

UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA
FACULTÉ DES HYDROCARBURES, DES ÉNERGIES RENOUVELABLES ET DES
SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS



Mémoire de Master Académique
Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers
Filière : Géologie
Spécialité : Géologie des bassins sédimentaires

**ETUDE GÉOTECHNIQUE ET MINÉRALOGIQUE DE
LA FRACTION FINE RÉSULTAT DE
L'ALTÉRATION DES ROCHES VOLCANIQUES DE
CAP BOUGAROUN COLLO SIKKDA.**

Présenté par

Menaa Mohammed Rafik

Lecheheb Sohaib

Soutenu publiquement le

Devant le jury : 07/06/2026

Président: BEN KHELIFA Randa

Promoteur: SATOUH Adel

Examineur: CHAMAM Asma

M. C. A Univ. Ouargla

M. C. A Univ. Ouargla

M. A. B Univ. Ouargla

Année Universitaire : 2025/2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Au terme de ce parcours universitaire, nous louons Dieu le Tout-Puissant pour la persévérance et l'énergie qu'il nous a insufflées afin d'achever ce travail.

Nous tenons à saluer chaleureusement l'engagement et le précieux soutien de notre encadrant, Monsieur le Dr. Satouh Adel. Ses directives avisées, sa patience et sa riche expertise ont été le pilier de cette recherche. Que ce travail soit le reflet de notre profonde reconnaissance.

Enfin, nous témoignons toute notre gratitude aux enseignants du Département des Sciences de la Terre pour leur bienveillance et la qualité de leur formation.

.Nous tenons à remercier la Fondation (LTPS) de nous avoir accueillis pour notre stage.

.Nous remercions le laboratoire (Crapc) de nous avoir accueillis et d'avoir accepté de réaliser l'analyse de (MEB) des échantillons.

. Nous tenons à remercier le (Laboratoire de géologie) du désert de nous avoir accueillis et d'avoir accepté de réaliser methode analyse granulométrique et l'analyse DRX des échantillons.

يرتبط التحول الحراري المائي للصخور البركانية في منطقة رأس بوغارون (شمال شرق الجزائر) ارتباطاً وثيقاً بالتفاعلات بين العوامل المناخية المائية، والتكوين الجيومورفولوجي، والتنوع الليثولوجي للقاعدة البلورية. ضمن هذا المركب الصخري، الذي يجمع بين السحنات المتحولة، والفلسية الماغماطية، والفوق قاعدية، تتسبب عمليات التحول الحراري المائي في التدهور الجيوكيميائي لشبكات السيليكات الأصلية، مما يؤدي إلى إطلاق قواعد قابلة للذوبان وتكوين معادن طينية ثانوية جديدة.

تؤكد نتائج التحليلات الحبيبية غلبة نسيج الطين، الناتج عن ديناميكية التحول المتقدمة هذه. أخيراً، يُظهر الفحص الجيوكيميائي استنزافاً عاماً للأملاح القابلة للذوبان، بسبب الترشيع المستمر الذي يعزز تركيز جزء السيليكات المائية. ولتوصيف جزء الطين هذا بدقة، تم اعتماد منهج تحليلي متعدد المقاييس. من جهة، كشف تحليل حيود الأشعة السينية عن الطبيعة المعدنية لهذه الأطوار المتشكلة حديثاً، مُظهرًا ارتباطاً معقدًا بين الزيوليت ومعادن الطين من مجموعة السميكتايت (مثل السابونيت)، وهو ما يُعدّ سمةً مميزةً للتغيرات التي تحدث في بيئة قلوية. ومن جهة أخرى، أظهرت صور المجهر البنية المجهرية لهذه الطينيات، مُبيّنةً أشكالاً صفائحية مميزة، ومؤكدّةً نتائج التحليلات الكيميائية الدقيقة الإلكتروني الماسح للمادة الأساسية. وأخيراً، يُبين التوصيف الجيوتقني باستخدام حدود أتربيرغ التأثير المباشر لهذا التركيب المعدني على السلوك الكلي للمادة، مُصنّفًا هذه الرواسب المتغيرة على أنها تربة شديدة اللدونة والتمدد. وتؤكد جميع هذه النتائج الإمكانيات الكبيرة لهذه الطينيات في تطبيقات صناعية محددة.

Résumé

L'altération hydrothermal des roches volcaniques situées au niveau de la région de Cap Bougaroun (NE Algérien) sont intimement liées des interactions entre les facteurs hydroclimatiques, la configuration géomorphologique et la diversité lithologique du socle cristallophyllien. Au sein de ce complexe rocheux, associant des faciès métamorphiques, magmatiques felsiques et ultramafiques, Les processus d'altération hydrothermal provoque la dégradation géochimique des réseaux silicatés originels, conduisant à la libération des bases solubles et à la néoformation de minéraux argileux secondaires.

. Les résultats des analyses granulométriques confirment la prédominance d'une texture argileuse,

issue de cette dynamique d'altération poussée. Enfin, l'examen géochimique montre un appauvrissement global en sels solubles, sous l'action d'un lessivage continu qui favorise la concentration de la fraction silicatée hydratée. Pour caractériser précisément cette fraction argileuse, une approche analytique multi-échelle a été adoptée. D'une part, l'analyse par diffraction des rayons X (DRX) a mis en évidence la nature minéralogique de ces phases néoformées, révélant une association complexe de zéolites et de minéraux argileux du groupe des smectites (tels que la saponite), typiques d'une altération en milieu alcalin. D'autre part,

les observations au microscope électronique à balayage (MEB) ont permis de visualiser la microstructure de ces argiles, montrant des morphologies en feuillets caractéristiques et confirmant les micro-analyses chimiques de la matrice. Enfin, la caractérisation géotechnique via les limites d'Atterberg traduit l'impact direct de cette composition minéralogique sur le comportement macroscopique du matériau, classant ces sédiments altérés parmi les sols hautement plastiques et expansifs. L'ensemble de ces résultats confirme le fort potentiel de ces argiles pour des applications industrielles spécifiques.

Abstract

The hydrothermal alteration of volcanic rocks in the Cap Bougaroun region (NE Algeria) is closely linked to interactions between hydroclimatic factors, geomorphological configuration, and the lithological diversity of the crystalline basement. Within this rock complex, which combines metamorphic, felsic magmatic, and ultramafic facies, hydrothermal alteration processes cause the geochemical degradation of the original silicate networks, leading to the release of soluble bases and the neoformation of secondary clay minerals.

The results of granulometric analyses confirm the predominance of a clay texture, resulting from this advanced alteration dynamic. Finally, the geochemical examination shows an overall depletion of soluble salts, due to continuous leaching that promotes the concentration of the hydrated silicate fraction. To precisely characterize this clay fraction, a multi-scale analytical approach was adopted. On the one hand, X-ray diffraction (XRD) analysis revealed the mineralogical nature of these newly formed phases, showing a complex association of zeolites and clay minerals from the smectite group (such as saponite), typical of alteration in an alkaline environment. On the other hand, scanning electron microscopy (SEM) observations visualized the microstructure of these clays, showing characteristic sheet-like morphologies and confirming the chemical microanalyses of the matrix. Finally, geotechnical characterization using Atterberg limits demonstrates the direct impact of this mineralogical composition on the macroscopic behavior of the material, classifying these altered sediments as highly plastic and expansive soils. All of these results confirm the strong potential of these clays for specific industrial applications.

Mots clés :

Cap Bougaroun , granulométrie , zéolite , Testes géotechniques , Testes Minéralogiques, altération hydrothermale.

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I : cadre générale de l'étude	
I.1 Cadre géographique	4
I.1 .1 Délimitation administrative	4
I.1.2 Limites géographiques de la région de Collo.....	4
I.1.3 Importance géographique de la région de Collo.....	5
I. 2. Cadre géologique de la zone de l'étude	5
I.2.1 Cadre régionale	5
I. 2. 2. Cadre geologique locale	6
I. 2. 3. Les terrains sédimentaires	7
I. 2. 4. Le complexe magmatique miocène	7
I .2. 5. Description des affleurements	8
I.3. Généralités sur l'altération hydrothermale des roches volcaniques	9
I.3.1. Processus d'Altération Hydrothermale des Roches Volcaniques, Caractérisation Minéralogique et Impacts Géotechniques.....	9
I.3.2. Les processus Géochimiques et Minéralogiques d'Altération.....	9
I.10 Conclusion.....	11
CHAPITRE II : Matériels et Méthodes	
II .1. Testes géotechniques.....	14
II.1.1. Analyse granulométrique.....	14
II.1.1.1. L'importance l'analyse granulométrique dans cette étude.....	15
II.1.1.2. Définition des paramètres granulométriques.....	18
II.1.2. Limites d'Atterberg.....	24

II.1.2. 1 Définition	24
II.1.2. 2 Objectifs de l'essai.....	24
II .2. Analyse minéralogique	27
II.2.1. Analyse par diffraction X (DRX).....	27
II.2.2. Analyse microscopie électronique à balayage (MEB).....	28
CHAPITRE III : résultats et interprétations	
III .1. Résultats de la méthode granulométrique	32
III .2. Résultats de la méthode Limites d'Atterberg	36
III .3. Résultats des analyses microscopie électronique à balayage (MEB).....	39
III .4. Résultats des Analyses par diffraction X (DRX).....	41
Conclusion Générale	47
BIBLIOGRAPHIQUE ANNEXE.....	48

LISTE DES FIGURES

Fig. I 01 : Carte de localisation de la région de Beni Said (cap bougaroun collo skikda).....	4
Fig. I 02 : (a) Les grands ensembles géologiques de la chaîne des Maghrébides ; (b) Les ensembles géologiques de la petite Kabylie d'après (Mahjoub, 1991). UB : Unité Bougaroun ; UBF : Unité des Beni Ferguene ; USK : Unité de Socle Sens. Strict ; UIK : Unités infr	5
Fig. I 03 : Carte géologique de la région de Collo et du Cap Bougaroun (d'après Bouillin, 1977).	7
Fig. I 04 : Photo montrant l'affleurement des roches volcaniques de la zone de l'étude et leur relation avec les terrains de socle métamorphique	9
Fig. I 05 : organigramme de synthèse bibliographique des propriétés géotechniques et minéralogiques des produits L'altération hydrothermal des roches volcaniques ainsi que les zones d'altération de ces roches.....	12
Fig II 01 : Echelle de Wentworth pour la classification granulométrique des sédiments détritiques.....	15

Fig II 02 : photo des Appareils utilisés dans le traitement granulométrique des prélèvements du secteur étudié. (A) séchage et homogénéisation échantillons. (B) peusage des échantillons. (C) opération de séchage à l'aide de l'étuve. Tamis	17
Fig II 03 : Standard visuel pour l'estimation du tri (logarithmique de Folk & Ward, 1957). .	20
Fig II 04 : Représentation de Le coefficient de dissymétrie. (Belmedrek, 2005 - 2006).....	21
Fig II 05 : Courbes de fréquence illustrant la relation entre le mode, la médiane et la moyenne et la différence entre une courbe normale symétrique et une courbe de fréquence asymétrique (skewed)	23
Fig II 06 : Matérielles de limite Atterberg (casagrande et spatule).	25
Fig II 07 : Matérielles de limite Atterberg (les tares et balance mesure).....	25
Fig II 8 schéma représentant le Principe de la DRX.....	27
Fig II 09 : Appareil de diffraction des rayons X (DRX) utilisé pour l'analyse minéralogique.	28
Fig II 10 : Les matériaux des analyses par le microscope électronique à balayage (MEB). ...	28
Fig II 11 :Image d'analyse par le microscope électronique à balayage (MEB).....	29
 Fig III 01 :Diagramme textural réalisé avec GRADISTATv9.1 des échantillon du secteur de l'étude	35
Fig III 2 Classification des 5 échantillons de sol selon l'abaque de Casagrande.	37
Fig III 3 Résultat de l'Analyse quantitative de la composition métallologique et élémentaire de l'échantillon N°9 par MEB.....	41
Fig III 04 : a) Identification des phases minérales et correspondance des pics DRX .b) résultats Diffractogramme des rayons x montrant la composition minéralogique de la fraction fine resultats de l'altertion hydrothermal du secteur de l'étude (échantillon 2).	44
Fig III 05 : résultats Diffractogramme des rayons x montrant la composition minéralogique de la fraction fine resultats de l'altertion hydrothermal du secteur de l'étude (échantillon 2).	45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 :les caractéristiques géotechniques des produits d'altérations hydrothermales dominants des roches volcaniques.	11
 Tableau II 1 la relation entre Indice de classement et environnement de dépôt.	20
Tableau II 02 : Interprétation de Le coefficient de dissymétrie	21

Tableau II 03 :Terminologie du Skewness (Ski) définie par Folk et Ward	22
Tableau II 04 : Terminologie du Kurtosis (K) définie par Folk et Ward.....	23
Tableau III 01 :Les poids refus par tamis pour 12 échantillons (Analyse granulométrique). 33	
Tableau III 02 :Tableau de nomenclature et description des résultats de l’analyse granulométrique (selon FOLK et WARD,1957)	34
Tableau III 03 : Relation entre le degré d’altération hydrothermale et les caractéristiques granulométriques des roches.....	36
Tableau III 4 Classification des 5 échantillons de sol selon l'abaque de Casagrande.....	38
Tableau III 5 Rapport Si/Al de quelque minéraux alumino silicatés	42

INTRODUCTION Générale

Introduction générale

L'altération hydrothermale des roches magmatiques désigne les transformations minéralogiques, chimiques et texturales qui se produisent dans les roches encaissantes en raison de leur interaction avec des solutions aqueuses chaudes.

Il s'agit d'un processus géologique au cours duquel la composition minéralogique et chimique d'une roche est transformée sous l'action de fluides chauds (circulations d'eau souterraine, solutions magmatiques, etc.). Ces transformations se produisent généralement dans un système ouvert où les fluides apportent et emportent différents ions

En fonction de la nature chimique du fluide et de la température, on observe différents types d'altérations courantes : la silicification, la séricitisation, la chloritisation, l'albitisation, l'argilisation

L'étude des produits d'altération des roches magmatiques, en particulier **les zéolites et les argiles**, revêt une importance fondamentale dans plusieurs disciplines de la géologie et des applications industrielles. Ces minéraux néoformés (secondaires) agissent comme de véritables enregistreurs des conditions physico-chimiques du passé, elle permet l'évaluation des Risques Volcaniques et Stabilité des Terrains (Géotechnique)

L'altération des minéraux magmatiques d'origine (comme les feldspaths ou les verres volcaniques) en argiles et en zéolites modifie radicalement les propriétés mécaniques de la roche :

- Fragilisation des édifices volcaniques : Les argiles et les zéolites ont une résistance mécanique très inférieure aux minéraux magmatiques primaires. Un volcan fortement altéré en argiles devient instable, ce qui favorise les glissements de terrain majeurs et les effondrements de flancs
- Propriétés géotechniques : Les smectites sont des argiles gonflantes. Leur identification est cruciale avant la construction de galeries, de tunnels ou de barrages dans des terrains volcaniques, car elles provoquent des variations de volume importantes en présence d'eau.
- Valorisation Économique et Applications Industrielles (Ressources utiles)

Les produits d'altération des roches magmatiques (notamment des tufs pyroclastiques) forment des gisements exploitables en tant que matières premières minérales Les zéolites en tant que "tamis moléculaires" : Grâce à leur structure cristalline en cages ouvertes, elles ont une capacité exceptionnelle d'échange ionique et d'adsorption. Elles sont extraites industriellement pour la purification des eaux (élimination des métaux lourds), la décontamination nucléaire (fixation du césium et strontium) et l'agriculture. Les argiles industrielles (Bentonites) : L'altération des

cendres volcaniques donne de la bentonite (riche en smectite), massivement utilisée dans les boues de forage, la fonderie, et la fabrication de barrières d'étanchéité environnementale

L'étude des caractéristiques physico-minéralogiques et géotechniques de ces produits d'altérations prennent une importance particulière dans les régions montagneuses à structure géologique complexe, comme la région de Collo (Cap Bougaroun), située dans la chaîne des petites Kabylie (wilaya de Skikda), qui représente un modèle pertinent pour l'étude de l'évolution des sols sous l'influence de facteurs géologiques et climatiques variés.

Cette étude vise à déterminer les propriétés physiques, minéralogiques et géotechniques des produits résultants de l'altération des roches volcaniques de la région de Collo, à travers :

- L'Etude granulométrique (détermine paramètre granulométrique).
- L'étude minéralogique à l'aide de (DRX, MEB).
- L'étude géotechnique.

Ce travail représente une contribution scientifique visant à améliorer la des matériaux locaux de la région de Collo qui peut fournir les différents secteurs économiques et industriels et Elle permet la gestion des ressources naturelles de cette dernière, ainsi que déterminer l'influence de différents facteurs geologiques comme la lithologiques sur la nature des soles de la région ;

❖ **Plan de travail**

- Introduction générale
- Premier chapitre : généralités sur la zone de l'étude.
- Deuxième chapitre : matériels et méthode
- Troisième chapitre : Résultats et interprétations.
- Conclusion générale.

CHAPITRE I : cadre générale de l'étude

I. 1. Cadre géographique

I. 1. 1. Délimitation administrative

La région de Collo est située au nord-est de l'Algérie, dans la partie occidentale de la wilaya de Skikda. Elle fait partie intégrante de la Petite Kabylie, une zone montagneuse appartenant à l'Atlas tellien oriental. Elle s'étend approximativement entre la latitude 36°52' et 36°57' Nord, et la longitude 6°20' et 6°32' Est. Elle s'ouvre au nord sur la mer Méditerranée, ce qui lui confère un caractère de transition entre les reliefs montagneux de l'intérieur et le littoral.

I.1.2. Limites géographiques de la région de Collo

Région de Collo est délimitée comme suit :

- **Au nord** : la mer Méditerranée.
- **À l'est** : la commune de Tamalous.
- **Au sud** : les hauteurs de l'Atlas tellien et les chaînes montagneuses de la Petite Kabylie.
- **À l'ouest** : les limites administratives de la wilaya de Jijel (commune de Selma Ben Ziada).

Le relief y est contrasté, composé de côtes rocheuses, de collines de moyenne altitude et de massifs montagneux.

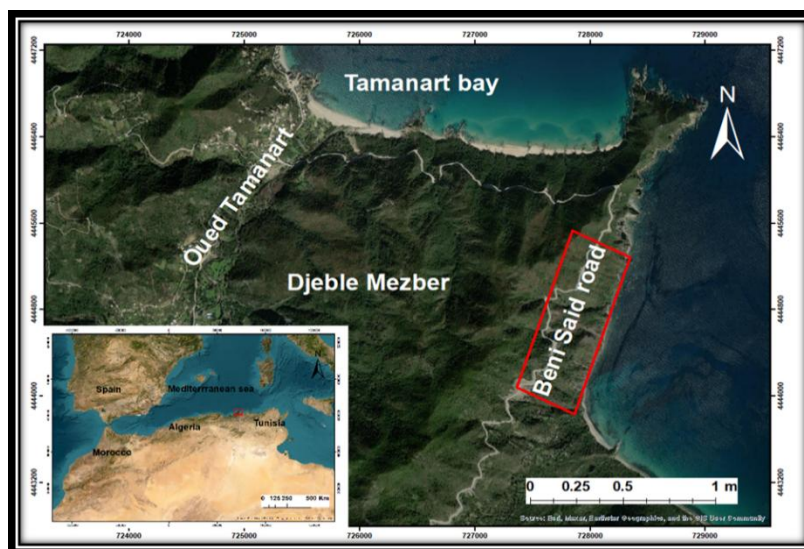


Fig. I 01 : Carte de localisation de la région de Beni Said (cap bougaroun collo skikda).

I.1.3. Importance géographique de la région de Collo

La région de Collo présente une importance géographique notable à plusieurs niveaux. Géologiquement, elle se situe à l'intersection de structures côtières et de nappes telliennes, ce qui explique la grande diversité lithologique et structurale, influençant directement la nature des produits d'altération des roches volcaniques.

La zone d'étude couvre une superficie d'environ 45 548 hectares, répartie entre quatre daïras principales relevant de la wilaya de Skikda :

- **Daïra de Collo (8 227 ha)** : comprenant les communes de Collo, Chéraïa, et Béni Zid.
- **Daïra de Zitouna (6 735,25 ha)** : incluant les communes de Zitouna et Kanoëua.
- **Daïra d'Ouled Attia (16 460,75 ha)** : regroupant Ouled Attia, OuedZ'hor, et Khenak Mayoune.
- **Daïra d'Aïn Kechra (14 168,25 ha)** : avec les communes d'Aïn Kechra et Ouldja Boulballou.

I.2. Cadre géologique de la zone de l'étude

I. 2. 1. Cadre régionale.

La région de Collo fait partie du socle métamorphique de la petite Kabylie qui est constitué dans son ensemble d'une vaste nappe qui repose sur des terrains mésozoïques et cénozoïques (Fig. I 02). Ces roches sont bien intégrées dans le schéma géologique global des Maghrébides et ont fait l'objet d'une description relativement ancienne (Roubault, 1934 ; Durand Délga, 1955 ; Mahjoub et Merle, 1990 ; Mahjoub *et al.*, 1997). On suppose que ce socle est recoupé par une grande zone de blastomylonites charriée vers le sud (jusqu'à 30 Km) sur les ensembles des flyschs (Bouillin, 1979, 1982 ; Mahjoub, 1991).

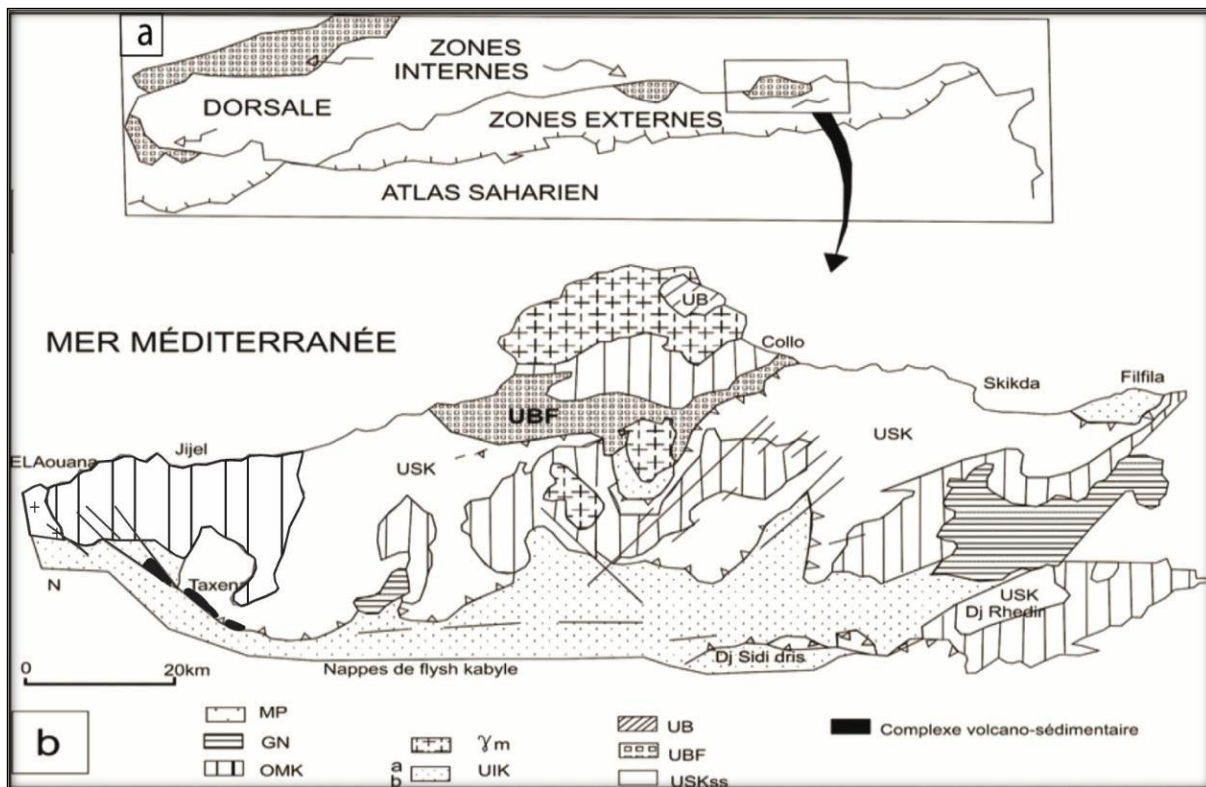


Fig. I 02 : (a) Les grands ensembles géologiques de la chaîne des Maghrébides ; (b) Les ensembles géologiques de la petite Kabylie d'après (Mahjoub, 1991). UB : Unité Bougaroun ; UBF : Unité des Beni Ferguene ; USK : Unité de Socle Sens. Strict ; UIK : Unités infr

I. 2. 2. Cadre géologique locale.

Le Massif du Cap Bougaroun (Fig. II. 2) est situé au Nord-Ouest des villes de Collo et de Skikda. Il est isolé du reste du socle de la petite Kabylie par le bassin de Collo et est limité au Sud et au Sud-Est par un ensemble de failles inverses qui le met en contact avec les terrains sédimentaires (Fig. II. 2). La plupart des affleurements des terrains sont constitués de roches intrusives. Les roches sédimentaires et métamorphiques occupent des terrains restreints dans l'extrémité orientale du Cap Bougaroun.

Trois ensembles distincts : métamorphiques, magmatiques et sédimentaires sont observés au sein de ce massif.

A) Les roches métamorphiques

Les terrains du socle métamorphique sont développés au Nord-Est et au Sud du phare du Cap Bougaroun du Cap Bougaroun. Ils sont constitués essentiellement de gneiss (Kinzigites) à facies granulites et des roches calco-silicatées.

- Les gneiss (kinzigites)

Suite à la composition minéralogique des gneiss, ils ont été définis comme kinzigites. Deux types de kinzigites ont été observés au contact avec les roches ultramafiques à l'est et à l'ouest du socle : au niveau du Dj. Mezaber, le long de la piste qui va de Beni-Saïd vers Ras-Kbiba et également dans le Dj. Rorbah ainsi que dans la partie basse de la rive gauche de l'Oued Tamanart :

(a) Des kinzigites mésocrates (Bouillin, 1977 ; Misseri, 1987) : Elles ont une texture granoblastique et renferment du feldspath potassique, du plagioclase, de la cordiérite, du quartz, de la tourmaline, peu ou pas de sillimanite et de la muscovite. (b) Des kinzigites leucocrates : Elles ont une texture granoblastique et présentent la même composition minéralogique que les kinzigites mésocrates, sauf que la sillimanite y est plus abondante, la biotite et la tourmaline y sont moins nombreuses.

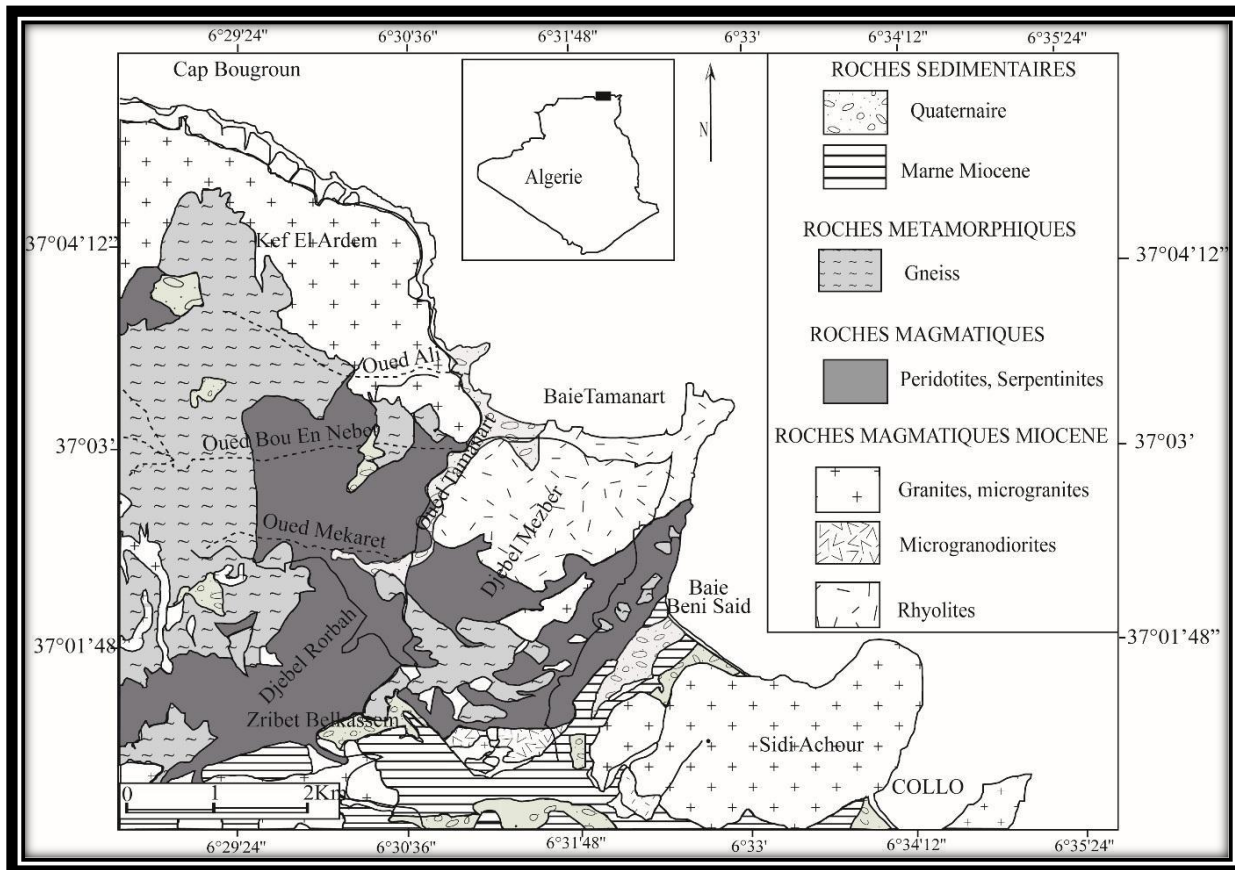


Fig. I 03 : Carte géologique de la région de Collo et du Cap Bougaroun (d'après Bouillin, 1977).

I. 2. 3. Les terrains sédimentaires

Au niveau de la zone de l'étude, les terrains sédimentaires affleurent dans la partie Sud-Est de la région du Cap Bougaroun où ils forment une bande puissante et disloquée qui débute à partir de la baie de Béni Saïd et qui passe ensuite au Sud-Ouest dans la région montagneuse de Echraïa. Au nord, les formations sédimentaires sont en contact anormal avec l'ensemble métamorphique (Fig. I 03). Au Sud-Est, elles sont recoupées par des roches microgranitiques tertiaires. Dans la partie centrale de la région, ces formations sédimentaires sont intrusées par des roches volcaniques du Burdigalien et sont à pendage fort et faillées.

I. 2. 4. Le complexe magmatique miocène

Les roches magmatiques tertiaires et leur contexte géologique ont fait l'objet de plusieurs études (ex : Bolfà, 1948 ; Bouillin, 1977 ; Ouabadi, 1987, 1994 ; Fougnot, 1990 ; Ouabadi *et al.*, 1992 ; Satouh 2007 ; Abbassene *et al.*, 2016). Les études pétrologique et géochimique détaillées des granites du Nord-Ouest de Cap Bougaroun, à savoir les granites à grains fins et les granites à grains grossiers, ont été faites par Ouabadi (1994). La géochimie de ces granitoïdes indique qu'ils sont peralumineux de type "S" typique aux granites mis en place dans les chaînes de collision (Ouabadi, 1994 ; Satouh, 2007 ; Abbassene *et al.*, 2016).

Les roches magmatiques de la région de Collo recoupent les roches métamorphiques, les roches ultramafiques et les formations sédimentaires. Les faciès intrusifs sont très variés et elles sont les plus importantes dans la région. Les granites leucocrates de la partie Nord-Ouest du massif du Cap Bougaroun sont des roches à grains moyens et grossiers de couleur claire gris-clair. En plus du quartz, feldspath et micas, ils renferment de la cordiérite.

Les granites mélanocrates à biotite occupent la partie centrale du massif. Ils sont à grains fins à moyens, gris-clairs ou gris-verdâtres. Ces granites sont formés de quartz, feldspath potassique, plagioclase et biotite. Les microgranites apparaissent sous forme de petits pointements ou des affleurements plus ou moins étendus, comme celui de Sidi Achour qui s'étend du golf de Collo au village de Béni-Saïd. Ces microgranites qui montrent souvent un aspect en colonnades caractéristique, renferment parfois des xénolites sédimentaires qui se transforment en cornéennes quartzieuses massives, homogènes et compactes. À la cassure, ils sont de couleur gris-clair ou gris-verdâtre. De composition, ils sont des microgranites monzonitiques, généralement altérés et présentent une texture microgrenue avec des phénocristaux de feldspaths.

La rhyolite affleure sous forme de filons. Il s'agit d'une roche blanchâtre tantôt Nettement fluidale, tantôt massive. Parmi les phénocristaux on peut reconnaître le quartz, le feldspath avec un peu de biotite altérée. La pâte est plus ou moins recristallisée. Des phénomènes de silicification secondaire affectent ces felsites.

De nombreux dykes de diabases et de microgabbro sont observés dans la partie Nord du Cap Bougaroun dans le champ des granites au voisinage de la zone de Béni-Saïd Belkacem. Certains dykes se prolongent sur des centaines de mètres. Au sud-est de Béni-Saïd Belkacem, les diabases sont accompagnées par des brèches éruptives et des tufs de même composition.

I .2. 5. Description des affleurements

Les affleurements des roches volcaniques sont localisés le long de la route de Beni Said qui mène à la baie de tammanart. Les observations sur terrain montrent que ses roches en contact direct avec les terrains de socle métamorphique de la région qui sont formé de gneiss et de Kinzigites. Le contact entre ces dernières et les roches métamorphique montrent une zone de métamorphisme de contact. Les observations montre aussi que ces coches sont très altérés qui produit d'altération des roches volcaniques de la région de l'étude située à proximité de la baie de de l'oued tammanart.

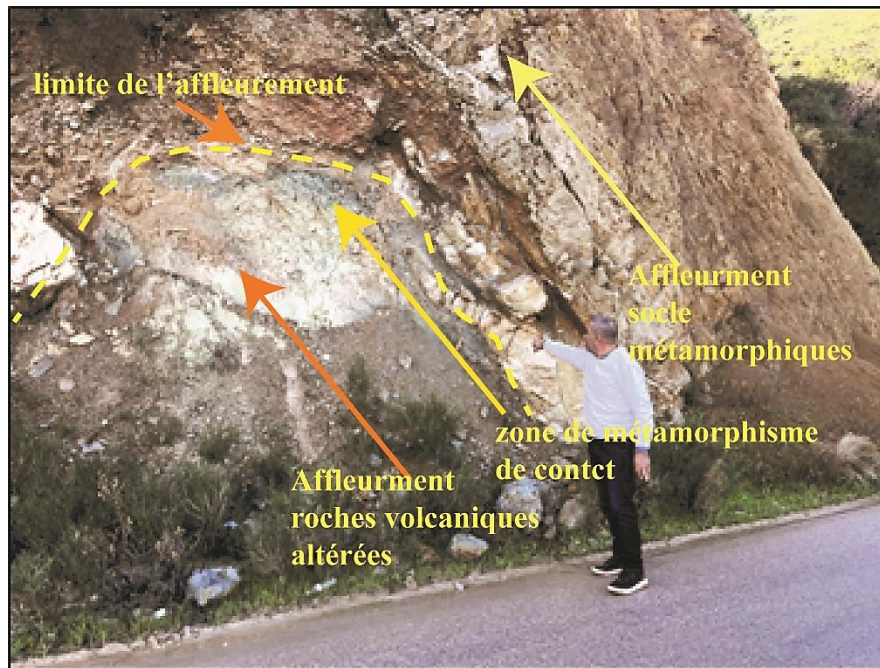


Fig. I 04 : Photo montrant l'affleurement des roches volcaniques de la zone de l'étude et leur relation avec les terrains de socle métamorphique

I.3. Généralités sur l'altération hydrothermale des roches volcaniques

I.3.1. Processus d'Altération Hydrothermale des Roches Volcaniques, Caractérisation Minéralogique et Impacts Géotechniques :

A) Introduction

L'altération hydrothermale des roches volcaniques correspond à l'ensemble des transformations chimiques, minéralogiques et structurales induites par la circulation de fluides chauds (300°C et 400°C) au sein d'un édifice ou d'une séquence volcanique. Ce phénomène metasomatique remplace les phases magmatiques primaires métastables (verre volcanique, feldspaths, pyroxènes) par des assemblages secondaires d'équilibre. Parmi ces néoformations, les argiles (phyllosilicates) et les zéolites (tectosilicates hydratés) occupent une place prépondérante à basse et moyenne température (200°C).

Les mécanismes de genèse de ces phases par l'action de fluides hydrothermaux neutres à alcalins, puis détaille l'apport des techniques analytiques complémentaires — la Diffraction des Rayons X (DRX), le Microscope Électronique à Balayage (MEB) et les essais géotechniques (Limites d'Atterberg) — pour caractériser ces produits et prédire les instabilités d'ouvrages ou de flancs volcaniques.

I.3.1. Les processus Géochimiques et Minéralogiques d'Altération:

- Kaolinisation: Cette altération correspond à un processus d'argilisation donnant aux feldspaths alcalins un aspect trouble et poussiéreux aux feldspaths

- Epidotisation: L'épidotisation correspond au degré extrême de la saussuritisation des plagioclases. Elle se traduit par le développement de grains dispersés d'épidotes.
- Calcitisation: Nous observons au sein de certains plagioclases l'apparition de petites plages irisées de calcite.
- Damouritisation: Cette altération est fréquente chez les plagioclases, elle conduit à l'apparition de damourite de petits fines micas blancs en paillettes souvent orientées. Altérations des amphiboles Les amphiboles s'altèrent en chlorites:
- Chloritisation: Celle-ci se manifeste sous différentes formes à savoir : en plaques xénomorphes en se superposant indifféremment aux minéraux primaires, en aiguilles, ou en veinules. Altération siliceuse: Elle se manifeste dans certaines roches sous forme de fines veinules de quartz. Ces dernières sont engrenées et de forme amiboïde, incolore et limpide. A leur éponte, nous distinguons quelque opaque.

La nature des phases secondaires dépend de la température, de la pression, du rapport fluide/roche, et du pH du fluide hydrothermal. Dans les contextes volcaniques (systèmes géothermiques, périphéries de gisements épithermaux ou milieux sous-marins), les fluides de type "chlorurés neutres à alcalins" favorisent la cristallisation conjointe de zéolites et d'argiles.

-La Zéolitisation : Elle se produit principalement aux dépens du verre volcanique (perlite, ponce, tufs pyroclastiques) et des feldspaths alcalins.

Mécanisme : Le fluide hydrothermal hydrolyse le verre poreux, provoquant la dissolution de la silice et de l'aluminium. Si le milieu est confiné, l'augmentation de l'activité des cations alcalins et alcalino-terreux s'accompagne d'une élévation du pH.

Paragénèses communes : À basse température (100°C), la clinoptilolite, la chabazite et la mordenite prédominent. Au-delà de (100 °C à 150°C), ces phases se déshydratent et se transforment en analcime puis en laumontite.

-L'Argilisation (Altération argilique). Les phyllosilicates hydrothermaux se forment selon un gradient de température et d'acidité. Smectites (Montmorillonite, Saponite) : Elles cristallisent à basse température (150°C) en conditions neutres à faiblement alcalines, souvent de manière synchrone avec les zéolites. Elles capturent le magnésium et le calcium libérés par l'altération des phénocristaux ferromagnésiens. Illite et Kaolinite : Si le système devient plus ouvert, le lessivage des cations favorise la transition des smectites vers l'illite (température 150°C -200°C) ou vers la kaolinite en cas de fluides plus acides.

Conclusion

L'étude fine des produits d'altération hydrothermale combine la rigueur minéralogique (DRX, MEB) et la quantification physique (Atterberg). Cette approche multi-échelle s'avère indispensable tant pour l'exploration des paléo-systèmes hydrothermaux que pour la mitigation des risques géotechniques en domaine volcanique actif ou fossile (Tableau I.1)

Tableau I.1 :les caractéristiques géotechniques des produits d'altérations hydrothermales dominants des roches volcaniques.

Produit d'altération dominant	Limite de Liquidité (w_L)	Indice de Plasticité (I_P)	Comportement Mécanique & Risques
Smectites (Montmorillonite)	Très élevée 100 % et 150%	Très élevé 70%	Activité colloïdale forte : Matériau hautement gonflant, sensible aux cycles d'humidification/séchage, instabilité géotechnique majeure.
Kaolinite / Illite	Faible à modérée 30 à 60%	10 à 20%	Plasticité modérée : Matériau stable, non gonflant mais sensible au cisaillement à saturation.
Zéolites (Clinoptilolite pure)	Modérée 40 à 60	Très faible à Non-Plastique	Comportement rigide/grenu : Bien qu'hydratées, les zéolites n'ont pas de glissement de feuillets cristallins. Elles se comportent comme des silts non-plastiques sauf si associées à des traces de smectites.

La synthèse bibliographique des propriétés géotechniques et minéralogiques des produits L'altération hydrothermal des roches volcaniques vitreuses sont rapporté sur l'organigramme (Fig. I 05)

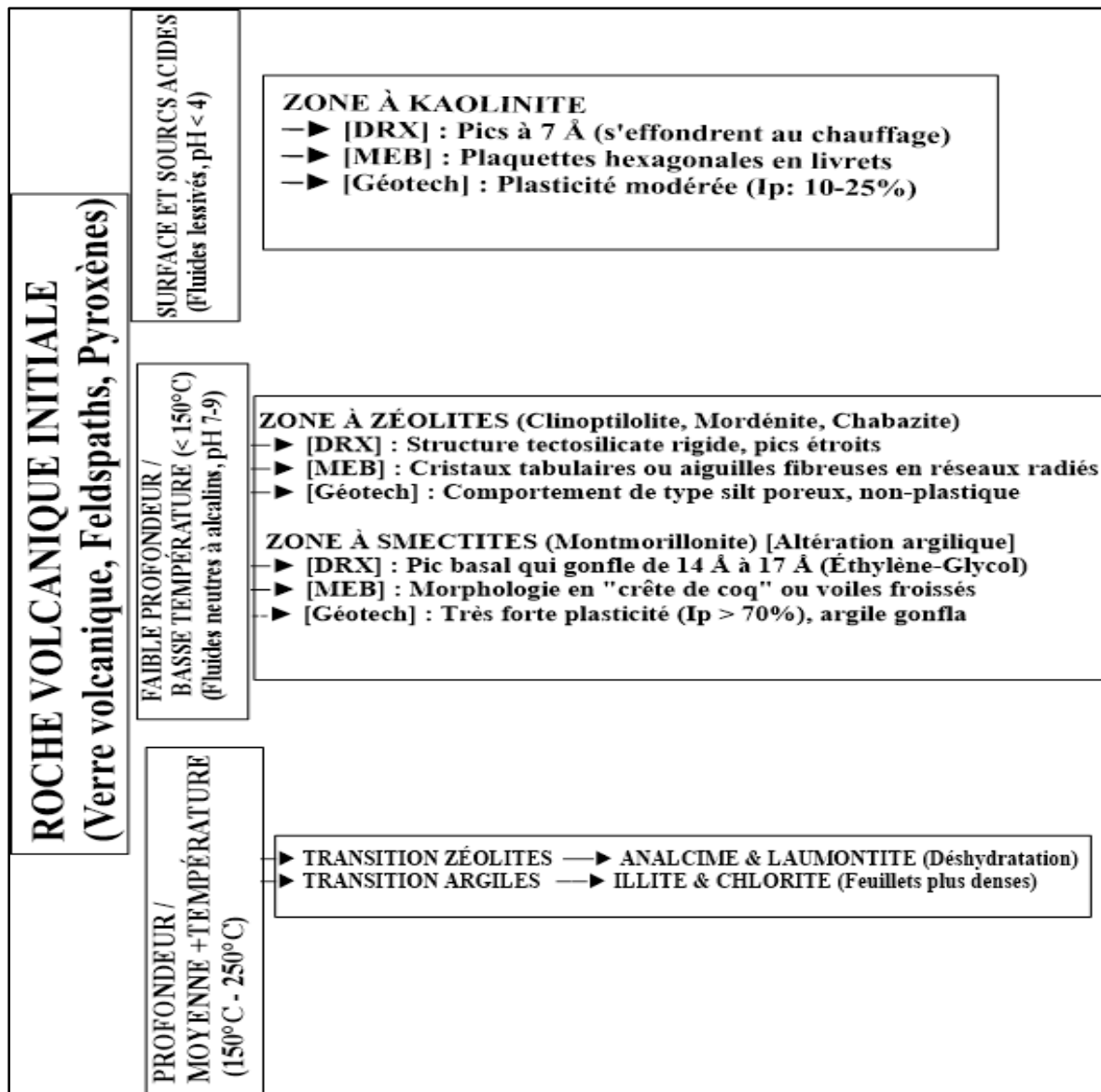


Fig. I 05 : organigramme de synthèse bibliographique des propriétés géotechniques et minéralogiques des produits L'altération hydrothermal des roches volcaniques ainsi que les zones d'altération de ces roches..

CHAPITRE II : Méthodes et matériels

Méthodes d'Identification et Caractérisation des roches volcaniques Multi-échelle

-Introduction

L'objectif de cette étude est la détermination de la nature de ces particules et l'évaluation de l'aptitude de cette fraction fine résultant de l'altération hydrothermal des roches volcaniques de la région d'El Collo à l'usage économiques

La complexité des textures des roches volcaniques altérées nécessite le couplage de protocoles cristallographiques, morphologiques et géotechniques afin de déterminer la nature de cette fraction et ses propriétés.

II .1. Testes géotechniques

II.1.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est une méthode de caractérisation des matériaux granulaires qui permet de déterminer la distribution des tailles de particules au sein d'un échantillon. Cette technique est cruciale dans de nombreux domaines, notamment la géotechnique, le génie civil, la sédimentologie et l'industrie des matériaux de construction. L'analyse granulométrique est pour but de détermination de type de fraction en se basant sur les triangles de nomenclature des sols (Fig II 01)

Taille (mm)	Sédiments	Roche	Classe
256	blocs (<i>boulders</i>)	Conglomérat (<i>conglomerate</i>)	Rudite
128	cailloux / galets (<i>cobbles</i>)		
64	-----		
32	-----		
16	graviers (<i>pebbles</i>)		
8	-----		
4	-----	Grès (<i>sandstone</i>)	Arenite
2,00	gravillons (<i>granules</i>)		
1,00	sable très grossier		
1/2 0,50	sable grossier		
1/4 0,25	sable moyen		
1/8 0,125	sable fin		
1/16 0,0625	sable très fin	Siltite et Argilite (<i>mudrock</i>)	Lutite
1/32 0,031	silt grossier		
1/64 0,0156	silt moyen		
1/128 0,0078	silt fin		
1/256 0,0039	silt très fin		
	argile		

Fig II 01 : Echelle de Wentworth pour la classification granulométrique des sédiments détritiques.

II.1.1.1. L'importance l'analyse granulométrique dans cette étude

Dans cette étude L'utilité de cette analyse se structure autour de:

A) Quantification du degré d'altération hydrothermale : L'altération hydrothermale brise les structures cristallines primaires d'une roche volcanique saine pour les transformer en phases beaucoup plus fines. **L'Augmentation de la fraction fine ($< 2 \mu\text{m}$ ou $< 63 \mu\text{m}$) :** Plus le rapport fluide/roche ou le temps d'interaction a été élevé, plus la proportion de "matrice" fine augmente aux dépens de la fraction "squelettique" (phénocristaux résiduels).

B) Différenciation Zéolites vs Argiles : Les zéolites hydrothermales (comme la clinoptilolite) forment généralement des micro-cristaux grenus ou fibreux qui se classent souvent dans la fraction des **silts ($2 \text{ à } 63 \mu\text{m}$)**. À l'inverse, les smectites et kaolinites se concentrent presque exclusivement dans la fraction **argileuse stricte ($< 2 \mu\text{m}$)**. Suivre la courbe granulométrique permet d'avoir une première estimation du ratio zéolites/argiles d'un tufs altéré

C) Mode opératoire

La granulométrie est définie comme une technique permettant de séparer un ensemble de particules selon leurs dimensions et d'en établir la fréquence statistique.

Les particules ainsi obtenues sont regroupées en fractions granulométriques, chaque fraction regroupant des grains dont les dimensions se situent dans un intervalle relativement étroit, décroissant d'une fraction à l'autre

Cette méthode permet d'identifier les substances associées aux différentes fractions granulométriques, et de déterminer si elles se concentrent dans les fractions fines, moyennes ou grossières. Elle constitue ainsi un outil précieux dans l'interprétation des processus sédimentaires (Fig II 02).

Dans le cadre de cette étude, nous avons adopté la méthodologie suivante :

a. Le quartage

Avant d'entamer toute analyse sédimentologie en laboratoire, il est nécessaire de soumettre les échantillons à une opération de quartage, dont l'objectif principal est d'homogénéiser l'échantillon et d'assurer sa représentativité.

b. Le séchage

Après décantation, les échantillons de sol sont placés dans une étuve afin d'éliminer l'humidité résiduelle et de stabiliser leur composition avant l'étape de tamisage.

Le séchage est effectué à une température comprise entre 50°C et 60°C, pendant une durée variant de 24 à 48 heures, selon la quantité et la nature de l'échantillon.

Durant cette phase, il est recommandé de surveiller régulièrement le fonctionnement de l'étuve afin d'éviter toute variation thermique indésirable. Certains modèles sont équipés de dispositifs de sécurité permettant de maintenir la température dans les limites souhaitées.

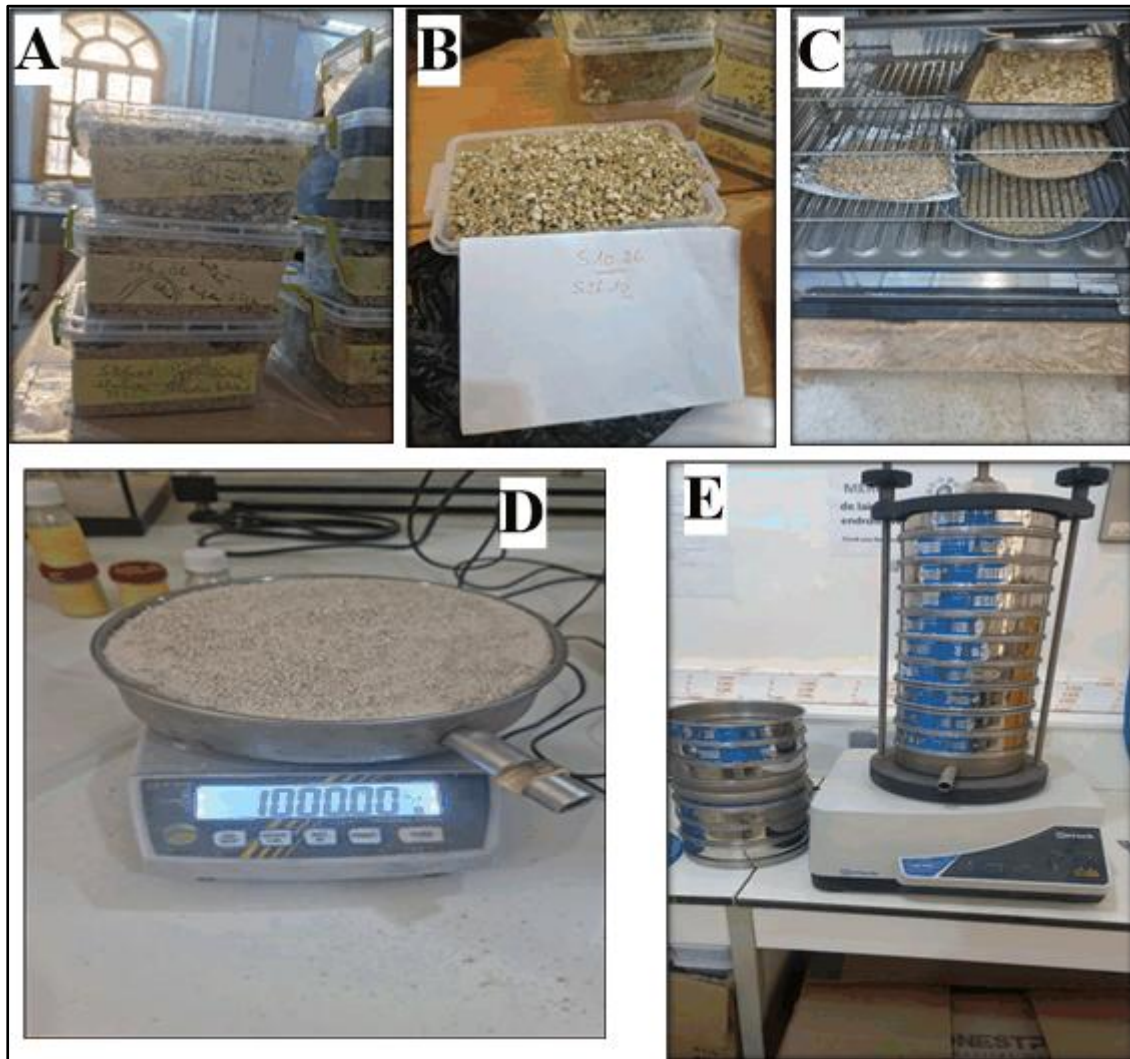


Fig II 02 : photo des Appareils utilisés dans le traitement granulométrique des prélèvés du secteur étudié. (A) séchage et homgenisations échantillons. (B) peusage des échantillons. (C) opération de séchage à l'aide de l'étuve. Tamis

c. Le tamisage

Cette étape a pour objectif de séparer les constituants de l'échantillon de sol en fonction de la taille des particules, à l'aide d'une série de tamis de dimensions normalisées.

La série de tamis utilisée dans cette étude comprend les ouvertures suivantes :

(2.5 - 2.0 - 1.0 - 0.80 - 0.63 - 0.50 - 0.40 - 0.063 - 0.050 - 0.040 mm).

L'échantillon sec est introduit dans la partie supérieure de la colonne de tamis, puis soumis à un tamiseur mécanique pendant une durée suffisante pour assurer une séparation efficace des particules.

Chaque refus retenu sur un tamis est soigneusement collecté et transféré dans une capsule propre pour être pesé.

Une attention particulière doit être portée lors de la récupération des fines particules, notamment en utilisant un pinceau adapté, sans jamais appuyer sur la maille ou forcer pour déloger un grain coincé.

En cas d'obstruction, le nettoyage peut être effectué à l'aide d'un dispositif à ultrasons, garantissant ainsi la propreté des tamis sans altérer leur précision.

Il est également important de ne pas utiliser, pour les analyses en laboratoire, des tamis ayant servi sur le terrain, afin de préserver l'exactitude des résultats granulométriques.

d. Le Pesage

Après l'étape de tamisage, chaque fraction granulométrique retenue sur les tamis est pesée à l'aide d'une balance électronique de haute précision. Celle-ci est placée sur une surface parfaitement plane et stable, préalablement tarée et protégée contre les courants d'air ou toute vibration susceptible d'affecter la fiabilité des mesures.

Il est impératif que la balance soit régulièrement étalonnée par un organisme accrédité, conformément aux normes en vigueur, afin de garantir l'exactitude des résultats.

Les données de pesée sont d'abord notées manuellement sur une fiche dédiée, puis saisies dans un tableur électronique en vue d'un traitement statistique ultérieur.

Les fractions granulométriques sont ensuite conservées dans des sachets hermétiques, clairement étiquetés, pour archivage ou pour d'éventuelles analyses complémentaires.

Généralités sur l'étude granulométrique

Les sédimentologues anglo-saxons ont généralisé l'usage d'une échelle logarithmique, dite échelle des phi (ϕ), définie par Krumbein et Pettijohn (1938) par la relation :

$$\phi = -\log_2 (d), (d : \text{étant le diamètre des grains en mm}).$$

Plusieurs auteurs ont proposé de diviser le gravier, le sable et le limon chacun en catégories choisies parmi les cinq suivantes : très fin, fin, moyen, grossier et très grossier et les limites entre ces catégories sont choisis arbitrairement. Seules les valeurs entières de l'échelle ϕ permettent de diviser cailloux, sable et limon, chacun en 5 catégories tout en respectant d'assez près les diverses limites admises par différents auteurs.

Nombreux sont les auteurs qui ont proposé des indices qui permettent d'exprimer numériquement les caractères de distribution granulométrique et on cite parmi eux (Trask, 1930) (Inman, D.I, 1952) ; (Folk. R.L, Ward, W.C., 1957). Les indices les plus

couramment utilisés sont : **la Moyenne M, le Sorting Index So, le Skewness Sk et le Kurtosis K.**

Dans ce présent travail les paramètres et indices choisis sont ceux définis par Folk et Ward (1957), ces deux auteurs ont proposé des formules qui contiennent un nombre élevé de quartiles, et ils ont utilisé des valeurs de phi comprises entre 5 % et 95%.

II.1.1.2. Définition des paramètres granulométriques

Dans la formule proposée par Trask l'échelle utilisée est l'échelle millimétrique, par contre Inman (1938) utilise l'échelle des Phi et il a proposé la formule suivante pour le calcul de la moyenne :

$$M = \frac{\phi 16 + \phi 84}{2}$$

Mais avec deux quartiles seulement ($\phi 16$ et $\phi 84$), la moyenne granulométrique ne serait pas représentative de l'échantillon. Pour y remédier, Folk et Ward ont proposé une autre expression :

$$M = \frac{\phi 16 + \phi 50 + \phi 84}{3}$$

Dans leur formule Folk et Ward ont choisi trois quartiles ($\phi 16$ et $\phi 50$ et $\phi 84$), dans le but d'avoir une bonne moyenne représentative de l'échantillon.

La moyenne granulométrique permet de donner une idée générale sur la texture de l'échantillon, le calcul de cet indice est d'autant plus fiable que le nombre de données prises en compte est élevé.

A/-l'indice de classement (So – sorting)

Ce paramètre est connu sous le nom de « indice de classement. So », (Trask, 1930) et « Graphique Standard Déviation G », (Otto, 1938). Les expressions données par Folk et Ward (1957), cet indice est donné par la formule suivante :

$$So = \frac{\phi 84 - \phi 16}{4} + \frac{\phi 95 - \phi 5}{6,6}$$

Avec ces quatre quartiles 90 % de la distribution est utilisé dans le calcul de ce paramètre. Le sorting index ou indice de tri ou de classement présent une estimation de la dispersion des tailles des particules par rapport à la moyenne de l'échantillon (Tab. 01).

Indice de classement et environnement de dépôt :

- l'indice de classement est lié à l'hydrodynamisme lors du dépôt du sédiment et donc l'environnement de dépôt.

Tableau II. 1 la relation entre Indice de classement et environnement de dépôt.

L'indice de classement :		Environnement de dépôt principal
$< 0,35 \phi$	très bien classé	Plage
$0,35 - 0,50\phi$	bien classé	Plage
$0,50 - 0,71\phi$	moyenne à bien classé	plage, rivière
$0,71 - 1,00\phi$	moyennement classé	rivière, turbidite
$1,00 - 2,00\phi$	mal classé	rivière, turbidite, cône alluvial
$2,00 - 4,00\phi$	très mal classé	moraine glaciaire, glissement de terrain

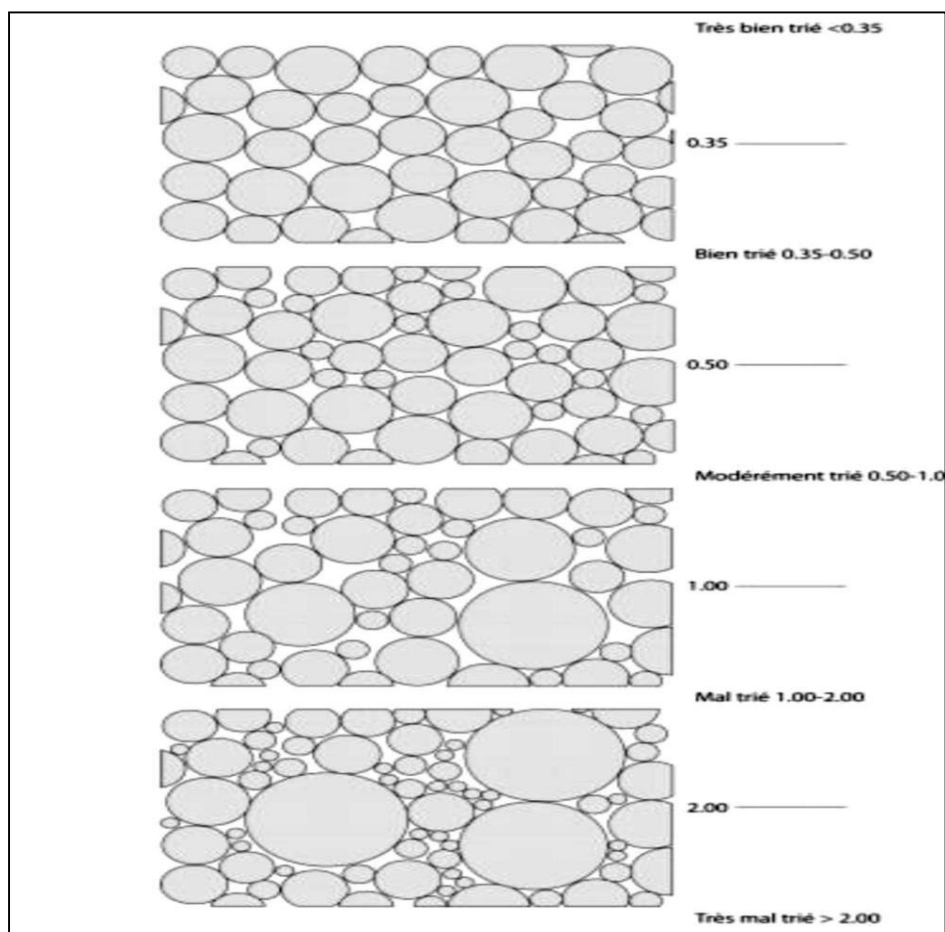


Fig II 03 : Standard visuel pour l'estimation du tri (logarithmique de Folk & Ward, 1957).

B/-Le coefficient de dissymétrie (Sk – Skewness)

Le terme utilisé par Inman pour cet indice est « Graphique Skewness », selon cet auteorce paramètre est donné par la formule suivante :

$$SK = \frac{\sum 84 + \sum 16 - 2\sum 50}{2(\sum 84 - \sum 16)} + \frac{\sum 95 + \sum 5 - 2\sum 50}{2(\sum 95 - \sum 5)}$$

Ce paramètre est souvent présenté comme un indicateur de l'environnement de dépôt Sédimentaire

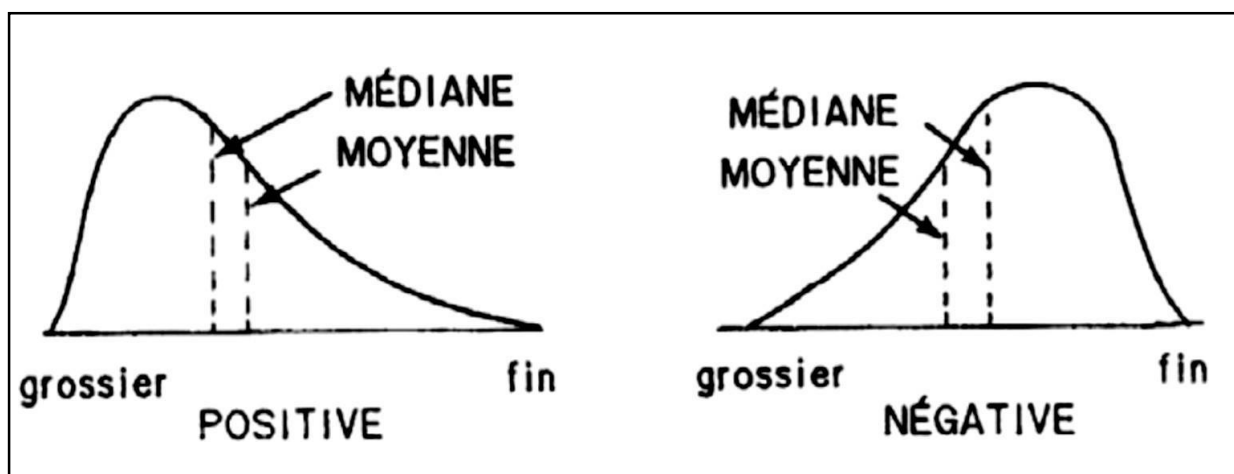


Fig II 04 : Représentation de Le coefficient de dissymétrie. (Belmedrek, 2005 - 2006)

Tableau II 02 : Interprétation de Le coefficient de dissymétrie .

Valeur	Asymétrie	Interprétation
Sk <1	Positive	Courant faible
Sk >1	Négative	Courant fort

Le meilleur calcul de cet indice est donné selon la formule proposé par Folk est ward (1957) :

$$SK = \frac{\sum 84 + \sum 16 - 2\sum 50}{2(\sum 84 - \sum 16)} + \frac{\sum 95 + \sum 5 - 2\sum 50}{2(\sum 95 - \sum 5)}$$

Avec cette formule 90% de la distribution est pris en considération.

Dans une distribution normale avec une courbe de fréquence en forme de cloche où la médiane et la moyenne coïncident. Chaque déviation de la distribution de la normale qui mène une différence entre la médiane et la moyenne représente une asymétrie ou Skewness de la courbe des fréquences.

Ce paramètre informe sur l'enrichissement en particules grossières (asymétrie négative), l'enrichissement en particules fines mal triées (asymétrie positive), ou s'il y'a asymétrie (Skewness compris entre -0.10 et 0.10)

$1,00 > \text{Ski} > 0,3$	Forte asymétrie vers les petites tailles
$0,30 > \text{Ski} > 0,10$	Asymétrie vers les petites tailles
$0,10 > \text{Ski} > - 0,10$	Symétrie granulométrique de l'échantillon
$- 0,10 > \text{Ski} > - 0,30$	Asymétrie vers les grandes tailles
$- 0,30 > \text{Ski} > - 1$	Asymétrie vers les grandes tailles

Tableau II 03 :Terminologie du Skewness (Ski) définie par Folk et Ward

C/-Le coefficient d'acuité (K – Kurtosis)

Folk et Ward (1957) ont défini ce paramètre par l'expression suivante :

$$K = \frac{s_{95} - s_5}{2,44(s_{75} - s_{25})}$$

Dans une courbe de Gausse, en forme de cloche, ce paramètre calcule le rapport entre le classement aux extrémités et le classement au centre de la courbe.

Le Kurtosis est l'indice d'acuité du mode, il mesure l'angulosité de la courbe des fréquences. Si le mode est concentré dans des classes granulométriques restreinte, on a une distribution Leptokurtique, s'il est dispersé on a une distribution Platykurtique (Tab. 04.).

Tableau II 04 : Terminologie du Kurtosis (K) définie par Folk et Ward.

$K < 0,67$	Courbe très platykurtique
$0,67 < K < 0,90$	Courbe Platykurtique
$0,90 < K < 1,11$	Courbe mesocurtique
$1,11 < K < 1,50$	Courbe Leptokurtique
$1,50 < K < 3,00$	Courbe très Leptokurtique
$3,00 < K$	Courbe extrêmement Leptokurtique

1. **SK = 0**, le mode coïncide avec la médiane et la moyenne, les fractions fines et grossières sont classées symétriquement par rapport à la médiane.

2. **SK > 0**, la fraction grossière est plus importante donc mieux classée que la fraction fine.

La médiane et le mode se situent à gauche de la moyenne.

3. **SK < 0**, la fraction fine est mieux classée que la fraction grossière. La médiane et le mode sont cette fois à droite de la moyenne Fig5.

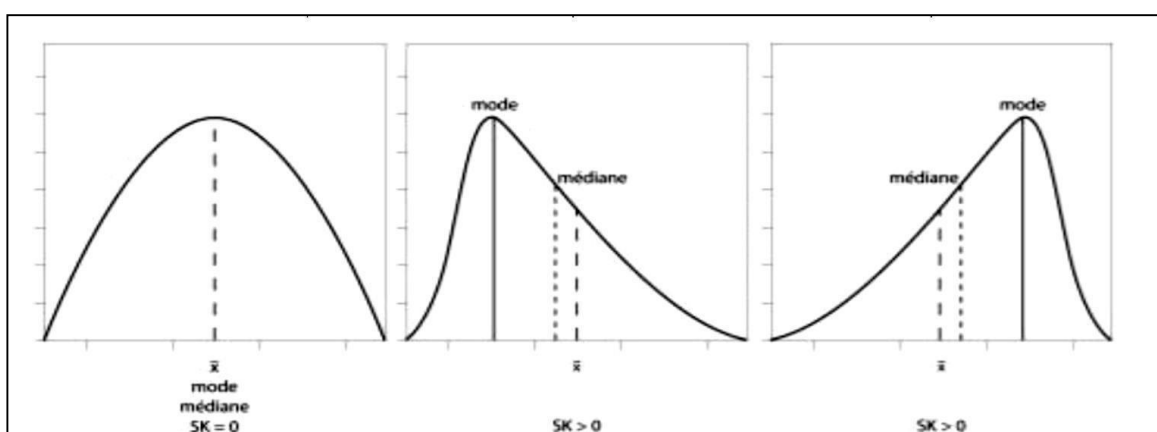


Fig II 05 : Courbes de fréquence illustrant la relation entre le mode, la médiane et la moyenne et la différence entre une courbe normale symétrique et une courbe de fréquence asymétrique (skewed) .

II.1.2. Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg, nommées d'après le scientifique suédois Albert Atterberg, sont des paramètres géotechniques essentiels qui définissent les états de consistance d'un sol fin en fonction de sa teneur en eau. Elles comprennent la limite de liquidité (**LL**), la limite de plasticité (**LP**) et la limite de retrait (**LR**).

II.1.2. 1 Définition

Les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques fondamentaux utilisés pour caractériser la consistance des sols fins (argiles et limons) en fonction de leur teneur en eau (w). Elles définissent les seuils de transition entre les quatre états de consistance : l'état solide, l'état semi-solide, l'état plastique et l'état liquide.

Ces limites marquent les transitions entre les différents états du sol :

Solide à semi-solide (limite de retrait)

Semi-solide à plastique (limite de plasticité)

Plastique à liquide (limite de liquidité)

II.1.2. 2 Objectifs de l'essai

A) **La Détermination de l'Indice de Plasticité (I_P)** : Calculé par la formule $I_P = w_L - w_P$. Cet indice exprime l'étendue de la plage de teneur en eau dans laquelle le sol reste plastique. Plus I_P est élevé, plus le sol est "argileux" et "plastique".

Classification du sol : Permet de positionner le sol sur l'Abaque de Plasticité de Casagrande afin de le classer (Argile peu plastique, très plastique, etc.).

Aptitude à la fabrication : Dans votre projet (briques), ces limites permettent de déterminer la quantité d'eau optimale pour le façonnage sans que le produit ne se fissure au séchage.

Norme Française AFNOR NF P94-051 : Sols : Reconnaissance et Essais - Détermination des limites d'Atterberg (Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau).

B) Limite de Liquidité (LL)

La limite de liquidité est la teneur en eau à laquelle le sol passe de l'état plastique à l'état liquide. Elle est généralement mesurée à l'aide de l'appareil de Casagrande ou du cône de pénétration (Fig II 06).



Fig II 06 : Matérielles de limite Atterberg (casagrande et spatule).

- **Matériel utilisé (Appareillage) :** On place un échantillon de sol dans une coupelle normalisée, on y trace un sillon, puis on compte le nombre de chocs nécessaires pour que le sillon se referme sur une longueur de 1 cm. La limite de liquidité correspond à une teneur en eau pour laquelle le sillon se referme après 25 chocs.

C. La Limite de Plasticité (LP)

La limite de plasticité est la teneur en eau à laquelle le sol passe de l'état semi-solide à l'état plastique. Elle est déterminée en roulant un échantillon de sol en fils de 3 mm de diamètre jusqu'à ce qu'ils se fissent (Fig II 07)



Fig II 07 : Matérielles de limite Atterberg (les tares et balance mesure).

-Matériel utilisé (Appareillage)

Pour réaliser cet essai en laboratoire, les outils suivants sont indispensables :

- L'Appareil de Casagrande : Un dispositif composé d'un socle en ébonite et d'une coupelle en laiton actionnée par une came (pour w_L).
- L'Outil à rainurer : Pour tracer une fente de dimensions normalisées dans l'échantillon étalé dans la coupelle.
- La Plaque de verre dépolie : Utilisée pour confectionner manuellement des rouleaux de sol de 3 mm de diamètre (pour w_P).
- La Balance de précision : Sensible à 0,01 g pour peser les échantillons avant et après séchage.
- Une Étuve de dessiccation : Réglée à (105°C) pour déterminer la teneur en eau réelle par évaporation.
- Une Spatules et mortier : Pour la préparation et le malaxage de la pâte.

D. Classification des sols selon la GTR

Le Guide des Terrassements Routiers (GTR) utilise les limites d'Atterberg pour classer les sols fins et les regrouper en familles selon leur comportement en chantier. Quelques exemples :

- A1 : Argile à faible plasticité ($LL < 35$, $IP < 15$)
- A2 : Argile à plasticité moyenne ($35 < LL < 50$, $15 < IP < 25$)
- A3 : Argile à haute plasticité ($LL > 50$, $IP > 25$)
- S1 : Silt ou limon peu plastique ($LL < 35$, $IP < 10$)
- S2 : Silt ou limon à plasticité moyenne ($35 < LL < 50$, $10 < IP < 20$)

II .2. Analyse minéralogique

II.2.1. Analyse par diffraction X (DRX)

Afin d'identifier avec précision la nature des minéraux argileux présents dans les échantillons, la technique de diffraction des rayons X (XRD) a été utilisée, étant l'outil principal pour analyser la structure cristalline des minéraux argileux.

A) Principe de la méthode utilisée

La diffraction des rayons X est une technique de base de la caractérisation et identification la nature et la structure des produits cristallisés (cristaux, minéraux, argiles...) du fait que leurs atomes sont arrangés selon des plans cristallins spécifiques (Eberhart ,J.-P.1989). Lorsqu'un faisceau de photons X interagit avec un échantillon cristallin, une partie du

rayonnement est diffractée (de longueur d'onde du rayonnement incident λ) selon des angles définis θ dont les valeurs sont directement reliées aux distances “d” entre les plans réticulaires par la loi de Bragg. La diffraction des rayons X est une technique analytique basée sur la diffraction radiologique sur des substances. Il est également connu sous le nom de cristallographie pour les rayons X et de diffusion pour les matériaux amorphes. Le dispositif utilisé est un diffractomètre, qui recueille des données pour former un diagramme de diffraction ou diffractogramme . Le principe de la DRX consiste à faire diffracter les rayons X sur un échantillon solide plat ou une poudre. La diffraction se fait suivant la loi de Bragg (Figure I).

Cette loi est exprimée par l'équation suivante :

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

Où ;

n : Nombre entier désignant l'ordre de la réflexion ;

λ : Longueur d'onde du rayonnement X (nm) ;

d_{hkl} : Distance entre les plans réticulaires d'une même famille désignée

Conventionnellement par les indices de Miller h, k, l , (Å) ;

θ : Angle de diffraction (°).

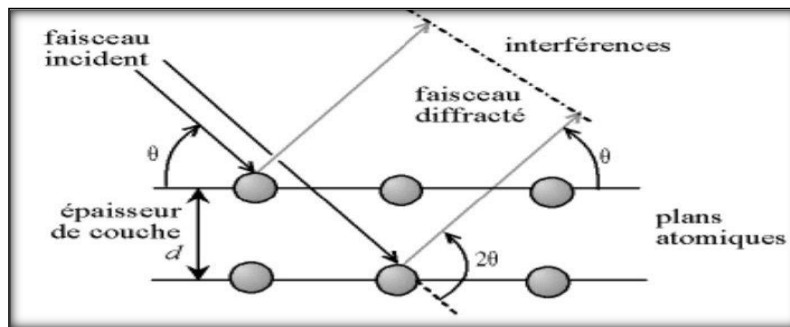


Fig II 8 schéma représentant le Principe de la DRX

L'échantillon a été analysé à l'aide de l'appareil de XRD.

Pour les Zéolites : Les tectosilicates possèdent des pics de diffraction étroits et bien définis (ex: pic majeur de la clinoptilolite vers angle ($2\theta \approx 9.8^\circ$ pour la raie du cuivre Cu K α))

- L'analyse sur poudre totale permet de quantifier la proportion de zéolite par rapport au verre résiduel.



Fig II 09 : Appareil de diffraction des rayons X (DRX) utilisé pour l'analyse minéralogique.

II.2.2. Analyse microscopie électronique à balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage (MEB ou SEM pour Scanning Electron Microscopy en anglais) est une technique de microscopie électronique basée sur le principe des interactions électrons-matière, capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon. La caractérisation par la microscopie électronique à balayage permet d'étudier l'état de surface des matériaux par observation directe des diagrammes (images), et d'en déduire le degré de rugosité de la surface. D'après Feng (Ning-chuan et al 2012) les micrographes électroniques à balayage indiquent clairement la texture extérieure et la morphologie de l'adsorbant.



Fig II 10 : Les matériaux des analyses par le microscope électronique à balayage (MEB).

A) Importance et le but de la MEB dans les analyses de laboratoire :

La MEB joue un rôle essentiel dans les laboratoires modernes. Elle permet de caractériser la topographie, la morphologie et la composition chimique des matériaux avec une précision inégalée. Grâce à cette technique, il est possible de détecter des défauts microscopiques, de contrôler la qualité des matériaux et de mieux comprendre les mécanismes à l'origine des défaillances dans divers systèmes.

- **Faciès des Zéolites** : La clinoptilolite s'identifie sous forme de cristaux tabulaires, plats, en plaquettes monocliniques bien individualisées tapissant les vacuoles (porosité de phénocristaux dissous). La mordénite se présente sous forme de fibres ou d'aiguilles en réseaux radiés très denses ("cheveux").
- **Faciès des Argiles** : Les smectites développent une morphologie typique en "crête de coq" ou en voiles froissés ultra-fins qui englobent les reliques de verre volcanique. La kaolinite s'observe sous forme d'empilements de plaquettes hexagonales ("livrets").

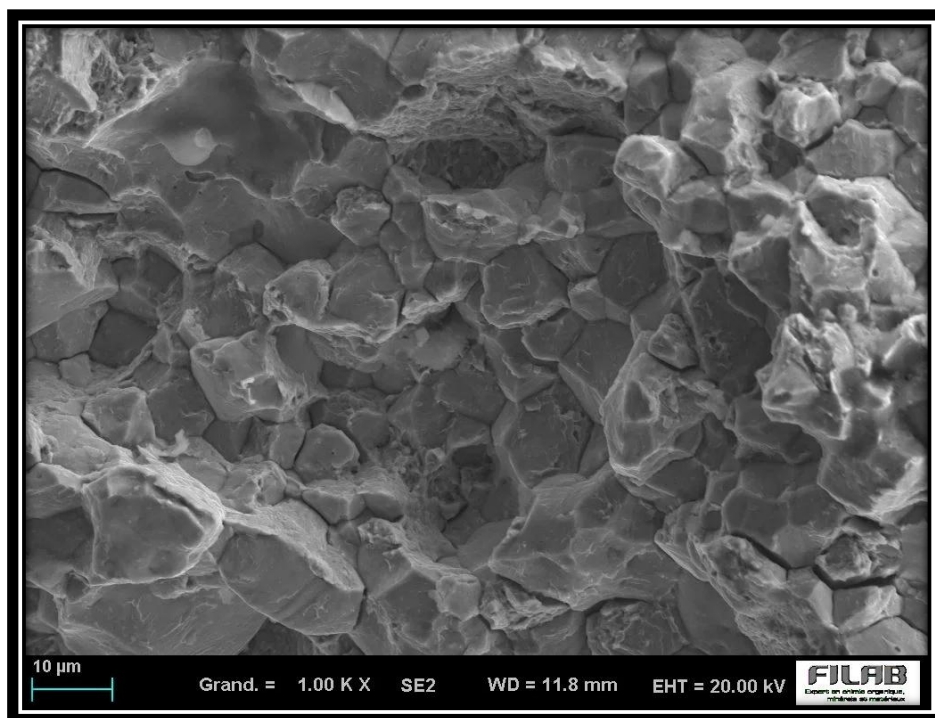


Fig II 11 :Image d'analyse par le microscope électronique à balayage (MEB).

CHAPITRE III Résultats et interprétations

III .1. Résultats et interprétation de l'analyse granulométrique

A) Résultats

Le tableau (Tableau III 01) rassemble les données brutes issues de l'analyse granulométrique par tamisage à sec de douze (12) échantillons des laterites produits des l'alteration hydrothermales des roches volcaniques de la zone de l'étude. Il exprime la distribution des différents fractions en émettant la masse du refus (en grammes ou en pourcentage) conservée au niveau de chaque fraction granulométrique, déterminée par une série de tamis normalisés dont les ouvertures de mailles (apertures) s'étalent décroissamment de 2500 Micromètresu m à 40 micromètres.

Tableau III 01 :Les poids refus par tamis pour 12 échantillons (Analyse granulométrique).

Initial Weight:	1000	1000	1000	1000	1000	1000	500	1000	1000	1000	500	1000
2500	0	0	0	260.73	570	0	0	0	0	0	0	0
2000	0	22.5	158.01	97.62	73.8	477.45	0	201.53	29.53	134.25	30.33	117.83
1000	167.90	236.81	298.5	305.12	184.7	262.86	102	311.04	200.37	410.35	55.72	171.45
800	141.53	97.1	80.1	65.75	39.7	52.05	62.68	82.92	92.9	104.08	24.17	93.03
630	105.88	70	70.8	43.73	21.28	32.58	49.9	58.1	64.85	67	15.5	61.6
500	56.9	13.6	11.2	2.13	7.7	8.24	11.37	6.6	8.09	4.19	2.73	11.59
400	139.35	137	100	67.92	24.43	46.55	66.52	98.18	147.93	104.51	25.09	131.39
315	92.95	74.7	60	32.86	14	24.2	35.55	49.73	87.74	49.46	15.34	74.22
250	78.7	68	55	27.93	18.8	20.88	32.6	47.2	88.34	42.51	13.05	70.6
200	41.3	41.5	45.35	20.5	7.02	14.08	20.8	28.55	54.55	22.01	8.54	66.22
150	30.85	47.15	19	6.42	5.3	9.35	22.36	26.85	50.89	18.34	4.1	24.3
100	33.63	38.33	24.35	12.9	10.66	12.25	21.2	23.2	46.72	15.79	7.15	36.65
80	28.92	45.15	25.9	11.7	15.76	9.99	20.82	21.15	37.88	14.3	5.09	28.81
63	17.41	30.8	11.45	7.85	17.06	4.86	19.35	9.69	19.05	6.9	1.35	23.4
50	17.3	30	15.85	13.4	17.23	10.12	14.19	16.05	19.2	8.92	5.22	29.25
40	6.2	8.25	5.65	3.1	4.01	2.53	3.25	3.77	4.47	1.41	0.25	6.48
4	21.91	32.2	18.08	11.3	20.9	2.4	10.75	18.15	15.08	30.3	2.8	18.95

Les résultats de la granulométrie et la nomenclature selon la méthode de folk et word montrent que les granulats grossiers supérieurs à 0.08 micromètres varient entre des sables et des sables très grossiers .

Prédominance de la fraction sableuse : La quasi-totalité des échantillons présente une texture fortement sableuse, avec un pourcentage de sable (Sand %) qui dépasse largement les 90%.

La Faible proportion de fines (Silt + Clay) : Les fractions fines (limons et argiles) sont minoritaires, représentant moins de 10% de la masse totale de la matrice sédimentaire. Le rapport Silt:Clay montre une très légère tendance vers le pôle limoneux (Silt).

Présence de graviers (Gravel) : Il est crucial de noter l'indication textuelle sur le graphique ("sont présents dans les échantillons"). Cela signifie que bien que la matrice fine soit purement sableuse, les sédiments contiennent également une fraction grossière de graviers, ce qui pourrait classer globalement l'échantillon comme un "Sable graveleux" (Gravelly Sand) selon la classification texturale complète de Folk (Fig.01) et tableau (02).

Tableau III 02 :Tableau de nomenclature et description des résultats de l'analyse granulométrique (selon FOLK et WARD,1957) .

Description selon la méthode de FOLK et WARD												
Numéros Echantillons	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
nomenclature	Sable moyen	Sable moyen	Sable grossier	Sables grossiers	Sables grossiers	Sables grossiers	Sable moyen	Sable grossier	Sable moyen	Sable grossier	Sable grossier	Sable grossier
% graviers:	0,0 %	2,3 %	15,8 %	36,2 %	61,2 %	48,2 %	0,0 %	20,1 %	3,1 %	13,3 %	14,0 %	12,2 %
% sable:	95,4 %	90,7 %	80,3 %	61,1 %	34,9 %	50,3 %	94,4 %	76,2 %	93,0 %	85,4 %	82,2 %	82,2 %
% silt:	4,6 %	7,0 %	3,9 %	2,8 %	3,9 %	1,5 %	5,6 %	3,7 %	3,9 %	1,3 %	3,7 %	5,6 %

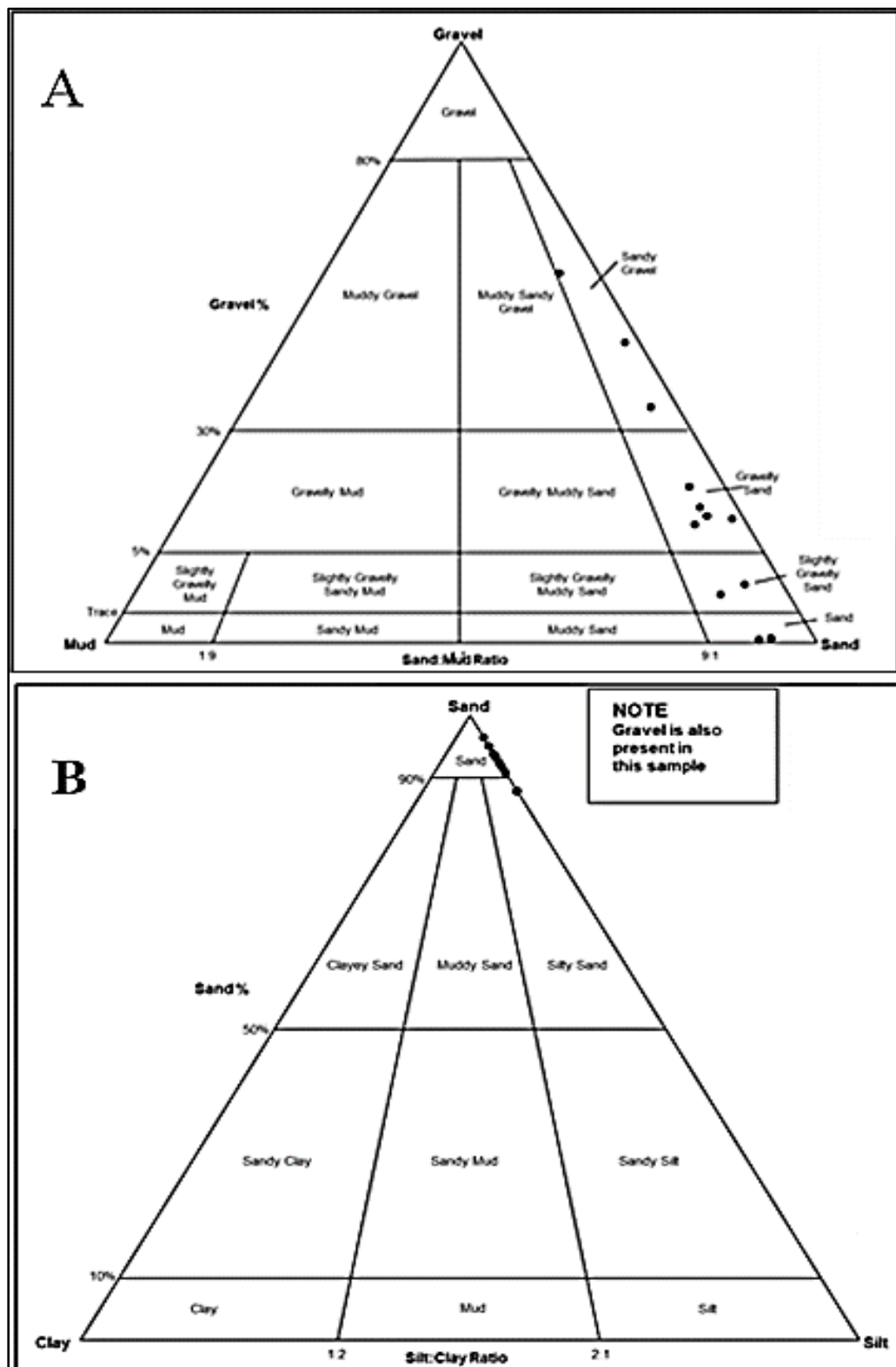


Fig III 01 :Diagramme textural réalisé avec GRADISTATv9.1 des échantillon du secteur de l'étude .

B) Interprétation de la granulométrie

L'altération hydrothermale modifie progressivement les minéraux primaires des roches volcaniques :

- Feldspaths → kaolinite, halloysite
- Verre volcanique → allophane, argiles secondaires
- Minéraux ferromagnésiens → oxydes et hydroxydes de fer

Cette transformation s'accompagne généralement :

- D'une destruction de la texture originelle .
- D'une augmentation de la fraction fine (limons + argiles) .
- D'une diminution de la fraction grossière (graviers et sables).

Ainsi, la granulométrie constitue souvent un bon indicateur indirect du degré d'altération. Comme indiqué dans le tableau suivant 03.

Tableau III 03 : Relation entre le degré d'altération hydrothermale et les caractéristiques granulométriques des roches.

Degré d'altération	Fraction dominante	Caractéristiques granulométriques	Signification
Faible	Graviers + sables	Forte proportion d'éléments grossiers	Roche peu altérée
Modérée	Sables + limons	Désagrégation progressive des minéraux	Altération intermédiaire
Forte	Limons	Augmentation des particules fines	Hydrolyse avancée
Très forte	Argiles	Forte teneur en particules < 2 μm	Altération hydrothermale intense

Conclusion sur l'analyse granulométrique

D'après les diagrammes triangulaires résultats de l'analyse granulométrique on remarque évolution progressive des matériaux vers des fractions de plus en plus fines. Cette tendance est cohérente avec un processus d'altération hydrothermale qui provoque la décomposition des minéraux primaires et la formation de minéraux argileux secondaires. Le secteur de l'étude montre une zone sableuse à graveleuse et l'altération est faible et la structure de la roche encore conservée et les minéraux primaires peu transformés.

III .2. Résultats de la méthode Limites d'Atterberg

A) Résultats

L'abaque de Casagrande (diagramme de plasticité) utilisé pour classer les sols fins à partir de la limite de liquidité (WL ou LL) et de l'indice de plasticité (IP ou PI). C'est un outil fondamental en géotechnique pour interpréter les produits d'altération des roches volcaniques (cendres volcaniques altérées, tufs, andosols, argiles résiduelles, sols latéritiques volcaniques).

Les résultats de l'analyse des Limites d'Atterberg sont rapportés sur la figure (Fig 02) et (Tableau04) .

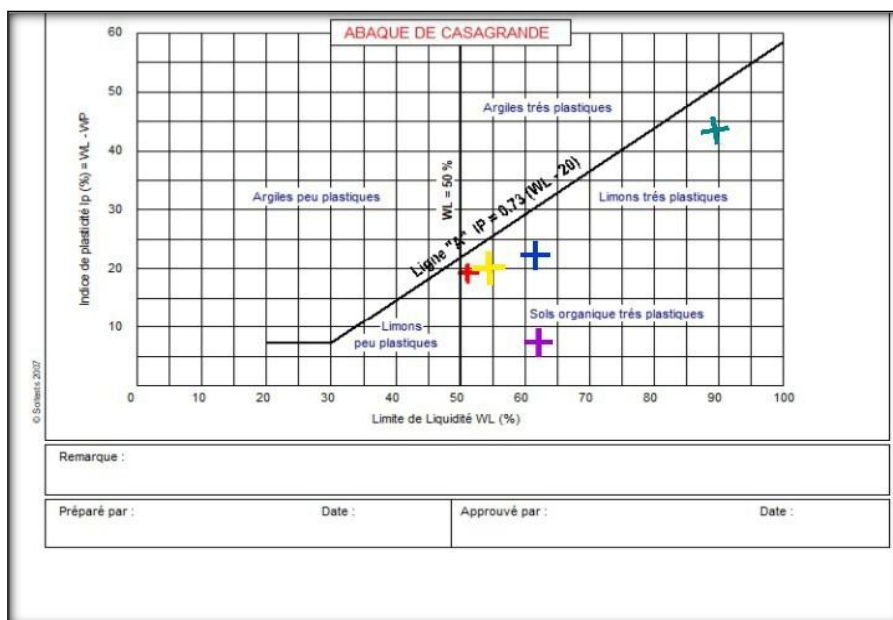


Fig III 2 Classification des 5 échantillons de sol selon l'abaque de Casagrande.

Tableau III 4 Classification des 5 échantillons de sol selon l'abaque de Casagrande.

Echantillon	Limite de liquidité (WL)	Indice de plasticité (Ip)	Classification géotechnique
Ech1+ Rouge	Moyenne (~52%)	Faible-Modéré (~17%)	Limon très plastique (Zone de transition)
Ech2 + Bleu	Élevée (~62%)	Modéré (~22%)	Limon très plastique
Ech4+ Violet	Élevée (~62%)	Très faible (~8%)	Sol organique très plastique
Ech7+ jaune	Moyenne-Élevée (~55%)	Modéré (~18%)	Limon très plastique
Ech10+ vert	Très élevée (~92%)	Élevé (~42%)	Argile très plastique

B) Interprétation

D'après les résultats des limites Atterberg

1. Échantillon 01 (croix rouge)

L'échantillon présente un WL = 52 %. La ligne A vaut et un IP observé $\approx 17\%$. Le point représentatif est légèrement sous la ligne A de l'abaque l'échantillon peut être classé comme limon inorganique de forte plasticité) ou matériel de transition limono-argileux a compressibilité élevée ; Une résistance moyenne à faible lorsqu'il est saturé et une sensibilité à l'eau.

2. L'échantillon 02 (croix bleu)

L'échantillon présente un WL= 62% et IP = 22%. Sa Position et situé juste en dessous de la ligne "A", à droite de la limite WL = 50%. Il se positionne dans la zone des Limons très plastiques. Sa proximité avec la zone des sols organiques nécessite une attention particulière pour vérifier (par d'autres essais complémentaires) s'il s'agit d'un limon pur.

3. L'échantillon 04 (croix violet)

L'échantillon présente un $WL = 62\%$ et un $IP = 8\%$. Sa position : Situé tout en bas du diagramme, très en dessous de la ligne "A" et à droite de $WL = 50\%$. Cet échantillon se classe dans la catégorie des Sols organiques très plastiques, Caractérisé par un indice de plasticité très faible par rapport à sa limite de liquidité élevée, ce type de sol présente généralement de faibles caractéristiques géotechniques (risque élevé de tassement).

4. L'échantillon 07 (croix jaune)

L'échantillon présente un $WL = 55\%$ et $IP = 18\%$. Sa position : Situé légèrement en dessous de la ligne "A", à droite de la limite $WL = 50\%$. Cet échantillon est également classé parmi les Limons très plastiques. Il présente une plasticité légèrement inférieure à celle de l'échantillon bleu, se rapprochant de la ligne de transition des 50% .

5. L'échantillon 10 (croix vert)

L'échantillon présente un $WL = 92\%$ et $IP = 42\%$. Sa position est située nettement au-dessus de la ligne "A" et très loin à droite de la limite $WL = 50\%$. Cet échantillon est classé comme une Argile très plastique. Ce type de sol possède une très forte capacité de rétention d'eau, un potentiel de gonflement/retrait élevé et une forte compressibilité.

Conclusion sur d'interprétation des limites d'Atterberg

Les résultats reportés sur l'abaque de Casagrande montrent que la majorité des échantillons issus de l'altération des roches volcaniques se situent dans le domaine des limons de forte plasticité, avec des limites de liquidité comprises approximativement entre 50 et 90 % et des indices de plasticité variant entre 7 et 45 %. Cette distribution traduit une forte capacité d'absorption d'eau, une compressibilité élevée et une sensibilité marquée aux variations hydriques. Ces caractéristiques sont cohérentes avec la présence de minéraux secondaires issus de l'altération volcanique. Les matériaux étudiés présentent ainsi un comportement géotechnique potentiellement défavorable pour les fondations superficielles en raison des risques de tassement et de diminution de résistance mécanique à l'état saturé.

Les données des limites d'Atterberg (Limite de Liquidité LL, Limite de Plasticité PL, et l'Indice de Plasticité $IP = LL - PL$) sur des échantillons de roches volcaniques permet de diagnostiquer directement leur degré et type d'altération hydrothermale.

En effet, une roche volcanique saine (non altérée) est rigide et non plastique ($IP = 0$). C'est la transformation géochimique de ses minéraux d'origine (feldspaths, verres volcaniques)

en argiles et en zéolites sous l'action de fluides hydrothermaux qui lui confère ses propriétés plastiques.

L'altération argilique (Smectites / Montmorillonite) montre une plasticité élevée à Très élevée se qui donne une forte augmentation de la limite de liquidité ($LL > 80\%$) et un indice de plasticité très élevé ($IP > 50\%$). Sur l'abaque de plasticité de Casagrande, ces échantillons se placent nettement au-dessus de la ligne A (domaine des argiles CH -hautement plastiques).

L'altération argilique avancée ou subaérienne (Kaolinite) montre une plasticité Faible à Moyenne, ce qui donne des valeurs de LL (30 - 60%) et d'IP (10 - 30%) sont modérées. Les points se situent généralement sous ou proche de la ligne A (argiles ML/CL ou limons).

La présence de Zéolites montre un comportement singulier. Si la roche contient beaucoup de zéolites et peu d'argiles, la limite de liquidité (LL) peut être étonnamment élevée, mais la limite de plasticité (PL) l'est tout autant. Par conséquent, l'indice de plasticité (IP) reste faible à modéré. Ces minéraux augmentent la capacité de rétention d'eau sans pour autant rendre le sol collant ou hautement plastique.

D'après les résultats on peut conclure que l'échantillon 10 représente un dépôt résultant de l'altération argilique (smectite et montmorillonite). L'échantillon 04 représente un mélange entre Argiles + Zéolites. Les échantillons 01, 02 et 07 sont des zéolites

III .3. Résultats des analyses microscopie électronique à balayage (MEB)

Un échantillon de la fraction fine a été analysés au MEB-EDS sous forme de poudre, l'identification des zéolites devient plus délicate mais reste possible. Ce qui est contrairement à une lame mince ou à un fragment rocheux intact, une poudre : détruit souvent la morphologie cristalline originale ; mélange plusieurs minéraux dans le même champ d'observation et rend difficile l'observation des textures d'altération et des relations entre minéraux.

Ainsi, avec une poudre, le MEB-EDS permet surtout d'identifier la composition chimique locale, de suggérer la présence de zéolites, mais rarement de déterminer avec certitude leur espèce. Un spectre dominé par : Si + Al + O avec Na, K ou Ca est compatible avec une zéolite.

A) Résultats

Les résultats d'analyse par MEB SEM de l'échantillon 09, Fig03 montre la présence de phases aluminosilicates riches en Si, Al et alcalins/alcalino-terreux est compatible avec le

développement de minéraux zéolitiques résultant de l'altération hydrothermale des matériaux volcaniques. Toutefois, l'analyse ayant été réalisée sur des poudres, l'identification précise des espèces zéolitiques nécessite une confirmation par diffraction des rayons X. Les éléments dominants sont : l'oxygène, le silicium et l'Aluminium.

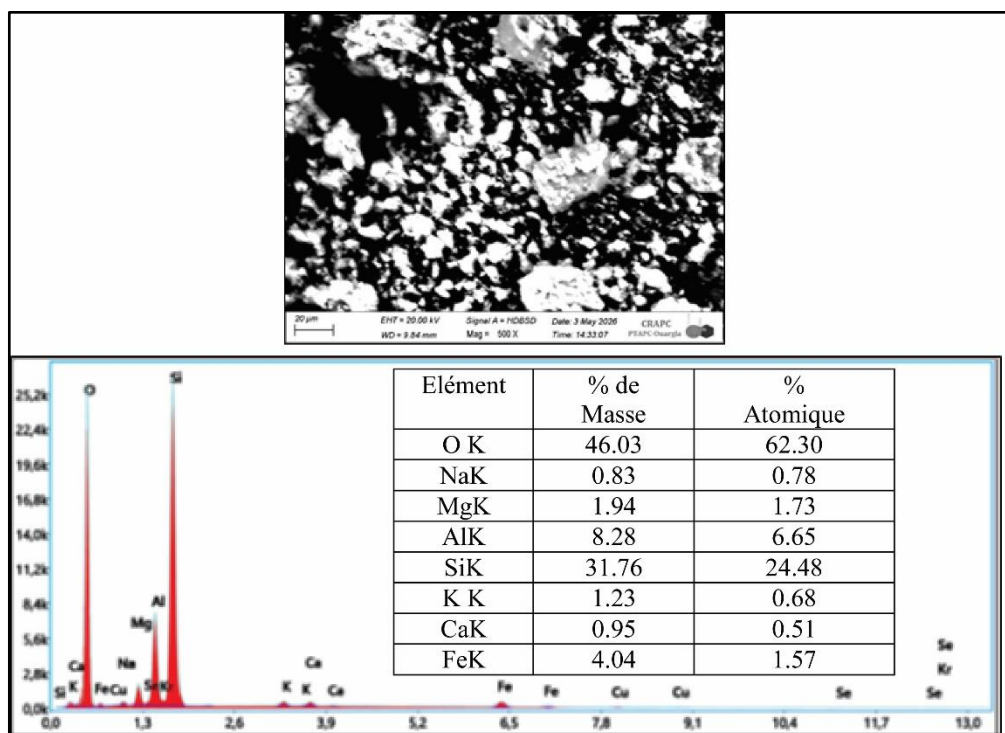


Fig III 3 Résultat de l'Analyse quantitative de la composition métallologique et élémentaire de l'échantillon N°9 par MEB.

B) Interprétation

Le rapport Si/Al à partir des pourcentages atomiques : Le Si = 24,48 % et Al = 6,65 %
 Le rapport : $\text{Si/Al} = 24.48 / 6.65 = 3,68$. Cette valeur comparée avec le tableau des rapport (Tableau III 5). ($\text{Si/Al} \approx 3,7$) se situe dans le domaine Heulandite et les Clinoptilolite pauvre en Si et est nettement plus élevée que celle des argiles kaoliniques. En plus Présence de cations échangeables tel que le Na, le K, le Ca et le Mg montre que cette association est typique des aluminosilicates zéolitiques.

Tableau III 5 Rapport Si/Al de quelque minéraux aluminosilicatés.

Minéral	Si/Al typique
Kaolinite	=1
Halloysite	= 1
Allophane	1 à 2
Analcime	2 à 3
Heulandite	3 à 5
Clinoptilolite	4 à 6
Mordenite	5 à 10

III .4. Résultats des analyses par diffraction X (DRX) :

1) L'échantillon 2

Les Résultats Identification des phases par le logiciel (Highscore plus) a identifié cinq phases minérales principales qui correspondent parfaitement aux pics du spectre expérimental (courbe rouge) :

- Mordenite (Ca-exchanged)
- Faujasite (Ca-exchanged, hydrated)
- Cristoballite \alpha
- Zeolite X (dehydrated, syn)
- Saponite

A)Définition des minéraux identifiés

1. La Mordénite (Mordenite - Ca-exchanged)

C'est un minéral de la famille des zéolites (tectosilicates hydratés). Elle se caractérise par une structure poreuse bidimensionnelle formée de canaux étroits. La mention (Ca-exchanged) signifie que les canaux de sa structure sont principalement occupés par des cations de Calcium (Ca^{2+}). Elle se forme généralement par l'altération hydrothermale de roches volcaniques acides (comme les tufs ou les rhyolites). Elle est très utilisée dans l'industrie comme catalyseur et adsorbant.

2. La Faujasite (Faujasite - Ca-exchanged, hydrated)

Une autre zéolite naturelle très importante, de structure cubique, possédant de grandes cavités. La formule ici indique qu'elle est hydratée et enrichie en Calcium. C'est un minéral rare à l'état naturel mais sa structure est la base des zéolites synthétiques (comme les zéolites X et Y) très utilisées dans le raffinage du pétrole (craquage catalytique).

3. La Cristobalite (Cristobalite \alpha)

C'est une forme (polymorphe) de haute température de la Silice (SiO_2), stable à basse température sous sa forme \alpha (quadratique). Sa présence est un indicateur clé d'une activité volcanique ou d'un processus thermique/diagénétique important. Elle est souvent associée à l'altération des verres volcaniques.

4. Zéolite X (Zeolite X - dehydrated, syn)

C'est la version synthétique (syn) et déshydratée (dehydrated) de la structure faujasite. Elle possède un réseau poreux très développé avec un rapport silicium/aluminium spécifique (Si/Al proche de 1 à 1.5). Elle est largement utilisée pour la séparation des gaz, la purification de l'eau et comme adoucisseur d'eau.

5. La Saponite (Saponite)

Qui un minéral argileux appartenant au groupe des smectites (argiles gonflantes) et plus précisément de la sous-famille des phyllosilicates trioctaédriques magnésiens. La saponite se forme par l'altération de minéraux riches en magnésium (comme les basaltes). Sa présence explique la capacité de gonflement de l'échantillon et sa capacité d'échange cationique élevée (CEC).

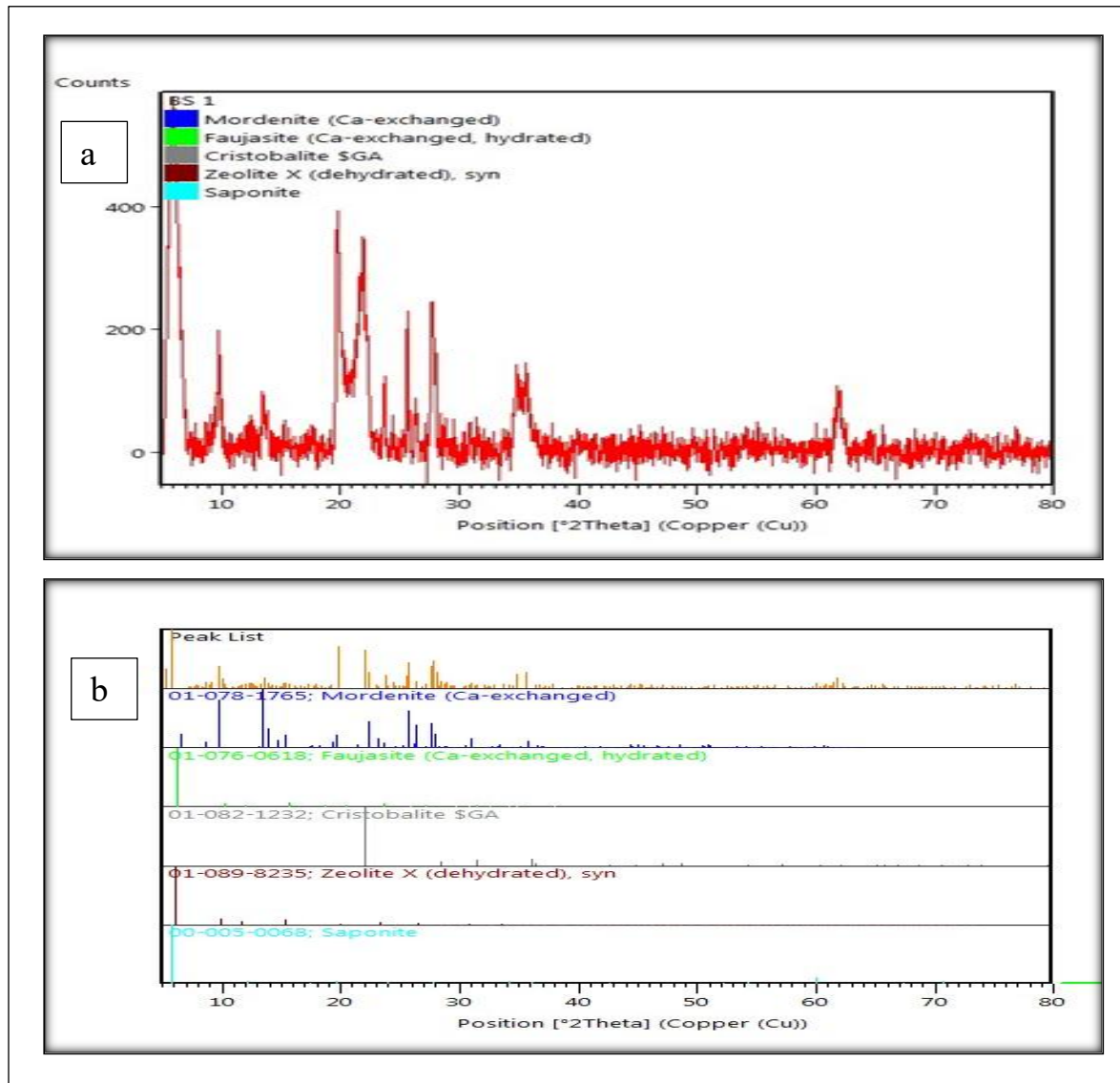


Fig III 04 : **a)** Identification des phases minérales et correspondance des pics DRX **.b)** résultats Diffractogramme des rayons x montrant la composition minéralogique de la fraction fine résultats de l'altertion hydrothermal du secteur de l'étude (échantillon 2).

B) Interprétation

L'analyse par DRX révèle que l'échantillon étudié est un matériau composite de type tuf zéolitisé ou une roche volcanosedimentaire altérée. L'association de zéolites calciques (Mordénite, Faujasite), d'une phase de silice (Cristobalite) et d'une argile smectitique (Saponite) indique un processus d'altération hydrothermale ou diagénétique en milieu alcalin. Ce profil minéralogique confère à l'échantillon d'excellentes propriétés d'adsorption et d'échange ionique."

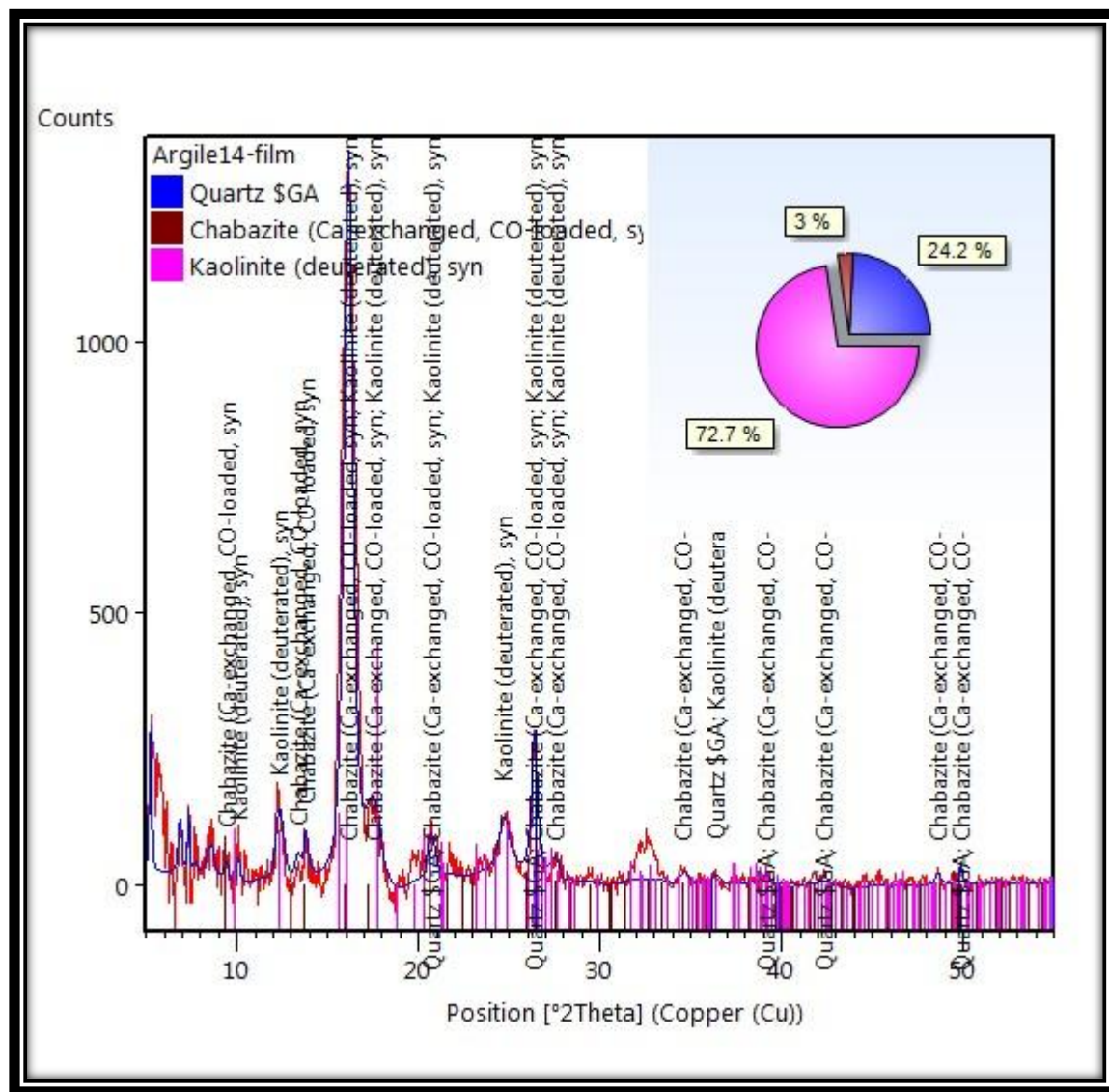


Fig III 05 : résultats Diffractogramme des rayons x montrant la composition minéralogique de la fraction fine résultats de l'altertion hydrothermal du secteur de l'étude (échantillon 2).

2) L'échantillon 14

Les résultats d'identification des phases par le logiciel (HighScore Plus) pour l'échantillon 14 (Argile14-film) montrent une composition minéralogique quantitative constituée de trois phases principales :

A) Définition des minéraux identifiés

Kaolinite (deuterated), syn (72.7%).

Quartz \alpha (24.2%).

Chabazite (Ca-exchanged, CO-loaded), syn (3%).

Définition des minéraux identifiés

1. La Kaolinite (deuterated), syn

C'est un minéral argileux appartenant au groupe des phyllosilicates, plus précisément de la famille des argiles de type 1:1 (constituée d'un feuillet tétraédrique de silice couplé à un feuillet octaédrique d'alumine). La mention « deuterated » indique qu'il s'agit d'une forme deutérée (où les groupes hydroxyle OH ont été substitués par du deutérium OD, souvent utilisée dans les études de caractérisation fine ou de modélisation spectroscopique), et « syn » désigne sa nature synthétique. La kaolinite est un produit typique de l'altération météorique ou hydrothermale poussée des feldspaths sous un climat chaud et humide. Sa dominance (72.7\%) indique le caractère hautement argileux de cette fraction.

2. Le Quartz \alpha

C'est la forme polymorphe stable à basse température de la silice (SiO_2). Le quartz est un tectosilicate extrêmement résistant à l'altération chimique et mécanique. Sa présence dans la fraction fine (24.2\%) représente la phase détritique résiduelle majeure. Il accompagne fréquemment les minéraux argileux dans les sédiments et les produits d'altération.

3. La Chabazite (Ca-exchanged, CO-loaded), syn

C'est un minéral tectosilicate hydraté appartenant au groupe des zéolites naturelles ou synthétiques, caractérisé par une structure tridimensionnelle hautement poreuse avec des cages de grande taille.

La mention « Ca-exchanged » signifie que ses sites d'échange cationique sont saturés par des ions calcium (Ca^{2+}).

La mention « CO-loaded » indique que la structure a été activée ou chargée avec du monoxyde de carbone (CO), ce qui reflète l'utilisation de ce type de matériau dans les applications de capture des gaz ou de catalyse environnementale. Elle est présente ici en faible quantité (3\%).

B) Interprétation (Échantillon 14)

"L'analyse par DRX révèle que l'échantillon étudié est un matériau à forte matrice argileuse, s'apparentant à une argile kaolinique ou s'intégrant dans une série sédimentaire détritique altérée. L'association prédominante d'une argile de type kaolinite, d'une phase de silice résiduelle (Quartz) et d'une faible proportion de zéolite calcique (Chabazite) indique un processus d'altération météorique intense ou hydrothermale acide des roches silicates initiales

(feldspaths). Ce profil minéralogique, dominé par la kaolinite, confère à l'échantillon des propriétés industrielles et technologiques d'intérêt, notamment pour les applications céramiques, réfractaires ou comme support d'adsorption."

Conclusion générale

Conclusion générale

La région de Cap Bougroun et le secteur objet de cette étude est caractérisé par l'affleurement des roches volcaniques intimement liées à l'évolution tectonique et structurale de la région et au socle métamorphique de Cap Bougaroun.

-Ces roches sont de l'obsidienne et de la rhyolite à caractère calco-alcalin. Ces roches ont subi des degrés variables d'altération hydrothermale.

Les résultats des test et analyses géotechniques et minéralogiques montre :

-Les résultats de l'analyse granulométrique on remarque évolution progressive des matériaux vers des fractions de plus en plus fines. Cette tendance est cohérente avec un processus d'altération hydrothermale qui provoque la décomposition des minéraux primaires et la formation de minéraux argileux secondaires.

L'analyse par DRX révèle que l'échantillon étudié est un matériau composite de type tuf zéolitisé ou une roche volcano-sédimentaire altérée.

Les analyses MEB-EDS réalisées sur les poudres montrent une composition dominée par Si, Al et O, associée à la présence de Na, K, Ca et Mg. Le rapport atomique Si/Al d'environ 3,7 est compatible avec celui de certaines zéolites naturelles. Cette composition suggère le développement de phases aluminosilicatées secondaires résultant de l'altération hydrothermale des matériaux volcaniques. La présence simultanée de fer indique également une évolution vers des produits d'altération ferrugineux. Les résultats géochimiques sont cohérents avec les caractéristiques géotechniques observées (fortes limites de liquidité et plasticité modérée à élever), traduisant une transformation progressive de la roche mère volcanique vers des assemblages minéralogiques secondaires.

BIBLIOGRAPHIQUE ANNEXE

Abbassene, F. (2016). Contraintes chronologiques et petro-géochimiques du magmatisme sur l'évolution pré- et post-collisionnelle de la marge algérienne : secteur de la Petite Kabylie.

Thèse de doctorat. USTHB Alger/UBO Brest, 244p

Belmedrek, S. (2001). Granulométrie et minéraux lourds des sables dunaires et de plage des secteurs de l'Oued Zhour et de Béni Bélaid (Jijel, Algérie nord-orientale). Mémoire de Magister, Université Mentouri - Constantine, Algérie, 115 p.

Bolfa, J., 1948. Contribution à l'étude des gîtes métallifères de la Kabylie de Collo et de la région de Bône. Bulletin du service de la carte Géologique de l'Algérie 6, 216p

Bouillin, J.-P., 1977. Géologie Alpine de la petite Kabylie dans les régions de Collo et d'EL-Milia. Thèse, Paris -Toulouse, 511p.

Bouillin, J.-P., 1979. La transversale de Collo et d'El Millia (Petite Kabylie) : une région – clef pour l'interprétation de la tectonique alpine de la chaîne littorale d'Algérie. Mémoire, Société géologique de France, (Nouvelle série), 83 p.

Bouillin, J.-P., 1982. Mise en évidence d'importantes tangentiels au sein du socle de Petite Kabylie (Algérie). Compte Rendus de. L'Académie des Sciences., Paris, II, 294 p.

Durand-Delga, M., 1955. Etude géologique de l'Ouest de la chaîne numidique. (Thèse, Paris). Bulletin du Service de la carte géologique de l'Algérie, (2), Stratigraphie., Descriptions régionales, n° 24, 533 p.

Eberhart, J. P. (1989). Analyse structurale et chimique des matériaux. Dunod.

Folk, R.L. and Ward, W.C. (1957) Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. Journal of Sedimentary Petrology, 27, 3-26.

Fougnot, J., 1990. Le magmatisme miocène du littoral nord constantinois. Thèse de Doctorat INPL Nancy., 358 p

Inman, D. L. (1938). Submarine geology of the region about Los Angeles with special reference to the sediments. (Technical Report).

Inoue, A. (1995). "Formation of clay minerals in hydrothermal environments." Clay Minerals, 30(4), 343-348.

Krumbein, W. C. et Pettijohn, F. J. (1938). Manual of sedimentary petrography. Appleton-Century-Crofts.

- Mahjoub, Y., 1991.** Cinématique des déformations et évolution P, T anté-alpines et alpines en Petite Kabylie (Algérie Orientale). Un modèle d'évolution du domaine tellien interne. Thèse doctorat. Université des Sciences., Université (USTHB), Alger, 193 p.
- Mahjoub, Y., Choukroune, P., Kienast, J.R., 1997.** Kinematics of a complex Alpine segment: superimposed tectonic and metamorphic events in the petite Kabylie massif (northern Algeria). Bulletin de la société géologique de France, 8, pp 649-661.
- Mahjoub, Y., Merle, O., 1990.** Cinématique des déformations tertiaires dans le massif de Petite Kabylie (Algérie Orientale). Bulletin de la société géologique de France, 8 (4), pp 629 -634.
- Mishra, A. K., & Khan, S. U. (2023).** "Influence of Zeolite on the Geotechnical Characteristics of Clayey Soils." (Met en évidence la hausse de w_L et la réduction de l'indice d'activité chimique).
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005).** Fundamentals of soil behavior (Vol. 3).
- Moon, V. G. (1993).** "Geotechnical characteristics of hydrothermally altered volcanic rocks." Engineering Geology, 35(1-2), 67-79. (Un classique pour l'évolution des limites d'Atterberg le long d'un profil d'altération hydrothermale).
- Moon, V. (1993).** Geotechnical characteristics of hydrothermally altered rhyolites. Engineering Geology, 35(1-2), 67-73.
- OTTO, G. H. (1938).** The sedimentation unit and its use in field sampling. The Journal of Geology, 46(4), 569-597.
- Ouabadi, A., 1987.** Etude pétrologique du complexe magmatique du Nord de la Kabylie de Collo. Thèse de Magister, Alger, 169 p.
- Ouabadi, A., Capdevila, R., Fourcade., 1992.** Le granite à biotite et cordiérite du Cap Bougaroun (Algérie). Un analogue alpin des granites de type S de la ceinture de Lachlan (Australie). Compte rendu de l'Académie des sciences, Paris, 314, Série II., 1187-1194.
- Ouabadi, A., 1994.** Pétrologie, géochimie et origine des granitoïdes peralumineux a cordiérite (Cap Bougaroun, Beni Touffout et Filfila), Algérie Nord orientale. Thèse de Doctorat, Université de Rennes, I, France., 257 p.
- Polidori, E. (2007).** "Proposal for a new clay classification diagram based on Atterberg limits." Engineering Geology, 93(1-2), 27-32. (Utile pour expliquer pourquoi certains minéraux dévient de la ligne A).

- Roubault, M., 1934.** La Kabylie de Collo. Etude géologique. Thèse D'état, Paris. Bulletin du service de la carte géologique de l'Algérie, 2, No 10, 272 p.
- Satouh, A. (2007).** Pétrogéochimie et minéralisations des roches magmatiques de la région de Collo (NE- algérien). Mémoire de magister, université Badji Mokhtar-Annaba, 117p.
- Trask, P. D. (1932).** Origin and Environment of Source Sediments of Petroleum. Houston, Texas: Gulf Publishing Company. (pp. 67-76).
- Wyring, L. D., et al. (2021).** From space to the lab: Hydrothermal alteration mapping and geotechnical characterisation.
- Yilmaz, I., & Marschalko, M. (2012).** "A study on the effects of zeolite (clinoptilolite) usage on the engineering properties of expansive soils." Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 71(2), 357-363.