



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

جامعة مولود معمري

FACULTÉ DES SCIENCES BIOLOGIQUES ET DES SCIENCES AGRONOMIQUES DÉPARTEMENT  
DES SCIENCES GÉOLOGIQUES



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

Option : Ressources Minérales, Géomatériaux et Environnements

Par :

AMIR Célia

YAHIAOUI Meriem

Thème

**Potentiel en lithium associé aux pegmatites du socle kabyle  
(région de Tizi-Ouzou, Algérie)**

Soutenu publiquement le 25 juin 2025

Devant le jury compose de :

Mme. DENDANE Malika	MAA	Présidente	UMMTO
Dr. HAMIS Ahmed	MCA	Examineur	UMMTO
Dr. ZEGHOUANE Hocine	MCB	Promoteur	UMMTO
Dr. SEMIANI Abdelkader	Consultant	Invité	D E-SONATRACH
M. MEDAOURI Mourad	Docteur	Invité	D E-SONATRACH

Année universitaire 2024-2025

# Remerciement

الحمد لله الذي يهب العلم لمن يشاء، والذي بفضله وفقني لإتمام هذا العمل.  
وصلى الله على نبينا محمد ﷺ، القدوة الأبدية في الحكمة والاستقامة.

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à notre promoteur, M. ZEGHOUANE Hocine, pour son accompagnement constant, ses conseils précieux et sa disponibilité. Son encadrement rigoureux et bienveillant a été d'un soutien inestimable tout au long de ce travail précieux.

Nous remercions également, M. SEMIANI Kader et M. HAMIS Ahmed, pour leurs remarques constructives, leur rigueur scientifique et leur présence attentive qui ont largement contribué à enrichir ce mémoire par leur expérience.

Nos plus vifs remerciements vont à l'ensemble des membres du jury, pour avoir accepté de juger ce travail, pour le temps consacré à sa lecture et pour leurs observations pertinentes qui ont contribué à notre amélioration personnelle et professionnelle.

Nous tenons à remercier aussi tous les enseignants et enseignantes du département de Géologie, pour la qualité de l'enseignement dispensé tout au long de notre parcours, et pour leur engagement à transmettre leur savoir avec passion et exigence.

Nous désirons également exprimer toute notre reconnaissance à notre famille, en particulier nos parents, pour leur soutien moral, leurs encouragements permanents, leurs sacrifices et leurs prières qui ont été pour nous une source essentielle de motivation.

Enfin, nous remercions nos chères camarades, collègues et amis pour leur présence, leurs conseils, leur entraide et les moments de partage tout au long de ce parcours académique.

À toutes et à tous, nous vous adressons nos sincères remerciements.



وَكَانَ فَضْلُ اللَّهِ عَلَيْكَ عَظِيمًا

## *Dédicaces*

وَآخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنِ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ

Ce mémoire reflète mes connaissances et ma gratitude envers ceux qui ont rendu cette expérience spéciale.

Je dédie ce travail en premier lieu à **moi-même**, pour avoir eu le courage d'aller au bout de mes rêves...

À celui dont je porte son nom avec fierté, à celui qui m'a appris à donner sans jamais rien attendre en retour, je prie Dieu de prolonger ta vie pour que tu puisses voir les fruits mûrs d'un long labeur. **Mon Roi papa.**

À celle que je la préfère à moi-même, à celle qui a tant sacrifié pour moi, à celle qui a le paradis sous ses pieds, celle dont son cœur m'a enlacé avant même ses bras, et qui a adouci mes épreuves par ses prières, **Ma reine Maman.**

À mes frères **Adlan** et **Wassim**, que Dieu m'a offert comme une bénédiction, vous avez été le meilleur des soutiens.

À celle pour qui je demande à Dieu d'éclairer Sa route, où qu'elle soit, Mon âme sœur **Lydia.**

À ceux qui m'ont soutenue avec tendresse et foi, et qui attendaient ce moment pour être fiers de moi, comme je le suis d'eux et de leur présence dans ma vie. **Ma chère famille.**

À mes amies chères, complices de chaque étape, merci pour votre présence, vos sourires et votre amour constant. Katia, Maya.

À mon binôme Sissi, ma partenaire de route, de rires, de fatigue, de doutes et de victoires. Sans toi, ce parcours n'aurait pas eu la même saveur. Merci d'avoir été là, entière, vraie, forte et douce à la fois. Ce mémoire est aussi le fruit de notre complicité, de nos nuits blanches partagées, de nos silences qui en disaient long.

YAHIAOUI Meriem

  
**2025**  
*Graduation*



وَكَانَ فَضْلُ اللَّهِ عَلَيْكَ عَظِيمًا

## *Dedicaces*

وَآخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنِ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ

Je dédie ce travail, fruit d'efforts, de persévérance et de passion, à ceux qui ont illuminé mon chemin de leur amour, leur présence et leur soutien inconditionnel.

À ma tendre mère, pilier de ma vie, dont les sacrifices silencieux, l'amour infini et les prières constantes m'ont porté et protégé à chaque étape de ce parcours. Que Dieu te garde, te comble de paix et de bonheur, en espérant me permette de te rendre un jour une partie de tout ce que tu m'as donné.

À mon père bien-aimé, modèle de droiture, de patience et de courage. Ton appui discret mais puissant a toujours été une force dans l'ombre. Merci pour ta confiance et ton regard fier qui m'a poussé à viser plus haut.

À mes frères et sœurs, ces complices de toujours, avec qui j'ai partagé **rires**, défis et rêves. Vos mots d'encouragement, vos gestes d'amour et votre présence m'ont tant apporté. Que Dieu vous accorde succès, santé et bonheur.

Et à Meriem, ma précieuse binôme, sans qui ce voyage académique n'aurait pas eu la même saveur. Merci pour ta générosité, ta patience, ta persévérance et ton soutien indéfectible. Ce mémoire porte aussi ton empreinte.

**AMIR Célia.**

**2025**  
*Graduation*

## **Résumé**

L'objectif du présent mémoire, est d'évaluer le potentiel en lithium des pegmatites associées au socle kabyle de la région de Tizi Ouzou. Pour atteindre cet objectif, nous avons procédé au dépouillement des données géologiques disponibles qui nous ont permis de dégager quatre sites essentiels renfermant des affleurements de pegmatites ; Azzouza (Larbaâ Nath Irathen), Meklaa, Pont de Bougie, et Aïn Zaouia (Bou Mhani).

La synthèse géologique régionale et la description des sites sélectionnés effectuée sur le terrain a été suivi d'un échantillonnage pour une étude pétrographique et géochimique ; Les lames minces et les analyses à la DRX ont été réalisé au laboratoire du CRD – Sonatrach et les analyses de l'ICP – OES Et XRF au laboratoire de l'ORGM.

Le résultat de l'étude pétrographique montre que les pegmatites échantillonnées sont composées essentiellement de quartz, de plagioclases (Albite) et de feldspaths (orthose et microcline), à texture grossièrement grenue avec une faible proportion en muscovite, biotite et accessoirement la pyrite, la tourmaline, le grenat et les oxydes de fer. Un grain de spodumène a été observé l'Echantillon n° 3.

L'étude géochimique, réalisée à partir des résultats des analyses à l'ICP-OES et XRF confirment les données de la pétrographie. Les résultats de l'ICP-OES montrent une signature géochimique marquée par un enrichissement en LREE par rapport aux HREE. Le rapport LREE / HREE (jusqu'à 3,52 ppm) indique un apport hydrothermal tardif ou une signature mixte LCT–NYF et les teneurs élevées en Nd, Pr, La et Gd, (jusqu'à 2,66 ppm pour le Pr et 2,61 ppm pour le Gd) reflètent un fort degré de différenciation magmatique. L'anomalie négative en Eu est typique des pegmatites différenciées.

Ainsi, les conclusions obtenues à partir de l'étude pétrographique et géochimique des pegmatites du socle kabyle de la région de Tizi Ouzou montrent leur appartenance à un système pegmatitique évolué, enrichi en éléments critiques tels que les métaux rares (Nb, Ta et Y) montrant ainsi un fort potentiel de ces pegmatites. Ce qui met en lumière leur intérêt économique ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour leur exploration et leur valorisation future.

**Mots clefs** ; socle kabyle, pegmatite, lithium, pétrographie, géochimie ; potentiel, Métaux rares

## **Abstract**

The objective of this study is to evaluate the lithium potential of pegmatites associated with the Kabyle basement of the Tizi Ouzou region. To achieve this objective, the analysis of available geological data made it possible to select four key sites containing pegmatite outcrops: Azzouza, Larbaâ Nath Irathen, Mekla, Pont de Bougie, Bou Mahani, and Aïn Zaouia.

The regional geological synthesis and field description of the selected areas allowed for sampling for a petrographical and geochemical study; thin sections, DRX and XRF analyses were carried out at the CRD-Sonatrach laboratory, and ICP-OES analyses at the ORGM laboratory.

The petrographic study shows that the sampled pegmatites are composed essentially by quartz, plagioclase (Albite), feldspar (orthoclase and microcline) with a coarse-grained texture, and a small proportion of muscovite, biotite, and accessory pyrite, tourmaline, garnet, and iron oxide. A grain of spodumene has been observed in Sample No. 2.

The geochemical study, based on the ICP-OES, XRF, and DRX analysis results, confirms the petrographic conclusions. The ICP-OES results show a geochemical signature marked by an enrichment of LREE relative to HREE. The LREE/HREE ratio (up to 3.52 ppm) indicates a late hydrothermal input or a mixed LCT–NYF signature and the high Nd, Pr, La) and Gd contents (up to 2.66 ppm for Pr and 2.61 ppm for Gd) reflect a high degree of magmatic differentiation. The Eu negative anomaly is typical of differentiated pegmatites.

The conclusions obtained from petrographical and geochemical study of the pegmatites of the Kabyle basement of the Tizi Ouzou region show their belonging to an evolved pegmatitic system, enriched in critical elements such as rare metals, confirming the strong potential of these pegmatites highlighting their economic interest, and opening new perspectives for their future exploration and development.

**Keywords:** Kabyle basement, pegmatite, lithium, petrography, geochemistry; potential, rare metals

## Table de matière :

1 Introduction Général.....	1
2 L'objectif de travail : .....	2
3 La méthodologie : .....	2

### **Chapitre 01 . Généralités**

4 Définition du lithium : .....	3
5 Propriétés du lithium : .....	3
5.1 Propriétés physiques : .....	3
5.2 Propriétés chimiques : .....	4
2.3 Propriétés minéralogiques : .....	4
6 Abondance de lithium dans la croûte terrestre : .....	4
6.1 Dans La croûte continentale : .....	4
6.2 Dans la croûte océanique : .....	4
7 Comparaison de lithium avec d'autre alcalin légers : .....	5
8 Utilisations de lithium dans l'industrie moderne : .....	5
8.1 Les batteries lithium-ion, .....	5
8.2 Céramiques et verres spéciaux : .....	6
8.3 Lubrifiants et graisses : .....	6
9 Sources naturelles du lithium : .....	7
10 Ressources et production mondiales de lithium : .....	8

### **Chapitre 02 . Géologie régional**

1 Introduction : .....	10
2 Historique des travaux géologiques : .....	11
3 Géologie régionale : .....	12
3.1 Le socle kabyle et sa couverture paléozoïque : .....	13
3.2 La dorsale kabyle : .....	14
3.2.1 Le Carbonifère : .....	15
3.2.2 Permo-Trias et Trias .....	15
3.2.3 Le Lias (Jurassique inférieur à moyen) .....	15
3.2.4 Le Crétacé : .....	15
3.2.5 Le Lutétien (Éocène moyen) : .....	16
3.2.6 L'Oligocène : .....	16

3.3	L'Oligo-Miocène Kabyle : .....	16
3.4	Les nappes de flysch : .....	17
3.5	Le Miocène post-nappe : .....	18
3.6	Le Quaternaire : .....	18

### **Chapitre 03 , géologie et pétrographie des sites étudiés**

1	Introduction.....	19
2	Description géologique des stations étudiées .....	20
2.1	La pegmatite d'Azzouza (Larbaa Nath Irathen) : .....	20
2.1.1	Situation géographique : .....	20
2.1.2	Contexte géologique : .....	21
2.1.3	Etude pétrographique : .....	24
2.1.3.1	Etude macroscopique : .....	24
2.1.3.2	Etude microscopique : .....	25
2.2	La pegmatite de Meklaa : .....	27
2.2.1	Situation géographique : .....	27
2.2.2	Contexte géologique .....	28
2.2.3	Etude pétrographique : .....	29
2.2.3.1	Etude macroscopique : .....	29
2.2.3.2	Etude microscopique : .....	30
2.3	La pegmatite de pont de bougie : .....	37
2.3.1	Situation géographique .....	37
2.3.2	Contexte géologique .....	38
2.3.3	Etude pétrographique.....	38
2.3.3.1	Description macroscopique .....	38
2.3.3.2	Etude microscopique : .....	41
2.4	La pegmatite de Ain Zaouia : .....	44
2.4.1	Situation géographique : .....	44
2.4.2	Contexte géologique : .....	45
2.4.3	Etude pétrographique.....	46
2.4.3.1	Étude macroscopique : .....	46
2.4.3.2	Etude microscopique : .....	47
	Conclusion : .....	49

## Liste des abréviations utilisées

<i>Abréviation</i>	<i>Signification / Nom complet</i>
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CRD	Centre de Recherche et Développement
ENDMC	École Nationale des Mines et de la Métallurgie de Annaba
ENRP	Entreprise Nationale de Recherche Pétrolière
ORGM	Office de Recherche Géologique et Minière
URGE	Unité de Recherche en Géologie de l'Engineering
USGS	United States Geological Survey
Qz	Quartz
Pl	Plagioclase
Orth	Orthose
Mcc	Microcline
Musc	Muscovite
Sp	Spodumène
Bt	Biotite
LPA	Lumière Polarisée Analysée
LPNA	Lumière Polarisée Non Analysée
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry
DRX	Diffraction des Rayons X
NW – SE	Nord-Ouest – Sud-Est
NNE – SSW	Nord-Nord-Est – Sud-Sud-Ouest
M	Mètre
Cm	Centimètre
g/cm <sup>3</sup>	Gramme par centimètre cube
W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	Watt par mètre-kelvin
S/m	Siemens par mètre
%	Pourcentage
Ppm	Parties par million
°C	Degré Celsius
u	Unité de masse atomique unifiée
n°	Numéro

# Liste des figures

- Figure 1** : Caractéristiques du lithium
- Figure 2** : Échantillon de lithium montrant sa légèreté
- Figure 3** : Usages mondiaux du lithium en 2008 et 2018 (Source : BRGM, d'après Roskill)
- Figure 4** : Pegmatite à lépidolite dans une ancienne galerie de mine de lithium du Limousin
- Figure 5** : Grands cristaux de pétalite dans une pegmatite du Limousin
- Figure 6** : Vue sur la paroi sud-est de la mine à ciel ouvert Cornwall Pit, Greenbushes
- Figure 7** : l'origine géologique des principales sources économiques de Li mondiales en 2019
- Figure 8** : Principaux pays producteurs de lithium dans le monde de 2010 à 2023 (en tonnes)
- Figure 9** : Principaux éléments structuraux du Nord de l'Algérie (R. Bracene, 2002)
- Figure 10** : Cadre géologique de la partie nord de l'Algérie (modifié d'après Domzig et al., 2006)
- Figure 11** : Colonne synthétique des ensembles tectométamorphiques du socle kabyle (Gani, 1988)
- Figure 12** : Colonne stratigraphique de l'Oligo-miocène kabyle (in Lounis, 2005)
- Figure 13** : Position des nappes de flysch par rapport aux unités de la chaîne maghrébine (d'après Boulin, 1986)
- Figure 14** : Colonne stratigraphique synthétique du Néogène post-nappes de Tizi-Ouzou (Aït, 1994)
- Figure 15** : Situation géographique de la wilaya de Tizi-Ouzou
- Figure 16** : Localisation géographique de l'affleurement d'Azouza (Larbaâ Nath Irathen)
- Figure 17** : Les deux niveaux d'affleurements
- Figure 18** : Trace visible d'une faille décrochante dans l'affleurement de pegmatite
- Figure 19** : Structure ptygmatisée en contexte métamorphique
- Figure 20** : Cristallisation des minéraux essentiels et accessoires associés à la pegmatite
- Figure 21** : Vue macroscopique de l'échantillon 02 de pegmatite
- Figure 22** : Vue macroscopique d'une muscovite de l'échantillon 02
- Figure 23** : Quartz en LPA et LPNA à faible grossissement – E2
- Figure 24** : Plagioclase en LPA et LPNA à faible grossissement – E2
- Figure 25** : Orthose en LPA et LPNA à faible grossissement – E2
- Figure 26** : Microcline en LPA et LPNA à faible grossissement – E2
- Figure 27** : Localisation géographique des affleurements de Meklaa
- Figure 28** : Affleurements pegmatitiques de Meklaa (Kabylie)
- Figure 29** : Miroir de faille observé sur l'affleurement de Meklaa
- Figure 30** : Vues macroscopiques des échantillons prélevés (3) et (4) – Meklaa
- Figure 31** : Quartz en LPA et LPNA à faible grossissement – E3
- Figure 32** : Microcline en LPA et LPNA à faible grossissement – E3
- Figure 33** : Plagioclase en LPA et LPNA à faible grossissement – E3
- Figure 34** : Muscovite en LPA et LPNA à faible grossissement – E3

- Figure 35** : Biotite en LPA et LPNA à faible grossissement – E3
- Figure 36** : Spodumène en LPA et LPNA à faible grossissement – E3
- Figure 37** : Grenat en LPA et LPNA à faible grossissement – E3
- Figure 38** : Pyrite en LPA et LPNA à faible grossissement – E3
- Figure 39** : Microcline en LPA et LPNA à faible grossissement – E4
- Figure 40** : Quartz en LPA et LPNA à faible grossissement – E4
- Figure 41** : Plagioclase en LPA et LPNA à faible grossissement – E4
- Figure 42** : Muscovite en LPA et LPNA à faible grossissement – E4
- Figure 43** : Orthose en LPA et LPNA à faible grossissement – E4
- Figure 44** : Localisation géographique des affleurements de Pont de Bougie
- Figure 45** : Pegmatite de premier ordre (syn-plissement)
- Figure 46** : Filon de pegmatite de second ordre (post-plissement)
- Figure 47** : Cristallisation macroscopique des minéraux de l’affleurement de Pont de Bougie
- Figure 48** : Quartz en LPA et LPNA à faible grossissement – E6
- Figure 49** : Orthose en LPA et LPNA à faible grossissement – E6
- Figure 50** : Microcline en LPA et LPNA à faible grossissement – E6
- Figure 51** : Muscovite en LPA et LPNA à faible grossissement – E6
- Figure 52** : Plagioclase en LPA et LPNA à faible grossissement – E6
- Figure 53** : Schiste satiné en LPA et LPNA à faible grossissement – E6
- Figure 54** : Localisation géographique de la pegmatite d’Aïn Zaouia (Boumhani)
- Figure 55** : Affleurement pegmatitique de la région de Boumhani
- Figure 56** : Photo macroscopique d’un échantillon de pegmatite – Boumhani
- Figure 57** : Quartz en LPA et LPNA à faible grossissement – E8
- Figure 58** : Microcline en LPA et LPNA à faible grossissement – E8
- Figure 59** : Orthose en LPA et LPNA à faible grossissement – E8
- Figure 60** : Muscovite en LPA et LPNA à faible grossissement – E8
- Figure 61** : Diagramme DRX de l’échantillon (Zh-Juin25)
- Figure 62** : Diagramme DRX de l’échantillon 2 (Juin25)
- Figure 63** : Diagramme DRX de l’échantillon 3 (Juin25)
- Figure 64** : Diagramme DRX de l’échantillon 4 (Juin25)

---

## Liste de Tableau

**Tableau 01** : Abondance du lithium dans l’Univers et dans la croûte terrestre – Comparaison avec les autres alcalins légers

**Tableau 02** : Résultats des analyses XRF – Teneurs en oxydes majeurs (%) des échantillons pegmatitiques.

**Tableau03** : Résultat d’analyse ICP-OES Teneur en PPM et %

# *Chapitre 01 :*

---

## *Généralités*

## Chapitre 01 : Généralités

### 1. Introduction

Le lithium (Li) est un élément stratégique qui joue un rôle essentiel dans l'industrie moderne, en particulier dans la fabrication des batteries rechargeables, l'électronique, les technologies liées aux énergies renouvelables et l'industrie des céramiques. Sa légèreté et sa réactivité en font un composant privilégié des batteries lithium-ion, qui alimentent une large gamme de dispositifs tels que les smartphones, les véhicules électriques et les systèmes de stockage d'énergie. La demande croissante pour ce métal est principalement portée par la transition énergétique mondiale, qui vise à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et à limiter les émissions de gaz à effet de serre.

Cet or blanc a été découvert en 1817 par le chimiste suédois Johan August ARFWEDSON, qui a été d'abord identifié sous forme de sel dans la pétalite avant d'être isolé par William Thomas Brande et Humphry Davy grâce à l'électrolyse. Son nom, dérivé du grec lithos (« pierre »), reflète son origine minérale. Initialement une curiosité scientifique, il est devenu un élément clé dans de nombreux domaines, notamment les technologies modernes, l'industrie et la médecine.

Géologiquement, le lithium est principalement présent dans trois types de gisements : les saumures de salars, les Argiles et les Calcaires, et enfin les roches magmatiques, notamment les pegmatites granitiques. Ces dernières, issues des phases ultimes de cristallisation du magma, contiennent des minéraux riches en lithium tels que le *spodumène* et le *lépidolite*.

Les principales réserves mondiales sont détenues par les principaux pays suivants : l'Amérique du Sud (triangle du lithium : Chili, Argentine, Bolivie), l'Australie et la Chine, bien que d'autres régions, comme l'Afrique du Nord, présentent un potentiel non négligeable.

Dans ce contexte, la région de Tizi Ouzou, située dans les massifs de grande Kabylie en Algérie, présente des affleurements de pegmatites qui n'ont pas encore été étudiés en détail pour leur potentiel en lithium. Une étude approfondie de ces formations pourrait révéler des ressources précieuses, contribuant ainsi à la valorisation des ressources minérales locales et au développement économique de la région, et permet par la même de mieux comprendre les processus géologiques responsables de la concentration du lithium dans ce type de roches et d'identifier des zones potentielles.

## Chapitre 01 : Généralités

### **2. Objectif du travail**

L'objectif principal de cette recherche est d'évaluer le potentiel minéral en lithium des formations pegmatitiques de la région de Tizi Ouzou, Bien que cette région présente des affleurements de pegmatites clairement observables et assez abondantes sur le terrain, ces formations n'ont pas encore fait l'objet d'études scientifiques approfondies quant à leur richesse en ce métal stratégique, et leur potentiel reste également méconnu ; d'où la problématique scientifique de ce travail qui repose sur l'identification, la caractérisation et l'évaluation de la concentration éventuelle en cet or blanc, à travers une approche pluridisciplinaire. Il s'agit donc :

- ✓ D'identifier les formations pegmatitiques et leurs caractéristiques structural et minéralogique qui sont bien visible sur le terrain
- ✓ De caractériser les minéraux présents, en particulier ceux susceptibles de contenir du lithium
- ✓ D'évaluer, sur la base d'analyses comparatives et quantitatives, le potentiel économique de ces pegmatites dans un contexte de demande mondiale croissante en lithium

Ce travail d'inscrit donc dans une démarche de valorisation des ressources naturelles nationales, et vise à ouvrir de nouvelles perspectives d'exploration et d'exploitation durable dans une région à fort potentiel géologique.

### **3. Méthodologie**

Cette démarche a combiné plusieurs volets méthodologiques complémentaires :

- Une analyse documentaire approfondie sur la géologie des pegmatites et la distribution mondiale du lithium.
- Une description géologique de terrain appuyée par l'imagerie satellitaire et les données topographiques.
- Des prélèvements d'échantillons sur les stations décrites suivis d'analyses en laboratoire, incluant des observations pétrographiques, des analyses par l'ICP-MS et DRX.
- Et enfin, une évaluation comparative des résultats obtenus avec ceux de gisements de lithium déjà exploités à l'échelle internationale, afin d'estimer le potentiel économique local.

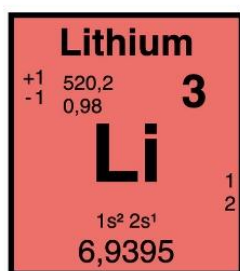
### 4. Définition du lithium

Le lithium est un élément chimique de symbole **Li** et de numéro atomique 3, appartenant à la famille des métaux alcalins (groupe 1 du tableau périodique). Il est le métal le plus léger des métaux et des éléments solides. Sa réactivité élevée est due à l'électron unique qu'il possède sur sa couche externe, notamment avec l'eau et l'air. Il n'existe pas à l'état libre dans la nature et est généralement stocké sous atmosphère inerte ou dans des huiles minérales pour éviter son oxydation. L'examen des caractéristiques physiques, chimiques, thermodynamiques, et électroniques du lithium sous différents angles permet de mieux comprendre son importance technologique dans le monde.

### 5. Propriétés du lithium

#### 5.1. Propriétés physiques :

Le lithium est l'élément métallique le plus léger (*Fig.1*), avec une masse atomique de 6,94 u et une densité de 0,534 g/cm<sup>3</sup> à 20 °C, ce qui lui permet de flotter sur l'eau. Il présente une couleur argentée et une texture douce, avec une dureté de 0,6 sur l'échelle de MOHS, ce qui le rend facilement découplable au couteau. Son point de fusion est relativement bas, à 180,5 °C, tandis que son point d'ébullition atteint environ 1 342 °C. Le lithium est également un bon conducteur thermique et électrique, avec une conductivité thermique de 84,7 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup> et une conductivité électrique de 1,08 × 10<sup>7</sup> S/m. Il cristallise dans une structure cubique centrée (*Fig.2*), ce qui influence ses propriétés mécaniques. Ces caractéristiques, en particulier sa légèreté et sa conductivité, font du lithium un élément stratégique pour les applications technologiques.



*Fig. 1. Caractéristiques de lithium*



*Fig. 2. Échantillon d'un lithium montre sa légèreté*

## Chapitre 01 : Généralités

### **5.2. Propriétés chimiques :**

Le lithium est un métal alcalin très réactif. Il réagit rapidement avec l'eau en produisant de l'hydroxyde de lithium (LiOH) et du dihydrogène (H<sub>2</sub>), en dégageant de la chaleur. À l'air, il s'oxyde spontanément en formant de l'oxyde de lithium (Li<sub>2</sub>O), et il peut aussi réagir avec l'azote pour donner du nitrure de lithium (Li<sub>3</sub>N). Il forme surtout des composés ioniques à l'état +1, comme les halogénures (LiCl, LiF) et les carbonates (Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), avec parfois un caractère covalent à cause de la petite taille de l'ion Li<sup>+</sup>. En chimie organique, il est utilisé sous forme d'organolithiens (R-Li), très réactifs.

### **5.3. Propriétés minéralogiques :**

Le lithium ne se trouve pas à l'état natif, mais sous forme de minéraux présents dans certaines roches magmatiques, notamment les pegmatites granitiques. Les principaux minéraux porteurs sont le *spodumène*, le *lépidolite* et la *pétalite*, cristallisant dans les systèmes monoclinique ou triclinique, avec une dureté de 2,5 à 7 sur l'échelle de MOHS. Le spodumène constitue la principale source de lithium, tandis que la lépidolite, riche aussi en rubidium et en césium, en est une source secondaire. La *pétalite* et l'*amblygonite*, bien que moins fréquentes, contiennent également des teneurs notables en lithium.

## **6. Abondance du lithium dans la croûte terrestre :**

### **6.1. Dans La croûte continentale :**

Le lithium est présent dans la croûte continentale avec une abondance moyenne d'environ 30 ppm, variant entre 20 et 65 ppm selon les roches. Les roches felsiques, comme les granites et surtout les pegmatites granitiques, peuvent atteindre ou dépasser 100 ppm grâce à l'enrichissement en éléments incompatibles lors de la cristallisation magmatique. En revanche, les roches mafiques contiennent généralement moins de 10 ppm de lithium. Les principaux minéraux porteurs dans cette croûte sont le *spodumène*, le *lépidolite* et la *pétalite*.

### **6.2. Dans la croûte océanique**

La croûte océanique, composée surtout de basaltes et de gabbros, contient en moyenne environ 6 ppm de lithium, soit bien moins que la croûte continentale. Cette faible teneur s'explique par la composition chimique des roches mafiques, pauvres en éléments lithophiles comme le lithium. Les échanges hydrothermaux avec l'eau de mer au niveau des dorsales peuvent modifier localement ces teneurs, mais sans enrichissement notable. Ainsi, la croûte océanique n'est pas considérée comme une source rentable pour l'extraction du lithium.

## Chapitre 01 : Généralités

### 7. Comparaison de lithium avec d'autres éléments alcalins légers :

Sur le plan géologique, le lithium se distingue du sodium (Na) et du potassium (K) par sa rareté, ses conditions de concentration et ses types de gisements. Alors que le sodium et le potassium sont très abondants dans la croûte terrestre (environ 23 000 ppm pour Na et 20 000 ppm pour K), le lithium est beaucoup plus rare, avec une moyenne d'environ 30 ppm. Cela s'explique par son comportement incompatible dans les magmas : il ne s'incorpore pas facilement dans les minéraux majeurs et se concentre plutôt dans les phases résiduelles riches en silice, comme les pegmatites granitiques.

En revanche, le sodium et le potassium sont largement présents dans les feldspaths (*albite* pour Na, *orthose* pour K), et aussi dans les évaporites comme l'*halite* (NaCl) et la *sylvite* (KCl), souvent exploitées industriellement. Le lithium, lui, ne forme pas d'évaporites massives mais peut s'accumuler dans certaines saumures continentales fermées (comme celles d'UYUNI ou d'ATACAMA), où l'évaporation intense permet sa concentration (*Tableau 1*).

Élément	Abondance atomique cosmique Normalisé à Si = $10^6$ atomes	Abondance atomique dans la croûte terrestre Normalisé à Si = $10^6$ atomes	Teneur massique dans la croûte (ppm)
Silicium (Si)	$10^6$	$10^6$	$\approx 280\ 000$
Lithium (Li)	$10^2$	$10^3$	$\approx 20$
Sodium (Na)	$3 \cdot 10^4$	$10^5$	$\approx 23\ 000$
Potassium (K)	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^4$	$\approx 20\ 000$

*Tableau 1. Abondance du lithium dans l'Univers et dans la croûte terrestre  
Comparaison avec les autres alcalins légers*

### 8. Utilisations de lithium dans l'industrie moderne :

#### 8.1. Les batteries lithium-ion,

Les batteries lithium-ion sont la principale utilisation du lithium dans l'industrie. On les rencontre dans les téléphones portables, ordinateurs, voitures électriques et systèmes de stockage d'énergie. Elles sont légères, durables et permettent de stocker beaucoup d'énergie, grâce au mouvement du lithium entre l'anode et la cathode pendant la charge et la décharge.

## Chapitre 01 : Généralités

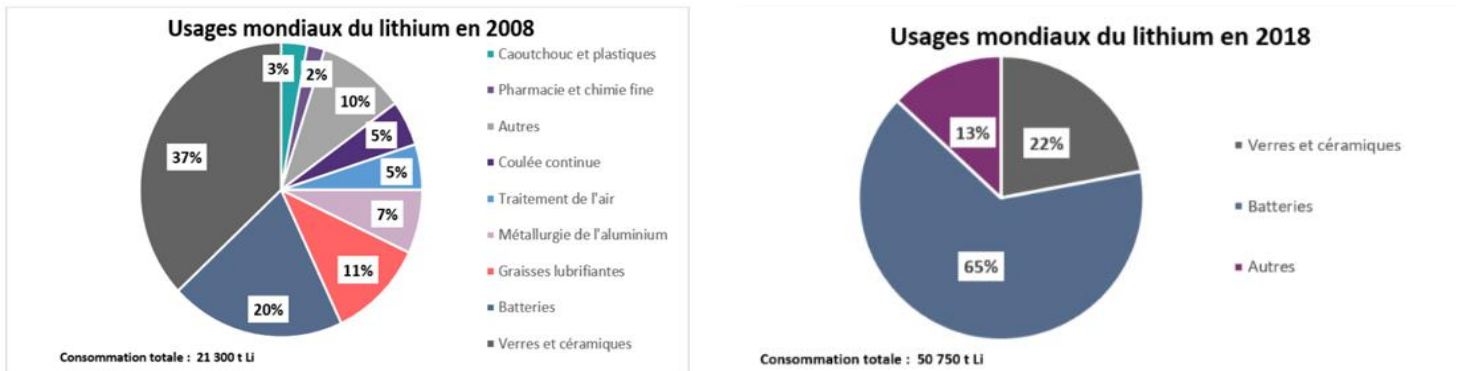
### 8.2.Céramiques et verres spéciaux

Le lithium, présent sous forme de carbonate ou de spodumène, est également utilisé en céramique et dans l'industrie du verre et ce, pour abaisser le point de fusion, améliorer la résistance thermique et réduire la dilatation. Il augmente aussi la brillance et la qualité des émaux, notamment dans les verres techniques et vitrocéramiques.

### 8.3.Lubrifiants et graisses :

Le lithium est aussi utilisé dans la fabrication de graisses lubrifiantes de haute performance, adaptées aux moteurs industriels, aux véhicules et aux avions. Ces graisses résistent à des températures élevées et réduisent l'usure, assurant le bon fonctionnement des machines dans des conditions extrêmes.

En plus de ses usages principaux, le lithium est également utilisé comme catalyseur dans la fabrication de caoutchoucs synthétiques. Il sert aussi à capter le CO<sub>2</sub> dans les sous-marins et stations spatiales. On le retrouve dans les piles non rechargeables pour équipements médicaux ou militaires. Enfin, il est utilisé dans les verres conducteurs pour écrans et panneaux solaires.



**Fig3. Source : BRGM, d'après ROSKILL : Usages mondiaux de lithium en 2008 et en 2018**

## 9. Sources naturelles du lithium

Le lithium n'existe pas à l'état pur dans la nature, mais se trouve dans des formations géologiques comme les saumures, les pegmatites, et dans une moindre mesure, les carbonates et les argiles.

Parmi ces formations géologiques, les deux principales sources d'extraction de Lithium sont les *saumures enrichies* (~70 % de la production mondiale) et les *pegmatites* (~30 %), selon la nature du gisement et les technologies disponibles où ce métal stratégique se retrouve dans plus de 145 minéraux (Talens Peiró, Villalba & Ayres, 2013).

Les gisements pegmatitiques se forment à la fin de la cristallisation de magmas granitiques, où les éléments incompatibles comme Li, Cs, Ta et Be s'accumulent dans des fluides riches en volatils (H<sub>2</sub>O, F, B). Ces fluides forment des pegmatites granitiques, souvent en veines ou corps lenticulaires, avec des cristaux de grande taille (**Fig.4 et 5**). Le lithium y cristallise dans des minéraux spécifiques tels que :

- ✓ Spodumène (~8 % Li<sub>2</sub>O),
- ✓ Pétalite (~4,8 % Li<sub>2</sub>O),
- ✓ Lépidoïite (3–4 % Li<sub>2</sub>O),
- ✓ Amblygonite/Montebrasite (7,5–9 % Li<sub>2</sub>O).



Source - © 2019 Pierre Thomas

**Fig4. Pegmatite à lépidolite dans une ancienne galerie de mine de lithium du Limousin**



Source - © 2019 Pierre Thomas

**Fig5. Grands cristaux de pétalite dans une pegmatite du Limousin**

### Exemples : GREENBUSHES (Australie) :

Le gisement de GREENBUSHES (Australie-Occidentale) est le plus grand gisement mondial de lithium issu de pegmatite (**Fig.6**). Il s'agit d'une pegmatite fortement zonée de type

## Chapitre 01 : Généralités

albite–spodumène, subverticale, qui peut atteindre jusqu'à 300 m d'épaisseur et se loge dans des gneiss et schistes amphiboliques du Complexe de BALINGUP (Précambrien). Les concentrations en spodumène peuvent atteindre 50 %, avec des teneurs en  $\text{Li}_2\text{O}$  allant jusqu'à ~5 % in situ ( $\approx 1,2$  % Li métal). Une teneur moyenne autour de 2 %  $\text{Li}_2\text{O}$  est typique de la ressource. Les réserves sont estimées à environ 6,8 Mt  $\text{Li}_2\text{O}$  équivalent lithium ( $\approx 6,8$  millions de tonnes d'équivalent lithium).



Source - © 2016 *InvestorIntel*

*Fig6. Vue sur la paroi Sud-Est de la mine à ciel ouvert Cornwall Pit, Greenbushes*

### **10.Ressources et production mondiales de lithium**

En 2010, les ressources mondiales en lithium étaient estimées à 38 millions de tonnes selon l'USGS. Toutefois, avec l'essor des batteries lithium-ion, ces estimations ont été fortement réévaluées. Entre 2005 et 2024, les chiffres ont été multipliés par cinq, atteignant 116 millions de tonnes en 2024.

Les réserves les plus importantes se trouvent en Amérique latine, principalement dans des lacs salés d'altitude appelés "salars". La Bolivie détient environ 23 millions de tonnes, l'Argentine 19,3 millions et le Chili 9,6 millions. Aux États-Unis, les ressources sont estimées à 7,9 millions de tonnes.

En Afrique, plusieurs pays possèdent également des gisements notables : la République démocratique du Congo (3 millions de tonnes), le Mali (700 000 tonnes) et le Zimbabwe (500 000 tonnes). L'Europe n'est pas en reste, avec des réserves localisées en Allemagne (2,7



*Chapitre 02 :*

---

*Géologie Régionale*

## Chapitre 02 : Géologie Régionale

### 1. Introduction

L'exploration du potentiel en lithium dans les formations pegmatitiques nécessite une compréhension approfondie du contexte géologique dans lequel ces corps se développent. C'est dans cette optique que ce chapitre s'attache, dans un premier temps, à présenter la géologie régionale du socle kabyle, qui constitue le substratum métamorphique des affleurements pegmatitiques étudiés. Ce socle, hérité d'une histoire tectono-métamorphique complexe, est marqué par la présence de gneiss, d'orthogneiss, de schistes et de granitoïdes, qui témoignent d'une évolution polyphasée allant de l'ère précambrienne jusqu'à l'orogénèse alpine.

L'étude s'est recentrée ensuite sur la géologie locale des quatre secteurs clés situés dans la région de Tizi Ouzou qui sont :

- *Azouza (Larbaâ Nath Irathen),*
- *Mekla,*
- *Pont de Bougie et*
- *Aïn Zaouia (Boumhani).*

Ces zones ont été choisies en raison de la présence des affleurements pegmatitiques, permettant de meilleures observations de terrain et aussi un bon prélèvement d'échantillons représentatifs. Une description détaillée de la situation géographique et du contexte géologique propre de chaque localité a été réalisée, suivie d'une analyse macroscopique des pegmatites sur le terrain.

Par la suite, une étude pétrographique a été menée sur les échantillons jugés les plus frais possibles et les représentatifs, afin de caractériser la minéralogie et la texture de ces roches à l'échelle microscopique. Cette approche permet non seulement de confirmer la nature leucocrate des pegmatites analysées, mais également de mettre en évidence la présence de minéraux d'intérêt économique, tels que le spodumène, porteur de lithium.

Ce chapitre constitue ainsi une étape fondamentale dans la démarche d'évaluation du potentiel en lithium de la région, en posant les bases géologiques et pétrographiques nécessaires à l'interprétation ultérieure des résultats géochimiques et minéralogiques.

## Chapitre 02 : Géologie Régionale

### **2. Historique des travaux géologiques :**

Les premières études géologiques du socle de la Grande Kabylie remontent au XIXe siècle avec les travaux d'APERON (1867) et de Ville (1868), suivis par FICHEUR (1890) qui décrit en détail les terrains métamorphiques et sédimentaires du Djurdjura. Ces recherches ont mis en évidence la complexité structurale de la région, marquée par la superposition d'unités alpines, précambriennes, paléozoïques et tertiaires. Au XXe siècle, MURATOUR (1958) analyse la stratigraphie de la Basse Kabylie et GELARD (1979) étudie la structuration des zones internes de l'arc tellien. Parallèlement, des institutions nationales comme l'EREM, l'ORGM et l'UREG (affiliée à l'ENDMC) mènent des prospections révélant un potentiel minier notable, incluant des gisements de plomb, zinc, cuivre, fer, lithium (dans des pegmatites granitiques), ainsi que du manganèse, de l'antimoine et de l'or dans des veines hydrothermales liées à des zones de cisaillement. Ces résultats confirment l'importance stratégique de la Kabylie pour la recherche et l'exploitation minière.

Dans les Aurès, G. BOSSIERE a mené des recherches approfondies sur les pegmatites granitiques, mettant en évidence leur richesse en minéraux rares et leur intérêt économique. Ces travaux ont permis d'établir des comparaisons intéressantes avec les pegmatites du socle kabyle, notamment en ce qui concerne la genèse des minéralisations en lithium et en métaux associés dans un contexte tectonique ancien.

Plus récemment, les recherches menées par M. SAADALLAH et son équipe, composée notamment de LOUNI, GANI et BELKAID, ont apporté une contribution significative à la compréhension du socle kabyle. En combinant des approches cartographiques, pétrographiques et géochimiques, ces auteurs ont mis en évidence la diversité lithologique des formations, la structuration métamorphique et magmatique, ainsi que les caractéristiques des pegmatites à spodumène à potentiel lithinifère. Leurs travaux constituent une base de référence actuelle pour l'étude et la valorisation des ressources minérales dans cette région.

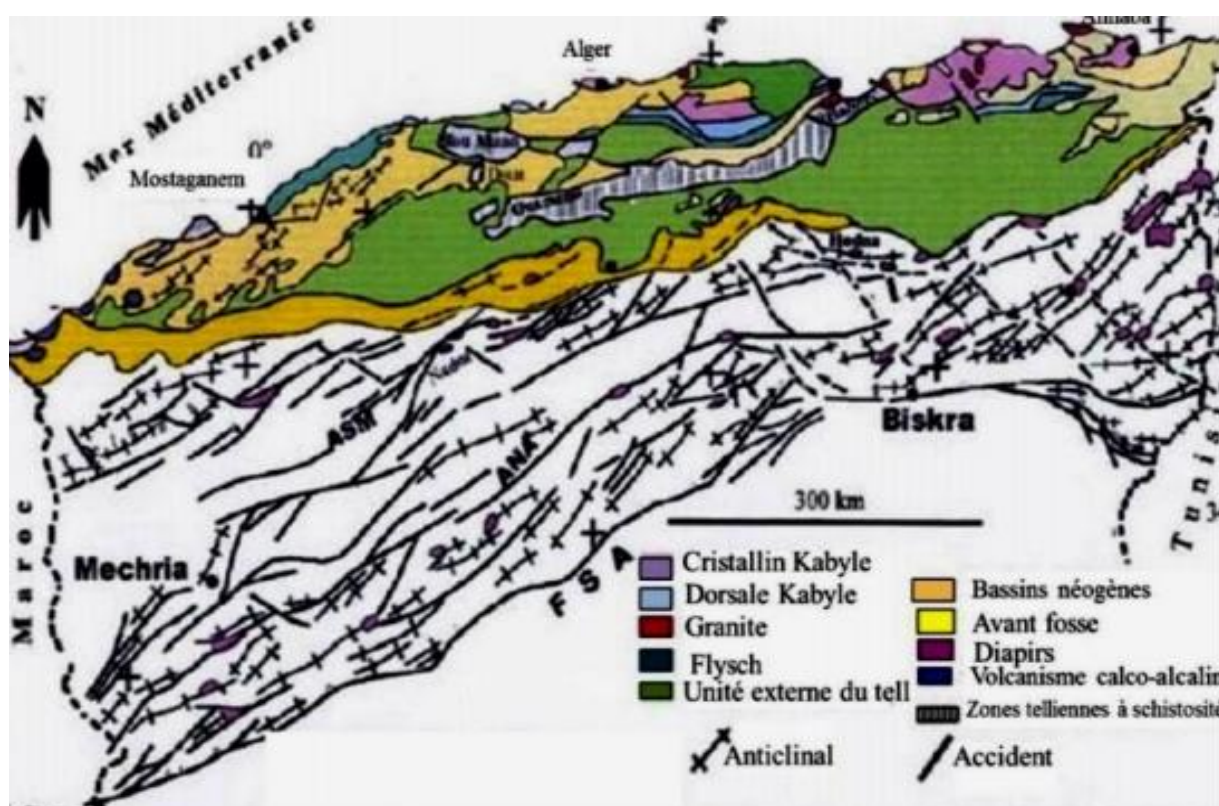
## Chapitre 02 : Géologie Régionale

### 3. Géologie régionale

La région de Tizi-Ouzou fait partie de la chaîne alpine périméditerranéenne, qui fait partie de la chaîne littorale d'Afrique du Nord. Cette zone géographique est encadrée par des plaines littorales à l'Ouest et à l'Est, et se trouve au Nord, bordée par la mer Méditerranée. Au Sud, elle est délimitée par les Hauts Plateaux. Le territoire s'étend de BOUDOUAOU à l'Ouest jusqu'à Cap Sigli à l'Est, englobant ainsi les différentes zones géographiques de la Haute Kabylie, de la Basse Kabylie et de la Kabylie maritime (**Fig09**). Ces zones sont caractérisées par une grande diversité géologique, qui résulte principalement de la dynamique orogénique de l'Atlas Tellien et de l'orogénèse alpine.

Les terrains qui affleurent sur ce territoire sont (**ZIANI** et **ARKOUB**, 1994) :

- Le socle kabyle et sa couverture paléozoïque
- La dorsale Kabyle
- L'Oligo-Miocène
- Les nappes de flysch
- Le Miocène post-nappe
- Le Quaternaire



*Fig09. Principaux éléments structuraux du Nord de l'Algérie (R. BRACENE, 2002).*

## Chapitre 02 : Géologie Régionale

Le socle cristallin de la Kabylie renferme plusieurs types de pegmatites granitiques, principalement quartzo-feldspathiques et muscovitiques, à texture grossière et riches en quartz, feldspaths et muscovite, parfois accompagnées de tourmaline. Certaines pegmatites, encore peu étudiées, montrent des caractéristiques suggérant un enrichissement en éléments rares tels que le lithium, le béryllium ou les terres rares, bien que la présence de minéraux comme le spodumène, le lépidolite ou le béryl n'ait pas encore été confirmée de manière formelle. Leur association fréquente avec des zones de cisaillement et leur emplacement à proximité de granites différenciés laissent entrevoir un potentiel économique non négligeable, justifiant des recherches approfondies.

### 3.1. Le socle kabyle et sa couverture paléozoïque :

Le socle kabyle, situé au sein des zones internes de la chaîne tellienne, correspond à une croûte continentale ancienne d'âge précambrien à paléozoïque, principalement constituée de gneiss, micaschistes, quartzites et amphibolites, témoins d'un métamorphisme varisque de moyenne à haute pression. Ce socle est recouvert, en discordance ou par chevauchement tectonique, par une couverture paléozoïque formée de schistes, quartzites et calcaires faiblement métamorphisés, déposés dans des environnements marins peu profonds. L'ensemble témoigne d'une évolution structurale complexe, liée aux phases orogéniques hercynienne puis alpine, et est bien visible sur la Fig10, qui illustre la répartition régionale des unités du socle et de sa couverture.

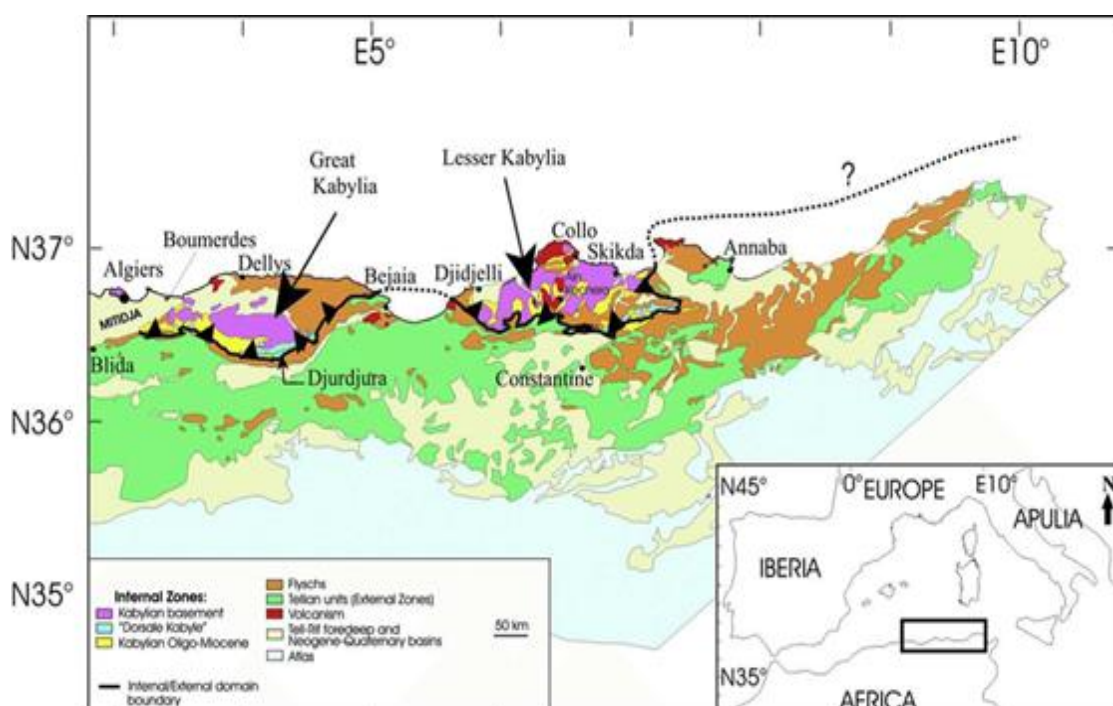
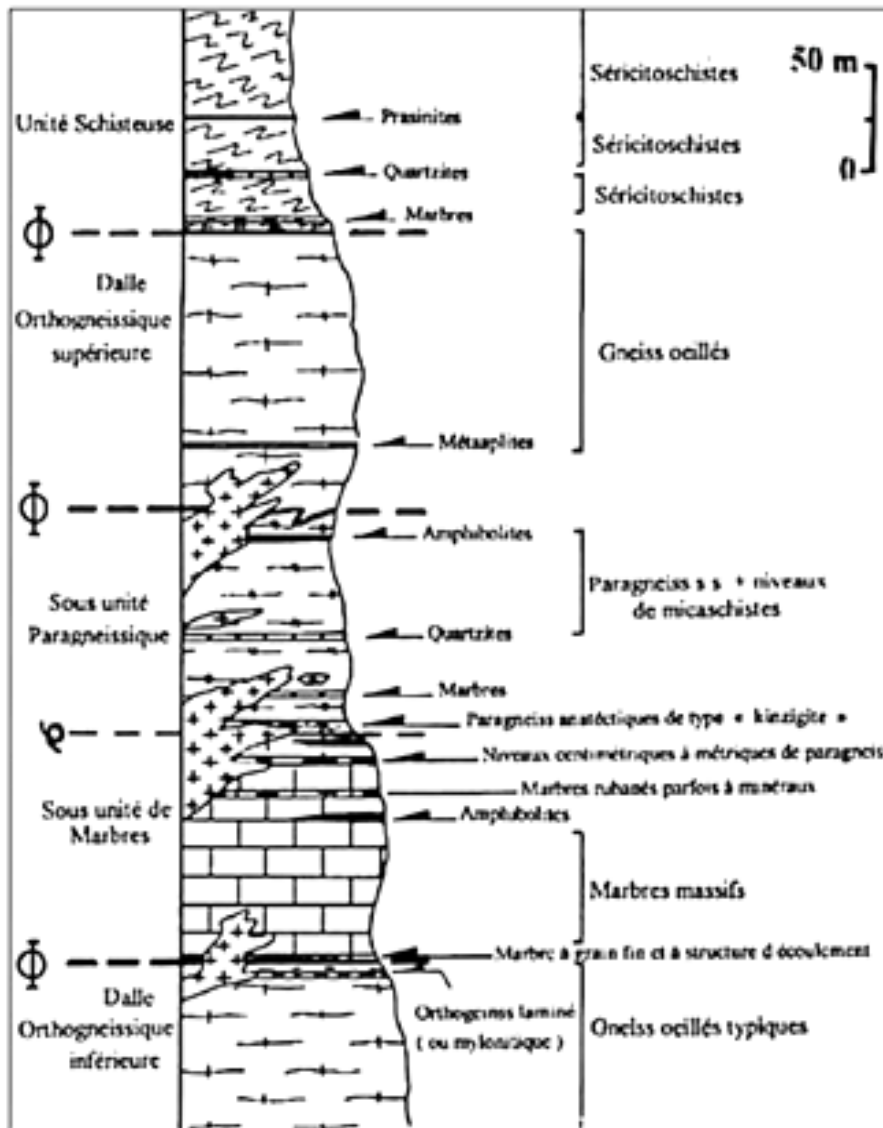


Fig10. Le cadre géologique de la partie nord de l'Algérie (Modifié d'après DOMZIG & All, 2006)

## Chapitre 02 : Géologie Régionale



**Fig11. Colonne synthétique des différents ensembles Tectono-métamorphiques du socle kabyle (GANI, 1988)**

### 3.2. La dorsale kabyle :

La dorsale Kabyle est une structure géologique majeure du Nord de l'Algérie, orientée ouest-est sur environ 50 km et culminant à 2305 m au mont Lalla Khadîdja, point le plus élevé du Djurdjura. Elle résulte des plissements alpins récents et présente un relief accidenté avec des sommets aigus et des plateaux dépassant souvent 1900 m. Cette dorsale forme une frontière naturelle entre, au Nord, le socle métamorphique ancien et, au Sud, les formations telliennes crétacées. Sa géologie est dominée par les calcaires du Lias, avec des affleurements éocènes et une succession de formations sédimentaires du Carbonifère à l'Oligocène, traduisant une histoire géodynamique longue et complexe.

## **Chapitre 02 : Géologie Régionale**

### **3.2.1. Le Carbonifère :**

Le Carbonifère marque le début de la sédimentation dans la chaîne du Djurdjura, directement sur le socle cristallin métamorphique. Les dépôts, épais d'environ 500 mètres, montrent une évolution verticale notable. À la base, on trouve des schistes gris à verdâtres, peu fossilifères, associés à des grès micacés et des lydiennes. Ils sont suivis par des schistes micacés et psammites à débris végétaux, traduisant un environnement deltaïque ou côtier.

La partie supérieure comporte des grès grossiers et des poudingues à galets de quartz, signes d'une érosion continentale active. L'ensemble reflète une sédimentation influencée par une tectonique modérée, des apports fluviaux et une végétation dense, caractéristiques du Carbonifère.

### **3.2.2. Permo-Trias et Trias**

Les formations permo-triasiques du Djurdjura, bien que peu étendues, marquent la transition entre les milieux humides du Carbonifère et les conditions arides du Trias. Elles sont essentiellement continentales. Elles sont composées de grès siliceux rouges témoignant d'un climat chaud et sec, associés à des calcaires dolomitiques formés en milieux peu profonds. Les calcaires vermiculés, riches en structures de déformation, sont caractéristiques de cette période.

Ces dépôts, irréguliers et localisés dans des bassins fermés, reflètent la fragmentation progressive de la Pangée et une forte instabilité climatique.

### **3.2.3. Le Lias (Jurassique inférieur à moyen)**

Dans le Djurdjura, le Lias est bien développé et divisé en deux parties. Le Lias inférieur débute par des cargneules et dolomies, témoignant d'un milieu marin peu profond, puis évolue vers des calcaires fins et oolithiques en environnement clair et oxygéné. Le Lias supérieur se compose de calcaires en dalles, marnes et silex, indiquant un approfondissement marin progressif et une sédimentation plus calme liée à une transgression marine durant le Jurassique.

### **3.2.4. Le Crétacé**

Le Crétacé est peu représenté dans la dorsale Kabyle, notamment dans la zone du Djurdjura. Cette période présente de nombreuses lacunes sédimentaires, dues soit à une absence de dépôts, soit à leur érosion ultérieure ou à un recouvrement postérieur. Cette discontinuité stratigraphique suggère une émergence temporaire de la région ou un manque de subsidence,

## **Chapitre 02 : Géologie Régionale**

empêchant l'accumulation et la préservation des sédiments crétacés typiques (tels que calcaires à rudistes, marnes ou grès marins observés ailleurs dans le Tell). Cela reflète une phase d'instabilité géologique durant le Crétacé dans cette partie de la Kabylie.

### **3.2.5. Le Lutétien (Éocène moyen)**

Au Lutétien, la sédimentation reprend avec des calcaires jaunes, suivis de calcaires massifs à nummulites, témoins d'un environnement marin chaud, peu profond et tropical de l'Éocène. Vers le sommet, ces calcaires s'enrichissent en quartz, évoluant vers des calcaires gréseux, puis des grès et conglomérats, traduisant un apport détritique continental croissant. Cette évolution marque une régression marine progressive, liée au soulèvement régional, avec une sédimentation mixte carbonatée et détritique. Le Lutétien correspond ainsi à une phase de transition vers un environnement côtier et fluviatile, riche en faune benthique.

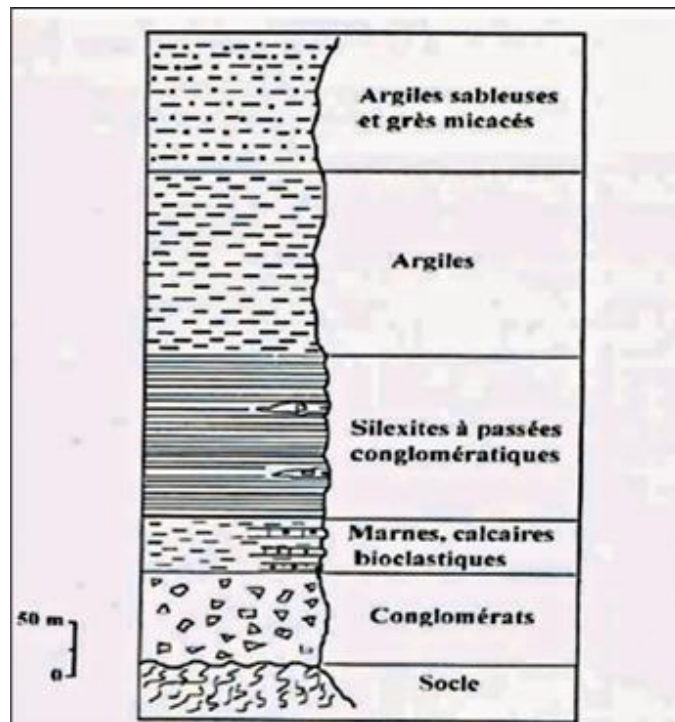
### **3.2.6. L'Oligocène**

À l'Oligocène, le versant nord du Djurdjura dans la dorsale Kabyle connaît une importante sédimentation détritique, avec des dépôts dépassant parfois 1000 mètres. Cette série, de type flysch, alterne conglomérats, grès, marnes et argiles schisteuses, témoignant d'un environnement marin profond influencé par des apports gravitaires. Les grès de Drâa-el-Mizan, friables et jaunâtres, contiennent du mica, des fragments charbonneux et parfois du lignite, révélant une proximité continentale végétalisée. On y observe aussi des marnes sableuses et des brèches formant des cônes de déjection dans les bassins de Boghni et Mechtras, signes d'un relief instable lié à une tectonique active.

### **3.2.7. L'Oligo-Miocène Kabyle**

La formation oligo-miocène kabyle (Fig.12), reposant en discordance sur le socle métamorphique, marque la reprise de la sédimentation après une forte érosion. Elle débute par des conglomérats et grès transgressifs, traduisant une avancée marine, puis évolue vers un olistostrome témoignant d'une instabilité gravitaire liée à la tectonique. L'ensemble est surmonté par les nappes de flysch déplacées vers le sud lors des compressions alpines. Cette formation illustre les grandes étapes géodynamiques du Néogène en Kabylie : soulèvement, transgression, dépôts chaotiques et chevauchements tectoniques.

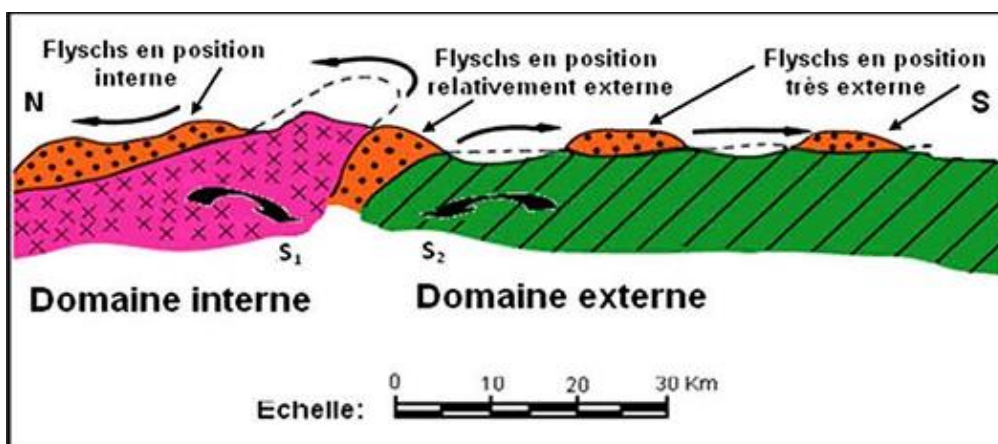
## Chapitre 02 : Géologie Régionale



*Fig12. Colonne stratigraphique de l'Oligo-miocène-kabyle (in Lounis 2005)*

### 3.2.8. Les nappes de flysch :

Les nappes de flysch en Kabylie (*Fig13*), datant du Crétacé à l'Éocène, sont composées de grès siliceux, marnes et calcaires nummulitiques déposés en milieu marin profond. Déplacées vers le sud par la tectonique alpine, elles recouvrent le socle métamorphique et forment un empilement d'unités allochtones. On distingue notamment le flysch numidien (grès massifs), le flysch massylien (plus ancien et varié), ainsi que les nappes de Haut Sébaou - Azazga, Port Guedon et la nappe maurétanienne. Ces nappes sont essentielles pour comprendre la fermeture de la Téthys et l'évolution tectonique de la Kabylie.



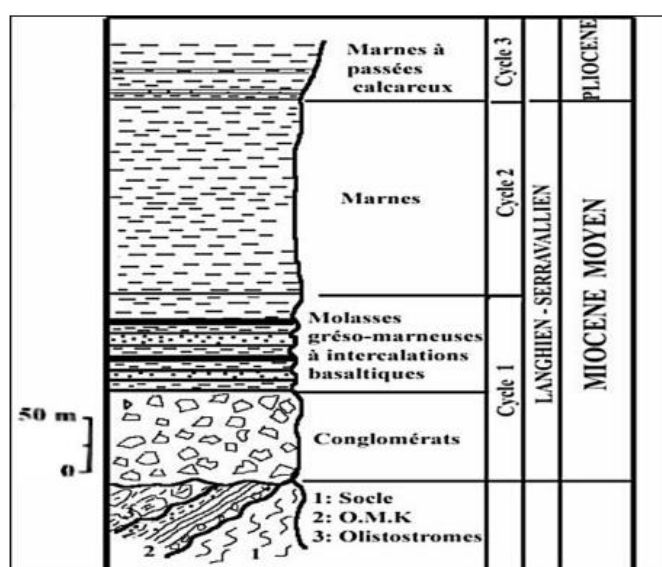
*Fig13. Position des nappes de flysch par rapport aux unités de la chaîne des Maghrébides (d'après boulin, 1986).*

## Chapitre 02 : Géologie Régionale

### 3.2.9. Le Miocène post-nappe :

Le Miocène post-nappe en Kabylie correspond à une phase de sédimentation qui suit l'installation des nappes de charriage, dans un large synclinorium centré sur Tizi-Ouzou et s'étendant jusqu'à Azazga. Il se compose de trois unités principales : des conglomérats épais (100 à 250 m) indiquant un milieu à forte énergie, une formation grés-marneuse d'environ 250 m marquant une transition, puis des argiles et marnes atteignant 500 m d'épaisseur, déposées en milieu marin peu profond.

Ces dépôts traduisent le comblement progressif d'un bassin post-orogénique durant le Miocène moyen à supérieur, à la fin de la compression alpine.



*Fig14. Colonne stratigraphique synthétique du néogène post-nappes de Tizi-Ouzou (Aite, 1994).*

### 3.2.10. Le Quaternaire

Le Quaternaire en Grande Kabylie est marqué par des dépôts alluviaux récents, principalement constitués de cailloutis, de grès polygènes et de gravelites, transportés par les eaux fluviales et déposés dans les vallées, en particulier dans la dépression de l'Oued Sébaou. Cette dernière, encadrée par la chaîne côtière au nord et le massif central kabyle au sud, représente la principale zone d'accumulation.

Les alluvions reposent sur un substrat tertiaire miocène post-nappe. Ces dépôts traduisent une dynamique post-orogénique, marquée par l'érosion des reliefs environnants, la formation de terrasses fluviales et de cônes de déjection, influencés par les variations climatiques du Pléistocène et de l'Holocène.

# *Chapitre 03 :*

*Géologie et  
pétrographie des sites  
étudiés*

## Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés

### 1. Introduction

La région de Tizi Ouzou, située au Nord de l'Algérie (**Fig15**), fait partie de la Grande Kabylie, qui est un ensemble montagneux appartenant à l'Atlas tellien. Elle est caractérisée par plusieurs massifs, dont la chaîne du Djurdjura, qui culmine à 2 308 mètres au sommet de Lalla Khedidja, constituée principalement de calcaires jurassiques.

Au Nord, la Kabylie maritime descend vers la Méditerranée et présente des reliefs côtiers atteignant 1 200 mètres, comme le mont Tamgout, tandis qu'au centre, le massif de l'Agawa, avec une altitude variante entre 800 et 1 500 mètres, abrite plusieurs villages et une activité agricole importante.

La région est traversée par la vallée du Sebaou, qui sépare ces reliefs et influence leur organisation. Cette diversité géomorphologique s'explique par une histoire géologique complexe incluant des formations sédimentaires et métamorphiques.



**Fig15. Situation géographique de la wilaya de Tizi-Ouzou.**

La Kabylie, notamment la région de Tizi Ouzou, est caractérisée par une géologie complexe, dominée par des terrains métamorphiques anciens appartenant au socle kabyle et des terrains sédimentaires qui représentent sa couverture.

Le climat est de type méditerranéen montagnard, avec des étés chauds et secs, et des hivers frais et humides, avec parfois des chutes de neiges sur les grandes altitudes.

## **Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés**

La végétation est un maquis méditerranéen composé d'arbustes (cistes, lentisques) et de chênes verts ainsi que des oliviers, poussant généralement sur les massifs du socle.

Le réseau hydrographique est généralement assez dense. Il est marqué par plusieurs petits cours d'eau temporaires qui drainent la zone, et contribuant à l'érosion des roches et à l'exposition des pegmatites aux observations visuelles.

Les zones sélectionnées sont situées dans les quatre localités suivantes : Azouza (larbaa nath irathen), Mesloub (Mekla), Pont de Bougie et Aïn Zaouia (Boumhani) présentent des affleurements de pegmatites, susceptibles de contenir des minéralisations en lithium.

A partir de ces stations, huit (8) échantillons ont été prélevés pour les différentes analyses de laboratoire (pétrographiques : lames minces et sections polies et géochimie ; majeurs et traces) : les lames minces et les sections polies ont été confectionnées au laboratoire de la Sonatrach (CRD) et les analyses géochimiques (ICP-OES) et (DRX) ont été réalisées au laboratoire de L'ORGM. Le schéma de description de chaque station était comme suit :

- Situation géographique
- Contexte géologique
- Etude pétrographique

### **2. Description géologique des stations étudiées**

#### **2.1 La pegmatite d'Azzouza (Larbaa Nath Irathen) :**

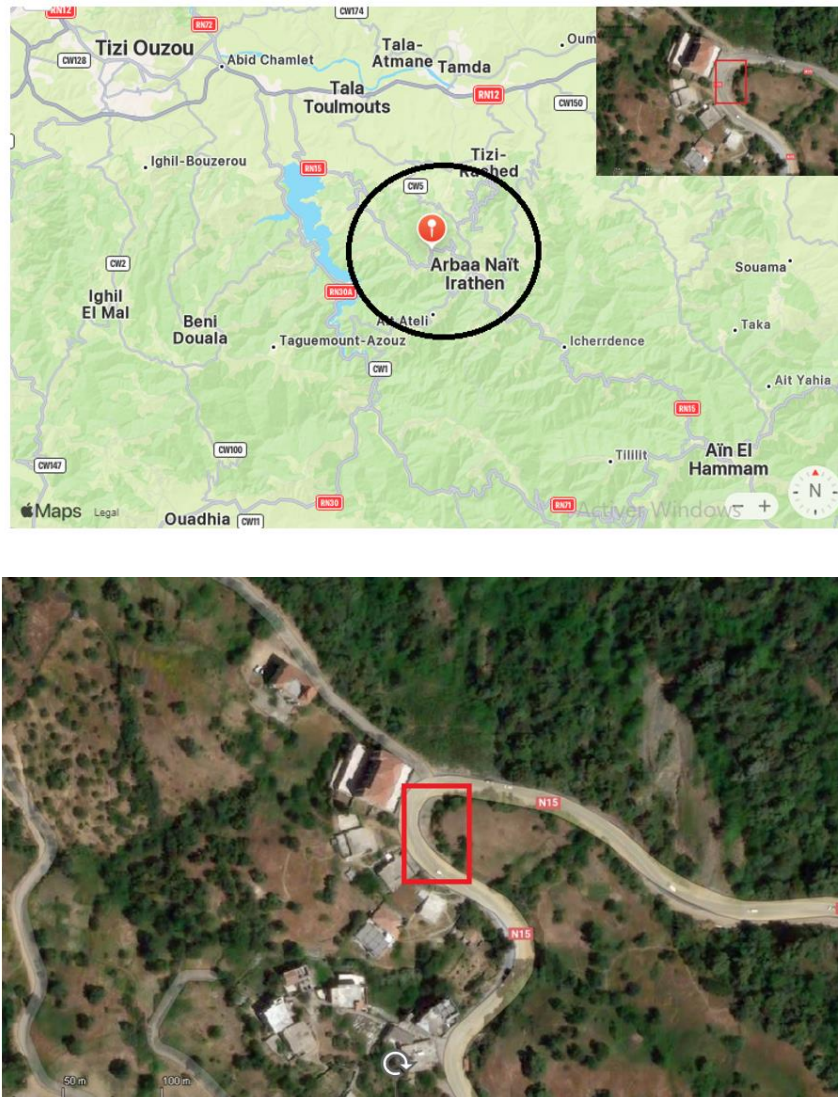
##### **2.1.1 Situation géographique :**

L'affleurement d'Azouza est situé dans la commune de Larbaâ Nath Irathen, au centre-sud de la wilaya de Tizi Ouzou Il se trouve à environ 30 km au sud-est du chef-lieu de wilaya. Ses coordonnées géographiques sont (fig16). :

- Latitude : 36.64616° N
- Longitude : 4.18169° E

Il est accessible par la route régionale depuis Larbaâ Nath Irathen et se situe dans une zone montagneuse

## Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés



**Fig16. Localisation géographique d'affleurement d'Azzouza (Larbaa Nath Irathen)**

Le relief est fortement accidenté, marqué par la présence de versants raides, de crêtes rocheuses et de vallées étroites. Le terrain est dominé par des altitudes variant entre 600 m et 1 000 m, avec une orientation des crêtes NW–SE. Ce relief est contrôlé par la structuration tectonique et la nature résistante des roches métamorphiques.

### **2.1.2 Contexte géologique :**

L'observation géologique du site de Azzouza, situé près de la route, montre un paysage qui présente une structure massive et épaisse, dont on peut distinguer nettement deux formations dans cette masse (fig17) :

- Une formation inférieure (N1) plus massif qui dépasse un mètre d'épaisseur
- Une formation supérieure (N2) dont l'épaisseur varie entre 60 et 70 cm.

### **Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés**

La longueur apparente de l’affleurement atteint environ 6 mètres, bien que cette dimension puisse être sous-estimée en raison de l’altération en surface et de la couverture végétale.

Il s’agit d’une pegmatite blanchâtre à beige, sous forme d’un filon. La pegmatite présente une foliation bien développée et est encaissée dans des gneiss œillés, témoignant d’un contexte géologique complexe et métamorphique.

Le socle hôte représenté par des orthogneiss œillés, localement migmatitisés à foliation subhorizontale. Ces orthogneiss montrent une structure foliée bien marquée (**Fig17**).



**Fig17. Les deux niveaux d’affleurements**

Sur le plan tectonique, la pegmatite présente une schistosité subhorizontale parfaitement parallèle à celle de son encaissant gneissique. Cela indique une mise en place syntectonique, voire tardi-tectonique, dans un contexte de déformation régionale où la pegmatite et son encaissant ont subi une même orientation de contraintes ainsi qu’une déformation cassante (faille décrochant) (Fig18).

Cette schistosité est continue entre la pegmatite et les gneiss encaissants, suggérant une relation étroite entre la cristallisation de la pegmatite et les déformations tectoniques régionales.

### ***Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés***

Par ailleurs, l'ensemble de la structure est affecté par un système de fractures multiples, orientées à la fois subverticalement et subhorizontalement (Fig.18).



***Fig18. Trace visible d'une faille décrochante dans l'affleurement de pegmatite***

Ces fractures recoupent indistinctement la pegmatite et les gneiss, traduisant une évolution tectonique continue postérieure à la mise en place du corps pegmatitique, avec présence de plissements ptygmatisés (Fig19) indiquant une déformation ductile intense précoce reprise dans un contexte de déformation fragile (fracturation et broyage).



***Fig19. Structure ptygmatisée en contexte métamorphique***

## Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés

### 2.1.3 Etude pétrographique

#### 2.1.3.1 : Etude macroscopique :

La pegmatite est visuellement très claire, avec des couleurs variant du blanc au beige. Elle montre une texture grossière, typique des pegmatites à cristallisation lente. Les minéraux majeurs identifiés dans cette formation sont (Fig20) :

- Quartz et feldspath potassique, très abondants et en cristaux centimétriques
- Biotite présente en cristaux plus grossiers, parfois altérés,
- Muscovite, grenat et localement tourmaline, en quantités variables.
- Des oxydes de fer.



**Fig20. Crystallisation des minéraux essentiels et accessoires associés à la pegmatite**

Cette composition minéralogique indique une pegmatite de type alumineuse, probablement associée à une évolution tardive d'un magma granitique différencié. La présence de grenat et de tourmaline pourrait indiquer une possible signature géochimique favorable à la présence d'éléments rares (Li, Be, B, etc).

Un échantillon a été prélevé pour une étude pétrographique plus approfondie (Ech 02) : prélevé au centre du corps pegmatitique il représente la zone massive interne. Malheureusement l'échantillon est très altéré.

L'échantillon 02 montre une pegmatite leucocrate qui est riche en minéraux clairs qui sont visible à l'œil nu. Cela montre que les cristaux mesurent plusieurs centimètres.

Les minéraux visibles sur l'échantillon sont (Fig21) :

## Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés

- Quartz en gris clair, qui a un aspect vitreux qui est présent en gros grains.
- Le feldspath en couleur beige, sous forme de gros grains avec des clivage parfois visible.
- Muscovite qui est un mica blanc, en couleur argenté à blanc brillant en feuillé bien visible. (Fig22)
- Quelques traces de tourmaline en couleur brune entouré en jaune, qui est un minéral accessoire vitreux.



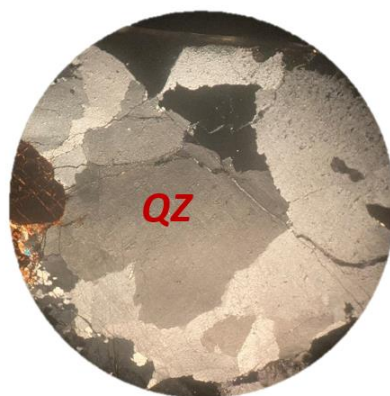
*Fig21. Vue macroscopique de l'Echantillon 02 de pegmatite*



*Fig22. Vue macroscopique d'une Muscovite de l'échantillon 02*

### 2.1.3.2 Etude microscopique :

**Le Quartz ( $\text{SiO}_2$ ) :** En LPA il présente une extinction ondulante caractéristique et des teintes d'interférence très faibles (gris de premier ordre), typiques d'un minéral uniaxe sans clivage.



*LPA*



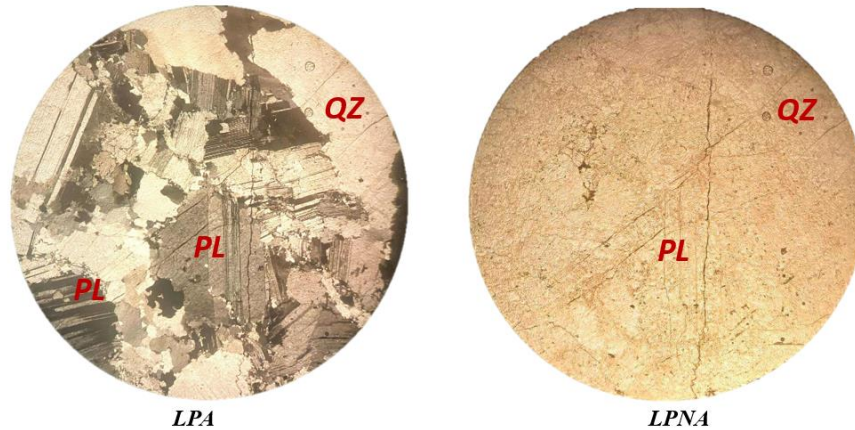
*LPNA*

*Fig23. Vue microscopique de Quartz observée en LPA ET LPNA à faible grossissement-E2-*

### Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés

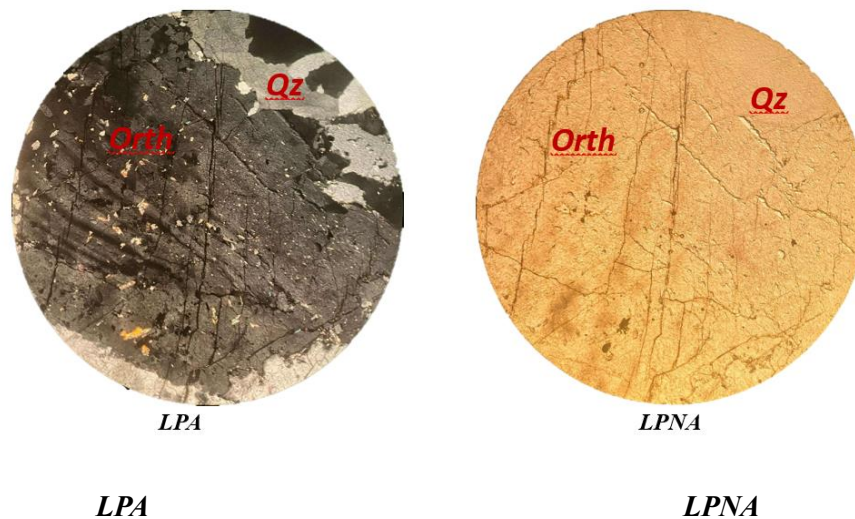
La forme xénomorphe est fréquente. En LPNA (Fig23), Le quartz (Qz) apparaît en teinte gris clair à beige, avec des limites de grain ondulées, traduisant une possible déformation (undulose extinction).

**Le plagioclase  $[(Na,Ca)(Al,Si)_4O_8]$**  : En LPA, Il est marqué par une macle polysynthétique, souvent bien développée. Les teintes d'interférence varient selon la composition (séries d'albite à andésine) et montrent des bandes colorées régulières. En LPNA, Le plagioclase (PL) se montre en grains allongés, de teinte blanche à gris clair. (Fig24)



**Fig24. Vue microscopique d'un plagioclase observé en LPA et LPNA à faible Grossissement-E2-**

**L'orthose  $(KAlSi_3O_8)$**  : En LPA, Fig25 l'orthose révèle des teintes d'interférence faibles à modérées (du gris au blanc nacré), typiques des feldspaths potassiques. L'extinction est droite ou légèrement oblique. En LPNA, il se présente sous forme de cristaux subautomorphes à xénomorphes, de teinte beige clair à jaune pâle. La surface du minéral est généralement homogène, sans zonation marquée, avec des fractures visibles. (Fig25)



**Fig25. Vue microscopique d'un orthose observé en LPA ET LPNA à faible Grossissement-E2-**

## Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés

**Le microcline ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) :** En LPA (Fig26), Elle est facilement identifiable grâce à sa macle en grille très caractéristique, formée par l'intersection des macles de Carlsbad et d'albite. Cette macle en damier est un critère diagnostique majeur du système triclinique du microcline. Les teintes d'interférence sont similaires à celles de l'orthose. En LPNA, en cristaux xénomorphes à subidiomorphes, de teinte semblable à celle de l'orthose (beige à gris clair) (Fig26)

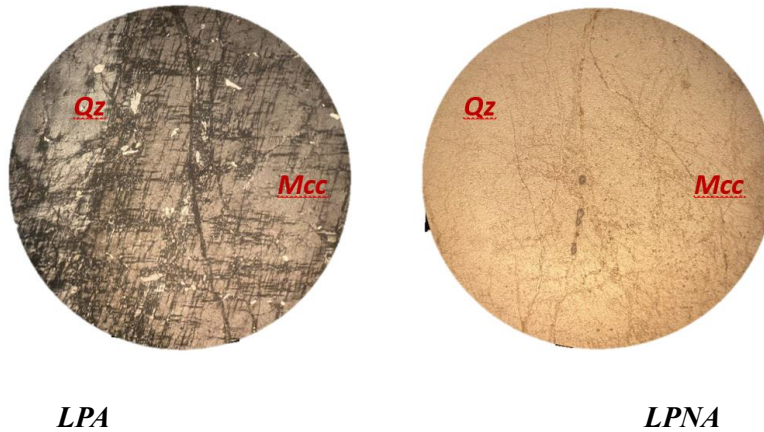


Fig26. Vue microscopique d'un microcline observée en LPA ET LPNA à faible grossissement-E2-

### 2.2 La pegmatite de Meklaa :

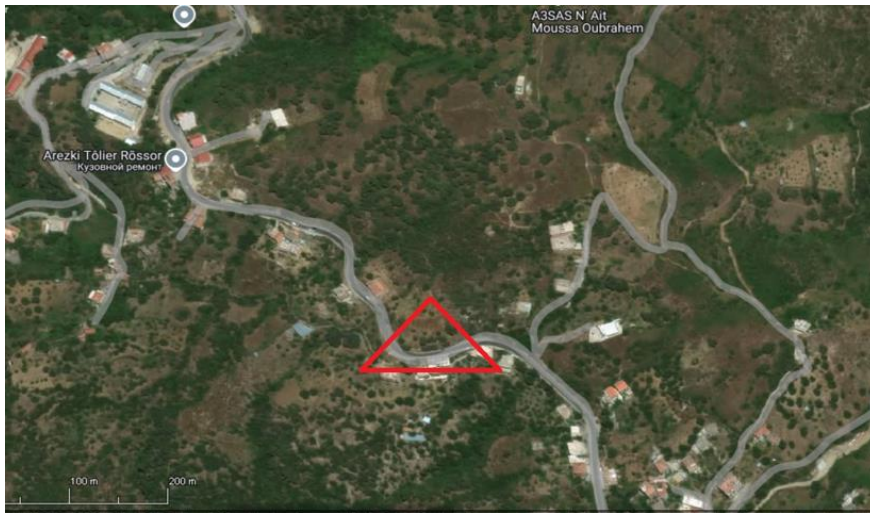
#### 2.2.1 Situation géographique

La station de MEKLA se situe dans la commune de MEKLA, au Sud-est de la wilaya de Tizi Ouzou (Fig27). Ce secteur, incluant une carrière privée où des pegmatites altérées ont été observées, est localisé aux coordonnées géographiques suivantes :

- Latitude :  $36.65718^\circ$  N
- Longitude :  $4.27797^\circ$  E



## Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés



**Fig27. Localisation géographique d'affleurements de Meklaa**

Cette station est accessible par une piste locale reliant MEKLA au village proche, dans une zone montagneuse

Le relief est marqué par un paysage très montagneux avec des vallées étroites et des versants escarpés. Une carrière de marbre se trouve sur une pente modérée, avec des affleurements rocheux altérés visibles le long des pistes d'accès. L'altitude varie entre 650 et 900 mètres environ, et le terrain est fortement fracturé et érodé.

### 2.2.2 Contexte géologique

L'affleurement de la pegmatite se présente sous forme d'un grand massif blanchâtre, épais et bien cristallisé à texture grossière, leucocrate, encaissé dans des gneiss métamorphiques (Fig28). Il apparaît comme un filon massif de 2 à 3 mètres d'épaisseur, contrastant nettement avec l'encaissant plus sombre.

Il s'agit d'une pegmatite de type granitique, essentiellement composée de quartz, de feldspaths, et de muscovite en feuillets brillants, avec la présence localisée de petits grains de tourmaline, reconnaissables à leur teinte sombre.

Sur le plan tectonique, la présence du miroir de faille visible à proximité témoigne d'une injection contrôlée par une structure tectonique préexistante, probablement réactivée lors des dernières phases de l'évolution orogénique (Fig29). L'ensemble suggère une mise en place tardive dans un contexte de relâchement tectonique, avec une cristallisation lente en profondeur, où les gneiss encaissants présentent une foliation du socle marquée, plissée localement. Les pegmatites, quant à elles, recoupent de manière discordante cette foliation

## ***Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés***

### **2.2.3 Etude pétrographique :**

#### **2.2.3.1 Etude macroscopique :**

Deux échantillons ont été prélevés pour une étude pétrographique plus approfondie. Échantillon 03 et 04 Les échantillons sont des roches massives à faciès pegmatitiques, de texture hétérogranulaire et à granulométrie très grossière, témoignant d'une cristallisation lente en profondeur.



*Fig28 : l'affleurement pegmatitiques de Meklaa (Kabylie)*



*Fig29 : l'affleurement pegmatitiques de Meklaa (Kabylie)*

## Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés

La couleur dominante est blanchâtre à gris clair, avec des nuances brunâtres résultant d'altérations ferrugineuses localisées.

L'aspect grenue révèle une abondance de Quartz (translucide à éclat vitreux), de Feldspaths Potassiques, souvent blanchâtres à rosés. On observe également la présence de muscovite en paillettes brillantes à éclat nacré, ainsi que des traces de Biotite et d'autres Micas sombres.

La composition et la texture suggèrent un environnement de cristallisation riche en fluides résiduels, propice à la formation de minéraux accessoires tels que la tourmaline qui est bien visible en petit cristaux.



Fig30. Vues Macroscopiques des Echantillons prélevé (3) et (4) d'affleurement de Meklaa

### 2.2.3.2 Etude microscopique :

#### Échantillon 03 :

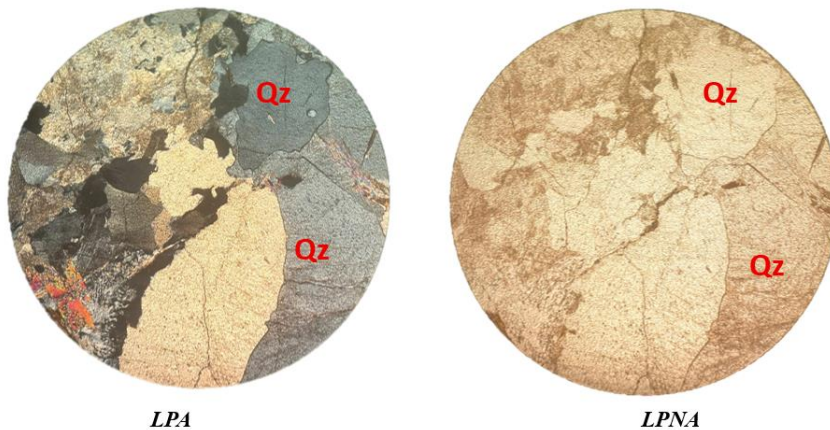
L'observation microscopique a permis de mettre en évidence une composition typique des pegmatites différenciées, riche et variée, incluant des minéraux majeurs, des minéraux accessoires, ainsi que des indices d'altération et de déformation.

## Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés

Les principales phases minérales sont décrites comme suit :

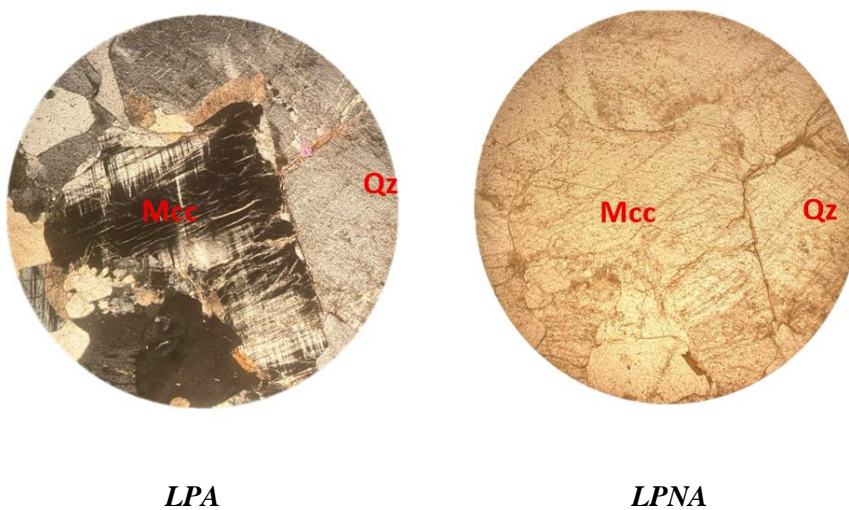
### 1. Minéraux cardinaux :

**Quartz ( $\text{SiO}_2$ )** : il est très abondant, formant de larges plages xénomorphes à contours irréguliers. Il est intensément fracturé, traduisant une déformation fragile post-cristallisation. Sa biréfringence est normale (gris de premier ordre) et l'on observe localement des inclusions de muscovite, feldspaths et minéraux opaques. Ces inclusions traduisent soit une croissance synchrone, soit des réarrangements liés à des recristallisations dynamiques partielles.



*Fig31. Vue microscopique d'un quartz observée en LPA ET LPNA à faible grossissement-E3-*

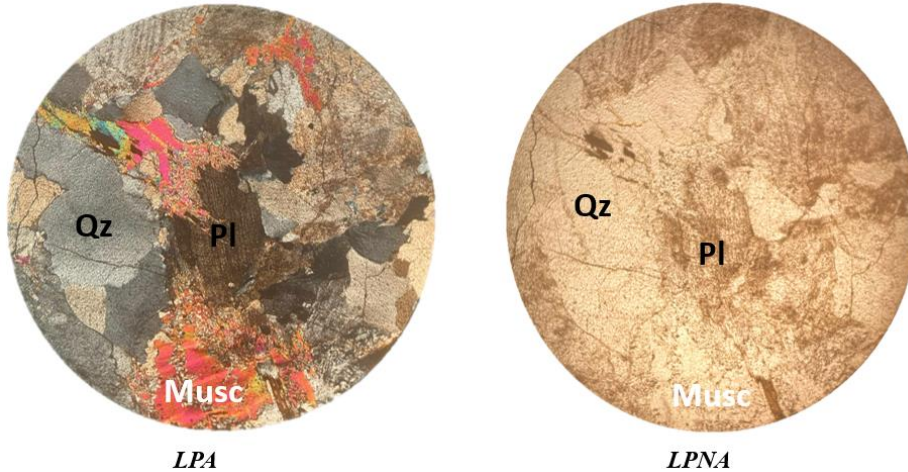
**Microcline ( $\text{KAISi}_3\text{O}_8$ )** : microcline se présente en grands cristaux idiomorphes à subidiomorphes, facilement identifiables grâce à leur maillage en grille (Carlsbad–albite), très net en lumière polarisée croisée. Les cristaux montrent parfois des fractures internes et des altérations en bordure. Ils sont en contact direct avec le quartz et la muscovite.



*Fig32. Vue microscopique d'un Microcline observée en LPA ET LPNA à faible grossissement-E3-*

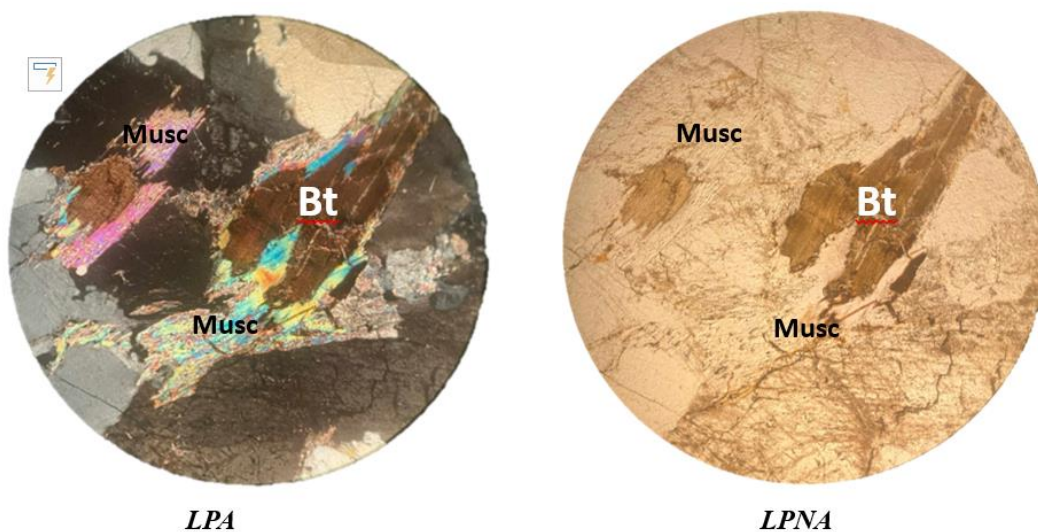
### Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés

**Plagioclase  $(Na,Ca)(Al,Si)_4O_8$**  : Présent en cristaux idiomorphes à subidiomorphes, le plagioclase se distingue par son maillage polysynthétique bien visible. Certaines sections montrent une zonation, traduisant des variations de composition pendant la cristallisation. Il est présent parfois dans des lames en grande plage contrairement au d'autres lames, il se présente en petit cristaux



*Fig33. Vue microscopique de Plagioclase observée en LPA ET LPNA à faible grossissement-E3-*

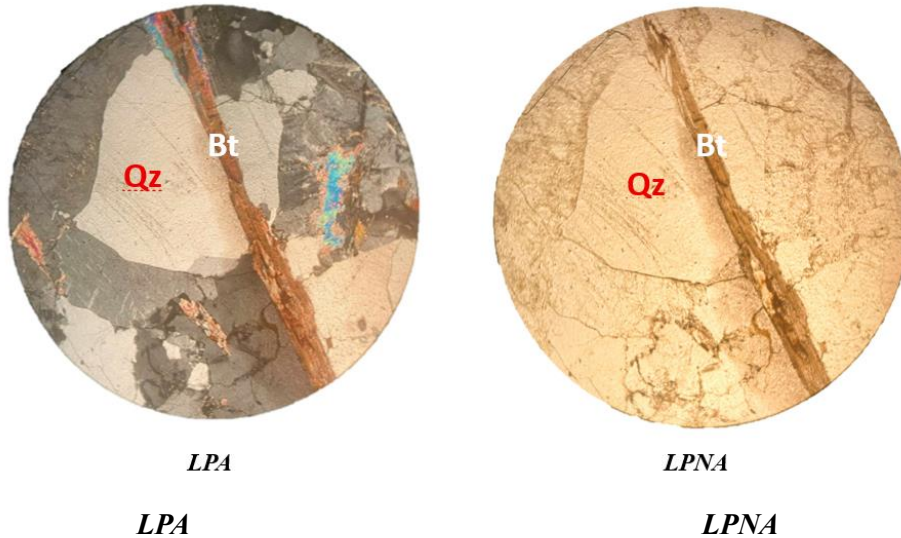
**Muscovite  $(KAlSi_3O_8)$**  : Se présente en larges feuillets clairs à relief modéré. En LPNA, elle est incolore à légèrement jaunâtre, avec un pléochroïsme très faible à absent. En LPA, elle est facilement reconnaissable grâce à sa forte biréfringence (teintes de 2e ordre vives) et son extinction droite. Elle montre parfois un plissement ou une ondulation, traduisant une déformation ductile.



*Fig34. Vue microscopique de la Muscovite observée en LPA ET LPNA à faible grossissement-E3-*

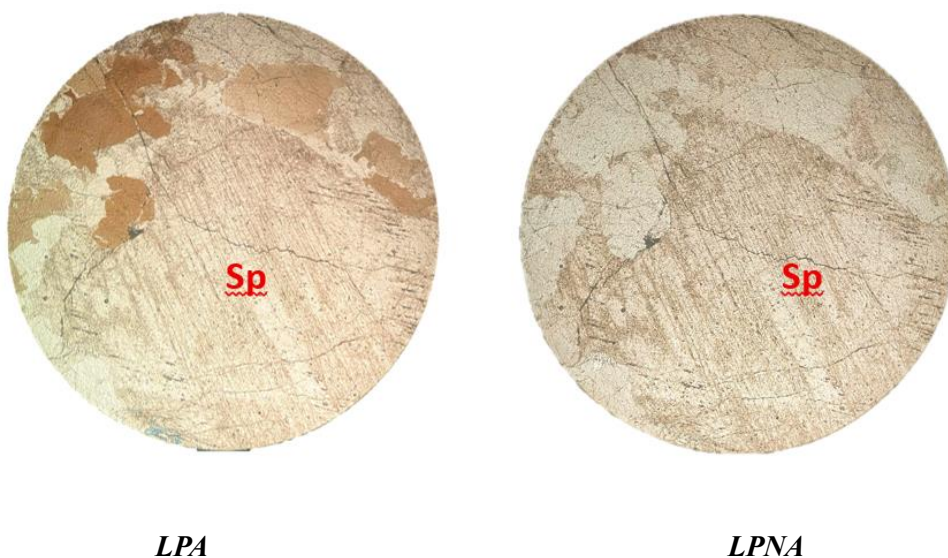
### Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés

**Biotite** [ $K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ ] : En LPA, elle présente des teintes d'interférence de 2<sup>e</sup> ordre), une extinction oblique, une forte biréfringence et des clivages parallèles bien visibles. Elle est souvent intercroisée avec la muscovite. En LPNA, la biotite apparaît en lamelles brun foncé à jaunâtre, avec un pléochroïsme marqué du brun foncé au clair. Elle a une forme en paillettes facilement reconnaissable.



*Fig35. Vue microscopique d'une biotite observée en LPA ET LPNA à faible grossissement-E3-*

**Probablement Spodumène** ( $LiAlSi_2O_6$ ) : Le spodumène se présente ici en cristal allongé, incolore à teinte légèrement beige en lumière naturelle, avec un pléochroïsme faible et des stries de clivage bien marquées. Sa faible biréfringence et ses fissures internes sont caractéristiques des minéraux lithinifères des pegmatites. ( reste a confirmer).

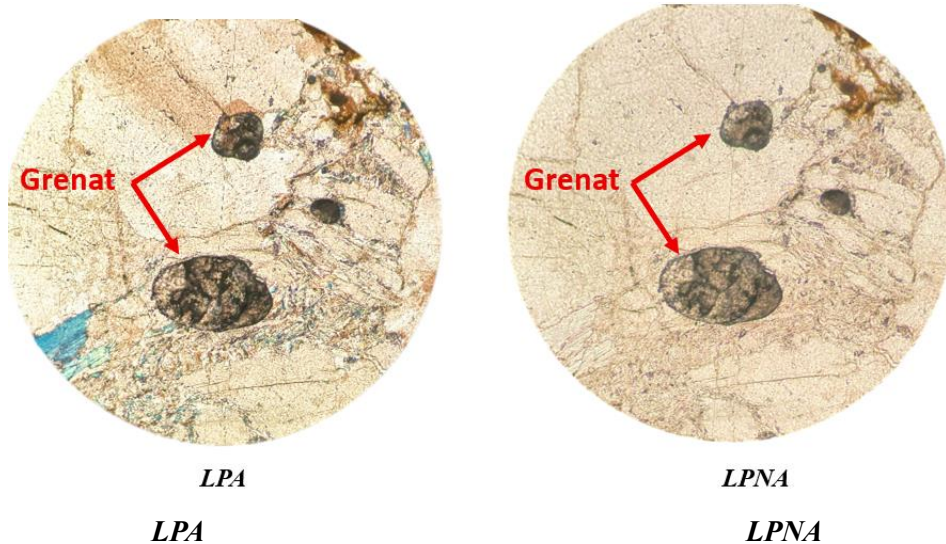


*Fig36. Vue microscopique d'un Spodumène observée en LPA ET LPNA à faible grossissement-E3*

## Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés

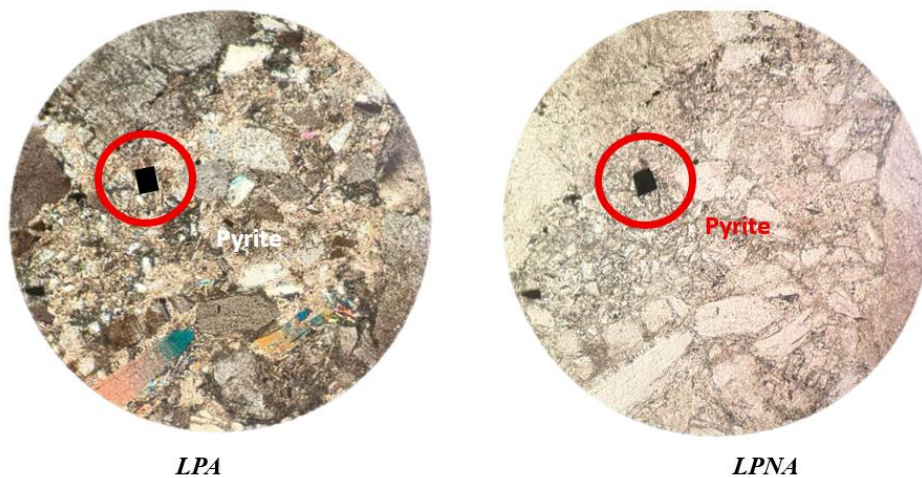
### Minéraux accessoires :

**Grenat** : Le grenat se manifeste sous forme d'inclusions sub-arrondies à teinte brun sombre à isotrope en LPNA, confirmant son absence de biréfringence. En LPA, il reste globalement noir, sans interférence, soulignant son caractère isotrope, contrastant nettement avec la matrice quartzofeldspathique biréfringente environnante.



*Fig.37 Vue microscopique d'un Grenat observée en LPA ET LPNA à faible grossissement-E3-*

**Pyrite (FeS<sub>2</sub>)** : elle se présente en grains opaques, cubique, reconnaissables par leur absence totale de transmission de lumière, que ce soit en LPNA ou en LPA, ce qui confirme leur nature opaque. En lumière naturelle (LPNA), elle montre un éclat métallique brillant, typique des sulfures. Elle ne révèle aucune interférence en lumière polarisée croisée (LPA), conservant une teinte noire uniforme. Certains grains montrent des altérations périphériques en oxydes de fer.

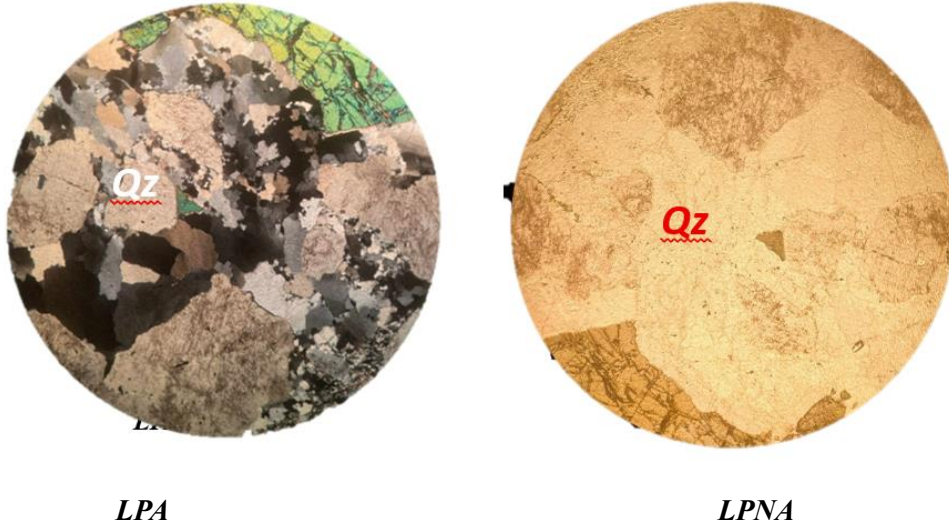


*Fig38. Vue microscopique d'une pyrite observée en LPA et LPNA à faible grossissement-E3-*

### Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés

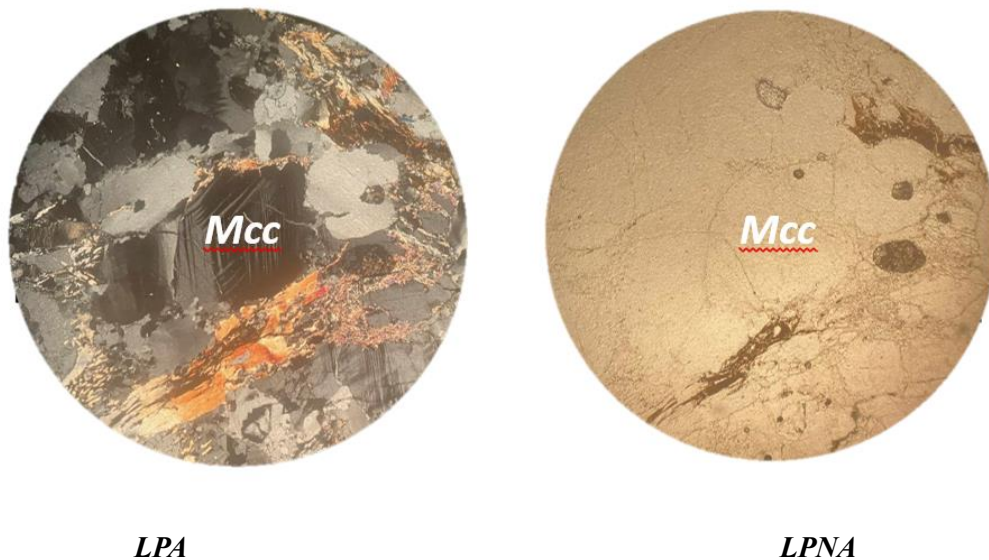
#### Echantillon 04 :

**Le quartz ( $\text{SiO}_2$ )** : il forme des cristaux xénomorphes interstitiels. Il est incolore en LPNA, sans clivage apparent. En LPA, il montre une extinction ondulante et une biréfringence faible avec des teintes grises à blanches, ce qui est typique de ce minéral. Cette extinction ondulante peut indiquer des déformations tardives ou des contraintes subies après cristallisation.



*Fig40. Vue microscopique de quartz en LPA et LPNA à faible grossissement-E4-*

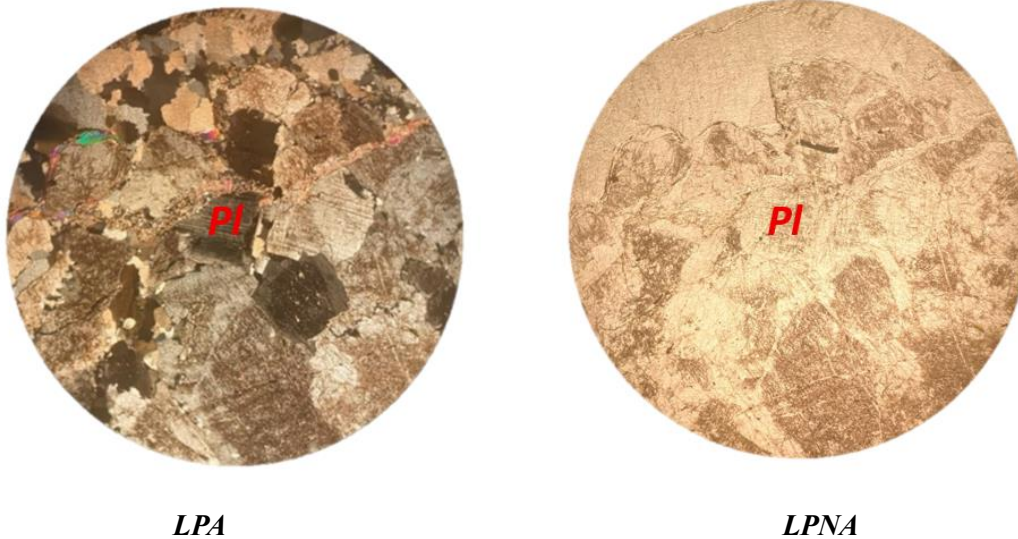
**La microcline ( $\text{KAiSi}_3\text{O}_8$ )** : Elle se présente sous forme de cristaux subautomorphes à xénomorphes. En LPNA, il est incolore, avec des clivages bien marqués. Sa reconnaissance est confirmée en LPA par la présence d'une macle en grille (ou macle tartan), typique de ce feldspath potassique, accompagnée d'une biréfringence faible à teintes d'interférence du premier ordre.



*Fig39. Vue microscopique de microcline en LPA et LPNA à faible grossissement-E4-*

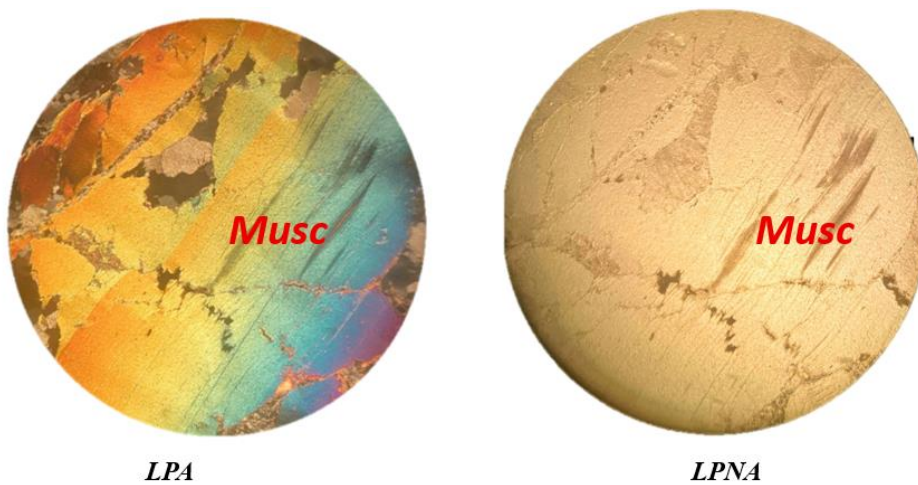
### Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés

**Le plagioclase  $(\text{Na,Ca})(\text{Al,Si})_4\text{O}_8$**  : Sous forme de cristaux subautomorphes à contours irréguliers, est reconnaissable en LPNA par sa teinte incolore et ses deux clivages rectilignes. En LPA, il présente des macles polysynthétiques de type albite, bien nettes, ainsi qu'une biréfringence modérée. Ces critères permettent de l'identifier avec certitude au sein des feldspaths calco-sodiques, il se présente parfois sous forme de grandes plages.



*Fig41. Vue microscopique de plagioclase en LPA et LPNA à faible grossissement-E4-*

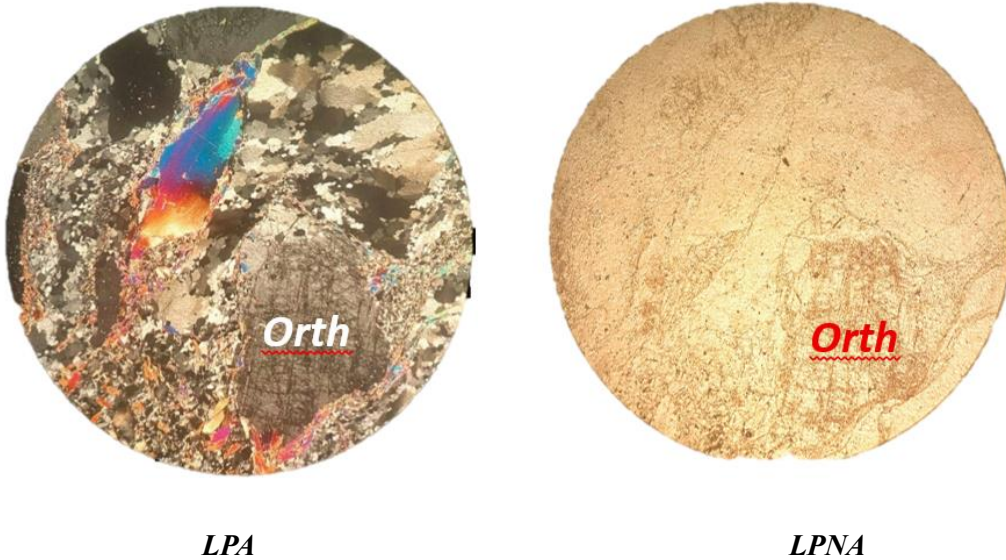
**La muscovite  $\text{KA}12(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$**  : est présente sous forme de paillettes fines à allongées. En LPNA, elle est incolore à légèrement jaunâtre, avec un clivage parfait selon une direction. En LPA, elle se distingue nettement par une biréfringence très élevée et des teintes d'interférence vives (du 2<sup>e</sup> au 3<sup>e</sup> ordre), souvent dans les tons bleus, roses ou jaunes. Cette forte biréfringence est un critère distinctif du mica blanc.



*Fig42. Vue microscopique de Muscovite en LPA et LPNA à faible grossissement-E4-*

## Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés

L'orthose ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) : difficile à distinguer du microcline en LPNA, se manifeste également par des cristaux incolores à clivage simple. En LPA, sa reconnaissance repose sur une biréfringence faible et parfois la présence d'une macle de Carlsbad, lorsqu'elle est visible. Sa présence, aux côtés du microcline, confirme l'abondance de feldspaths potassiques dans l'assemblage.



*Fig43. Vue microscopique de Orthose en LPA et LPNA à faible grossissement-E4-*

### 2.3 La pegmatite de pont de bougie

#### 2.3.1 Situation géographique

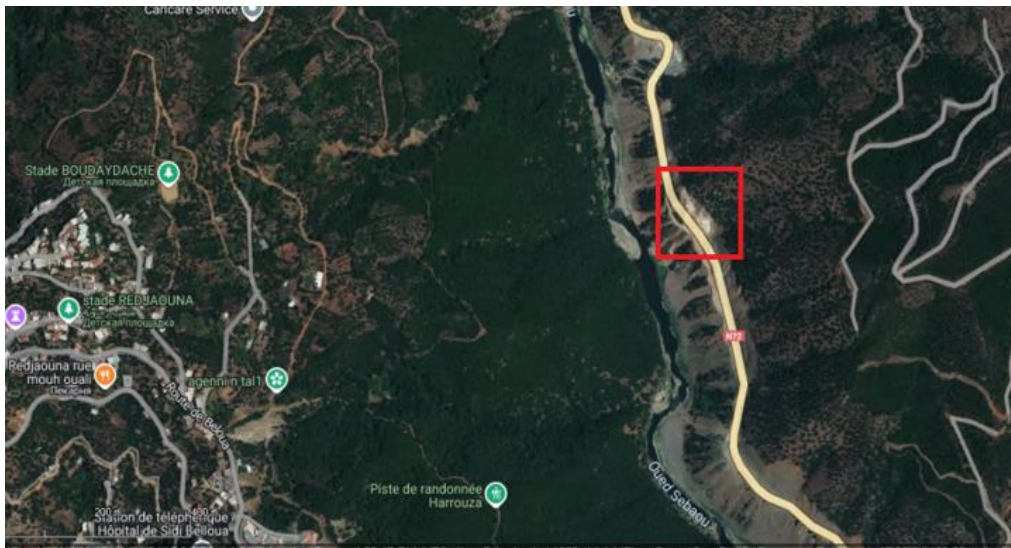
Cet affleurement est situé le long de la route menant de pont de bougie vers TIGZIRT. Près de la localité d'Akaoudj, situé à l'Est de la ville de Tizi Ouzou, dans une zone de transition entre formations métamorphiques et sédimentaires.

Les coordonnées géographiques approximatives des affleurements de pegmatites sont :

- Latitude :  $36.6000^\circ$  N
- Longitude :  $4.3500^\circ$  E

Cette zone d'affleurement est facilement accessible par la route principale reliant Tizi Ouzou à la côte méditerranéenne.

## Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés



**Fig44. Localisation géographique d’affleurement de pont de bougie.**

Le relief est plus relativement doux, avec des collines arrondies et des vallées plus larges. Les altitudes oscillent entre 400 et 700 mètres. On observe la présence des formations de calcaires métamorphiques au sein de la série schisteuse.

La végétation, mixte est composée de chênes verts, d’oliviers cultivés, et d’arbustes divers. Le réseau hydrographique comprend plusieurs petits oueds temporaires alimentant le bassin du Sebaou.

### 2.3.2 Contexte géologique

Dans la région du Pont de Bougie, les affleurements montrent la présence de deux types de formations pegmatitiques :

## **Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés**

### **- Les pegmatites du premier ordre (pegmatites syn-plissement) :**

Elles sont représentées par des intrusions filoniennes gisant dans le socle métamorphique précambrien, constitué essentiellement d'une série schisteuse formée essentiellement de schistes satinés et de rares bancs de marbres. La pegmatite est plissée et boudinée en même temps que la série schisteuse (Fig45).



**Fig.45. La pegmatite du premier ordre (syn-plissement)**

### **Les pegmatites du second ordre (pegmatites post plissement) :**



**Fig46. Filon de la pegmatite du second ordre (post-plissement)**

## Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés

Les observations de terrain montrent l'existence de plusieurs filons de pegmatites d'une teinte beige à blanche de type pneumatolytique à hydrothermal, recoupant nettement la foliation du socle, selon des directions dominantes NNE-SSW, avec des pendages subverticaux, atteignant jusqu'à 6 mètres de longueur et 2 à 3 mètres d'épaisseur et qui recoupe nettement la série, localement riches en mica, quartz, feldspath, et la présence de tourmaline en agrégats atteignant 20 cm de dimensions (Fig46). Il s'agit d'un bon stock frais de pegmatite.

### 2.3.3 Etude pétrographique

#### 2.3.3.1 Description macroscopique

L'échantillon n°06, prélevé sur un filon de pegmatite a été soumis à l'analyse pétrographique. À l'œil nu, la roche présente une structure massive et une texture hétérogranulaire, marquée par la présence de cristaux généralement de grande taille. Sa teinte dominante est gris-clair à blanc, ponctuée de taches brunâtres dues à des altérations superficielles, notamment l'oxydation des minéraux ferri-fères (*oxydes de fer*). Sur le plan minéralogique, cette pegmatite est constituée principalement de quartz, reconnaissable à son éclat vitreux et à sa cassure, ainsi que de feldspaths potassiques, qui apparaissent sous forme de cristaux blancs à rosés à éclat nacré.

La muscovite, facilement identifiable grâce à ses feuillets brillants et argentés, est bien représentée. On distingue également de petits cristaux de tourmaline noire à brun foncé, souvent disséminés dans la matrice. On observe aussi des très petits cristaux de pyrite ubiquiste (Fig47). L'absence de foliation ainsi que la grande taille des minéraux confirment la nature pegmatitique de la roche.

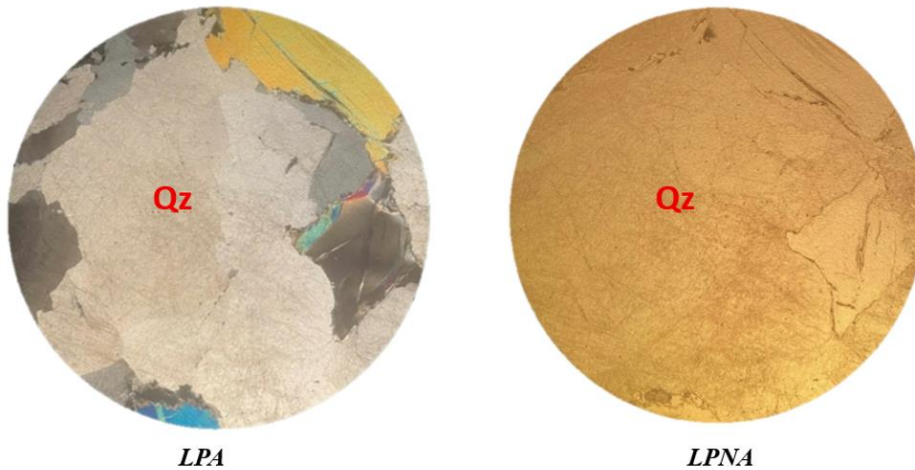


*Fig47. Photo macroscopique de La cristallisation des minéraux essentiel et accessoires d'affleurement de pont de bougie*

## Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés

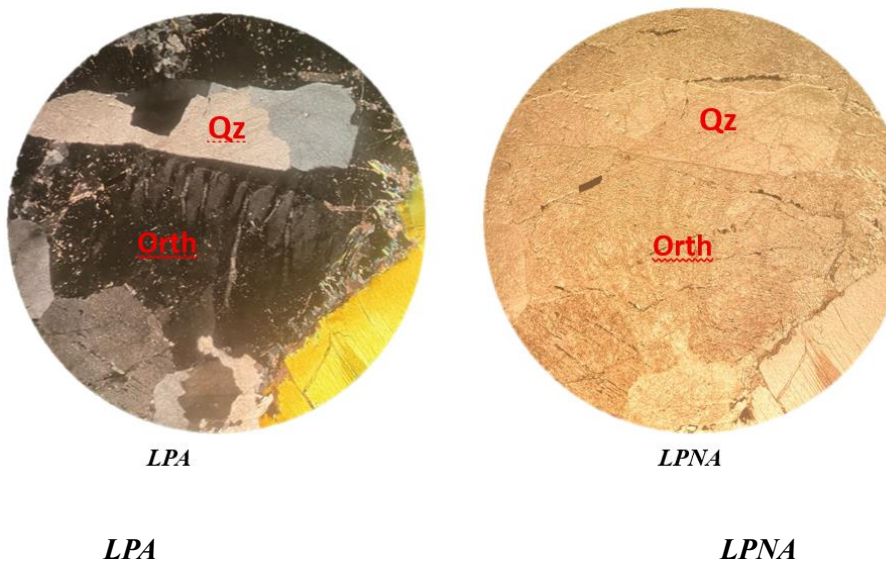
### 2.3.3.2 Etude microscopique :

**Le quartz ( $\text{SiO}_2$ )** : est abondant, facilement identifiable par ses formes anhydres, ses bords souvent ondulés et son extinction en taches grises à noires en lumière polarisée non analysée (LPN), tandis qu'il montre une faible biréfringence en LPA. Il remplit souvent l'espace entre les cristaux de feldspath



*Fig48. Vue microscopique de Quartz en LPA et LPNA à faible grossissement-E6-*

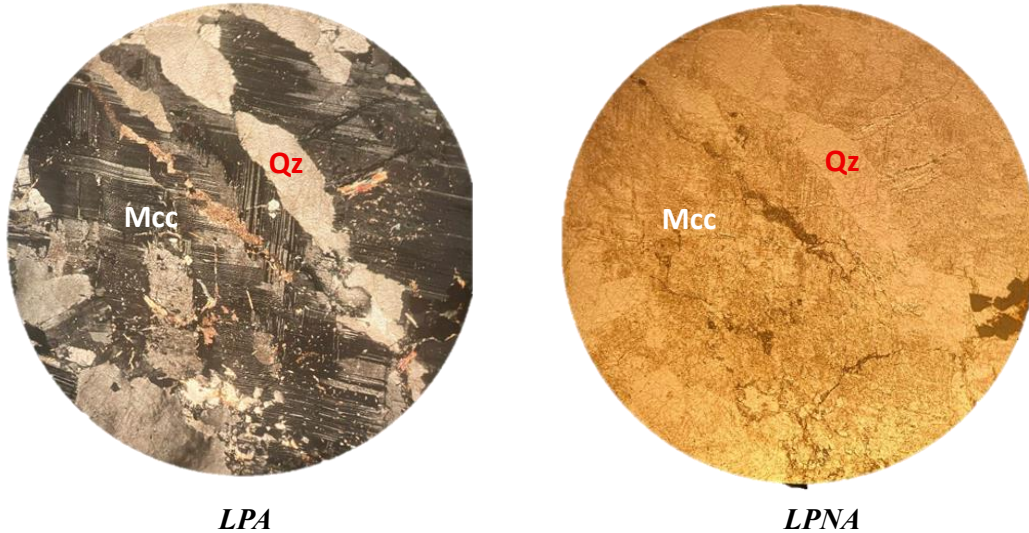
**Orthose ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ )** : Il se présente en LPNA sous forme de cristaux idiomorphes à subidiomorphes, de teinte beige à brun clair, avec deux clivages orthogonaux nets et des fractures internes traduisant un refroidissement ou des contraintes post-magmatique. En LPA, il montre une biréfringence modérée à élevée, avec des teintes d'interférence gris, sans macles visibles. L'absence de macle en grille permet de le distinguer du microcline.



*Fig49. Vue microscopique de l'Orthose en LPA et LPNA à faible grossissement-E6-*

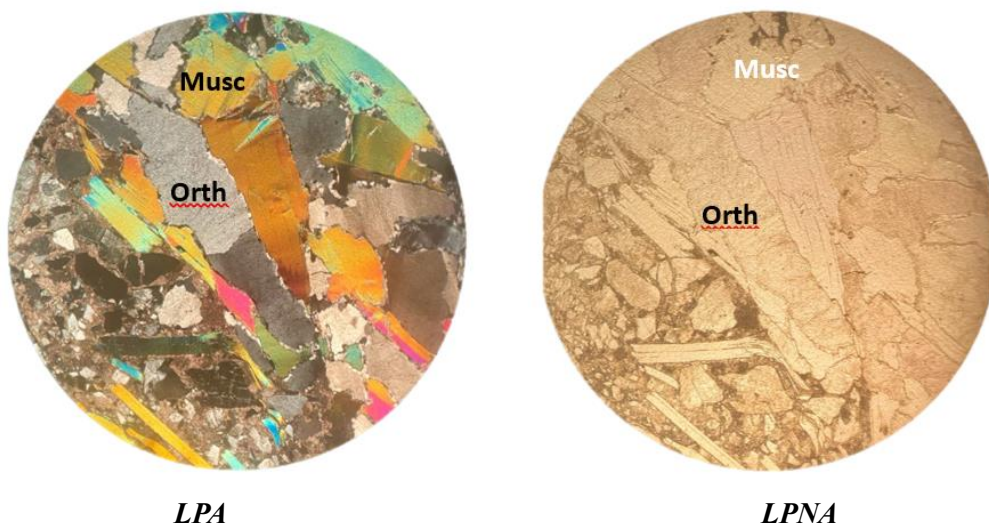
### Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés

**La microcline ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ )** : En LPA, il est reconnaissable grâce à sa macle en grille caractéristique (tartan), ses teintes d'interférence grises et sa biréfringence modérée. elle est souvent associée avec le quartz et la muscovite, En LPNA, le microcline se présente en cristaux xénomorphes à subautomorphes, de teinte claire à gris pâle, avec une surface homogène.



*Fig50. Vue microscopique de Microcline en LPA et LPNA à faible grossissement-E6-*

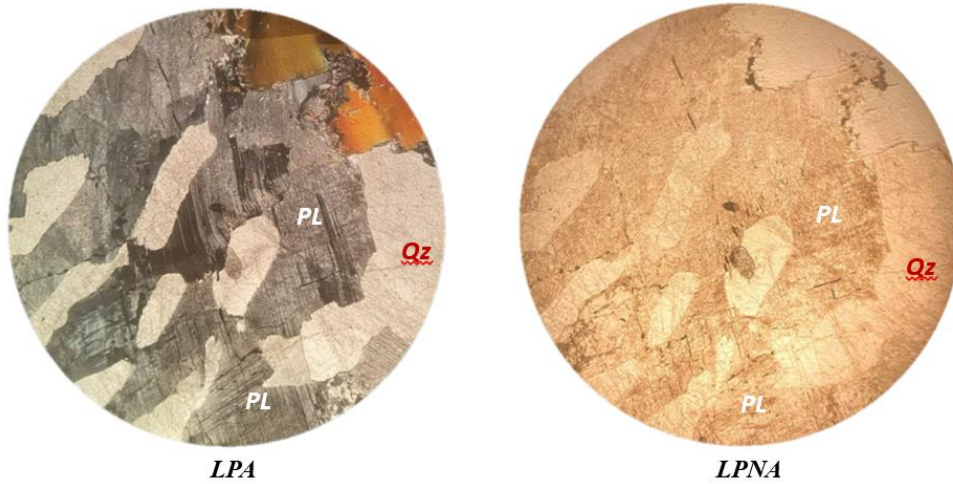
**La muscovite  $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$**  : Se reconnaît par ses fines lamelles flexueuses, à biréfringence élevée, souvent jaunes à roses en LPA, et par son aspect brillant en LPN. Elle peut se présenter en agrégats ou en cristaux isolés, parfois altérés. L'ensemble de la texture est grenu, avec des cristaux de taille variable et une structure équigranulaire à légèrement porphyrique, ce qui suggère un refroidissement plutonique lent.



*Fig51. Vue microscopique de Muscovite en LPA et LPNA à faible grossissement-E6-*

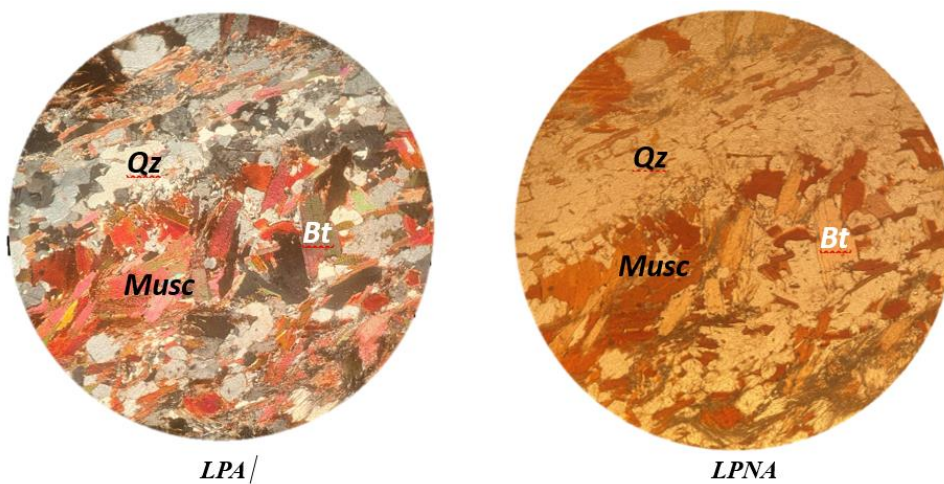
### Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés

**Plagioclase  $(Na,Ca)(Al,Si)_4O_8$**  : Le plagioclase apparaît incolore en lumière polarisée non analysée (LPNA), avec un faible à moyen relief, des macles polysynthétiques bien visibles en bandes parallèles et parfois des clivages nets à  $90^\circ$ . En lumière polarisée analysée (LPA), il montre des couleurs d'interférence de premier ordre (gris ou blanc), une extinction oblique et des macles peu marquées.



*Fig52. Vue microscopique d'un Plagioclase en LPA et LPNA à faible grossissement-E6-*

**L'encaissant : Schiste satiné** : En lame mince, le schiste satiné révèle une foliation fine marquée par l'alignement de minéraux micacés (muscovite, biotite) donnant un aspect soyeux en LPNA. Le quartz, en grains xénomorphes déformés, occupe l'espace interstitiel. En LPA, les micas présentent des couleurs d'interférence du 2<sup>e</sup> ordre, le chlorite des teintes verdâtres faibles, et le quartz une extinction ondulante.



*Fig53. Vue microscopique d'un Schiste satiné en LPA et LPNA à faible grossissement-E6-*

## Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés

### 2.4 La pegmatite de Ain Zaouia

#### 2.4.1 Situation géographique

Ain Zaouia (Bou Mehani) est un village situé dans la commune d'Aïn Zaouia, à l'est de Tizi Ouzou. La Pegmatite étudiée se trouve approximativement aux coordonnées suivantes (Fig53.)

- Latitude :  $36.57400^{\circ}$  N
- Longitude :  $3.91640^{\circ}$  E

Le site est accessible par des pistes rurales depuis le village de Aïn Zaouia

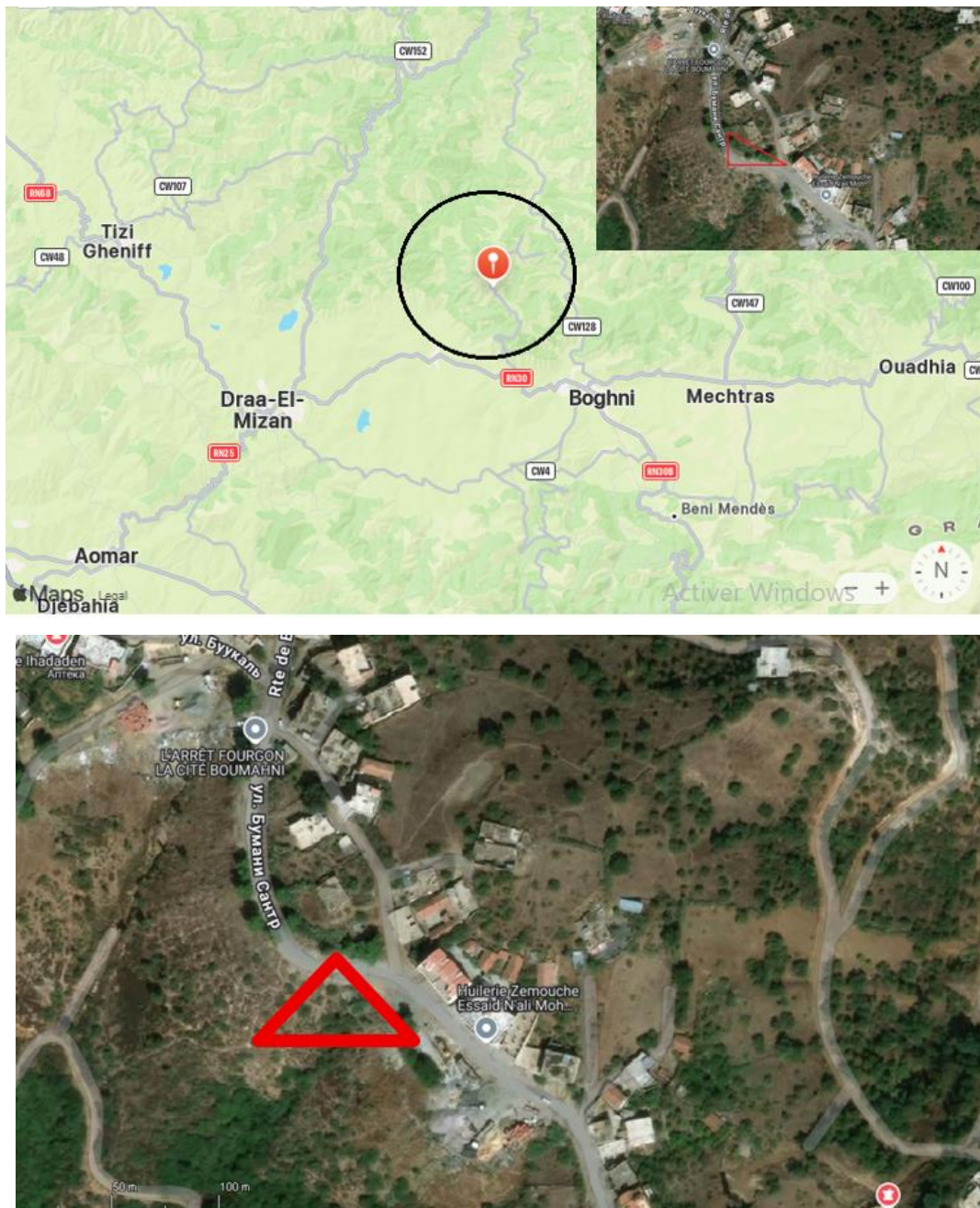


Fig54. Localisation géographique de pegmatite de Ain Zaouia (Boumhani)

## Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés

Le relief de cette station est marqué par des crêtes rocheuses et des pentes abruptes, typiques des massifs du Djurdjura. Les altitudes varient entre 700 et 1 100 mètres, avec un réseau de vallées encaissées et des affleurements rocheux fréquents.

La végétation naturelle est dense, composée de chênes-lièges, de chênes verts, et d'arbustes. Le réseau hydrographique est constitué de petits oueds temporaires, qui alimentent le bassin versant de la région.

### 2.4.2 Contexte géologique :

La station de Bou MEHANI est caractérisée également par des affleurements du socle kabyle métamorphique ancien. Ce secteur a fait l'objet d'investigations antérieures, notamment par la SONAREM, comme en témoignent les anciennes tranchées de prospection.

Du point de vue structurale la région est marquée par une fracturation intense du socle, favorable à l'intrusion de corps pegmatitiques tardi-tectoniques.

Le terrain observé montre des d'affleurements formés de deux unités principales qui sont :

- Une formation gneissique intensément fracturée, servant d'encaissant métamorphique,
- Des filons pegmatitiques à teinte blanche à beige, affleurant sous forme d'éboulis et de lentilles discontinues, avec des épaisseurs variant de 60 à 80 cm, une largeur moyenne de 15 m et une hauteur apparente de 3 à 4 m (Fig55).



*Fig55. l'affleurement pegmatitique de La région de BoumHani*

## **Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés**

### **2.4.3 Etude pétrographique :**

#### **2.4.3.1 Étude macroscopique :**

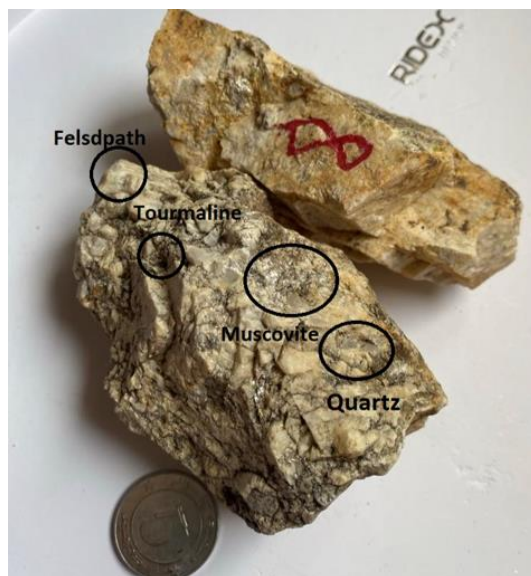
L'échantillon n°08 a été prélevé sur un affleurement riche en minéraux noirs et clairs, dans le cadre d'une analyse pétrographique (fig. 55).

À l'œil nu, la roche présente une structure massive et une texture hétérogranulaire, marquée par une variation dans la taille des cristaux. La couleur dominante est gris clair à blanchâtre, avec zones noires et de taches brunâtres qui correspondent à des oxydes de fer résultant d'une altération superficielle des minéraux ferromagnésiens.

Sur le plan minéralogique, la roche est composée principalement de quartz, reconnaissable à son aspect vitreux, sa cassure, et sa couleur translucide à gris clair. Elle contient également une proportion significative de micas à la muscovite, facilement identifiable à ses feuillets brillants argentés visibles à l'œil nu. Ces micas sont bien développés et abondants dans la matrice.

Des cristaux noirs de tourmaline sont également observés, dispersés de manière irrégulière dans la roche ; ils présentent une teinte noire à brun foncé.

L'absence de foliation, la texture irrégulière ainsi que la taille visible des minéraux indiquent que cette roche est probablement une pegmatite tourmalinifère à micas, cristallisée à partir d'un fluide magmatique enrichi en éléments volatils, typique des phases tardives de la différenciation granitique.

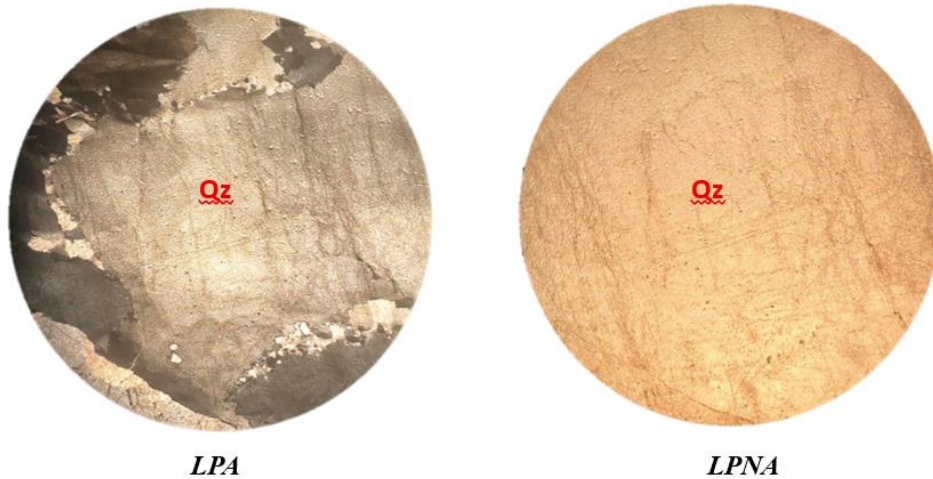


**Fig56. Photo macroscopique d'un échantillon de pegmatite de la région de Boumhani**

## Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés

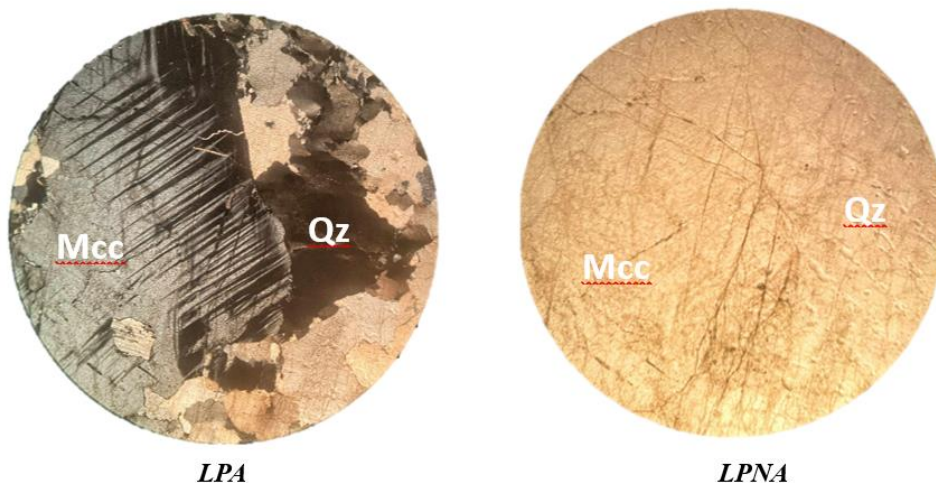
### 2.4.3.2 Etude microscopique :

**Le Quartz ( $\text{SiO}_2$ )** : il est abondant, xénomorphe, comblant les interstices entre les autres minéraux. Il présente une faible biréfringence en lumière polarisée analysée (LPA) et une extinction en taches grises en lumière polarisée non analysée (LPNA), avec parfois des bords ondulés caractéristiques.



*Fig57. Vue microscopique de Quartz en LPA et LPNA à faible grossissement-E8-*

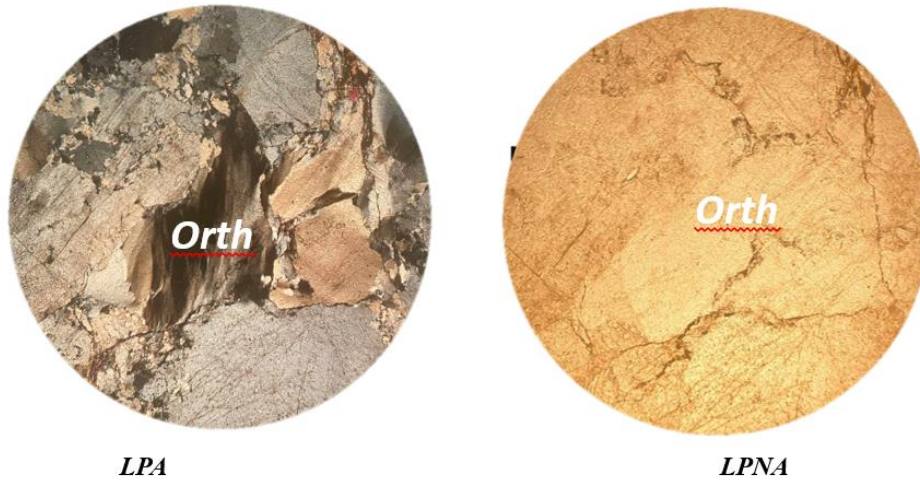
**La microcline ( $\text{KAISi}_3\text{O}_8$ )** : Se distingue facilement grâce à sa macle en grille typique, visible en LPA sous forme de stries croisées. Il apparaît sous forme de cristaux subautomorphes à xénomorphes, souvent de grande taille.



*Fig58. Vue microscopique de Microcline en LPA et LPNA à faible grossissement-E8-*

**L'orthose ( $\text{KAISi}_3\text{O}_8$ )** : Il est également présent sous forme de cristaux à clivage bien marqué, montrant une biréfringence moyenne et des couleurs d'interférence variées en LPA. Il peut être difficile à distinguer du microcline en l'absence de maillage visible.

### Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés

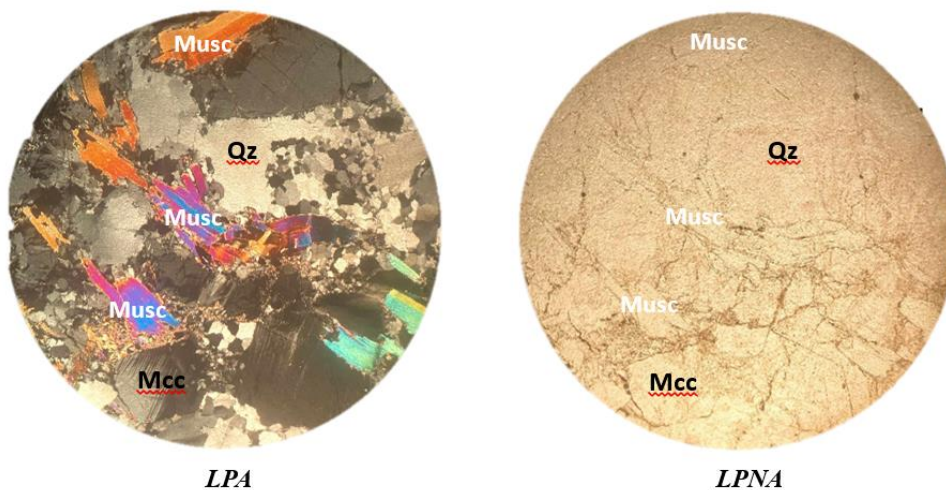


*Fig59. Vue microscopique de L'orthose en LPA et LPNA à faible grossissement-E8-*

#### La muscovite $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ :

Elle se reconnaît aisément par ses fines lamelles allongées à biréfringence élevée, souvent colorées en jaune, rose ou vert en LPA. Elle peut apparaître en paillettes isolées ou en agrégats, parfois avec des signes d'altération.

La texture globale de la roche est granoblastique à lépidoblastique, typique d'une cristallisation lente en profondeur, suggérant un environnement plutonique à évolution pegmatitique.



*Fig60. Vue microscopique d'une muscovite en LPA et LPNA à faible Grossissement-E8-*

## **Chapitre 03 : Géologie et pétrographie des sites étudiés**

### **Conclusion :**

Ce chapitre a permis de mieux comprendre le cadre géologique des pegmatites étudiées, indispensable à la compréhension de l'occurrence des pegmatites dans la région de Tizi Ouzou.

Le socle kabyle est caractérisé par une nature métamorphique complexe (schistes, micaschiste, marbre, granites, amphibolites, des gneiss, orthogneiss et migmatites...) et affecté par des réactivations alpines. Ces formations profondes sont intrudées localement par des corps pegmatitiques d'intérêt économique apparent.

L'étude pétrographique s'est focalisée sur quatre zones géographiques représentatives : *Azouza (Larbaâ Nath Irathen)*, *Meklaa*, *Pont de Bougie* et *Aïn Zaouia (Bou Mahani)*, sélectionnées pour la qualité de leurs affleurements pegmatitiques relativement fraîches.

Dans le secteur d'Azouza, les pegmatites affleurent de façon massive dans un granite clair à muscovite et recourent les unités encaissantes, traduisant ainsi une mise en place post-sédimentaire. À Meklaa, elles apparaissent sous forme lenticulaire injectée dans un granite porphyroïde.

Au Pont de Bougie, on observe des filons épais, parfois tourmalinifères, traversant les structures encaissantes, ce qui atteste aussi d'une mise en place post-sédimentaire, avec des indices de cristallisation tardive comme la présence de tourmaline. Enfin, à Aïn Zaouia, les pegmatites se disposent de manière discordante sur les structures encaissantes, sans perturbation des structures sédimentaires.

Au total, huit échantillons ont été prélevés des affleurements rocheux, dont six ont fait l'objet d'études macroscopique et microscopique détaillées. Ces pegmatites leucocrates de type filonien, encaissées dans les gneiss et orthogneiss à structure foliée, montrent une texture hétérogène avec des minéraux identifiables à l'œil nu comme le quartz, la muscovite, la biotite, le feldspath potassique et la tourmaline.

L'analyse pétrographique a confirmé cette minéralogie, avec la présence de quartz, plagioclase, orthose, microcline et micas. Un grain isolé, identifié comme étant du spodumène grâce à des propriétés optiques, renforce notre rattachement à ce type de formations.

Ce cadre lithologique et minéralogique constitue une base essentielle pour l'interprétation des analyses géochimiques (ICP-OES, DRX, XRF) qui visent à évaluer le potentiel en lithium de ces pegmatites dans le chapitre suivant.

# *Chapitre 04 :*

---

*Géochimie*

*Des sites étudiés*

# Chapitre 04 : Géochimie des sites étudiés

## 1. Introduction

Afin d'approfondir la caractérisation des pegmatites échantillonnées dans la région de Tizi Ouzou, une série d'analyses chimiques a été réalisée dans des laboratoires spécialisés. Ces investigations ont pour objectif de préciser la nature minéralogique des phases cristallisées ainsi que les teneurs en oxydes majeurs et éléments en traces de ces roches.

Compte tenu du coût élevé de ces analyses, seuls trois échantillons représentatifs (Meklaa 03, Pont de bougie 06 et Boumhani 08) ont été sélectionnés pour être étudiés. Ce choix a été guidé par leur richesse minéralogique apparente et leur fraîcheur.

Trois techniques analytiques ont été mises en œuvre dans cette démarche :

✓ **La diffraction des rayons X (DRX),**

Cette analyse, effectuée au laboratoire central de Sonatrach – Centre de Recherche et Développement (CRD), a permis l'identification des phases minérales présentes dans les échantillons, confirmant ou complétant les observations issues de l'analyse pétrographique.

✓ **La fluorescence des rayons X (XRF)**

Elle a permis de déterminer les teneurs en oxydes majeurs présents dans les échantillons, tels que le Si, Al, K, Na, Ca, Fe, Mg, et Ti. Cette méthode fournit une vue d'ensemble sur la composition chimique globale des pegmatites. Elle a été réalisée au laboratoire de l'ORGM.

✓ **La spectrométrie d'émission optique à plasma induit (ICP-OES)**

Cette analyse a été réalisée au sein de l'Office National de la Recherche Géologique et Minière (ORGM), a permis la quantification précise des éléments en traces caractéristiques des pegmatites à lithium, tels que le Li, Be, Rb et Cs.

Les résultats sont présentés sous forme de tableaux analytiques et diagrammes comparatifs, accompagnés d'une interprétation détaillée. Cette étape analytique est essentielle pour identifier les pegmatites les plus enrichies et affiner l'évaluation du potentiel économique de la zone d'étude.

# Chapitre 04 : Géochimie des sites étudiés

## 2. Analyse par diffractométrie des rayons x (DRX) :

### 2.1.Principe de l'analyse

L'analyse par diffraction des rayons X repose sur l'interaction d'un faisceau de rayons X avec un matériau cristallin. L'échantillon, finement broyé, est monté sur un porte-échantillon et exposé à un faisceau monochromatique de rayons X. Les plans atomiques du réseau cristallin diffractent ce faisceau selon la loi de Bragg :

$n\lambda=2d \sin\theta$  (où  $\lambda$  =longueur d'onde en angströms,  $d$ = distance réticulaire en angströms et  $\theta$  = angle de diffraction ou de réflexion en degrés).

Le diffractogramme obtenu (intensité en fonction de l'angle  $2\theta$ ) révèle des pics caractéristiques des différentes *phases cristallines* présentes dans l'échantillon. Chaque pic est défini par sa position (angle  $2\theta$ ) et son intensité.

L'identification des phases minérales se fait par comparaison avec les fiches standards du fichier PDF-ICDD (Powder Diffraction File – International Center for Diffraction Data).

### 2.2. Interprétation de l'analyse DRX de l'échantillon n°1 (Zh-Juin25) :

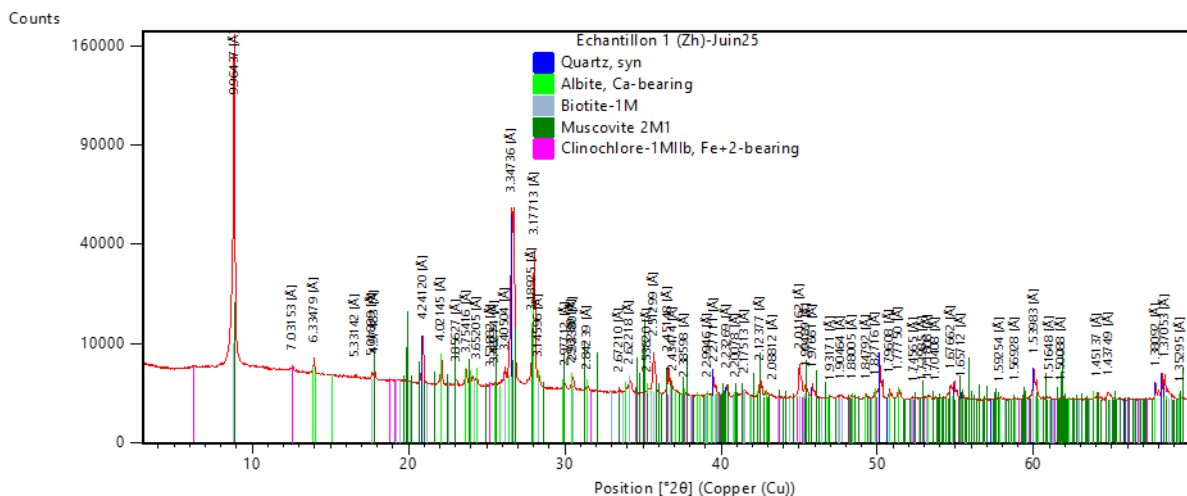


Fig61. Diagramme de diffraction des rayons X (DRX) de l'échantillon (Zh-Juin25)

L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) de l'échantillon « Zh-Juin25 » révèle une minéralogie complexe et indicative d'un faciès métamorphique à dominante alumino-silicatée, avec une forte contribution de phases silicatées primaires et secondaires.

## Chapitre 04 : Géochimie des sites étudiés

### 2.2.1 Phases minérales identifiées :

#### **Quartz (SiO<sub>2</sub>) :**

Le quartz est la phase minérale dominante dans le diffractogramme, comme en témoigne l'intensité très marquée du pic principal autour de 3.34 Å ( $\approx 26.6^\circ 2\theta$ ), caractéristique de cette espèce minérale. Sa cristallinité élevée et sa forte proportion traduisent une abondance de silice libre dans l'échantillon, typique des formations granitiques, pegmatitiques ou métamorphiques évoluées.

Le quartz est un minéral très stable thermiquement et chimiquement, ce qui justifie sa persistance dans divers environnements pétrogénétiques. Son abondance ici pourrait également être liée à un fort degré de différenciation magmatique ou aussi à une recristallisation métamorphique.

#### **Albite : feldspath calco-sodique ((Na,Ca)Al(Si,Al)<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) :**

La présence de l'albite, feldspath plagioclase riche en sodium et calcique, est bien attestée par plusieurs pics bien définis, notamment dans la zone de 4.0 – 3.2 Å. Ce minéral joue un rôle essentiel dans les roches granitiques et pegmatitiques, où il cristallise à un stade intermédiaire à tardif du refroidissement magmatique.

Dans les terrains métamorphiques, il peut résulter d'une recristallisation ou d'une transformation métasomatique des feldspaths antérieurs. Son identification dans cet échantillon souligne la présence d'un environnement riche en éléments alcalins, en accord avec une genèse pegmatitique ou un métamorphisme de basse pression.

#### **Biotite-1M (mica noir ferromagnésien) :**

La biotite a été identifiée également sous sa polymorphe monoclinique 1M, avec des pics caractéristiques entre 9 – 10 Å et ~3.0 Å, correspondant aux plans basaux et secondaires de la structure micacée. Il s'agit d'un mica riche en Fe<sup>2+</sup> et Mg, souvent associé aux roches magmatiques intermédiaires à acides et aux métapélites.

Sa composition chimique, enrichie en fer et en potassium, indique un environnement relativement réducteur et alumineux, avec des conditions thermiques modérées à élevées. Sa

## Chapitre 04 : Géochimie des sites étudiés

présence dans cet échantillon suggère un stade métamorphique bien affirmé, ou une différenciation pegmatitique ayant conservé les micas ferromagnésiens.

### **Muscovite 2M1 (mica blanc potassique) :**

La muscovite est bien visible dans le diffractogramme avec des pics nets autour de 10 Å (plan basal) et d'autres secondaires aux alentours de 2.9 – 3.0 Å. Le polymorphe 2M1 est typique d'une muscovite stable, bien cristallisée, ce qui reflète une formation dans un environnement à pression et température modérées.

La muscovite est un minéral indicateur des séries alumineuses, souvent présent dans les schistes métapélitiques, les gneiss ou les pegmatites leucocrates. Sa présence traduit un enrichissement en Al, K et Si, compatible avec un environnement tectonique de socle métamorphique ou de chambre magmatique évoluée. Elle est également un bon indicateur des processus hydrothermaux lorsqu'elle remplace d'autres silicates.

### **Clinochlore-1MIIb, chlorite ferreuse ((Mg,Fe)<sub>6</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>8</sub>) :**

La clinochlore, membre ferromagnésien du groupe des chlorites, a été détectée par des pics caractéristiques dans la région de 14 – 7 Å, correspondant à la maille basale de cette phyllosilicate. Ce minéral se forme généralement lors des stades rétrogrades du métamorphisme, par altération de la biotite ou de l'amphibole, et il est souvent associé à des conditions plus hydratées, à basses températures.

Le chlorite observé ici, riche en Fe<sup>2+</sup>, témoigne d'un contexte rétrograde ou d'une altération hydrothermale affectant une roche préalablement riche en micas ou en amphiboles. Elle traduit également un environnement potentiellement réducteur, dans lequel la mobilité du fer est limitée.

L'échantillon n°1 présente un assemblage minéralogique compatible avec une pegmatite injectée dans un encaissant de schiste satiné. Les minéraux révélés par DRX traduisent une évolution polyphasée, marquée par des conditions de cristallisation silicatées, suivies d'altérations hydrothermales ou métamorphiques rétrogrades. Cette minéralogie traduit un système évolutif, avec un potentiel pour les éléments rares dans les phases accessoire (comme la biotite ou les chlorites ferromagnésiennes), en lien avec la dynamique pegmatitique dans les zones métamorphiques de la région étudiée.

# Chapitre 04 : Géochimie des sites étudiés

## 2.3. Interprétation de l'analyse DRX de l'échantillon 2 (Juin25) :

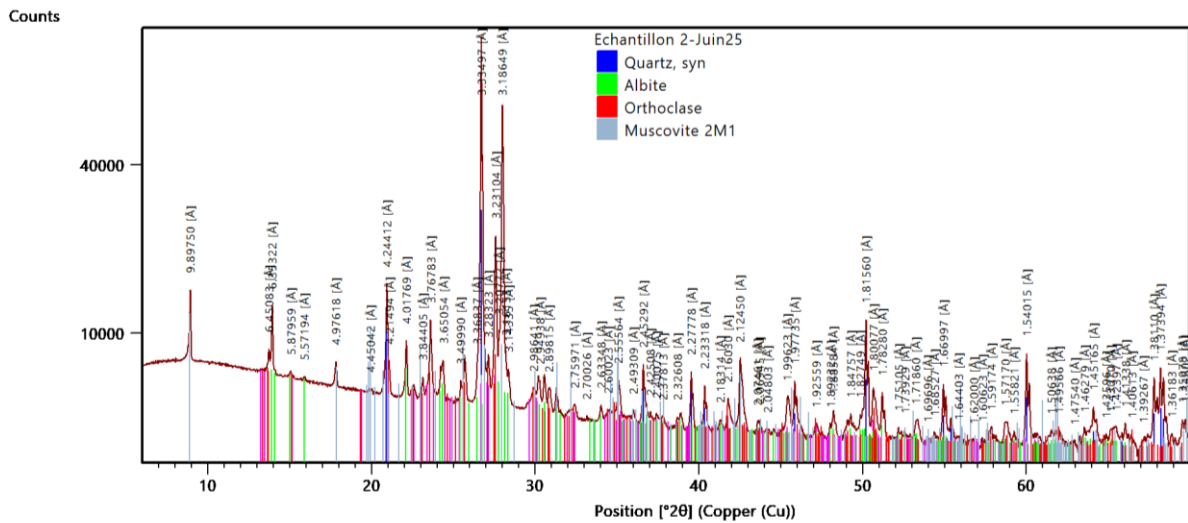


Fig62 : Diagramme de diffraction des rayons X (DRX) de l'échantillon 2 (Juin25)

Le diffractogramme obtenu pour l'échantillon N°2 révèle une assemblage minéralogique typique d'un faciès pegmatitique à muscovite, dominé par des silicates alcalins et alumineux. L'analyse met en évidence une cristallisation bien ordonnée, avec des phases majeures comme le quartz, l'albite, l'orthoclase et la muscovite. Cet assemblage est caractéristique des pegmatites de type granitique, dans lesquelles la différenciation magmatique avancée favorise la formation de feldspaths alcalins et de micas blancs bien cristallisés.

La présence simultanée d'albite et d'orthoclase suggère une co-cristallisation de feldspaths dans un environnement chimique évolué, tandis que la muscovite témoigne d'un contexte alumineux marqué.

### 2.3.1 Phases minérales identifiées :

#### Quartz (SiO<sub>2</sub>) :

Le quartz apparaît comme la phase dominante dans l'échantillon, confirmé par la présence d'un pic très intense vers 3.34 Å, correspondant à la maille cristalline typique de ce minéral. La netteté et l'intensité de ses pics dans le diffractogramme traduisent une excellente cristallinité. Minéral stable, le quartz est un constituant commun des roches ignées acides, des pegmatites et des roches métamorphiques évoluées. Sa présence ici indique une forte teneur en silice libre et témoigne probablement d'un environnement de cristallisation tardive dans un système magmatique ou d'une recristallisation métamorphique statique, souvent associée à des fluides siliceux.

## Chapitre 04 : Géochimie des sites étudiés

### **Albite ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) :**

L'albite, plagioclase sodique, est également bien représentée dans le spectre, avec des pics situés entre 4.0 et 3.2 Å. Ce minéral feldspathique est typique des séries magmatiques différenciées et se forme souvent en association avec le quartz et la muscovite dans les pegmatites ou les roches granitiques. Sa structure cristalline stable à basse température et sa composition riche en sodium indiquent un stade de cristallisation tardive du magma ou un métamorphisme de faible grade.

La présence d'albite dans cet échantillon souligne un environnement alcalin sodique, compatible avec une genèse pegmatitique évoluée ou une transformation métasomatique des feldspaths calco-sodiques.

### **Orthoclase (K-feldspath) :**

L'orthoclase est bien identifié par des pics nets dans les plages caractéristiques des feldspaths potassiques, notamment autour de 3.2 – 3.0 Å. Ce minéral est un feldspath alcalin riche en potassium, typique des granites, syénites et pegmatites. Sa composition chimique révèle une faible teneur en impuretés (Na, Ca, Ba), ce qui témoigne d'une bonne différenciation magmatique.

L'orthoclase se forme à des températures intermédiaires à basses, souvent après le quartz et avant les micas. Dans cet échantillon, sa présence, conjuguée à celle de l'albite, suggère un équilibre de type perthitique ou une coexistence feldspathique binaire, confirmant un environnement de cristallisation tardi-magmatique, typique des pegmatites granitiques.

### **Muscovite 2M1 (mica blanc potassique) :**

La muscovite est représentée sous sa forme 2M1, polymorphe stable et bien cristallisé, avec des pics caractéristiques proches de 10 Å (plan basal), ainsi qu'aux environs de 2.9 – 3.0 Å. Ce mica blanc est un indicateur classique de séries alumineuses, présent dans les schistes, les gneiss, mais aussi dans les pegmatites leucocrates.

La composition chimique riche en Al, Si et K, avec des traces de Fe, Mg, Na et Ti, témoigne d'une minéralogie évoluée et stable. Sa présence dans cet échantillon suggère un environnement de cristallisation calme, à température moyenne, et conforte l'idée d'un système chimique peralumineux, cohérent avec les pegmatites à muscovite.

## Chapitre 04 : Géochimie des sites étudiés

L'échantillon N° 2 est typique d'une pegmatite à dominante quartzo-feldspathique avec une signature alcaline bien marquée. L'association albite + orthose + muscovite suggère un système évolutif riche en fluides tardi-pegmatitiques et fortement potentiels en métaux rares. Ce type de minéralogie est donc favorable à la présence d'éléments rares et de métaux critiques en trace dans les phases accessoires, et illustre une dynamique de cristallisation différenciée dans les pegmatites de la région étudiée.

### 2.4. Interprétation de l'analyse DRX de l'échantillon 3 (Juin25) :

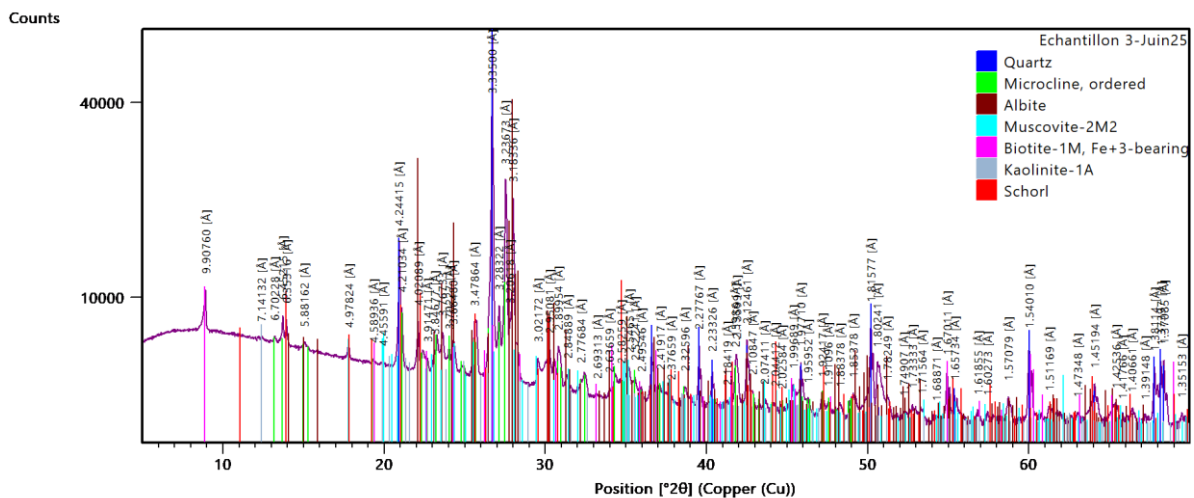


Fig63 : Diagramme de diffraction des rayons X (DRX) de l'échantillon 3 (Juin25)

L'analyse DRX de l'échantillon n°3 révèle une minéralogie très évoluée et typique des pegmatites différenciées, avec une combinaison de silicates primaires (quartz, feldspaths, micas) et de phases secondaires ou accessoires (kaolinite, tourmaline de type schorl). Cet assemblage est caractéristique d'un système peralumineux à borosilicates, souvent associé à des conditions hydrothermales tardives ou à une altération de haute intensité.

La présence de minéraux borés comme la schorl, ainsi que de micas ferrifères et de kaolinite, indique une évolution complexe du système, avec des apports fluides et une possible zonation dans le corps pegmatitique.

#### 2.4.1 Phases minérales identifiées :

##### Quartz (SiO<sub>2</sub>) :

Le quartz est une fois de plus une phase majeure de l'échantillon, identifiable par ses pics intenses et nets, notamment autour de 3.34 Å, ce qui reflète une cristallinité élevée. Sa dominance traduit une forte concentration en silice, typique des pegmatites à haut degré de

## Chapitre 04 : Géochimie des sites étudiés

fractionnement. Sa persistance dans l'ensemble des échantillons confirme un environnement chimique riche en Si et une cristallisation tardive à partir de fluides résiduels siliceux, en lien avec la différenciation magmatique.

### **Microcline ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) :**

Le microcline, feldspath potassique triclinique, se distingue ici par la présence de pics spécifiques légèrement décalés par rapport à l'orthoclase. Ce minéral se forme à basse température, lors du refroidissement lent des magmas granitiques, ou dans les conditions pegmatitiques profondes. Sa structure bien ordonnée reflète un environnement de cristallisation stable et évolué.

Dans les pegmatites, le microcline est souvent l'un des derniers feldspaths à cristalliser, et sa présence dans cet échantillon est un marqueur de différenciation tardive, typique des zones internes des corps pegmatitiques.

### **Albite ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) :**

L'albite est également bien représentée, comme dans les autres échantillons, mais ici avec une composition très sodique et peu calcique, ce qui indique une albite quasi pure. Sa structure stable à basse température suggère une cristallisation tardive dans un système alcalin sodique. Elle est souvent associée au microcline dans les pegmatites de type granitique à plagioclases différenciés.

La présence conjointe de l'albite avec la muscovite et le quartz forme un assemblage minéralogique peralumineux classique, souvent associé à la présence de lithium ou de boron dans les phases accessoires.

### **Muscovite (mica blanc potassique) :**

La muscovite dans cet échantillon se distingue par une composition alumineuse riche et bien cristallisée, avec un rapport Si/Al élevé. Elle témoigne d'un environnement de cristallisation relativement stable, souvent lié à la précipitation tardive à partir de fluides résiduels riches en Al et K.

Dans les pegmatites, la muscovite peut également résulter d'une altération hydrothermale du feldspath. Sa présence abondante confirme le caractère peralumineux du système, tandis que sa coexistence avec la kaolinite pourrait indiquer un début d'altération des micas en conditions acides ou fluées.

## Chapitre 04 : Géochimie des sites étudiés

### **Biotite-1M, ferrifère (mica noir Fe<sup>3+</sup>) :**

La biotite détectée ici est de type 1M, contenant du fer ferrique (Fe<sup>3+</sup>), ce qui est relativement rare et témoigne d'un environnement oxydant. Ce mica noir ferromagnésien est un minéral précoce, souvent remplacé ou altéré lors des stades hydrothermaux. Sa présence dans cet échantillon indique un stade magmatique ou submagmatique antérieur, suivi probablement d'une évolution vers des conditions plus oxydantes. La biotite est également un minéral indicateur potentiel pour les éléments traces tels que le lithium, le fluor ou le bore, présents dans les fluides pegmatitiques.

### **Kaolinite (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>) :**

La kaolinite est un minéral argileux secondaire, formé par l'altération hydrothermale ou météorique des feldspaths et micas, dans des conditions acides. Sa détection dans cet échantillon suggère un processus d'altération post-magmatique, affectant particulièrement les minéraux alumineux comme la muscovite ou l'albite. La kaolinite témoigne de la circulation de fluides acides riches en eau, capables de provoquer la décomposition des phyllosilicates primaires. Sa présence, bien que mineure, confirme un épisode d'altération hydrothermale localisée dans la pegmatite.

### **Schorl (tourmaline noire – NaFe<sub>3</sub>Al<sub>6</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>18</sub>(OH)<sub>4</sub>) :**

La présence de schorl, tourmaline noire ferrifère riche en sodium et bore, est particulièrement remarquable. Il s'agit d'un minéral typique des pegmatites borées, souvent associé à des fluides très différenciés, enrichis en éléments volatils comme B, F et Li. La schorl se forme lors des stades tardifs de cristallisation pegmatitique, parfois même en milieu hydrothermal. Son identification dans cet échantillon constitue un indicateur géochimique précieux, suggérant la possibilité d'une minéralisation borée, voire de la présence d'autres minéraux d'intérêt économique liés aux éléments légers.

L'analyse DRX de l'échantillon n°3 met en évidence une minéralogie complexe et évoluée, caractéristique des pegmatites fortement différenciées. L'association du quartz, des feldspaths (microcline et albite), des micas (muscovite et biotite), ainsi que de minéraux accessoires comme la kaolinite et la schorl, témoigne d'un système peralumineux, ayant subi une altération hydrothermale modérée à localement intense. Ces caractéristiques renforcent l'intérêt de cet échantillon dans la prospection de minéralisations liées aux fluides différenciés, notamment pour des éléments critiques tels que le lithium.

# Chapitre 04 : Géochimie des sites étudiés

## 2.5. Interprétation de l'analyse DRX de l'échantillon 4 (Juin25) :

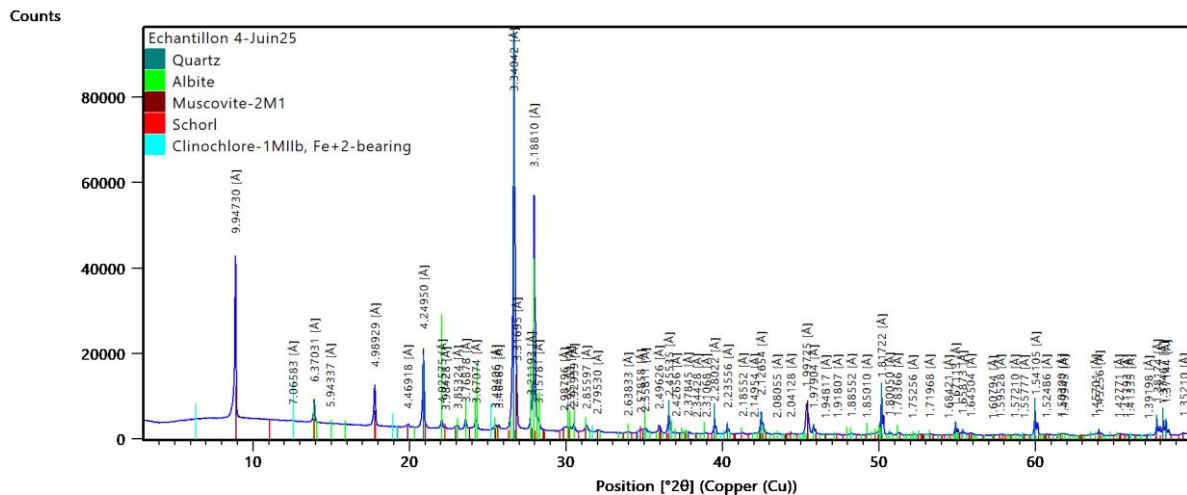


Fig64 : Diagramme de diffraction des rayons X (DRX) de l'échantillon 4 (Juin25)

L'échantillon N°4 présente une assemblage minéralogique typique des pegmatites évoluées, dominé par des silicates alumino-potassiques et des minéraux borés. L'association du quartz, de l'albite, de la muscovite, de la tourmaline (schorl) et de la chlorite (clinocllore) témoigne d'un système peralumineux à borosilicates, avec une composante hydrothermale marquée. Ces caractéristiques indiquent une cristallisation tardive à partir de fluides différenciés, dans un environnement géologique favorable à la concentration d'éléments critiques.

### 2.5.1 Phases minérales identifiées :

#### Quartz (SiO<sub>2</sub>) :

C'est l'un des minéraux majeurs de cet échantillon, identifiable par ses pics nets et intenses, notamment autour de 3.34 Å, caractéristiques d'un quartz bien cristallisé. Sa forte présence reflète une teneur élevée en silice libre, ce qui est typique des pegmatites à fort degré de différenciation. La cristallisation du quartz dans ce contexte témoigne d'une précipitation à partir de fluides magmatiques ou hydrothermaux tardifs.

#### Albite (NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) :

Il est détectée ici est pratiquement pure, à très faible teneur en calcium, ce qui indique une phase sodique bien différenciée. Ce feldspath se forme généralement à basse température dans les pegmatites évoluées. Sa présence renforce l'hypothèse d'un milieu alcalin sodique et d'un stade tardif de cristallisation, souvent associé à la concentration d'éléments légers comme le lithium, le bore ou le fluor.

## Chapitre 04 : Géochimie des sites étudiés

### **Muscovite 2M1:**

Elle apparaît ici sous sa forme bien cristallisée 2M1, avec des pics typiques autour de 10 Å. Ce mica potassique est un indicateur classique de milieux peralumineux, et sa présence dans cet échantillon confirme l'évolution chimique du système. Elle se forme en général à partir de fluides riches en Al et K, et peut également signaler un milieu hydrothermal stable à température modérée, cohérent avec le cadre pegmatitique.

### **Schorl (tourmaline noire) :**

La schorl, membre ferromagnésien du groupe des tourmalines, est une phase significative dans cet échantillon. Sa composition riche en fer, bore, et avec traces de lithium et fluor, indique une cristallisation tardive à partir de fluides très différenciés, typiques des pegmatites borées. Sa présence est un marqueur géochimique important, révélateur de potentiel pour les minéralisations en éléments critiques. C'est également un indicateur de conditions relativement oxydantes, à température modérée à faible.

### **Clinochlore:**

Appartenant au groupe des phyllosilicates, se manifeste par des pics dans la zone des 14–7 Å, caractéristiques de cette structure. Ce minéral secondaire se forme par altération rétrograde des micas noirs (biotite) ou dans des environnements hydrothermaux peu profonds. Sa présence ici suggère un épisode d'altération modérée, intervenu à un stade post-cristallin, soulignant une circulation fluide ayant affecté les minéraux ferromagnésiens initiaux.

L'échantillon 4 révèle une minéralogie riche en silicates alcalins, borés et alumineux, témoignant d'un environnement pegmatitique différencié, à composante hydrothermale et borée. L'association de minéraux comme la schorl, la muscovite, l'albite et le clinochlore traduit une évolution minéralogique complexe, favorable à la concentration de bore, lithium et fluor, éléments d'intérêt dans la prospection de ressources critiques.

## Chapitre 04 : Géochimie des sites étudiés

### 3. Analyse par fluorescence des rayons X (XRF) :

#### 3.1.Principe de l'analyse :

L'analyse par fluorescence des rayons X (XRF) repose sur l'excitation des atomes d'un échantillon solide par un faisceau de rayons X primaire. Lorsque ces rayons interagissent avec les atomes, ils provoquent l'éjection d'électrons des couches internes. Le réarrangement électronique qui suit entraîne l'émission de rayons X secondaires (fluorescents) dont l'énergie est caractéristique de chaque élément chimique.

La mesure des énergies et des intensités des rayons X émis permet de déterminer la nature (analyse qualitative) et la concentration (analyse quantitative) des éléments présents dans l'échantillon. Cette technique est particulièrement adaptée à l'analyse des éléments majeurs et mineurs, du sodium (Na) à l'uranium (U), dans des matrices solides homogènes.

#### 3.2.Interprétation d'analyses chimiques :

N d'échantillon	03	06	08
Lieux	Meklaa	Pont de bougie	Ain Zaouia
<b>Analysé par XRF Teneur en (%)</b>			
<b>SiO<sub>2</sub></b>	78,01	75,67	75,94
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	12,87	12,61	13,04
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1,09	1,22	0,61
<b>CaO</b>	0,34	1,6	0,54
<b>MgO</b>	0,09	0,51	0,1
<b>MnO</b>	0,05	0,06	<0,05
<b>TiO<sub>2</sub></b>	<0,05	<0,05	<0,05
<b>K<sub>2</sub>O</b>	3,51	1,43	4,75
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	2,31	4,98	3,24
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,19	0,41	0,23
<b>PAF</b>	0,72	1,99	0,86

*Tableau02 : Résultats des analyses XRF – Teneurs en oxydes majeurs (en %) des échantillons de pegmatites.*

Les résultats des analyses XRF révèlent une composition typique de pegmatites très différenciées.

- Les teneurs en silice (SiO<sub>2</sub>) sont particulièrement élevées, dépassant les 75 % dans les trois échantillons, ce qui témoigne du caractère très acide de la roche. Une telle richesse en silice est caractéristique des pegmatites à dominante quartzique, formées à partir de magmas évolués.

## Chapitre 04 : Géochimie des sites étudiés

- L'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), également présente à des teneurs importantes (autour de 13 %), indique la présence abondante de minéraux alumineux tels que les feldspaths et les micas, notamment la muscovite.
- Les teneurs en  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{Na}_2\text{O}$  sont toutes deux significatives, avec un enrichissement en potassium dans l'échantillon 06 (4,33 %) et une forte proportion de sodium dans les échantillons 06 et 08. Cela reflète une association de feldspaths potassiques (comme le microcline) et sodiques (comme l'albite), typique des pegmatites à cristallisation tardive. Le rapport  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  peut être utilisé comme indicateur du degré de différenciation : un rapport élevé, comme dans l'échantillon 03, suggère une cristallisation plus avancée dans l'évolution magmatique.
- Par ailleurs, les oxydes de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), de calcium ( $\text{CaO}$ ) et de magnésium ( $\text{MgO}$ ) sont présents en très faibles quantités. Cela confirme l'absence notable de minéraux ferromagnésiens (biotite, amphibole), traduisant une différenciation poussée du magma initial, appauvrie en éléments compatibles avec ces minéraux.
- La faible teneur en  $\text{MgO}$  notamment est un marqueur clair de cette évolution avancée. La perte au feu (PAF), modérée (0,7 à 2 %), peut être liée à la présence de phases hydratées comme les micas blancs (muscovite), ou de minéraux secondaires issus d'une altération hydrothermale post-magmatique.

En conclusion, les résultats des analyses XRF ont permis tout d'abord de confirmer l'étude pétrographique réalisée sur les quatre stations sélectionnées montrant ainsi la nature très différenciée et acide des pegmatites étudiées, avec une dominance accrue en silice, en feldspaths sodiques et potassiques, ainsi qu'une très faible teneur en minéraux ferromagnésiens. Ces caractéristiques traduisent une cristallisation typique d'un magma évolué étroitement associé aux minéralisations à métaux rares. Ce qui confirme une fois de plus l'intérêt économique de ce type de formations.

## Chapitre 04 : Géochimie des sites étudiés

### 4. Analyses par ICP-OES :

#### 4.1. Principe d'analyse :

L'analyse ICP-OES (Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometry), réalisée au niveau de l'ORGM, a permis de déterminer la concentration des éléments majeurs et traces dans les échantillons analysés après mise en solution acide.

Le principe repose sur l'introduction de l'échantillon sous forme d'aérosol dans un plasma d'argon à très haute température (~8000 K), où les atomes sont excités puis émettent une lumière caractéristique. Chaque élément chimique émet à une longueur d'onde précise, et l'intensité de cette émission, mesurée par un spectromètre optique, est proportionnelle à sa concentration.

Cette technique est particulièrement efficace pour les analyses géochimiques, car elle permet une détection rapide, précise et simultanée de nombreux éléments, notamment dans les pegmatites riches en métaux rares comme le lithium.

#### 4.2. Interprétation des analyses ICP-OES :

L'analyse des éléments traces obtenue par ICP-OES (Tableau n°3) montre une signature géochimique marquée par un enrichissement en terres rares légères (LREE) par rapport aux terres rares lourdes (HREE).

L'ensemble des échantillons analysés présentent des teneurs notables en néodyme (Nd), praséodyme (Pr), lanthane (La) et gadolinium (Gd), atteignant jusqu'à 2,66 ppm pour le Pr et 2,61 ppm pour le Gd. Ces éléments, fortement incompatibles, se concentrent généralement dans les phases résiduelles de cristallisation, ce qui reflète un fort degré de différenciation magmatique.

À l'inverse, certaines terres rares lourdes comme le thulium (Tm) et l'holmium (Ho) sont en dessous du seuil de détection (<LQ), suggérant une faible concentration de minéraux hôtes comme la monazite ou le xénotime pour ces éléments.

Le rapport entre LREE et HREE est également renforcé par la présence de l'yttrium (Y) à des niveaux significatifs (jusqu'à 3,52 ppm), ce qui indique un *apport hydrothermal tardif* ou une *signature mixte LCT–NYF*.

Enfin, la très faible teneur en europium (Eu) traduit une anomalie négative d'Eu, typique des pegmatites différenciées où cet élément est extrait précocement par les plagioclases.

## Chapitre 04 : Géochimie des sites étudiés

L'ensemble de ces observations renforce l'interprétation d'un système pegmatitiques évolué, enrichi en éléments critiques tels que les métaux rares à forte valeur économique.

<b>Tableau03. Résultat d'analyses chimiques ICP-OES Teneur en PPM et %</b>			
<b>N échantillon</b>	<b>03</b>	<b>06</b>	<b>08</b>
<b>Ce</b>	<LQ	<b>0,91</b>	<LQ
<b>Dy</b>	<b>0,49</b>	<b>0,42</b>	<b>0,21</b>
<b>Er</b>	<b>0,46</b>	<b>0,42</b>	<b>0,23</b>
<b>Eu</b>	0,14	0,03	0,05
<b>Gd</b>	<b>2,30</b>	<b>2,61</b>	<b>1,05</b>
<b>Ho</b>	<b>0,06</b>	<b>0,30</b>	<LQ
<b>La</b>	2,85	1,24	0,97
<b>Lu</b>	<b>0,19</b>	<b>0,25</b>	0,07
<b>Nd</b>	<b>2,58</b>	<b>1,29</b>	<b>1,16</b>
<b>Pr</b>	<b>2,09</b>	<b>2,66</b>	<b>0,90</b>
<b>Se</b>	<b>3,31</b>	<b>1,31</b>	<b>0,97</b>
<b>Sm</b>	<b>0,52</b>	<b>0,24</b>	<b>0,18</b>
<b>Tb</b>	<b>0,44</b>	<b>0,56</b>	<b>0,06</b>
<b>Tm</b>	<LQ	<LQ	<LQ
<b>Y</b>	3,13	3,52	2,62
<b>Yb</b>	<b>0,31</b>	<b>0,36</b>	<b>0,22</b>
<b>Li</b>	0,0023	0,0013	0,0012
<b>W</b>	<LQ	<LQ	<LQ
<b>Sn</b>	0,0006	0,0019	0,0006
<b>Ba</b>	0,0052	0,0013	0,0856
<b>Ge</b>	<LQ	<LQ	<LQ
<b>Rb</b>	<LQ	<LQ	<LQ
<b>Cs</b>	0,0269	0,0217	0,0243
<b>Sr</b>	0,0030	0,0027	0,0065
<b>Se</b>	<LQ	<LQ	<LQ
<b>Nb</b>	0,0021	0,0011	0,0007
<b>Ta</b>	0,0001	0,0002	0,0001

## Chapitre 04 : Géochimie des sites étudiés

D'autre part, les analyses ICP-OES confirment la nature très évoluée et géochimiquement fertile des pegmatites étudiées car le lithium a été détecté dans tous les échantillons analysés. Les concentrations en lithium (Li) avec des valeurs comprises entre 0,0012 % et 0,0023 % sont relativement modestes en valeur absolue.

En plus du lithium, d'autres éléments étroitement liés au groupe des métaux rares, ont été également détectés dans les pegmatites analysées. Parmi ces éléments on cite :

- Le césium (Cs) présente des teneurs remarquablement élevées (jusqu'à 0,0269 %), ce qui est typique des pegmatites de type LCT (Lithium–Césium–Tantale). Le Cs est un élément très incompatible qui se concentre dans les dernières fractions de la cristallisation, et son enrichissement constitue un bon indicateur de différenciation magmatique avancée.

- Le tantale (Ta) et le niobium (Nb), également présents, sont des éléments à haut champ de force (HFSE) qui accompagnent fréquemment les pegmatites enrichies en métaux rares. Le rapport Nb/Ta supérieur à 10 dans l'échantillon 03 suggère une origine LCT évoluée, compatible avec une cristallisation dans un système enrichi en fluides post-magmatique.

- Les terres rares (REE), telles que le néodyme (Nd), le cérium (Ce), le gadolinium (Gd) et l'yttrium (Y), sont détectées à des teneurs variables mais significatives. Leur présence témoigne d'une activité hydrothermale associée aux stades finaux de la cristallisation pegmatitiques. Ces éléments sont souvent concentrés dans des minéraux accessoires comme la monazite ou l'allanite.

En revanche, les éléments plus compatibles comme le strontium (Sr) et le baryum (Ba) présentent des teneurs faibles à modérées, ce qui indique qu'ils ont probablement été extraits précocement du magma lors de la cristallisation des feldspaths.

L'analyse ICP-OES réalisée sur les échantillons de pegmatite issus du socle kabyle de la région de Tizi Ouzou révèle une signature géochimique compatible avec une minéralisation en lithium. La détection de teneurs mesurables en lithium, ainsi que l'enrichissement en éléments indicateurs de différenciation magmatique tels que le césium, le niobium, le tantale et plusieurs terres rares (notamment le néodyme, le praséodyme et le lanthane), suggèrent que ces pegmatites ont cristallisé à partir de fluides résiduels enrichis en éléments incompatibles

## **Chapitre 04 : Géochimie des sites étudiés**

La présence de terres rares légères et la faible concentration en strontium et europium, souvent extraits précocement dans les plagioclases, confirment un haut degré de fractionnement dans le système magmatique. L'yttrium et certains éléments lourds, bien que faiblement concentrés, pourraient signaler une influence mixte entre un système LCT (Lithium-Césium-Tantale) et un environnement NYF (Niobium-Yttrium-Fluorine), ce qui reflète la complexité géochimique du socle kabyle.

Dans ce contexte, les données ICP-OES renforcent l'idée d'un potentiel réel en lithium dans les pegmatites de la région de Tizi Ouzou, notamment en raison de leur caractère fortement différencié, favorable à la concentration de métaux critiques.

## Conclusion Générale

Les résultats combinés de la description géologique de terrain, de l'étude pétrographique et des analyses XRF, DRX et ICP-OES permettent de caractériser de manière approfondie les pegmatites étudiées dans le socle kabyle, au sein de la région de Tizi Ouzou.

**L'étude pétrographique** a permis de déterminer la composition minéralogique des pegmatites de la région de Tizi Ouzou et de marquer la présence d'un minéral ; le *spodumène* étroitement associé aux pegmatites lithinifères

**L'analyse XRF** révèle une composition majoritairement acide, marquée par des teneurs très élevées en silice, associées à des concentrations importantes en oxydes d'aluminium et en alcalins ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ), ce qui confirme une origine granitique évoluée. L'appauvrissement en éléments ferromagnésiens (fer, magnésium, calcium) et en titane reflète un système fortement différencié, caractéristique des stades terminaux de cristallisation magmatique.

**Les données de diffraction des rayons X (DRX)** confirment la nature minéralogique des échantillons, identifiant la présence dominante de quartz, d'albite, de muscovite et de tourmaline (schorl). Ces minéraux sont typiques des pegmatites de type LCT, souvent associées à des concentrations en lithium, césium et tantale.

**L'analyse ICP-OES** complète l'interprétation en mettant en évidence des teneurs significatives en éléments critiques, dont le lithium, les terres rares légères, le tantale, le césium et le niobium. La signature chimique est cohérente avec celle des pegmatites enrichies en éléments rares, suggérant un potentiel minier non négligeable dans le contexte géologique du socle kabyle.

Cependant, et quoique ces valeurs sont assez faibles du point de vue quantitatif ; elles sont assez significatives qualitativement car sur le plan géologique et géochimique, elles traduisent un enrichissement bien visible et constant dans toutes les phases résiduelles du magma parent.

La présence constante du lithium même en faible quantité dans les pegmatites indique forcément la présence potentielle de minéraux lithinifères qui sont essentiellement le spodumène (où, son identification reste incertaine), donc les pegmatites sont fertiles, ce qui permet de confirmer la nature fertile des pegmatites analysées.

La sélection de bons critères d'exploration étroitement liés aux gisements à métaux rares associés aux pegmatites peut donc nous guider vers la découverte des zones pegmatitiques plus perspectives c'est à dire les pegmatites minéralisées. Les pegmatites du socle kabyle représenteraient de ce fait une importante réserve lithologique pour une future exploration minière.

Ainsi, la convergence de toutes les données pétrographiques et géochimiques, confirme que les pegmatites de la région de Tizi Ouzou présenteraient des caractéristiques géologiques assez favorables à la concentration du lithium associé aux pegmatites lithinifères et représenteraient de ce fait un potentiel non négligeable pour la recherche et l'exploration des pegmatites à des métaux rares en générale et lithinifères en particulier.

De ce fait, notre étude a révélé qu'une exploration régionale basée sur des investigations plus quantitatives est fortement recommandées sur les pegmatites du socle kabyle car elle peut mener à une importante découverte. Ces résultats ouvrent des perspectives sérieuses pour la valorisation économique de ces formations, dans un contexte national où la recherche de ressources énergétiques alternatives devient un enjeu prioritaire.

## Référence bibliographique :

Agence Ecofin. (2024). Côte d'Ivoire : African Gold découvre du minerai de lithium sur le projet Agboville.

Apéron, A. (1867). Constitution géologique de la Kabylie.

Belkaid, F. (2019). Géologie structurale de la Kabylie et son potentiel minier. Alger : Éditions Universitaires d'Algérie.

Béni-Slimane, M., & Kacimi, M. (2014). Tectonique et sédimentation des nappes de flyschs en Grande Kabylie. *Revue Africaine de Géologie*, 1, 39–53.

Bossière, G. (1978). Étude des paragenèses postcinématiques dans les métapelites de la couverture du socle de Grande Kabylie (Algérie) : mise en évidence d'un métamorphisme de basse pression. *Bulletin de la Société Géologique de France*, Série 7, Volume XX (3), 289–298.

Bouillin, J. P. (1986). Les Maghrébides : une chaîne de collision à l'extrémité occidentale de la chaîne alpine. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 8(2), 325–334.

Bradley, D., McCauley, A., & Stillings, L. (2017). Lithium – A global overview of sources, production, and markets. U.S. Geological Survey.

BRGM / Algérie. (1977). Géologie des massifs cristallins de Kabylie. Orléans : BRGM.

Brady, D. A. (2020). Lithium Mining and Environmental Impact. *Scientific American*, 325(5), 42–49.

Černý, P., & Ercit, T. S. (2005). The classification of granitic pegmatites revisited. *The Canadian Mineralogist*, 43(6), 2005–2026.

Derradji, A., & Boukhalfa, M. (2021). Les ressources minérales de l'Algérie : Perspectives et défis. *Revue Algérienne des Sciences de la Terre*, 15(2), 45–67.

Diakité, D. (2022). Pegmatites lithinifères (Li-Cs-Ta) et roches plutoniques de Bougouni (Mali). Thèse de doctorat, Université de Lille.

Direction Nationale de la Géologie et des Mines du Mali (DNGM). (2021). Potentiel minier du Mali : Focus sur le lithium.

Domzig, A. (2006). Structure et évolution tectonique des Maghrébides orientales (Algérie). Thèse de doctorat, Université de Montpellier II.

Dupont, J. (2019). Géologie et potentiel économique des gisements de lithium en contexte pegmatitique. Thèse de doctorat, Université de Lorraine.

Durand-Delga, M. (1969). La chaîne tello-rifaine : Structure, stratigraphie et évolution géodynamique. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7(11), 1020–1050.

Durand-Delga, M., et al. (1972). Notices explicatives sur la carte géologique du Djurdjura. Service géologique national, Algérie.

- ENS Lyon – Planet-Terre. (2021). Le lithium : un "or blanc" énergétique et stratégique.
- Fabre, J. (1988). Géologie du Maghreb. Paris : CNRS Éditions.
- Ficheur, E. (1890). Description géologique de la Kabylie du Djurdjura : Étude spéciale des terrains tertiaires. Paris : Imprimerie Nationale.
- Frizon de Lamotte, D., et al. (2000). The Alpine belt of the Maghreb and the Betic Cordilleras : An overview. *Mémoires du Muséum national d'Histoire naturelle*, 186, 237–277.
- Geoscience Australia. (2023). Australian Resource Reviews : Lithium.
- Gelard, J. P. (1979). Géologie du Nord-Est de la Grande Kabylie. Thèse de doctorat, Université de Dijon.
- Gogodo, A. S. (2021). A review of the geology and structural controls on Bikita pegmatites. Université du Witwatersrand.
- Hardwick, W. M. (2018). Lithium and its Extraction Methods: A Review. *Journal of Materials Science*, 53, 1640–1657.
- Harbi, H., & Ouzegane, K. (2017). Les formations pegmatitiques en Algérie et leur potentiel économique. *Journal of North African Geology*, 10(1), 98–112.
- Harris, J. G. (2015). *The Geology of Lithium*. Springer.
- Jambor, J. L., & Lagache, M. (2003). Lithium-bearing pegmatites: An overview. *Mineralogical Association of Canada*, 42(3), 187–201.
- Jaskula, B. W. (2016). Lithium. In *Mineral Commodity Summaries 2016* (pp. 94–95). USGS.
- Kesler, S. E., & Wilkinson, W. A. (2012). The global lithium market: A comparative analysis. *Economic Geology*, 107(6), 1083–1094.
- London, D. (2008). Pegmatites. *The Canadian Mineralogist*, 46(4), 1285–1320.
- Mahé, A. (2001). Histoire de la Grande Kabylie, XIXe–XXe siècles. Paris : Éditions Bouchène.
- Martin, S. (2020). Les saumures riches en lithium : genèse et exploitation. Mémoire de Master, Université de Bordeaux.
- Muratour, P. (1958). Étude stratigraphique et sédimentologique de la basse Kabylie.
- Naak, M. (1996). Du rifting thétyisien au cadre alpino-méditerranéen de la dorsale kabyle du Djurdjura. Thèse de doctorat d'État, USTHB, Alger.
- ResearchGate. (2021). Effects of lithium resource exploitation on surface water at Jiajika mine, China.
- Saadallah, A., et al. (1996). Djurdjura Flower Structure and the Major Tectonic Zones of the Maghrebides. ResearchGate.

Salhi, A. (2020). Potentiel minéral de la Kabylie : Analyse géochimique et implications économiques. *Bulletin de la Société Géologique d'Algérie*, 28(4), 123–141.

Talison Lithium. (2024). Greenbushes Lithium Operations.

Tarascon, J.-M., & Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 414(6861), 359–367.

Thiébaud, J. (1951). Étude géologique des terrains métamorphiques de la Grande Kabylie. Paris : CNRS.

US Geological Survey (USGS). (2023). Mineral Commodity Summaries – Lithium.

Ville, L. (1868). Études géologiques réalisées dans la Kabylie.

Vila, J. M. (1980). La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. Thèse de doctorat, Université de Paris-Sud, Orsay.

Wang, Z., et al. (2022). Evolution and Li Mineralization of the No. 134 Pegmatite in Jiajika. *Minerals*, 12(1), 45.

Wood Mackenzie. (2020). Jiajika - Lithium mine Report.

Ziani, A., & Arkoub, M. (1994). Étude géologique des terrains affleurant dans le socle kabyle. *Revue des Sciences de la Terre d'Algérie*, 6(1), xx–xx.