l'échelle de travail, des linéaments à partir des photos aériennes du secteur d'étude.

✚ Dans une seconde étape, nous procéderons à l'analyse statistique des linéaments par établissement de la rosace directionnelle proportionnelle à la fréquence cumulative des linéaments par classe de 15°, ce qui permettra de déterminer les orientations structurales, la densité de fracturation, les variations spatiales des linéaments.

✚ Ensuite, vient l'étape où nous procéderons à la confrontation des résultats aux données de terrain et à la carte géologique d'El Haria, feuille n°74, échelle 1/50 000.

✚ Dans la dernière étape, nous procéderons enfin, à l'interprétation des résultats et discussions sur la fracturation.

V.2.3.3 Etablissement de la carte linéamentaire:

Une carte des linéaments (Fig. V.17) a été établie à partir du report systématique de tout les linéaments repérés sur six photos aériennes au 1/20 000 de l'année 1973 (Fig. V.18) de la région (secteur d'étude) couvrant une partie de l'Ouest la feuille d'El Haria au 1/50 000. Le traitement a été fait à l'aide du logiciel ARCGIS.

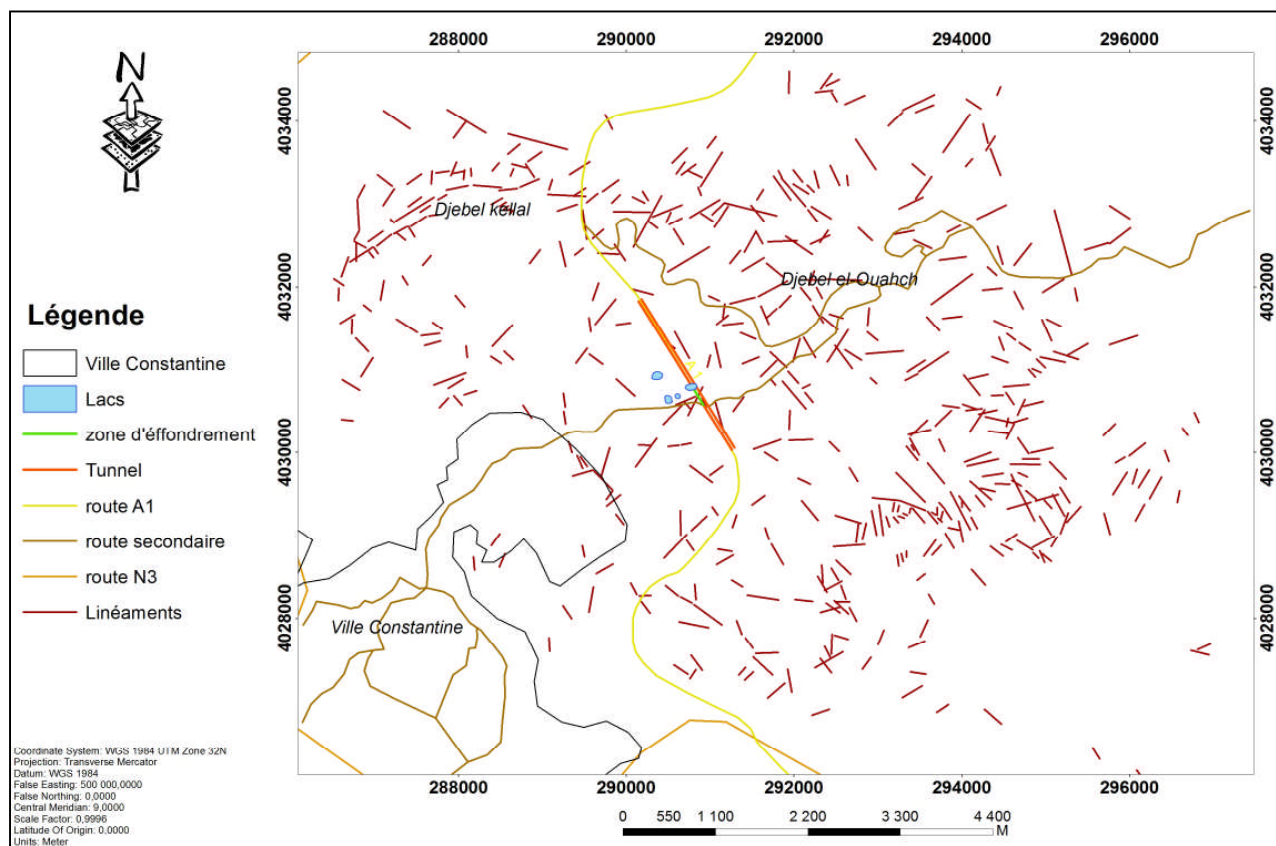


Figure V.17 : Trame dense des linéaments avec maillage d'après l'étude des photos aériennes, au 1/20 000.

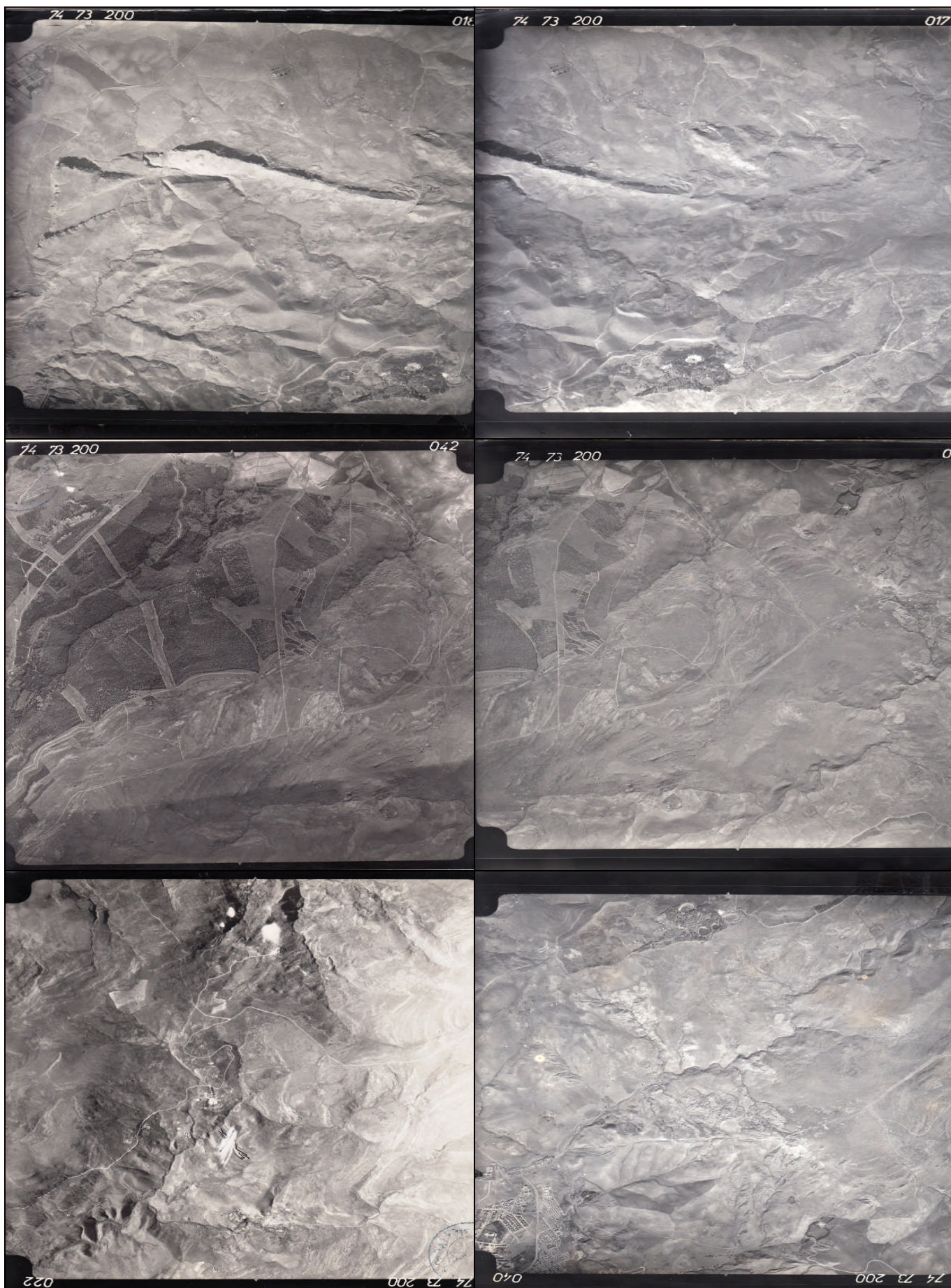


Figure V.18 : photos aériennes utilisées pour l'établissement de la carte linéamentaire

L'observation de la trame dense des linéaments issue des photo-aériennes au 1/20 000 qui regroupe au total 251 linéaments, indique que leur longueur s'échelonne sur des grandeurs kilométriques.

La carte montre une zone de faible densité de linéaments dans le Sud- Ouest (ce sont des terrains meubles), alors que la partie N-W, N-E et S-E sont fortement peuplées car elles sont couvertes par les calcaires de la nappe de Djemila et les massifs gréseux de Dj El Ouahch (formations dures).

V.2.3.4 Analyse statistique des linéaments:

Le traitement statistique, des linéaments relevés, par angles croissant de 0° - 180° en divisant le fichier en classes de 15° , a donné lieu aux résultats représentés selon un histogramme (Fig. V.19) et une rosace directionnelle (Fig. V.20).

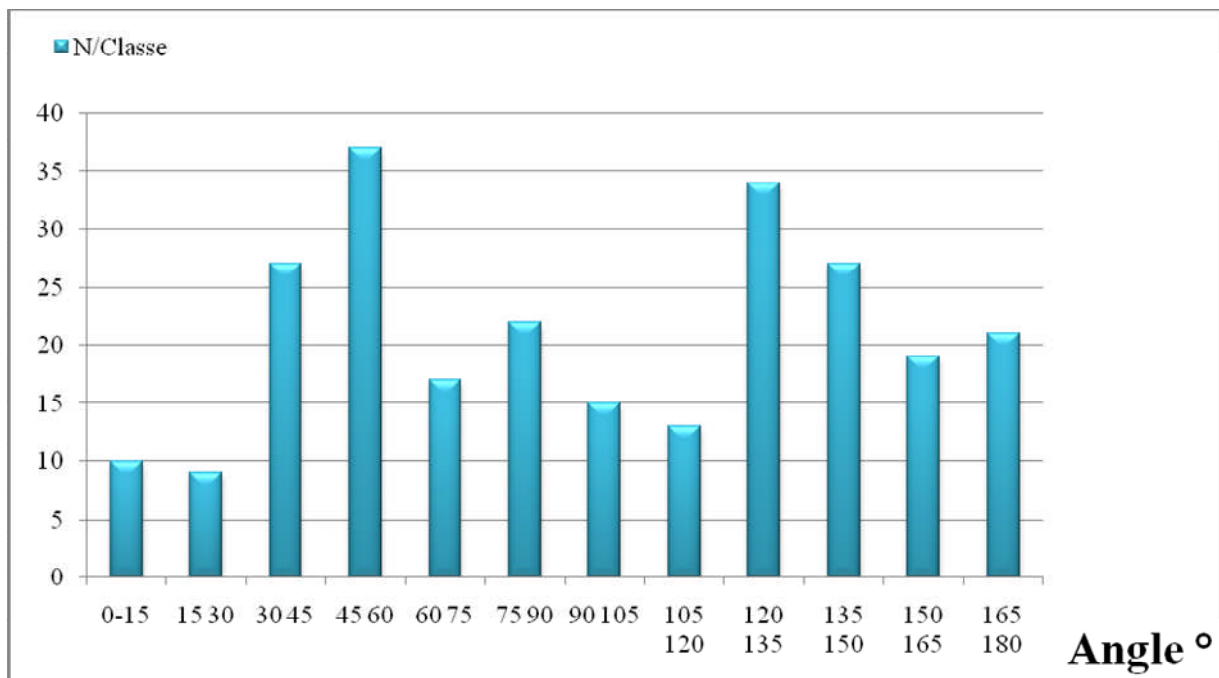


Figure V.19 : Histogramme de fréquence en nombre des directions des linéaments.

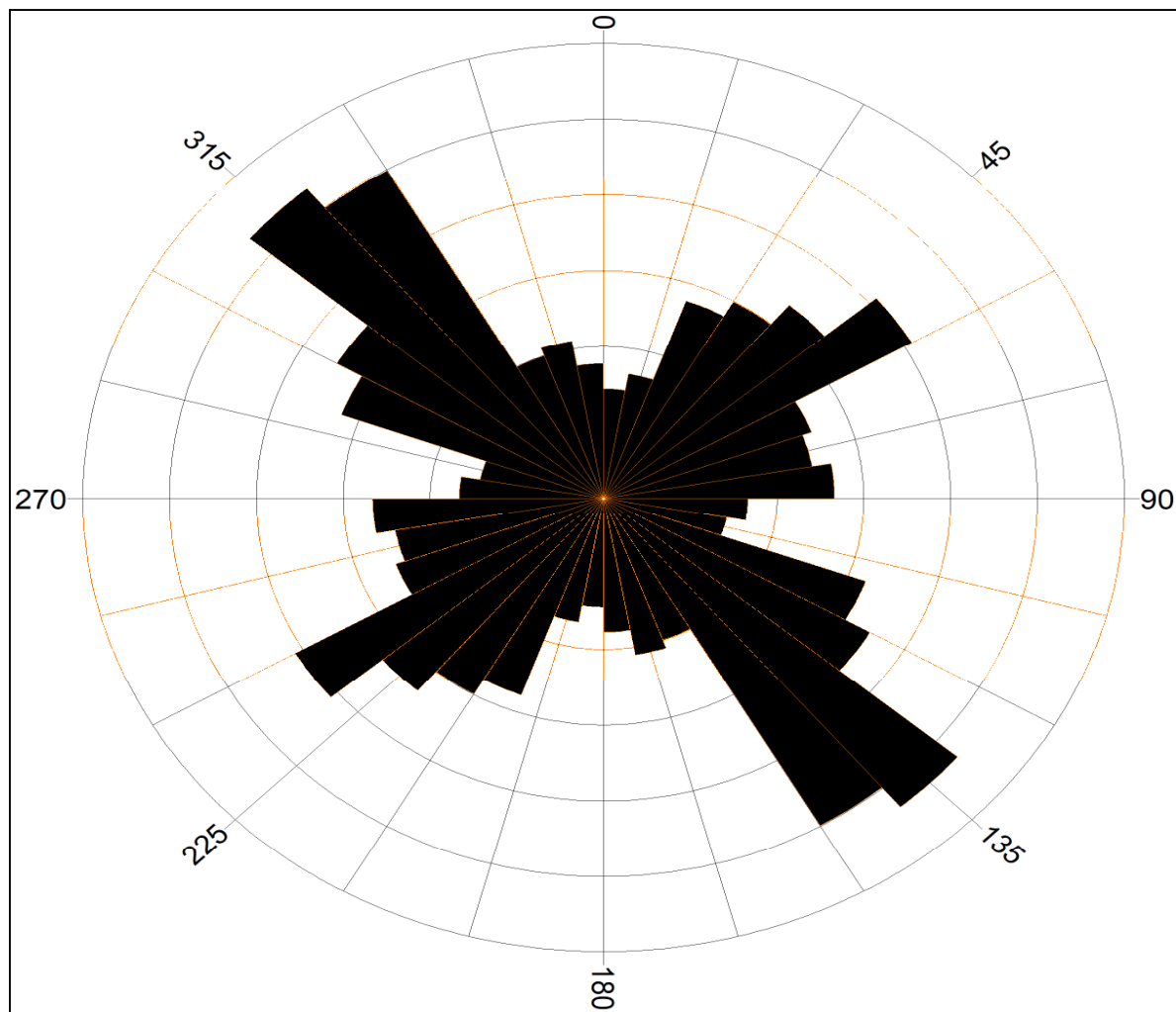


Figure V.20 : Diagramme en rosace directionnelle des linéaments

L'interprétation de la rosace directionnelle des linéaments montre que la fracturation s'organise selon deux directions majeures: la NE – SW (N45-60) c'est la faille N45° E dont l'accident d'el Kentour (Aris. Y, 1994) et NW – SE (130-150) notant la présence des deux directions N-S (N0-15 et N165-180) et la E-W (comprise entre N75 et N100) c'est la N100° E qui est représentée par l'importance accident de M'Cide Aicha Debbar qui met localement en contact les formations jurassiques avec les formations Mio-Plio-Quaternaire (Aris. Y, 1994).

D'après les travaux de terrain, nous avons pu mesurer quelques éléments structuraux (axe de charnière de micro- plissements, directions et pendage des miroirs de fractures) sur les flancs latéraux à l'intérieur du tunnel effondré aux endroits où le revêtement a été dénudé. A ces endroits, les argilites schisteuses grisâtres sont marquées par la présence des micro-plissements dont l'axe de la charnière est orienté parallèlement à l'axe du tunnel. Ces micro-plissements sont affectés par des fractures conjuguées, l'une est de direction N90 E et l'autre de direction N135 E formant entre eux un angle de 45° environ (Fig. V.21) notant que les miroirs de fractures sont marquées par des stries (Fig. V.22).



Figure V.21 : directions des fractures dans les argilites



Figure V.22 : les stries dans les surfaces de fractures des argilites

En surface en suivant l'axe du tunnel, nous avons pu localiser plusieurs failles dans les formations gréseuses de différentes directions (N144° E, N81° E) (Fig.V.23) qui coïncident avec les directions déterminées sur la rosace directionnelle.



Figure V.23 : le miroir de faille dans les formations gréseuses

V.2.3.5 Comparaison du réseau de fractures à la carte géologique :

La comparaison du réseau de fractures à la carte géologique est une étape importante dans l'analyse géotechnique et géologique d'une région donnée. La carte géologique fournit des informations sur la composition, la structure et l'âge des différentes formations géologiques présentes dans la région.

D'un autre côté, le réseau de fractures fait référence aux fissures et aux failles présentes dans les formations géologiques. Ces fractures peuvent avoir une orientation spécifique, une longueur variable et une influence significative sur les propriétés mécaniques des roches. Elles peuvent également jouer un rôle dans la circulation des eaux souterraines et dans la stabilité des pentes.

En comparant le réseau de fractures avec la carte géologique, il est possible de déterminer si les fractures sont associées à des formations géologiques spécifiques ou si elles traversent plusieurs formations. Cela peut aider à comprendre l'origine des fractures et à évaluer leur potentiel d'influence sur les propriétés géotechniques de la région.

De plus, la comparaison entre le réseau de fractures et la carte géologique peut également aider à identifier les zones où les fractures sont plus fréquentes ou plus importantes.

Donc, la comparaison du réseau de fractures à la carte géologique est une étape cruciale dans l'analyse géotechnique et géologique d'une région. Elle permet de mieux comprendre les relations entre les fractures et les formations géologiques, d'identifier les zones à risque et d'optimiser les décisions de conception et de construction des infrastructures.

La confrontation de la carte géologique d'El Haria, feuille n°74 échelle 1/50 000 avec la carte linéamentaire (Fig. V.24) montre une certaine coïncidence des linéaments avec les failles matérialisées dans la carte géologique, sachant qu'il est très difficile de vérifier ces linéaments sur le terrain, d'une part à cause des travaux de creusement des conduites et de terrassement des routes, d'autre part, de la couverture végétale très dense couvrant les formations géologiques.

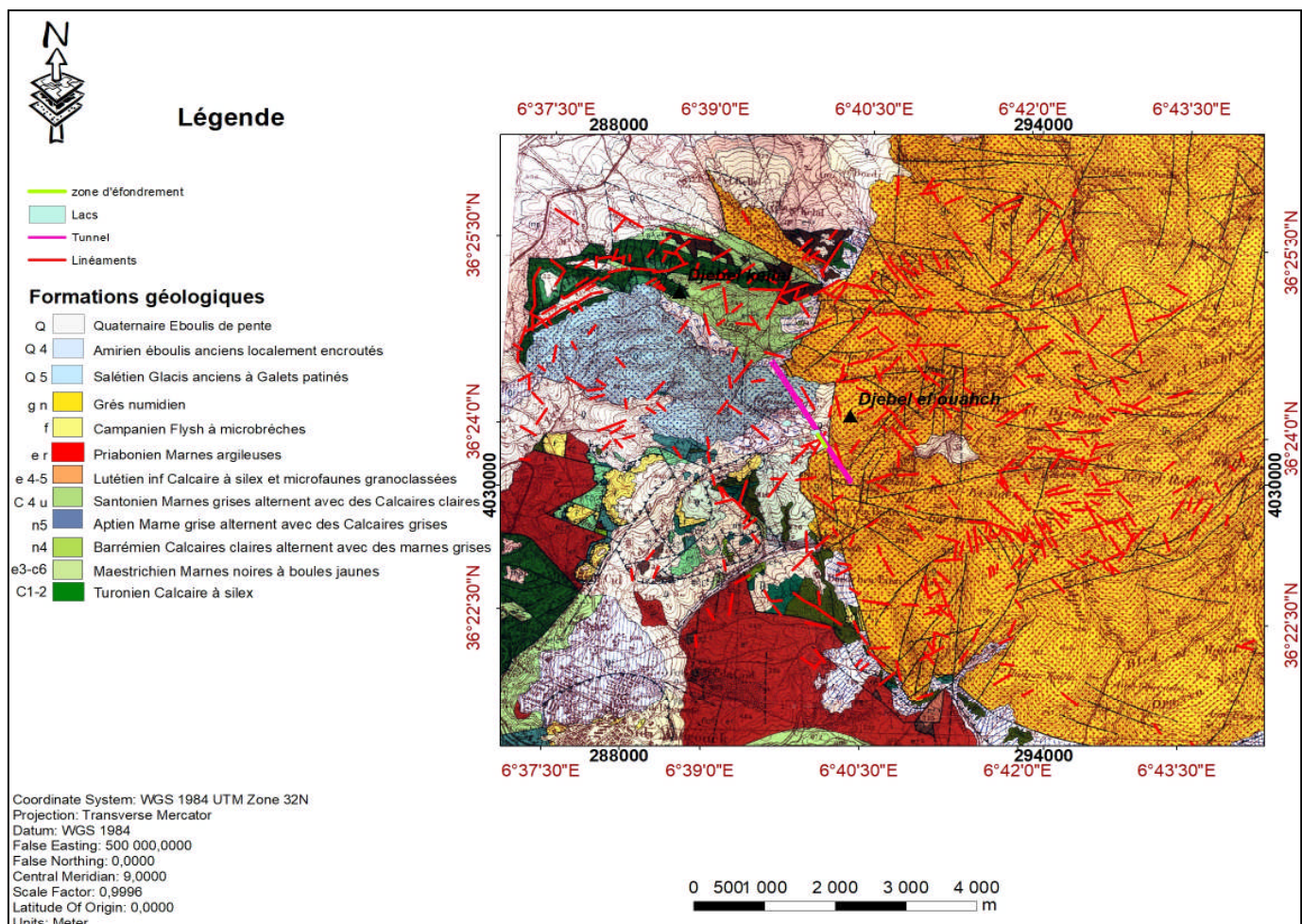


Figure V.24 : la superposition de la carte géologique d'El Haria, feuille n°74 (échelle 1/50 000) avec la carte linéamentaire et le tracé du tunnel T1

L'exploitation de la figure 24, montre que la zone d'effondrement du tunnel coïncide avec l'intersection de la grande faille N-S avec la faille sensiblement E-W (zone de broyage) matérialisées sur la carte géologique d'El Haria qui correspondent à des linéaments portés sur la carte linéamentaire et qui coïncide presque avec les désordres apparues en surface (Fig V.25) après l'effondrement sous forme d'affaissement et de soulèvement situées à 100m environ à l'Ouest du grand lac (Fig V.26) où il y avait des fissures de tension et des fissures de compression (Fig. V.27).

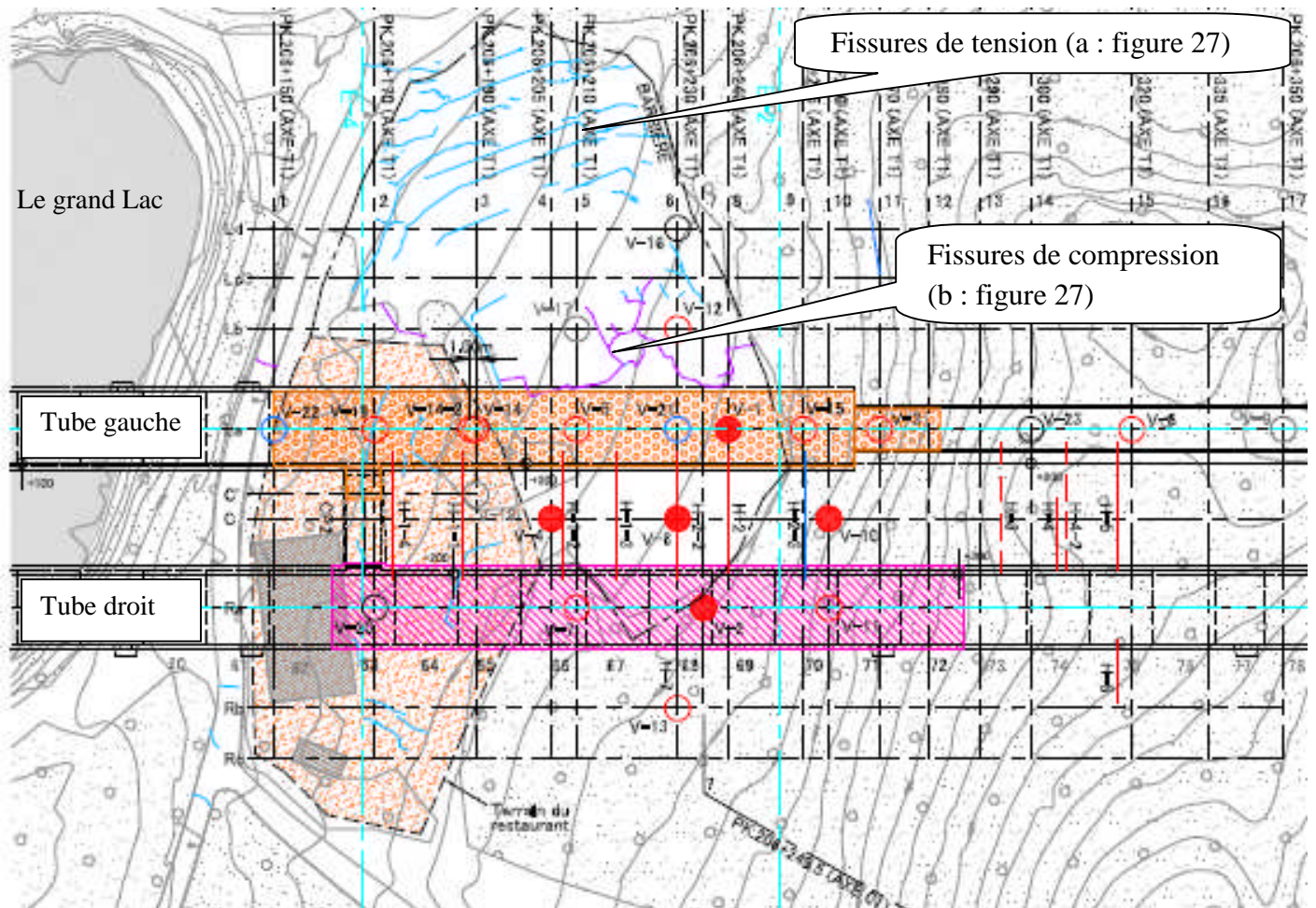


Figure V.25 : vue en plan des deux tubes du tunnel avec le développement des désordres en surface



Figure V.26 : les désordres apparus en surface à l'endroit de l'effondrement du tunnel près du grand lac



Figure V.27 : les fissures de tension et de compression apparues en surface à l'endroit de l'effondrement du tube gauche du tunnel : a : fissure de tension, b : fissure de compression

V.3 Conclusion :

Le chapitre des résultats et discussion a fourni un aperçu détaillé des données collectées et des analyses effectuées dans le cadre de cette étude.

A travers l'examen approfondi des résultats, plusieurs tendances et implications ont été mises en évidence, offrant ainsi des perspectives essentielles sur l'effondrement du tunnel de Djebel El Ouahch.

Les résultats obtenus des différentes analyses réalisées sur les argilites sous numidienne de Djebel El Ouahch, montrent une certaine homogénéité entre les différents échantillons.

Les essais physiques montrent que ces échantillons sont des limons peu plastiques. Quant au taux de carbonate (CaCO_3), il varie entre 1.63% et 13.33% reflétant des argiles non carbonatées.

Les analyses minéralogiques aux rayons X ont fait ressortir que ces argilites sont composés de 43.75% de l'argile totale, de 41.37% de quartz et enfin, il y a les minéraux accessoires tels que feldspath, calcite, dolomite et oxydes de fers (hématite) et sidérite en traces. Ces analyses ont été complétées par les lames orientées qui ont montré un cortège argileux composé de la kaolinite, l'illite, la chlorite, la smectite et les inter- stratifiés réguliers.

La fluorescence X a confirmé ces résultats en révélant que les composants prédominants sont le silicium et l'aluminium, ce qui s'explique par la présence de quartz (SiO_2) et de phyllosilicates (kaolinite, illite, chlorite et smectite).

Les faibles pourcentages de calcium et de magnésium, associés à la calcite et à la dolomite, sont présentés par des faibles valeurs de carbonate de calcium (CaCO_3). Le fer, quant à lui, est lié à la sidérite et à l'hématite.

Les images obtenues par microscopie électronique à balayage (MEB) ont également révélé la présence de kaolinite sous forme hexagonale, ainsi que de grains de quartz.

Une carte linéamentaire a été établie aussi à partir des photos aériennes, sur laquelle, on observe une région au Sud- Ouest présentant une faible densité de linéaments, attribuée à la présence de sols meubles. En revanche, les régions Nord-Ouest, Nord-Est et Sud-Est sont fortement peuplées, étant donné qu'elles sont recouvertes par les calcaires de la nappe de Djemila et les massifs gréseux de Dj El Ouahch (formations rocheuses dures).

L'analyse de la rosace directionnelle révèle une organisation de la fracturation selon deux directions principales : le nord-est - sud-ouest (N45-60), représentant la faille N45° E, comme l'accident d'el Kentour (*Aris. Y, 1994*), et le nord-ouest - sud-est (130-150), indiquant la présence des deux directions nord-sud (N0-15 et N165-180) et est-ouest (entre N75 et

N100), représentant la N100° E, comme l'importante faille de M'Cide Aicha Debbar (*Aris. Y, 1994*).

La comparaison entre la carte géologique d'El Haria, feuille n°74 à l'échelle 1/50 000, et la carte linéamentaire révèle une correspondance partielle entre les linéaments et les failles identifiées dans la carte géologique. Il est cependant difficile de confirmer ces linéaments sur le terrain en raison des travaux de creusement des conduites et de terrassement des routes, ainsi que de la dense couverture végétale qui recouvre les formations géologiques.

Il est important de noter que bien que ces résultats offrent des insights significatifs, ils ne sont pas limités. Des études plus approfondies basées sur des nouvelles techniques (télédétection) peuvent ajouter de nouvelles conclusions et enrichir le travail.

En somme, ce chapitre a jeté les bases d'une compréhension de l'effondrement du tunnel de Djebel El Ouahch et a ouvert la voie à des discussions plus nuancées tout en soulignant l'importance continue d'approfondir notre compréhension de ce phénomène complexe.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a permis de mettre en lumière plusieurs conclusions importantes concernant le phénomène de l'effondrement du tunnel T01 de Djebel El Ouahch qui est un phénomène complexe et dangereux.

L'effondrement s'est produit en mois de janvier 2014 dans le tube Ouest qui était en phase de creusement, il traverse des formations géologiques représentées par les argilites sous numidiennes, qui sont schisteuses plissées et fracturées de couleur grisâtre dont les plans de schistosité et de fractures sont marqués par la présence de la kaolinite. Ces argiles ne sont pas carbonatées où le taux de carbonate obtenu est situé entre 1.63% et 13.33%.

Les essais géotechniques (essais physiques) ont montré qu'il s'agit des argiles limoneuses peu plastiques. Quant aux essais mécaniques (cisaillement, oedomètre), ils n'ont pas été réalisés suite aux effritements des échantillons le long des plans de schistosité lors de leur préparation pour les essais.

Les analyses minéralogiques DRX faites sur l'échantillon total ont fait ressortir que ces argilites sont composés de 43.75% de l'argile totale, de 41.37% de quartz et enfin, il y a les minéraux accessoires tels que feldspath, calcite, dolomite et oxydes de fers (hématite) et sidérite en traces. Ces analyses ont été complétées par les lames orientées qui ont montré un cortège argileux composé de la kaolinite, l'illite, la chlorite, la smectite et les inter- stratifiés réguliers.

Ces résultats ont été confirmés par la fluorescence X ayant montré que les constituants les plus dominants sont la Silice et l'Aluminium qui est expliqué par la présence du quartz (SiO_2), et les phyllosilicates (la kaolinite, l'illite, la chlorite et la smectite).

Le calcium et le magnésium liés à la calcite et la dolomite, sont présentés par des faibles pourcentages dont le taux de carbonate a montré des faibles valeurs de CaCO_3 . Quant au fer, il est lié à la sidérite et l'hématite.

Les images obtenues du MEB aussi ont montré la présence de la kaolinite en forme hexagonale ainsi que le quartz sous forme de grains.

L'étude de la tectonique et la miro-tectonique qui consiste en la réalisation d'une carte linéamentaire à partir des photos aériennes en noir et blanc prises en 1973 avec une échelle 1/20 000 et la carte géologique d'El Haria (feuille n°74) 1/50 000 aboutissant à la réalisation d'une rosace directionnelle montrant l'existence de deux familles de directions principales, c'est la NE-SW et la NW-SE. Notant aussi la présence d'une famille de direction secondaire, c'est la E-W et la N-S.

Ces résultats ont été complétés par les travaux de terrain à l'intérieur du tube effondré et en surface sur l'axe de ce tube où il ressort que les argilites traversées par le tunnel sont fragilisées par la schistosité, les micro- plissement et les fractures résultants de l'empilement de nappes de charriages qu'a connu la région.

D'après les résultats de cette étude, il ressort que la partie effondrée se trouve au noyau d'une zone fragile, il s'agit d'un nœud de faille où le matériau a été complètement désagrégé, donc les caractéristiques de ces argilites sont dégradées à ce niveau où le radier du tunnel en béton armé a été soulevé vers le haut sous l'effet des pressions exercées par les flancs.

Tous ces facteurs naturels font que cet endroit est prédisposé à l'effondrement aux quels s'ajoutent les facteurs anthropiques représentés par le retard de soutènement durant six mois suite aux divergences sur le mode de confortement à appliquer (utilisation de double cintre au lieu de simple cintre) notamment après l'apparition des désordres sur la partie achevée.

La conjugaison de ces facteurs naturels de prédisposition aux quels s'ajoutent les facteurs anthropiques ont provoqué l'effondrement du tunnel. Cette approche n'a pas été abordée par aucune étude dans le cadre des études et expertises réalisées avant le creusement du tunnel ni après son effondrement pour le conforter.

A cet effet, et pour éviter d'éventuels problèmes techniques de ce genre, des études géologiques et géotechniques approfondies doivent être réalisées pour le meilleur choix des tracés neufs de routes et autoroutes et avant d'entamer les travaux de réalisation.

En conclusion, la recherche menée dans cette thèse met en évidence la complexité de l'effondrement du tunnel de Dj El Ouahch et souligne l'importance de l'approche holistique pour prévenir ces incidents. Elle a permis aussi de révéler l'importance critique de la compréhension de ce phénomène complexe et de ses mécanismes pour assurer la sécurité et la durabilité des infrastructures souterraines.

Ainsi la sécurité des tunnels dépend de la collaboration entre les ingénieurs, les géologues, les gestionnaires de projets et les autorités de réglementation, ainsi que l'adoption de pratiques de conception, de construction et de maintenance de haute qualité.

De ce fait, cette étude représente le point culminant de nombreuses heures de collecte et d'analyses des données, ainsi que de réflexion méthodique et critique et elle offrira des suggestions pour les recherches futures pour guider les chercheurs futurs dans leurs enquêtes.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES



Bibliographie

Aris. Y, 1994 : étude tectonique et microtectonique des séries jurassiques à Plio-Quaternaire du constantinois central (Algérie Nord Orientale). caractérisation des différentes phases de déformations. Doctorat, université de Nancy I, 201pp

- ❖ Azdimousa, A., Jabaloy-Sanchez,A., talavera,C.,Asebrity,L., Gonzalez-Lodeiro,F., Evans,N.J., 2019. Detrital zircon U-Pb ages in the Rif Belt (Northern Morocco): Paleogeographic implications. *Gondwana Research*, 70, 133-150.

Bossière, G., 1980 : un complexe polycyclique et sa blostomylonitisation. Etude pétrologique de la partie occidentale du massif de grande kabylie (Algérie). Thèse d'état, Univ. Nantes, 302pp.

- ❖ Bouadja, F., 2010. Tectonique actuelle et récente et risque sismique de la région de Constantine. Mémoire magistère. Université farhat Abbas Sétif. 135pp
- ❖ Boullin, J. P., 1977. Géologie alpine de la petite Kabylie dans les régions de Collo et d'El Milia. Thèse de doctorat d'état sciences naturelles, université Pierre et Marie Curie Paris et université Paul Sabatier, Toulouse, 511pp.
- ❖ Boullin, J.P., Delga, D.M., Olivier.P., 1986 : Betic Rifian and Tyrrhenian arcs: Distinctive features, genesis and development stages. The origin of arcs. *Development in Geotechnics*. Volume 21, 281-304pp.
- ❖ Broquet, P., 1968. Etude géologique de la région de Madonies (Sicile). Thèse de doctorat université de Lille. Faculté des sciences, 797pp.

Caillière, S., Henin, S., Rautureau, M., 1982 : Minéralogie des argiles : classification et nomenclature (Tome 2), Ed. Masson, Paris, pp.9, 107-114.

- ❖ Caire, A., 1957: Etude géologique de la région des Bibans (Algérie) (Thèse, Paris). *Bull. Serv. Carte. Géol. Algérie NSN16 2t 816p*.
- ❖ Chouabbi, A., 1987: étude géologique de la région de Hamam N'Bails (SE Guelma, Constantinois, Algérie). Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier Toulouse.123pp
- ❖ Clauer, N., Chaudhuri,S., 1995. Clays in Crustal Environnements. *Isotope Dating and Tracing*, xii+369pp.

Bibliographie

- ❖ Coiffait, P.E., 1992: un bassin post nappes dans son cadre structural l'exemple du bassin de Constantine. Thèse de doctorat. Université de Nancy I. 501pp
- ❖ Coiffait, P.E., Vila, J.M., 1977: notice explicative de la carte géologique au 1/50 000 d'El Haria, feuille N°74.

D esjardins, R., Iris, S., Roy, D.W., Lemieux, G. H., Toutin, T., 2000: efficacité des données de RADARSAT-1 dans la reconnaissance des linéaments : un bilan. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 26, N°6. December 2000

- ❖ Domzig Anne, 2006: déformation active et récente, et structuration tectonosédimentaire de la marge sous marine Algérienne. Thèse de doctorat université de Bretagne occidentale.332pp
- ❖ Duchaufour, Ph., 1988: Abrégé de pédologie, 2e éd., coll. « abrégés de sciences », Masson, Paris, 332pp.
- ❖ Durand, D.M., 1969: mise au point sur la structure du nord est de la berberie. P. S. C. G. A., N.S. Bull. n°39, p.89-131,9fig, Alger.

E slinger, E.D., Peaver, D., 1988: clay minerals for petroleum geologist and engineers, SEPM short course. Notes n°22. Soc. Economic paleontologist mineralogist, Tulsa, USA 1988.

F agel, N., Thamo-Bozso Heim, B., 2007. Mineralogical Signatures of Lake Baikalsediments: Sources of sediments supplies through late Quaternary. Sedimentary Geology, 194. 37-59.

- ❖ Ficheur. E, Jacob. H, 1899: notice de la carte géologique de Constantine, feuille numéro 73, échelle 1 / 50 000.
- ❖ Fildes, C., Stow, D.A.V., Riahi, S., Soussi, M., Patel, U., Milton, A.J., Marsh, S., 2010. European provenance of the numidian flysch in northern Tunisia. Terra Nova 22, 94-102.
- ❖ Flandrin, J., 1952: la chaîne de Djurdjira. XIX congrès géologique international. Monographies régionales. 1ère série: Algérie-N°.19.497p.
- ❖ Fornelli,A, Micheletti,F., Langone, A and Perrone,V., 2015. First U-Pb detrital zircon ages from Numidian sandstones in Southern Apennines (Italy): evidence of African provenance. Sedimentary Geology 320, 19-29.

Bibliographie

- ❖ Frizon De Lamotte., D, Saint Bézar, B., Bracéne, R., Mercier, E., 2000: the two mains steps of the Atlas building and geodynamics of the western Mediterraanean. *Tectonics*, VOL. 19, NO.4, pages 740-761.

G

ilbert, L., 1999 : structures géologiques et linéaments, Beauce (Quebec) : apport de la télédétection. Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître es sciences (M.Sc.) en géographie, cheminement Télédétection. Université de Sherbrooke, 82pp

- ❖ Guerrera, F., Martin-Alagra., Martin-Martin, M., 2012: toctono sedimentary evolution of the numidian formation and lateral facies (southern branch of the western Thetys): constraints for central-western mediterranean geodynamics. *TERRA NOVA*, 24:34-41.

H

adji, R., Rais, K., Gadri, L., Chouabi, A., & Hamed, Y. (2017). Slope failure characteristics and slope movement susceptibility assessment using GIS in a medium scale: a case study from Ouled Driss and Machroha municipalities, Northeast Algeria. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42, 281–300. <https://doi.org/10.1007/s13369-016-2046-1>.

- ❖ Harbi, A., Maouche, S., Ayadi, A., Benouar, D., Panza, G.F., Benhallou, H., 2004: Seismicity and tectonic structures in the site of Algiers and its surroundings: A step towards microzonation. *Pure appl. geophys.* 161 (2004) 949–967
- ❖ Hobbs, W.H., 1904. Lineaments of the Atlantic Border Region. *Geological Society of America Bulletin*, 15, 483-506.
- ❖ Hoyez B., 1975. Dispersion du matériel quartzeux dans les formations aquitaniennes de Tunisie septentrionale et d'Alférie nord orientale. *Bull.Soc.géol.France*, (7), XVII, n°6, p.1147-1156.
- ❖ Hoyez, B., 1989: le numidien et les flyschs Oligo-Miocène de la bordure Sud de la méditerranée occidentale. Thèse de doctorat. Université des sciences et techniques de Lille Flandres-Artois.431pp

J

driss, J., 2007 : accidents géotechniques des tunnels et des ouvrages souterrains, méthodes analytiques pour le retour d'expérience et la modélisation numérique.

Bibliographie

Thèse de doctorat. Université de Nancy. 214pp

J

anin, J.P., 2012: Tunnels en milieu urbain: Prévisions des tassements avec prise en compte des effets des pré-soutènements (renforcement du front de taille et voute parapluie). Thèse de doctorat, école doctorale université de Lyon, 267 pp

- ❖ Johansson, M., Braakenberg, N.E., Stow, D.A.V., Faugères, J.C., 1998. Deep water massive sands: facies, processes and channel geometry in the numidian flysch, N Sicily. *Sedimentary Geology*, 115:233-266.

K

azi Tani, N., 1986 : évolution géodynamique de la bordure nord-africaine : le domaine intraplaque Nord Algérien, approche méga-séquentielle. Thèse doctorat, univ de Pau (France).

- ❖ Kimour, M., Boukelloul, M.L., Hafsaoui, A., Narsis, S., Benghadab, K.M., Benselhoub, A., 2023. Geomechanical characterization of rock mass rating and numerical modeling for underground mining excavation design. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 32(1), 67–78. <https://doi.org/10.15421/112308>
- ❖ Kitchah, F., Benmebarek, S., & Djabri, M. 2021. Numerical assessment of tunnel collapse: a case study of a tunnel at the East–West Algerian highway. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 6161–6176. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02318-y>

L

ahondère, 1987 : les séries ultra-telliennes d'Algérie Nord orientale et les formations environnantes dans leur cadre structural. Thèse de doctorat d'état en sciences naturelles, université Paul Sabatier Toulouse. 234pp

- ❖ Lefèvre, M.J., 1979 : détection aéroportée de phénomènes géologiques de subsurfaces révélées par une anomalie de température de brillance (Coat en Noz, Côtes du Nord) France. *Revue photo interprétation*, 6 (3a).
- ❖ Leikine, M., 1971 : Etude géologique des Babors occidentaux (l'Algérie), thèse de doctorat, Université de Paris, 537pp.

Bibliographie

Manning, D.A.C., 1995: Introduction to industrial mineral. Chapman and Hall edition, London 275pp.

- ❖ Mebarki, A, Thomas, C., 1988: Analyse des relations entre écoulements superficiels et souterrains à partir des hydrogrammes des cours d'eau Application au bassin du Kebir –Rhumel dans le constantinois Algérie). Hydrologie Continentale, 3 (2), p. 89-103. ISSN 0246-1528.
- ❖ Mebarki, A., 2007: article les bassins hydrologiques de l'Algérie orientale : ressources en eau, aménagement et environnement. La Houille Blanche, N°2 (Avril 2007), pp. 112-115
- ❖ Menzoul, B., 2023 : Sedimentology and ichnology of the numidien formation in the Oursenis Moutains, nourthwestern Algeria, Thesis of Doctorai , University Abubakr Belkaid, Telemcen. 137pp
- ❖ Moore, D.M., Reynolds, J.R.C, 1989. X ray diffraction and the identification and Analysis of clay minerals. Oxford University Press, Oxford, 179-201.
- ❖ Moretti, E., Coccioni, R., Guerrera, F., Lahondere, J.C., Loiacono, F., Puglisi, D., 1991. Numidian sequence between Guelma and Constantine (Eastern tell, Algeria). Terra Nova, 3, 153-165.

O'Leary, D.W., Friedman, J.D., Pohn, H.A., 1976. Lineament, linear, lineation: some proposed new standars for old terms. Geological Society of America Bulletin 1976;87, no. 10;1463-1469

- ❖ Obert, D., 1981 : Etude géologique des Babors orientaux (Domaine tellien, Algérie), thèse de doctorat des sciences naturelle, l'Université pierre et Marie Curie-Paris 6, 560pp.

Parize,O., Beaudoin, B., Buroillet, P.F., Cojan, G.F., Pinault, M., 1986. La provenance du materiel gréseux numidien est septentrionale (Sicile et Tunisie). Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de Paris 288, 1671-1674.

- ❖ Philliponat, G., Hubert, B., 2002. Fondations et ouvrages en terre, Paris. Ed, Eyrolles
- ❖ Plumelle, C., Cui, Y.J., Fabre, D., Fouché, O., Hirschauer., Tabbagh, A., 2013. Théorie et pratique de la géotechnique. Paris, Ed, Le Moniteur

Bibliographie

R aoult, J.F., 1974 : géologie du centre de la chaîne numidique, nord du constantinois, Algérie. Mémoire de la société géologique de France, 111 (121) : 163pp

- ❖ Rat, M., 2010. L'effondrement au cours de construction du tunnel « METEOR ». revue française de géotechnique, N°131-132.
- ❖ Riahi, S., Soussi, M., Kamel, B., Kmar, B.I.L., Stow, D., Sami, K., Mourad, B., 2010. Stratigraphy, sedimentology and structure of the numidian flysch thrust belt in northern Tunisia. Journal of African Earth Sciences, 57: 109-126.

T AJEDDINE, L., 2008 : étude de la phototransformation de l'orthophenylphenol et du monuron adsorbés sur des argiles extraites des sols de la chaouia. THESE de doctorat national. Université de Hassan 1^{er}, Faculté des Sciences et Techniques de Settat UFR. 174pp.

- ❖ Thiry, M., Carillon, N., Franke, C., Martineau, N., 2013. Technique de préparation des minéraux argileux en vue de l'analyse par diffraction des rayons X et introduction à l'interprétation des digrammes. Rapport technique n°RT131010MTHI, centre de géosciences, Ecole des mines de Paris, Fontainebleau, France, 34pp.
- ❖ Thomas, M.F.H., Bodin, S., Redfern, J., 2010a. Comment on "European provenance of the numidian flysch in northern Tunisia (by Fildes et al, 2010). Terra Nova 22,501-503.
- ❖ Thomas, M.F.h., Bodin, S., Redfern, J., Irving, D.H.B., 2010b. A constrained Africa-craton source for Cenozoic Numidian flysch: implications for the paleogeography of the western Mediterranean basin. Earth science Reviews 101, 1-23.
- ❖ Thorez, J., 1976 : Practical identification of clay minerals. ED.G. Lelotte, Dison, 190pp.
- ❖ Thorez, J., 1986: physico-chemical studies of the structure of the solid supports: X- ray studies In: P.Laszlo (ED). Preparative chemistry using supported reagents. Academic press, New-York, 177-189.
- ❖ Thorez, J., 2003: L'argile, mineral, pluriel. Bull Soc R Sci Liège 72:19-70.

Bibliographie

Velde, B., 1995: composition and mineralogy of clay minerals, origin and mineralogy of clays, clays and environment: Berlin, Springer, p.8-41.

- ❖ Vila, J.M et al., 1995 : le chenal gréseux de l'Oligocène terminal et le Miocène de Sidi Affif dans leur cadre structural Est Algérien : origine saharienne du Numidien et calendrier des charriages du Miocène. C.R.Acad.Sci.Paris, t320, série IIa, p.1001 à 1009.
- ❖ Vila, J.M., 1980. La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro - Tunisiens. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 663 pp.

Wenzel, F.C., 1970. Numidian Flysch : An Oligocene-early Miocene continental rise deposit off the African Platform. Nature Vol.228.

- ❖ Wildi, W., 1983. La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie): structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. Revue de géologie dynamique et de géographie physique. Vol 24, FASC.3, p. 201-297, Paris.

Yäich, C., Hooyberghs, H.J.F., Durllet, C., Renard, M., 2000. Corrélation stratigraphique entre les unités Oligo-Miocènes de Tunisie centrale et le Numidien. Comptes Rendus de l'Académie des sciences de Paris 331,499-506.

Rapports:

- ✓ Rapport géotechnique (lot tunnel) n° LE1-DAH-0424-ETD-DEX-RPT-0001-FR-REV0 en date du: 01/12/2007 établi par DAR EL HANDASA au profit de COOJAL.
- ✓ Rapport n°: MEW017_R_GEO_GEOT_T1_003_A en date du: 12/05/2015 réalisé par l'entreprise COSIDER au profit de ADA.

Les normes:

- ✓ XP CEN ISO/TS 17892-1 Aout 2005.
- ✓ XP CEN ISO/TS 17892-12 2005.
- ✓ XP CEN ISO/TS 17892-4 Aout 2005.
- ✓ XP CEN ISO/TS 17892-10 Aout 2005.
- ✓ XP CEN ISO/TS 17892-5 Aout 2005.
- ✓ NF P 94-057-1992.