

République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique
Université d'Oran 2 Mohamed ben Ahmed
Faculté des Sciences de la Terre et de L'univers
Département des sciences de la terre

Mémoire

Présenté pour l'obtention du
De Master en Sciences de la terre

Option : GEODYNAMIQUE DE LA LITHOSPHERE

Thème :

**Les terres Rares dans Le Hoggar central
Indices et roches encaissantes**

Présenté par : **Melle. Tlemsani Baya**

Soutenu le 25 juin 2023, devant la commission d'examen :

Mr. A.SEDDIKI	Professeur	université d'Oran 2	président
Mr. A.BAAOUGUE	MAA	Université Oran 2	Encadreur
Mr.MAHMOUDI	MAA	Université Oran 2	Examineur

Année : 2022/2023

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail Au cher défunt, mon père Afif que Dieu lui fasse miséricorde et A ma très chère mère et À ma très chère sœur Sara tout au long de mon parcours universitaires qui m'a Soutenu et encouragé avant et pendant mes études Afin que ce mémoire puisse aboutir Aujourd'hui.

Je dédie A mes chers frères ilyas et Ahmed et Afif

Je dédie aussi ce travail à mes amis en particulier Mohamed et amira qui m'ont soutenu encouragé et apporté leur aide tout au long de ce travail.

Tlemsani Baya

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier ceux qui ont contribué chacun pour sa manière de surmonter les difficultés et de me permettre d'atteindre mon objectif

*Monsieur **A.BAAOUGUE**, a été en sa qualité d'encadrement, l'élément principal je le remercie pour sa compréhension, son sérieux travail ses critiques, sa gentillesse et sa générosité et pour les conditions et les moyens de travail qu'il m'a apporté.*

*Je remercie Monsieur **A. SEDDIKI** de présider ce jury et je lui exprime mon profond respect et ma gratitude pour tout ce qu'il nous a transmis durant mes études dans la spécialité.*

*Mes sincères remerciements également à **Mr.MAHMOUDI** pour avoir accepté d'examiner et juger ce travail.*

Je remercie également les professeurs du département de géologie, de la faculté des sciences de la terre et l'univers pour les connaissances reçues et pour l'engagement dont ils ont fait preuve tout au long de notre formation.

Résumé

Les métaux de terres rares présentent un groupe de minéraux qui sont utilisés dans une variété d'applications technologiques telles que les aimants permanents, les batteries rechargeables, les écrans LCD et les appareils de communication.

La chaîne du Hoggar, également connu sous le nom de massif du Hoggar est une région située dans le désert du Sahara en Algérie. Bien que la partie centrale est riche en ressources utiles tel que les terres rares.

Les activités d'exploration et d'exploitation minière dans la région ne sont pas développées ; cependant, des études géologiques ont montré que certaines zones du centre de Hoggar peuvent contenir des gîtes de terres rares.

Les études pétrographiques des roches encaissantes de la région de Hoggar central du massif Tillik et Guerioune et Rechla renfermant des indices de terres rares et cela après observations macroscopiques et microscopiques.

L'exploration et l'extraction de métaux de terres rares dans le centre de Hoggar nécessitent des investissements importants, une technologie de pointe et une expertise ; de plus les aspects environnementaux et sociaux doivent être pris en compte pour assurer le développement durable et responsable de ces ressources.

Globalement, malgré le potentiel des ressources en terres rares du central Hoggar, beaucoup d'effort reste à faire pour évaluer et développer ces ressources de manière responsable et durable.

Abstract

Rare earth metals present a group of minerals that are used in a variety of technological applications such as permanent magnets, rechargeable batteries, LCD screens and communication devices.

The Hoggar chain, also known as the Hoggar massif is a region located in the Sahara desert in Algeria. Although the central part is rich in useful resources such as rare earths.

Exploration and mining activities in the region are not developed; however, geological studies have shown that some areas of central Hoggar may contain rare earth deposits.

Petrographic studies of the host rocks of the central Hoggar region of the Tillik and Guerioune and Rechla massif containing rare earth indices and this after macroscopic and microscopic observations.

Exploration and extraction of rare earth metals in the center of Hoggar requires significant investment, advanced technology and expertise; in addition, environmental and social aspects must be taken into account to ensure the sustainable and responsible development of these resources.

Overall, despite the potential of the rare earth resources of Central Hoggar, much effort remains to be made to assess and develop these resources in a responsible and sustainable manner.

ملخص

تقدم المعادن الأرضية النادرة مجموعة من المعادن التي تستخدم في مجموعة متنوعة من التطبيقات التكنولوجية مثل المغناطيس الدائم والبطاريات القابلة لإعادة الشحن وشاشات الكريستال السائل وأجهزة الاتصال. سلسلة الهقار، والمعروفة أيضًا باسم كتل الهقار هي منطقة تقع في الصحراء الكبرى في الجزائر.

على الرغم من أن الجزء المركزي غني بالموارد المفيدة مثل التربة النادرة. لم يتم تطوير أنشطة الاستكشاف والتعدين في المنطقة؛ ومع ذلك، فقد أظهرت الدراسات الجيولوجية أن بعض مناطق وسط الهقار قد تحتوي على رواسب أرضية نادرة.

دراسات بطوغرافية للصحور المضيفة في منطقة الهقار المركزية في منطقة تيليكي وقرين ورشلة التي تحتوي على مؤشرات أرضية نادرة وذلك بعد الملاحظات المجهرية والميكروسكوبية.

يتطلب التنقيب عن المعادن الأرضية النادرة واستخراجها في وسط الهقار استثمارات كبيرة وتقنيات وخبرات متقدمة؛ بالإضافة إلى ذلك، يجب مراعاة الجوانب البيئية والاجتماعية لضمان التنمية المستدامة والمسؤولية لهذه الموارد.

بشكل عام، على الرغم من إمكانات الموارد الأرضية النادرة في وسط الهقار، لا يزال يتعين بذل الكثير من الجهد لتقييم وتطوير هذه الموارد بطريقة مسؤولة ومستدامة.

Table des Matières

-Introduction générale.....	1
-----------------------------	---

Chapitre I

I-GÈNÈRALITÈS SUR LES TERRES RARES	4
--	---

I-1 Notion	4
------------------	---

I-2 Historique.....	4
---------------------	---

I-3 Éléments de terres rares (REE)	5
--	---

I-4 Propriétés physiques et chimiques des terres rares :	7
--	---

I- 4- 1 Fondements chimiques.....	8
-----------------------------------	---

I-5 Économie des terres rares dans le monde	8
---	---

I- 5- 1 Les domaines d'application des terres rares :	8
---	---

I-5-2 Le Recyclage une solution nécessaire , mais insuffisante.....	11
---	----

I-6 Classification des gîtes de terres rares	11
--	----

I-7 L'utilisation des TR par l'homme et le transfert de ces TR anthropiques vers l'environnement	12
---	----

I-8 Pour une production de terres rares Plus durable.....	13
---	----

Chapitre II

II -Géologie du hoggar.....	15
-----------------------------	----

II-1 Introduction	15
-------------------------	----

II – Les Granitoïde dans le hoggar	16
--	----

II-2-Notion.....	16
------------------	----

II-3- Le Compartimentage Tectonique	17
---	----

II-4- La Chaines Pharusien	18
----------------------------------	----

II-5- Structure d'ensemble.....	18
---------------------------------	----

II-5.1- Hoggar central	20
------------------------------	----

II-5.2- Le Hoggar oriental	20
----------------------------------	----

II-6- Distribution des Granites de types Taourirt.....	20
--	----

II-7- Répartition Des Taourirts A travers les grands Ensembles Du Hoggar.....	21
---	----

II-7.1- Structure	21
-------------------------	----

II-7.2- La Ménéralisations des Taourirts	21
II-8- Anticlinorium Du hoggar central	21
II-8.1- Région de Tamanrasset	21
II-8.2- Minéralisation Non liées aux taourirts.....	22
II-8.3- Position Des zones Minéralisses par rapports Aux Intrusions Granitique..	22
II-8.4- Zonalite spatiales Des Mineralisations A l'échelle Du Hoggar	22
II-8.5- Criteres De Reconnaissances Des GranitesTaourirts.....	23
➤Critere Regional	23
➤Critere Structural	23
➤Criteres Aeororadimetriques.....	23
➤Criteres Morphologique	23
➤Criteres de Zonalité et de mode de mise en place	23
II-9- Modèle d'évolution géodynamique du Hoggar.....	24
II-9.1- Les terranes du Hoggar central	24
➤Les Greissens et de Roches Greiséniées	25
-Les apogranites ou granites à muscovite , microcline , quartz et albite.....	25
II-10- Les Carbonatites	26
A– Généralités	26
β–Conditions Physico-Chimiques De Formation.....	30
C-Conditions Géologiques De formation	34
a-Relation avec les formations magmatique	34
b-Age géologique.....	34
c-Structure géologique	35
d-Lien avec d'autres groupes génétiques	35
II-11- Les conditions géologiques de formation des terres rares.....	36
Chapitre III	
III-1-Introduction.....	38
III-2-Les Caractères microscopiques (Massif granitiques de Guerioune)	38
- Caractères microscopiques.....	38
III-2.1-le granite à albite-Topaze.....	39

-Caractères microscopiques.....	39
III-2.2-Le granites à muscovites	39
- Caractères macroscopiques	39
III-2.3-Les pegmatites.....	40
III-3- Caractères microscopiques (Massif granitique de Tiliiki)	41
III-3.1-Les Minéraux secondaires	42
III-3.2-Granite à albite –Topaze.....	42
-Caractères macroscopiques	42
-Caractères microscopique	42
III-3.3-Les greisens.....	43
III-3.4- Minéralogie des granites.....	44
III-3.5-La Topaze.....	44
III-3.6-Les accessoires.....	45
-Les columbo-tantalites.....	45
III-4-Du point de vu chimique.....	46
-La monazite.....	46
-La cérianite.....	47
-La fluocérite et mélanocérite.....	47
-Autres minéraux.....	47
III-5- Étude géochimique.....	48
-Guerioune.....	48
-Tillik.....	48
-CONCLUSION	
GENERALE.....	52
-Récommandation pour les terres rares en Algérie.....	53
-REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE.....	56

Liste des Figures

Fig. 1 : filiation des découvertes successives des REE (d'après asianmetals .Com et vanderkrogt.net).....	5
Fig. 2 : Les terres rares dans le tableau périodique des éléments	7
Fig .3 : Répartition des usages des REE par filières dans le monde en 2018	9
Fig. 4 : caractéristiques des principaux modèles de gisements En bleu , les gites majeurs localisés en Europ ou au Groenland .T: Tonnage ,la valeur de 8% correspond au gisement de Mont Weld , le rapport HREO/LREO correspondant est de 0,3 les mines en activité sont suivie d'un symbole minier Bastnäs relève du patrimoine minier .Abréviations ; AU (Australie) ,BR (Brésil), CA(Canada), CN(Chine) , FI (Finlande) ,GL(Groenland) ,GR(Grèce) ,IN (Inde) ,RU (Russie), SE(Suédé) ,TR (Turquie) ,Us (États-Unis) ,ZA (Afrique du sud)	11
Fig .5 : production globale de terres rares par l'industrie minière de 1950 à 2000 en kilotonnes (Haxel etal.2002) .la chine est depuis 1990 le principal producteur. La production globale a atteint 124KT en 2007 (Hedrick2008)	12
Fig .6 : Le Craton Ouest Africain, Liégeois et al. (2012)	16
Fig. 7 : Ensembles structuraux du Hoggar	17
Fig. 8 : Carte des principaux domaines structuraux du Bouclier Touareg (Bertrand et Caby , 1978, modifié	19
Fig 9 : Carte principaux gites et gisements (slideplayer.fr /slide/17992676/	29
Fig .10 : Schéma général de structure d'un gisement à carbonatites. V. Smirnov. (1982)	27
Fig. 11 : types minéraux de carbonatites métallifères en section verticale des roches ultrabasiques et alcalines .Selon A.Frolov.	29

Fig. 12: Carte géologique de la région d'Ihouhaouene dans la partie nord-ouest du terrane d'In Ouzal et localisation des Terres rares et syénites associées. (B) Position de la région d'Ihouhaouene dans l'ouest du Hoggar, au sud de l'Algérie (Djeddah et al. 2021 modifié de Ouezzane et al. 1988 ; Black et al. 1994. Modifié).30

Fig. 13: Schéma général de Zonalité verticale des carbonatites .Selon A. Moore volcanites. V. Smirnov. (1982) 32

Fig.14: Quelques columbo-tantalites analysées à la microsonde (GRPG, Nancy, France)46

Fig.15: Association fluorine (Flu) ,Zinnwaldite (Zinw) et Topaze (Top) (a) ,cérianite (Ce) et apatite (AP) dans Zinnwaldite (b) ,monazite (C) et Zinnwaldite à cœur de muscovite (Mu (d) au MEB48

Fig.16: Spectres des terres rares, massif de Guerioune (analyse Dr. Ahmed Hamis. 2021).....49

Fig.17 : Spectres des terres rares, massif de Tillik (analyse Dr .Ahmed Hamis).....50

Liste des photos

Photo 1: Vu panoramique du Hoggar	15
Photo 2 : Columbo-tantalite dans quartz.....	39
Photo 3 : orthose perthitique dans granites porphyres	39
Photo 4: Béryl sub automorphe et l'atte d'albite une plage de quartz	39
Photo 5 : Granite à muscovite	40
Photo 6 : poche de pegmatite à béryl (cavité miarolitique)	40
Photo 7 : poche de pegmatite à béryl (cavité miarolitique)	41
Photo 8 : Granite central à amazonite (Granite vert)	41
Photo 9 : Grande plage de Topaze renfermant des inclusions de la columbo-tantalite	43
Photo 10 : Texture en " Snow Ball " dans le granite à albite topaze	43
Photo 11 : Filon de Greisen	44
Photo 12: Greisen	44
Photo 13: La Monazite	47

Liste des tableaux

Tab. 1: From Shannon (1976) ; in Angstroms(10^{-10} m).....	6
Tab. 2: Métaux de terres rares : Classification et Application.....	10
Tab. 3: Analyse des topazes du massif Tillik.....	45



Introduction générale

Introduction générale :

-Introduction générale :

Dix-sept éléments métalliques ont suscité ces dernières années toutes les attentions des principaux pays industrialisés qui souhaitent désormais s'orienter vers la transformation digitale et la transition énergétique.

Leur présence dans le sol est invisible, durant des centaines d'années nous avons tout ignoré de leurs existences et ils étaient considérés comme sans valeur, il n'est que depuis quelques années que les chercheurs ont reconnu leurs utilités. Aujourd'hui, elles nous dictent notre avenir, elles nous ouvrent un large champ de nouvelles possibilités, elles sont partout, dans les téléphones cellulaires, les voitures électriques, dans les billets de banque. Elles sont plus précieuses que l'or ou le pétrole. Tout en bas du tableau périodique, des éléments chimiques ont l'air un peu à l'écart et qu'on a tendance à oublier. Il s'agit de 17 métaux qui ont des particularités très recherchées, souvent irremplaçables dans les processus de fabrication de plusieurs produits notamment dans le domaine de la nouvelle technologie, ce sont les terres rares.

Au départ peu utilisées par l'industrie, sont aujourd'hui des métaux stratégiques, sorte de vitamines pour les technologies numériques et exploitées de façon anecdotique dans les années 1950-1960 au sein de placers à minéraux lourds en Australie, Inde, Afrique du Sud ou au Brésil, leur attrait grandit et les États-Unis deviennent le producteur principal des années 1970 à 1980 avec leur gisement de Mountain Pass. C'est ensuite la Chine qui manifestement « n'a pas autant de pétrole que le Moyen-Orient mais qui a des terres rares », comme aimera à le dire en 1992 le Premier Secrétaire du Parti Communiste chinois Deng Xiaoping, de devenir le principal producteur mondial de terres rares à la fin des années 1980.

Tout le monde semble au départ s'accommoder de cette situation, les pays importateurs bénéficiant de prix bas et évitant les impacts environnementaux et sociaux d'une exploitation de ces métaux sur leur territoire. Il aura suffi d'un incident diplomatique autour d'une petite île en mer de Chine orientale pour que tout bascule en septembre 2010. La Chine déclare un embargo des terres rares envers le Japon, gros importateur de terres rares et pays en pointe dans les technologies du numérique. Puis c'est l'abaissement des quotas d'exportation chinois qui met le feu aux poudres en 2011 avec l'augmentation fulgurante du prix des terres rares (jusqu'à 10 000 % pour le dysprosium).

Introduction générale :

L'expansion de l'extraction et de la transformation des terres rares dans le monde, ainsi que la mise au point des solutions de recyclage et de produits de substitution pourraient offrir aux pays consommateurs et importateurs une plus grande flexibilité, quant à la diversification de leurs achats, ainsi qu'une opportunité de réduire leur dépendance vis-à-vis des importations de terres rares et contribuer ainsi à diminuer la pression sur les prix.



Chapitre I
Les terres rares

I-GÉNÉRALITÉS SUR LES TERRES RARES

I-1 Notion :

On présente souvent les terres rares comme les « vitamines » de l'industrie moderne, dans la mesure où leurs différentes propriétés ont permis des gains de performance dans une vaste gamme de technologies. Si, sur un plan chimique, ces éléments ont été regroupés dans une catégorie de 17 métaux, on les divise souvent en deux groupes, à savoir les terres rares « légères » et les terres rares « lourdes », en fonction de leur numéro atomique. En général, cette distinction renvoie à une indication de leur présence géologique, les légères étant plus abondantes que les lourdes.

Les aimants permanents à base de terres rares, dont les plus utilisés reposent sur le néodymium, le praséodymium et le dysprosium, constituent aujourd'hui l'emploi le plus courant de ces minerais. On les trouve notamment dans le matériel médical nécessaire au fonctionnement des techniques d'Imagerie Électromagnétique, mais aussi dans les véhicules hybrides et électriques, les éoliennes, les disques durs, les téléphones portables et même dans les avions de combat dernière génération, les drones et le matériel militaire, entre autres. D'autres éléments, tels que le lanthanum et le cérium, sont employés dans le polissage de la céramique et du verre, mais surtout et plus particulièrement pour des utilisations telles que le craquage catalytique pour le raffinage du pétrole et les pots catalytiques, qui réduisent les émissions et permettent une consommation de carburant plus efficace et moins polluante.

Les propriétés luminescentes d'autres types de terres rares, comme l'euprécium ou l'yttrium, permettent un éclairage plus efficace : c'est notamment le cas des ampoules dites de lampes fluorescentes compactes (LFC) ou encore en optique, avec les écrans à cristaux liquides ou les dispositifs de guidage par laser. En effet, les terres rares trouvent un éventail d'usages très large dans la société moderne.

I-2 Historique :

La découverte des terres rares débute en 1787 en Suède. Rappelons au passage, que le mot « terres » était le nom donné par les chimistes aux oxydes métalliques supposés être des corps simples.

L'épithète « rares » rappelle les difficultés rencontrées par les chimistes pour les isoler et leur concentration supposée faible dans les minerais. Carl Axel Arrhenius, chimiste suédois décrit pour la première fois un minéral noir et dense dans les pegmatites d'Ytterby. Envoyé pour analyse au chimiste finlandais Johan Gadolin, ce dernier découvre en 1794 une nouvelle « terre » contenue dans ce minéral, l'yttria, qui donnera son nom à l'ytterbite, connue depuis sous le nom gadolinite.

Cependant, un minéral rougeâtre a été découvert plus tôt, en 1751, par le minéralogiste suédois Axel Fredrik Cronstedt dans la mine de cuivre de Bastnäs. Ce n'est qu'en 1803 que les chimistes suédois Jöns Jakob Berzelius et Wilhelm Hisinger isolent une nouvelle « terre » aux propriétés proches de l'yttria. Cette nouvelle terre est nommée « ceria », en référence à l'astéroïde Cérés tout juste découvert, et donnera son nom au minéral bastnäsite. Tout au long du XIXe siècle, différents chimistes découvrent que les quelques terres isolées précédemment contiennent en

Fait plusieurs autres éléments chimiques aux propriétés proches. Par exemple, Carl Gustaf Mosander découvre en 1839 que l'oxyde de cérium est aussi composé d'un oxyde d'un autre élément qu'il nommera lanthane (du grec lanthano, être caché). En 1843, il découvre que l'ytterbium est en fait un mélange contenant deux autres éléments, le terbium et l'erbium. Le dernier élément de REE, le lutétium, est découvert en 1907. Enfin, il est à noter que le prométhium est découvert en 1947 dans les produits de fission de l'uranium du réacteur d'Oak Ridge (États-Unis). Les REE ont donc été découvertes par séparation progressive, certaines à partir du cérium (terres cériques), les autres à partir de l'yttrium (terres yttriques). À noter que le gadolinium sera identifié dans les deux types de terres. Par ordre de découverte (Figure 1) : Y (1794), Ce (1803), La (1839), Er (1843), Tb (1843), Sc (1876), Yb (1878), Ho (1879), Sm (1879), Tm (1879), Gd (1880), Nd (1885), Pr (1885), Dy (1886), Eu (1901), Lu (1907) et Pm (1947).

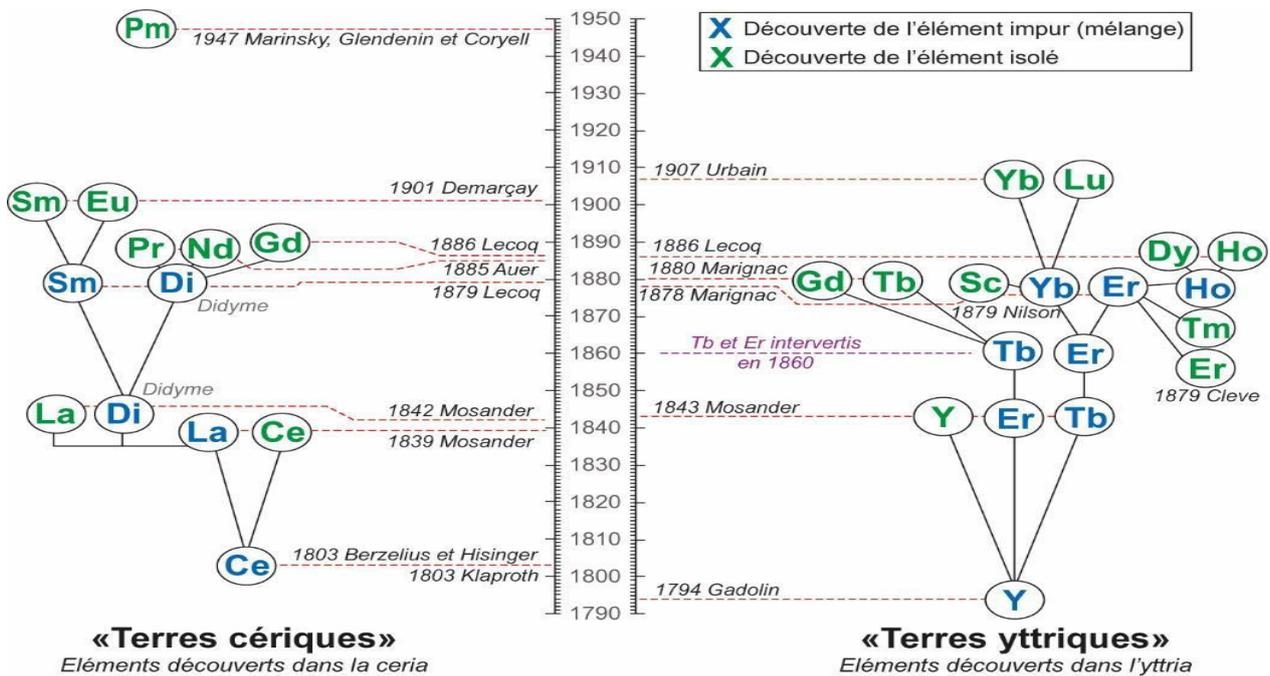


Fig. 1 : filiation des découvertes successives des REE (d'après asianmetals .Com et vanderkrogt.net).

I-3 Éléments de terres rares (REE) :

« Terres rares » est un nom collectif donné, pour des raisons historiques et pratiques à un ensemble d'éléments métalliques du tableau périodique. Les terres rares (REE de l'anglais Rare Earth Elements) sont des éléments dits « en traces » dans la plupart des environnements naturels. Les REE constituent un groupe de 17 éléments métalliques, cohérents en termes de rayon ionique, charge et coordination. Selon les définitions (Henderson, 1984 ; Lapin et McKay, 1989 ; Jones et al. 1996 ; Atwood, 2012), les REE comprennent les lanthanides (de(57) La à 71(Lu), l'yttrium (39Y) et parfois le scandium (21Sc). L'appartenance du Sc à ce groupe fait débat car son comportement dans les environnements géologiques est généralement différent de celui des autres REE. De même

Le prométhium (61Pm) avec sa demi-vie extrêmement courte, est quasi-inexistant dans la nature. Selon les configurations spécifiques des électrons au sein de chaque atome, les REE peuvent être divisées en deux sous-groupes : (1) les terres rares légères (LREE pour Light Rare Earth Elements)

avec La-Ce-Pr-Nd-Sm-Eu-Gd et (2) les terres rares lourdes (HREE pour Heavy Rare Earth Elements) avec Tb-Dy-Ho-Er-Tm-Yb-Lu-Y.

Atomic number	Name	Symbol	Ionic radius for eight-fold coordination
57	Lanthanum	La^{3+}	1.160
58	Cerium	Ce^{3+}	1.143
		Ce^{4+}	0.970
59	Pracsodymium	Pr^{3+}	1.126
60	Neodymium	Nd^{3+}	1.109
61	Promethium	Pm^{3+}	Not naturally occurring
62	Samarium	Sm^{3+}	1.079
63	Europium	Eu^{3+}	1.066
		Eu^{2+}	1.250
64	Gadolinium	Gd^{3+}	1.053
65	Terbium	Tb^{3+}	1.040
66	Dysprosium	Dy^{3+}	1.027
67	Holmium	Ho^{3+}	1.015
68	Erbium	Er^{3+}	1.004
69	Thulium	Tm^{3+}	0.994
70	Ytterbium	Yb^{3+}	0.985
71	Lutetium	Lu^{3+}	0.977
39	Yttrium	Y^{3+}	1.019

Tab. 1: From Shannon (1976); in Angstroms ($10^{-10} m$).

1 H																	2 He	
3 Li	4 Be																	10 Ne
11 Na	12 Mg																	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
55 Cs	56 Ba	57-71	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
87 Fr	88 Ra	89-103	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo	
		Terres rares légères (LREE)										Terres rares lourdes (HREE)						
Lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
Actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr			

Fig. 2: Les terres rares dans le tableau périodique des éléments.

I-4 Propriétés physiques et chimiques des terres rares :

Les REE possèdent des propriétés physico chimiques très recherchées par les industriels, notamment grâce à leur structure électronique interne associée à la sous-couche électronique 4f. Les REE sous forme métallique neutre ont des rayons atomiques assez proches, sauf l'euporium et l'ytterbium dont le rayon atomique plus grand explique leur plus faible densité. Leurs duretés sont variables passant de tendre (La, Nd, Yb) à dur (Ho, Er, Lu). Les REE sont moyennement fusibles, leurs températures de fusion s'échelonnant entre 799°C (Ce) et 1 663 °C (Lu). Les propriétés spectrales des REE sont les plus remarquables tant en absorption (coloration) qu'en émission (luminescence) justifiant leur utilisation courante dans les luminophores et les lasers. C'est le degré de mobilité des électrons dans les niveaux d'énergie des atomes qui est à la base de cette propriété. Soumis à de puissants rayons (ex. rayons UV), un atome de REE entouré de ligands (oxyde ou molécule) va s'exciter électroniquement et la désexcitation de l'atome de REE se traduira par l'émission de lumière avec des pics d'émission de longueurs d'onde spécifiques selon l'élément de REE (ex. Y et Eu : rouge et bleu ; Tb et Tm : vert ; Ce : jaune). L'autre propriété physique remarquable de certaines REE est leur magnétisme à l'origine de leur utilisation pour la confection d'aimants permanents de haute performance (aimantation et rémanence élevées). Les REE couplées à des éléments de transition (Fe, Co) permettent la confection des aimants les plus coercitifs fabriqués à l'échelle industrielle (Sm-Co, Nd-Fe-B). Du point de vue chimique, les REE sont des métaux réducteurs (propriété désoxydante et désulfurante). La plupart s'oxyde assez rapidement à l'air et à température ambiante en quelques jours à quelques mois (Eu, La, Ce, Pr, Nd). Les HREE résistent plusieurs années à l'oxydation (Y, Dy, Ho, Er). Broyé finement, le Ce allié au Fe (ferrocérium) brûle à l'air. C'est l'une des premières applications des REE avec les pierres à Briquet constituées de ferrocérium. Dans les minéraux, les REE sont sous forme de cation trivalent. Bien que le rayon ionique varie d'une terre rare à l'autre, leurs propriétés.

I- 4- 1 Fondements chimiques :

La spécificité et la cohérence du comportement géochimique des TR sont liée à la structure de leur couche électronique. Les TR et plus précisément les lanthanides sont, avec les actinides, les seuls éléments du système périodique pour lesquels les électrons ajoutés à la structure ne se placent pas dans les couches s, p ou d, mais dans la couche f, située en-dessous de la couche des électrons de valence. Dans le milieu naturel, les TR apparaissent essentiellement sous forme trivalente, à l'exception du cérium et de l'euprotium qui existent aussi sous la forme respectivement tétra et bivalente. Malgré la cohérence du comportement chimique du groupe des TR, le remplissage de la couche électronique 4f provoque une diminution continue du rayon ionique du lanthane au lutétium ; cette "lanthanide contraction" induit des variations systématiques du comportement chimique à l'intérieur du groupe. La couche des électrons de valence garde, pour toutes les TR trivalentes, la configuration du gaz noble xénon (5s² 5p⁶)

Dans les systèmes magmatiques anhydres, le comportement chimique des TR est essentiellement contrôlé par leur charge et par la diminution de leur rayon ionique. Dans les systèmes contenant une phase aqueuse, la complexation des TR est un facteur additionnel très important. La stabilité des complexes de TR ne dépend plus uniquement de leur charge et de leur rayon ionique, mais aussi du degré de remplissage de la couche 4f (Bau, 1996). De ce fait on observe des constantes de complexation avec des ligands inorganiques et organiques, qui varient de façon régulière au sein du groupe des TR (Cantrell et Byrne, 1987; Lee et Byrne, 1992; Millero, 1992; Byrne et Kim, 1993; Bau, 1999; Davranche et al., 2005; Sonke et Salters, 2006; Stern et al., 2007; Davranche et al., 2008).

I-5 Économie des terres rares dans le monde**I- 5- 1 Les domaines d'application des terres rares :**

Le premier usage des REE est attesté dès 1885 où le cérium est utilisé dans les manchons à gaz de la ville de Vienne. Les usages des REE sont très limités jusqu'aux années 1960 (ferrocérium des pierres à briquet), puis plus diversifiés avec des applications technologiques à partir des années 1970 (écrans cathodiques couleur, lasers, luminophores, etc.) et 1980 (aimants permanents). Les REE ont des propriétés magnétiques, électroniques, optiques et catalytiques exceptionnelles, aujourd'hui particulièrement utiles pour des technologies toujours plus diversifiées voire pointues, notamment l'industrie de la défense, l'électronique, ou les énergies renouvelables (Balarama, 2019 ; Dushyantha et al. 2020). Les REE sont utilisées sous différentes formes chimiques : métalliques, alliages, oxydes et chlorures.

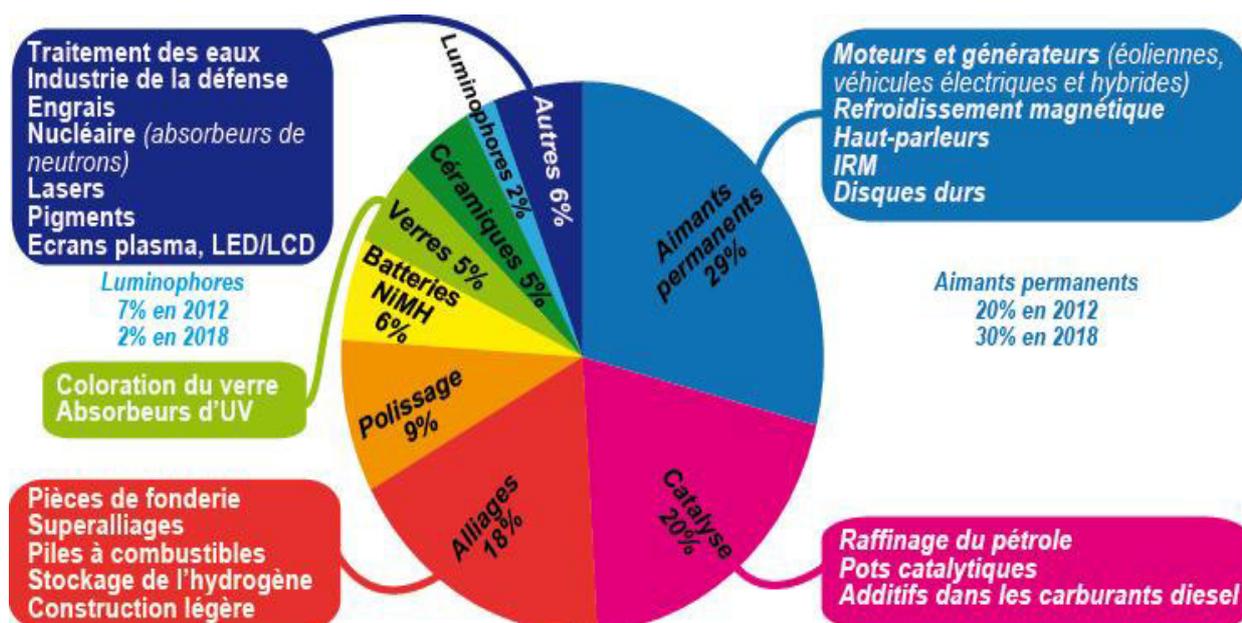


Fig. 3: Répartition des usages des REE par filières dans le monde en 2018

Terres rares	Classification	Abondance dans la croûte terrestre (parties par million)	Applications
Lanthane (La)	Légère	5-39	Alliage pour batteries , alliages de métaux , catalyseurs , raffinage du pétrole , poudres de polissage , additifs au verre, phosphores, céramique et optique
Cérium (Ce)	Légère	20-70	Alliages pour batteries , alliages de métaux , catalyseurs (contrôle des émissions) , raffinage du pétrole , poudres de polissage , additifs au verres , phosphores et céramique
Praséodyme(Pr)	Légère	3,5 – 9,2	Alliages pour batteries, alliage de métaux, catalyseurs, poudres de polissage, additifs au verre et coloration de céramique

Néodyme (Nd)	Légère	12-41,5	Aimants permanents, alliage de métaux, catalyseurs, poudres de polissage, additifs au verre et coloration de Céramique
Prométhium(Pr)	Légère	N/A	Montres, pacemakers et recherche
Samarium (Sm)	Légère	4,5 -8	Aimants, Céramique et radiothérapie (cancer)
Europium(Eu)	Légère	0 14 -2	Phosphore
Gadolinium(Gd)	Légère	4-8	Céramique, énergie nucléaire et dispositifs médicaux (imagerie par résonance magnétique, rayons X)
Terbium (Tb)	Lourde	0,65 – 2,5	Lampes fluorescentes à base de phosphore, aimants conçus pour les hautes températures et défense
Dysprosium(Dy)	Lourde	3-7,5	Aimants permanents
Holmium(Ho)	Lourde	0,7 – 1,7	Aimants permanents, énergie nucléaire et équipement à micro –ondes
Erbium(Er)	Lourde	2,1-6,5	Énergie nucléaire, communication à fibre optique et coloration du verre
Thulium (Tm)	Lourde	0,2-1	Rayons X (médical) et laser
Ytterbium (Yb)	Lourde	0,33-8	Traitement du cancer et acier inoxydable
Lutétium(Lu)	Lourd	0, 35- 1,7	Détermination de l'âge, raffinage du pétrole
Yttrium(Y)	-----	24-70	Aillages pour batterie, phosphores, et Céramique
Scandium(SC)	-----	5-22	Alliages aluminium scandium légers à haute résistance

Tab. 2: Métaux de terres rares : Classification et Application.

I-5-2 Le Recyclage une solution nécessaire, mais insuffisante :

Le recyclage, que ce soit au niveau de l'industrie ou du consommateur, constitue une forme d'approvisionnement alternative de plus en plus prisée. Au niveau industriel, certains fabricants d'aimants au Japon, par exemple, ont pu retraiter des déchets industriels et récupérer jusqu'à 30 % des terres rares employées aux stades initiaux de la production. Au niveau de la post consommation, le recyclage de déchets électroniques et industriels s'est avéré plus complexe, en raison de difficultés relatives à la collecte des déchets imputables à une faible sensibilisation des populations à l'enjeu et à des programmes de collecte inadéquats –, mais aussi des coûts et des difficultés techniques afférents à l'extraction de petites quantités de matériau à base de terres rares présents dans des produits tels que les téléphones portables et les ordinateurs personnels. Cependant, le recyclage dans certains domaines, tels que l'éclairage fluorescent, a connu un succès relatif à ses débuts²⁰. Mais le recyclage en Europe, par exemple, ne constitue toujours qu'une modeste fraction de l'offre (estimée aujourd'hui à 6 ou 7 %²¹). Ainsi, le coût du recyclage demeure une contrainte significative. Cependant, les produits à forte teneur en terres rares et autres métaux technologiques (comme les véhicules hybrides et électriques, ou encore les éoliennes) terminent leurs cycles de vie et sont démantelés.

I-6 Classification des gîtes de terres rares :

Les gisements de REE peuvent être divisés en deux grandes catégories les gîtes primaires ou endogènes associés aux processus magmatiques et hydrothermaux et (2) les gîtes secondaires ou exogènes liés à des processus sédimentaires et/ou climatiques (Walters et al., 2011 ; Chakhmouradian et Wall, 2012; Chakhmouradian et Zaitsev, 2012; Charles et al., 2013 ; Tuduri et al., 2015 ; Goodenough et al., 2016 ; Dushyantha et al., 2020). Malgré la grande variété de gisements, seuls 5 types sont exploités : carbonatites (48 % de la production mondiale), gîtes du magmatisme alcalin (2 %), gîtes à argiles ioniques (36 %), gîtes latéritiques (12 %) et placers (2 %).

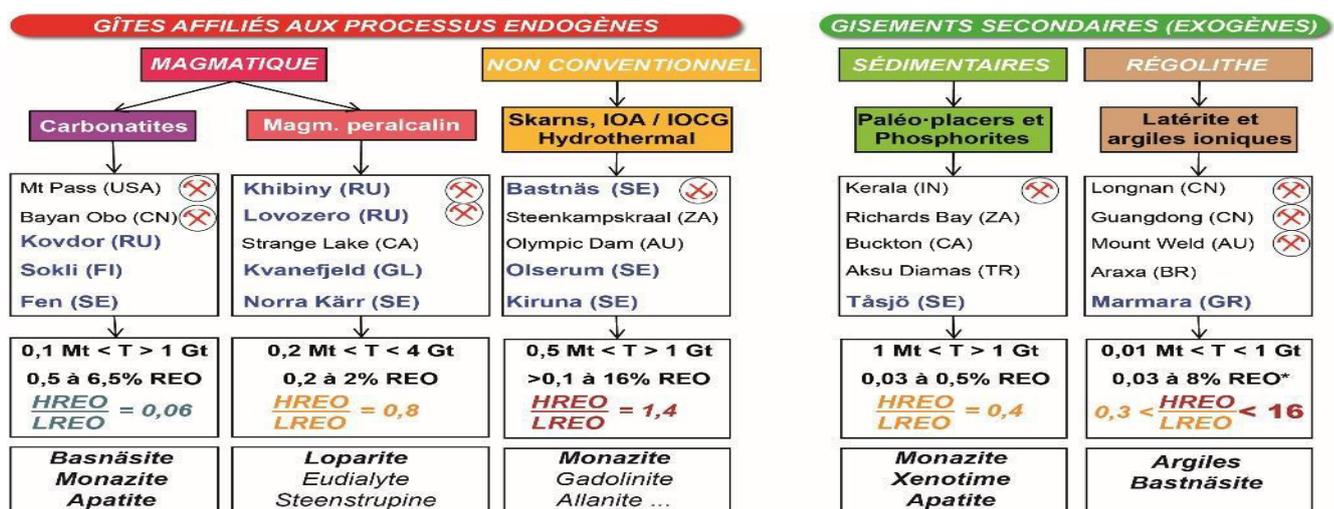


Fig. 4: caractéristiques des principaux modèles de gisements En bleu , les gites majeurs localisés en Europ ou au Groenland .T: Tonnage ,la valeur de 8% correspond au gisement de Mont Weld , le rapport HREO/LREO correspondant est de 0,3 les mines en activité sont suivie d'un symbole minier Bastnäs relève du patrimoine minier .Abréviations ; AU (Australie) ,BR (Brésil), CA(Canada), CN(Chine) , FI (Finlande) ,GL(Groenland) ,GR(Grèce) ,IN (Inde) ,RU (Russie), SE(Suédé) ,TR (Turquie) ,Us (États-Unis) ,ZA (Afrique du sud).

I-7 L'utilisation des TR par l'homme et le transfert de ces TR anthropiques vers l'environnement :

La spécificité chimique des TR leur confère un intérêt grandissant pour l'industrie de pointe (électronique, optique etc.), comme pour la médecine et l'agriculture. L'utilisation des TR par l'homme est en forte augmentation depuis 1980. La Chine est aujourd'hui le premier et quasi l'unique producteur de TR ; ce pays assure environ 97 % des besoins mondiaux et la production de l'industrie minière est passée de 30 kT de TR extraites en 1980 à 124 kT en 2007 (Haxel et al. 2002; Hedrick, 2008).

Les applications industrielles sont multiples elles vont de produits "grand public"(ex. briquets, abrasifs, écrans CRT et LCD, ampoules à basse consommation et LED, revêtements phosphorescents, pots catalytiques...), à d'autres plus sophistiqués (lasers, fibres optiques, aimants, piles La-Ni-H, réfrigération magnétique) ou même futuristes (supra conducteurs, piles à hydrogène ; Haxel et al. 2002). Dans la plupart des cas, une TR unique ou un mélange de plusieurs TR est ajouté en faible quantité à un matériau afin d'optimiser ses performances. Les quantités de TR utilisées sont en augmentation exponentielle, par exemple un produit de technologies innovantes tel que la voiture hybride Toyota Prius contient environ 20 kg de TR (Degraaf, 2006).

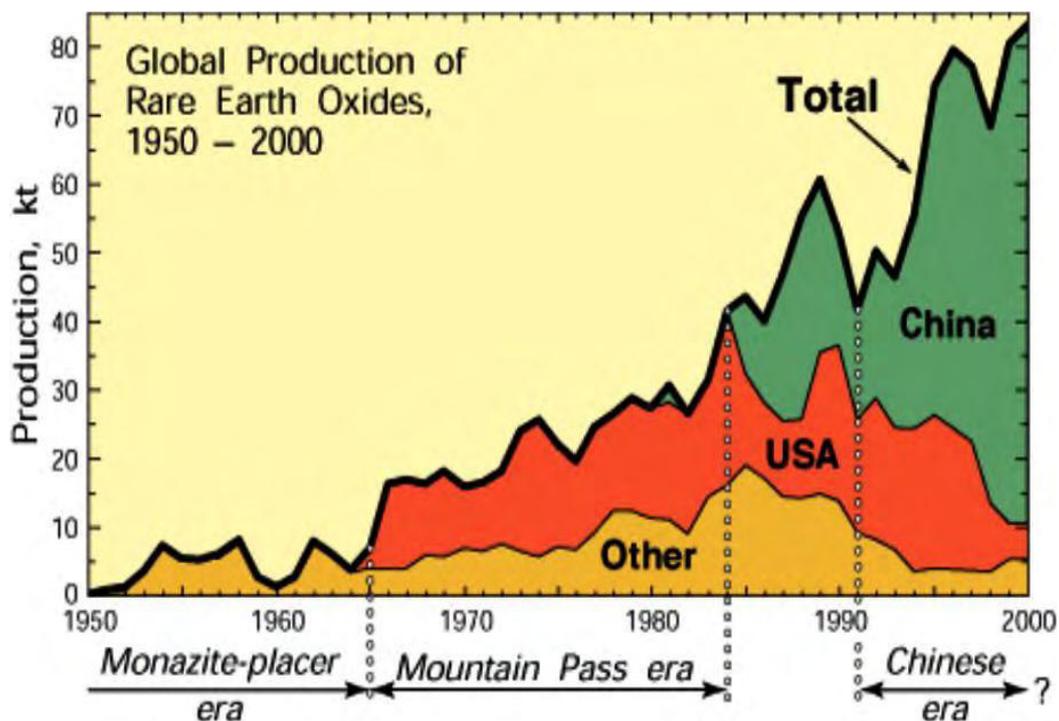
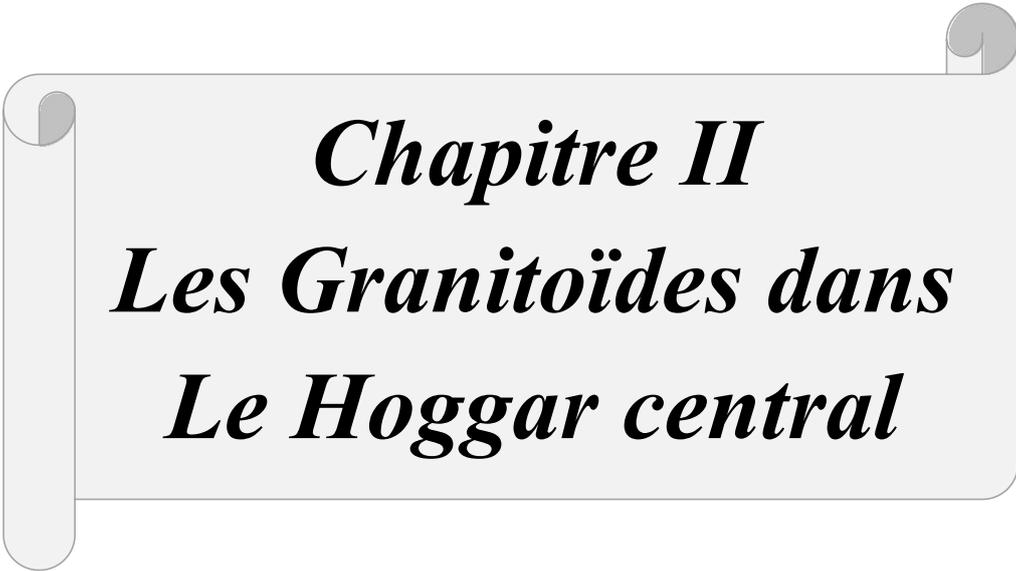


Fig. 5: production globale de terres rares par l'industrie minière de 1950 à 2000 en kilotonnes (Haxel et al. 2002). la chine est depuis 1990 le principal producteur. La production globale a atteint 124KT en 2007 (Hedrick 2008).

I-8 Pour une production de terres rares Plus durable :

Dans notre quête de nouvelles sources de terres rares, nous ne devrions pas faire l'impasse sur les régions dont elles ont été extraites sans jamais avoir été utilisées. En effet, une des spécificités des terres rares est qu'on les localise souvent en même temps que d'autres minerais tels que le minerai de fer ou l'uranium et qu'on en trouve fréquemment dans des résidus provenant d'extractions antérieures. Des concentrations de terres rares susceptibles d'être utilisées ont également été retrouvées dans des déchets issus d'exploitations minières tels que des cendres de charbon, des résidus de bauxite (aussi connus sous le nom de « boue rouge »), ou encore du phosphate résultant de la fabrication d'engrais⁶⁹. C'est la raison pour laquelle certains projets d'extraction de terres rares pourraient contribuer à donner une seconde vie aux anciennes mines et à les assainir au lieu d'en créer de nouvelles.



Chapitre II
Les Granitoïdes dans
Le Hoggar central

II -Géologie du Hoggar**II-1 Introduction :**

La mine américaine de Mountain Pass était le site le plus important au monde pour la production de terres rares de 1950 jusqu'aux années 1990 qui fit faillite en 2002. La Chine a depuis dominé les terres rares du monde jusqu'à Aujourd'hui. Elle ne détient que 50 % des réserves de la planète, la Chine compte désormais pour 80 à 95 % de la production mondiale des terres rares. Notre volonté de trouver des solutions pour démanteler ce contrôle imposé par la Chine sur le monde et basée sur des études récentes a révélé l'existence d'environ 20% des réserves mondiales de terres rares en Algérie. Nous avons voulu faire la lumière sur cette richesse méconnue et notre tentative de accueillir les zones où les terres rares existent. Dans ce mémoire, nous avons essayé de montrer les roches qui contiennent des terres rares dans la partie de Hoggar central. Donc quelles sont ces roches qui contient ces terres rares et quelles sont leurs caractéristiques.

Les terres rares principalement présentes sous forme minérale dans les roches ignées et métamorphiques dans le Hoggar, les terres rares sont principalement associées à des carbonatites, le Hoggar sont principalement composées de dolomite, de calcite et de magnétite, et contiennent des minéraux riches en terres rares tels que la monazite, la bastnäsité et la synchisite.

En regardant les informations sur la bibliothèque par les auteurs qui ont travaillé sur le Hoggar j'ai essayé Contribuer à savoir dans ce domaine Le bouclier Touareg, dont le Hoggar représente la partie algérienne méridionale (500.000 km² de superficie et un millier de mètres d'altitude moyenne et un point culminant à plus de 3000m : Djebel Tatrât), fait partie d'un immense domaine, construit pendant l'orogène panafricain, situé immédiatement à l'Est du craton ouest africain. Il se prolonge, au sud-ouest, au Mali, par le Massif des Iforas, et à l'Est, au Niger, par le Massif de l'Aïr



Photo 1: Vu panoramique du Hoggar

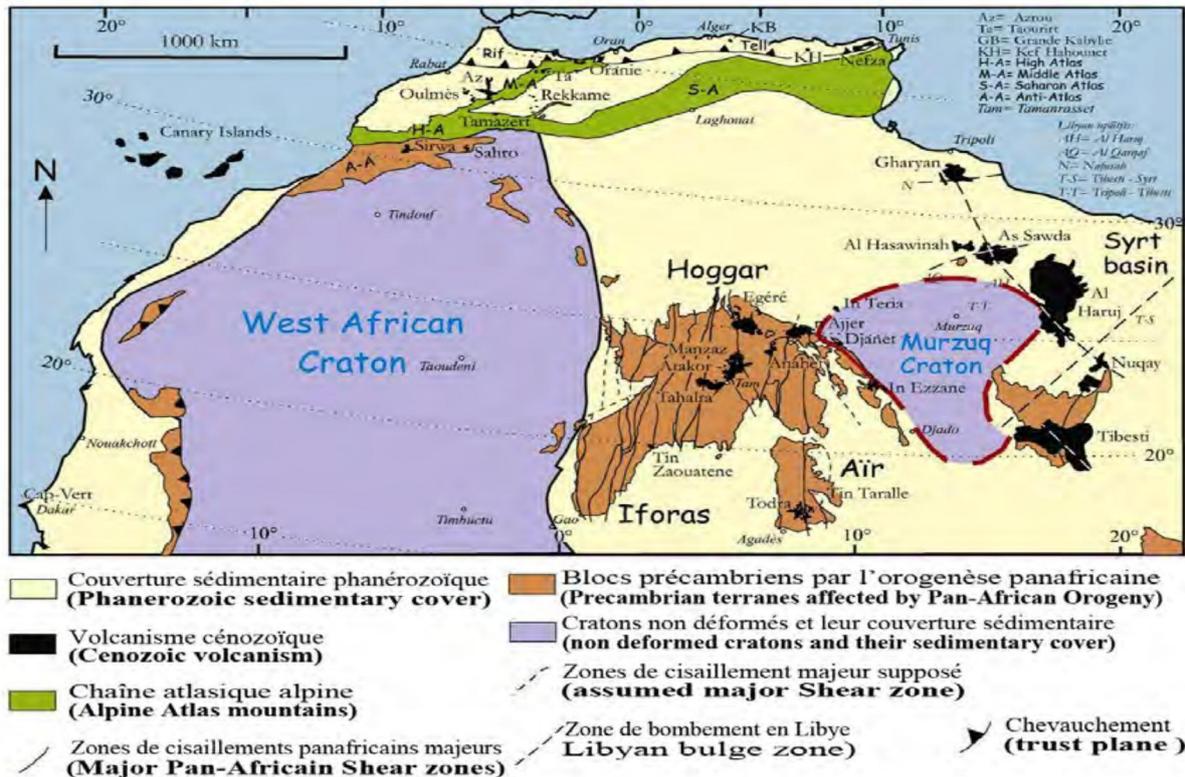


Fig.6. Le Craton Ouest Africain, Liégeois et al. (2012).

A l’affleurement, le massif du Hoggar offre une grande diversité de roches cristallines et métamorphiques essentiellement précambriennes comprenant des granites et des gneiss, des schistes, des micaschistes, des cipolins, des quartzites et des amphibolites. La couverture, en discordance, est formée de grès ordoviciens, les Tassilis. Elle ne subsiste que dans les parties Nord et Sud. Son décapage a été provoqué, à la fin du Jurassique, par une phase distensive liée à l’ouverture de l’Atlantique mais aussi par un bombement lithosphérique à grand rayon de courbure (Girod, 1976 ; Dautria, 1988). Ce dernier est accompagné par une grande Activité volcanique, de type "point chaud", à caractère tholéïtique à alcalin et d’âge Eocène supérieur à Quaternaire récent (Girod, 1976 ; Dautria, 1988 ; Ait-Hamou, 2000)

Historiquement, le Hoggar représente la plus jeune et la mieux conservée des chaînes précambriennes. Sa configuration actuelle est héritée principalement de l’orogénèse panafricaine (750 - 525 Ma). Elle se termine par la mise en place de suites post-orogéniques d’affinité alcaline. Ce sont les granites « Taourirts » qui se mettent en place le long de shear zones en régimes de transpression – transtension.

II – Les Granitoïdes dans le Hoggar :

II-2-Notion :

Des études ont révélé que les granites Taourirts sont riches en tungstène et en étain, ce qui en fait une cible potentielle pour l’exploration minière de ces métaux. Les processus responsables de l’enrichissement en tungstène et en étain sont complexes et impliquent des réactions

hydrothermales post- magmatiques L'analyse des échantillons a révélé que le tungstène est principalement associé à la scheelite et que l'étain est présent sous forme de cassitérite. Les minéraux hébergeurs se trouvent dans les zones altérées et veines hydrothermales associées aux granites Taourirts ; ainsi ils ont également montré que les granites Taourirts étaient associés à d'autres types de minéraux économiques tels que le cuivre, l'or et l'uranium. Ces résultats sont importants pour la compréhension de la genèse géologique et de l'exploration des gîtes minéraux de la région du Hoggar central en Algérie

II-3- Le Compartimentage Tectonique :

La carte SONAREM 1/2 000 000 de 1972 – 1976 subdivise le Hoggar en quatre grands compartiments délimités par de grandes failles. Ces compartiments sont le Horst anticlinorium du Hoggar ouest, le Meganticlinorium du Hoggar central et la zone plissée de L'Est. Les subdivisions établies par M. LELUBRE sont en gros reprises, avec notamment les granites du complexe Taourirts et les plutons volcaniques probablement de même âge. Les séries nigritiennes et de tiririne sont les plus récentes de la boutonnière, recouverte en discordance par des terrains. Le terme " Taourirts" est une appellation targuie signifiant "coupole" ou " pain de sucre" et a été introduit par M.LELUBRE en 1952

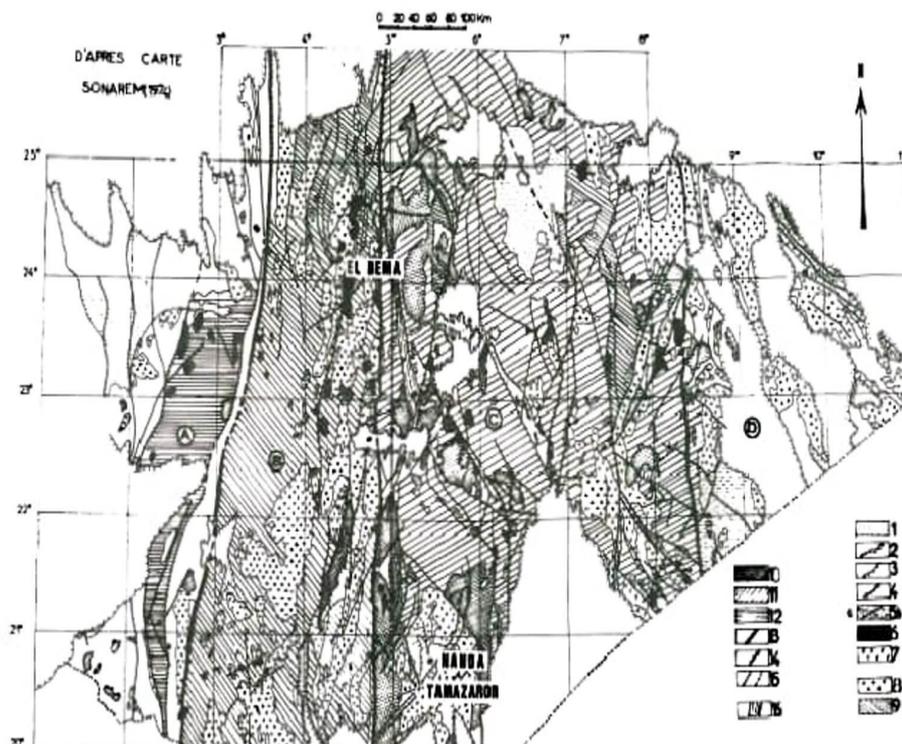


Fig.7: Ensembles structuraux du Hoggar

Horst Anticlinorium du Hoggar ouest (B) Megasynclinorium du Hoggar Ouest

(C) Meganticlinorium du Hoggar central (D) plissée de l'Est

Légende Fig.7 Ensembles Structuraux du Hoggar

- 1 - Quaternaire
- 2 - Couverture basaltique
- 3 - Roches terrigenes sédimentaires
- 4 - Couverture tassilienne
- 5 - a. Série "Nigritien" b. Série "Tiririne"
- 6 - Granites "Taourirts"
- 7 - Plutons volcaniques probablement du même âge que les granites "Taourirts"
- 8 - Granitoïdes du Pharusien
- 9 - Roches indifférenciées du Pharusien
- 10 - Granitoïdes du Suggarien
- 11 - Roches indifférenciées du Suggarien
- 12 - Suggarien : faciès In-ouzzol
- 13 - Failles limitant les zones structuro-faciales
- 14 - Failles sur lesquelles se placent les granites "Taourirts"
- 15 - Failles réelles et hypothétiques

II-4- La Chaines Pharusien :

A l'Est du craton Ouest-africain, le domaine possède en son centre, comme une charpente le massif granitiques d'in Ouzzal probablement d'âge archéens (>2700 Ma). A l'Ouest, la juxtaposition de terrains catazonaux (dont contrains d'âge protérozoïques inférieur compris entre 2 000 et 2 700 Ma). De séries de quartzites (d'âge protérozoïque moyen à supérieur, de 2 000 à 8 00 Ma), de méta plutonites, de méta volcanites et des métagrauwackes (1000-650Ma) et des formations d'âge Eocambrien à cambrien (série pourpre d'ahnet<570 Ma) sont remarquables. A l'est du massif d'in Ouzzal, la branche centrale se caractérise par une certaine homogénéité structurale (plis subméridiens), important développement de plutons superficiels et l'existence d'une cassure au sein du pharusien S.Lat. Cette rupture est marquée par une pénéplanation du substrat protérozoïque (1 000 – 800 Ma), avec de nombreuses intrusions variées, suivie d'une transgression du protérozoïque terminal (800-650Ma).

II-5- Structure d'ensemble

Le Hoggar est traversé par de grands accidents majeurs de direction N-S à composantes décrochantes, soit l'accident 4°50' et l'accident 8°30'. Ces accidents ont divisé le Hoggar en compartiments longitudinaux juxtaposés. Cette compartimentation définit trois grands domaines structuro fractionnels distincts par leur lithologie et leur évolution tectonometamorphiques (Lelubre, 1952 ; Bertrand et Caby, 1978). Ce sont, d'ouest en est (Fig.8-) :

1. le Hoggar occidental ou la chaîne pharusienne qui s'étendait de la limite du Craton Ouest Africain (C.O.A) jusqu'au méridien 4°50' avec la mole In Ouzzal et les rameaux occidental et oriental de la chaîne pharusienne.
2. le Hoggar central polycyclique situé entre les méridiens 4°50' et le 8°30' ;

3. Hoggar oriental ou Ténéré très peu étudié à l'est du méridien 8°30'.

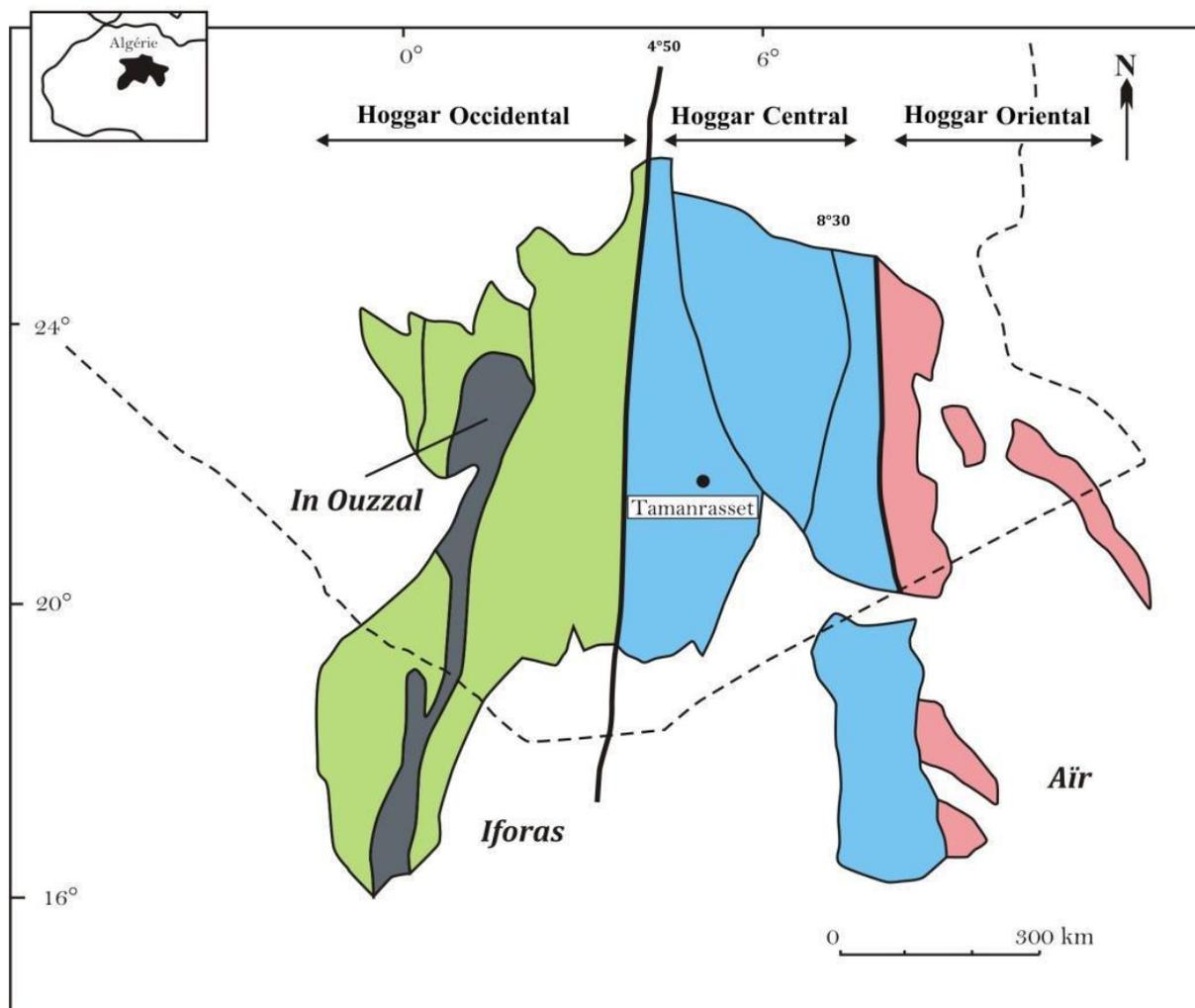


Fig. 8 : Carte des principaux domaines structuraux du Bouclier Touareg (Bertrand et Caby, 1978, modifié)

Chacun de ces domaines est interprété comme amalgame de nombreux segments mobiles, accolés pendant l'orogénèse panafricaine (Black et al. 1994). Il est possible, aujourd'hui, de considérer le Hoggar comme un type moderne de chaîne et que l'histoire géodynamique de ce dernier est liée à la collision continentale entre le craton ouest africain et la zone mobile orientale. Un cycle de Wilson initié autour de 800 Ma s'est terminé il y a 600 Ma par la formation d'un orogène de collision (Caby et al. 1981 ; Bertrand et al, 1986 ; Caby et Andreopoulos-Renaud, 1987, Liégeois et al. 1987 ; Black & Liégeois ,1993 et Black et al. 1994).

Cette collision rappelle d'ailleurs (Black et al. 1979), celle qui s'est produite entre le bouclier NE asiatique et l'Inde au Cénozoïque. Des études récentes (Black et al. 1993 et Liégeois et al. 1994) ont été entreprises au sud du Hoggar dans la région de l'Adrar des Iforas et l'Aïr (prolongement de la zone mobile du Hoggar au sud). En utilisant la démarche appliquée et l'ensemble des critères définis dans ces régions. Il a été possible de faire une réinterprétation complète de la géologie du Hoggar. Son interprétation dans un concept d'assemblage de plusieurs terrains mobiles allochtones appelés «terrane» est devenue évidente (Black et al. 1994).

II-5.1- Hoggar central :

Le Hoggar central est un domaine géologique complexe composé principalement de formations polycycliques qui ont été affectées à des degrés différents par les événements tectonometamorphiques kibarien et panafricain. Les roches constitutives sont principalement des gneiss et des métas sédiments soumis à un haut degré de métamorphisme, avec également de petites lanières de sédiments et de volcanites moins métamorphiques. Trois zones ont été identifiées dans le Hoggar central, chacun ayant des caractéristiques géologiques distinctes et des âges différents

La zones Tefedeat –Atakor est caractérisée par l'abondance des granitoïdes présumés d'âge panafricain.

La zones Egéré-Arefna est marquée par des déformations et un métamorphisme d'âge kibarien, ainsi que par un métamorphisme panafricain.

La zones orientale (Oumalalen – Temassint) est caractérisée par la présence de méta sédiments anciens d'âge protérozoïque inférieur.

La complexité et la diversité de ces formations rendent l'histoire géologique du Hoggar central difficile à comprendre.

II-5.2- Le Hoggar oriental :

Est caractérisée par la présence de roches métamorphiques telles que les gneiss , les Schistes , les quartzites et les marbres , ainsi que par des intrusions granitiques. Entre ces deux socles se trouve la chaîne tiririnienne elle – même , qui est formée de roches métamorphiques de haute pression et haute température telles que les gneiss , les schistes et les marbres , ainsi que de roches ignées telles que les granites et les syénites. Le Hoggar Oriental est une région qui présente une grande diversité géologique et géomorphologique , avec des paysages désertiques variés tels que des plateaux , des canyons , des ergs et des règes . Cette région est également riche en biodiversité, avec une faune et une flore adaptée à un environnement aride. Elle abrite également des populations nomades qui pratiquent l'élevage et le commerce caravanier depuis des siècles. En d'autres termes, cette description géologique semble décrire une zone où une série de roches appelée tiririne est présente. Cette série de roches est injectée par des sills acides et basiques, qui ont été datés radio métriquement à 660 millions d'années. Au nord de la latitude 22°30 le plissement des roches tiririne se développe graduellement le long de l'accident 8°30. Cet événement de plissement est daté de 580 millions d'années, ce qui correspond à la formation du granite tiririne.

II-6- Distribution des Granites de types Taourirts :

La distribution des granites de type Taourirts a été étudiée dans la région de Hoggar .On a dénombré environ 120 granits de ce type, qui sont présents sous forme de massifs et de dykes, dans des batholites de granitoïdes pharusiens et suggarien, ainsi que dans des Schistes cristallins de différents âges et natures. Selon la carte 2 environ 34 % des granites Taourirts se trouvent dans les granitoïdes pharusiens et environ 24 % se trouvent dans les roches indifférenciées du pharisien, tandis que 12% se trouvent dans les granitoïdes suggarien et environ 30 % se trouvent

dans les roches indifférenciées du suggarien. la majorité des granites de type Taourirts sont directement contrôlés par des failles , notamment des failles de direction Nord – Ouest , Nord – sud et Nord –est , qui contrôlent respectivement plus de 70 % , 20 % et 10 % des granites identifiés dans la région .

II-7- Répartition Des Taourirts A travers les grands Ensembles Du Hoggar :

La présence de plusieurs Taourirts (montagnes) dans la partie nord de le Horst – Anticlinorium du Hoggar leur présence est contrôlée par des failles nord-est et ces massifs ne présentent pas de minéralisation intéressante, à l'exception de quelques faibles anomalies de niobium et de tantale. Dans la partie ouest de le Horst- Anticlinorium se trouve le Megasynclinorium du Hoggar qui regroupe également plusieurs Taourirts associés aux granitoïdes pharusiens et concentrés pour la plupart dans la partie nord .Ces massifs sont contrôlés par des failles subméridiennes ou réseau de failles de direction nord-est. Certains massifs peuvent atteindre de grandes dimensions en coalescence avec d'autres unités la pétrographie du granite couramment présent dans ces massifs, qui est de type calco-alcalin potassique ou monozonitique et contient des cristaux d'hypidiomorphes et zonés de plagioclases, des phénocristaux de microcline, de la biotite ferrifère et parfois de la hornblende, ainsi que des minéraux accessoires tels que la fluorine, l'allanite, la sphène, l'apatite et le zircon.

II-7.1- Structure :

La structure de Taourirts est décrite comme ayant des zones imbriquées avec un anneau externe granitique à grain moyen et une granulométrie décroissante vers le centre

II-7.2- La Minéralisations des Taourirts :

Dans la région sont également faibles, à l'exception d'un petit gisement d'étain à El BEMA EST. Des indices de cassitérite sont rapportés dans les veines de quartz d'AIT OKLAN, tandis que TESNOU 2 contient des pegmatites à cassitérite et tourmaline, ce qui est rare pour la région les indices de Wolfram se trouvent dans les lentilles de quartz de TESNOU 6, tandis que les indices de scheelite se trouvent dans les alluvions drainant TESNOU 7. EL BEMA – EST contient cinq veines de quartz avec de la cassitérite et les réserves d'étain estimées sont de quelques milliers de tonnes. Les Taourirts se trouvent également dans la partie ouest du Hoggar contrôlées par des failles nord – nord –ouest, et présentent de faibles anomalies géochimiques à Ta

II-8- Anticlinorium Du Hoggar central :

Est une vaste région qui contient le plus grand nombre de Taourirts minéralisés ceux- ci sont répartis en deux Zones : Tamanrasset e Laouni

II-8.1- Région de Tamanrasset :

dans la région de Tamanrasset sont principalement contrôlés par des failles nord-ouest comme GARA HONIQUE tassa et des failles nord-nord-ouest comme BACHIR TANOUT TIN TEGANET .La mise en place de ces massifs s'est faite à faible profondeur comme en témoignent les bordures gelées Le granite de la région est à gros grains avec une dominante d'orthose , d'oligoclase de biotite ferrifère et de fluor, les minéralisations de cette région sont principalement en cassitérite

et en wolframite et se retrouvent dans diverses formations , dont des veines de quartz , des Greisen et des pegmatites . Certaines des minéralisations les plus intéressantes sur le plan économique sont situées dans la partie sud de TAMANRASSET à TIN AMZI, EL KAROUSSA et BACHIR. Il est à noter qu'il y a une absence totale de Tourmaline

La plusieurs gisements miniers de différents minéraux situés dans la région sud de TAMANRASSET le gisement de Taourirts se trouve dans un bassin de gneiss et de granitogneiss, avec une minéralisation sous forme de veines de quartz et de Greisen à prédominance de wolframite, avec un peu de cassitérite et des traces de sulfures

EL KAROUSSA est à proximité et a une géologie similaire, avec une minéralisation sous forme de veines riches en quartz de cassitérite et de wolframite ou de pegmatites et de stockverks.

Le gisement **BACHIR** est plus au sud et est encaissé dans des gneiss et des granitos gneiss recoupés par des dykes de micro diorite, avec une minéralisation retrouvée dans des veines de quartz ce gisement contient principalement du wolframite, une peau de cassitérite et des traces de sulfures. Enfin, deux petits gisements de wolframite et de cassitérite respectivement sont mentionnés la pluparts des gisements de région sont mixtes, mais à partir de BACHIR, ils deviennent uniquement wolframifères

II-8.2- Minéralisation Non liées aux Taourirts :

Il y'a plusieurs types de minéralisations dans le Hoggar en plus des minéralisations liées aux Taourirts qui sont le plus intéressantes économiquement, il y a d'autre minéralisations qui n'ont pas d'intérêt économique il s'agit principalement de traces trouvées dans les fonds de batée cependant, il y également des indices en place tels que la scheelite dans les pyroxénites de l'oued BENE LERE et la cassitérite et le wolframite liées au granites intrusifs de DJILOUED. Ces minéralisations disséminées montrent que le Hoggar est une véritable province métallo génique à étains -tungstène

II-8.3- Position Des zones Minéralisses par rapports Aux Intrusions Granitiques :

Les zones de min éralisation sont positionnées soit à la partie supérieure des intrusions granitiques soit dans les roches environnantes . les intrusions qui affleurent peu ou pas sont les plus intéressantes pour l'exploitation minière . la répartition de la minéralisation est fonction de l'environnement structurel au moment de la mise en place des intrutions . Dans les zones intensément fissurées , la mise en place s'est effectuée dans des conditions d'un système ouvert , tandis que dans la zones peu disloquées , elle s'est déroulée dans un système clos . les éléments volatils se sont concentrés dans l'apex des intrusions et ont contribué à la transformation des granites et à la formation des minéralisations en su ; w et métaux rares (Ta , Mb entre autre)

II-8.4- Zonalite spatiales Des Mineralisations A l'échelle Du Hoggar :

minéralisations mixtes L'échelle du hoggar montre une distribution zonale dans les minéralisations en cassitérite et wolframite Au nord de la boutonnière , on trouve le petit gisement de cassiterite d'El Bema , tandis qu'au sud de tamanrasset , on trouve des minéralisations mixtes comme celles de Tin Amzi et d'Al Karoussa . Dans la région de laouni au sud de la précédente , c'est la wolframite qui l'emporte à Bachir et Nahda . Enfin , plus au Sud ce sont de faible comme Tamazaror , Titenir ,

Ouan Rechla et Sedis. Cette zonalité spatiale de l'étain et du tungstène n'est pas sans rappeler celle signalée par Routhier en 1980 à l'échelle de l'Europe et de l'Espagne . il est possible que d'autres éléments présentent une Zonalité spatiale à l'échelle du Hoggar , comme l'abondance du béryllium à Nahda et à Guerioun , mais son absence dans la région de tamanrasset est aussi remarquable .

II-8.5- Criteres De Reconnaissances Des GranitesTaourirts :

➤ **Critere Regional :**

Ils se localisent de préférence dans le Hoggar Central

➤ **Critere Structural :**

Pour la plupart , ils se situent à l'intersection de failles appartenant à deux des trois réseaux suivants : subméridien , nord-est – sud ouest et nord –ouest-sud-est.

➤ **Criteres Aeororadimetriques :**

Le critère aéroradiométrique désigne l'analyse des données collectées par des capteurs aériens pour mesurer les rayonnements émis par la surface terrestre . Cette méthodes permet de détecter des anomalies en thorium , uranium et potassium 40 qui sont souvent associées à la présence de gisements minéraux riches en ces éléments . Cependant , seules les anomalies qui sont trois fois supérieures à la valeur de base (clark) doivent être considérées comme significatives car elles sont plus susceptibles de représenter une concentration minérale intéressante . par conséquent , l'interpréssante . par conséquent , l'interprétation des données aéroradiométriques est un outil essentiel pour la prospection minière mais doit être utilisée avec prudence et en complément d'autre méthodes d'exploration pour confirmer la présence de gisements minéraux exploitables .

➤ **Criteres Morphologique :**

Sont constituées de roches grenues , langagières et à texture équigranulaire . les minéraux principaux sont le quartz , le feldspath potassique et le mica blanc ou noir . le couleur des granites peut varier du blanc au gris foncé en fonction du rapport entre les minéraux feldspathiques et mafiques Globalement , morphologiques imposantes qui ont été formées par des processus de cristallisation dans le sous- sol et qui ensuite été exposées à la surface suite à l'érosion des couches supérieures des roches .

➤ **Criteres de Zonalité et de mode de mise en place :**

Ce passage traite des caractéristiques géologiques de diverses intrusions montagneuses , telles que Taourirt , dans la région du hoggar en Algérie . les montagnes présentent généralement des structure concentriques avec une composition relativement cohérente au sein de chaque anneau . le nombre de zones varie selon les massifs et il existe deux types de zonage basés sur les changements d'alcalinité vers le centre ou la préphérie de l'intrusion . les éléments volatil sont on tendance à se concentrer au sommet de l'intrusion en raison de la gravité ou de la température . la taille des intrusions diminue du nord au sud , mais la cause est probablement une réduction de volume plutôt qu'une érosion . le Taourirt présente généralement une zonation verticale , avec des greisens au sommet , suivis d'apogranites avec albitisation , et enfin de granites sains . le

mode d'intrusion était probablement peu profond dans la région centrale du hoggar , les roches environnantes s'effondrant pour permettre à l'intrusion de se former . les observations peuvent ne pas s'appliquer aux intrusions fortement érodées comme Nahda.

II-9- Modèle d'évolution géodynamique du Hoggar :

Le bouclier Touareg s'est structuré au cours de l'orogénèse panafricaine ; celle-ci, est définie par Kennedy en 1964. Selon Liégeois et al, 2003, l'histoire géodynamique du Hoggar peut être résumée par deux phases principales de collision :

-Vers 700 Ma, une collision précoce qui s'est produite entre le craton Est Africain et les terranes situés le plus à l'Est du bouclier touareg,

-Vers 630 Ma, commence une deuxième phase de collision avec le craton Ouest Africain et s'achève vers 525 Ma suivie d'un magmatisme post-collisionnel.

Dans les deux cas, la collision correspond au premier impact majeur, marqué par de grands chevauchements, la mise en place de plusieurs batholites calco-alkalins riches en K, la remontée de roches métamorphiques de haute pression et de grands cisaillements subméridiens verticaux, d'échelle continentale (Caby, 1968 ; Black et Liégeois, 1993), soulignés par des mylonites. Ces accidents sont interprétés comme des décrochements à rejet horizontal pouvant atteindre 100 km. Cependant, la période post-collision correspond à de vastes mouvements horizontaux des terranes le long de grandes zones de cisaillement ou « megashear zones » et s'accompagne de mise en place d'intrusions basiques et de nombreux granitoïdes (Liégeois et al. 1998). Ceci est l'épisode majeur conduisant à la structuration de l'Afrique et à la formation du super-continent du Gondwana.

II-9.1- Les terranes du Hoggar central :

Le Hoggar central constitue un vaste domaine de croûte continentale ancienne et épaissie, plus ou moins réactivée au cours de l'orogénèse panafricaine. Sa configuration actuelle est due à la juxtaposition de quatre terranes aux caractéristiques géologiques communes (Laouni, Azrou-n-Fad, Téféddest et Egéré-Aleksod), bordés au sud par le principal terrain juvénile de Serouenat, et à l'ouest par les terrains Iskel. Ces quatre terranes composites de LATEA sont formés d'un socle paléo protérozoïque (Bertrand et al 1986) avec des lithologies archéennes bien conservées (Latouche et Vidal, 1974 ; Peucat et al 2003), et de terrains néoprotérozoïques d'extension limitée (moins de 10% de la surface), bordés par des contacts tectonique (Bertrand et Caby, 1978). Les ressemblances remarquables entre les différents terranes, à savoir la paragenèse primaire, la composition, les reliques de métamorphisme panafricain de type HP-HT, et les critères de sens de cisaillement qui indiquent un sens de mouvement général vers le Nord-Nord-Est, ont conduit Liégeois et al. (2003) à les interpréter comme un vieux microcontinent appelé LATEA. Le terme de LATEA a été choisi, à partir des initiales des terranes qui le composent (Laouni, Azrou n'fad, Tefedest, Egeré-Aleksod). L'histoire de l'ensemble de LATEA selon Maxon et Tinkoff (1996) correspond à une orogénèse de type « hit and run » : « hit » correspond à la collision précoce marqué par de grands chevauchements et par un soulèvement des roches métamorphiques de haute pression et « run » correspondent aux grands mouvements horizontaux des terrains le long

des méga zones de cisaillement sub vertical accompagné par la mise en place de nombreux batholites.

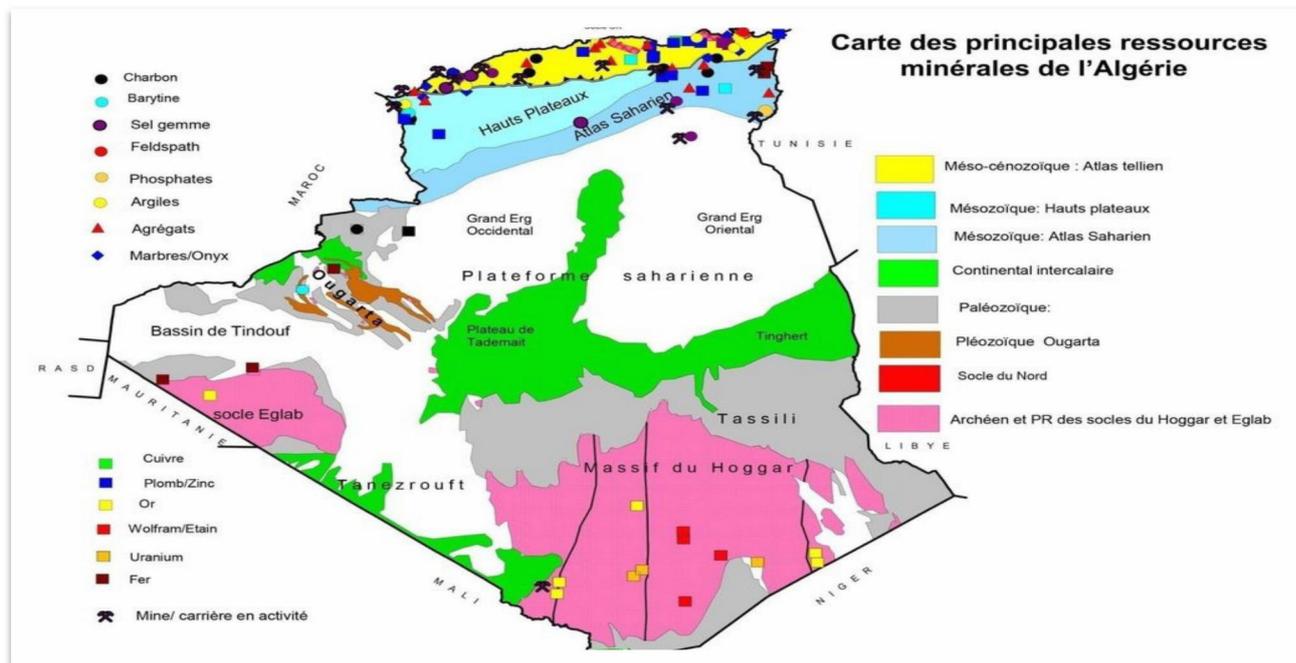


Fig.9 : Carte principaux gites et gisements (slideplayer.fr /slide/17992676/

➤ **Les Greissens et de Roches Greiséniées :**

La greiséniation est un processus de transformation des roches granitiques en roches greiséniées. Ce processus affecte tous les types de granites , y compris les "lambeaux du toi" l'intensité de la greiséniation a été irrégulière , mais elle est plus forte à l'ouest du massif , souvent aux dépens des granites à grains moyens et fins , qu'à l'est dans les granites à gros grains , les Greisen les plus remarquables se trouvent au centre du massif , formant une masse homogène de 300 * 150 m D'autre accumulations de roches greiséniées peuvent être trouvées à l'ouest et surtout à l'est du massif , souvent dans les zones fortement fissurées Greisen riches en micas et en topaze dont la composition est la suivante :

Quartz	Muscovite	Topaze	Fluorine
40-50 %	20-40 %	10-20%	1%

Greisen sur mica :

Muscovite	Quartz	Topaze	Fluorine
80 -90 %	5-10%	2-4%	1%

- **Les apogranites ou granites à muscovite, microcline, quartz et albite :**

ce sont des roches à grain moyen et fin de couleur en général blanche, mais aussi quelquefois bleu ciel , gris rosâtre , ou verdâtre : Le quartz représente environ 30 à 40 de la roche ce sont des grains 2 à 3 mm avec souvent des inclusions d'albite et de muscovite . le plagioclase représente environ 30 à 60 de la roche il s'agit généralement d'albite , mais parfois aussi d'oligoclase , qui est remplacé tardivement par de l'albite en petits cristaux allongés et lamellaires souvent , l'albite est

aussi incluse dans le quartz le microcline est xénomorphe , non quadrillé , souvent kaolinisé et mesure de 1/10 à 1,5 mm , dans certains grains , nous trouvons des inclusions d'albite tardive lamellaire . Le mica est uniquement une muscovite ferrifère elle se présente sous forme de lamelles relativement grandes, incolores ou légèrement verdâtres.souvent, elle est recristallisée en gerbes ou en houppettes. La topaze mesure environ 0,1 à 0,4 mm en grains interstitiels dans le quartz, son pourcentage peut atteindre 2 à 3% dans certaines roches. Parmi les minéraux opaques il y a la présence d'hématite identifiée par diffraction X. Elle se présente soit en cristaux automorphes isolés, soit en petits grains accolés les uns aux autres et formant des amas ou traînées dans un fond quartzeux.

II-10- Les Carbonatites :

A- Généralités

Les carbonatites sont des accumulations endogènes de calcite, de dolomite et d'autres carbonates associées de façon intime et spatialement génétiques aux intrusions compliquées de composition ultrabasique et alcaline. Elles ont commencé à être utilisées à des fins d'obtention de minéraux utiles qu'au deuxième quart du siècle courant, lorsqu'on y a décelé d'importantes réserves de minerais de niobium, terres rares, apatite et établi une concentration élevée en zircon, tantale, strontium et, par endroits, également magnétite, phlogopite et vermiculite. Les gisements de carbonatites constituent un groupe autonome de minéraux dont la valeur commerciale a été appréciée beaucoup plus tard que l'isolement d'autres groupes de matière minérale endogène. À l'heure actuelle, on connaît environ 200 massifs ou groupes de massifs de carbonatites en roches ultrabasiques et alcalines de profondeur dont près de 20 sont exploités. Les carbonatites se rencontrent dans le globe terrestre assez rarement, ce qui explique leur exploitation tardive à des fins d'en tirer des minéraux utiles. Les carbonatites ont été découverts dans de nombreux pays, tels que l'Union Soviétique, les États-Unis, le Canada, le Brésil, la Bolivie, la République Fédérale d'Allemagne, la Suède, la Norvège, la Finlande, le Groenland, l'Australie, l'Inde, l'Afghanistan et quinze autres pays d'Afrique. En règle générale les carbonatites entrent dans la composition d'ensembles intrusifs compliqués du type central, qui ont évolué en cours de formation des roches ultrabasiques aux alcalines

Voici quelques exemples des Terres Rares fréquemment trouvées dans les Carbonatites

Cérium (Ce) ; Lanthane(La) ; Néodyme (Nd) ; Praséodyme (Pr) ; Samarium (Sm) ; Europium (Eu) ; Gadolinium (Gd) ; Terbium (Tb) ; Dysprosium (Dy) ; Holmium (Ho) ; Erbium (Er) ; Thulium (Tm) ; Ytterbium (Yb) ; Lutécium (Lu)

Les complexes magmatiques ultrabasiques et alcalins à carbonatites donnent naissance généralement aux formations intrusives en anneaux zonales d'aspect morphologique semblable On y distingue : 1) des stocks (massifs) annulaires et zonaux du type de bouches volcaniques , 2) des massifs en lopolites côniques , 3) des systèmes de dykes annulaires et semi-annulaires remplissant les fissures côniques convergeant ou divergeant en profondeur , 4) des intrusions combinées englobant les éléments de trois premiers groupes

La formation des complexes commence avec la pénétration d'un magma ultrabasique et passe par une série d'intrusions ultrabasiques et alcalines, qui se termine par la création de carbonatites.

Parfois, les carbonatites sont recoupées par des dykes plus tardifs de roches alcalines. Dans certains gisements de carbonatites, les roches ultrabasiques sont absentes et elles ne sont associées qu'aux intrusions alcalines. Lorsque les intrusions à carbonatites s'insèrent dans les granites, les gneiss ou les schistes, ces derniers sont modifiés par métasomatose alcaline avec formation de fénites très spécifiques. Les auréoles de roches fénitisées s'étendent à la périphérie des complexes alcalins sur des centaines de mètres (jusqu'à 10 km).

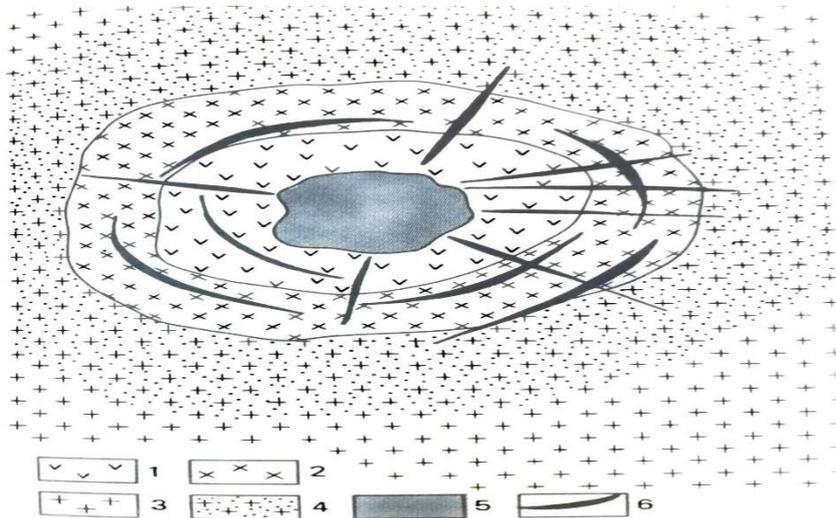


Fig. 10 : Schéma général de structure d'un gisement à carbonatites. V. Smirnov. (1982).

- 1- roches alcalines
- 2-roches ultrabasiques
- 3-gneisse
- 4-fénites
- 5-stock de carbonatites
- 6-filons de carbonatites

Le processus de formation de complexes magmatiques ultrabasiques et alcalins est généralement caractérisé par un mouvement des séries de roches postérieures vers le centre de la structure annulaire zonale. Les carbonatites remplissent alors le noyau de cette structure. Toutefois, il peut y avoir des cas plus rares où le développement inverse se produit, à partir du centre vers la périphérie de la structure. Dans ces situations, les carbonatites occupent les zones marginales du complexe annulaire zonal. Les gisements de carbonatites existent sous différentes formes telles que des stocks (massifs), des dykes coniques plongeant vers le centre du massif, des dykes annulaires plongeant depuis le centre du massif et des dykes radiaux. Ils ont des dimensions variables, allant de quelques mètres à 7-8 km pour les stocks en Afrique du Sud, et en passant par des dykes épais jusqu'à 10m et longs de plusieurs centaines de mètres, voire de 1 à 2 km comme en Suède (Alno). Les contacts entre les carbonatites et les roches encaissantes sont généralement brusques 80 à 90% de la composition minérale des carbonatites, avec les carbonates en tête. Les carbonatites les plus courantes sont les calcifiées ou sövites, mais il existe également des carbonatites à dolomites, ankérites et à sidérose (très rares). La formation de carbonatites suit une

certaine succession avec une accumulation initiale de calcite, puis de dolomite et enfin d'ankérite. Les autres minéraux sont considérés comme accessoires. Leur nombre total peut représenter environ 10-20% de la composition minérale des carbonatites

Parmi les minéraux accessoires des carbonatites il y a des minéraux particulièrement spécifiques considérés comme minéraux typo morphiques , à savoir , la phlogopite et l'apatite ainsi que des minéraux rares : 1) la baddeleyite- ZrO_2 , 2) le pyrochlore-(Na , Ca , Ce)₂ (Nb ,Ti, Ta)₂O₆(O,OH,F), 3) la hatchettolite , le pyrochlore à uranium , 4) la pérowskite-knopite-dysanalyte (Ca, Ce)(Ti, Fe⁺³, Nb)O₃ , 5) , les carbonatites des terres rares du type de schiste Ca (Ce, La)(CO₃)₂ F, de parasite Ca(Ce, La)₂(CO₃)F₂, de bastnäsité (Ce, La)(CO₃)F.

Les carbonatites sont des roches riches en carbonate et contiennent des minéraux accessoires spécifiques tels que la phlogopite, l'apatite, la baddeleyite, le pyrochlore, la hatchettolite, la pérowskite-knopite-dysanalyte, et les carbonates des terres rares : bastnäsité, parasite, etc. Selon des études, l'accumulation des carbonatites se fait en quatre stades, avec des minéraux différents se formant à chaque stade, y compris des minéraux de titane, de zirconium, de tantale, de niobium, d'uranium et de thorium. Les carbonates des terres rares tels que bastnäsité et parasite se développent également au quatrième stade

La texture des carbonatites est généralement massive, quelquefois rubanée, noduleuse et gaufrée. Ces dernières variétés de texture sont dues aux précipitations correspondantes de minéraux accessoires de couleur sombre constituant des chaînes linéaires et des fines intercalations dans la masse carbonatée. La structure des carbonatites est grenue avec des minéraux composants de grosseurs variées.

Dans les carbonatites se concentrent les ressources de tantale, niobium, terres rares et des réserves suffisamment importantes de minerai de fer (magnétite, hématite, sidérite), titane, fluorine, phlogopite, apatite, minerais de cuivre, plomb et zinc, matière carbonatée. D'après la composition des minéraux utiles dans les carbonatites, ces dernières peuvent être divisées en sept groupes : 1) des minerais de tantale et de niobium à hatchettolite et pyrochlore, 2) des minerais de terres rares à bastnäsité-parasite-monazite, 3) des minerais de fer-titane à pérowskite et titan magnétite, 4) des minerais de fer et phosphore à apatite et magné- Tite, 5) des phlogopite, 6) des fluorines, 7) des minerais de cuivre et plomb sulfurés. Le terme "carbonatites" a été introduit dans la littérature géologique par le géologue W.Brogger qui a décrit en 1921 le gîte de foen en Norvège la valeur commerciale des carbonatites a été appréciée sur l'exemple de gisements d'Afrique en 1940 par K.Davis.

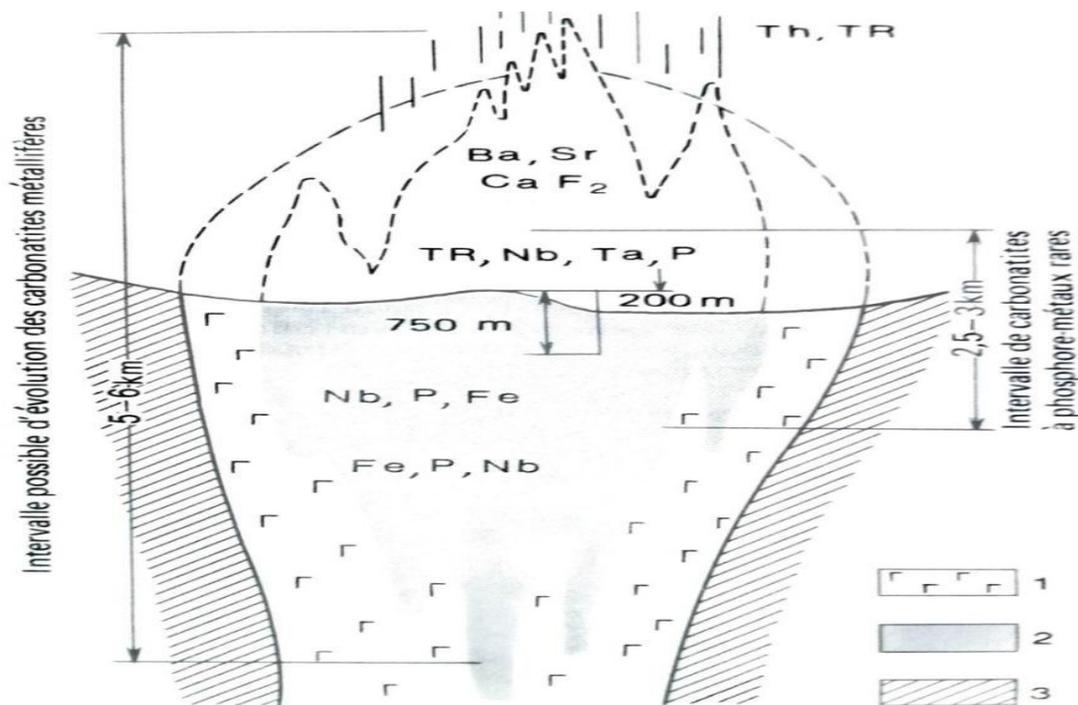


Fig. 11: types minéraux de carbonatites métallifères en section verticale des roches ultrabasiques et alcalines. Selon A.Frolov.

1-roches ultrabasiques et alcalines

2-Carbonatites

3-terrains encaissants

Les carbonatites à hatchettolite et pyrophore sont connues au Canada, Brésil, Afrique et autres Pays; elles contiennent d'importantes réserves de niobium atteignant des millions de tonnes avec teneur en Nb_2O_5 , de 0,1 à 1% qui dans la zone d'altération monte par endroits jusqu'à 4,5%; des réserves plus modestes de tantale atteignent, toutefois, plusieurs millions de tonnes pour une teneur de Ta, O, de 0,01 à 0,3%. Les carbonatites à bastnäsité-parasite-monazite ont été décelées au Canada, U.S.A., Afrique et autres pays; elles sont une source importante de terres rares, surtout du groupe de cérium; la teneur en TR_2O_3 , varie des dizaines à l'unité de pour cent et atteint dans la zone d'altération 20% (Mountain Passe. U.S.A.).

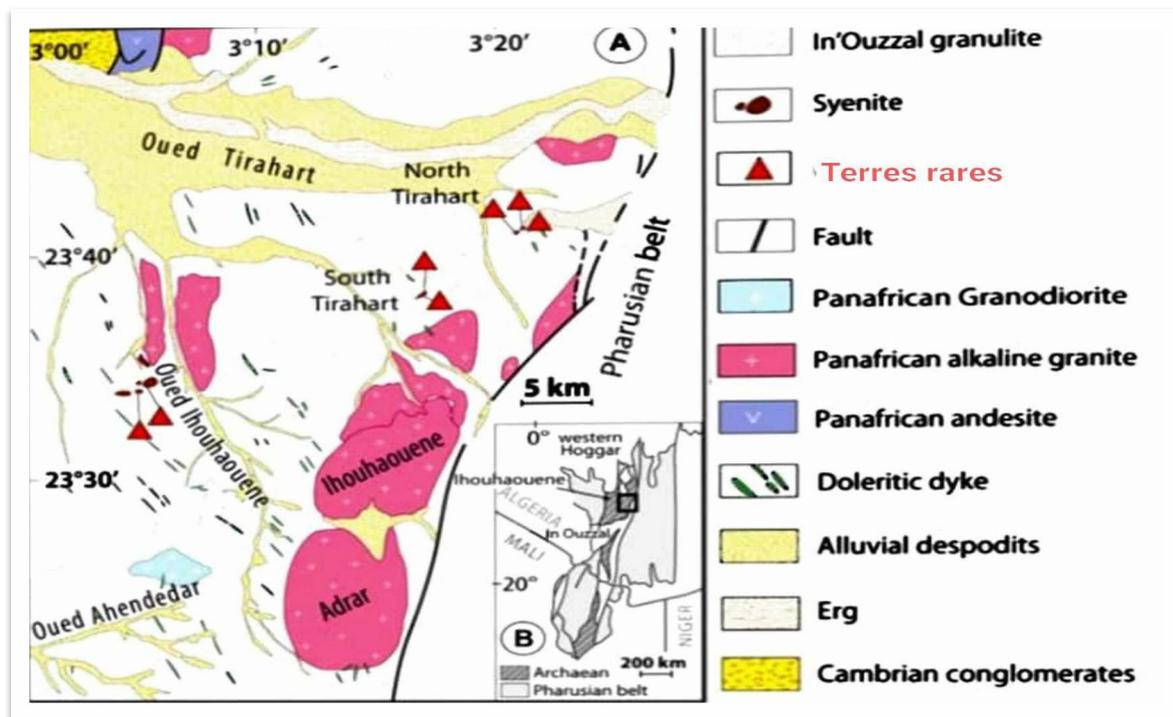


Fig.12 : Carte géologique de la région d'Ihouhaouene dans la partie nord-ouest du terrane d'In Ouzzal et localisation des Terres rares et syénites associées. (B) Position de la région d'Ihouhaouene dans l'ouest du Hoggar, au sud de l'Algérie (Djeddah et al. 2021 modifié de Ouezzane et al. 1988 ; Black et al. 1994. Modifié).

B- Conditions Physico-Chimiques De Formation :

La formation de massifs de roches ultrabasiques et alcalines s'achève par l'isolement des carbonatites et couvre une longue période. Selon A. Guinsburg et E. Epstein, cette évolution magmatique se divise en quatre étapes, chacune caractérisée par la formation de différentes roches, telles que les dunites-péridotites, les péridotites et les pyroxénites à la première étape ultrabasique, les péridotites biotiques, les pyroxénites, les katangaises et les roches à méli-mélo à la deuxième étape alcalino-ultrabasique, les roches d'ijolitemelteigite allant des jacupirangites aux urtites à la troisième étape et les syénites néphéliniques et alcalines à la quatrième étape. La formation de ces roches magmatiques est interrompue par l'insertion de roches magmatiques insérées.

Le temps écoulé entre la formation des premières roches basiques et l'apparition des carbonatites les plus tardives peut atteindre plusieurs dizaines de millions d'années.

Au cours de l'insertion successive du magma, des transformations métasomatiques se produisent aussi bien dans les contacts endomorphes qu'exomorphes. Les accumulations de néphéline-pyroxène, pyroxène-phlogopite et pyroxène-amphibole se forment grâce à la métasomatose de contact endomorphe, tandis que la métasomatose de contact exomorphe se manifeste par la formation d'auréoles de fénitisation dans les roches encaissantes.

Les carbonatites se divisent en deux catégories, les carbonatites "ouvertes" qui ont atteint la surface de la Terre et les corps de carbonatites qui descendent à de grandes profondeurs. Les

sondages de prospection ont permis de suivre les carbonatites jusqu'à des profondeurs de 300 à 500 mètres en URSS, 2 km pour les carbonatites d'Alnö en Suède et même 10 km pour les carbonatites du groupe de Sette-Daban. Cela signifie que l'intervalle vertical de développement des carbonatites peut atteindre au moins 10 km.

Dans l'étude menée par Frolov, Samoilov et Moore sur les carbonatites de différents niveaux de formation et de tranche érodée, un schéma de zonalité verticale des gîtes de carbonatites a été dressé. Selon les données recueillies, à de grandes profondeurs dominent les roches ultrabasiques, auxquelles est annexée la minéralisation en pérowskite-titanomagnétite, phlogopite et dolomite-calcite à des profondeurs moyennes, ces roches sont préférentiellement remplacées par des formations à ijolitemelteigite avec des carbonatites calciques. Aux faibles niveaux volcaniques se développent des roches à syénites avec le cortège de carbonatites le plus varié. Finalement, dans le faciès effusif, prédominent les laves alcalines et les tufs à minéralisation en baryte-apatite.

Les carbonatites associées aux roches ultrabasiques et alcalines sont interprétées comme des dérivées de magmas basaltiques sous-corticaux et appartiennent aux foyers magmatiques plutoniques. Il est admis sur la base d'analyses géologiques, géophysiques et d'expériences, que le magma, qui leur a donné naissance, s'est élevé des profondeurs de 100 à 150 km. L'intervalle étendu de montée du magma engendrant les carbonatites, égal à des centaines de kilomètres suivant la verticale, a assuré son long cheminement, vraisemblablement avec des arrêts dans les foyers intermédiaires, nécessaire pour différencier d'une manière radicale. La composition ultrabasique de celle alcaline. Le long développement des roches ultrabasiques et alcalines avec carbonatites les accompagnants s'est déroulé dans de très larges limites de température s'abaissent peu à peu. Selon Sokolov, les étapes suivantes d'évolution des températures ont été observées

- 1) des roches ultrabasiques suivant les données différentes de 1350 à 1100 °C ;
- 2) des roches alcalines d'étapes à ijolitemelteigite, établies d'après le thermomètre géologique à biotite-pyroxène et le thermomètre d'enclaves vitreuses, de 1100 à 630 °C ;
- 3) des roches d'étape de syénites néphéliniques d'après les données analogues de 750 à 620 °C ;
- 4) des carbonatites de premier stade, d'après les données d'analyse des champs de stabilité, du thermomètre géologique à pyrrhotine-pyrite, de désintégration des solutions solides, de luminescence et de thermométrie (homogénéisation et décrépitation), de 630 à 520 °C

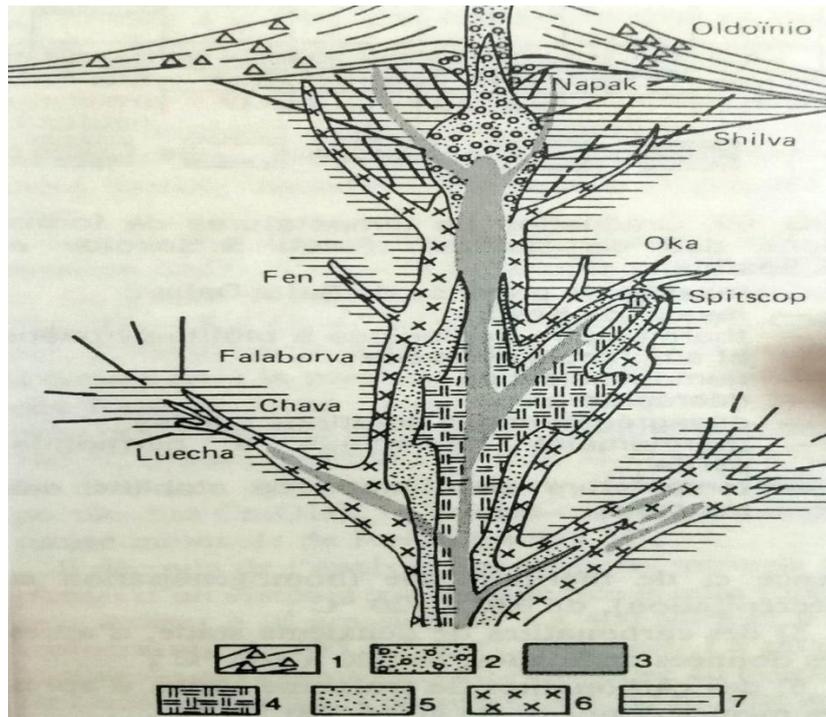


Fig. 13: Schéma général de Zonalité verticale des carbonatites .Selon A. Moore volcanites. V. Smirnov. (1982)

1- des versants

2-de bouche de volcan ;

3-Carbonatites ;

4-roches ultrabasiques ;

5-ijolites ;

6-syérites néphéliniques ;

7-aire de fénitisation.

5) des carbonatites de deuxième stade, d'après les données analogues, de 520 à 400 °C.

6) des carbonatites de troisième stade, d'après les mêmes données, de 400 à 300 °C ;

7) des carbonatites de quatrième stade , d'après les mêmes données , de 300 à 200 °C Les grande extension verticale de formation des carbonatites témoigne du fait que la pression variait beaucoup du niveau supérieur , atteignant la surface terrestre , aux horizons profonds . Pour le gisement de Goulia où la tranche érodée est suffisamment profonde L.panina et V.kostiouk estiment la pression égale à 100-60 MPA

Les variations importantes de pression et de température présentes dans les carbonatites ne sont pas caractéristiques des roches sédimentaires.

-les carbonatites sont souvent associées à des roches alcalines et ultramafiques à des, qui ont une origine magmatique plutôt que sédimentaire. Des études géochimiques ont montré que la composition des carbonatites diffère de celle des calcaires sédimentaires

-Les carbonatites contiennent souvent des minéraux rares et des éléments en concentrations anormalement élevées, ce qui n'est pas le cas des calcaires sédimentaires.

-Les carbonatites sont souvent intrusives et présentent des textures magmatiques, ce qui contredit l'hypothèse de leur origine sédimentaire

En somme, les carbonatites ont une origine magmatique et sont hébergées dans des complexes alcalins et ultramafiques. Leur formation est associée à des conditions extrêmes de pression et de température, ce qui en fait des gisements endogènes distincts des roches sédimentaires. Elles sont contredites par les facteurs suivants :

1) dans les assises des roches encaissantes de la plupart des régions d'extension des carbonatites les roches carbonatées sédimentaires manquent ; 2) la forme cylindrique ou en dykes des carbonatites ; 3) la mise en place en plusieurs stades des carbonatites ; 4) les indices de substitution métasomatiques des carbonatites aux roches encaissantes de plusieurs gisements ; 5) la présence dans les carbonatites de minéraux spécifiques dont des terres rares absentes dans les calcaires sédimentaires ; 6- et partant l'enrichissement des carbonatites en éléments rares , par exemple , la teneur en strontium y est de 5 fois , en lanthane de 500 fois , en niobium de 6 mille fois supérieure à celle des roches carbonatées sédimentaires (D.Gold) ; 7) le rapport élevé d'isotopes ^{18}O , ^{16}O , ^{13}C , ^{12}C , ^{26}Mg , ^{24}Mg et ^{87}Sr , ^{86}Sr dans les carbonatites comparé aux roches carbonatées sédimentaires et la correspondance du rapports ^{34}S , ^{32}S au standard des météorites ce qui témoigne de leur origine juvénile ainsi que de la température de formation plus élevée .

Actuellement deux hypothèses de formation des carbonatites sont en concurrence .l'une voit dans les carbonatites une roche formée par cristallisation du bain magmatique .Ce pont de vu est défendu par H.Basset , D.Bayly,W.Brogger ,K.Davis ,B.King ,E. larsen, V.pekora ,B.Smith, A.Holms ,H.Eckermann ,R.Erikson et autres , et parmi les géologues soviétiques par L.Egorov , A. Lapine , A.jabine

D'après la deuxième , les carbonatites sont des produits typiques des gisements hydrothermaux postmagmatiques aux rapports variés des dépôts de substance dans les cavités des roches encaissantes à leur substitution .parmi les savants étrangers cette hypothèse est propagée par N.Bower à certains égards par E.Setterly , I.Frehen et parmi les soviétiques par L.Borodine , A.Guinsburg , L.pojaritskaïa , A.Frolov , Y. Scheinmann, E.Epstein et autre .

L'hypothèse magmatique suggère que certains corps de carbonatites ont été mis en place par cristallisation à partir du bain magmatique .Cette hypothèse est confirmée par présence de xénolites de roches environnantes , des débris de roches ultrabasiques et alcalines , ainsi que de roches fanatisées , dans les carbonatites , et par la texture fluidale de certaines d'entre elles ,De plus la composition des carbonatites est indépendante de celle des roches les traversant .Des épanchements de laves alcalino-carbonique calcio- et carboniques ont également été observés dans les volcans actuels . Ainsi , l'hypothèse magmatique suppose que les carbonatites sont d'origine magmatique un argument important en faveur de l'origine magmatique est découverte dans la composition des carbonatites de l'U.R.S.S. et de l'Afrique des enclaves fondues de température d'homogénéisation de 880 à 550 °C (B.Romanov ,S.Sokolov ,E .Kharlamov ,V. Kelly et

autres), ce qui a incité certains chercheurs les étudiant de soulever la question de liquation magmatique et de séparation d'un carbonaté aux températures de $900 \pm 50^\circ\text{C}$. Ces conceptions sont confirmées par les études expérimentales de G.Orlova et I.Riabtchi –kov du système $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{CO}_2$ démontrant que la liquation du magma avec séparation du bain carbonaté est possible en conditions de potentiel élevé de CO_2 à la profondeur non inférieure à 30-40 km . L'aspect théorique de l'hypothèse magmatique a également été élaboré par L.Pertchouk, des informations intéressantes peuvent être puisées dans les travaux de A. Lapine. L'examen de dykes de carbonatites d'Alnö en suède par les participants à la XXI^e session du congrès géologique international en automne 1960 sous la direction de H.Eckermann n'a laissé aucun doute sur la genèse à partir du bain magmatique.

C- Conditions Géologiques De formation

a-Relation avec les formations magmatique

Les carbonatites constituent un groupe isolé de gisements endogènes non seulement par l'originalité de leur composition, mais aussi du fait de la spécificité des conditions géologiques de leur mise en place. Tous les gisements de carbonatites découverts à ce jour sont associés exclusivement à l'étape cationique de développement géologique et ne sont annexés qu'aux complexes d'intrusions ultrabasiques et alcalines des plates-formes du type central. Ces intrusions de composition suffisamment compliquée d'une part, et d'autre part nettement différenciée, possèdent un arrangement en zones concentriques.

On y distingue quatre variétés principales :

- 1) les roches primaires ultrabasiques (dunites-péridotites, pyroxénites, pyroxénites alcalines;
- 2) les roches alcalines postérieures (melteigites-ijolites, syénites alcalines et néphéliniques) ;
- 3) les auréoles de roches encaissantes acides, soumises à la métasomatose alcaline et transformées en fénites ;
- 4) les carbonatites elles s'accompagnent d'une série à dykes nombreux, en général, de composition compliquée, témoignant d'une évolution longue et résolument orientée du foyer magmatique et constituée de roches variées depuis les porphyrites picritiques au pegmatites alcalines le groupe caractérise dans l'ensemble par une sous-saturation en alumine et un enrichissement relatif en alcalins et composants volatils, les relations avec des gisements de carbonatites avec les autres formations magmatiques d'origine aussi bien géosynclinale que cratonique n'ont pas encore été établies jusqu'à ce jour.

b- Age géologique

En se localisant sur l'aire des plates-formes antépaléozoïques, les carbonatites ont des âges géologiques différents on connaît des formations du cycle de développement précambrien (quelques carbonatites de Sibérie, Afrique et Amérique du Nord), calédonien (Touva, probablement Saïan oriental et Scandinavie), hercynien (presqu'îles de Kola), cimmérien (plate-forme de Sibérie, Brésil, Canada) et alpin (la plupart des carbonatites d'Afrique, d'Asie), les carbonatites se formaient en place sur les plates-formes dans des conditions d'activation tectonomagmatique, alors que dans les géosynclinaux voisins se déroulaient les principales phases de plissement.

c-Structure géologique

En étudiant des structures géologiques contrôlant la position des gisements de carbonatites, il faut distinguer les structures déterminant la position d'intrusions à carbonatites de celles fixant la position des concentrations de carbonatites en leurs limites

Comme il a été déjà noté, les intrusions ultrabasiques et alcalines du type central, auxquelles sont annexées les carbonatites, se disposent exclusivement sur les plates-formes. Elles sont connues sur les aires de plates-formes activisées, affectées d'énormes cassures tectoniques. Actuellement les carbonatites sont décelées sur les plate-forme de Sibérie , d'Afrique , d'Amérique du sud , d'Amérique du Nord , indienne et australienne , ainsi que sur le bouclier baltique de la plate-forme de Russie .les grand fractures affectent soit la bordure des plates-formes , soit se concentrent dans leurs parties centrales (c'est ainsi que les carbonatites de la plate-forme africaine se trouvent dans la région des grandes cassures tectoniques) .

d-Lien avec d'autres groupes génétiques :

Les gisements de carbonatites sont nettement séparés d'autres groupes minéraux aussi bien par leurs conditions de mise en place géologiques que physico-chimiques .le plus s'en rapprochent les gisements magmatiques de diamants de kimberlites localisés comme les carbonatites le long de grandes cassures affectant des corps d'anciennes plates-formes.

II-11- Les conditions géologiques de formation des terres rares

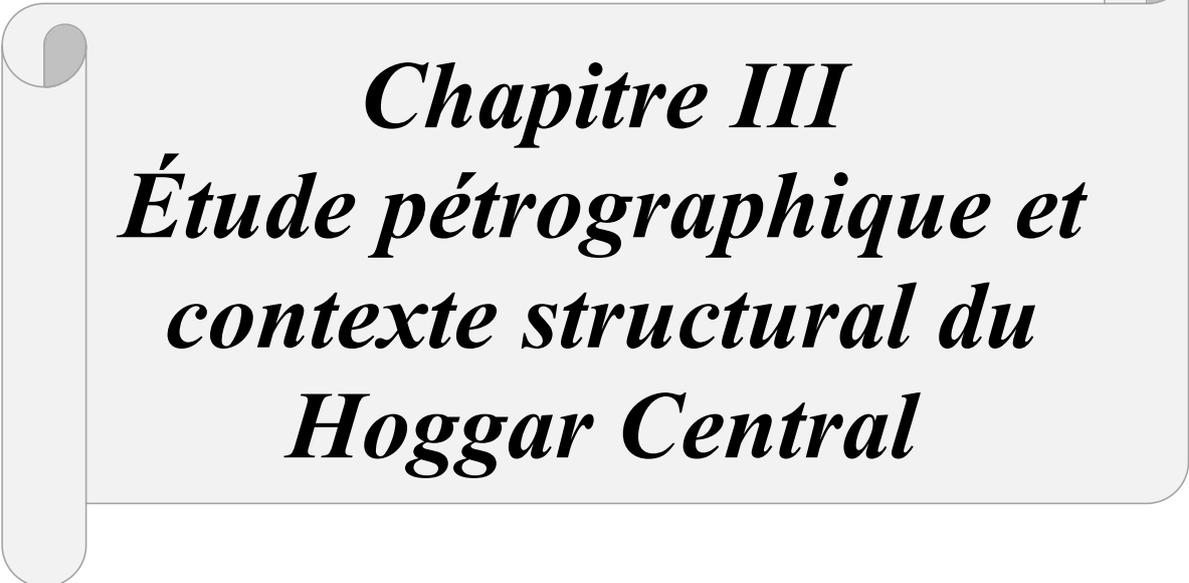
Les terres rares sont des éléments qui se trouvent dans la croûte terrestre mais leur concentration est très faible, souvent inférieure à 0,1%. Les gisements de terres rares sont formés par des processus géologiques qui impliquent la présence de certaines roches et minéraux.

1- Magmatisme alcalin : les terres rares se forment souvent dans des roches magmatiques alcalines, qui sont riches en sodium et en potassium. Ces roches se forment lorsque du magma chaud remonte vers la surface et se refroidit lentement. Les terres rares sont concentrées dans des minéraux tels que la monazite, la bastnäsité, et la xenotime.

2-Hydrothermalisme : les gisements de terres rares peuvent également se former par le biais de processus hydrothermaux, où des fluides chauds circulent dans les fractures et les fissures des roches. Les terres rares peuvent être déposées dans des minéraux tels que la fluorite, la pyrite et la baryte.

3-Sédimentaire : les dépôts sédimentaires peuvent également contenir des terres rares. Les minéraux tels que la xenotime peuvent être trouvés dans des sédiments de plage et des dépôts de sable côtiers.

4-placer : les terres rares peuvent également être trouvées dans des dépôts d'alluvions ou de plages, où des minéraux lourds sont concentrés par des vagues et des courants marins. Les minéraux contenant des terres rares peuvent être extraits à partir de ces dépôts en utilisant des lames ou des techniques d'extraction de densité.



Chapitre III
Étude pétrographique et
contexte structural du
Hoggar Central

Chapitre III: Étude pétrographique et contexte structural du Hoggar Central

III-1-Introduction :

Le Hoggar central est une région montagneuse située dans le sud de l'Algérie. Cette région est caractérisée par une géologie complexe et diversifiée, ainsi que par une variété de roches et de minéraux, contenant des indices des terres rares. Du point de vue géologique, le Hoggar central est composé de roches magmatiques, métamorphiques et sédimentaires. Les roches magmatiques dominantes sont le granite et le gabbro, tandis que les roches métamorphiques comprennent le marbre, le schiste et le gneiss. Les roches sédimentaires couvrent une grande partie de la région et comprennent des dépôts de grès, de calcaire et d'argile. Les études pétrographiques ont révélé que les roches du Hoggar central présentent une grande variété de textures et de structures, allant du grain fin au gros grain, ainsi que des structures plissées et des failles. Ces caractéristiques ont permis aux géologues de mieux comprendre la formation de cette région. En ce qui concerne les terres rares, des études récentes ont montré que le Hoggar central contient des indices apparemment importants de terres rares. Ces substances sont utilisées dans plusieurs domaines de la fabrication de nombreux produits de haute technologie, tels que les écrans plats, les aimants permanents et les batteries rechargeables. En résumé, le Hoggar central est une région géologiquement très diversifiée riche en ressources minérales et substances utiles. Les études pétrographiques et la découverte de terres rares dans la région ont permis aux scientifiques de mieux comprendre sa formation et son potentiel économique pour l'avenir.

III-2-Les Caractères microscopiques (Massif granitiques de Guerioune)

Les feuilles ont une texture panachée granuleuse; cellules à prédominance maculaire Petit plagioclase et micro plagioclase avec des quantités mineures de quartz. La roche est principalement constituée de quartz, de plagioclase (albite, oligoclase), microcline, orthose et muscovite. Quartz : cela va de la défense automatique normale à la sous-défense automatique La taille moyenne est de 1 mm ou peut généralement atteindre plus de 3 mm contient généralement des inclusions de biotite, de quartz, d'albite et de columbite-tantalite (Photo 2). Parfois, ils sont cassés et ont une structure ondulée. Orthose : C'est un minéral très abondant et se trouve dans une petite gamme de 0,25 mm Ou roche épiphyte généralement supérieure à 30 mm en phénocristaux Il contient des inclusions de plagioclase, généralement de l'albite, du micro plagioclase et du mica. Certains phénocristaux dégénèrent du cœur vers la périphérie pour former de fines particules Cristaux de topaze, de muscovite et de quartz

La Micro Line est plus ou moins riche en petites plages et a souvent formé de l'acholine 10mm, sa structure dans un tamis est très caractéristique. Earth Stone: Ce n'est pas très riche en matrice, c'est fondamentalement albite Le potassium contient des articles mélangés de potassium et de quartz. Biotite : Elle a une taille moyenne d'environ 0,25 mm et est abondante des auréoles pléochroïque, souvent en zircon. Peut être observé dans les inclusions de quartz et tantalite de Colomb. Certaines biotites montrent un fort clivage Oxyde

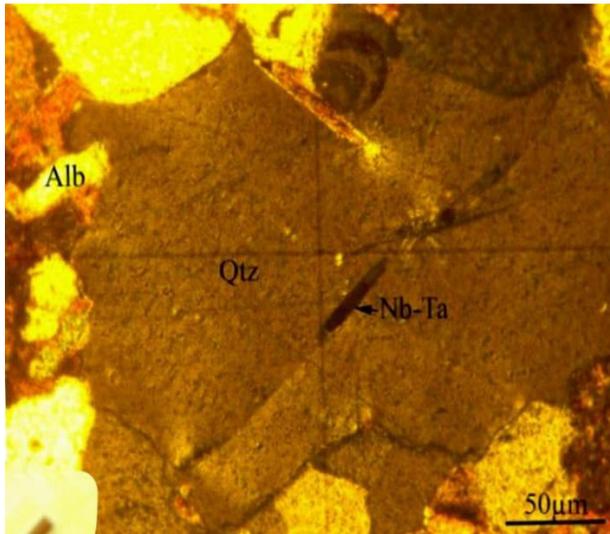


Photo 2 : Columbo-tantalite dans quartz.



Photo 3: Orthose perthitique dans granite porphyres

III-2.1-le granite à albite-Topaze

- Caractères microscopiques

Les études microscopiques révèlent un Différent faciès, granulométrie, abondance de plagioclase et présence de texture En boules de neige dans certaines lames Les autres lames sont structurées Grain fin, contenant de la topaze rare, de la fluorite et du béryl rare (Photo 4)

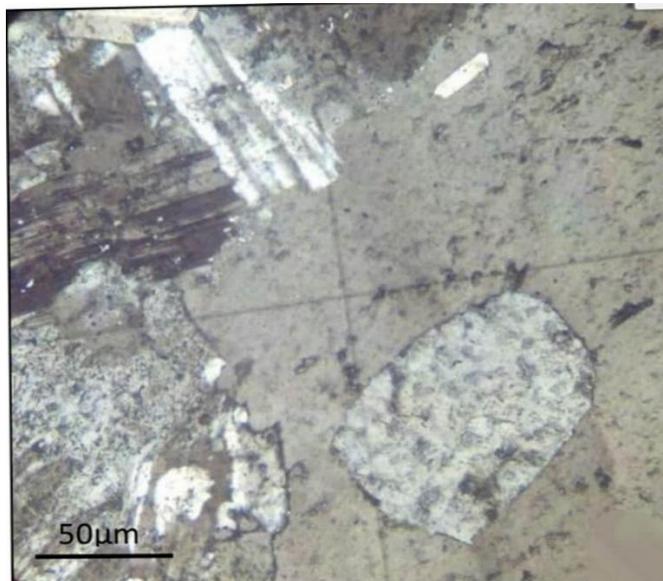


Photo 4: Béryl sub automorphe et l'atte d'albite une plage de quartz

III-2.2-Le granites à muscovites

- Caractères macroscopiques

Il existe en îlot au nord-ouest du massif et fait face au granit rose avec de la pegmatite à béryl. La pierre est de couleur blanche avec une texture à grain moyen composée de Cristaux de quartz essentiellement équivalents, parfois sphériques (1 à 2 mm), Il y a un éclat de verre. Le feldspath

Chapitre III: Étude pétrographique et contexte structural du Hoggar Central

Forme une matrice blanche avec un éclat terne. Le mica se multiplie et se colore sur les cristaux de quartz. Les relations avec les autres granites ne sont pas très claires. Photo 5 : Granite à muscovite.

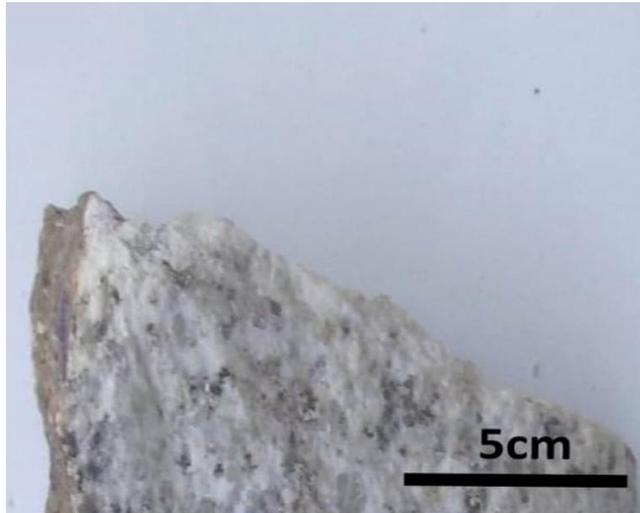


Photo 5 : Granite à muscovite

III-2.3-Les pegmatites

Les pegmatites peuvent être divisées en deux catégories :

- Pegmatites dans des poches internes de granite, échelle centimétrique, pour la plupart incisées. Granite rose, béryl commun, quartz, biotite (gabardite de zinc) Matrice générale de feldspath (Photo 6-7.)
- L'autre est enterré dans une veine de quartz. Éléments de même nature. Mais plus gros : quartz, béryl, feldspath et gabardine de zinc. Cette pegmatite contient le nécessaire. Minéralisation du béryl. Ces pegmatites feront l'objet de recherches. Voir minéralisation pour plus de détails.



Photo 6 : poche de pegmatite à béryl (cavité miarolitique)



Photo 7 : poche de pegmatite à béryl (cavité miarolitique)



Photo 8 : Granite central à amazonite (Granite vert)

III-3- Caractères microscopiques (Massif granitique de Tillik)

Au microscope, le granite central montre une texture granuleuse faite de Principalement quartz, feldspath potassique (microcline et orthose). Plagioclase Principalement albite et Oligofeldspath, mica faiblement pléochroïque il y a des Zinnwaldite et enfin des topazes dans de grandes zones rares. Quartz : Tendance à s'automorphiser, taille moyenne, peu les cristaux peuvent atteindre 1 mm Plusieurs plages de quartz contiennent des inclusions petites lamelles d'albite et décrit une certaine structure dans une "boule de neige" caractéristique des magmas à métaux rares se sont développés. Quelques fissures dans le quartz ont été enregistrées Fait d'albite. Microcline : C'est le minéral le plus abondant dans les feuilles, il Présente un motif en treillis caractéristique, souvent entrelacé Carlsbad et autochtone. Micro pente Parfois, il est souvent remplacé par l'albite. Orthose : contrairement au microcline, l'orthose est rare Moyenne (0,30 mm). C'est un extra-terrestre sous-soi avec des lamelles sur tout le corps

Albite. L'orthose est souvent profondément enchâssée, mais sans aucune altération en particulier.

Plagioclase : Ceux-ci sont rares et se présentent sous deux types :

Chapitre III: Étude pétrographique et contexte structural du Hoggar Central

Oligofeldspath : très rare, a un angle d'extinction différent de l'albite super. On le trouve dans de grandes lamelles avec des macles agrégées. Albite : Il peut avoir trois générations : première génération, précoce Présente en petites lattes d'orthose, de mica et de quartz. Avec ça Enfin, l'albite décrit la structure "boule de neige" caractéristique du granite évolué métaux rares. Dégagement deuxième génération, en lattes d'autodéfense Montre généralement une conjonction avec des jumeaux. La troisième génération dans les minuscules cristallites qui ont germé dans les micros tranches.

Mica : Le mica granitique central se présente en petites zones irrégulières (0,2 mm) et Rare dans la grande gamme 0.40mm. Ils sont faiblement pléochroïque et contiennent Inclusions d'albite, de quartz, de minéraux opaques, parfois de spath fluor et de minéraux rares Zircon. Les études de ces micas par M.E.B. ont montré que la splendolinite contient souvent de la muscovite. Parmi ces Zinnwaldite, des zircons automorphes et La présence de quartz de cérium. Ce dernier est affiché sous forme agrégée lors de la conversion en Apatite et pyrophyllite

Topaze : Très rare, cette phase a été observée dans un seul grain de zinc. Son montre des fissures normales remplies de mica.

III-3.1-Les Minéraux secondaires

La muscovite est très rare, elle pousse généralement en bordure des mines de zinc-zinc, parfois inclus en eux.

Fluorite : Très rare, généralement sub automorphe et petite. Chez M.E.B. Notez la présence importante de zircons automorphes, qui sont couramment distribués et parfois présents La fluorite est incluse dans la série.

III-3.2-Granite à albite –Topaze

-Caractères macroscopiques

C'est un granit très léger avec les mêmes propriétés que le précédent, La blancheur augmente à mesure que l'angle de micro-inclinaison diminue D'une part (amazonite) et d'autre part une abondance d'albite et de quartz. L'attention existe Topaze relativement importante

-Caractères microscopique

Au microscope, il a montré les mêmes caractéristiques que le granit central. Nous avons remarqué Cependant, quelques particularités : D'une part, la granulométrie est beaucoup plus grande Les feldspaths fins et potassiques sont fortement réduits au profit de l'albite. En revanche, la topaze est beaucoup plus abondante et de plus grande taille. Cependant Le mica reste dans les mêmes conditions (Photo 9-10).

Mica : Ils se produisent dans des endroits irréguliers, rarement 0,15 mm, on les retrouve également dans les fissures ou les inclusions. Il y en a peu Le pléochroïsme, c'est une pierre pailletée. Il contient des oxydes le long du plan une scission. Ces étincelles ont une aura polychromatique due aux cristaux de zircon.

Zircon : Il se présente en petits cristaux auto cristallisés dans le mica et conduit à habituellement une aura polychromatique.

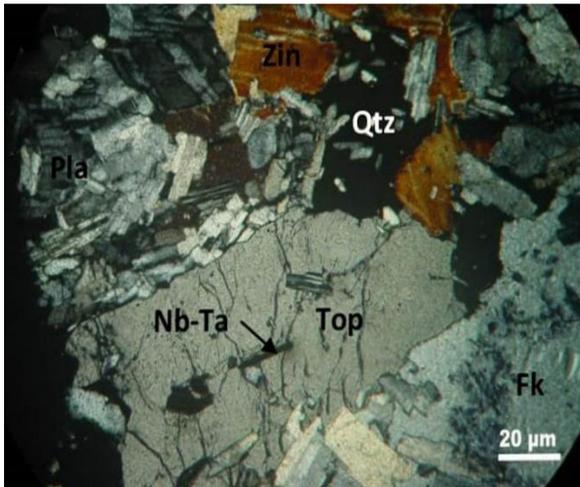


Photo 9 : Grande plage de Topaze renfermant des inclusions de la columbo-tantalite

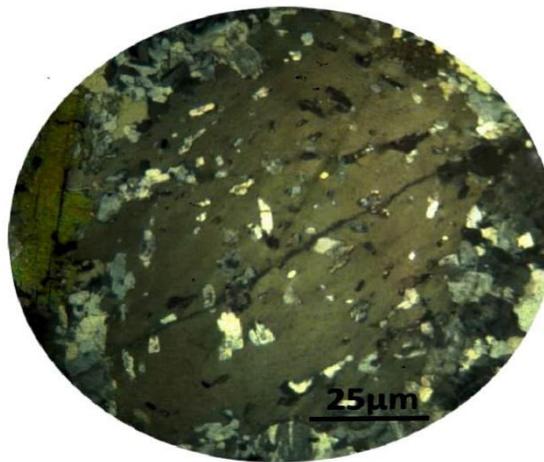


Photo 10 : Texture en " Snow Ball " dans le granite à albite topaze

III-3.3-Les Greisen

Ils apparaissent sur les bords nord-ouest (NW) et sud-est (SE) Géant Ils se manifestent sous la forme d'objets d'aspect lenticulaire et Très peu d'impulsion. La pierre est de couleur gris foncé. Composition minérale sont le quartz, la biotite et les oxydes. La cassitérite est visible dans certains grès cristal centimétrique. Il y a aussi deux halos veineux Granit à pointe topaze. Ce sont des pierres légères avec une texture Granuleux, principalement composé de quartz et de mica. Notons également que la cassitérite et Oxydes sous forme de points noirs. La première veine stérile à la surface est d'env. 3 mètres Épais. Longer la grande faille en direction N60°. C'est fondamentalement Contient du quartz et de la biotite (Zinnwaldite). Ils occupent la partie centrale du corps, Autour du quartz et Deuxième Minéralisation, direction N110 est au sud de la première. Il contient Principalement quartz, biotite (Zinnwaldite) et cassitérite cristalline Visible jusqu'à un ou deux centimètres. Taille depuis minerai de jument capable de maintenant 5 arriver 10 mètres de long et 1 à 3 mètres d'épaisseur. L'observation microscopique a révélé que les deux veines étaient présentes effectivement minéralisé et montre une très belle section de cassitérite, Wolframite et

Chapitre III: Étude pétrographique et contexte structural du Hoggar Central

Topaze. Observation M.E.B a confirmé les observations microscopiques et a montré la présence Plage d'étain (SnO₂), riche en bâtonnets de wolframite de type ferroborite Fer, scheelite riche en sodium, fines tiges de tungstène et (Sn, Pb, As) et traces de monazite-Ce Remarque non Zonage de ces minéral

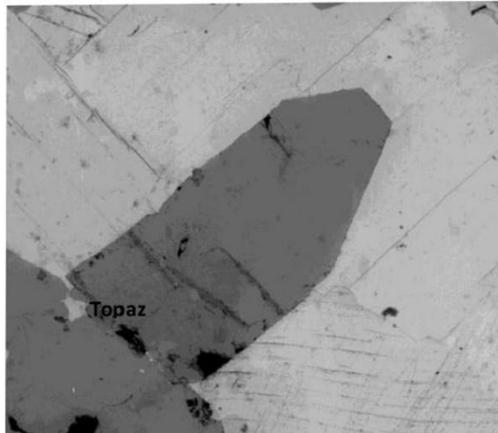


Photo 11 : Filon de Greisen



Photo 12: Greisen

III-3.4- Minéralogie des granites

Le mica granitique Tillik est faiblement pléochroïque et se produit Les patchs sont irréguliers, rarement dans la section d'autodéfense. On les retrouve aussi fissures ou inclusions. Ils contiennent de nombreuses inclusions (albite, quartz, fluorite, zircon, columbo-tantalite, monazite et topaze). Les observations au MEB ont montré des noyaux de muscovite Le mica granitique topaze bitite à des teneurs élevées en Rb, Li et F et projeté dans la zone zinwaldienne. Super sur le marché Cire de fer : $K_2^{XII} (Fe^{2+} 4Al_2)^{VI} (Si_4 + Al_4)^{IV} O_{20}(OH)_4$ (Fig4a et 4b)

III-3.5-La Topaze

Topaze : Cette phase est relativement abondante et se produit souvent dans de vastes zones Automorphisme à sous-automorphisme de taille supérieure à 5 mm La topaze a un fort relief et est percée de nombreuses fissures en relief oxyde. Lorsque ces fissures s'ouvrent, elles sont tapissées de mica, Quartz et Albite. Il contient des inclusions microcristallines d'albite, de fines tiges de niobium-tantalite et de fins cristaux de quartz. Il y a beaucoup plus dans le granit topaze

Chapitre III: Étude pétrographique et contexte structural du Hoggar Central

La teneur en fluor (F : 21,45) et en dioxyde de silicium (SiO₂ : 31,36) est faible, tandis que taupent Ils sont pauvres en fluor (F : 13,76), riches en silice (SiO₂ : 33,04), (tableau 3)

Sample	TK02-A	TM1	TM2	TM2	TM2
Analysis %	41	35	19	21	24
SiO ₂	31,368	33,392	33,381	32,449	33,041
Al ₂ O ₃	56,408	56,751	57,263	57,516	57,047
F	21,457	14,151	13,081	14,149	13,226
O=F	-9,01	-5,94	-5,49	-5,94	-5,55
Total	100,22	98,35	98,23	98,17	97,76
base O ₂	5	5	5	5	5
Si	0,965	0,999	0,993	0,974	0,990
Al	2,046	2,001	2,009	2,035	2,014
F	2,088	1,339	1,231	1,343	1,253
OH	-0,088	0,661	0,769	0,657	0,747
F/F+OH	1,044	0,669	0,616	0,672	0,626
somme O ₂	2,704	2,781	2,796	2,772	2,778
Formule structurale de la topaze : Al ₂ SiO ₄ (OH,F) ₂					

Tab. 3: Analyse des topazes du massif Tillik

III-3.6-Les accessoires

-Les columbo-tantalites

Les minéraux Nb et Ta sont des minéraux accessoires sous forme de granite, Greisen et pegmatite. On les trouve principalement sous forme d'inclusions dans le mica. Celui-ci Le columbo-tantalite a une forme typique de tige et rarement une forme prismatique (Figure.14-) Lui De taille variable, 20 µm à 120 µm, parfois perforé et contenant des fissures Inclusions de zircon. Au microscope électronique à balayage, ils sont divisés en bandes Les couleurs sont assez bien représentées, le centre du cristal est plus foncé que les bords, est due à l'hétérogénéité de leur composition chimique, qui accentue la substitution entre Principaux couples d'éléments : Nb → Ta et Fe → Mn

Ces régions ont des contours plus ou moins réguliers dominés par des noyaux sombres (enrichis en Nb) contre une périphérie claire (riche en Ta).

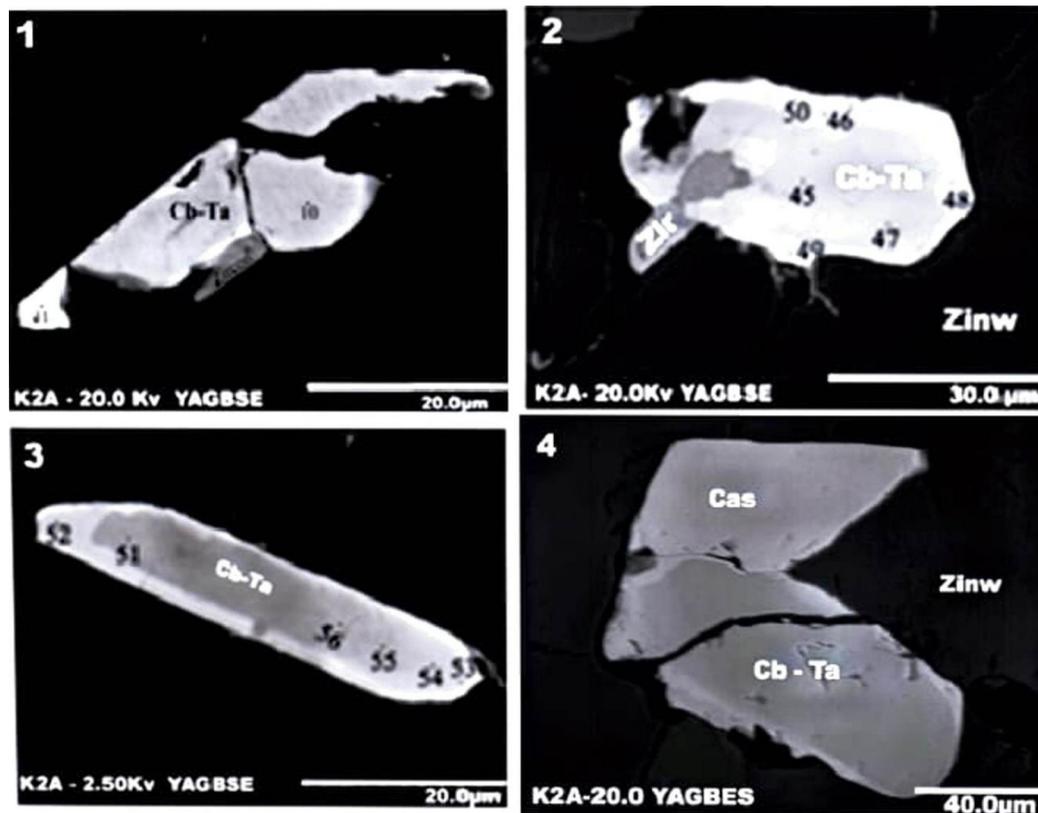


Fig. 14: Quelques columbo-tantalites analysées à la microsonde (GRPG, Nancy, France)

III-4-Du point de vu chimique

Le granite central de la tantalite au niobium a une teneur en niobium plus élevée que le tantale. Pour eux Présente une teneur élevée en titane. Leur teneur en manganèse est également plus élevée que Contient du fer. Le columbo-tantalite est classé comme noyau de Ferro-columbite Riche en Mn, avec du minerai de manganocolumbite en bordure, vers Antalite de manganèse. Le passage du cœur à la frontière se caractérise par une rupture assez nette Augmentation des rapports Mn/Mn + Fe et Ta/Ta + Nb

-La monazite (phosphate naturel de cérium, de lanthane et d'autres terres rares , contenant un peu de thorium , monoclinique , et répandu au états –unis , au canada , au brésil , en Afrique équatoriale .(C'est le principale minerai des lanthanides .)

La monazite (Ce, La, Nd, Th) PO₄ (Photo 13) a été observée dans les granites à albite-topaze. Elle est Déformateur automatique avec des contours de taille 150µm très précis. Ça se trouve aussi Inclus dans le quartz et la Zinnwaldite qui forment une auréole pléochroïque Que dans les fissures de fluorite. M.E.B. la monazite domine Cérium important.



Photo 13: La Monazite

-La cérianite

Minerai de cérium : La cérianite est un type d'oxyde de cérium de formule générale $(Ce, Th) O_2$, la présence d'autres éléments de terres rares. Il se produit dans le granit albitopaze, Contient du mica. Il est attaché à une tige de columbo-tantale son Est indépendant et avec des bords corrodés. Sa taille peut atteindre 130 μm . La composition chimique de la silice de cérium suggère que la composition de CeO_2 peut Plus de 80% et ThO_2 5-6%. Il contient également d'autres éléments de terres rares et de petites quantités de niobium et de tantale. MEB a créé une carte élémentaire des cristaux de quartz de cérium. Il est à noter Ce, Pr et Nd sont plus ou moins uniformément répartis dans le cristal. Généralement La périphérie est plus enrichie, tandis que A est principalement distribué au centre minéral. Nous avons remarqué Zone tampon entre la cérique-quartz riche en phosphore et la columbite-tantalite. Ce n'est pas Doubtes, monazites. On note aussi que le columbo-tantalite n'en contient pas Analyse élémentaire (métaux de terres rares et P).

-La fluocérite et mélanocérite

Ces minéraux ont été déterminés par MEB. Ils se produisent dans la fluorine sous forme d'inclusions. Là La fluorite et la météorite noire sont des minéraux riches en césium et thorium dans leur composition Ce dernier est hautement radioactif. La mélanocérite a une faible teneur en fluor (1.41), La_2O_3 (0.00) et riche en P_2O_5 (5.22) et Ce_2O_3 contrairement au spath fluor Riche en fluor (42,98), oxyde d'aluminium, phosphore et potassium.

-Autres minéraux

Le zircon est abondant dans toutes les phases du massif de Tillik. En fines tranches, on les trouve dans des inclusions de quartz, le plus souvent dans des inclusions de quartz Mica, où ils forment un halo polychrome. Selon les observations de M.E.B. Leur présence a également été démontrée dans plusieurs minéraux : albite, topaze, fluorite et tantalite de columbo-tantalite Zircon non analysé. L'apatite est rare et apparaît comme une fine tige sous un microscope polarisant Automorphismes dans le mica. Chez M.E.B. L'apatite semble remplir les fissures qui affectent l'impact Mica et zircon ou cristaux isolés. Fluorine Changya Autonome et de petite taille (30 μ à 40 μ). Le SEM contient de la fluorite Contient de très petites lamelles d'albite et de nombreux zircons.

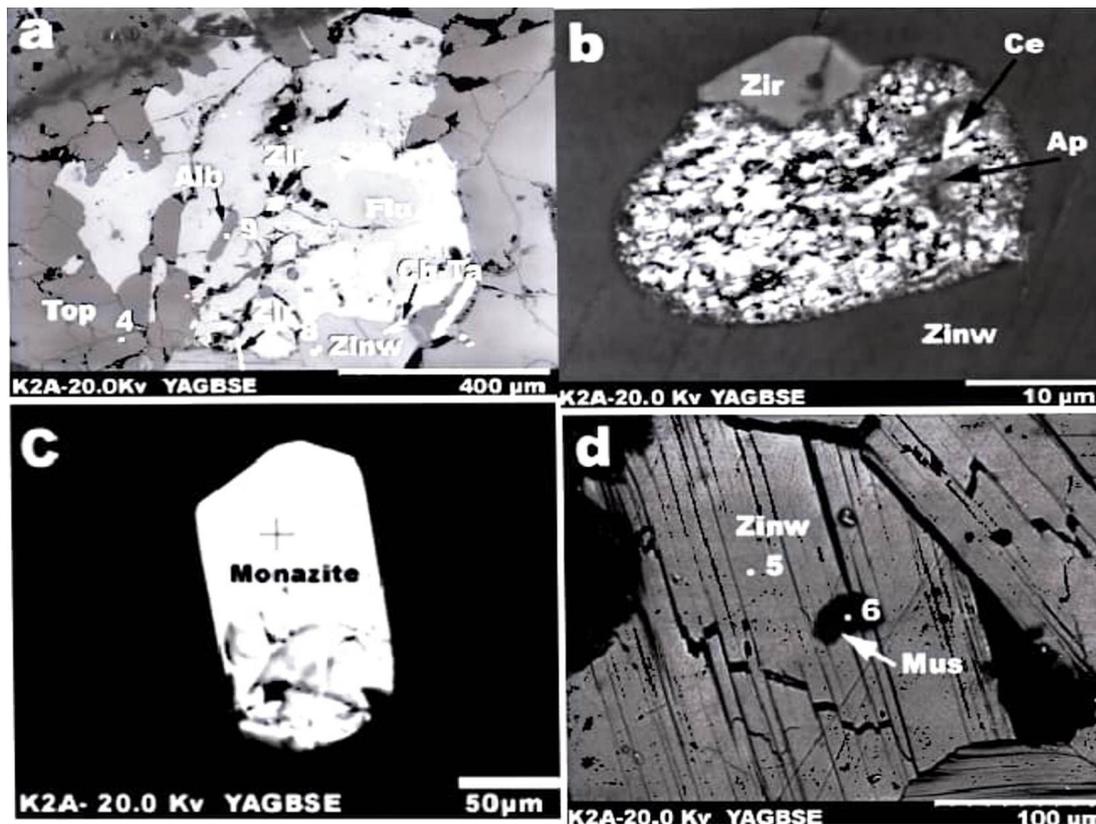


Fig. 15: Association fluorine (Flu), Zinnwaldite (Zinw) et Topaze (Top) (a), cérianite (Ce) et apatite (AP) dans Zinnwaldite (b), monazite (c) et Zinnwaldite à cœur de muscovite (Mu) (d) au MEB

III-5- Étude géochimique

-Gueriounne

Les spectres des terres rares montrent un enrichissement significatif dans le granite rose à poche de béryl au contact d'un stockscheider et au contact d'un Greisen, avec une concentration entre 100 et 120 fois supérieure aux normes des chondrites pour la. En revanche, le granite l'eurocrate à albite, le granite rose central et l'aplite présentent des spectres inférieurs à 100 fois plus les normes des chondrites pour la et s'appauvrissent depuis la bordure vers le centre du massif.

-Tillik

Les spectres des terres rares sont de type "mouette" avec un effet tétrade bien marqué. Cela signifie qu'il y a un enrichissement en terres rares dans le granite central, environ 40 fois plus que les normes de la chondrite. Le granite à albite topaze montre également un enrichissement en terres rares, environ 10 fois plus que la norme, mais il est plus appauvri que le granite central. Le granite à albite topaze à poches de pegmatites est encore plus riche en terres rares, tandis que les pegmatites elles-mêmes ont un spectre de terres rares inférieur à 10. On remarque également un appauvrissement en terres rares du centre vers la périphérie du massif. Ce phénomène peut être expliqué par un lessivage des terres rares par des solutions hydrothermales vers les parties sommitales du massif qui sont ensuite érodées. Enfin, l'anomalie en eu est très prononcée, avec une valeur de $0,03 < \text{eu}/\text{eu}^* < 0,16$.

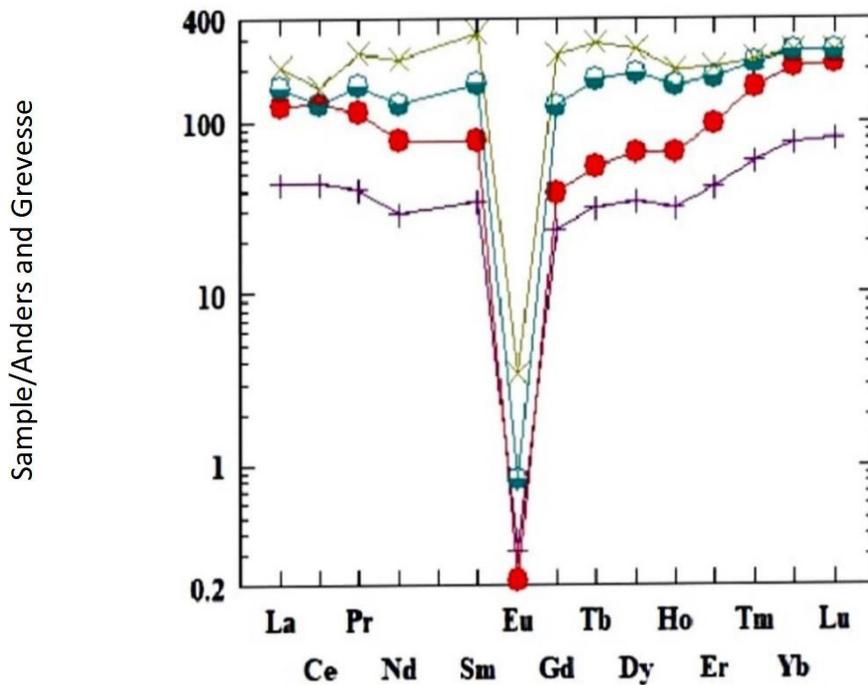


Fig.16 Spectres des terres rares, massif de Guerioune (analyse Dr. Ahmed Hamis. 2021)

+ Granite rose

Rond rouge : Granite rose 1

X Granite rose 2

Demi-ronde bleu : Greisen

On constate que la somme des REE diminue depuis le granite porphyre étant les plus élevées (Σ REE = 199.6), au granite à lépidolite (Σ REE = 21.64 – 48.99), jusqu'aux pegmatites (Σ REE = 17.06). Ces dernières représenteraient de toute évidence le dernier liquide à cristalliser. Pour le granite porphyre.

En résumé, l'enrichissement en éléments tels que La et Yb dans le granite porphyrique est moyen, environ 100 à 200 fois plus élevé que dans les chondrites pour La et environ 50 fois plus élevé pour Yb. Les valeurs pour l'aplite intrusive dans le granite porphyrique sont presque identiques pour Yb, mais légèrement inférieures pour La, environ 50 fois supérieures aux chondrites. Le granite à lépidolite est faiblement enrichi par rapport aux chondrites, avec environ 10 à 40 fois la chondrite pour La et 2 à 10 fois la chondrite pour Yb. L'anomalie en Eu est très prononcée, avec un rapport Eu/Eu* compris entre 0,05 et 0,1

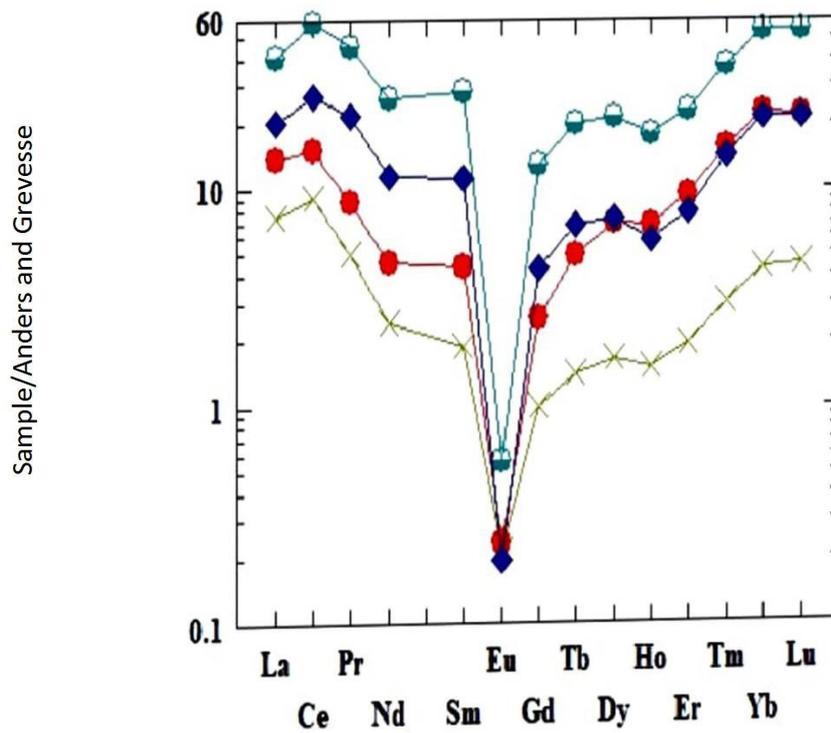


Fig.17. Spectre des terres rares (massif Tillik) (analyse Dr. Ahmed Hamis.2021)

Demi-ronde bleu : granite central à amazonite

Losange bleu : granite leucocrate à albite –topaze

Ronde rouge : granite leucocrat à albite –topaze à poche de pegmatites

Multiplier rouge : pegmatite



***Conclusion générale
Et Recommandations***

- CONCLUSION GENERALE

Dans ce présent Travail nous nous sommes intéressés aux terres rares en raison de ses valeurs et de ses raretés. Les terres rares sont un groupe de 17 métaux qui ont été regroupés en deux catégories : les terres rares "légères", qui comprennent Ce, La, Pr, Nd, Sm, Eu et Gd, et les terres rares "lourdes", qui comprennent Y, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb et Lu. Les terres rares légères sont plus abondantes que les terres rares lourdes. Les aimants permanents à base de terres rares, principalement le néodyme, le praséodyme et le dysprosium, sont largement utilisés dans diverses industries telles que la technologie médicale, les véhicules électriques et hybrides, les éoliennes, les disques durs, les téléphones portables, les avions de combat, les drones et le matériel militaire. D'autres éléments comme le lanthane et le cérium sont également utilisés dans le polissage de la céramique et du verre les terres rares ont des duretés variables, allant de tendre à dur, et ont des températures de fusion qui varient entre 799 et 1663 degrés Celsius. Les pierres à briquet de ferrocérium sont l'une des premières applications des terres rares. Certains minéraux de terres rares tels que la monazite et la bastnäsite sont plus enclins à incorporer certains éléments tels que le Ce, La, Nd, Pr, Sm, Eu, Gd, tandis que d'autres minéraux, comme la xénotime et la gadolinite, sont plus favorables aux éléments Y, Tb et Dy.

Les REE (terres rares) sont utilisés sous différentes formes chimiques telles que les alliages métalliques, les oxydes et les chlorures. Les gisements de REE peuvent être divisés en deux grandes catégories selon les processus magmatiques et hydrothermaux d'une part et les gisements secondaires ou endogènes liés à des processus sédimentaires et/ou climatiques d'autre part. L'étude montre également que les granites Taourirts sont associés à d'autres minéraux tels que le cuivre, l'or et l'uranium, ce qui est important pour la compréhension de la genèse géologique et de l'exploration des gîtes minéraux de la région du Hoggar central en Algérie. La présence de plusieurs Taourirts dans la partie nord du horst anticlinorium du Hoggar est contrôlée par des failles nord-est et ces massifs ne présentent pas de minéralisation intéressante à l'exception de quelques faibles anomalies de niobium et de tantale

Les Taourirts sont des formations géologiques qui se situent dans la partie ouest du Hoggar et sont contrôlées par des failles nord-nord-ouest. Elles présentent de faibles anomalies géochimiques en tantale, les éléments volatils se concentrant dans l'apex des intrusions contribuent à la transformation des granites et à la formation des minéralisations en étain et en métaux rares tels que le tantale et le niobium. L'abondance de béryllium a été constatée à Nahda et à Guerioun. Le critère aéroradiométrique est utilisé pour mesurer les rayonnements émis par la surface terrestre et détecter des anomalies en thorium, en uranium et en potassium. Les granites syntectoniques d'Anfeg Ey Tin Amzi ont été mis en place parallèlement à ces surfaces foliées et ont été datés en U-Pb sur zircon, entre 615 ± 510 et $12+50/-20$ Ma. Les analyses chimiques révèlent que ces granites sont plus riches en pneumatolytes tels que le rubidium, le lithium et le fer

D'après les recherches qui ont été effectuées, il a été conclu que l'accumulation des carbonatites se fait en quatre étapes, avec différents minéraux se formant à chaque étape, notamment des minéraux de titane, de zircon, de tantale, de niobium, d'uranium et de thorium. Les ressources de tantale, de niobium et de terres rares sont concentrées dans ces carbonatites. Les terres rares se forment souvent dans des roches magmatiques alcalines riches en sodium et en potassium et sont

Chapitre III: Étude pétrographique et contexte structural du Hoggar Central

concentrées dans des minéraux tels que la monazite, la bastnäsité et la xénotime. Les gisements de terres rares se forment également par le biais de processus hydrothermaux ou de fluides ou de dépôts sédimentaires.

- Recommandations pour les terres rares en Algérie

Le Hoggar central est une région riche en terres rares et l'exploitation minière de ces ressources pourrait avoir un impact significatif sur le développement économique et social de la région. L'exploitation minière des terres rares pourrait créer des emplois locaux, stimuler l'économie locale et renforcer les liens avec les marchés mondiaux. De plus, les terres rares pourraient jouer un rôle important dans la transition énergétique du Hoggar central en fournissant des matériaux pour les technologies d'énergie renouvelable telles que les éoliennes et les panneaux solaires

En raison de la complexité et des défis de l'exploration des terres rares dans des régions éloignées telles que le Hoggar central, il est recommandé d'adopter une approche systématique et étape par étape pour maximiser les chances de succès. Quelques recommandations à prendre en compte lors de l'exploration de terres rares dans le Hoggar central sont les suivantes :

1. Utilisation de technologies géophysiques modernes pour identifier les zones potentielles riches en terres rares. Les techniques d'imagerie aéroportée, magnétométrie, gravimétrie et électromagnétisme peuvent aider à identifier les anomalies géologiques.
2. Collecte d'échantillons de surface pour une analyse géochimique détaillée, afin de déterminer la concentration en terres rares et leurs associations.
3. Utilisation de la modélisation informatique pour identifier les zones potentielles de minéralisation en fonction des caractéristiques géologiques.
4. Mise en place de forages d'exploration pour permettre une évaluation plus précise de l'étendue et de la qualité de la minéralisation.
5. Effectuer des études environnementales pour garantir l'exploitation durable des terres rares dans cette zone.

6. Mettre en place des partenariats avec le gouvernement local et les communautés locales pour favoriser une collaboration transparente et positive pour l'exploration et la mise en valeur des ressources en terres rares de la région et la question demeure, quels sont les résultats et les avantages économiques potentiels de l'exploitation des terres rares dans le Hoggar central ? Donc les terres rares sont un groupe de métaux utilisés dans de nombreux produits technologiques tels que les téléphones portables, les batteries rechargeables, les aimants, les écrans plasma, etc. Cela signifie que l'exploitation des terres rares dans le Hoggar central pourrait avoir des avantages économiques considérables pour la région et le pays dans son ensemble.

Les avantages économiques potentiels comprennent la création d'emplois directs et indirects, l'augmentation des recettes fiscales pour le gouvernement, la stimulation de la demande de services de transport et d'équipements miniers, et l'augmentation de la production de fournisseurs locaux, contribuant ainsi à stimuler la croissance économique de la région et du pays en général.

Cependant, il est important de noter que l'exploitation des terres rares doit être menée de manière responsable et durable pour éviter les impacts négatifs sur l'environnement et les

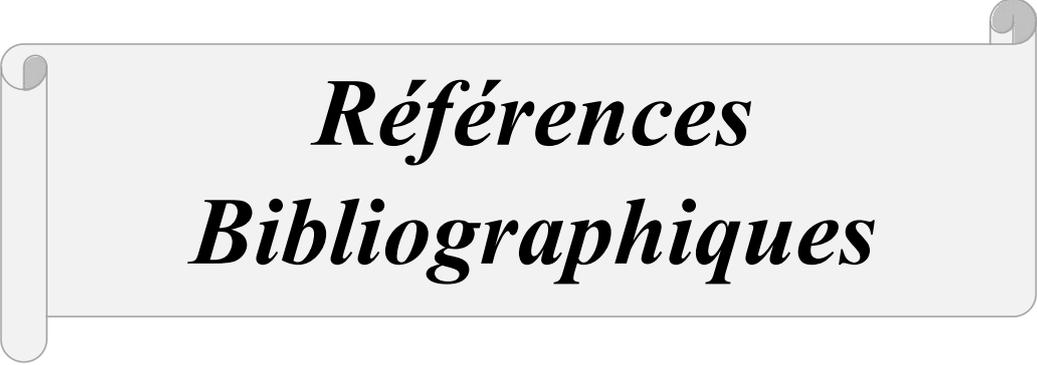
Chapitre III: Étude pétrographique et contexte structural du Hoggar Central

communautés locales, Alors je suggère des mesures nécessaires pour assurer la durabilité environnementale dans l'exploitation des terres rares dans le Hoggar central

Donc L'exploitation des terres rares dans le Hoggar Central doit être effectuée en respectant des mesures environnementales strictes comme :

1. Réduire les impacts écologiques et sociaux en améliorant les techniques d'extraction et en minimisant la production de déchets, ainsi qu'en appliquant des pratiques responsables de gestion environnementale.
2. Promouvoir l'utilisation de techniques d'extraction innovantes et durables pour minimiser l'impact sur l'environnement, telles que l'utilisation de techniques de récupération des rejets miniers.
3. Mettre en œuvre des plans de réhabilitation environnementale pour restaurer les zones exploitées.
4. S'assurer que les communautés locales travaillent en partenariat avec l'exploitant minier pour faire progresser les pratiques de développement durable.
5. Imposer des réglementations environnementales strictes pour les entreprises minières opérant dans la zone.
6. Encourager une production responsable de terres rares en favorisant des processus d'extraction et de production durables et en réduisant les déchets et la pollution.

En fin de compte, l'exploitation de terres rares doit être menée de manière à minimiser les impacts sur l'environnement et les communautés locales tout en maximisant les bénéfices économiques.



*Références
Bibliographiques*

Références bibliographiques :

-REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Amel-zoulikha BenHaLLouet abla azzouni-sekkaL, Bernard Bonin, Faiza ikHLeF-deBaBHa et, riad Ben el kHaznadjiet Jean-Paul Liégeois (2016). Le district volcanique du Manzaz (Hoggar, Sahara algérien):géologie, pétrographie Et Minéralogie.
- Bettioui Djamila (2022). Etude Géochimique Géochronologique et structural du magmatisme panafricain de tin Begane Implications Géodynamiques dans L'évolution de métacraton LATEA Hoggar central Algérie.
- DERAMCHI Aboubakr BOUKHALFA Zakaria (2014). Cartographie et pétrographie des réseaux de dykes du LATEA Hoggar central. Algérie.
- Guessoune Nabila (2012).Etude Géologique Des Minéralisation Aurifères de la partie Orientale du terranes de Laouni (Hoggar central).
- Hamis. A. (2021).Le béryl : Géologie, Minéralogie et géochimie des gisements dans la région de Laouni (Hoggar central, Algérie).L'évolution de métacraton.
- Hasini.H. (2015). Pétrographie et géochimie des Roches Magmatiques de secteur Tin Amzi et de Timgaouine (Laouni, Hoggar, Algérie) LATEA Hoggar Central Algérie.
- <https://images.google.com/4WCQRmEFvVzDoWR4A>.
-[Slideplayer.fr/slide /17992676](https://www.slideplayer.fr/slides/17992676).
- Jean Fabre. (2005). Tervuren Africain Géoscience collection vol.108 Géologie du Sahara occidentale et central ; musée royal de l'Afrique centrale-Belgique.
- John Seaman ; Janvier 2019. La chine et les terres rares son Rôle critique dans la Nouvelle économie.
- Kawther Araïbia(2022).Evolution thermo-tectonique de la Région de l'Oued Takalous (Hoggar Central, Algérie).
- Lakhdar benmoussa. (1980). Etude Géochimiques du processus de concentration du tungstène et de l'étain dans les granites "Taourirts" du Hoggar central (Algérie).
- Michel BERNAT. (1975). Les isotopes de l'uranium et de Thorium et les terres rares dans l'environnement marin.

Références bibliographiques :

-**Mokrane Kesraoui (2005)**. Nature et évolutions comparées de Granite à métaux rares dans le Hoggar central (Algérie) à travers la pétrographie, la cristallogénie des micas et des minéraux à Ta, Nb, Sn, et la Géochimie.

-**Nicolas Charles, Johann Tuduri, Gaétan Lefebvre, Olivier Pourret, Fabrice. (2021)**. Gaillard, Kathryn Goodenough. HALId:Hal-03138953 <https://hal.science/hal-03138953> Submitted.

-**Rahmani.S. (Février 2019)**. pétrologie et géochimie et géochronologie de l'industrusion basique de l'oued ZaZir (Laouni, Est Hoggar central) .thèse de Magister.uni.d'oran 2.

-**Romain J.Garcier Fanny verrax. (2017)** .Créatives mais non recyclées : expliquer les limites au recyclage des terres rares en Europe. Uni. Gustavo Eiffel.

-**S.-s. Sun and W. F. McDonough. (1989)**. Geological Society, London, Special Publications 1989; v. 42; p. 313-345. doi:10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19. Processes Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and.

-**V. Smirnov. (1982)**. Géologie des minérales utiles éditions MIR P13602.