

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

**THÈSE PRÉSENTÉE À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DU DOCTORAT EN RESSOURCES MINÉRALES
OFFERT À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
EN VERTU D'UN PROTOCOLE D'ENTENTE
AVEC
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI**

PAR

DRISS OUKEMENI

**GÉOCHIMIE, GÉOCHRONOLOGIE (U-Pb) DU PLUTON D'AOULI ET
COMPARAISONS GÉOCHIMIQUES AVEC D'AUTRES GRANITOÏDES
HERCYNIEUS DU MAROC PAR ANALYSE DISCRIMINANTE**

DÉCEMBRE 1993



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

RESUME

Ce travail concernant les granitoïdes hercyniens du Maroc est présenté en trois parties.

(1) Etude géochimique du pluton d'Aouli, Haute Moulouya. Le pluton d'Aouli est composé de quatre unités, (i) la granodiorite, (ii) le granite gris, (iii), le granite rose; ces trois unités forment un seul massif, et (iv) le granite à muscovite qui affleure dans deux pointements isolés du reste du massif. Trois entités pétrogénétiques différentes ont été mises en évidence par cette étude chimique. Elle sont toutes de nature calcoalcaline à tendance subalcaline. La granodiorite et le granite à muscovite forment chacun une entité à part, mais le granite gris et le granite rose semblent former ensemble une seule entité. Ce pluton à émissions multiples est tardif à post-orogénique. Il met fin à l'orogénèse hercynienne dans la zone orientale.

(2) Les datations isotopiques par U-Pb sur zircon et titanite ont donné un âge de 333 ± 2 Ma pour la granodiorite et 319 ± 1.5 Ma pour le granite gris. Cette différence d'âges entre les deux unités soutient l'hypothèse d'un pluton à émissions multiples. Les roches datées contiennent des composants hérités de la croûte, daté à 1520 Ma dans la granodiorite et à 1245 ± 50 et 1804 Ma dans le granite gris. Ceci suggère fort probablement la présence d'une la croûte, d'âge proterozoïque complexe, héritée par les granitoïdes de la Haute Moulouya.

(3) L'étude par analyse discriminante a permis de vérifier la diversité des unités déjà distinguées par la cartographie et l'étude géochimique du pluton d'Aouli. Dans cette étude statistique, un groupe de massifs granitiques qui affleurent dans la zone orientale de la chaîne hercynienne du Maroc, a été comparé par la chimie, à un autre groupe de massifs granitiques qui affleurent dans la zone occidentale. La discrimination entre ces deux groupes est très bonne. Ces deux groupes de granitoïdes sont donc différents l'un de l'autre, ce qui reflète fort probablement la différence de la composition chimique la croûte entre les deux zones. Enfin, une étude de la comparaison chimique de deux groupes, qui affleurent tous en Méséta Occidentale ayant été distingués par leur contexte tectonique de mise en place, tel que déterminé par des études structurales et de terrain des différents auteurs, n'a pas permis de discriminer entre ces deux groupes. Ceci prouve que l'influence de la croûte dans la genèse des granitoïdes est aussi importante que celle du contexte tectonique de leur mise en place.

A la lumière de ces résultats, la limite entre la zone occidentale et la zone orientale de la chaîne hercynienne correspondrait, fort probablement, à une limite entre deux blocs continentaux rapprochés bien avant l'orogénèse hercynienne soit par collision ou par coulissement.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet de coopération en Géologie Appliquée (CIGAM), établi entre l'Université du Québec à Montréal (Canada) et la Faculté des Sciences de l'Université Mohammed V de Rabat (Maroc). Ce projet est financé par l'Agence Canadienne pour le Développement International (ACDI).

Cet ouvrage porte l'empreinte de nombreuses personnes, mes maîtres, mes collègues, mes amis et ma famille, ont tous apporté une importante contribution.

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur le Professeur A. Essaid, Doyen de la faculté des Sciences de l'Université Mohammed V de Rabat, pour m'avoir libéré de mes tâches d'enseignement, ce qui m'a permis de réaliser ce travail dans de très bonnes conditions.

Je tiens également à remercier le Doyen de l'Université du Québec à Montréal, et le groupe GEOTERAP du département des Sciences de la Terre, de m'avoir accepté dans leur établissement pour réaliser ce travail.

Mes remerciements vont également aux membres du groupe CIGAM, Canadiens et Marocains, et plus particulièrement à son directeur, le professeur G. Prichonnet, pour toutes les facilités qu'ils m'ont accordées, tant au Maroc qu'à Montréal, mais aussi pour la sympathie et l'intérêt qu'ils ont manifestés tout au long du développement de ce projet.

Je dois aussi exprimer toute ma gratitude à l'égard du Dr J. Bourne, professeur à l'Université du Québec à Montréal, pour son apport scientifique, ses conseils prodigieux, sa sympathie, son soutien morale et pour tout le temps qu'il a consacré pour la réalisation de ce travail. C'est à lui que je dois l'essentiel de ma formation dans le domaine de la géochimie des roches plutoniques. Je le remercie d'avoir dirigé, critiqué et jugé ce travail.

Mes remerciements vont également aux membres du jury de thèse qui ont accepté de critiquer et de juger ce travail, MM.:

- _ N. Goulet, professeur à l'Université du Québec à Montréal
- _ G. Woussen, professeur à l'université du Québec à Chicoutimi
- _ W. Trzcienski, professeur à l'Université de Montréal

Je suis également très reconnaissant à mes collègues du département des Sciences de la terre de la faculté des Sciences de Rabat, pour leurs conseils et leur soutien.

Je ne saurais, enfin, clore cette liste de remerciements, sans avoir une pensée, toute particulière, pour ma grande famille, parents, frères et soeurs, Aomar et Boubker et leurs petites familles, ma belle famille, mes beaux frères et belles soeurs, nombreux pour qu'ils soient cités de manière nominative, et enfin pour mon épouse et mes enfants Mohammed-Amine, Samia et Sofia, qui, par leur grande patience, leur soutien inégalé et leurs encouragements constants, m'ont permis de mener à terme ce travail.

TABLE DES MATIERES

RESUME	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIERES	iv
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	x
 INTRODUCTION GENERALE	 1
I. GEOLOGIE DU MAROC, APERÇU GENERAL	3
I.1. Subdivisions géologiques du Maroc	3
I.1.1. Domaine Saharien	3
I.1.2. Domaine Pré-Saharien	3
I.1.3. Domaine Mésétien	5
I.1.4. Domaine Atlasique	5
I.1.5. Domaine Rifain	5
I.2. Les principales zones de la chaîne hercynienne du Maroc	6
I.2.1. La chaîne promontoire de l'anti Atlas	6
I.2.2. La chaîne hercynienne de l'Ouest du Maroc	6
I.2.3. La chaîne hercynienne orientale du Maroc	8
I.3. Magmatisme hercynien	8
II. PRESENTATION DES SECTEURS D'ETUDE	9
II.1. Pluton d'Aouli	9
II.1.1. Situation géographique	9
II.1.2. Cadre géologique	10
II.1.3. Travaux antérieurs	11
II.2. Les massifs granitiques du Maroc	13
III. OBJECTIFS DU TRAVAIL	14

CHAPITRE I ETUDE GEOCHIMIQUE DES GRANITOIDES DU	
PLUTON D'AOULI, HAUTE MOULOUYA, MAROC.....	15
RESUME	16
ABSTRACT	17
INTRODUCTION	18
ETUDE PETROGRAPHIQUE.....	21
Granodiorite d'Elhassir	23
Granite gris	25
Granite rose	26
Granite à muscovite	27
ETUDE GEOCHIMIQUE.....	28
Analyses chimiques	28
Résultats	28
DISCUSSION	43
Mécanismes des variations chimiques.....	43
Contexte géodynamique	49
CONCLUSIONS	55
BIBLIOGRAPHIE	56

CHAPITRE II GEOCHRONOLOGIE, PAR U-Pb SUR ZIRCON	
ET TITANITE, DU PLUTON D'AOULI, HAUTE	
MOULOUYA, MAROC.....	60
RESUME	61
INTRODUCTION	62
I. ETUDE DU MASSIF GRANITIQUE D'AOULI	66
I.1. Travaux antérieurs	66
I.1.1. Pétrographie.....	66
I.1.2. Historique des datations isotopiques.....	68

I. 2. Etude géochronologique.....	70
I.2.1. Méthode analytique.....	70
I.2.2. Résultats.....	71
I.2.2.1. Datation de la granodiorite.....	71
I.2.2.2. Datation du granite gris.....	74
II. DISCUSSIONS ET INTERPRETATIONS.....	78
CONCLUSIONS	80
BIBLIOGRAPHIE	81

CHAPITRE III ANALYSE DISCRIMINANTE APPLIQUEE AUX	
GRANITOIDES HERCINIENS DU MAROC:IMPACT SUR	
LES ROLES RESPECTIFS DE LA CROUTE ET DU CONTEXTE	
TECTONIQUE DE LEUR MISE EN PLACE DANS LEUR CHIMIE. 83	
RESUME	84
ABSTRACT	85
INTRODUCTION	86
ANALYSE DISCRIMINANTE.....	87
ETUDE DES PLUTONS HERCINIENS DU MAROC.....	89
Pluton de Tichka.....	92
Pluton d'Oulad Ouaslam	92
Pluton du Sebt des Brikiine	92
Pluton des Zaer	92
Pluton d'Oulmes.....	92
Pluton de Ment	93
Pluton d'Aouli	93
CALCULS ET RESULTATS	93
Etude du pluton d'Aouli	93
Comparaison des granitoïdes de la zone orientale avec ceux de la zone	
occidentale de la chaîne hercynienne du Maroc	99

Discrimination des granites occidentaux distincts par le contexte tectonique de mise en place.....	102
DISCUSSION	104
CONCLUSIONS	105
BIBLIOGRAPHIE	106
 CONCLUSIONS GENERALES	 110
BIBLIOGRAPHIE	117
 ANNEXE: Données d'analyses chimiques du pluton d'Aouli	 120
Coordonnées de localisation des échantillons analysés.....	126

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau Ia:	Analyses chimiques des roches plutoniques d'Aouli, éléments majeurs. .	29
Tableau Ib:	Analyses chimiques des roches plutoniques d'Aouli, éléments en traces et terres rares.....	30

Chapitre II

Tableau I:	Ages des plutons hercyniens du Maroc.....	64
Tableau II:	Datations isotopiques Rb/Sr du pluton d'Aouli.....	67
Tableau III:	Datations isotopiques U-Pb sur zircon et titanite de la granodiorite du pluton d'Aouli.	72
Tableau IV:	Datations isotopiques U-Pb sur zircon et titanite du granite gris du pluton d'Aouli.	75

Chapitre III

Tableau I:	Origine des données géochimiques des granitoïdes hercyniens du Maroc.	91
Tableaux II à V:	Discrimination entre les unités du pluton d'Aouli.....	95
Tableaux VI :	Discrimination entre les plutons hercyniens de la Méséta Orientale et de la Méséta Occidentale.....	103
Tableaux VII:	Discrimination entre les plutons hercyniens syn-tectoniques et les plutons tardi et post-tectoniques.....	103

LISTE DES FIGURES

Introduction Générale

Fig.1: Carte des affleurements paléozoïques du Maroc; (provinces du Nord)	
Carte insérée: carte des domaines structuraux du Maroc	4
Fig.2: Carte des terrains paléozoïques et des massifs de granitoïdes hercyniens	
du Maroc.	7

Chapitre I

Fig.1: Carte des terrains paléozoïques et des massifs de granitoïdes hercyniens	
du Maroc	19
Fig.2: Carte géologique de la boutonnière d'Aouli.	22
Fig.3: Diagramme de Streckeisen (1973), classification des roches plutoniques	24
Fig.4: Carte de répartition des valeurs de SiO ₂ (%) dans le pluton d'Aouli.	31
Fig.4a: Distribution des quatres unités d'Aouli sur le diagramme ternaire	
AFM tiré de Irving et Baragar (1971)	33
Fig.4b: Diagramme de Peacock (1931) appliqué au pluton d'Aouli.....	33
Fig.5: Représentation graphique de l'indice de péraluminité, (A/CNK),	
en fonction de SiO ₂ , des granitoïdes du pluton d'Aouli.	34
Fig.6: Evolution des faciès du pluton d'Aouli dans les diagrammes de Harker,	
(a) MgO en fonction de SiO ₂ , (b) TiO ₂ en fonction de SiO ₂ ,	36
(c) Al ₂ O ₃ en fonction SiO ₂	37
Figs.7 : Spectres des terres rares normalisées aux chondrites	39
Fig.8: Graphe de variations du rapport, La/Yb, en fonction de SiO ₂	41
Fig.9: Représentation graphique du rapport, Eu/Eu*, en fonction de SiO ₂	42
Fig.10: Représentation graphique des variations de Eu en fonction de Sr	
dans les granites gris et rose du pluton d'Aouli.	44
Fig.11: Représentations graphiques de (a) Ba en fonction de SiO ₂ ,	
(b) Nb en fonction de SiO ₂ , (c) Rb en fonction de SiO ₂	46
Fig.12: Diagrammes B/B ₀ en fonction de A/A ₀ , (a): granites gris et rose,	
(b): granodiorite.....	48

Fig.12c: Représentation graphique des variations Nb en fonction de Y, tiré de Pearce et al (1984), appliqué au pluton d'Aouli.....	50
Fig.13: Graphe de $\text{FeO}^*/\text{FeO}^*+\text{MgO}$ en fonction de SiO_2	52
Fig.14: Diagramme $\text{R}_1\text{-R}_2$, Batchelor et Bowden, (1985).....	53
Fig.15: Diagramme discriminant pour les roches alcalines (Eby,1992).....	54

Chapitre II

Fig.1: Carte des terrains paléozoïques et des massifs de granitoïdes hercyniens du Maroc.	63
Fig.2: Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$; granodiorite du pluton d'Aouli.	73
Fig.3a: Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$; granite gris du pluton d'Aouli.....	76
Fig.3b: Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$; granite gris du pluton d'Aouli.(Agrandissement de la figure 3a).....	77

Chapitre III

Fig.1: Carte des terrains paléozoïques et des massifs de granitoïdes hercyniens du Maroc.	90
--	----

CONCLUSIONS GENERALES

Fig.1: Carte des massifs paléozoïques du Maroc (Provinces du Nord).....	115
---	-----

INTRODUCTION GENERALE

Ce travail concerne les granitoïdes hercyniens du Maroc. Il est abordé suivant trois volets: études (1) géochimique et (2) géochronologique du pluton d'Aouli, situé dans la boutonnière de la Haute Moulouya, et (3) comparaison de plusieurs plutons du Maroc hercynien par leur chimisme, en utilisant une méthode statistique, l'analyse discriminante. Chaque volet constitue un chapitre de ce mémoire, et en outre, un dernier chapitre intégrant les principaux résultats des trois premiers, compilés aux données bibliographiques, est présenté à la fin en guise de conclusions générales. Ce mémoire est présenté sous forme de trois d'articles:

- (1) le premier étant déjà publié dans le Journal Africain des Sciences de la Terre;
- (2) le deuxième est soumis au Journal Canadien des Sciences de la Terre;
- (3) et le troisième est en cours de préparation pour la publication.

De ce fait, le lecteur peut, de temps à autre, relever des idées qui se répètent à travers le mémoire, étant donné que les trois chapitres traitent des sujets qui concernent tous un même thème.

Pour situer le sujet d'étude dans son cadre géologique et expliquer par la même le choix du thème, il me paraît nécessaire de présenter un rappel, bref soit-il, sur la géologie du Maroc. Ceci va rendre plus aisée la lecture de ce mémoire, surtout pour le géologue de l'Amérique du Nord, qui, jusqu'à ces dernières années, n'était pas très familiarisé avec la géologie du Maroc, parce que, d'une part la grande majorité des travaux effectués sur la géologie marocaine sont publiés sous forme de monographies ou de rapports

gouvernementaux non disponibles au Canada, et d'autre part, il y avait un manque d'échanges entre le Maroc et le Canada dans le domaine de la géologie, problème auquel plusieurs géologues des deux pays s'intéressent depuis quelques années, le projet CIGAM en fait preuve.

I. GEOLOGIE DU MAROC, APERÇU GENERAL

Le Maroc est le pays le plus occidental de l'Afrique du nord. Il est limité au nord par la Méditerranée, au sud par la Mauritanie, à l'est par l'Algérie et à l'ouest par l'Océan Atlantique (Fig.1).

I.1. Subdivisions géologiques du Maroc

Le Maroc a été subdivisé en cinq principaux domaines structuraux, (Michard, 1976; Piqué, 1983; Piqué et Michard, 1989), (Fig.1).

I.1.1. Domaine Saharien

Ce domaine fait partie du Bouclier Ouest Africain (Michard, 1976; Piqué et Michard, 1989). Il est formé de séries du Protérozoïque inférieur, extrêmement déformées et métamorphisées au cours de l'orogénèse éburnéenne (vers 2000 Ma). Ces séries sont surmontées, au nord, par des roches paléozoïques non déformées du Bassin de Tindouf, qui à leur tour sont cachetées en partie par une couverture mésozoïque et cénozoïque.

I.1.2. Domaine Pré-Saharien

Dans l'Anti Atlas, le socle ancien et sa couverture du Protérozoïque supérieur ont été affectés par l'orogénèse panafricaine (680-570 Ma) (Leblanc et *al.*, 1980). Plus tard, la couverture fini-Protérozoïque et paléozoïque de la chaîne panafricaine a été affectée par une déformation hercynienne, varisque, relativement modérée. La couverture méso - cénozoïque est peu épaisse et non déformée.

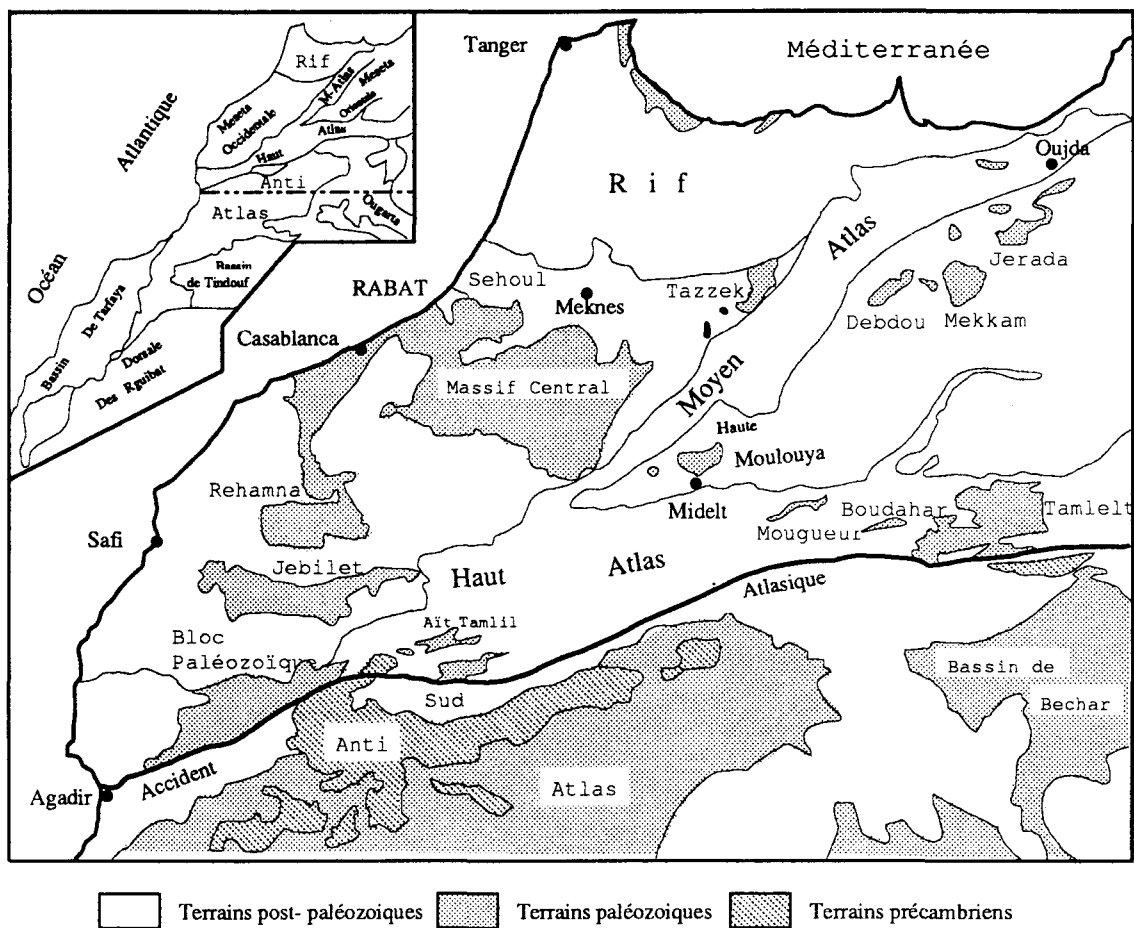


Fig. 1: Carte des Massifs paléozoïques du Maroc; (Provinces du Nord).
Carte insérée: Domaines structuraux du Maroc

I.1.3. Domaine Mésétien

Le Domaine Mésétien a été défini par Gentil (1918) comme étant le domaine de la chaîne hercynienne du Maroc. Il est constitué d'un socle paléozoïque couvert en discordance par des séries méso-cénozoïques non déformées. Ce domaine est séparé en deux parties par le Moyen Atlas, (Termier, 1936; Michard, 1976):

(1) la Méséta Occidentale, dite marocaine. Elle est constituée de trois grands massifs paléozoïques, le Massif central ou Maroc central, les Rehamna et les Jebilet, qui apparaissent à l'affleurement au sein de la couverture méso -cénozoïque.

(2) la Méséta Orientale ou oranaise. Elle est composée de plusieurs boutonnières (Jerada, Debdou, Mekam et Midelt) dont les affleurements des terrains paléozoïques sont relativement plus restreints.

I.1.4. Domaine Atlasique

Le domaine atlasique est constitué de deux chaînes de montagnes, le Haut Atlas et le Moyen Atlas (Michard, 1976). Le Moyen Atlas, de direction NE-SW, sépare la Méséta en deux. Le Haut Atlas, situé entre le Domaine Mésétien au nord et l'Anti Atlas au sud, se prolonge en Algérie et en Tunisie par l'Atlas Saharien. Ce domaine est formé d'une épaisse série permo-mésozoïque et cénozoïque, plissée au cours de l'orogénèse atlasique. Les phases de plissement sont d'âge jurassique-supérieur et tertiaire. En outre, il renferme des terrains paléozoïques tels que le bloc Paléozoïque du Haut Atlas occidental et les boutonnières du Haut Atlas central et oriental et celles du Moyen Atlas.

I.1.5. Domaine Rifain

Le domaine Rifain est le domaine le plus septentrional du Maroc. Il constitue la partie sud-orientale de la chaîne alpine périméditerranéenne. Il est formé de terrains allochtones chevauchant la Méséta. On y connaît aussi des terrains paléozoïques qui affleurent surtout dans la partie interne de la chaîne.

I.2 Les principales zones de la chaîne hercynienne du Maroc

La chaîne hercynienne du Maroc affleure dans de petites boutonnières dispersés ou des massifs de plus grande étendue. Les corrélations géologiques sont relativement plus faciles entre les systèmes paléozoïques des différents massifs mésétiens et aussi entre les affleurements continus de l'Anti Atlas. Dans le Domaine Atlasique, les raccourcissements post-hercyniens sont assez faibles pour que les affleurements paléozoïques soient corrélables avec ceux de la Méséta ou ceux de l'Anti Atlas. Par contre, dans le Domaine Rifain, les nappes paléozoïques ont été fortement reprises et très disloquées par les mouvements alpins. Leur corrélation avec le reste de l'hercynien du Maroc est difficile (Piqué, 1983; Piqué et Michard, 1989).

En se basant sur l'évolution sédimentaire, stratigraphique et tectono-métamorphique, et en mettant l'accent sur le sens et l'intensité de la déformation hercynienne, trois zones distinctes ont été définies (Fig.2) (Michard, 1976; Piqué, 1983; Piqué et Michard, 1989).

I.2.1. La chaîne promontoire de l'Anti Atlas

Cette zone constitue la marge nord de la Plate-forme Saharienne ou Ouest Africaine. Elle est faiblement déformée par l'orogénèse hercynienne au Paléozoïque supérieur. Elle se continue vers le sud, dans la région des Zemmour, où elle est considérée comme le promontoire de la chaîne des Mauritanides (Sougy, 1969) et aussi vers l'est dans la chaîne de l'Ougarta en Algérie (Michard, 1976).

I.2.2. La chaîne hercynienne de l'Ouest du Maroc

Cette zone inclue la majeure partie de la Méséta occidentale et le bloc paléozoïque du Haut Atlas occidental. Elle montre un gradient métamorphique et structural très important. Les structures se présentent sous forme d'une succession d'anticlinoriums et de synclinoriums de direction générale NE-SW à E-W (Termier, 1936).

A l'exception du bloc des Séhoul (Zone de Rabat-Tiflet), où l'on connaît une déformation ordovicienne, la déformation et les principaux épisodes de recristallisation sont partout ailleurs d'âge carbonifère (Michard, 1976; Piqué, 1983; Hoepffner, 1987; Piqué et Michard, 1989).

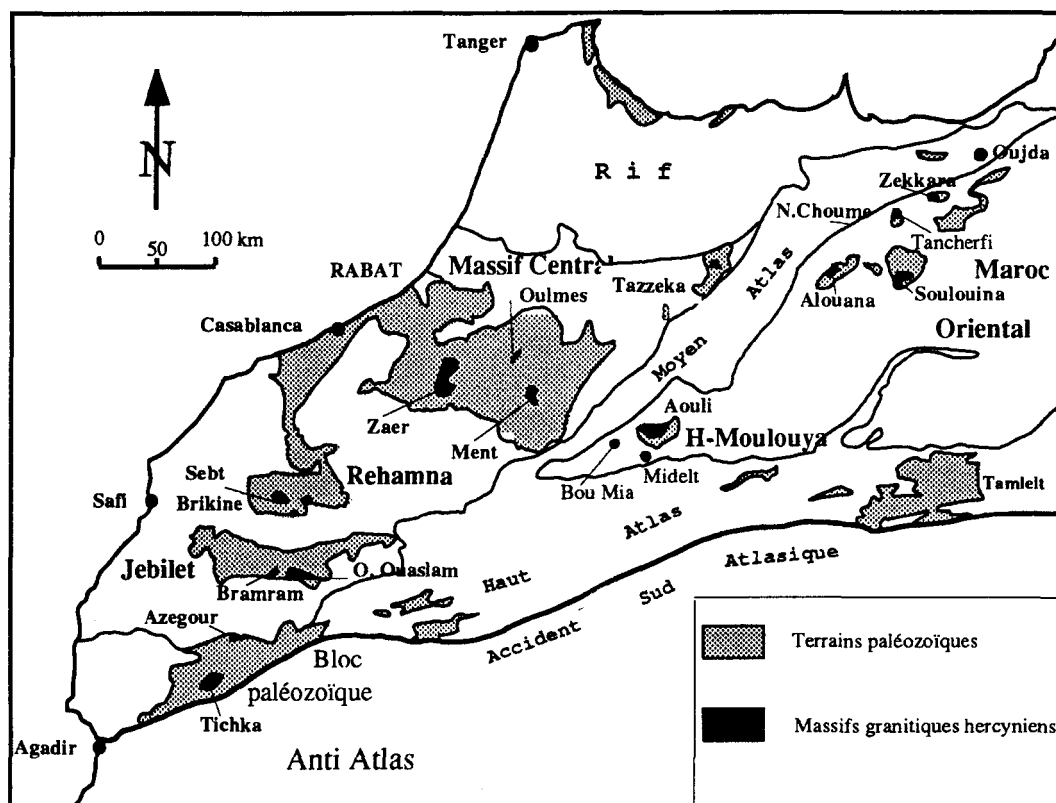


Fig. 2: Carte des Terrains paléozoïques et des massifs de granitoides hercyniens du Maroc

I.2.3. La chaîne hercynienne orientale du Maroc

Cette zone renferme l'ensemble des affleurements paléozoïque de la Méséta Orientale, les boutonnières du Moyen Atlas et celles du Haut Atlas Central et Oriental et enfin la partie la plus orientale de la Méséta occidentale.

La déformation hercynienne est caractérisée dans cette zone par des phases précoces de plissement, et/ou de chevauchement, allant du Dévonien supérieur au Viséen supérieur (Hoepffner, 1987). Dans la boutonnière la Haute Moulouya, située à l'est du Moyen Atlas, le plissement synmétamorphique est daté de 366 Ma, donc du Dévonien (Tisserant, 1977). A l'ouest et au voisinage immédiat du Moyen Atlas, l'âge du premier épisode de plissement est mal déterminé, toutefois, il reste situé entre le Dévonien moyen et le Viséen moyen (Huvelin, 1973; Hoepffner, 1987). Après la transgression viséenne, des nappes sédimentaires et gravitaires se sont mises en place dans un bassin du Viséen supérieur, formant ainsi une zone arquée à l'ouest de la zone de Midelt dont elles sont actuellement séparées par la chaîne atlasique (Allary et *al.*, 1972; Huvelin, 1977; Jenny et le Marrec, 1980; Michard et *al.*, 1982; Bouabdelli, 1982; Hoepffner, 1987; Oukememni, 1987). Enfin, le plissement, les chevauchements et des failles de distension affectent ce domaine durant le Carbonifère supérieur, approximativement en même temps que la chaîne occidentale. Dans ce contexte, la partie orientale constitue ainsi les zones internes de la chaîne hercynienne du Maroc (Piqué et *al.*, 1989).

I.3. Magmatisme hercynien

Au Maroc, l'activité magmatique hercynienne est marquée par des intrusions granitiques mises en place à différents niveaux dans la série paléozoïque. Les massifs des granitoïdes hercyniens marocains affleurent dans des boutonnières paléozoïques, situées dans les domaines atlasique et mésétien, exclusivement au nord de l'accident Sud-Atlasique (Fig.2). L'âge de mise en place des plutons est variable, aussi bien que leur rapport avec les phases de structuration hercynienne qui sont plus anciennes à l'est qu'à l'ouest du pays. Ils

présentent en outre des différences minéralogiques, chimiques et de faciès aussi bien au sein d'un pluton qu'entre les différents plutons dépendant du contexte tectonique et du mode de mise en place.

II. PRESENTATION DES SECTEURS D'ETUDE

Parmi les granitoïdes hercyniens ici étudiés, le pluton d'Aouli représente la majeure partie dans ce travail, soit deux chapitres sur trois. Pour cela, une introduction générale est présentée pour l'étude de ce pluton. Par contre, pour les autres je me contenterai de les présenter brièvement dans le troisième chapitre de ce mémoire.

II.1. Pluton d'Aouli

II.1.1. Situation géographique

Le pluton d'Aouli affleure au sein de la cuvette de la Haute Moulouya, à une vingtaine de kilomètres au nord de Midelt (Fig.2).

La Haute Moulouya est une dépression qui se termine en coin à la jonction orientale des deux chaînes de montagnes, le Haut Atlas et le Moyen Atlas. Cette cuvette qui semble être quasi-pénéplanée est, en effet, échancrée par la vallée de l'Oued Moulouya et ses affluents, ce qui donne des reliefs négatifs parfois importants, les gorges d'Aouli entre-autres. L'altitude varie de 1200 à 1500 m dans la dépression et culmine à 3757 m au Jbel Ayachi dans le Haut Atlas. Le climat est continental, sec et chaud en été, froid et peu humide en hiver. La végétation spontanée est constituée surtout de l'alfa, ce qui développe des conditions d'affleurement très favorables à l'observation. L'accès au terrain se fait par la route principale (R.P.21), et les déplacements sont facilités par un réseau, très développé, de pistes minières qui sillonnent la cuvette.

II.1.2. Cadre géologique

Deux boutonnières paléozoïques sont connues dans la Haute Moulouya; Aouli ayant fait l'objet de cette étude et Bou-Mia située plus à l'ouest. Elles sont isolées du reste de la chaîne hercynienne occidentale par le Moyen Atlas. Ces deux boutonnières laissent apparaître, sous une couverture mésozoïque et cénozoïque, un substratum cristallophyllien et cristallin; le massif d'Aouli à l'Est et celui de Bou-Mia à l'ouest, constituant tous les deux le massif de la Haute Moulouya (Emberger, 1965).

Le massif granitique d'Aouli affleure, au sein des schistes, sur environ 260 km² et celui de Bou-Mia sur 65 km². Les limites, occidentale du premier et orientale du second, sont distantes l'une de l'autre d'une vingtaine de km, de Zeida à Bou-Mia. Cependant la continuité entre ces deux massifs semble être bien établie sous la couverture. Il s'agirait d'un seul massif granitique dont la superficie minimum serait supérieure à 700 km² (Diot et Bouchez, 1989).

Dans la boutonnière d'Aouli, les schistes déformés, encaissant des granites, n'affleurent que dans la partie sud-est, sur environ 200 km². Ces schistes sont à chlorite séricite et parfois à amphibolites avec localement de la biotite. Ils ont été rapportés au Cambrien par analogie de faciès avec d'autres affleurements voisins. Le massif granitique s'étend de Zeida à l'ouest jusqu'à Aouli à l'est, deux localités minières distantes d'une quarantaine de km. Il est constitué de plusieurs faciès, caractérisés par une croissance de SiO₂ de l'est vers l'ouest.

Le socle paléozoïque est surmonté, en discordance, par une couverture subtabulaire, constituée à la base par des formations détritiques rouges et des épanchements de laves permo-triasiques, surmontés à leur tour par une sédimentation détritique et carbonatée du Jurassique et Crétacé (Emberger, 1965).

II.1.3. Travaux antérieurs

Des fouilles minières très anciennes sont connues dans la région de la Haute Moulouya leur histoire remonterait vraisemblablement, selon la légende, au XV ou début du XVI^{ème} siècle. Cependant, ce n'est qu'au début de ce siècle, que les premiers travaux de prospection minière ont connu le jour. Depuis, plusieurs études ayant surtout pour objectifs la recherche minière, en particulier sur le plomb-zinc, ont été réalisées. Ce n'est qu'au début des années soixante que les géologues commencent à prendre conscience de l'intérêt que présente cette région dans la compréhension de la chaîne hercynienne du Maroc.

Emberger (1965) publie son important travail sur la cuvette de la Haute Moulouya. Il a dressé une carte géologique, au 25 000^{ème}, de la boutonnière d'Aouli et de sa périphérie, ce qui reste jusqu'à nos jours le seul document de base disponible pour des études ultérieures. Il décrit aussi le massif granitique, dit de la Moulouya, et y distingue trois faciès, (1) les diorites, granodiorites et granites à amphibole qui affleurent dans la partie orientale, de l'apophyse d'El-Hassir, (2) les granites monzonitiques, calcoalcalins, et souvent porphyroïdes et (3) les granites aplitiques roses alcalins. Il décrit aussi deux pointements de granites à muscovite isolés au sein des schistes (Poulet et Perdreaux) qu'il considère comme étant des digitations du massif. Depuis, les travaux se sont axés de nouveau sur la recherche et l'exploitation minières. Mais, vers le milieu des années soixante-dix, les géologues se sont rendu compte du rôle important, que pourrait jouer l'étude de cette région dans la contribution à la connaissance de la chaîne hercynienne marocaine.

Vaucher (1976), étudiant la déformation anté-triasique dans la boutonnière d'Aouli-Mibladen, décrit quatre phases successives, (1) plis isoclinaux déversés vers le sud auxquels est associée une schistosité de flux S_1 , synchrone d'un métamorphisme régional épizonal, (2) plis couchés vers le sud dont les flancs inverses sont étirés et parfois cisailés, accompagnés d'une schistosité S_2 , (3) plis droits et ouverts sans schistosité associée,

(4) décrochements conjugués, NE-SW senestres et N 110-130 dextres, cette dernière phase est postérieure à la mise en place des granites. Malgré l'absence de toute datation, cet auteur rattache ces déformations à l'orogénèse hercynienne, par analogie avec d'autres secteurs proches déjà étudiés.

Tisserant (1977) entreprend une étude géochronologique sur les massifs plutoniques hercyniens du Maroc, par la méthode Rb-Sr. Il propose trois âges pour les phases de déformation dans les roches cristallophylliennes constituant l'encaissant des granites, soient 354 ± 7 , 296 ± 12 , et 273 ± 16 Ma. En discutant ces résultats, l'auteur note qu'il ne lui était pas possible de séparer, dans le temps, les deux phases tectono-métamorphiques précédemment identifiées par Vauchez (1976) et signale aussi que l'âge de 273 Ma est très suspect. Il a aussi calculé des âges différents pour les divers faciès de granites; 336 ± 17 Ma. pour les granodiorites; 316 ± 3 Ma, pour les granites alcalins; 309 ± 5 Ma, pour les granites calcoalcalins et enfin, 271 ± 3 Ma, pour les deux pointements de granites muscovitisés (Poulet et Perdreux). Il émet une réserve sur ce dernier âge et lui préfère plutôt un autre, 308 ± 12 Ma, calculé sur la muscovite primaire. L'auteur envisage une origine profonde pour les granodiorites et granites alcalins qui résultent d'une cristallisation fractionnée. Ces deux faciès proviennent, soit de la différenciation d'un magma basique mantellique, soit d'un mélange, suivi d'une cristallisation fractionnée, entre un précurseur mantellique et les roches de la croûte inférieure environnante. Il penche plutôt vers la deuxième hypothèse. Pour les granites calcoalcalins il envisage une origine mixte avec une proportion de matériel crustal beaucoup plus importante. Enfin il propose que les granites à muscovite dériveraient en grande partie des granites calcoalcalins.

Ganzeev et *al.*, (1978) étudient la structure géologique de la région de la Haute Moulouya. Ils proposent des âges absolus, déterminés par la méthode Rb-Sr, sans préciser sur quelle fraction, de 330 ± 40 Ma pour les schistes, ainsi les rapportent-ils au Carbonifère,

et 310 Ma pour les granites en général.

Clauer et *al.*, (1980) reprennent l'étude isotopique, par la méthode Rb-Sr, de la série cristallophyllienne et des roches cristallines qui affleurent dans les boutonnières de la Haute Moulouya. Ils distinguent ainsi deux phases tectono-métamorphiques dans les schistes, la première se terminant vers 366 ± 7 Ma et la seconde vers 315 Ma. Pour les épisodes intrusifs, ce sont tout d'abord les granodiorites qui se sont mises en place vers 347 ± 7 Ma, suivies par les granites alcalins vers 329 ± 6 Ma, et enfin par les granites calcoalcalins vers 319 ± 6 Ma.

Hoepffner (1987), dans son travail consacré à l'ensemble de l'hercynien de l'est du Maroc, s'est intéressé entre autres, à l'étude de la déformation dans le socle cristallophyllien de la Haute Moulouya. Pour cet auteur, les deux premiers épisodes décrits par Vauchez (1976), représentent un continuum de déformation et non pas deux phases distinctes. Il montre aussi que le sens des cisaillements pendant cette phase s'est effectué de l'est vers l'ouest, selon un plan faiblement incliné vers l'est et que ces cisaillements ont persisté après le métamorphisme de contact lié à la mise en place des granites.

Diot et Bouchez (1989) étudient la structure primaire et la mise en place des granitoïdes hercyniens de la Haute Moulouya par la technique de l'anisotropie de la susceptibilité magnétique (ASM). Ils en déduisent que ces corps granitiques présentent une fabrique magmatique, dominée par une linéation subhorizontale, d'orientation constante SE-NW, qu'ils attribuent à un épisode tectonique en cisaillement plat de direction, SE-NW, dominante. Ces granitoïdes sont considérés comme étant syn- à tardi-tectoniques.

II.2. Les massifs granitiques du Maroc

Les autres massifs granitiques étudiés dans le troisième chapitre du mémoire, sont d'âge hercyniens, et sont tous situés au nord de l'accident sud-atlasique, dans la zone occidentale de la chaîne hercynienne du Maroc (Fig.2). Le choix des plutons à étudier est contraint par la disponibilité des données d'analyses de leur composition chimiques dans la

littérature. Les plutons ayant été retenus pour cette étude sont, le Tichka dans le bloc paléozoïque du Haut Atlas Occidental, Oulad Ouaslam dans les Jebilet, Sebt des Brikiine dans les Rehamna, et Zaer, Oulmes et Ment dans le Massif Central.

III. OBJECTIFS DU TRAVAIL

Les principaux objectifs de ce travail sont les suivants:

- distinguer, par leur chimisme, les différents types (faciès) de roches granitiques constituant le pluton d'Aouli;
- déterminer l'évolution magmatique et les mécanismes des processus pétrogénétiques qui sont à l'origine du magma parental de ces roches;
- définir le contexte géodynamique de mise en place du pluton d'Aouli;
- calculer, avec plus de précision, l'âge absolu de chacun de ces types de roches, et confronter les résultats obtenus à ceux de l'étude géochimique pour en dégager le mode de mise en place du pluton
- comparer, du point de vue chimique, le pluton d'Aouli situé dans la Méséta Orientale à d'autres plutons hercyniens de la zone occidentale de la chaîne hercynienne du Maroc;
- comparer, entre eux, uniquement les plutons de la zone occidentale, préalablement divisés en deux groupes qui sont distincts par le contexte tectonique de leur mise en place;
- et, enfin combiner les résultats de notre étude et les compiler avec ceux déjà connus, dans un essai de synthèse géotectonique intégrée au contexte plus général de l'Hercynien du Maroc.

CHAPITRE I

ETUDE GEOCHIMIQUE DES GRANITOIDES DU PLUTON D'AOULI, HAUTE MOULOUYA, MAROC

RESUME

L'étude géochimique des granitoïdes qui affleurent au sein de la boutonnière paléozoïque d'Aouli, Haute Moulouya (Maroc), a permis de reconnaître quatre faciès distincts tant par la chimie que par la pétrographie et la couleur: (1) une granodiorite, faciès le plus basique de tout le pluton; (2) un granite gris à grain moyen; (3) un granite rose, homogène et à grain fin; et enfin, (4) un granite leucocrate dit à muscovite. Les quatre faciès sont de type calcoalcalin à tendance subalcaline et aucun d'eux n'a révélé le caractère purement alcalin tel que proposé par les auteurs précédents. L'étude géochimique suggère que la granodiorite et le granite à muscovite forment, chacun, une entité à part; mais que le granite gris et le granite rose ont une origine commune, le second proviendrait du premier par différenciation magmatique. La répartition subhorizontale à horizontale, de SiO_2 dans l'espace, laisse suggérer un batholite à émissions multiples, et soutient l'hypothèse de la mise en place du pluton en cisaillement plat. L'environnement tectonique, dans lequel s'est effectué la mise en place du pluton d'Aouli, tel que déduit de l'étude de la composition chimique des roches est tardi- à post-orogénique.

ABSTRACT

A mapping and geochemical study of granitic rocks which are exposed in the Aouli Paleozoic window, Haute Moulouya area, Morocco, has revealed the presence of four distinct facies: (1) a granodiorite, which is the most mafic member of the complex; (2) a medium-grained grey granite; (3) a pinkish, medium-grained homogeneous granite; (4) a leucocratic muscovite granite. The four facies are calc-alkaline to subalkaline in nature - none of them is truly alkaline as had been suggested previously. The available data show that the granodiorite and the muscovite granite are geochemically distinct. They also suggest that the pinkish facies evolved from the grey facies by fractional crystallization. The horizontal to subhorizontal distribution of SiO_2 contours and observed field relationships both suggest that the grey phase is related to the pink phase by multiple injection, supporting the hypothesis that the whole complex was emplaced into a pre-existing horizontal shear zone. A late-orogenic to post-orogenic tectonic environment of emplacement is suggested based on a number of discriminant diagrams.

INTRODUCTION

La chaîne hercynienne du Maroc affleure dans des massifs et boutonnières isolés les uns des autres par des recouvrements mésozoïques, cénozoïques et quaternaires (Fig.1).

Dans le but de corrélérer les affleurements paléozoïques, plusieurs travaux de synthèse ont été réalisés et plusieurs hypothèses ont été proposées. L'une des idées fondamentales concernant la chaîne hercynienne du Maroc, est que la zone de Midelt constitue la marge ouest de la chaîne éovarisque (Piqué, 1983; Hoepffner, 1987). A l'ouest du Moyen Atlas, se trouve un ensemble, en arc, de nappes à matériel ordovico-siluro-dévonien mises en place dans un bassin viséen. Ce dispositif de nappes montre une disposition centrifuge à partir de la zone de Midelt (Allary, *et al.* 1976; Huvelin, 1977; Jenny et le Marrec, 1980; Michard *et al.*, 1982; Bouabdelli, 1982; Hoepffner, 1987; Oukemeni, 1987). La zone de Midelt est considérée comme étant le secteur des zones internes de cette chaîne (Piqué et Michard, 1989). La déformation hercynienne est enregistrée à l'est du Maroc (zone de Midelt) dès le Dévonien supérieur (360 Ma) (Tisserant, 1977; Clauer *et al.*, 1980; Hoepffner, 1987), alors qu'elle est du Namurien inférieur (325 Ma) dans les Jebilet Orientales et au centre du Maroc (Huvelin, 1969a, 1969b, 1973, 1977; Hoepffner, 1987; Oukemeni, 1987) et n'atteint la partie occidentale du pays qu'au Westphalien (315 Ma) (Hoepffner, 1987). Elle paraît alors se déplacer en continuum, de l'est vers l'ouest du Maroc. Cependant, il faut noter que si les âges de cette déformation sont stratigraphiquement cernés dans le centre et l'ouest du pays, ce n'est pas le cas pour la zone de Midelt, où l'âge de la déformation est obtenu uniquement par des datations isotopiques.

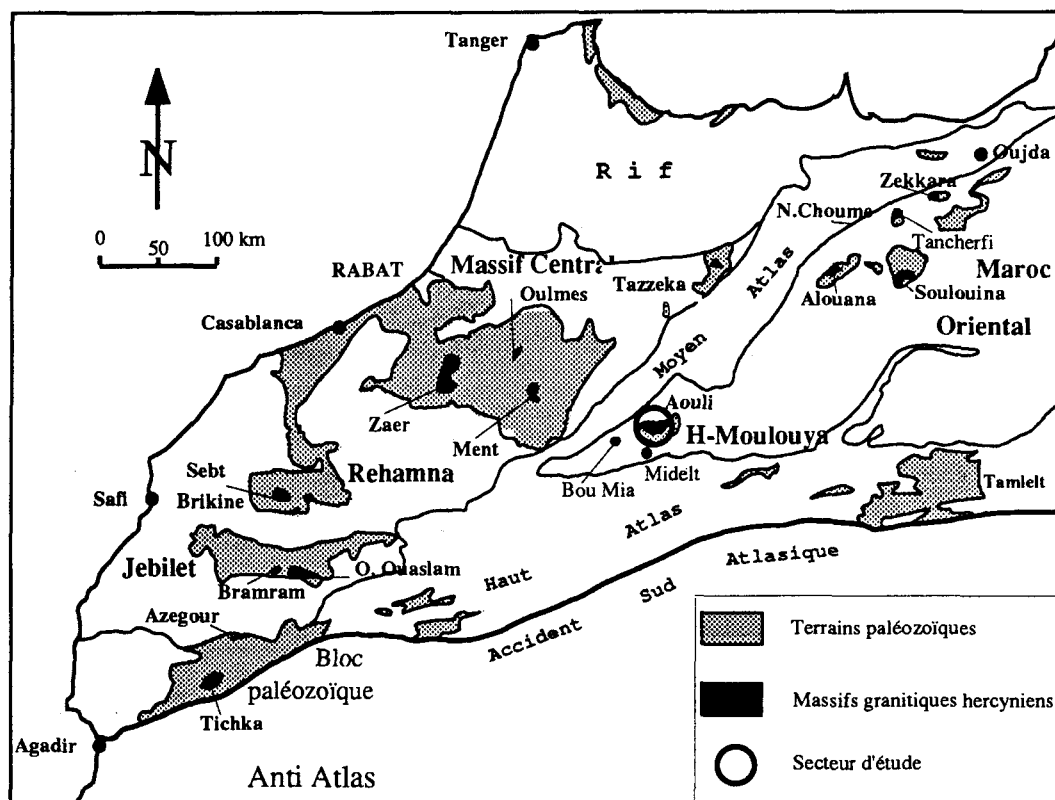


Fig. 1: Carte des terrains paléozoïques et des massifs de granitoïdes hercyniens du Maroc (Provinces du Nord).

Dans un tel schéma, la zone de Midelt occupe une position très privilégiée en formant le secteur des zones internes de la chaîne hercynienne du Maroc, tout en étant le berceau de la déformation éovarisque précoce (Piqué et Michard, 1989).

L'activité magmatique hercynienne au Maroc est marquée par des intrusions granitiques mises en place à différents niveaux dans les séries paléozoïques. Les massifs de granitoïdes hercyniens affleurent tous au nord de l'accident Sud-Atlasique (Fig.1).

La position de la zone de Midelt dans la chaîne hercynienne du Maroc, incite à s'y intéresser d'avantage; la présente contribution consiste à étudier l'un des massifs granitiques qui affleurent au sein de cette zone.

Le massif granitique de la Haute Moulouya est constitué de deux plutons, Bou Mia à l'ouest et Aouli à l'est (Fig.1). Ce dernier, sujet du présent travail, affleure sur une superficie de 260 km² au sein des schistes déformés rapportés au Paléozoïque probablement inférieur. Ce pluton et son encaissant constituent le socle pour une couverture formée de terrains triasiques et post-triasiques (Emberger, 1965).

Ces granitoïdes ont fait l'objet de plusieurs travaux; 1) pétrographique (Emberger, 1965; Clauer *et al.*, 1980), 2) isotopique (Tisserant, 1977; Clauer *et al.*, 1980) et 3) structurale (Diot et Bouchez, 1989). Dans le pluton d'Aouli, Emberger (1965) a identifié quatre unités, dont la granodiorite d'Elhassir, un granite alcalin, un granite calcoalcalin, et un granite à muscovite. Ces unités, selon l'auteur, sont disposées les unes au dessus des autres et sont caractérisées par une acidité croissante d'est en ouest; les plus profondes, situées à l'est, sont surélevées par le biais de failles verticales tardives, à regard nord-ouest. Le granite à muscovite est considéré comme étant des digitations dérivées des granites calcoalcalins, (Emberger, 1965; Clauer *et al.*, 1980). Cette hypothèse admet d'emblée que tous les faciès appartiennent au même réservoir magmatique, leur variation proviendrait de la différenciation du magma. Or, des datations isotopiques, par la méthode Rb-Sr sur roche totale (Clauer *et*

al., 1980), ont donné des âges de 347 ± 17 Ma pour la granodiorite, 329 ± 6 Ma pour le granite alcalin, 319 ± 6 Ma pour le granite calcoalcalin et 281 ± 3 Ma pour le granite à muscovite. Ces âges ne concordent pas tout à fait, avec l'idée d'une seule chambre magmatique; car, il est peu probable qu'un tel réservoir puisse fonctionner en continuité pendant plus de 60 Ma. Ces datations suggèrent, plutôt, un massif à émissions multiples séparées par de longues périodes de silence. Cependant, il faut signaler que les auteurs ont émis une réserve sur l'âge du granite à muscovite, (281 ± 3 Ma), et préfèrent un autre de 319 ± 12 Ma, calculé par isochrone Rb-Sr sur le couple roche totale - muscovite biotite. Le recoupement de âges calculés, compte-tenu des erreurs de calculs, pour le granite alcalin, le granite calcoalcalin et le granite à muscovite, laisse suggérer la possibilité, qu'au moins, ces trois unités soient issues d'une même chambre magmatique. Finalement, il faut noter que Clauer *et al.*, (1980) n'ont pas précisé si la pondération des calculs est de 1 ou de 2 sigma; parce que, si elle est seulement de 1 sigma, l'hypothèse d'Emberger reste toujours valable. L'un des buts de cette étude est d'utiliser les informations géochimiques pour évaluer cette hypothèse.

ETUDE PETROGRAPHIQUE

L'étude de terrain a permis de reconnaître quatre faciès de granitoïdes dans le pluton d'Aouli, distincts par leur couleur, leur granulométrie et leur signature magnétique: (1) un faciès de couleur sombre qui affleure dans la partie nord-est du pluton, à Elhassir (Fig.2), il correspond à la granodiorite de l'apophyse d'Elhassir d'Emberger (1965); (2) un faciès de couleur grise à grain moyen et grossier, qui affleure dans la partie centrale du pluton; (3) un faciès de couleur rose à grain plus fin qui affleure dans la partie orientale; ces deux derniers faciès constituent la majeure partie du pluton à l'affleurement (Fig.2), et

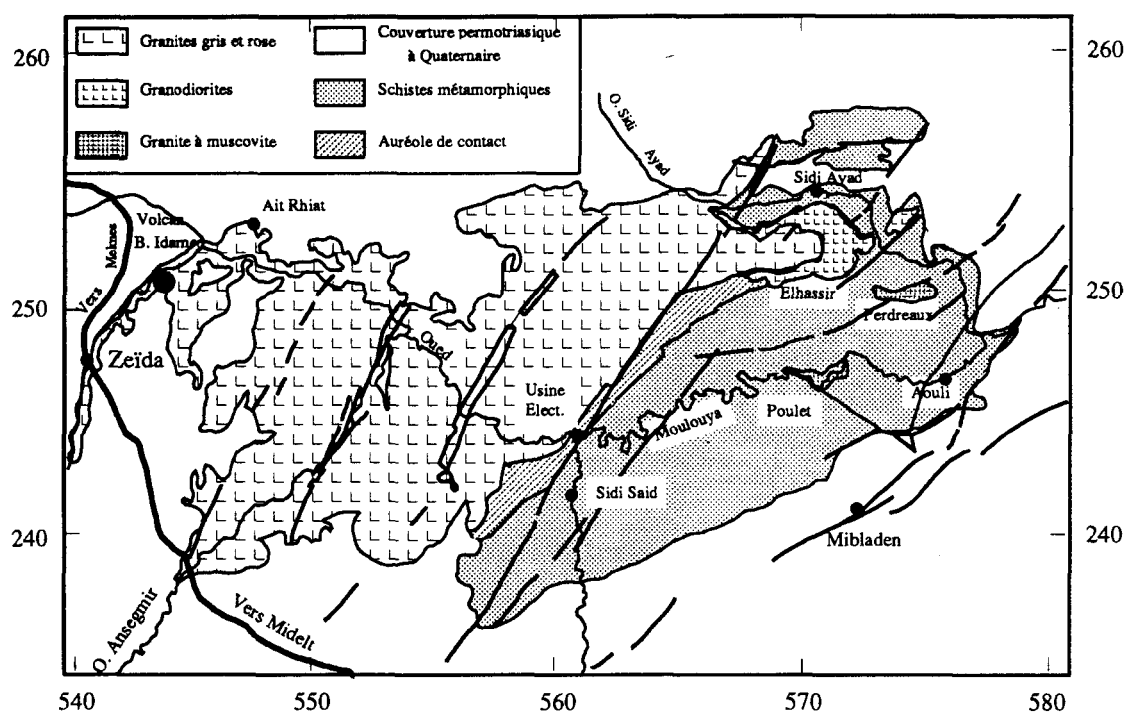


Fig.2: Carte géologique de la boutonnière d'Aouli; d'après Emberger, 1965.

correspondent aux granites, calcoalcalin et alcalin, mis ensemble, d'Emberger (1965). Le faciès rose se présente en feuillets subhorizontaux à horizontaux, parfois lenticulaires, qui s'intercalent au sein mais surtout reposent sur le faciès gris. Le contact entre les deux faciès est généralement franc et plat, mais il est progressif par endroit ; (4) un faciès leucocrate à muscovite qui affleure dans deux pointements, dits Perdreaux et Poulet (Emberger, 1965), isolés du reste du pluton au sein des schistes paléozoïques encaissants (Fig.2).

Les valeurs de la susceptibilité magnétique, mesurées sur le terrain, sont variables selon les faciès. Elles sont de l'ordre de 3000×10^{-5} SI pour la granodiorite; 2000×10^{-5} SI pour le faciès gris et $0 \text{ à } 100 \times 10^{-5}$ SI pour le faciès rose. Nous ne disposons pas des données magnétiques concernant le faciès à muscovite.

Sur le diagramme de Streckeisen (1973) (Fig.3), les points représentatifs des analyses modales du faciès sombre se projettent dans le champ des granodiorites, granites, diorites quartziques et monzonites quartziques, mais ils restent toujours non loin du domaine des granodiorites. Pour cette raison, et pour utiliser la même terminologie que celle des travaux antérieurs, nous retenons le terme, granodiorite, pour désigner les roches de cette unité. Par contre, les points représentatifs des autres faciès, le gris, le rose, et à muscovite, se projettent tous dans le champ des granites. Désormais, les termes; (1) granodiorite, (2) granite gris, (3) granite rose, et (4) granite à muscovite, seront retenus pour désigner les quatre faciès du pluton d'aouli, décrits ci-dessus.

Granodiorite d'Elhassir

Ce faciès est le plus basique de tout le pluton. Il est constitué d'une roche hétérogranulaire dont la taille des grains varie du millimètre au demi-centimètre. Les minéraux cardinaux sont le quartz, le plagioclase qui est zoné, de composition variable de An₃₅ à An₄₈, et présentant une altération brunâtre, et de la biotite. Les minéraux accessoires sont: la chlorite, les opaques, les pyroxènes, la hornblende, l'épidote et l'apatite.

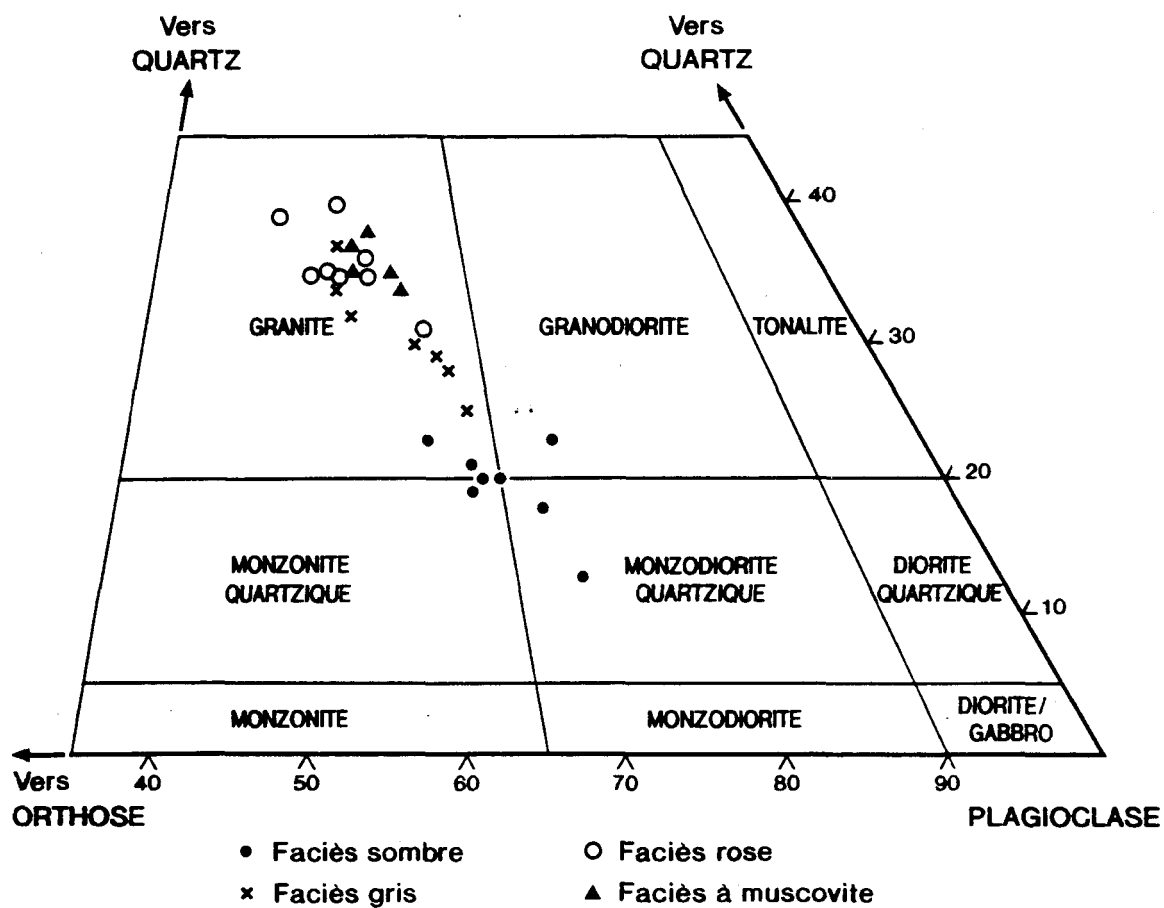
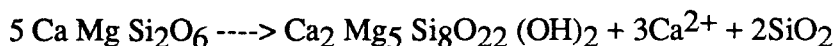


Fig.3: Diagramme de Streckeisen (1973), classification des roches plutoniques

Le quartz est parfois enrobé par la hornblende. Cette texture suggère qu'une partie de la hornblende soit d'origine secondaire. Il est possible que cette hornblende soit formée à partir des clinopyroxènes, lorsque la pression de l'eau était suffisante, selon une réaction telle que:



Une telle réaction peut également expliquer la présence du quartz dans la hornblende. Les clinopyroxènes peuvent avoir directement cristallisé du magma granodioritique ou constituer des minéraux résiduels ayant été transportés par le magma ascendant; et, ils ont été remplacés par la hornblende pendant une étape magmatique où la température était encore suffisamment élevée. Il est possible que la réaction ait impliqué le magma lui même (Speer 1987).

La granodiorite d'Elhassir renferme des enclaves basiques, microgrenues, de couleur sombre, de 5 à 30 cm de diamètre et à contours généralement diffus. Ce faciès est traversé par des dykes de microgranite de même couleur que la roche principale et de puissance allant jusqu'à 2m.

Granite gris

La taille des grains de cette roche est en moyenne de 3 à 5 mm; cependant, par endroit, elle renferme des cristaux de feldspath très développés, de 4 à 5 cm d'arête. Outre le quartz et les feldspaths, ce faciès contient 25 à 30 % de minéraux sombres surtout des opaques, de la biotite et rarement de la hornblende.

Les minéraux essentiels sont: le quartz, l'orthose, les plagioclases (An_{18} à An_{29}) et la biotite; tandis que la chlorite, l'épidote, le sphène et l'apatite, et des minéraux opaques, constituent les minéraux accessoires. La biotite, et parfois même la chlorite, se trouvent généralement associées, dans l'espace, aux minéraux opaques, ce qui laisse suggérer qu'ils proviennent tous ensemble d'un même minéral ferrique dont les traces ont complètement disparu. Speer (1987) a noté que lors du remplacement de l'amphibole par la biotite, à cause

des réactions magmatiques, il peut y avoir formation du sphène, de la muscovite et du quartz. Des textures de myrmekite sont aussi présentes, phénomène de subsolidus provenant de la transformation de l'orthose en plagioclase. L'origine de cette texture a été très discutée (Phillips et Ransom, 1968; Ransom et Phillips, 1969; Hubbard, 1969; Phillips, 1973), mais en général, on suggère qu'elle se développe lorsqu'un fluide riche en calcium s'introduit dans une roche plutonique déjà consolidée (Ashworth, 1973; Phillips, 1974, 1980; Hopson et Ramsey, 1990).

Ce faciès est relativement riche en enclaves. Ces dernières sont plus abondantes sur la bordure sud du pluton, en contact avec l'encaissant, du côté de l'Usine Électrique (Fig.2). Ces enclaves sont de trois types; (1) des enclaves basiques microgrenues, de couleur sombre, de forme ovoïde plus ou moins arrondie et de taille variable de 5 à 30 cm de diamètre; le contact avec la roche principale est diffus et le passage se fait de manière graduelle, ce qui suggère une assimilation de l'enclave, au moins en partie; (2) des enclaves granulaires, de couleur sombre, de forme plus ou moins angulaire et de taille variant de quelques décimètres à un mètre de diamètre, leur contact avec le granite est généralement net; (3) des enclaves de forme angulaire, de taille variable de 5 à 30 cm; elles présentent des structures correspondant vraisemblablement à un litage métamorphique préexistant préservé rappelant les gneiss foliés. Leur contact avec le granite est net.

Le granite gris est traversé par des dykes d'aplite dont l'épaisseur dépasse parfois le mètre et par des filons de quartz minéralisés en plomb par endroit. Il renferme, en outre, des pochettes de pegmatites, centimétriques à décimétriques.

Granite rose

En général, ce faciès présente la granulométrie la plus fine du pluton, la taille des grains est de l'ordre du millimètre; toutefois, des grains de quartz peuvent atteindre 5 mm de

diamètre ou plus. Localement, de petits amas de biotite, de 1 à 4 mm de diamètre, confèrent à la roche un aspect moucheté à l'affleurement. Au microscope polarisant, la roche montre des textures graphiques spectaculaires. Cette unité est la plus évoluée de toutes. La biotite rare est le seul minéral mafique observé. La composition des plagioclases varie de An₄ à An₁₀.

Les enclaves sont rares. Elles sont microgrenues lorsqu'elles existent, de forme ovoïde, de taille allant de 5 à 10 cm de diamètre. Ces enclaves ont, elles aussi, une couleur rose, ce qui empêche de les distinguer facilement du reste de la roche principale. Ce faciès est traversé par des dykes d'aplite et de microgranite, dont l'épaisseur varie du décimètre au mètre, et aussi par des filons de barytine de quelques centimètres de puissance. Il renferme lui aussi des pochettes de pegmatites d'ordre centimétrique à décimétrique.

Granite à muscovite

Ce faciès est caractérisé par une présence de paillettes abondantes de mica blanc.

Les minéraux essentiels observés sont le quartz, la muscovite, la microcline et des plagioclases (oligoclase) maclés. C'est un granite à deux feldspaths contenant de la biotite rouge comme minéral accessoire. La muscovite montre deux groupes de paillettes, de petite et de grande taille, qui, sans doute, correspondent à deux générations de micas blanc, primaire et secondaire.

Le granite à muscovite est traversé par des dykes de microgranite, d'environ 2m de puissance, et renferme en outre, deux types d'enclaves; (1) des enclaves microgrenues, de forme ovoïde et de 10 à 20 cm de diamètre, et (2) des enclaves granulaires, de forme angulaire et dont la taille varie de quelques centimètres au demi-mètre, et sont surtout localisées près du contact avec l'encaissant.

ETUDE GEOCHIMIQUE

Analyses chimiques

Cent soixante-huit échantillons de roche totale ont été analysés pour déterminer leur composition en éléments majeurs et en traces, dont 11 échantillons de la granodiorite, 81 du granite gris, 71 du granite rose et 5 du granite à muscovite. Vingt-huit de ces échantillons ont été également analysés pour les terres rares, dont 8 de la granodiorite, 7 du granite gris, 8 du granite rose et 5 du granite à muscovite. Seuls les échantillons ayant fait l'objet des analyses à la fois pour les éléments majeurs, en traces et les terres rares, sont représentés dans les tableaux Ia et Ib. Les autres résultats d'analyses sont présentés en annexe à la fin du mémoire.

Les méthodes employées pour ces analyses sont: la spectrographie aux R-X pour les éléments majeurs; la fluorescence aux R-X pour les éléments en traces; l'électrode à ion spécifique pour le fluor; et l'activation neutronique pour l'analyse des terres rares.

Les valeurs d'analyses des terres rares ont été normalisées par rapport à leurs valeurs respectives dans les chondrites telles que déterminées par Sun (1982).

Résultats

La teneur en SiO_2 des échantillons analysés varie de 55.97 à 78.10 %. Les roches les plus pauvres en SiO_2 sont localisées dans la partie nord-est du pluton, à Elhassir (Fig.4), alors que les plus riches sont surtout localisées dans la partie ouest. La répartition des contours de pourcentage en SiO_2 égale, ou isolignes, ne montre pas de zonation régulière générale à l'échelle de l'ensemble du pluton. A l'exception de la zone d'Elhassir,

Tableau I a: Analyses chimiques des roches plutoniques d'Aouli: éléments majeurs exprimées, en poids, en %.

	#&type	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI
0	202e	58.95	0.78	16.56	1.84	3.85	0.11	3.90	4.29	2.42	4.40	0.21	1.49
1	204e	59.42	0.74	16.49	1.74	3.65	0.11	3.62	3.99	2.49	4.61	0.19	1.48
2	206e	58.51	0.87	17.97	1.84	3.86	0.10	3.13	4.76	2.35	3.88	0.20	1.18
3	207e	59.06	0.87	17.76	1.82	3.82	0.10	3.21	4.72	2.34	3.67	0.23	1.49
4	208e	55.97	0.83	17.51	1.99	4.17	0.12	4.03	5.08	2.64	3.98	0.22	1.79
5	209e	61.36	0.68	16.29	1.63	3.41	0.10	3.39	4.07	2.59	4.53	0.17	0.89
6	210e	59.58	0.71	16.32	1.74	3.65	0.10	3.73	3.99	2.56	4.44	0.20	1.30
7	212e	61.62	0.67	16.32	1.67	3.51	0.11	3.64	3.85	2.24	4.72	0.19	1.59
8	1g	67.50	0.60	15.31	1.16	2.44	0.08	1.16	2.25	3.86	4.29	0.22	0.40
9	19g	73.36	0.28	13.34	0.56	1.18	0.04	0.38	1.04	3.63	5.04	0.10	0.39
10	21g	70.55	0.42	14.42	0.87	1.83	0.08	0.79	1.69	3.72	4.49	0.15	0.78
11	33g	69.07	0.49	14.52	1.06	2.22	0.07	1.07	2.04	3.71	4.39	0.15	0.38
12	47g	74.55	0.17	12.63	0.46	0.97	0.04	0.31	0.85	3.42	4.70	0.06	0.40
13	112g	70.38	0.40	14.83	0.89	1.86	0.07	0.67	1.69	3.92	4.45	0.17	0.70
14	149g	69.99	0.39	14.26	0.79	1.66	0.07	0.71	1.66	3.59	4.45	0.09	0.89
15	217p	71.63	0.19	15.18	0.56	1.17	0.05	0.32	0.83	3.37	4.30	0.19	1.20
16	218p	72.10	0.17	15.11	0.50	1.06	0.05	0.35	0.88	3.35	4.57	0.21	1.18
17	219p	71.51	0.16	15.23	0.48	1.01	0.06	0.29	0.89	3.41	4.59	0.20	0.89
18	220p	71.77	0.16	15.18	0.56	1.18	0.05	0.44	0.92	3.80	4.27	0.18	1.00
19	221p	71.12	0.19	15.32	0.57	1.20	0.05	0.50	1.23	3.51	4.28	0.15	0.40
20	7r	75.97	0.07	12.53	0.39	0.82	0.05	0.11	0.52	3.82	4.83	0.03	0.50
21	9r	76.77	0.05	12.54	0.25	0.52	0.03	0.01	0.37	3.82	5.00	0.01	0.30
22	29r	75.46	0.13	12.47	0.28	0.58	0.02	0.12	0.50	3.69	5.14	0.02	0.19
23	72r	78.10	0.07	11.29	0.30	0.62	0.03	0.06	0.34	3.41	4.69	0.01	0.30
24	76r	77.61	0.05	12.29	0.17	0.36	0.01	0.04	0.34	3.95	4.92	0.07	0.30
25	147r	74.25	0.14	13.77	0.38	0.79	0.04	0.23	0.72	3.48	4.95	0.07	0.10
26	166r	74.89	0.17	12.74	0.41	0.86	0.04	0.28	0.61	3.42	5.19	0.02	0.39
27	167r	77.24	0.12	12.06	0.29	0.62	0.02	0.11	0.46	3.11	5.31	0.02	0.50

Tableau I b: Analyses chimiques des roches plutoniques d'Aouli: éléments en taces et terres rares exprimées en ppm.

	Pb	Ba	Sr	Ga	Nb	Zr	Y	F	La	Ce	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu
0	160	148	802	25	16	244	30	735	50.00	114.10	9.23	2.19	1.00	3.71	0.45
1	182	57	758	21	15	224	26	665	42.47	79.14	8.63	1.82	0.86	2.63	0.34
2	136	913	725	20	15	190	38	630	33.24	61.53	9.26	1.85	1.10	3.46	0.42
3	135	870	700	22	14	189	29	615	40.87	74.69	9.12	1.78	1.02	2.75	0.34
4	144	330	879	23	15	266	22	825	39.90	70.97	8.69	2.10	0.78	2.19	0.28
5	153	165	773	21	14	195	27	620	45.54	78.48	8.11	1.74	0.78	2.67	0.35
6	157	957	881	24	14	193	26	630	5.19	96.21	9.05	1.84	0.99	2.74	0.36
7	167	32	756	21	15	209	27	695	44.42	87.35	7.92	1.74	0.85	2.81	0.33
8	184	573	225	21	17	207	32	510	35.92	80.19	6.28	1.44	0.88	4.67	0.56
9	214	350	90	16	17	169	29	380	23.89	60.96	5.70	0.83	0.76	2.90	0.35
10	216	379	169	18	18	190	36	375	31.07	69.78	6.40	1.13	0.88	4.14	0.53
11	200	474	175	20	19	203	37	430	39.90	78.00	6.70	1.16	1.10	3.47	0.52
12	217	289	86	15	12	123	21	10	21.97	44.26	3.44	0.79	0.60	2.79	0.40
13	252	504	157	17	18	207	36	440	38.20	74.00	6.70	1.13	1.00	3.61	0.53
14	232	465	159	18	19	208	39	595	33.49	73.42	6.47	1.13	0.91	4.28	0.54
15	267	291	145	26	18	100	15	455	14.92	41.43	3.11	0.69	0.43	2.61	0.17
16	267	233	102	28	18	89	0	470	30.94	92.60	5.65	1.81	1.26	2.54	0.33
17	281	312	129	29	17	90	14	420	43.04	88.76	6.51	1.91	1.10	3.07	0.34
18	188	327	151	13	14	92	13	165	43.74	82.40	5.73	2.26	1.23	3.14	0.35
19	177	366	180	20	14	99	14	260	18.90	38.45	3.56	0.85	0.44	1.14	0.18
20	455	40	10	19	31	81	38	445	5.13	30.93	3.06	0.24	0.70	6.37	0.86
21	399	66	12	17	25	92	56	290	40.49	92.08	12.78	0.70	3.23	19.44	2.64
22	276	78	23	16	22	112	46	75	58.20	147.58	8.12	0.97	3.23	18.60	2.45
23	358	41	10	18	28	95	58	240	19.65	41.18	4.99	0.19	1.12	9.49	0.96
24	386	26	7	18	29	149	45	60	15.19	50.81	3.34	0.11	0.88	7.31	0.98
25	311	395	81	15	16	108	31	441	57.87	125.02	9.12	1.60	2.14	10.16	1.22
26	292	169	46	16	21	121	40	190	55.20	132.25	9.45	1.36	2.73	14.47	1.82
27	280	187	39	14	20	84	36	120	11.74	28.33	3.27	0.46	0.75	4.71	0.63

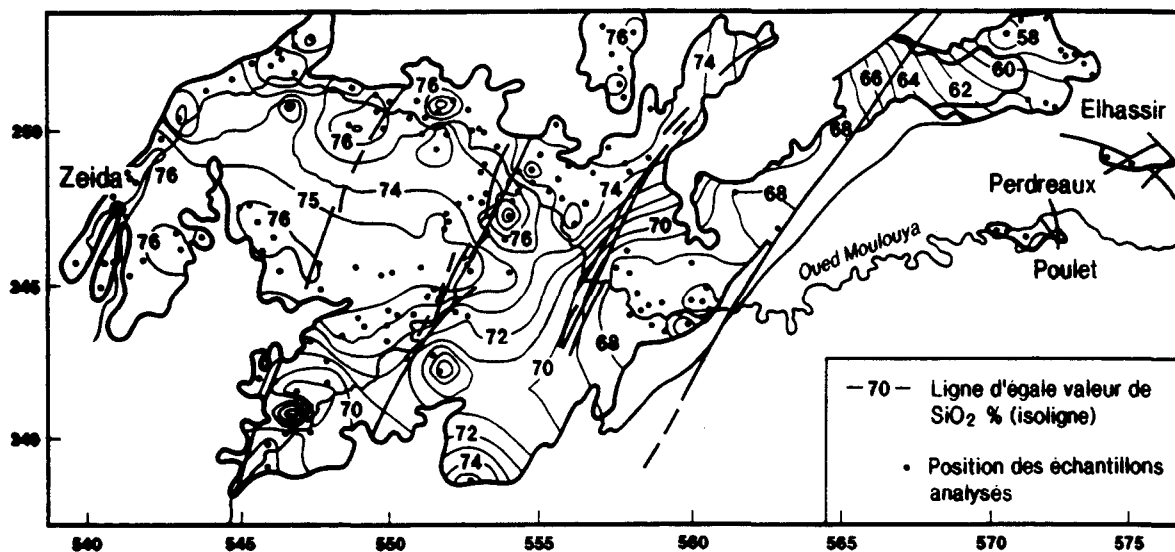


Fig.4: Carte de répartition des valeurs de SiO_2 (%) dans le pluton d'Aouli.

la zonation concentrique, qui se dégage sporadiquement à certains endroits en particulier dans la partie orientale du pluton (Fig.4), correspond vraisemblablement à des variations de SiO_2 , selon des plans subhorizontaux et superposés, plutôt qu'à des variations verticales concentriques. Rappelons que le granite rose, qui renferme les teneurs les plus élevées en SiO_2 , se présente en feuillets subhorizontaux qui parfois s'intercalent au sein, mais généralement reposent sur le granite gris. La variation de SiO_2 est donc, fort probablement, due à cette superposition de feuillets, ce qui donne à l'affleurement des valeurs de SiO_2 variables contrôlées par l'érosion et par la topographie. Ceci est en accord avec l'idée que la mise en place du pluton d'Aouli correspond à un cisaillement plat dans un régime extensif plutôt que compressif d'après Diot et Bouchez (1989). Les deux plutons de la Haute Moulouya, Aouli à l'est et Bou Mia à l'ouest, formeraient un seul massif d'une superficie supérieure à 700 km²; la partie entre les deux étant cachetée par la couverture (Diot et Bouchez, 1989). Cette répartition plus ou moins aléatoire de SiO_2 pourrait aussi suggérer un batholite à émissions multiples, ce qui serait en accord avec les âges de cristallisation obtenus par les datations isotopiques allant de 347 à 319 Ma. (Clauer *et al.*, 1980).

Quatre lignes d'évidence suggèrent que toutes les unités appartiennent à la série ignée calcoalcaline; (i) sur le diagramme classique AFM, de Irvine et Baragar (1971) (Fig.4a), les points représentatifs du pluton d'Aouli se projettent, tous, dans le domaine de la série calcoalcaline; (ii) sur le diagramme de Peacock (1931) (Fig.4b), le point d'intersection des deux meilleures lignes, à travers les deux nuages de points, a une composante en SiO_2 égale à 52 %, ce qui correspond à un domaine calci-alcalique (subalcalin). Ces deux diagrammes ne sont pas présentés ici; (iii) la présence des xénolites et surtout des enclaves basiques suggère que les granites sont de type-I (Didier *et al.*, 1982); et enfin, (iv) en discutant de la classification des granitoïdes varisques du Massif Central Français, Stussi (1989) définit, entre-autres, un groupe de granitoïdes calcoalcalins formant une association pétrographique composée de leucogranites, granites, adamellites, granodiorites, tonalites, diorites, gabbros.

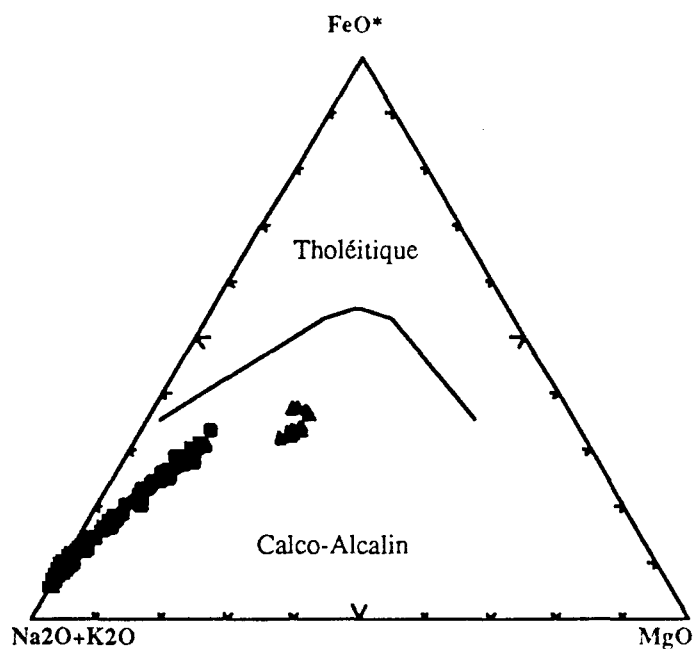


Fig.4a: Distribution des quatres unités du pluton d'Aouli sur le diagramme ternaire AFM tiré de Irving et Baragar, (1971).

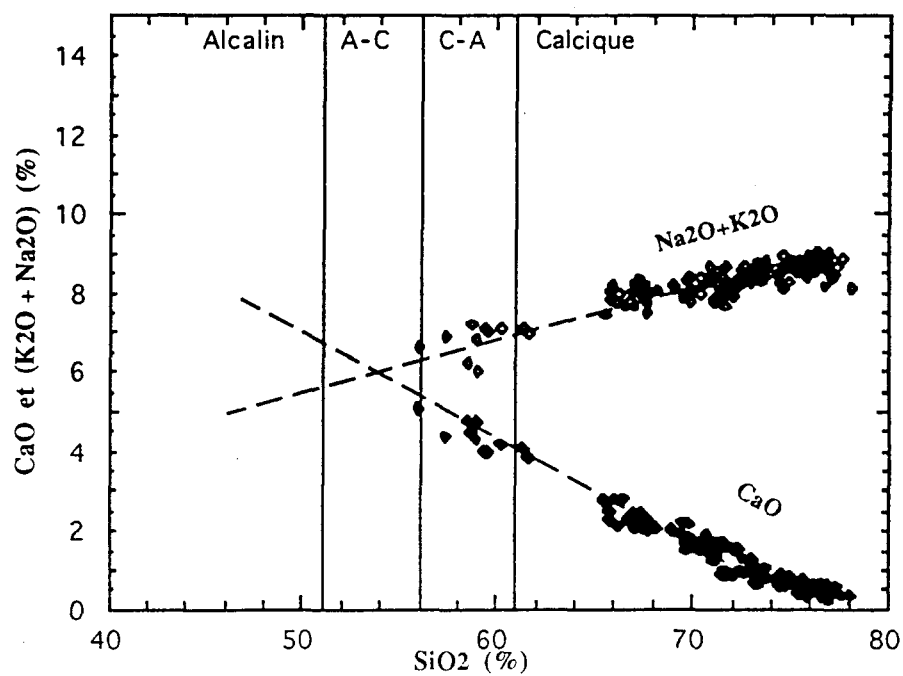


Fig.4b: Diagramme de Peacock, (1931), appliqué au pluton d'Aouli.

Cette association se retrouve en partie dans le pluton d'Aouli, ce qui permet de classer ce dernier dans le groupe des granitoïdes calcoalcalins plutôt que dans les subalcalins ou aluminopotassiques. Les faciès du pluton d'Aouli sont donc, tous, de composition calcoalcaline à tendance subalcaline, et aucun ne présente le caractère purement alcalin, comme cela a été proposé par Emberger (1965) pour une partie du granite rose.

L'indice de péraluminité qui est égal au rapport moléculaire, $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, noté A/CNK, a des valeurs moyennes de: 1.015 ± 0.037 (1 sigma) pour la granodiorite; 1.024 ± 0.029 pour le granite gris; 1.014 ± 0.028 pour le granite rose et 1.244 ± 0.035 pour le granite à muscovite. Compte-tenu des valeurs moyennes, les trois premières unités, de composition calcoalcaline à subalcaline, sont sensiblement identiques et sont métalumineuses; par contre le granite à muscovite, peralumineux, est nettement différent. Sur le graphe A/CNK en fonction de SiO_2 (Fig.5), les points représentatifs du granite gris décrivent une tendance qui est subhorizontale (1), tandis que ceux du granite rose forment une tendance qui diminue lorsque SiO_2 augmente (2). Cawthorne et Brown (1976) ont montré que si la hornblende cristallise au cours d'une différenciation magmatique, la valeur du rapport A/CNK augmente avec la teneur, en SiO_2 , croissante. La cristallisation de la biotite, avec un rapport $\text{K}/\text{Al} = 1$, ne provoque pas cet effet, et par conséquent, le rapport A/CNK reste quasiment stable même lorsque la teneur en SiO_2 augmente. La distribution horizontale des points permet donc d'affirmer que la cristallisation de la hornblende n'a pas joué de rôle notable pendant l'évolution chimique du granite gris.

Les figures (6a, b et c) montrent respectivement que MgO , TiO_2 et Al_2O_3 diminuent lorsque la teneur en SiO_2 augmente. Dans le cas de MgO en fonction de SiO_2 (Fig.6a), les points forment une courbe légèrement concave asymptotique à l'axe des abscisses. Pour TiO_2 , les points représentatifs des échantillons, du granite gris et du granite rose, s'alignent suivant une droite (Fig.6b); les points du granite à muscovite ne

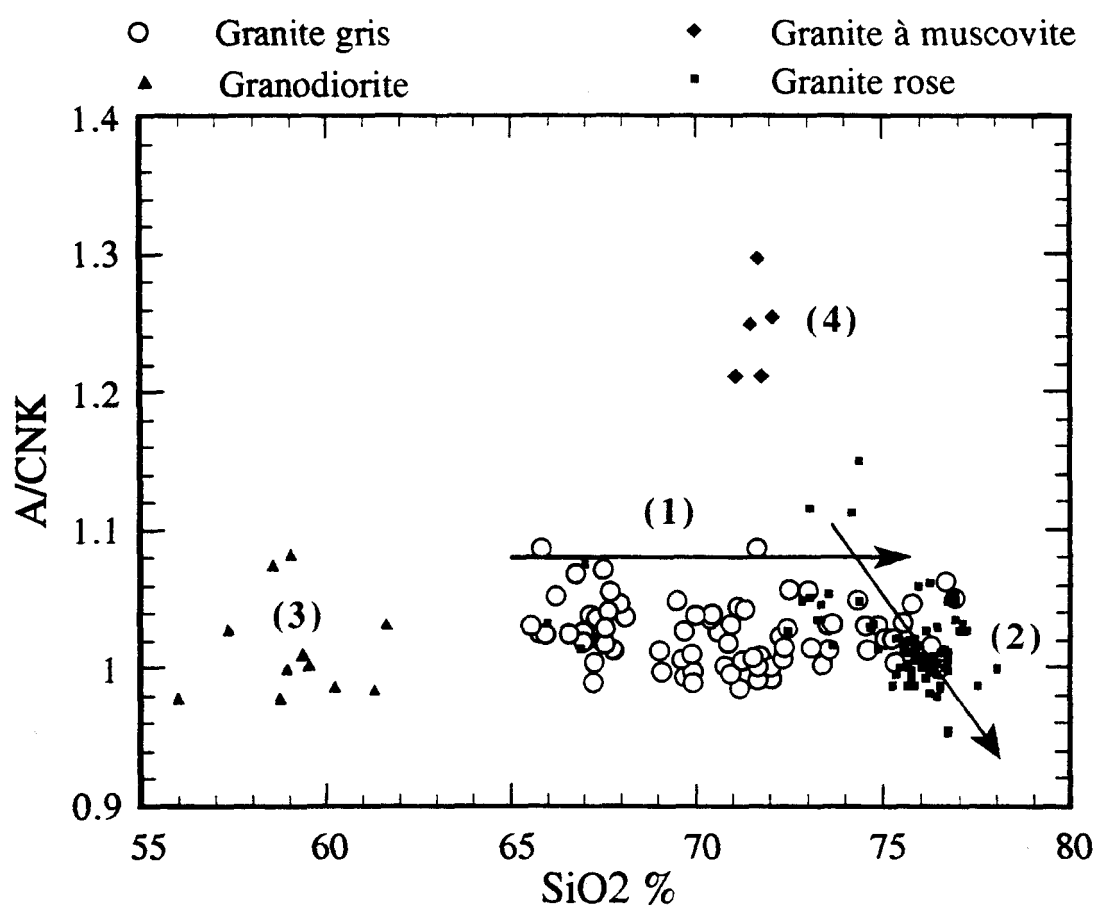


Fig.5: Représentation graphique, de l'indice de péraluminité (A/CNK) en fonction de SiO₂, des granitoïdes du pluton d'Aouli.

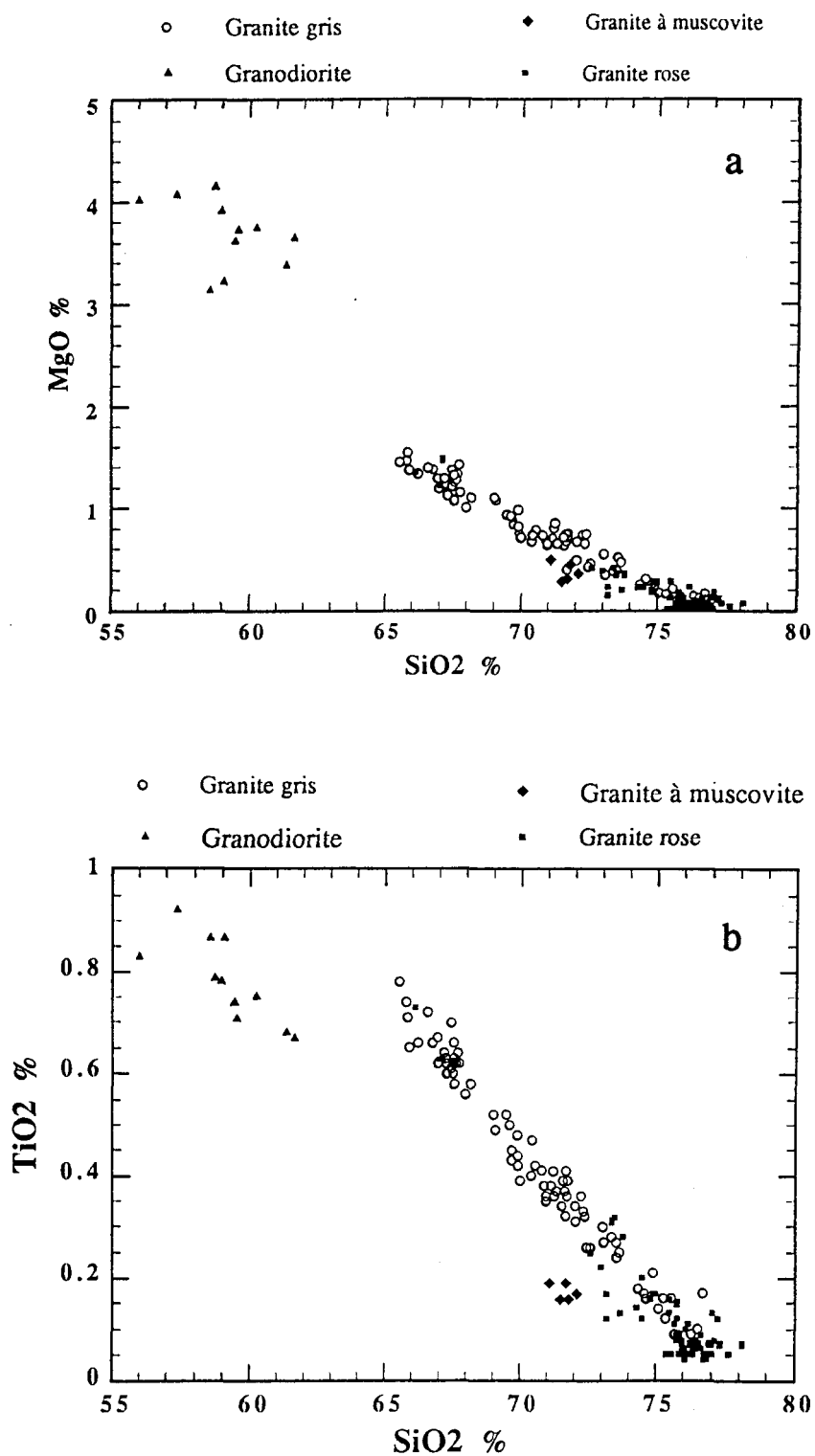


Fig.6: Evolution des faciès du pluton d'Aouli dans les diagrammes de Harker, (a) MgO en fonction de SiO₂, (b) TiO₂ en fonction de SiO₂.

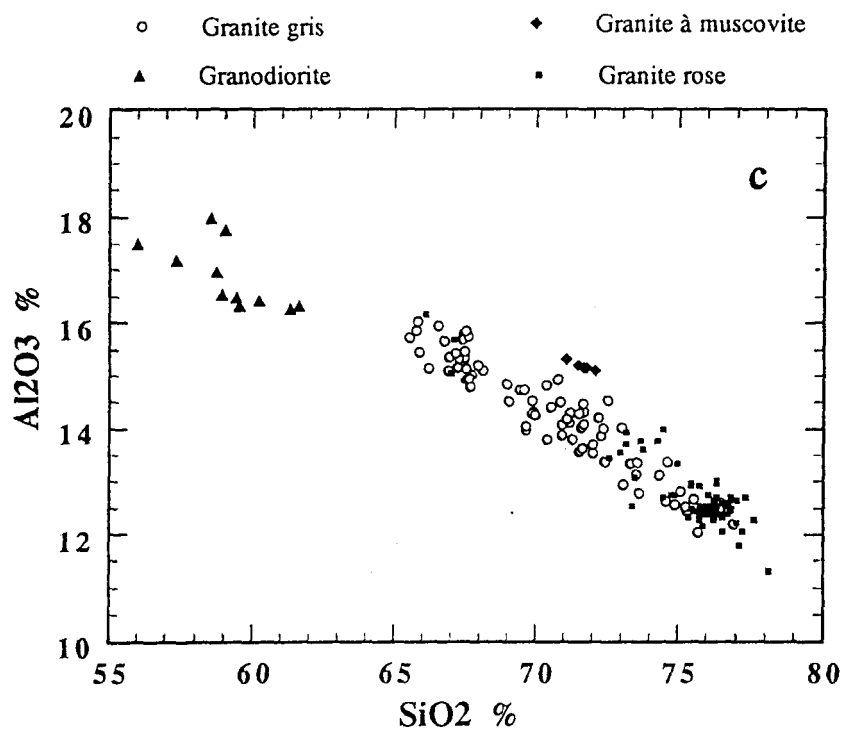


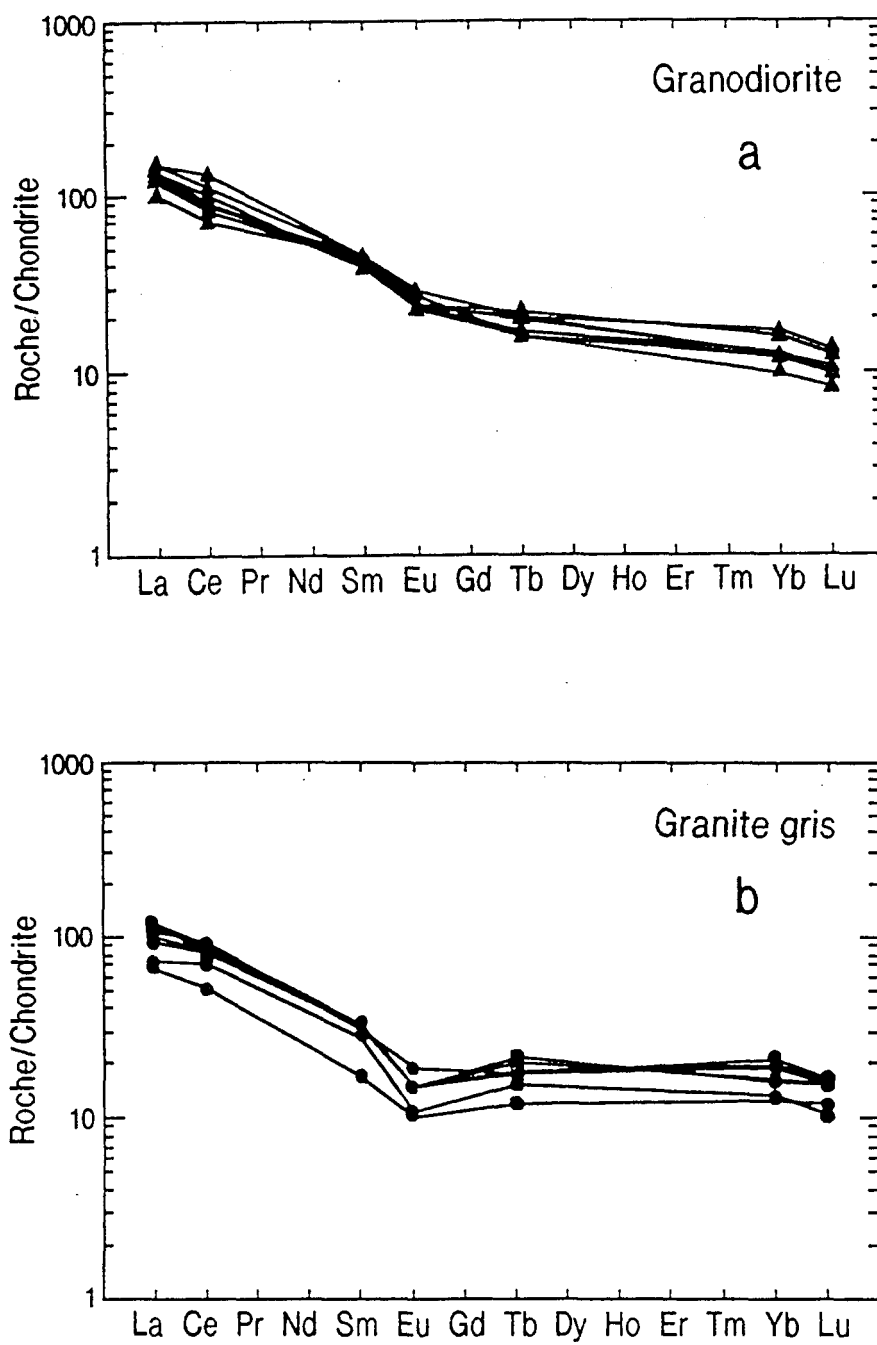
Fig.6c: Evolution des faciès du pluton d'Aouli dans les diagrammes de Harker, Al_2O_3 en fonction de SiO_2 .

tombent pas sur cette tendance, et ceux de la granodiorite définissent une tendance différente mais parallèle. Enfin, dans le cas de Al_2O_3 (Fig.6c), les points forment une courbe légèrement convexe.

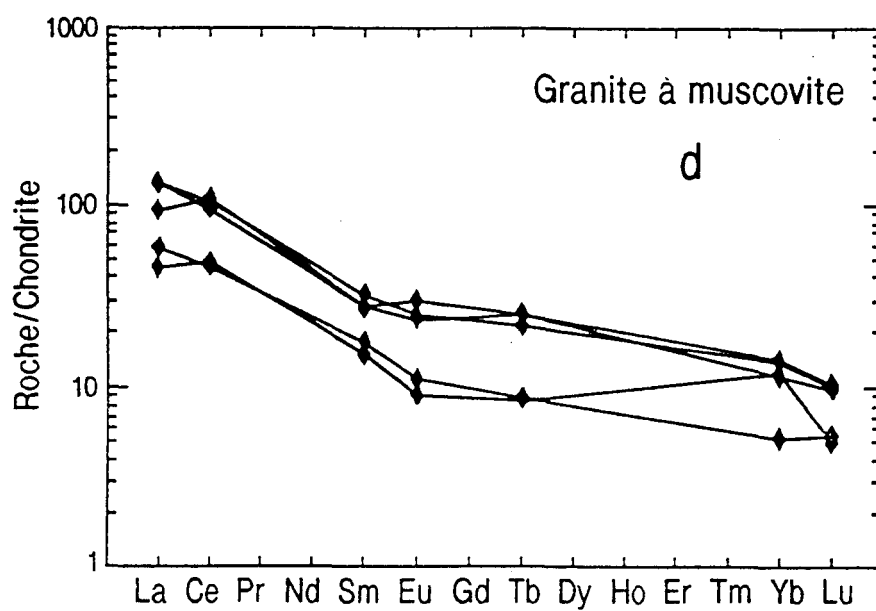
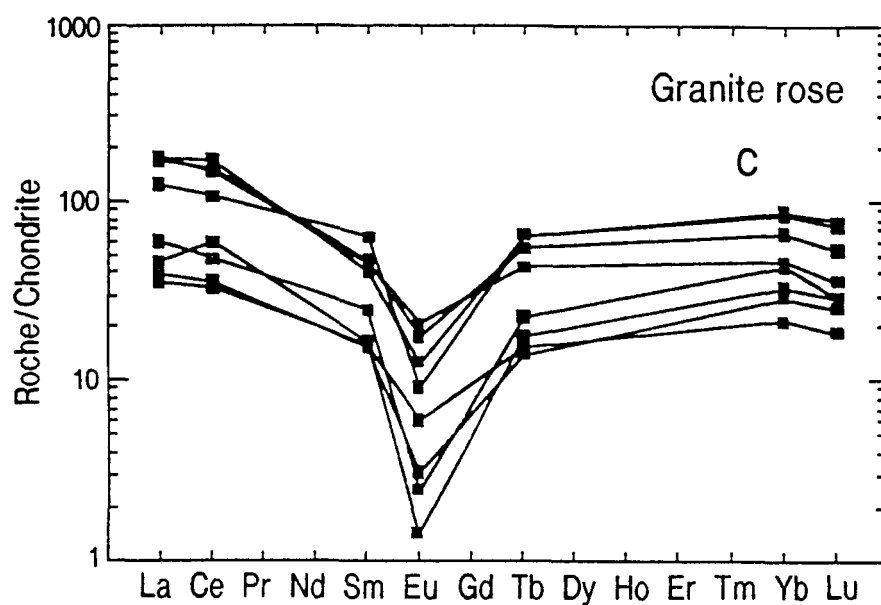
L'allure des spectres des terres rares (Figs.7a à 7d) est en accord avec les nuances pétrographiques de sorte que les échantillons, de chacune de ces unités, dessinent des spectres qui la caractérisent. Les échantillons de granodiorite (Fig.7a) montrent une composition, 100 à 160 fois plus élevée que dans la chondrite, en terres rares légères, et seulement de 8 à 12 fois en terres rares lourdes. La pente La/Lu, La et Lu étant normalisés aux chondrites, est égale à 12. Pour le granite gris (Fig.7b), les spectres présentent une légère anomalie négative en Eu. Sa composition en terres rares légères est de 60 à 110 fois supérieure aux chondrites, et celle en terres rares lourdes est seulement de 10 à 30 fois plus. La pente La/Lu = 7. Dans le cas du granite rose (Fig.7c), l'anomalie négative en Eu est relativement forte. Les terres rares légères sont de 40 à 180 fois chondrite et les terres rares lourdes sont de 20 à 80 fois. La pente La/Lu = 2. Pour le granite à muscovite (Fig.7d), les spectres ne montrent aucune anomalie en Eu. Les valeurs, des terres rares légères, varient de 50 à 150 fois chondrites, et celles des terres rares lourdes varient de 5 à 10 fois. La pente La/Lu est égale à 10.

La variation, du rapport La/Yb en fonction de SiO_2 (Fig.8), montre que ce rapport diminue progressivement en fonction des valeurs croissantes de SiO_2 . Ce phénomène peut être dû à la cristallisation d'un minéral, l'allanite, par exemple, qui incorpore les terres rares légères dans sa structure de manière préférentielle (Eby, 1990). La teneur élevée en terres rares lourdes dans le granite rose pourrait être engendrée par la présence d'un fluide au moment de la cristallisation, présence dont témoignent les pochettes de pegmatites.

Le graphe, Eu/Eu^* en fonction de SiO_2 (Fig.9), montre qu'à l'exception des échantillons du granite à muscovite, les autres unités forment une seule tendance qui diminue graduellement quand SiO_2 augmente.



Figs.7 a et b: Spectres des terres rares normalisées aux chondrites calculées par Sun, (1982); (a) dans la granodiorite, (b): dans le granite gris.



Figs.7 c et d: Spectres des terres rares normalisées aux chondrites calculées par Sun, (1982); (c) dans le granite rose et (d) dans le granite à muscovite.

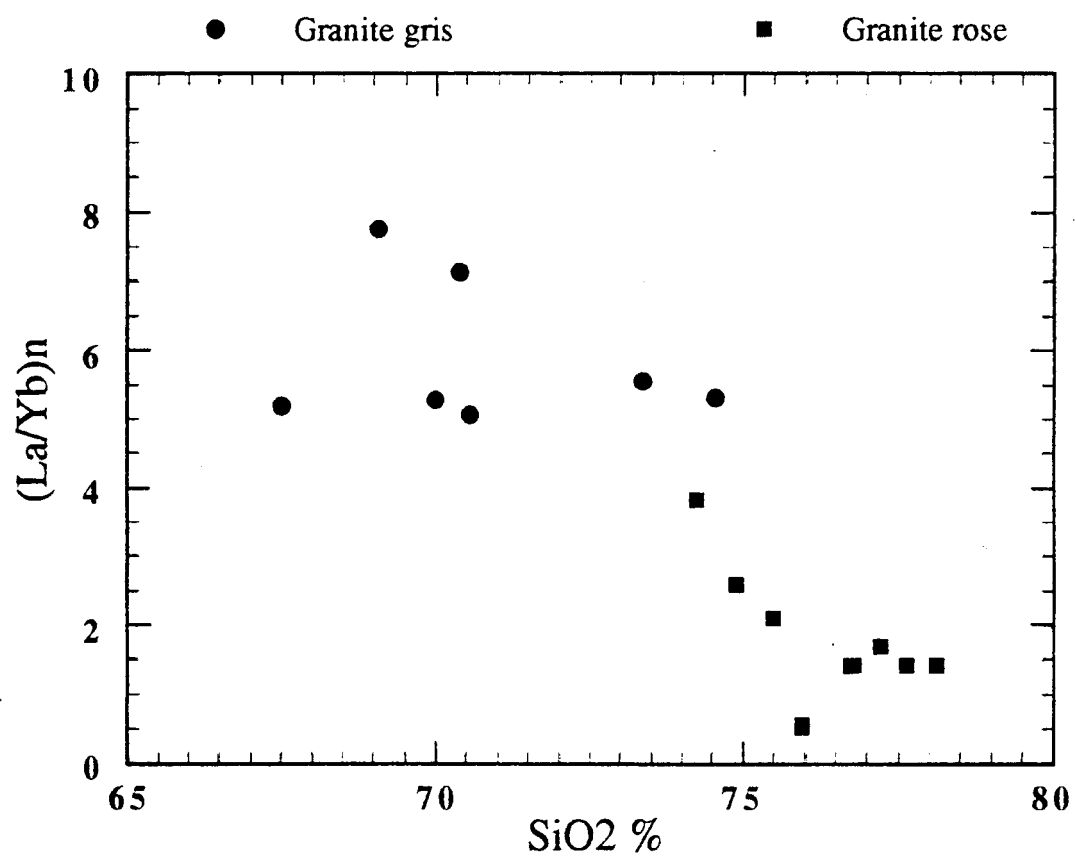


Fig.8: Graphe de variations du rapport, La/Yb, en fonction de SiO₂

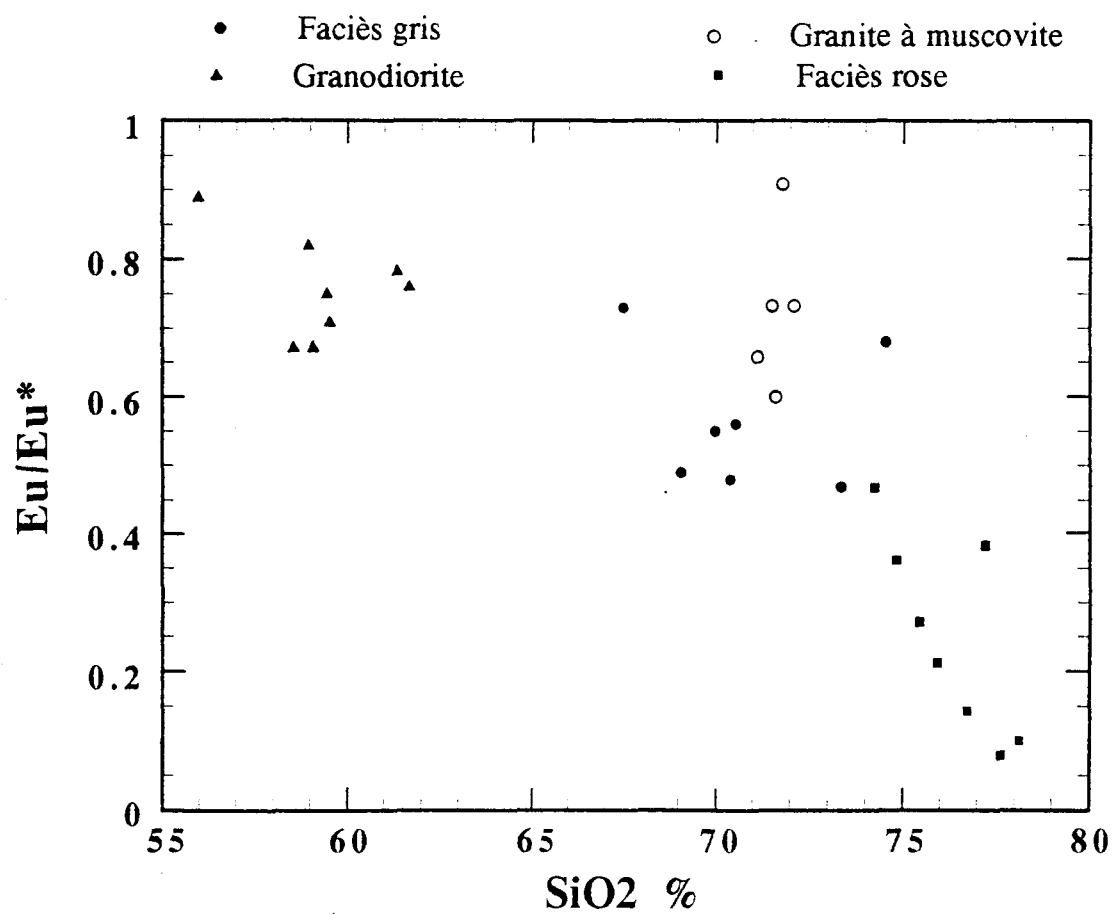


Fig.9: Représentation graphique du rapport, Eu/Eu^* , en fonction de SiO_2 .

Cette diminution du rapport Eu/Eu^* en fonction de SiO_2 croissant, en passant du granite gris au rose, témoigne d'une diminution du rapport $\text{Eu}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$, par conséquent, il y a passage d'un milieu oxydant à un milieu réducteur au cours de l'évolution progressive du magma.

Le graphe, Eu en fonction de Sr (Fig.10), montre que les granites gris et rose présentent une corrélation positive entre Eu et Sr. Cependant, la pente moyenne de la droite (1), formée par les points représentatifs du granite rose, est plus forte que celle formée par les points du granite gris (2). Cette observation soutient l'hypothèse proposée ci-dessus, c'est à dire que la fugacité de l'oxygène n'était pas la même lors de la cristallisation du granite gris et du granite rose. Sur un diagramme, Eu (total) en fonction de Sr, une proportion élevée de l'euprium sous forme Eu^{2+} , engendrera une ligne à pente plus forte que si la majeure partie de cet euprium est sous forme de Eu^{3+} .

DISCUSSION

Mécanismes des variations chimiques

Mac Caskie (1984), discutant de l'identification des processus pétrogénétiques à l'origine des roches ignées, propose que des modèles d'évolution des systèmes magmatiques (cristallisation fractionnée, fusion partielle, mélange magmatique etc...) engendrent des courbes de données de forme géométrique qui se distinguent sur des diagrammes, Rapport / Rapport, de forme $X/Y = f(X/V)$ où X, Y et V sont des rapports d'éléments en traces. Ces rapports impliquent trois éléments en traces dont un compatible et deux incompatibles.

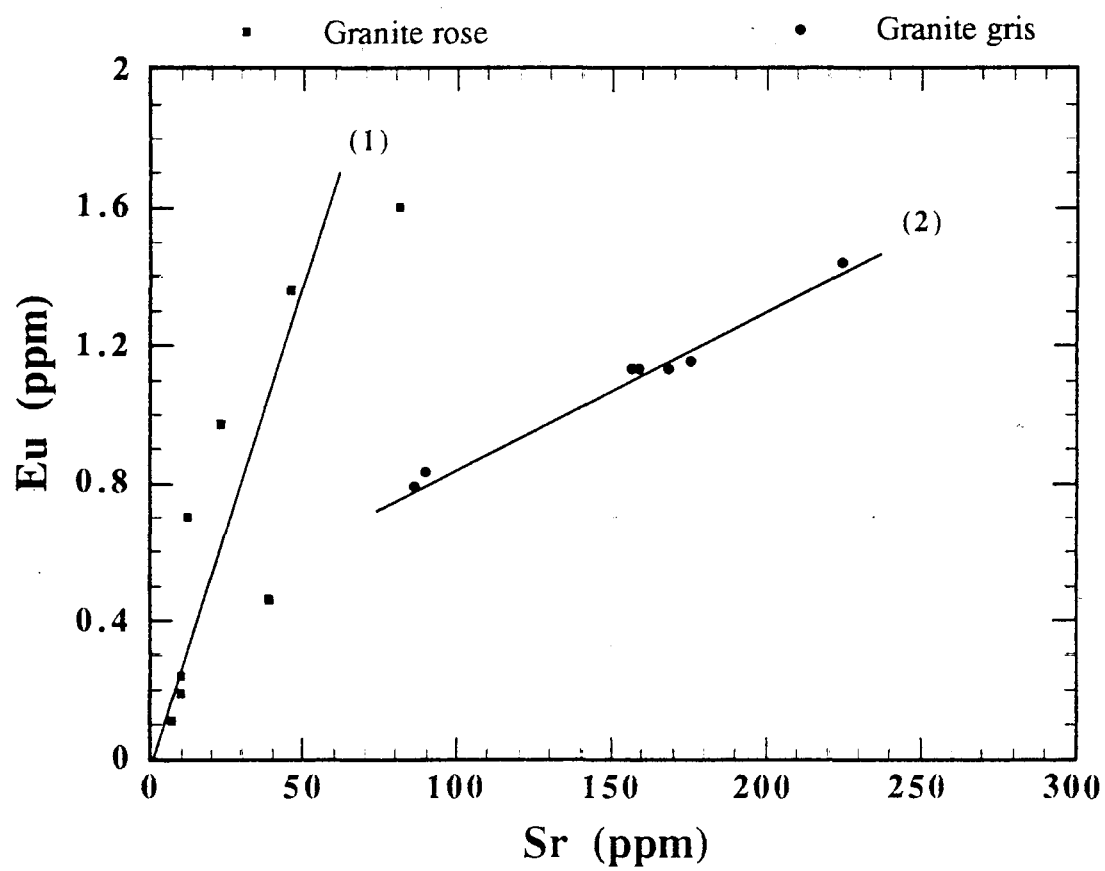


Fig.10: Représentation graphique des variations de Eu en fonction de Sr dans les granites gris et rose du pluton d'Aouli.

Pour appliquer cette méthode au pluton d'Aouli, une série de graphes de variations, des éléments en traces en fonction de SiO_2 , ont été préalablement produits dans le but de trier les éléments compatibles des incompatibles (Figs. 11a à 11c). Ainsi, le rubidium (Rb) et le niobium (Nb) ont été retenus comme éléments incompatibles, et le barium (Ba) comme élément compatible. Il apparaît clairement sur la figure 11a, Ba en fonction de SiO_2 , que les onze points représentatifs de la granodiorite ($\text{SiO}_2 < 62\%$ sur le graphe) dessinent une tendance très différente de celles du granite gris et du granite rose, ce qui suggère que la granodiorite, d'une part, et les granites gris et rose, d'autre part, ne sont pas pétrogénétiquement liés, et sont considérés comme deux entités différentes. Dans ce qui suit, nous abordons indépendamment le problème du processus évolutif de chacun de ces deux groupes en leur appliquant le graphe des variations B/B_0 en fonction de A/A_0 (Mc Caskie 1984), où $A = \text{Ba/Rb}$ et $A_0 = \text{Ba}_0/\text{Rb}_0$; $B = \text{Ba/Nb}$ et $B_0 = \text{Ba}_0/\text{Nb}_0$. Les valeurs, Ba_0 , Rb_0 et Nb_0 , correspondent respectivement aux valeurs analytiques de ces éléments dans le magma initial, exprimées en ppm. Dans ce cas, la roche la moins évoluée est considérée comme étant le magma initial.

Pour les granites gris et rose: $\text{Ba}_0 = 750$ ppm, $\text{Rb}_0 = 150$ ppm et $\text{Nb}_0 = 15$ ppm et par conséquent $A_0 = 6.3$ et $B_0 = 63.3$

Pour la granodiorite: $\text{Ba}_0 = 957$ ppm, $\text{Rb}_0 = 157$ ppm et $\text{Nb}_0 = 14$ ppm, donc $A_0 = 6.09$ et $B_0 = 68.4$

La figure 12a montre que les points représentatifs, du granite gris et du granite rose forment une courbe exponentielle qui passe par l'origine des coordonnées; la forme de la courbe évoque donc un processus évolutif du magma par cristallisation fractionnée et/ou fusion partielle fractionnée, pour le granite gris et le granite rose. Pour la granodiorite (Fig.12b), la forme de la courbe est plutôt une droite qui passe par l'origine des coordonnées, elle est difficile à interpréter. Toutefois, elle pourrait évoquer une cristallisation fractionnée et/ou une fusion partielle puisque elle passe par l'origine des coordonnées, car les hyperboles ne passent pas par cette origine dans le diagramme de Mac Caskie.

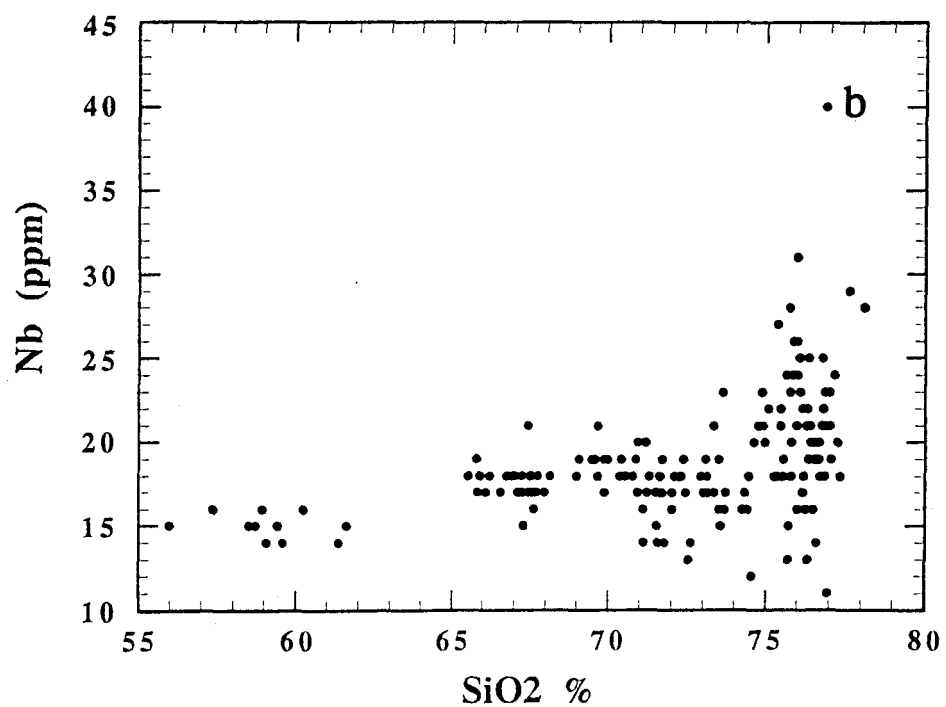
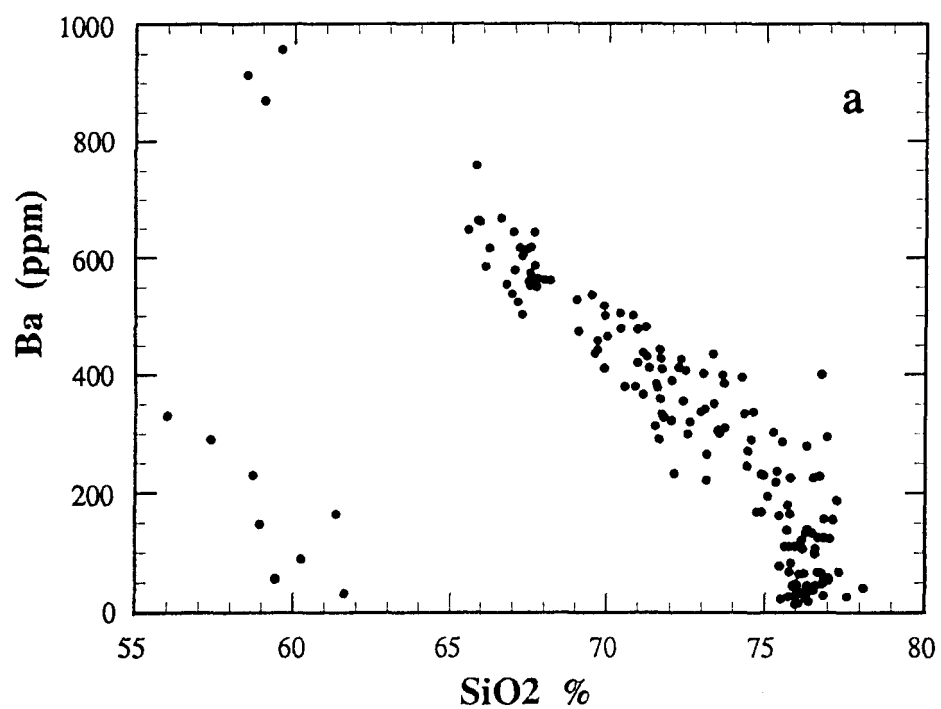


Fig.11: Représentations graphiques de (a) Ba en fonction de SiO₂, (b) Nb en fonction de SiO₂.

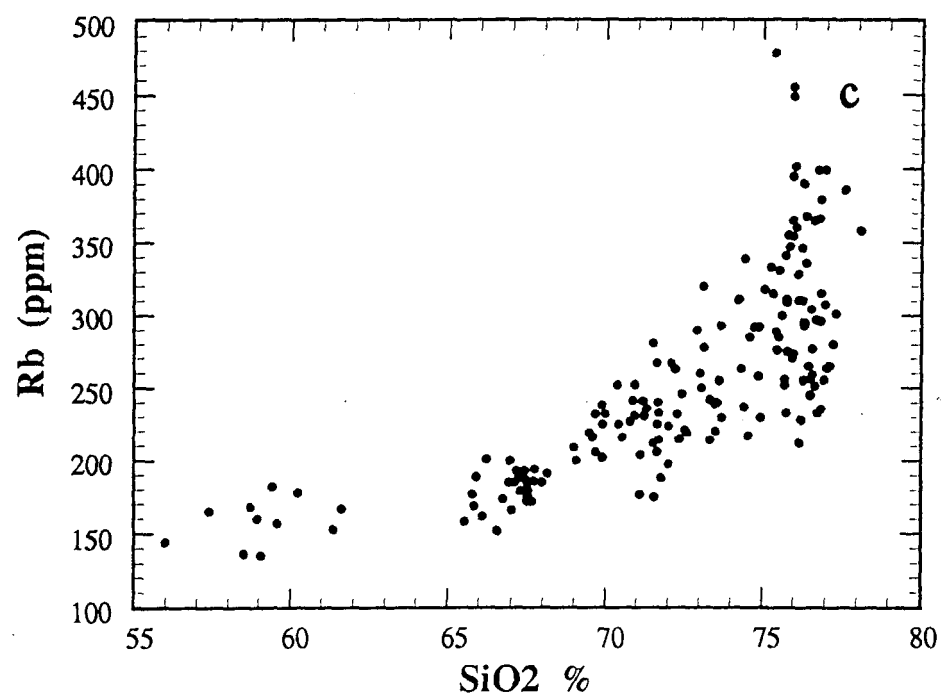


Fig.11c: Représentation graphique de Rb en fonction de SiO₂.

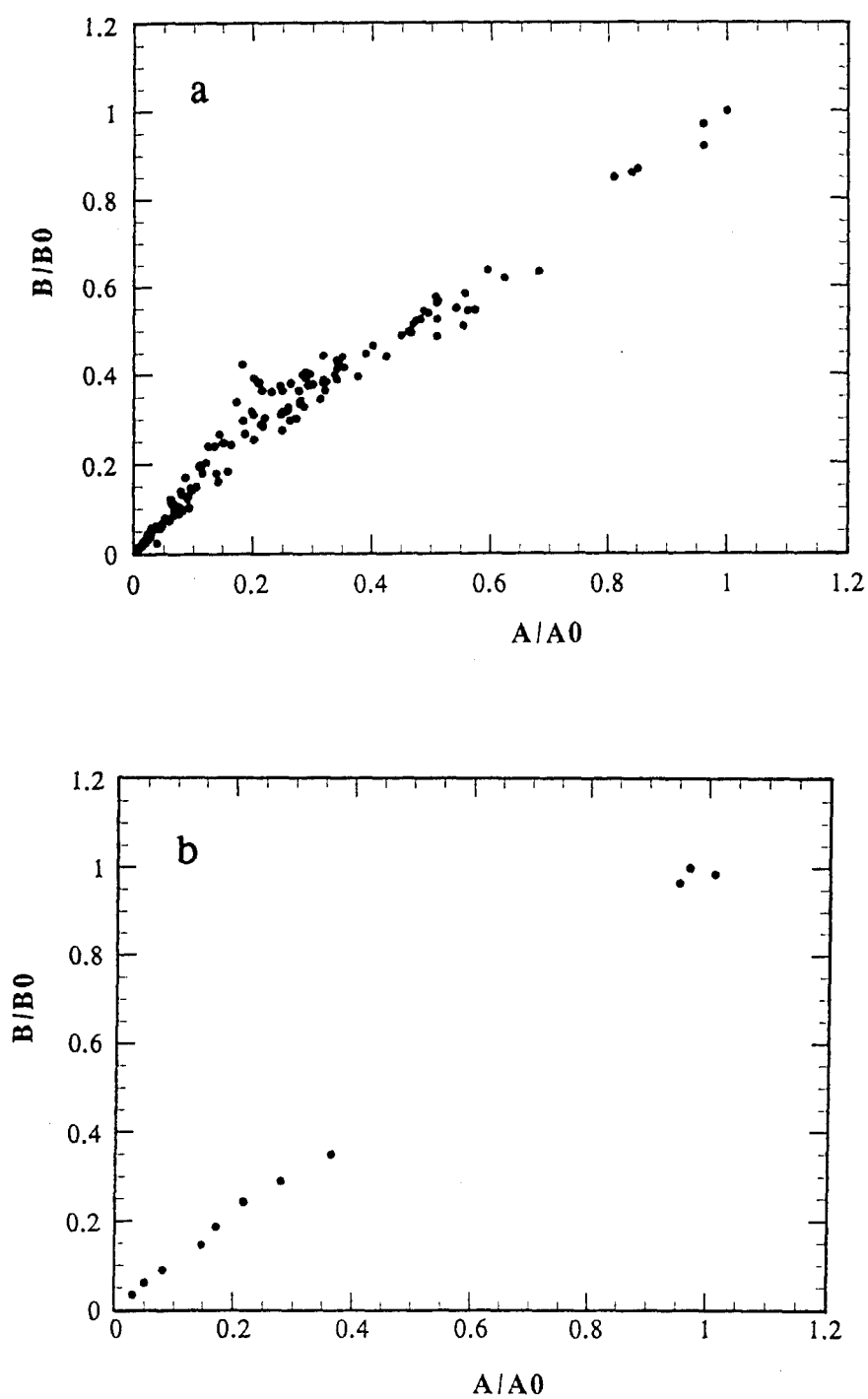


Fig.12: Diagramme B/B_0 en fonction de A/A_0 , Mac Casckie (1984), appliqué aux granitoïdes d'Aouli, (a): granites gris et rose, (b): granodiorite.

Des diagrammes présentés ci-dessus, tels que Rb-SiO₂ (Fig.11c) et MgO-SiO₂ (Fig.6a), montrent des points dont la distribution définit une courbe. Cette observation suggère que, ni le mélange entre deux magmas, ni l'assimilation des roches encaissantes, ne soient les mécanismes les plus importants, pour expliquer la variabilité des compositions observées. Quelque soit la méthode utilisée, les données géochimiques suggèrent que la cristallisation fractionnée et/ou la fusion partielle sont les processus prépondérants responsables du mécanisme de l'évolution chimique du magma source des unités d'Aouli.

Contexte géodynamique

Au cours de ces dix dernières années, plusieurs travaux ont été effectués, à l'échelle mondiale, dans le but d'établir une liaison directe entre la composition chimique des ensembles plutoniques et le contexte géodynamique de leur mise en place. Ainsi, et dans ce sens, certains auteurs ont utilisé la composition de la roche en éléments en traces (Pearce *et al.*, 1984), d'autres ont essayé la composition en éléments majeurs (Batchelor et Bowden, 1985; Maniar et Piccoli, 1989) et d'autres se sont servi des valeurs moyennes des données des éléments majeurs et en traces tous ensemble (Rogers et Greenberg, 1990). Il existe parfois des contradictions entre les résultats obtenus par les différents auteurs. Ces résultats devraient donc être manipulés avec prudence et il faut surtout les confronter aux données de terrain préalablement connues.

Dans le but de déterminer l'environnement tectonique de mise en place du pluton d'Aouli, à partir de l'étude géochimique, plusieurs méthodes ont été utilisées.

Sur le diagramme, Nb en fonction de Y, de Pearce *et al.* (1984), (Fig.12c) tous les points, représentatifs des données analytiques des quatre unités, se projettent sur le point triple entre les différents domaines tectoniques. D'autres diagrammes, de ces auteurs ont été essayés, mais pour des raisons non évidentes, aucun de ces diagrammes n'a permis de "discriminer" entre les différents faciès d'Aouli, sans pour autant être capable de leur attribuer une origine quelconque ou de déterminer le contexte géologique de leur mise en place.

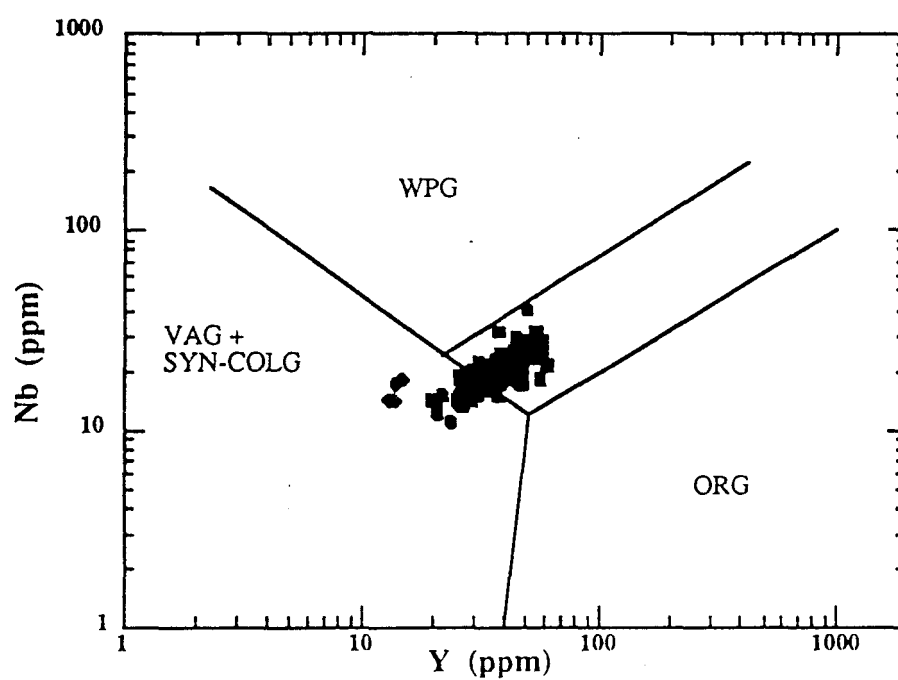


Fig.12c: Représentation graphique des variations Nb en fonction de Y tiré de Pearce et al. (1984), appliqué au pluton d'Aouli.

Le graphe de variations, $\text{FeO}^* / (\text{FeO}^* + \text{MgO})$ en fonction de SiO_2 , qui est l'un des diagrammes discriminants de Maniar et Piccoli (1989), (Fig.13), montre que les trois échantillons de granodiorite, contenant plus de 60 % de SiO_2 , sont nettement situés dans le domaine (IAG+CAG+CCG) et ceux du granite à muscovite sont dans le domaine des POG. Cependant, la tendance, définie par le granite gris et le granite rose, montre une suite qui prend son origine dans le domaine (IAG+CAG+CCG), mais la majorité des points (75%) sont dans le domaine des POG, de part et d'autre de la limite (RRG+CEUG) - (IAG+CAG+CCG).

Le diagramme, R_1 - R_2 , de Batchelor et Bowden (1985) (Fig.14), a été appliqué au pluton d'Aouli. Ces deux co-auteurs ont repris le diagramme multiplicationnel, R_1 - R_2 (de La Roche *et al.*, 1980), et y ont défini six domaines tectoniques de mise en place des granitoïdes. Les points représentatifs des granites gris et rose suivent une tendance qui passe en plein domaine correspondant au contexte de la mise en place tardi-orogénique. La granodiorite et le granite à muscovite ne définissent pas de tendance claire sur ce diagramme.

Finalement, à cause de la nature subalcaline de quelques échantillons, le diagramme de Eby (1992), qui permet la discrimination entre les granites alcalins, a été appliqué au pluton d'Aouli (Fig.15). Les points représentatifs du granite gris et du granite rose se projettent dans le domaine A1, défini par Eby comme étant le domaine des magmas qui se forment soit par fusion d'une croûte sous-plaquée ayant déjà connu une période de collision continent-continent, soit provenant d'un magmatisme d'île en arc.

L'étude géochimique du pluton d'Aouli suggère donc une mise en place tardi- à post-orogénique, en particulier pour le granite gris et le granite rose et pour le granite à muscovite. Ceci est en accord avec les observations de terrain. Ces granites intrudent des schistes encaissants préalablement déformés, auxquels ils surimposent une auréole de contact, et de surcroît, ils renferment des enclaves de gneiss folié. Ces granitoïdes se sont formés lors de la dernière phase d'un orogène, généralement après la déformation. Ils représentent un stade de transition correspondant à la stabilisation de la croûte qui suit un orogène.

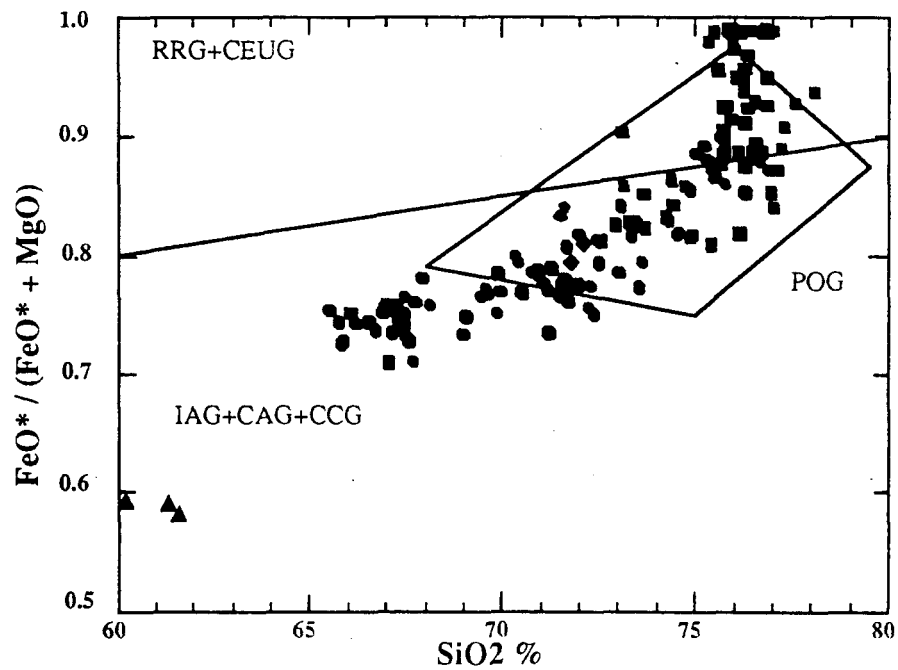


Fig.13: Graphe de $\text{FeO}^*/\text{FeO}^*+\text{MgO}$ en fonction de SiO_2 , tiré de Maniar et Piccoli (1989), appliqué au pluton d'Aouli. IAG = Granitoïdes d'Arcs Insulaires; CAG = Granitoïdes d'Arcs Continentaux; CCG = Granitoïdes de Collision Continentale; POG = Granitoïdes Post-Orogéniques; RRG = Granitoïdes de zone de Rift; CEUG = Granitoïdes de zone de soulèvement continental.

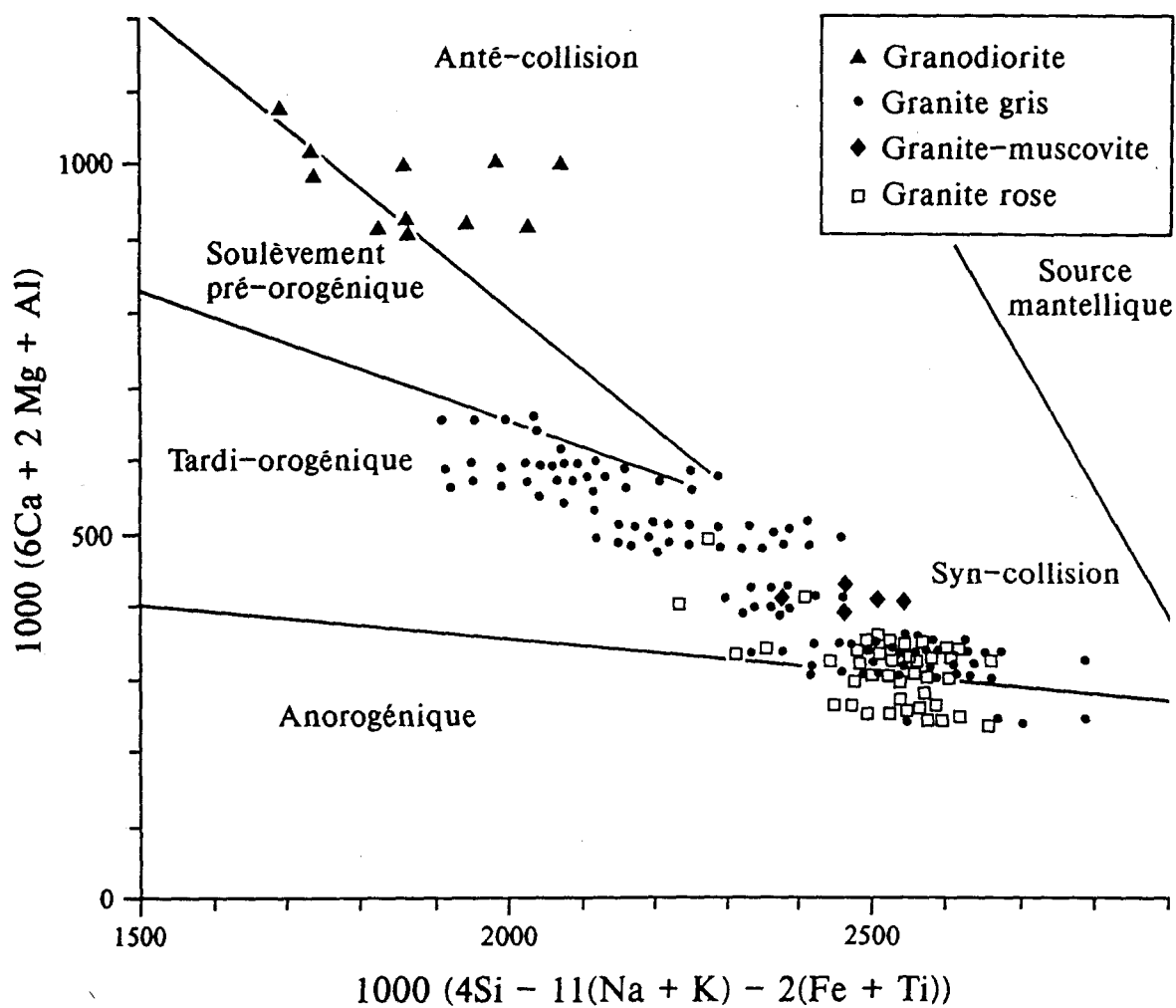


Fig.14: Diagramme R_1-R_2 , Batchelor et Bowden, (1985) où $R_1=4\text{Si}-11(\text{Na}+\text{K})-2(\text{Fe}+\text{Ti})$ et $R_2=6\text{Ca}+2\text{Mg}+\text{Al}$, appliqué au pluton d'Aouli.

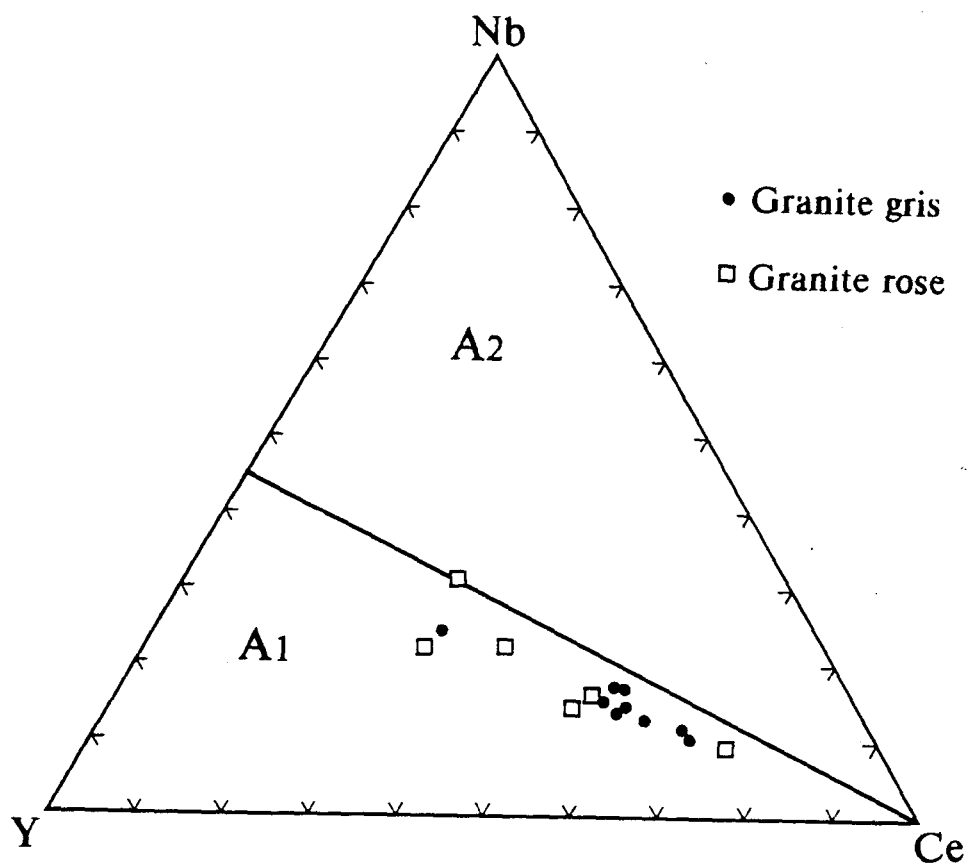


Fig.15: Diagramme discriminant pour les roches alcalines (de Eby, 1992).
 A1 = domaines des roches alcalines associées à des zones de collision continentale; A2 = domaine des roches alcalines associées aux rifts.

CONCLUSIONS

L'étude des terres rares et des éléments en traces permet de distinguer trois entités dans le complexe plutonique d'Aouli: (a) la granodiorite, qui affleure dans la partie est du complexe, à Elhassir; (b) le granite gris et le granite rose. Ces deux granites forment une seule entité, le granite rose ayant évolué à partir du magma du granite gris, fort probablement par cristallisation fractionnée. Ces deux premières entités forment un seul massif; et enfin, (c) le granite à muscovite qui affleure, dans deux pointements isolés, au sein des schistes encaissants. Ces trois entités sont distinctes du point de vue pétrogénétique. Mais, les datations radiométriques disponibles ne permettent pas d'établir une chronologie définitive entre elles, ce qui nécessitera des datations plus précises.

La composition chimique du complexe, telle que déterminée par l'étude des éléments majeurs, est de nature calcoalcaline à tendance subalcaline, mais jamais alcaline. La granodiorite, le granite gris et le granite rose sont métalumineux, tandis que le granite à muscovite est péralumineux.

Les mécanismes de différenciation magmatique des trois entités, tels qu'appréhendés par l'étude des éléments en traces, se résument essentiellement à la cristallisation fractionnée et/ou la fusion partielle fractionnée et n'évoquent jamais un mélange magmatique. Le contexte géodynamique de mise en place du complexe plutonique d'Aouli, correspond à celui des granites tardi- à post- orogéniques. La mise en place de ces granites mettrait donc fin à l'orogénèse hercynienne dans la zone orientale de la chaîne hercynienne du Maroc.

BIBLIOGRAPHIE

- Allary, A. Lavenu, A. et Ribeyrolles, M. 1976. La chaîne hercynienne du Maroc central Sud-Est. *Notes et Mémoires du service géologique du Maroc, Rabat*. **261**, 170p.
- Ashworth, J.R. 1973. Myrmekites of exsolution and replacement origins - a reply. *Geological Magazine*. **110**, 77-80.
- Batchelor, R.A. & Bowden, P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology*. **48**, 43-55.
- Bouabdelli, M. 1982. Stratigraphie et évolution structurale du Paléozoïque d'Azrou (NE du Maroc central): *thèse 3^{ème} cycle, Université Louis Pasteur, Strasbourg*. 164p.
- Cawthorn, R.G. and Brown, P.A. 1976. A model for the formation and crystallization of corundum-normative calc-alkaline magmas through amphibole fractionation. *Journal of Geology*. **84**, 467-476.
- Clauer, N.; Jeannette, D. et Tisserant, D. 1980. Datations isotopiques des cristallisations successives d'un socle cristallin et cristallophyllien (Haute-Moulouya, Moyen Maroc). *Geol.Rundsch.Stuttgart*. **5**, 83-399
- Didier, J. Duthou J.L. and Lameyre, J. 1982. Mantle and crustal granites : Genetic classification of orogenic granites and the nature of their enclaves. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. **14**, 125-132.
- Diot, H. et Bouchez J.L. 1989. Les granitoides hercyniens de la Haute-Moulouya (Maroc): leur structure primaire déduite de l'ASM. Indications sur leur mise en place. *Bull. Soc.géol. France*. (8), t. V, **4**, 705-716.
- Eby, G.N. 1990. The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*. **26**, 115-134.
- Eby, G.N. 1992. Chemical subdivision of A-type granitoids: petrogenetic and tectonique implications. *Geology* **20**, 641-644.

- Emberger, A. 1965. Introduction à l'étude des minéralisations plombifères de la Haute-Moulouya. *Notes et Mémoires du Service Géologique (Rabat)*. **181**, 167-180, 1 carte H.t.
- Hoepffner, Ch. 1987. La tectonique hercynienne dans l'Est du Maroc. *Thèse de doctorat ès-Sciences, Université Louis Pasteur, Strasbourg*.
- Hopson, R.F. and Ramseyer, K. 1990. Cathodoluminescence study of myrmekite. *Geology*. **18**, 336-339.
- Hubbard, F.H. 1969. The proportionality of quartz in myrmekite: a contribution to the discussion. *American Mineralogist*. **54**, 988-989.
- Huvelin, P. 1969a. Mouvements hercyniens précoces et structure du Jebel Hadid près de Khénifra (Maroc). *C.R. Acad. Sci. Paris*. **269 D**, 2305-2308.
- Huvelin, P. 1969b. Mouvements hercyniens précoces dans la région de Mrirt (Maroc). *C.R. Acad. Sci. Paris*. **271D**, 953-955
- Huvelin, P. 1973. Déformations hercyniennes précoces dans la région comprise entre Azrou, Aguélmous et Khénifra (Massif hercynien central). *Notes et mémoires du service géologique du Maroc, Rabat*. **34, 254**, 93-107.
- Huvelin, P. 1977. Etude géologique et gîtologique du Massif hercynien des Jebilet (Maroc occidental). *Notes et mémoires du service géologique du Maroc, Rabat*. **232**.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*. **8**, 523-548.
- Jenny, J. et Le Marrec, A. 1980. Mise en évidence d'une nappe à la limite méridionale du domaine hercynien dans la boutonnière d'Aït-Tamlil (Haut-Atlas Central, Maroc). *Eclogae geologiae helvetiae*. **73**, 681-696.
- La Roche, H. de, Leterrier, J., Grandclaude, P. and Marchal, M. 1980. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagram and major element analysis - its relationships with current nomenclature. *Chemical Geology* **29**, 183-210.
- Mac Caskie, D.R. 1984. Identification of petrogenetic processes using covariance plots of trace-element data. *Chemical Geology*. **42**, 325-341.

- Maniar, P.D. and Piccoli, P.M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*. **101**, 635-643.
- Michard, A.; Yazidi, A.; Benziane, F.; Hollard, H. et Willefert, S. 1982. Foreland thrusts and olistostromes on the pre-Saharan margin of the Variscan orogen, Morocco. *Geology*. **10**, 253-256
- Oukemeni, D. 1987. Les nappes hercyniennes des Jebilet Orientales et leur substratum carbonifère. *Thèse 3^{ème} cycle, Uni. Aix-Marseille III*, 125 p. 4 planches H.T.
- Peacock, M.A. 1931. Classification of igneous rock series. *Journal of Geology*. **39**, 54-67.
- Pearce, J.A. Harris, N.B.W. and Tindle, A.G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*. **25**, 956-983.
- Phillips, E.R. 1973. Myrmekites of exsolution and replacement origins - a discussion. *Geological Magazine*. **110**, 74-77.
- Phillips. E.R. 1974. Myrmekite - one hundred years later. *Lithos*. **7**, 181-194.
- Phillips, E.R. 1980. On polygenetic myrmekite. *Geological Magazine*. **117**, 29-36.
- Phillips, E.R. and Ransom, D.M. 1968. The proportionality of quartz in myrmekite. *American Mineralogist*. **53**, 1411- 1413.
- Piqué, A. 1983. Structural domains of the hercynian belt in Morocco. In : *Reginal trends in the geology of the Appalichian - Caledonian - Hercynian - Mauritanide orogen* (Edited by Schenk, P). *Dordrecht, Reidel*. 339-345.
- Piqué A. et Michard A. 1989. Moroccan Hercynides: A synopsis. The paleozoic sedimentary and tectonic evolution at the northern margin of west Africa. *American Journal of Science*, **289**, 286-330.
- Ransom, D.R. and Phillips, E.R. 1969. The proportionality of quartz in myrmekite: a reply. *American Mineralogist*, **54**: 984-987.
- Rogers, J.J.W. and Greenberg, J.K. 1990. Late-orogenic, post-orogenic and anorogenic granites: distinction by major-element and trace-element chemistry and possible origins. *Journal of Geology*. **98**, 291-309.

- Speer, J.A. 1987. Evolution of magmatic AFM mineral assemblages in granitoid rocks: the hornblende + melt = biotite reaction in the Liberty Hill pluton, South Carolina. *American Mineralogist*. **72**, 863-878.
- Streckeisen, A. 1973. Plutonic rocks: classification and nomenclature recommended by the IUGS subcommission on the systematic of igneous rocks. *Geotimes* (Oct. 1973) 26-30.
- Stussi, J.M. 1989. Granitoid chemistry and associated mineralization in the French Variscan. *Economic Geology*. **84**, 1363-1381
- Sun, S.S. 1982. Chemical composition and origin of the Earth's primitive mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **46**, 179-192.
- Tisserant, D. 1977. Les isotopes du Strontium et l'histoire hercynienne du Maroc. Etude de quelques massifs atlasiques et mésétiens. *Thèse 3^{ème} cycle, Strasbourg*, 103p.

CHAPITRE II

GEOCHRONOLOGIE, PAR U-Pb SUR ZIRCON ET TITANITE, DU PLUTON
D'AOULI, HAUTE MOULOUYA, MAROC.

RESUME

Le pluton d'Aouli est constitué de quatre unités: (1) la granodiorite, (2) le granite gris, (3) le granite rose, ces trois unités forment un seul massif, et (4) le granite à muscovite, celui-ci affleure dans deux pointements isolés du massif. Les trois premières unités constituant le massif ont été sélectionnées pour les datations isotopiques. Mais, le granite rose, ne renfermant pas des zircons, n'a pas été ici daté. Les âges obtenus par U-Pb sur zircon et titanite sont respectivement de 333 ± 2 et 319 ± 1.5 Ma pour la granodiorite et le granite gris. Les deux roches contiennent des composants hérités qui ont été datés de 1520 Ma dans le cas de la granodiorite, et de 1245 ± 50 et 1804 Ma dans le cas du granite gris.

La mise en place du pluton étant tardi à post-orogénique, l'âge de la granodiorite (333 ± 2 Ma) permet donc d'en déduire que la déformation hercynienne est anté Viséen dans la Haute Moulouya et donc dans la zone orientale de la Méséta hercynienne.

La différence d'âge, qui est de 10 Ma, entre la granodiorite et le granite gris soutient l'idée d'un pluton à émissions multiples déjà suggérée par l'étude géochimique (Oukemeni et Bourne, sous presse).

Les composants hérités, datés de 1245 à 1804 Ma, mettent en évidence, fort probablement, la présence d'une croûte précambrienne à l'aplomb de la Haute Moulouya.

INTRODUCTION

Le segment de la chaîne hercynienne qui affleure dans le Domaine Mésétien du Maroc est subdivisée en deux grands ensembles (Fig.1):

(1) la Méséta Orientale, où les terrains paléozoïque affleurent dans des boutonnières de faible superficie, dispersées et éloignées les unes des autres, à savoir la boutonnière de Midelt dans la Haute Moulouya et l'ensemble des boutonnières du Maroc Oriental;

(2) la Méséta Occidentale où le Paléozoïque affleure plus largement dans le Massif Central, les Rehamna, les Jebilet et la Méséta Côtière.

Ces deux ensembles hercyniens, Méséta Orientale et Méséta Occidentale, se distinguent l'un de l'autre par leur évolution sédimentaire et tectono-métamorphique. La déformation est précoce dans la partie orientale. Elle est du Dévonien supérieur, les datations isotopiques du métamorphisme synschisteux associé sont de 366 Ma dans la boutonnière de Midelt en Haute Moulouya, 372 Ma à Debdou et 368 Ma à Mekam dans le Maroc Oriental (Tisserant, 1977). Cette déformation n'atteint la Méséta Occidentale qu'au Carbonifère moyen (Michard, 1976). Dans un schéma de corrélation avec le reste de la chaîne hercynienne du Maroc la zone orientale est considérée comme étant la partie des zones internes de la chaîne (Hoepffner, 1987; Piqué et Michard, 1989).

L'étude géochronologique, des massifs granitiques, constitue l'une des façons de retracer l'évolution géodynamique du segment hercynien au Maroc. Ainsi, plusieurs études de datations isotopiques, concernant les différents plutons hercyniens du Maroc, ont été réalisées dont un résumé des principaux résultats est présenté au tableau I. Ces datations ont été, toutes, réalisées par la seule méthode Rb/Sr, et compte-tenu des incertitudes sur les calculs, il est, parfois, difficile de se prononcer sur la chronologie relative entre certains de ces massifs. Toutefois, la granodiorite, du pluton d'Aouli qui affleure dans la boutonnière de

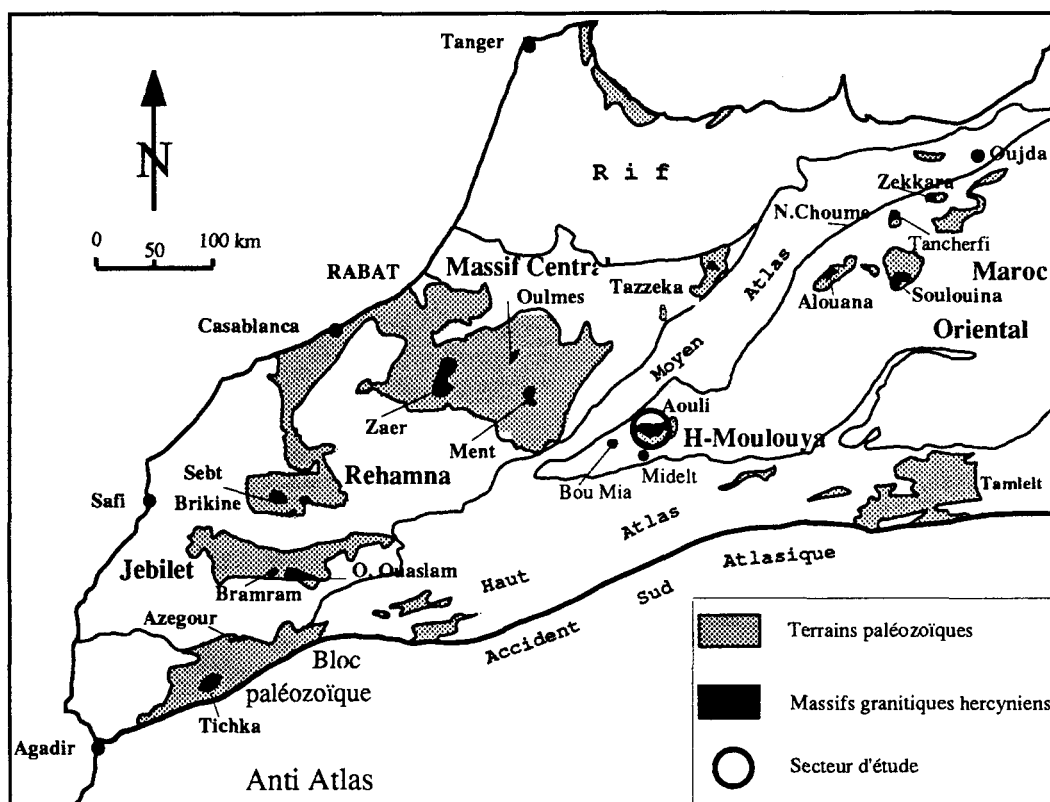


Fig. 1: Carte des terrains paléozoïques et des massifs de granitoïdes hercyniens du Maroc (Provinces du Nord).

Tableau I: Ages des plutons hercyniens du Maroc (Analyses par Rb-Sr)

Massif	Faciès	Age (Ma)	RI	Auteurs
Jebilet	Leucogranite (O.O et Br)	295±15 332±5	.7177±.0018 .7076±.0004	Mrini 92 Mrini 85
	Granite à biot et cord	327±4	.707 à .709	Mrini 92
	Granodiotite	330-340	.704 à .711	Mrini 85
Rehamna	Granites à biot (SDBR, Ras Elbiod)	273±2 (281)	.7047±.0026	Tisserant77 Mrini 92
	Leucogranite (Ras Elbiod)	275±7	.712	Tisserant77
	Granite monzonitique (SDBR)	268±6	.705±.001	Mrini 92
	Leucogranite	265	.706 et .7116	Mrini 92
Zaer	Faciès à biot	303±13	.7050±.0003	Mrini 85
	Faciès à 2 micas	279±11	.7093±.0013	Mrini 85
	Granite à biot	284±15		Choubert65
	Granites	298±2		Guiliani82
Oulmes	Granite principale	298	.7100	Mrini 85
	Granite secondaire	262±4	.7176±.0011	Mrini85
	Granite principale	~290 260±17 et	>.710	Mrini 92 Mrini 92
	Granite secondaire	271±20		Mrini 92
	Granites	268-271±7 (277-279)		Tisserant77
Ment	Granite à biot	279±6	.7054±.0015	Mrini 85,92
	Leucogranite	270±3	.7155±.0014	Mrini 85,92
	Leucogranite à grain fin	243±6	.712	Tisserant77

Tableau I: Ages des plutons hercyniens du Maroc (suite)

Massif	Faciès	Age (Ma)	RI	Auteurs
Tichka	Granites Leucocrate à biotit amphib. et Monzogranite	291±5	.70348± .00004	Mrini 85,92
	Gabros, diorites et Granodiorite	291	.7090	Mrini 92
	Leucogranite	296	.7030	Mrini 92
	Ensemble	330		Mrini85
Azegour	Granites	269±11 271±3	.7051±.0004	Charlot 67 Mrini 85,92
Zekkara	Granodiorite	287±8	.7087±.0001	Mrini 92
Taghilesset	Granites	328±19	.7057±.0003	Mrini 92
Marguechoum	Granites	321±15	.7050±.0002	Mrini 92
Tannecherfi	Granites	286±6	.7049±.0001	Mrini 92
Boudoufoud	Granites	266±9 (275)	.721±.015	Tisserant77
	Granites	259±11	.7092±0003	Mrini 92
Beni Znasen	Granites	247±7	.7081±.0017	Mrini 92
Alouana	Granites	284±7 (294)	.7058±.0017	Tisserant77
Aouli	Granodiorite	347±17	.7052±.0005	Clauer 80
	Granite alcalin	329±6	.7101±.0009	"
	Granite calcoalcalin	319±6	.7037±.0036	"
	Granite à muscovite	309±12	~.718	"
Bou Mia	Granite calcoalcalin	315 (326)	.715 à .720	Tisserant77
	Granites graphitiques	290±3 (300)	.7086±.0048	"

Nb. Les âges indiqués entre parenthèse ont été recalculés en multipliant par un facteur de 1.035 (constante de désintégration = 1.42).

la Haute Moulouya, datée à 347 ± 17 Ma (Clauer et al., 1980), semble être la plus ancienne (Tab.I). Le complexe granitique d'Aouli est constitué de trois entités pétrogénétiquement indépendantes dont, (1) la granodiorite, (2) le granite gris et le granite gris, ces deux entités constituent un seul massif, et enfin (3) le granite à muscovite qui apparaît dans deux petits affleurements isolés du reste du massif (Oukemeni et Bourne, sous presse). Ces deux auteurs ont aussi démontré que le contexte tectonique, de mise en place de complexe d'Aouli, est tardi à post-orogénique. Il met donc fin à l'orogénèse hercynienne dans cette partie de la chaîne. La détermination de son âge, avec plus de précision, permettra d'en déduire un âge minimum pour la déformation hercynienne dans la zone orientale de la chaîne hercynienne au Maroc. De plus, une datation précise va permettre de vérifier jusqu'à quel point les entités du complexe d'Aouli, sont différentes sur le plan géochronologique, et donc, si le modèle de mise en place, par intrusions multiples (Clauer et al., 1980; Oukemeni et Bourne, sous presse) serait soutenu par la géochronologie du massif.

I. ETUDE DU MASSIF GRANITIQUE D'AOULI

I.1. Travaux antérieurs

I.1.1. Pétrographie

Le massif granitique d'Aouli affleure au sein des schistes attribués par analogie de faciès au Cambrien (Hoepffner, 1987). Dans une étude géologique concernant toute la région de la Haute Moulouya, Emberger (1965) a décrit quatre types de roches intrusives: (1) la granodiorite d'Elhassir; (2) un granite calcoalcalin; (3) un granite alcalin; et (4) un granite à muscovite qui affleure dans deux pointements (Poulet et Perdreaux) séparés du reste du pluton, isolés au sein des schistes encaissants. Oukemeni et Bourne (sous presse), dans une étude géochimique du pluton d'Aouli, ont décrit, eux aussi, quatre unités différentes, mais, ils proposent des termes descriptifs légèrement différents pour désigner ces unités (Tab.II).

Tableau II: Datations isotopiques Rb/Sr du pluton d'Aouli; d'après Clauer *et al.* (1980).

Unité	Nomenclature Oukemeni et Bourne (sous presse)	Nomenclature Emberger (1965)	Age (Ma) Clauer (1980)	Fraction analysée
1	granodiorite	granodiorite	347±17	roche totale
2	granite rose	granite alcalin	329±6	roche totale
3	granite gris	granite calcoalcalin	319±6	roche totale
4	granite à muscovite	granite à muscovite	319±12	roche totale + muscovite + biotite

La différence fondamentale, entre les résultats dégagés de ces deux études, est que Emberger (1965), ayant effectué surtout des travaux de terrain, considèrent que les quatre faciès, qu'il a définis, sont tous co-magmatiques; tandis que, Oukemeni et Bourne (sous presse), dans leur étude géochimique sont plutôt en faveur d'un modèle d'intrusions multiples en trois étapes. D'après ces derniers auteurs, la granodiorite ne montre pas de consanguinité pétrogénétique avec les autres unités et semble être une entité à part, ce qui est aussi le cas du granite à muscovite. Par contre, une liaison pétrogénétique semble être bien établie entre le granite gris et le granite rose, ce dernier proviendrait du premier par différenciation magmatique.

I.1.2. Historique des datations isotopiques

Tisserant (1977) a effectué une étude de datation isotopique, par la méthode Rb- Sr, des faciès du pluton d'Aouli décrits par Emberger (1965). Ses calculs ont été repris par Clauer et al. (1980) (Tab.II), en se servant de 1.42×10^{-11} , comme constante de désintégration, au lieu de 1.40×10^{-11} utilisée par Tisserant. Ces résultats suggèrent une mise en place épisodique des différentes unités du pluton, avec, tout d'abord les granodiorites (347 ± 17 Ma), suivies par les granites alcalins (329 ± 6 Ma), puis par les granites calcoalcalins (319 ± 6 Ma), et enfin, les granites à muscovite (319 ± 12 ou 281 ± 3 Ma).

Les datations des roches granitiques par la méthode Rb-Sr risquent de ne pas être très précises pour plusieurs raisons. Le rubidium (Rb) est un élément assez mobile qui a un comportement chimique semblable à celui du potassium (K). En conséquence, le Rb est facilement incorporé dans la structure de la séricite ou d'autres minéraux secondaires. Si du ^{87}Rb qui provient d'une source externe, les schistes encaissants dans le cas d'Aouli par exemple, s'introduit dans le système au moment de l'intrusion, les points sur l'isochrone initial seront déplacés vers la droite, mais la ligne reste horizontale et l'âge calculé reste donc le même. Par contre, si le strontium (Sr), qui est moins mobile que le Rb et dont le comportement est proche de celui du calcium (Ca), s'introduit dans le système à cette étape,

peut donc fausser l'isochrone initialement horizontale, ce qui va donner des âges erronés.

De plus, si après une certaine période précédant la mise en place d'un granite, 100 Ma par exemple, des fluides contenant du ^{87}Sr continuent à circuler dans des fractures, les points de l'isochrone peuvent être déplacés vers la droite, ce qui va donner des âges relativement plus jeunes. Simonetti et Doig (1990), en datant des intrusions, qui du point de vue pétrographique ne sont pas altérées, ont toutefois évoqué la présence des fluides tardi- à post-solidification, pour expliquer la dispersion des points analytiques sur leurs diagrammes d'isochrones et donc la grande incertitude sur les âges calculés.

Notons que le granite gris et le granite rose du massif d'Aouli présentent des évidences du dégagement de la phase fluide lors de la solidification magmatique, telles que les pochettes de pegmatite, les mégacristsaux de feldspath potassique et des cavités miarolitiques (Oukemeni et Bourne, sous presse). Un tel dégagement peut provoquer le développement d'une fracturation intense (Burnham, 1979), ce qui faciliterait la circulation des fluides pendant ou après la solidification de la masse magmatique. En plus, Emberger (1965) a décrit une fracturation importante postérieure à la solidification du magma. Chacun de ces facteurs risque donc d'introduire des incertitudes dans les âges obtenus par Clauer et al. (1980) par la méthode Rb-Sr.

D'autres facteurs, qui peuvent influencer ces résultats, sont directement liés à la méthode elle même. Dans une étude géochronologique intégrant plusieurs types de techniques de datation, Ayuso et al. (1984) ont remarqué que les âges calculés par la méthode Rb-Sr sont relativement plus jeunes que ceux obtenus par la méthode U-Pb sur les zircons. Ces auteurs suggèrent alors qu'il est possible de réduire la valeur de la constante de désintégration de ^{87}Rb , pour que les âges déterminés par les deux méthodes soient plus concordants. Il faut noter aussi qu'en général, les valeurs d'incertitudes sur les âges obtenus par la méthode Rb-Sr sont plus élevées que dans le cas des âges calculés par U-Pb.

De ce fait, considérant les valeurs d'incertitudes, les différences entre les âges calculés par Clauer et al. (1980), soit 347 ± 17 Ma pour la granodiorite, 329 ± 6 Ma pour le granite alcalin, et 319 ± 6 Ma pour le granite calcoalcalin, peuvent ne pas être significatives. Pour les raisons évoquées ci-dessus, il paraît nécessaire de déterminer les âges des différentes unités du massif d'Aouli par la méthode U-Pb sur les zircons. Cette méthode donne des âges plus précis. En plus, les zircons sont résistants aux processus d'altération qui peuvent intervenir au cours, ou après, la genèse du magma.

I. 2. Etude géochronologique

I.2.1. Méthode analytique

Trois roches différentes, constituant le massif d'Aouli, ont été sélectionnées pour les datations, la granodiorite de l'apophyse d'Elhassir, le granite gris et le granite rose. Seuls les deux premières ont pu être datées, le granite rose, lui ne contient pas de zircon. Les échantillons de roches ont été broyées par un broyeur à mâchoire en acier et par un moulin à disque. La séparation des minéraux a été faite par la table de séparation, Wilfley Table, par des liqueurs denses et par un séparateur isodynamique, Frantz, au Royal Ontario Museum (Canada). Toutes les plaques utilisées, lors des différentes étapes du broyage, sont nettoyées avec de l'alcool et à l'aide d'une brosse électrique pour éliminer toute possibilité de contamination. Les zircons sont ensuite triés en fonction de leur taille et de leurs propriétés magnétiques. Enfin, la sélection des meilleurs cristaux se fait sous une loupe binoculaire. Les fractions ont été abrasées pour enlever la perte de plomb qui est en surface (Krogh, 1982). Les zircons sont ensuite mis en solution et analysés suivant la méthode décrite par Krogh (1973). Les corrections pour le plomb commun incorporé, se basent sur le modèle de Stacey et Kramers (1975) et les régressions utilisent la méthode de Davis (1982). Toutes les erreurs citées dans le texte sont pondérées à 2 sigma. Les constantes de désintégration de l'uranium sont tirés de Steiger et Jager (1977).

I.2.2. Résultats

I.2.2.1. Datation de la granodiorite

L'échantillon de la granodiorite a fourni une quantité moyenne de zircons magmatiques. Ces zircons sont de très bonne qualité. Ils sont incolores, sans inclusions et généralement non fracturés. Le rapport longueur sur largeur (L/l), varie de 1 à 5, aussi bien pour les petits grains que pour les gros. Seuls les cristaux de haute qualité et sans fractures ont été retenus pour les analyses. Ainsi, une série d'analyses a été effectuée (Tab.III).

Tout d'abord, (1) une fraction multicristalline de gros et petits prismes a été sélectionnée, puis (2) une deuxième fraction de petits prismes courts et automorphes. Généralement, les petits prismes ont plus de probabilité de contenir des noyaux hérités. Les deux premières analyses (1 et 2; Tab.III) donnent des âges $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ de 333 Ma et 337 Ma qui sont respectivement discordants à 0.6 et 1.9 % et considérant la marge d'erreur, ces deux âges se recoupent juste à peine (Fig.2).

Dans le cas de la troisième analyse (analyse 3; Tab.III), les données sont déplacées vers la droite ce qui suggère la présence d'une petite quantité de zircon hérité d'âge moyen de 1520 Ma.

Les analyses subséquentes conçues pour améliorer et vérifier ces résultats consistent, entre autres, à analyser un seul cristal de zircon automorphe (analyse 4; Tab.III) et une fraction de titanite brune (analyse 5; Tab.III). Le zircon automorphe, de haute qualité et abrasé, donne un âge de 333 ± 2 Ma qui est concordant, avec une précision de 2 sigma et un pourcentage de discordance de 0.3 %. Dans le cas de la titanite, les données U/Pb ont une très grande correction pour le Pb initial, il en résulte alors une très grande erreur même si le niveau d'uranium (600 ppm) est assez élevé. Etant donné que les analyses, 4 et 5 (Tab.III), sont concordantes et donnent le même âge, il est fort probable que le degré d'héritage, signalé dans l'analyse 3, a été évité dans ces deux analyses.

Tableau III: Données isotopiques U-Pb sur zircon et titanite

Granodiorite du pluton d'Aouli

Description	Poids (mg)	Concentration		a Commun Pb (pg)	Rapports atomiques					Age (Ma)	% Disc
		U (ppm)	Pb (ppm)		$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_c$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}_c$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}_c$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}_c$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}_c$		
1. +100 prismes courts ab	0.085	323	19	14	6690	0.2123	0.05270	0.38586	0.05310	333.1	0.6
2. +200 prismes bien formés ab	0.060	302	17	12	4822	0.2025	0.05270	0.38660	0.05320	337.3	1.9
3. Prismes courts ab	0.024	271	16	7	2935	0.1896	0.05432	0.40704	0.05434	385.3	11.8
4. un zircon automorphe ab	0.009	138	8	3	1163	0.2186	0.05273	0.38595	0.05308	332.3	0.3
5. 20 titanites bruns nab	0.241	604	44	1232	403	0.3756	0.05201	0.38386	0.05353	351.5	7.2

Notes: ab - abrasés; nab - non-abrasés; MO - pente du Frantz à 0 degré magnétique

a Plomb commun total présent (contributions de l'échantillon et de la préparation chimique)

b Valeurs mesurées, corrigées pour la fractionation et le plomb commun dans l'étalon.

c Corrigé pour la discrimination de masse, la préparation chimique, et le plomb commun de l'étalon. La composition isotopique du plomb commun dans l'échantillon était calculé à partir du modèle de Stacey Krames (1975). La discrimination de masse corrigée pour le Pb est d'environ $\pm 13\%$.

La constante de désintégration de: $^{238}\text{U}=0.15513 \times 10^{-9}/\text{an}$; $^{235}\text{U}=0.98485 \times 10^{-9}/\text{an}$.

Le rapport $^{238}\text{U} / ^{235}\text{U} = 137.88$

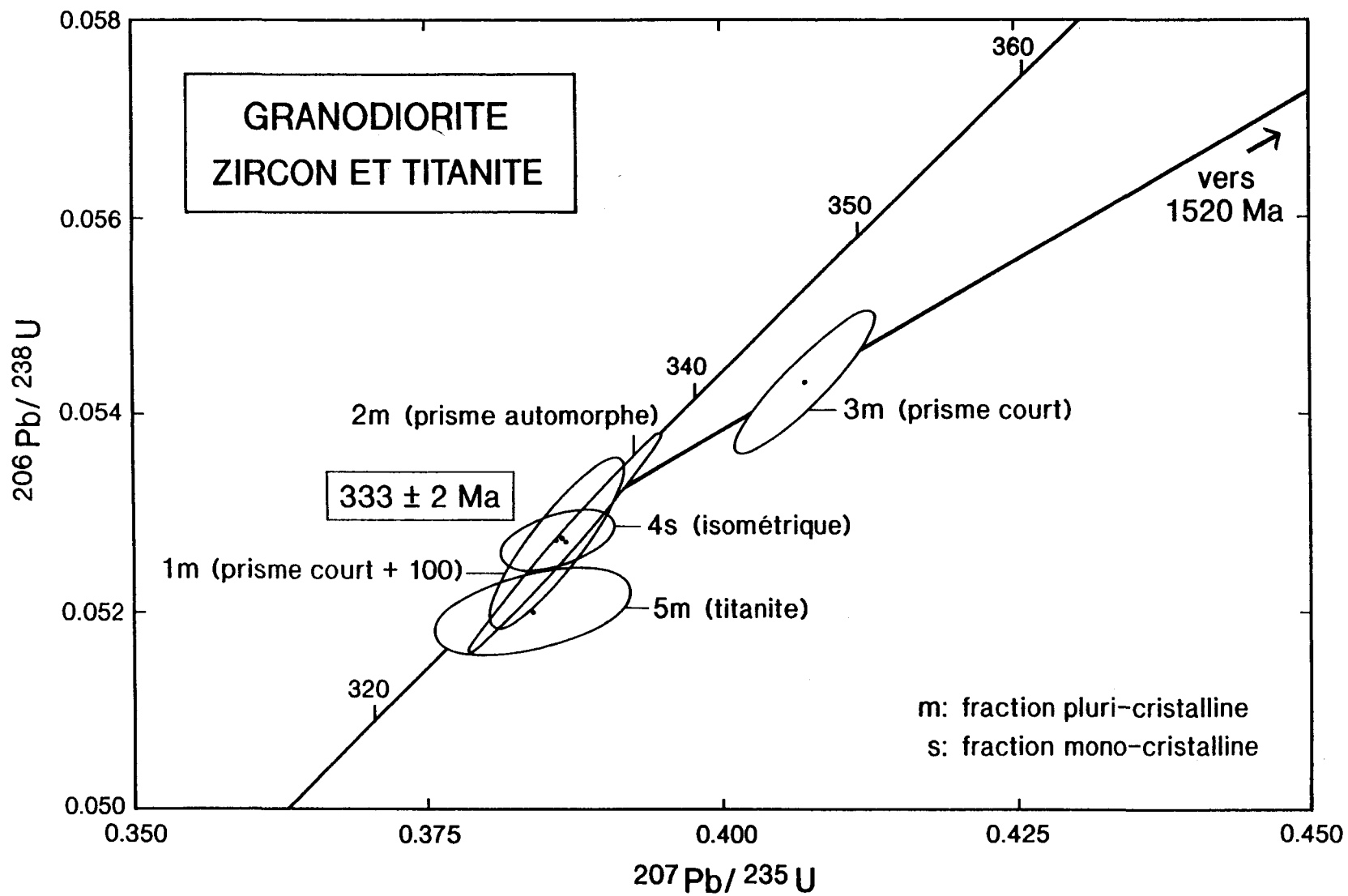


Fig.2: Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$; granodiorite du pluton d'Aouli.

En conclusion, un âge de 334 ± 3 Ma (analyses 1, 2 et 3; Tab.III) est retenu pour satisfaire toutes les options possibles. Cependant un âge plus plausible de 333 ± 2 Ma est obtenu par les deux points les plus concordants (analyses 1 et 4; Tab.III).

I.2.2.2. Datation du granite gris

L'échantillon du granite gris contient une variété de cristaux de zircons magmatiques automorphes, clairs, sans inclusions et légèrement colorés. La forme de ces cristaux est variable. Ils se présentent soit en forme d'aiguilles, de grande et petite taille, avec un rapport longueur/largeur qui varie de 10 à 1, soit en cristaux équidimensionnels de petite taille (analyse 1, 2, 3; Tab.IV).

Les premières analyses ont été effectuées, tout d'abord sur des fractions multicristallines de prismes en forme d'aiguilles de grande taille (analyse 1; Tab.IV), puis de petite taille (analyse 2; Tab.IV); ces prismes sont normalement sans héritage, et enfin sur les petits prismes courts, qui sont, en général, typiquement censés contenir des évidences de composants hérités (analyse 3; Tab.IV). Les données U/Pb pour les deux populations d'aiguilles sont discordantes à 0.9 et à 1.2 % (analyses 1 et 2; Tab.IV) avec des âges $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ minimums de 321 Ma et 319 Ma respectivement (Fig.3 a et b). Les données, pour les cristaux équidimensionnels courts (analyse 3; Tab.IV) montrent la présence d'un héritage ayant un âge moyen 1245 ± 50 Ma. Afin d'améliorer la fiabilité de ces données une autre sélection a été faite avec un seul cristal prismatique de zircon automorphe qui a été fortement abrasé (analyse 4; Tab.IV), une fraction multicristalline de zircon en forme d'aiguille abrasée (analyse 6; Tab.IV) et une fraction des zircons plats non abrasés (analyse 7; Tab.IV). Les cristaux des deux dernières fractions ont des rapports, superficie/masse, relativement forts. Les zircons de ce genre sont typiquement reconnus être non concordants, même après abrasion. Toutefois, leur analyse reste utile pour la précision de la ligne discordia.

Tableau IV: Données isotopiques U-Pb sur zircon et titanite

Granite gris du pluton d'Aouli

Description	Poids (mg)	Concentration		^a Commun Pb (pg)	Rapports atomiques					Age (Ma)	% Disc
		U (ppm)	Pb (ppm)		²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb _c	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb _c	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U _c	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U _c	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb _c		
1. grandes aiguilles ab	0.049	478	24	8	8687	0.1099	0.05059	0.36838	0.05282	320.7	0.9
2. petites aiguilles ab	0.060	571	29	10	10962	0.1161	0.05013	0.36476	0.05277	319.1	1.2
3. zircons équidimension- nels ab	0.025	213	12	3	5442	0.0966	0.05616	0.43735	0.05648	471.4	26
4. un zircon automorphe ab	0.013	153	8	2	2951	0.0923	0.05075	0.36911	0.05275	318.1	-0.3
5. 13 zircons équidimension- nels ab	0.060	154	10	3	11813	0.0953	0.06328	0.57851	0.06631	816.1	53.1
6. zircons en forme d'aiguille ab	0.082	428	21	10	11030	0.0954	0.05005	0.36425	0.05278	319.4	1.5
7. zircons aplatis nab	0.087	474	23	34	3683	0.0848	0.04833	0.35210	0.05284	322.1	5.7
8. zircon en forme d'aiguille nab	0.088	530	27	94	1533	0.0986	0.04878	0.35469	0.05274	317.6	3.4

Notes: ab - abrasés; nab - non-abrasés; MO - pente du Frantz à 0 degré magnétique

a Plomb commun total présent (contributions de l'échantillon et de la préparation chimique)

b Valeurs mesurées, corrigées pour la fractionation et le plomb commun dans l'étalon.

c Corrigé pour la discrimination de masse, la préparation chimique, et le plomb commun de l'étalon. La composition isotopique du plomb commun dans l'échantillon était calculé à partir du modèle de Stacey Krames (1975). La discrimination de masse corrigée pour le Pb est d'environ ±13%.

La constante de désintégration de: $^{238}\text{U}=0.15513 \times 10^{-9}/\text{an}$; $^{235}\text{U}=0.98485 \times 10^{-9}/\text{an}$.

Le rapport $^{238}\text{U} / ^{235}\text{U} = 137.88$

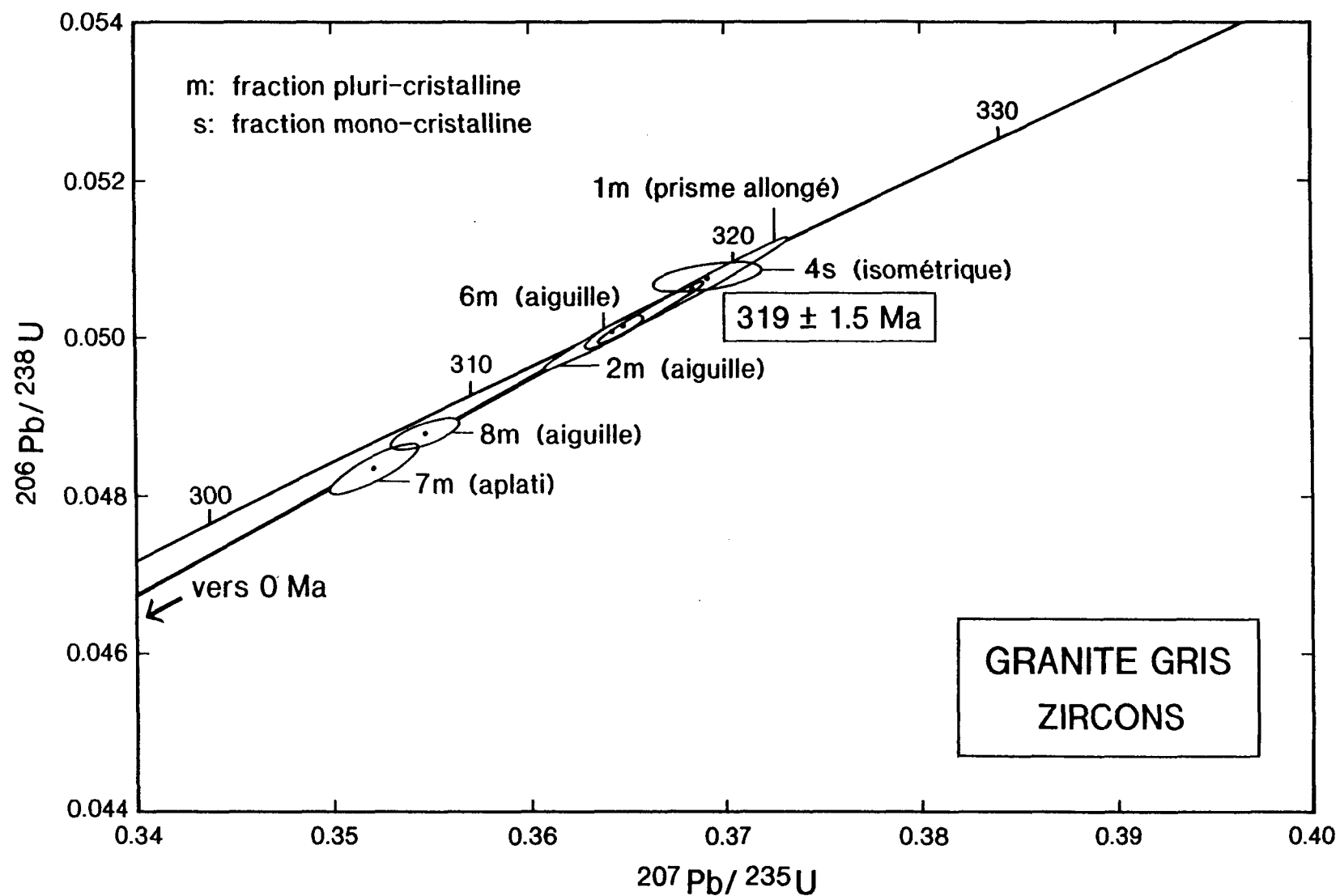


Fig.3a: Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$; granite gris du pluton d'Aouli.
 (Agrandissement de la figure 3a)

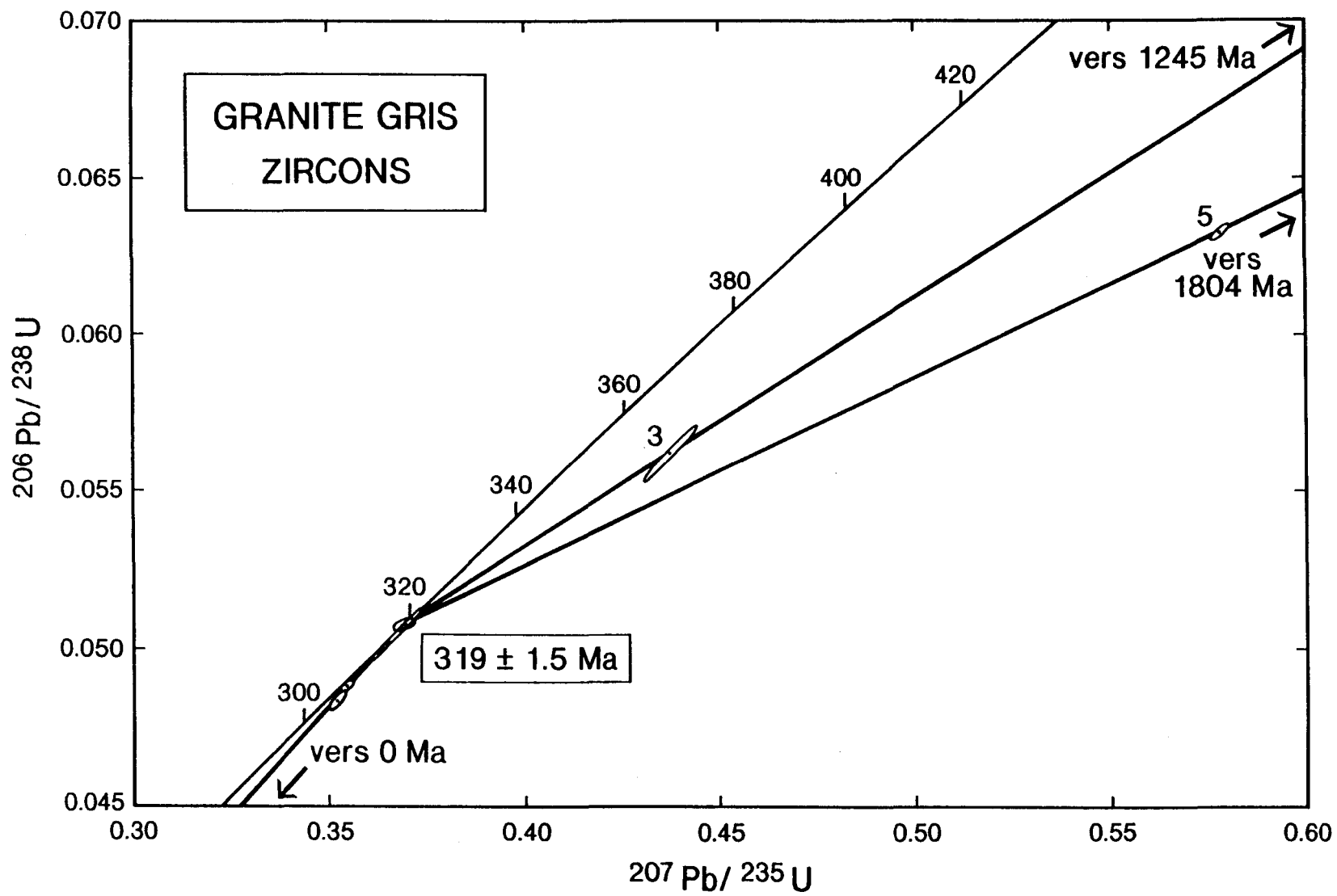


Fig.3b: Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$; granite gris du pluton d'Aouli.

Une autre analyse (analyse 8; Tab.IV) a été effectuée sur des zircons en forme d'aiguilles analysés sans abrasion, pour déterminer un point discordant supplémentaire. Les points analytiques le cristal simple de haute qualité (analyse 4; Tab.IV) sont concordants, considérant la marge d'erreur (-0.3% discordant). Ce cristal donne un âge Pb/Pb de 318 ± 2 Ma. Les données pour les cristaux plats et les cristaux en forme d'aiguilles (analyses 7 et 8; Tab.IV) sont comme prévues, discordantes à 3 et 6 % respectivement . Une analyse de vérification (analyse 5; Tab.IV) de 13 cristaux équidimensionnels et courts, même population que dans le cas de l'analyse 3, montre, encore une fois, des évidences d'héritage. Mais, dans ce cas l'âge moyen pour l'héritage est de 1804 Ma. Ceci indique que le composant hérité est d'âge multiple.

Les données pour les analyses 1, 2, 4, 6, 7 et 8 (Tab.IV) peuvent être combinées pour donner un âge de 319 ± 1.5 Ma.

II. DISCUSSIONS ET INTERPRETATIONS

Les âges, de la granodiorite et du granite gris, calculés dans cette étude par la méthode U-Pb sur zircon sont en partie concordants avec ceux obtenus par Clauer et *al.* (1980). La granodiorite reste toujours l'unité la plus ancienne du massif, mais l'âge de 333 ± 2 Ma, avec une précision 2 sigma est plus jeune et plus précis que celui calculé par Clauer et *al.* qui est de 347 ± 17 Ma. Pour le granite gris, l'âge calculé, 319 ± 1.5 Ma est identique à celui déterminé par Clauer et *al.* (1980) soit 319 ± 6 Ma, mais avec une valeur de l'incertitude plus faible. Ces âges correspondent à la période de cristallisation des deux unités. La différence pétrogénétique, mise en évidence par l'étude chimique, entre la granodiorite et le granite gris (Oukemeni et Bourne, sous presse) est donc confirmée.

Le massif d'Aouli est à émissions multiples. Cette hypothèse, originalement proposée par Oukemeni et Bourne (sous presse) lors d'une étude géochimique, est soutenue par les datations isotopiques par U-Pb sur zircon. Les résultats de Clauer *et al.*, (1980) n'ont pas

permis de conclure ainsi, parce qu'ils ne précisent pas si les valeurs des incertitudes sont pondérées à 1 ou 2 sigma. Car, si la pondération est seulement de 1 sigma, la différence entre les âges calculés ne serait pas significative.

L'analyse des noyaux des zircons a mis en évidence la présence d'un composant hérité, dans la granodiorite et le granite gris, dont l'âge varie de 1245 à 1804 Ma (Figs.2 et 3). Ce composant peut être une évidence de l'existence d'un socle précambrien sous le massif d'Aouli.. Ceci est en accord avec les résultats de Nasloubi (1993), qui dans son travail sur les minéralisations plombifères de la Haute Moulouya suggère une origine commune aux deux gisements du plomb (filonien d'Aouli et stratoïde de Zeida) et propose que la source de ce plomb serait dans une croûte vraisemblablement précambrienne, enfouie sous la Haute Moulouya. Ces résultats appuie l'hypothèse de Wigger *et al.*, (1992) qui, dans une étude par réfraction sismique, suggèrent une continuité du socle précambrien, entre le flanc sud du Haut Atlas, au sud, et le Moyen Atlas, au nord, en passant par la Haute Moulouya.

Une comparaison de l'âge du massif d'Aouli avec ceux des plutons qui affleurent dans la partie occidentale de la chaîne hercynienne du Maroc, n'est pas sans risque, compte tenu des incertitudes élevées sur les calculs des âges par la méthode Rb-Sr. Toutefois, les âges des unités du massif d'Aouli, calculés dans cette étude ou par Clauer *et al.*, (1980), en particulier pour la granodiorite, reste le plus vieux de tous.

Rappelons que la mise en place du massif d'Aouli, telle que déterminée par une étude géochimique (Oukemeni et Bourne, sous presse), est tardive à post-orogénique, et que la granodiorite n'est pas affectée par la déformation hercynienne. Par conséquent, la déformation hercynienne est donc antérieure à 333 Ma dans la région de Midelt. Ceci est en accord avec l'âge de 360 Ma proposé pour la déformation syn-schisteuse dans cette région (Tisserant, 1977). Nos résultats sont en accord avec l'idée que la déformation hercynienne est précoce dans la zone orientale du Maroc.

CONCLUSIONS

1) Les âges calculés par la méthode U-Pb sur les zircons pour la granodiorite et le granite gris du massif d'Aouli sont respectivement de 333 ± 2 et 319 ± 1.5 Ma.

2) La granodiorite et le granite gris contiennent tous les deux des composants de zircons hérités. Ces composants sont datés à 1520 Ma pour la granodiorite et 1245 ± 50 et 1804 Ma pour le granite gris. Ceci suggère la présence d'un socle précambrien, complexe, d'âge variable, sous le massif d'Aouli.

3) La différence d'âge entre la granodiorite et le granite gris, qui est de l'ordre de 10 Ma d'années, prouve le caractère épisodique de la mise en place du massif d'Aouli. Il s'agit donc d'un massif à émissions multiples tel que suggéré par une étude chimique (Oukemeni et Bourne, sous presse)

4) La granodiorite du massif d'Aouli est fort probablement l'unité intrusive la plus ancienne de toutes les intrusions hercyniennes, elle met terme à l'orogénèse hercynienne dans la zone orientale de la chaîne. La déformation qui est antérieure à la mise place de la granodiorite datée de 333 ± 2 Ma, est donc précoce dans la zone orientale, par rapport à la zone occidentale de la chaîne hercynienne du Maroc.

BIBLIOGRAPHIE

- Ayuso, R.A., Arth, A.K., Sinha, A.K., Carlson, J. and Wones, D.R. 1984. Comparative geochronology in the reversely zoned plutons of the Bottle Lake Complex, Maine: U-Pb on zircons and Rb-Sr on whole rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **88**: 113-125.
- Burnham, C.W., 1979. Magmas and hydrothermal fluids. IN: *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 2nd edition. EDITED BY: H.L. Barnes. John Wiley, New York
- Charlot, T., Tisserant, D., Vidal, Ph. & F. 1967. Rapport technique et quelques résultats. *Compte rendu de l'activité du Service Géologique, Rabat, Maroc*: 126-137.
- Choubert, 1965. Essai de Chronologie hercynienne. *Notes et Mémoires du Service Géologique (Rabat) Maroc*, **4**, 83: 9-78.
- Clauer, N. Jeannette, D. et Tisserant, D. 1980. Datations isotopiques des cristallisations successives d'un socle cristallin et cristallophyllien (Haute Moulouya, Moyen Maroc). *Geologische Rundschau*, **5**: 383-399
- Davis, D.W., 1982. Optimum linear regression and error estimation applied to U-Pb data. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **19**: 2141-2149.
- Emberger, A. 1965. Introduction à l'étude des minéralisations plombifères de la Haute Moulouya. *Notes et Mémoires du Service Géologique (Rabat)*, **181**: p.167-180.
- Guiliani, G., 1982. Contribution à la géologie du massif granitique des Zaer (Maroc Central). Etude des minéralisations à Sn-W-Mo associées. Thèse de spécialité I.N.P.L. Nancy, 345p.
- Hoepffner, Ch. 1987. La tectonique hercynienne dans l'Est du Maroc. Thèse de doctorat ès-Sciences, Université Louis Pasteur, Strasbourg.
- Krogh, T.E., 1973. A low contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determination. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **37**: 488-494.

- Krogh, T.E., 1982. Improved accuracy of U-Pb zircon ages by the creation of more concordant systems using an air abrasion technique. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **46**: 637-649.
- Michard, A. 1976. *Eléments de géologie marocaine. Notes et mémoires du service géologique du Maroc*, **252**: 408p.
- Mrini, Z. 1985. Age et origine des granitoïdes hercyniens du Maroc: apport de la géochronologie et de la géochimie isotopique (Sr, Nd, Pb). Thèse Univ. Clermont - Ferrand, 156p.
- Mrini, Z., Rafi, A. Duthou, J-L. et Vidal, P. 1992. Chronologie Rb-Sr des granitoïdes hercyniens du Maroc: conséquences. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **163**: 281-291.
- Nasloubi, M. 1993. Genèse et modélisation des minéralisations plombifères de la Haute Moulouya. Maîtrise en Sciences de la Terre. Université du Québec à Montréal.
- Piqué A. et Michard A. 1989. Moroccan Hercynides: A synopsis. The paleozoic sedimentary and tectonic evolution at the northern margin of west Africa. *American Journal of Science*, **289**: 286-330.
- Simonetti, A. and Doig, R., 1990. U-Pb and Rb-Sr geochronology of Acadian plutonism in the Dunnage zone of the southeastern Québec Appalachians. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **27**: 881-892.
- Stacey, J.S. and Kramers, J.D., 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, **26**: 207-221.
- Steiger, R.H. and Jager, E., 1977. Subcommittee on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochemistry. *Earth and Planetary Science Letters*, **36**: 359-362.
- Taylor, H.P. jr., and Forester, R.W. 1971. Low O_{18} igneous rocks from the intrusive complexes of skye, Mull and Ardnamurchan, Western Scotland. *Journal of Petrology*, **12**: 465-497.
- Tisserant, D. 1977. Les isotopes du strontium et l'histoire hercynienne du Maroc. Etude de quelques massifs atlasiques et mésétiens. Thèse 3^{ème} cycle, Strasbourg, 103p.

CHAPITRE III

ANALYSE DISCRIMINANTE APPLIQUEE AUX GRANITOIDES HERCYNINIENS DU MAROC: IMPACT SUR LES ROLES RESPECTIFS, DE LA CROUTE ET DU CONTEXTE TECTONIQUE DE LEUR MISE EN PLACE, DANS LEUR CHIMISME

RESUME

Au nord de l'accident sud atlasique, la chaîne hercynienne du Maroc est subdivisée en deux zones, la Méséta Orientale et la Méséta Occidentale séparées par le Moyen Atlas. Des granitoïdes intrusifs se trouvent dans chacune de ces zones. Le massif d'Aouli, situé en Haute Moulouya, dans la Méséta Orientale, a été étudié en détail sur le plan cartographique et géochimique par Oukemeni et Bourne (sous presse). Une étude de ce massif, par analyse discriminante, utilisant les données chimiques comme variables et les unités cartographiques comme groupes, indique qu'il existe une relation étroite entre la cartographie de terrain et la chimie des roches, démontrant ainsi l'utilité de cette méthode pour vérifier la cartographie des roches de ce type. Lorsque les granitoïdes de la Méséta Occidentale sont classés en deux groupes, selon leur contexte tectonique de mise en place, soit syn-tectonique soit tardi- à post-tectonique, par les différents auteurs, l'analyse discriminante ne montre pas une différence chimique significative entre ces deux groupes. Par contre, en comparant les massifs de la Méséta Orientale, considérés tous comme un premier groupe à ceux de la Méséta Occidentale considérés comme un deuxième groupe, par la même méthode, la discrimination entre les deux groupes devient alors très significative. Les résultats de cette étude suggèrent donc que les caractères chimiques d'un granitoïde ne reflètent pas uniquement le contexte tectonique de mise en place, mais aussi la nature chimique de la croûte qui lui est associée; ceci étant valable, au moins, pour les éléments considérés dans cette étude.

ABSTRACT

The Hercynian belt of Morocco can be divided into two zones, the Western Meseta and the Eastern Meseta respectively, which are separated by the Middle Atlas Mountains. A number of granitoid intrusions are found in both of these zones. The Aouli Pluton, emplaced in the upper Moulouya area of the Eastern Meseta, has been both mapped and studied geochemically in some detail (Oukemeni and Bourne, in press). A discriminant analysis, carried out using their chemical data as the variables and their map unit as the group criterion, gives a very strong relationship between the two, and demonstrates the usefulness of using this method to verify field mapping of such rocks. When the plutons of the Western Meseta were grouped into pre-tectonic and syn- to post-tectonic categories, as divined by various field studies, the discriminant analysis failed to demonstrate a significant chemical difference between the two groups. However a discriminant analysis between the chemical data for all the Eastern Meseta granitoids and Western Meseta granitoids reveals a significant difference between the two. Results for this area suggest that the chemical characteristics of a granitoid body may be as much a function of the nature of the crust during emplacement as it is a function of the tectonic environment of emplacement of the mass, at least for the elements considered in this study.

INTRODUCTION

Dans une étude géochimique, les pétrologues se servent généralement des diagrammes pour exprimer les relations quantitatives dans des groupes de données, espérant que cette représentation graphique améliore la compréhension des relations entre les variables. Malheureusement, ces relations peuvent être, en fait, modifiées par les transformations au cours des représentations graphiques, ce qui peut conduire à former des tendances plutôt numériques que d'origine pétrogénétiques. A cet égard, les diagrammes de Harker sont classiques: une augmentation en SiO_2 induit nécessairement une diminution dans l'autre variable provoquant ainsi une tendance à pente négative. Cette corrélation négative controuvée (spurious correlation) est difficilement séparable des corrélations causées par les processus pétrogénétiques (Chayes, 1960, 1962). Les diagrammes triangulaires peuvent être aussi trompeurs que les diagrammes binaires à cause des transformations effectuées (Smith, 1972).

De plus, l'analyse chimique d'une roche plutonique comporte plusieurs éléments chimiques ou variables. Il serait trop simpliste de vouloir faire la comparaison de deux ou plusieurs plutons en considérant les valeurs d'une seule ou de deux variables, telles que SiO_2 , et MgO , car de telles analyses partielles conduisent à une grande perte d'information, (Chayes, 1962). Quand certaines variables sont sélectionnées pour caractériser la variation d'une séquence chimique, il est tacitement admissible que le rôle, des autres variables non sélectionnées, est pratiquement nul. Il est donc intuitivement évident que l'étude d'une variation chimique sera plus complète et de plus en plus détaillée, au fur et à mesure qu'on utilise de manière simultanée, un grand nombre d'éléments chimiques comme variables. Ainsi, doit-on se servir des méthodes de calcul multivariées dans une étude géochimique, ce qui permettra de considérer simultanément la variation de plusieurs variables.

L'objectif principal de cette étude est de comparer la composition chimique des roches granitiques provenant des plutons situés dans des régions géographiquement différentes, ou des roches provenant d'un même pluton mais appartenant à des faciès différents, distincts par des caractères autres que leur composition chimique. Dans ce cas, l'analyse discriminante s'avère la méthode la plus appropriée pour aborder ce problème.

ANALYSE DISCRIMINANTE

L'analyse discriminante est une méthode statistique qui calcule un ou plusieurs polynômes à partir d'une série de variables initiales choisies par l'utilisateur. Le but de cette méthode est de calculer un polynôme qui permet la discrimination, le plus efficacement possible, entre deux groupes d'échantillons. Normalement, si (n) est le nombre de groupes impliqués dans le calcul, $(n-1)$ polynômes vont être calculés. Les groupes en question doivent être nécessairement définis au préalable. Pour éviter une évolution subjective des résultats, les critères de classification des groupes doivent être différents des variables utilisées et non liés à celles-ci (Le Maître, 1982).

Cette méthode a été originalement proposée par Fisher (1936) puis appliquée à des contextes géologiques par plusieurs auteurs (eg. Shaw, 1972; Le Maître, 1982; Richard, 1989). D'excellents résumés de la méthodologie sont disponibles dans Tatsuoka (1970), Klecka (1980) et Le Maître (1982). Shaw (1972) est l'un des premiers à appliquer cette approche mathématique à un problème géochimique. Il a calculé un polynôme qui lui a permis de faire la distinction entre un premier groupe formé par des roches volcaniques acides et intermédiaires et un deuxième groupe formé par des roches sédimentaires. En appliquant le polynôme calculé à des analyses chimiques de gneiss quartzo-feldspathiques d'origine inconnue, ces gneiss se sont classés essentiellement dans le groupe des roches

volcaniques, ce qui a lui permis de déterminer leur origine. Autrement dit, le polynôme calculé permet non seulement de comparer des groupes prédéterminés, mais aussi de classer dans ces groupes, des données d'analyses chimiques dont l'affinité n'est pas connue au préalable.

Plus récemment, l'analyse discriminante a été utilisée par Richard (1988) et par Richard et Clarke, (1989) pour réaliser une étude comparative entre des granitoïdes de la Nouvelle Ecosse, du Maroc, d'Espagne et de l'Australie. Richard (1988) a effectué une série d'essais afin d'évaluer la robustesse de cette méthode. Les résultats de cette recherche et la compilation des travaux antérieurs lui ont permis de proposer quelques règles essentielles à l'application de la méthode dont nous présentons, ici, le résumé:

- le rapport du nombre d'analyses du plus petit au plus grand groupe ne doit pas être inférieur à 1/10;

- la distribution asymétrique (skewed) qui peut survenir si l'une des unités d'un pluton affleure mal et qu'en conséquence le nombre de ses analyses est relativement faible, n'a pas d'effet notable sur l'efficacité de la discrimination;

- l'effet de la somme constante (closure) des éléments majeurs dans une analyse chimique d'une roche, peut être réduit ou même annulé en transformant ces valeurs selon la formule suivante:

$$X_t = \ln (X/\text{SiO}_2) \quad [1]$$

où X est la valeur analytique de l'élément et X_t sa valeur transformée, considérée comme variable au moment des calculs. Dans ce cas, SiO_2 ne doit pas être impliqué dans la suite du calcul;

- le nombre de variables à considérer dans une analyse discriminante ne doit pas dépasser 10% du nombre total des analyses chimiques de tous les groupes étudiés,

- il est préférable de faire une sélection préalable des variables à manipuler lors de

l'analyse discriminante, au lieu de les incorporer de façon séquentielle dans les calculs.

Le succès de la discrimination est évalué à partir de la matrice de classification. Nous considérons que, si le taux de succès global, qui est égal au rapport de la somme des échantillons bien classés chacun dans son propre groupe sur le nombre total des échantillons analysés exprimé en pourcentage, est supérieur ou égal à 80%, la discrimination est jugée comme étant bonne, et si ce pourcentage est supérieur à 90%, elle est alors considérée comme très bonne.

ETUDE DES PLUTONS HERCINIENS DU MAROC

La chaîne hercynienne du Maroc a subi l'intrusion de plutons granitiques d'âge également hercynien. Ces granitoïdes affleurent exclusivement au nord de l'Accident Sud Atlasique, au sein des terrains paléozoïques dans la Méséta Occidentale et la Méséta Orientale et dans le Bloc Paléozoïque du Haut Atlas Occidental (Fig.1).

Les plutons impliqués dans cette étude sont ceux dont les analyses de composition chimique sont disponibles dans la littérature: Tichka, Oulad Ouaslam, Sebt des Brikiine, Zaer, Oulmes, Ment et Aouli (Fig.1). La banque des données comporte au total 506 analyses de roches plutoniques provenant des différents complexes de granitoïdes hercyniens du Maroc (Tab.I)

Avant de procéder à la comparaison de ces plutons, nous présentons un résumé de la géologie concernant chacun d'eux:

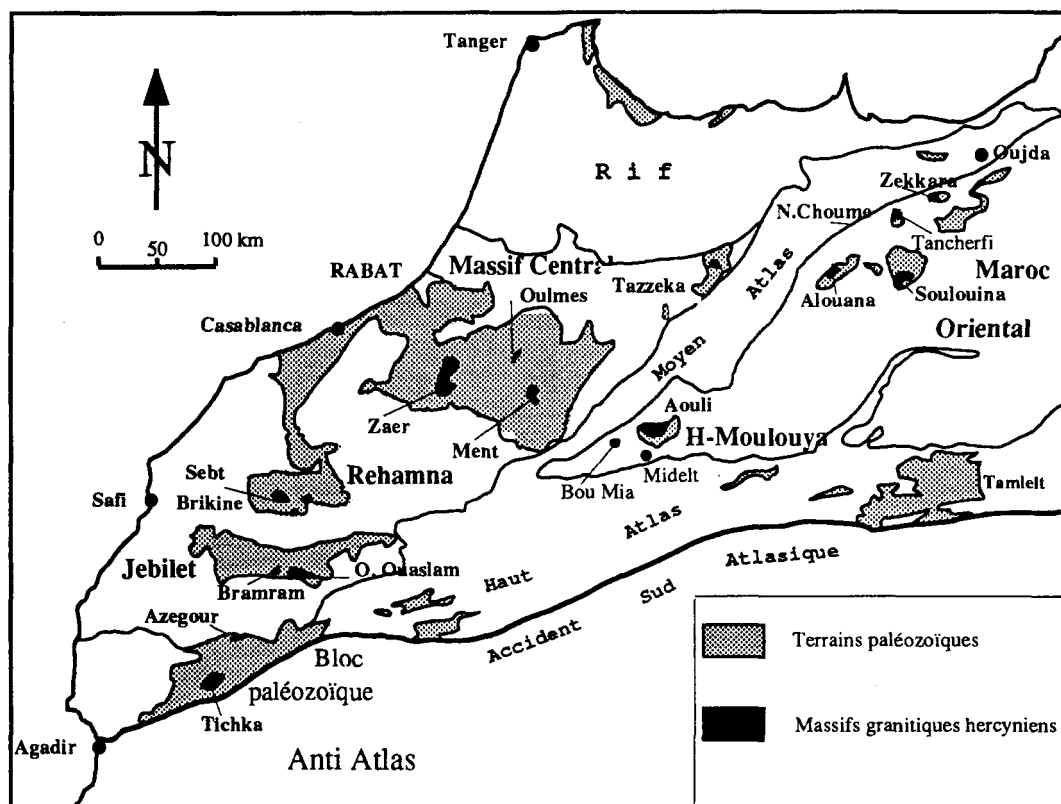


Fig. 1: Carte des Terrains paléozoïques et des massifs de granitoides du Maroc

Tableau I: Origine des données géochimiques des granitoïdes hercyniens du Maroc

Pluton	Nombre analyses	Sources des données
Aouli	168	Oukemeni et Bourne, sous presse
Zaer	155	Mahmood, 1980; Guiliani, 1982
Oulmes	37	Mahmood et Bennani, 1984
Ment	49	Boushaba, 1984; Mahmood et Bennani, 1984
SDBR	14	Richard, 1988
Tbam	8	Richard, 1988
O Ouasl	24	Huvelin, 1977; Richard, 1988
Bramram	3	Richard, 1988
Tichka	48	Vogel et Walker, 1975 ; Gasquet (1992).

SDBR=Sebt des Brikiine; Tbam=Tbamouchent; O Ouasl=Oulad Ouaslam

Pluton de Tichka

Le pluton de Tichka affleure dans le Bloc Paléozoïque du Haut Atlas Occidental (Fig.1), au sein d'une série métamorphique. Il est constitué de cinq groupes de roches: gabbros, diorites, granodiorites-tonalites, monzogranites et leucogranites (Gasquet, 1989). Sa mise en place est considérée comme contemporaine de la phase tectonique majeure, donc syn-tectonique (Gasquet, 1989).

Pluton d'Oulad Ouaslam

Ce pluton affleure dans la boutonnière paléozoïque des Jebilet (Fig.1). Il est composé de tonalites, de granodiorites et de monzogranites (Rosé, 1987; Ben Salah, 1989). Sa mise en place est syn-tectonique (Huvelin, 1977; Lagarde *et al.*, 1982).

Pluton du Sebt des Brikiine

Ce pluton affleure dans le Massif des Rehamna (Fig.1). Il est composé essentiellement d'un granite à biotite (Michard, 1976; Mrini *et al.*, 1992). Sa mise en place est tardi-tectonique (Michard, 1976).

Pluton des Zaer

C'est le pluton le plus grand et le plus occidental du Massif Central, (Fig.1). Il est composé de granites à biotite et de granites à deux micas. Sa mise en place est considérée comme tardi-tectonique (Mahmood, 1980).

Pluton d'Oulmes

Ce pluton est situé au centre du Massif Central (Fig.1). Il est constitué de deux faciès, (1) un granite dit principal à deux micas qui passe à un granite à muscovite vers la périphérie et (2) un granite dit secondaire à grain plus fin. Sa mise en place est syn-tectonique (Termier *et al.*, 1950; Ait Omar, 1986).

Pluton de Ment

C'est le pluton le plus oriental du Massif Central (Fig.1). Il est composé de granites à biotite et de leucogranites. Sa mise en place est post-tectonique selon Boushaba (1984).

Pluton d'Aouli

C'est le pluton oriental de la boutonnière de la Haute Moulouya (Fig.1). Il est composé de quatre faciès: (1) une granodiorite de couleur sombre à grain moyen; (2) un granite gris à grain grossier; (3) un granite rose à grain fin; et (4) un granite leucocrate à muscovite. Ce dernier faciès est isolé du reste du massif affleurant dans deux pointements au sein des schistes paléozoïques encaissants. La mise en place du pluton est tardi- à post-orogénique (Oukemeni et Bourne, sous presse).

CALCULS ET RESULTATS

Dans ce qui suit, seront comparés:

- (1) les quatres faciès du massif granitique d'Aouli entre eux, chacun de ces faciès étant considéré comme un groupe;
- (2) un groupe de plutons du Maroc Hercynien Oriental par opposition à un groupe formé de granitoïdes du Maroc Hercynien Occidental;
- (3) un groupe de plutons dont la mise en place est syn-tectonique à autre groupe de plutons tardi- et post-tectoniques, les plutons de ces deux groupes affleurent tous dans la zone occidentale de la chaîne hercynienne du Maroc.

Etude du pluton d'Aouli

Au total, 168 analyses chimiques de roches provenant des quatres faciès du pluton d'Aouli (Oukemeni et Bourne, sous presse) ont été utilisées, dont 81 appartiennent au granite gris, 71 au granite rose, 11 à la granodiorite et 5 au granite à muscovite.

Chaque faciès est considéré comme un groupe. Le critère de distinction des groupes est basé sur la couleur et la texture attribuées à la roche, sur le terrain, au moment de l'échantillonnage. Les matrices de classification vont être calculées en variant le nombre et la nature des variables (éléments chimiques). En effet, on dispose de 16 variables au total, 9 éléments majeurs et 7 en traces. La transformation des variables est faite selon la formule [1].

Notons que le granite à muscovite forme le groupe le plus petit en nombre d'analyses, en conséquence, il ne répond pas à l'exigence de l'une des règles proposée par Richard (1988), car son rapport au plus grand groupe, qui est celui des granites gris, est égal à 5/81, ce qui est inférieur à 1/10.

La matrice de classification calculée, pour les trois faciès ,sombre, gris et rose (Tab. II, en utilisant 11 variables (TiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , CaO , MgO , FeT , Ba, Rb, Sr, Zr), donne un taux de succès est de $(11+74+61) / 163 = 89.57\%$ et la discrimination est donc très bonne.

Avec les mêmes variables utilisées dans le tableau II, la matrice de classification est calculée cette fois-ci pour tous les quatre faciès incluant le granite à muscovite. Ce calcul permet de comparer les résultats, quand un des groupes considéré comme étant trop petit, selon les normes de Richard (1988), est introduit dans les calculs. Le taux de succès calculé (Tab. III) est de 89.28% ce qui signifie que la discrimination est considérée comme très bonne. Ces résultats sont semblables à ceux obtenus dans le tableau II. La présence du faciès à muscovite dans les calculs n'a donc pas d'influence notable sur les résultats. Désormais, il peut être considéré dans le reste des calculs.

La matrice de classification pour les quatres faciès d'Aouli est calculée seulement par les éléments majeurs (K_2O , Na_2O , Al_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO et FeT) (Tab. IV). Le taux de succès est de 86.30% et la discrimination est considérée comme bonne.

Tableau II: Discrimination entre les unités du pluton d'Aouli

	Granodiorite	Granite Gris	Granite rose	Total
Granodiorite	11 100%	0	0	11
Granite Gris	0	74 91.36%	7 8.64%	81
Granite Rose	0	10 14.08%	61 85.92%	71
Total	11 6.75%	84 51.53%	68 41.72%	163

Taux de succès: $89.57\% = (11+74+61) / 163$

Variables: K_2O , Na_2O , Al_2O_3 , TiO_2 , CaO , $Fe(Total)$, MgO , Zr , Rb , Sr , Ba . Toutes les variables sont normalisées à SiO_2

Tableau III: Discrimination entre les unités du pluton d'Aouli

	Granodiorite	Granite Gris	Granite Muscovite	Granite Rose	Total
Granod	11 100%	0	0	0	11
Gra Gris	0	74 91.36%	1 1.23%	6 7.41%	81
Gra Musc	0	0	5 100%	0	5
Gra Rose	0	10 14.08%	1 1.41%	60 84.51%	71
Total	1 16.55%	84 50%	7 4.17%	66 39.29%	168

Taux de succès: 89.28%

Variables: K_2O , Na_2O , Al_2O_3 , TiO_2 , CaO , $Fe(Total)$, MgO , Zr , Rb , Sr , Ba . Toutes les variables sont normalisées à SiO_2 .

Tableau IV: Discrimination entre les unités du pluton d'Aouli

	Granodiorite	Granite Gris	Granite Muscovite	Granite Rose	Total
Granod	11 100%	0	0	0	11
Gra Gris	2 2.47%	69 85.19%	1 1.23%	11 13.58%	81
Gra Musc	0	0	5 100%	0	5
Gra Rose	0	10 14.08%	1 1.41%	60 84.51%	71
Total	13 7.73%	79 47.02%	7 4.17%	71 42.24%	168

Taux de succès: 86.30%

Variables: K₂O, Na₂O, Al₂O₃, TiO₂, CaO, Fe(Total), MgO.

Toutes les variables sont normalisées à SiO₂.

Tableau V: Discrimination entre les unités du pluton d'Aouli

	Granodiorite	Granite Gris	Granite Musc	Granite Rose	Total
Granod	11 100%	0	0	0	11
Gra Gris	0	55 67.90%	9 11.11%	17 20.99%	81
Gra Musc	0	0	5 100%	0	5
Gra Rose	0	8 11.27%	1 1.40%	62 87.32%	71
Total	11 6.55%	63 37.5%	9 8.92%	79 47.02%	168

Taux de succès: 79.16%

Variables: K₂O, Na₂O, Al₂O₃.

Toutes les variables sont normalisées à SiO₂

Les résultats de ces calculs montrent à chaque fois que la granodiorite et le faciès à muscovite sont très bien classés (100%) dans leur groupe respectif et que chacun de ces deux groupes est nettement distinct des quatre autres. Par contre, dans le cas du faciès gris et du faciès rose, quelques soient la nature et le nombre des variables utilisées dans les calculs, il y a toujours un certain pourcentage d'échantillons qui originellement appartiennent à l'un de ces deux groupes mais qui se trouvent classés par les calcul dans l'autre groupe et vice versa.

L'examen eigenvecteurs, associés aux calculs qui ont donné les tableaux III et IV, suggère que K, Na et Al ont le pouvoir discriminatoire le plus élevé. Cependant, en utilisant seulement ces trois variables dans le calcul de la matrice, le taux de succès pour les groupes qui sont considérés comme classés correctement (Tab. V) a nettement diminué (de 86.30 à 79.16 %) et donc la discrimination est moins bonne. Ceci peut s'expliquer par le fait que le nombre de variables, qui n'est que de trois, est insuffisant pour permettre une bonne discrimination, ou tout simplement que c'est la nature de ces trois variables qui est directement responsable du résultat. Lorsqu'on fait des calculs uniquement avec les deux meilleurs variables (Na_2O et K_2O), le taux de succès (55.35%) diminue encore d'avantage, ce qui démontre clairement que le nombre des variables utilisées dans une analyse discriminante peut avoir une influence directe et considérable sur les résultats.

Notons que lorsque les éléments majeurs et les éléments en traces sont considérés ensembles comme des variables dans l'analyse discriminante, le taux de succès calculé (en %) est très élevé et par conséquent la discrimination est considérée comme très bonne. Ceci signifie que la distinction préalable qui se dégage de la pétrographie et de la couleur des différents faciès du pluton d'Aouli au moment de leur cartographie, est aussi bien évidente au niveau de leur composition chimique à l'exception de quelques échantillons qui se classent mal entre le faciès gris et le faciès rose, ce qui suggère un recouvrement possible entre les domaines chimiques de ces deux groupes.

Il se dégage de cette étude que le pluton d'Aouli est constitué de trois unités distinctes aussi bien par leur pétrographie que par leur chimie: (1) une première unité formée par le groupe de la granodiorite; (2) une deuxième unité formée par le groupe du faciès à muscovite; et (3) enfin une troisième unité formée par les deux faciès, le gris et le rose, ces deux derniers montrent une affinité chimique commune.

L'hypothèse émise par Emberger (1965) et Tisserant (1977), qui stipule que le faciès à muscovite serait une digitation dérivant du faciès calcoalcalin est, ici, mise en cause par l'étude de l'analyse discriminante. Même si le champ des variations des teneurs en SiO_2 est identique dans le faciès à muscovite et dans l'unité calcoalcaline (faciès gris et rose considérés ensemble), la chimie des deux groupes, telle que suggérée par cette étude, reste assez différente pour les distinguer.

Cette étude, par analyse discriminante des différents faciès composant le massif d'Aouli, confirme les résultats déjà obtenus par une étude géochimique classique (Oukemeni et Bourne, sous presse). Cette étude géochimique propose que ce massif est constitué de trois injections magmatiques non liées du point de vue pétrogénétique: (1) un premier pluton constitué par le faciès sombre, surtout granodioritique, situé au nord-est; (2) un deuxième pluton formé par deux faciès, le faciès gris et le faciès rose correspondant aux granites gris et rose; et (3) enfin un troisième pluton formé par le faciès à muscovite, ou granites à muscovite. Ces résultats sont en partie en accord avec les âges déduits de l'isochrone Rb/Sr sur roche totale obtenus par Clauer *et al.*, (1980), soient: 347 ± 17 Ma pour la granodiorite, 319 ± 6 Ma pour le granites gris (granite calco-alcalin de Clauer *et al.*); et également 319 ± 6 Ma pour le granite à muscovite. Les datations U-Pb confirment cette différence avec plus de certitude, les âges calculés par cette méthode pour la granodiorite et le granite gris sont respectivement de 333 ± 2 et 319 ± 1.5 Ma.

Comparaison des granitoïdes de la zone orientale avec ceux de la zone occidentale de la chaîne hercynienne du Maroc

Mis à part l'Anti Atlas, la chaîne hercynienne du Maroc est subdivisée en deux zones: (1) la Chaîne Hercynienne Orientale du Maroc et (2) la Chaîne Hercynienne de l'Ouest du Maroc (Michard, 1976; Piqué, 1983; Hoepffner, 1987; Piqué et Michard, 1981 et 1989).

La zone orientale est composée de plusieurs petites boutonnières paléozoïques; elle inclut celles du Maroc Oriental, du Moyen Atlas, de la Haute Moulouya, du Haut Atlas Central et Oriental, et la partie la plus orientale des massifs paléozoïques de la Méséta Occidentale (Fig.1).

La zone occidentale est composée du Bloc Paléozoïque du Haut Atlas Occidental et de la grande partie de la Méséta Occidentale, incluant les parties centrales et occidentales du Massif central, des Rehamna et des Jebilet (Fig.1).

Ces deux zones se distinguent par la lithologie et les faciès des terrains qui les constituent et surtout par leur évolution tectonique, en particulier l'âge, l'intensité et le sens de la déformation hercynienne. En effet, au Paléozoïque inférieur, à l'exception du bloc des Séhoul, toute la Méséta et l'Anti-Atlas connaissent une évolution très voisine les situant dans un domaine de plate-forme, ou marge continentale, bordant le craton ouest africain (Hoepffner, 1987; Piqué et Michard, 1989). L'évolution de la Méséta orientale s'achève au Dévonien supérieur par une phase de serrage, et cette partie de la chaîne hercynienne devient donc structurée et indurée et probablement émergée. Pendant la même période, il s'établit un régime de transtension dans la Méséta occidentale ce qui permet l'ouverture de bassins en déchirure (Hoepffner, 1987).

La Méséta Orientale, caractérisée par un degré de métamorphisme qui atteint le faciès amphibolite, est considérée comme étant la zone interne de la Chaîne Hercynienne tandis que la Méséta Occidentale représente la zone externe (Hoepffner, 1987; Piqué et Michard, 1989).

L'âge des terrains qui constituent les deux domaines mésétiens varie du Tardi-Précambrien (Eo-Cambrien) au Dévonien. Ils reposent sur un socle caractérisé par une lithologie très variable, un métamorphisme très intense et une déformation polyphasée. Les terrains, d'étendue inconnue, ont été déformés lors de l'orogénèse éburnéenne (~2000 Ma), pour ensuite être repris par l'orogénèse panafricain (570 Ma - 680 Ma). L'étude par réfraction sismique effectuée par Wigger *et al.*, (1992) suggèrent que ce socle est continu, de part et d'autre du Haut Atlas, entre l'accident sud atlasique au sud. Pourtant, des différences existent dans le profil sismique et dans l'épaisseur de la croûte continentale entre la zone atlasique et la Méséta Orientale, ce qui pourrait indiquer une différence fondamentale entre la croûte profonde de ces deux domaines.

Dans ce qui suit, les massifs granitiques qui affleurent au sein de chacune de ces deux zones mésétiennes vont être comparés à partir de leur chimisme. Cette comparaison fait impliquer deux groupes de massifs: (1) un premier groupe constitué par le massif d'Aouli, le seul représentant de la zone orientale, faute d'absence des analyses des autres massifs; et (2) un deuxième groupe formé par des massifs qui affleurent dans la zone occidentale, soient: Tichka, Oulad Ouaslam, Sebt des Brikiine, Zaer, Oulmes et Ment. Les deux plutons de Bramram et Tbamouchent, sont exclus de ces calculs, car le nombre de leurs analyses chimiques est insuffisant. Il faut signaler que les données d'analyses chimiques, de roches appartenant aux différents massifs granitiques, proviennent de sources bibliographiques différentes, et par conséquent, elles ne comportent pas, toutes, les mêmes éléments analysés. Il a donc été nécessaire de faire un choix: soit utiliser un grand nombre d'individus (échantillons de roches) avec un minimum de variables (éléments chimiques) communes à tous ces individus; soit, plutôt, réduire le nombre d'individus et augmenter le nombre de variables. Après un certain nombre d'essais, nous avons opté pour le premier choix. Ceci va malheureusement exclure, de ces calculs, plusieurs éléments en traces qui sont réputés être de

bons discriminants. Les éléments communs à un nombre maximum d'analyses chimiques, sont sept (7) éléments majeurs (Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , CaO , TiO_2 , MgO , FeT) et un seul élément en trace (Ba). Les valeurs des ces éléments ont été normalisées par rapport à SiO_2 suivant la formule [1] présentée ci-haut.

Le taux de succès calculé par la matrice de classification est de 92.27 % (Tab. VI), ce qui donne une bonne discrimination entre les granitoïdes de la zone orientale et ceux de la zone occidentale.

Ceci permet de confirmer que, comparés avec la base de sept (7) éléments majeurs et le Ba, l'ensemble des granitoïdes hercyniens situés dans la zone occidentale ont une composition chimique globale qui diffère de celle du massif d'Aouli situé dans la zone orientale. Cette différence est indépendante de SiO_2 , car tous les plutons montrent les mêmes variations de la teneur en cet élément. Elle est également indépendante des contextes tectoniques de mise en place de ces massifs, tels que révélés par les études géologiques.

La raison qui semble être la plus évidente pour expliquer cette différence, est que les magmas parentaux des deux groupes de massifs, ont pu être affectés par deux sources de contamination différentes pendant leur genèse et leur ascension; ce qui par conséquent permet d'opposer la nature du socle dans le bloc oriental, intrudé par le massif d'Aouli, à celle du socle dans le bloc occidental, où s'est effectuée l'intrusion des autres plutons occidentaux. Dans la mesure où une croûte soit impliquée dans la genèse d'un complexe granitique, soit par assimilation de cette croûte au moment de l'ascension du corps magmatique ou par fusion partielle de sa base, elle va transférer de ses caractéristiques chimiques aux magmas qui lui sont associés. Ainsi, deux plutons de même contexte tectonique de mise en place peuvent avoir des compositions différentes.

Discrimination des granites occidentaux distincts par le contexte tectonique de mise en place

L'objectif est d'étudier l'influence du contexte tectonique de mise en place sur la composition chimique d'un massif granitique. Pour cela, nous avons retenu la classification que les différents auteurs ont attribué à ces massifs, en relation avec les phases tectoniques, soient (1) syn-tectoniques, ou (2) tardi-à post-tectonique. Seuls les granitoïdes de la zone occidentale sont considérés dans cette section d'étude. Le massif d'Aouli, qui appartient à la zone orientale, est exclu des calculs pour éliminer l'influence de la nature de la croûte. Deux groupes de massifs ont été prédéterminés en fonction de leur relation avec les phases de structurations hercyniennes de leur encaissant: (1) un premier groupe constitué par les massifs dits syn-tectoniques (Oulmes, Oulad Ouaslam et Tichka); et un deuxième groupe de massifs, dits tardi- à post-tectonique (Zaer, Ment et Sebt des Brikiine).

La matrice de classification de ces deux groupes est calculée avec huit (8) variables, dont sept (7) éléments majeurs (K_2O , Al_2O_3 , Na_2O , CaO , FeT , MgO , TiO_2) et un élément en traces (Ba) (Tab. VII). Le taux de succès obtenu est faible (68.11%), ce qui signifie que la discrimination n'est pas bonne. En conséquence, il n'y a pas de différence chimique notable qui se dégage de cette étude, entre les deux groupes de massifs étudiés. Autrement dit, la classification syn-tectonique et tardi- à post-tectonique, ne se reflète pas, ici, sur la composition chimique des massifs granitiques. Deux facteurs peuvent être évoqués pour expliquer cette mauvaise discrimination:

(1) la nature et, peut-être, le nombre des éléments chimiques, utilisés comme variables dans ces calculs, ne sont pas adéquats pour permettre la discrimination souhaitée. Pourtant, ceci pourrait se manifester aussi lors des calculs de la comparaison des différents faciès du massif d'Aouli et de la comparaison du groupe des massifs de la Méséta Orientale avec le groupe des massifs de la Méséta Occidentale;

Tableau VI: Discrimination entre les plutons hercyniens de la Méséta Orientale et de la Méséta Occidentale

	Zone Orientale		Zone Occidentale		Total
Zone Orientale	160	95.24%	8	4.76%	168
Zone Occidentale	21	10.14%	186	89.86%	207
Total	181	48.27%	194	51.73%	375

Taux de succès: 92.27%

Variables: Na₂O, K₂O, Al₂O₃, CaO, TiO₂, Fe(total), MgO, Ba.

Toutes les variables sont normalisées à SiO₂

Tableau VII: Discrimination entre les plutons hercyniens syntectoniques et les plutons tardi- et post-tectoniques de la Méséta Occidentale du Maroc

	Tardi+Post-Tectoniques		Syn-Tectoniques		Total
Tardi+Post-Tect.	111	73.51%	40	26.49%	151
Syn-Tect.	26	46.43%	30	53.57%	56
Total	137	66.18%	70	33.82%	207

Taux de succès: 68.11%

Variables: K₂O, Na₂O, Al₂O₃, CaO, TiO₂, Fe (total), MgO, Ba.

Toutes les variables sont normalisées à SiO₂

(2) l'attribution du qualificatif syn-, tardi- ou post-tectonique à un massif, par l'auteur, peut ne pas impliquer tous les faciès qui composent ce massif, et seul celui ou ceux qui sont en contact avec l'encaissant montrent une relation directe, dans le temps et dans l'espace, avec la phase de déformation de l'encaissant. Autrement dit, un massif peut être composite et renfermer à la fois des unités syn- tardi- et post-tectonique, et seule la mise en place, de l'une ou l'autre de ces unités, est retenue par l'auteur. Mais, la qualité des affleurements des granitoïdes étudiés par les différents auteurs et leur relation avec l'encaissant, est très bonne, de sorte que les études structurales ayant permis aux différents auteurs de déterminer le contexte tectonique de la mise en place des plutons sont, à notre avis, fiables.

DISCUSSION

Les résultats de cette étude par analyse discriminante, dans les trois cas précédents, suggèrent que la composition globale d'un pluton ne dépend pas seulement de son contexte tectonique de mise en place, mais aussi de la nature de la croûte qui lui est associée, si cette dernière est impliquée dans la genèse du magma parental. Ceci est valable au moins pour les éléments, ici, retenus comme variables. Ainsi, on comprend pourquoi les diagrammes de discrimination de Maniar et Piccoli (1989), Rogers et Greenberg (1990), entre autres, qui sont essentiellement fondés sur l'utilisation des éléments majeurs, connaissent un succès limité. Evidemment, ceci n'exclut absolument pas la possibilité de déduire le contexte tectonique de mise en place d'un massif granitique à partir des données géochimiques. En effet, de nombreuses études ont prouvé qu'un choix judicieux des éléments chimiques, en particulier les éléments en traces, permettraient une telle discrimination avec beaucoup plus de confiance.

On peut donc déduire de ces calculs, que les signatures chimiques d'un pluton peuvent être influencées non seulement par le contexte tectonique, mais aussi par la composition chimique du milieu auquel est associée la genèse du magma initial. Brown et D'Lamos (1991), ont abouti à une conclusion identique, lors d'une étude sur les granitoïdes de St. Malo en France. En effet, une telle conclusion ne devrait pas être surprenante, car l'interaction entre les magmas ascendants et la croûte continentale est un phénomène connu, mis en évidence par des études isotopiques Rb/Sr entre autres. Mais, en ce qui concerne les éléments majeurs utilisés dans cette étude, les résultats obtenus suggèrent que cette interaction est importante de telle sorte que la discrimination, entre deux groupes qui ont été classés suivant leur contexte tectonique de mise en place, est moins évidente que dans le cas de deux groupes classés suivant le type de croûte continentale impliquée.

CONCLUSIONS

Une étude par analyse discriminante appliquée aux données chimiques des différents massifs de granitoïdes hercyniens du Maroc montre que,

- la distinction entre les quatre unités cartographiques du massif d'Aouli, déjà montrée par une étude géochimique classique, est ici vérifiée;
- dans la Méséta Occidentale, deux groupes de massifs granitiques préalablement déterminés, en fonction de leur contexte tectonique de mise en place, ne montrent pas de différence chimique notable permettant leur distinction;
- la comparaison, des granitoïdes de la Méséta Orientale aux granitoïdes de la Méséta Occidentale, montre une distinction très nette entre les deux groupes. Cette distinction reflète fort probablement, une différence de la nature chimique, opposant une croûte orientale à une croûte occidentale, sans qu'il soit, ici, possible de déceler cette différence. Donc, la zone orientale et la zone occidentale de la chaîne hercynienne du Maroc qui sont opposées par leurs évolutions sédimentaire et tectono-métamorphiques, le sont aussi par la nature chimique de la croûte.

BIBLIOGRAPHIE

- Ait Omar, S. 1986. Modalités de mise en place d'un pluton granitique et ses relations avec la déformation régionale: l'exemple du granite d'Oulmes (Maroc Central). Thèse, Université de Rennes, Rennes, France. 224p.
- Ben Salah, K. 1989. Etude pétrographique, géochimique et structurale des massifs granitiques de Baméga-Tabouchent-Bramram et Oulad Ouaslam, Jebilet-Maroc. Thèse de 3^{ème} cycle, Université Cadi Ayad, Marrakech, Maroc. 296p.
- Boushaba, A. 1984. Contribution à la connaissance géologique du complexe granitique du Ment et de son encaissant (Maroc central), étude pétrologique géochimique et structurale. Thèse de 3^{ème} cycle, Université Mohammed V, Rabat, Maroc. 186p.
- Brown, M. et D'Lemos, R.S. 1991. The Cadomian granites of Mancellia, northeast Armorican Massif of France: relation to the St. Malo migmatite belt, petrogenesis and tectonic setting. *Precambrian Geology*, **51**: 393-427.
- Chayes, F. 1960. On correlation between variables of constant sum. *Journal of Geophysical Research*, **65**: 4185-4193.
- Chayes F. 1962. Numerical correlation and petrographic variation. *Journal of Geology*, **70**: 440-452.
- Clauer, N.; Jeannette, D. et Tisserant, D. 1980. Datations isotopiques des cristallisations successives d'un socle cristallin et cristallophyllien (Haute-Moulouya, Moyen Maroc). *Geologische Rundschau*, **69**: 63-83.
- Emberger, A. 1965. Introduction à l'étude des minéralisations plombifères de la Haute-Moulouya. Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, **181**: 167-180.
- Fisher, R. A., 1936. The use of multiple measurements in taxonomic problems. *Annals of Eugenics*, **79**: 179-188.
- Gasquet, D. 1989. Caractères pétrologiques et géochimiques du Massif du Tichka (Haut Atlas Occidental). Sa place dans l'orogénèse hercynienne du Maroc. Colloque de Géologie franco-marocain, Strasbourg, France.
- Guiliani, G. 1982. Contribution à la géologie du massif granitique des Zaer (Maroc Central). Etude des minéralisations à Sn-W-Mo associées. Thèse de 3^{ème} cycle, Institut Nationale Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 345p.

- Guillaumes, A. 1977. Introduction à la géologie quantitative. Masson, Paris, France, 200p.
- Hoepffner, C. 1987. La tectonique hercynienne dans l'Est du Maroc. Thèse de Doctorat ès Sciences, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France. 280 p.
- Huvelin, P. 1977. Etude géologique et gîtologique du Massif hercynien des Jebilet (Maroc occidental). Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, **232**: 308 p.
- Klecka, W. R., 1980. Discriminant analysis. Sage Publications, Beverly Hills, California, U.S.A., 70 p.
- Lagarde, J.L. et Choukroune, P. 1982. Cisaillement ductile et granitoïdes syntectoniques: l'exemple du massif hercynien des Jebilet. Bulletin de la Société Géologique de France (série 7), **24**: 299-307.
- Le Maître R.W. 1982. Numerical petrology. Elsevier, New York, 281p.
- Mahmood, A. 1980. Etude pétrologique du granite hercynien des Zaër (Massif Central Marocain). Thèse de Doctorat ès Sciences, Université de Clermont-Ferrand, Clermont-Ferrand, France. 421p.
- Mahmood, A. and Bennani, A. 1984. S-type characteristics of the hercynian granitoids of the central Paleozoic massif, Morocco. Geological Magazine, **121**: 301-309.
- Maniar, P.D. and Piccoli, P.M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. Geological Society of America Bulletin, **101**: 635-643.
- Michard, A. 1976. Eléments de Géologie Marocaine. Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, **252**: 408 p.
- Mrini, Z. 1985. Age et origine des granitoïdes hercyniens du Maroc: apport de la géochronologie et de la géochimie isotopique (Sr, Nd, Pb). Thèse, Université de Clermont II, Clermont-Ferrand, France. 156p.
- Mrini, Z., Rafi, A., Duthou, J-L. et Vidal, P. 1992. Chronologie Rb-Sr des granitoïdes hercyniens du Maroc: conséquences. Bulletin de la Société Géologique de France, **163**: 281-291.
- Piqué A. and Michard A. 1989. Moroccan Hercynides: A synopsis. The paleozoic sedimentary and tectonic evolution at the northern margin of west Africa. American Journal of Science, **289**: 286-330.

- Piqué, A. 1983. Structural domains of the Hercynian belt in Morocco, *In* Regional trends in the geology of the Appalachian-Caledonian-Hercynian-Mauritanide orogen. *Edited by* P. Schenk. Reidel, Dordrecht, Holland. 339-345.
- Piqué, A. et Michard, A. 1981. Les zones structurales du Maroc hercynien. *Sciences Géologiques*, **34**: 135-146.
- Richard L.R. 1988. Geochemical discrimination of the peraluminous Devonian - Carboniferous granitoids of Nova Scotia and Morocco. M.Sc. thesis, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, Canada 344p.
- Richard, L.R. and Clarke D.B. 1989. Multivariate statistical models for granites in terrane analysis: Nova Scotia, Morocco, and Iberia. *Geological Society of America Bulletin*, **101**: 1157-1162.
- Rogers, J.J.W. and Greenberg, J.K. 1990. Late-orogenic, post-orogenic and anorogenic granites: distinction by major-element and trace-element chemistry and possible origins. *Journal of Geology*, **98**: 291-309.
- Rosé, F. 1987. Les types granitiques du Maroc hercynien. Thèse, Université Paris VI, Paris, France. 381p.
- Shaw D.M. 1972. The origin of the Apsley Gneiss, Ontario. *Canadian Journal of Earth Science*, **9**: 18-35.
- Smith, F.G., 1972. A computer program to plot random or real proportions of 3 components in a mixture. *Mathematical Geology*, **4**: 263-268.
- Tatsuoka, M. M., 1970. Discriminant analysis - the study of group differences. Institute for Personality and Ability testing, Champagne, Illinois, U.S.A., 57 p.
- Termier, H., Owdenko, B. et Agard, J. 1950. Les gîtes d'étain et de tungstène de la région d'Oulmes (Maroc). Etude géologique, pétrographique et métallogénique. Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc. **82**: 328p.
- Tisserant, D. 1977. Les isotopes du strontium et l'histoire hercynienne du Maroc: Etude de quelques massifs atlasiques et mésétiens. Thèse de 3^{ème} cycle, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France. 103 p.

- Vogel, T.A. and Walker, B.M. 1975. The Tichka Massif, Morocco - an example of contemporaneous acidic and basic plutonism. *Lithos*, **8**: 29-38.
- Wigger, P., Asch, G., Giese, P., Heinsohn, W-D., El Alami, S.O. and Ramdani, F. 1992. Crustal structure along a traverse across the Middle and High Atlas mountains derived from seismic refraction studies. *Geologische Rundschau*, **81**: 237-248.

CONCLUSIONS GENERALES

Dans les trois premiers chapitres, nous avons déjà donné des conclusions partielles concernant l'étude géochimique et géochronologique du pluton d'Aouli et une étude comparative de la chimie des plutons hercyniens du Maroc, par une méthode statistique, l'analyse discriminante. Nous résumerons ici l'essentiel de ces résultats, en essayant de les combiner pour, tout d'abord, dégager les traits essentiels propres au complexe granitique d'Aouli, concernant son évolution magmatique et le contexte géodynamique de sa mise en place, ensuite, discuter de l'impact de ces résultats sur l'âge relatif de la déformation hercynienne dans la région de Midelt et en général dans la Méséta Orientale, et enfin, à la lumière de tous ces résultats, discuter des relations de la Méséta Orientale avec le reste de la chaîne hercynienne du Maroc.

L'étude géochimique du pluton d'Aouli permet de distinguer trois entités pétrogénétiquement indépendantes, et de composition calcoalcaline à tendance subalcaline, mais jamais purement alcaline et dont les mécanismes de l'évolution magmatique se résument essentiellement à la cristallisation fractionnée et/ou la fusion partielle fractionnée. Les entités reconnues sont, (1) l'ensemble des roches qui affleurent dans la partie orientale du massif, regroupées sous le nom de la granodiorite d'Elhassir, (2) les deux faciès qui représentent la majeure partie du massif à l'affleurement, ce sont le granite gris et le granite rose, ces deux granites semblent être liés du point de vue pétrogénétique, le second ayant évolué du premier

par différenciation magmatique (cristallisation fractionnée), et enfin, (3) le faciès leucocrate, dit granite à muscovite, connus dans deux petits plutons (Perdreux et Poulet d'Emberger, 1965), isolés du reste du massif. Cette étude géochimique suggère alors l'hypothèse d'un massif à émissions multiples, hypothèse qui est soutenue par les datations isotopiques, U-Pb sur les zircons. Les âges calculés par cette méthode, dans la présente étude, sont respectivement de 333 ± 2 et 319 ± 1.5 Ma pour la granodiorite et le granite gris. La différence d'âge de 10 Ma, au minimum, entre les deux unités suggère un pluton à émissions multiples. Le granite rose, ne contenant pas de grains de zircons, n'a pas été daté par U-Pb. Mais, il est admis qu'il serait du même âge que le granite gris, si l'on considère nos résultats géochimiques. Ceci n'est pas en accord avec les résultats isotopiques obtenus par la méthode Rb-Sr, (Clauer *et al.*, 1980). Le granite alcalin de ces auteurs daté à 329 ± 6 Ma, correspond au granite rose dans notre étude. Il semble être plus ancien que le granite calcoalcalin, daté à 319 ± 6 Ma, qui correspond à notre granite gris. Cependant, les résultats de Clauer *et al.* (1980) restent toujours discutables, considérant la méthode de datation employée et les marges d'erreurs sur les calculs, ce qui est en faveur de notre hypothèse. Le massif d'Aouli dont la mise en place est épisodique est constitué au moins de deux plutons séparés par la chimie et par les âges absolus, un pluton des granodiorites et un pluton des granites gris et rose. La position du granite à muscovite, qui est isolé du massif, reste problématique. Toutefois, l'étude géochimique suggère qu'il pourrait être considéré comme une entité à part et non considéré comme des digitations du granite gris (calcoalcalin d'Emberger, 1965). Cependant, il ne nous a pas été donné de vérifier cette hypothèse par des datations isotopiques, parce que d'une part, ce granite à muscovite n'a pas été daté dans cette étude, et d'autre part les résultats de Clauer *et al.* (1980) ne sont pas convaincants dans ce sens.

L'étude par analyse discriminante, comportant sur la comparaison chimique des quatre faciès du pluton d'Aouli, a permis la discrimination entre ces quatre faciès, de sorte

que chacun de ces faciès constitue une entité à part qui est distincte des autres; cependant, elle n'exclut pas la possibilité que le granite gris et le granite rose aient des champs de composition chimique qui se recoupent, ce qui est probablement dû à leur parenté mise en évidence par l'étude géochimique.

Le contexte géodynamique de mise en place du complexe granitique d'Aouli, tel que déduit de l'étude géochimique, est tardi- à post orogénique. Ces granitoïdes se sont donc mis en place, après la déformation, lors de la dernière phase de l'orogène hercynien. Ils représentent ainsi le stade de transition correspondant à une stabilisation de la croûte qui suit l'orogène. La mise en place du complexe d'Aouli met donc fin à l'orogénèse hercynienne dans la Haute Moulouya et plus généralement dans l'ensemble de la Méséta Orientale. La déformation hercynienne est en conséquence antérieure à l'âge de la granodiorite, (333 ± 2 Ma), celle-ci n'étant pas déformée. Cette déformation est donc anté-viséenne (anté Carbonifère inférieur). Ces résultats sont en accord avec l'idée que la déformation hercynienne est précoce dans cette région, elle date du Dévonien supérieur (Hoepffner, 1987) si l'on considère l'âge du métamorphisme associé, qui est de 366 Ma, déterminé par Tisserant (1977).

Lors des datations isotopiques des deux unités du complexe d'Aouli, par la méthode U-Pb sur les zircons, des composants hérités ont été mis en évidence dans les noyaux des grains de zircon. Les composants hérités par la granodiorite ont été datés de 1520 Ma et ceux hérités par le granite gris ont donné deux âges, 1245 ± 50 et 1804 Ma. Ceci laisse supposer la présence d'un socle précambrien complexe d'âge variable sous les terrains paléozoïques de la Haute Moulouya. L'existence d'une croûte ancienne enfouie sous le granite d'Aouli dans la Haute Moulouya a été proposée par Nasloubi, (1993) pour expliquer la source commune du plomb filonien d'Aouli et stratiformes dans les arkoses permo-triasiques de Zeida.

L'étude comparative, par analyse discriminante, de la composition chimique des

granitoïdes qui affleurent dans la Méséta Orientale d'une part, et des granitoïdes qui affleurent dans la Méséta Occidentale d'autre part, montre une bonne discrimination du point de vue chimique entre ces deux de granitoïdes, ce qui fort probablement reflète une différence de la nature de la croûte dans les deux zones. Les deux zones peuvent donc être opposées par la nature de la composition chimique de leur croûte. Cette étude a permis de distinguer la croûte orientale de la croûte occidentale, par leur nature chimique, sans qu'il soit possible d'exprimer les différences entre elles. En effet, ces deux zones ont toujours été opposées par leur évolution sédimentaire et tectono-métamorphique hercynienne (Piqué, 1983; Hoepffner, 1987; Piqué et Michard, 1989). Plus récemment, les travaux de Wigger *et al.* (1992), dans une étude par réfraction sismique, ont mis en évidence la continuité du socle précambrien entre le SE du Haut Atlas oriental au sud, et la Haut Moulouya au nord, et que ce socle semble être perturbé à l'aplomb du Moyen Atlas, c'est à dire vers la limite qui sépare la zone orientale de la zone occidentale de la chaîne hercynienne de la Méséta Marocaine. Il s'agit là, d'un élément supplémentaire qui opposerait les deux zones hercyniennes de la Méséta Marocaine. Dans une étude sur le volcanisme du Carbonifère inférieur, Kharbouch (1982) propose un modèle géodynamique dans lequel un plaque océanique plongerait sous la Méséta Marocaine, considérée comme une plaque continentale, suivant un plan de subduction à pendage vers l'ouest. Dans ce contexte la Méséta Orientale serait en position d'une marge active et la Méséta Occidentale, elle, en position de bassin d'arrière arc. Les témoins de cette subduction ne sont pas connus au Maroc, elle est interprété comme étant une paléo-subduction dont les vestiges sont à chercher plutôt plus à l'est ou au nord-est d'après Hoepffner (1987). Ce dernier auteur soulève l'importance d'un magmatisme carbonifère, généralement calcoalcalin, aligné suivant une direction SW-NE, de Tichka au SW, jusqu'à Oujda au nord-est, en passant par le complexe d'Aouli dans la Haute Moulouya (Fig.1). Il souligne que l'hypothèse d'une paléo-subduction a été évoquée à plusieurs auteurs pour expliquer l'occurrence du magmatisme calcoalcalin post-collision dans les segments hercyniens voisins du Maroc, dans la Cordillère Bétique (Puga, 1980), et en Europe Occidentale (Lorenz et Nicholls, 1984; Ouazzani et Lapierre, 1986).

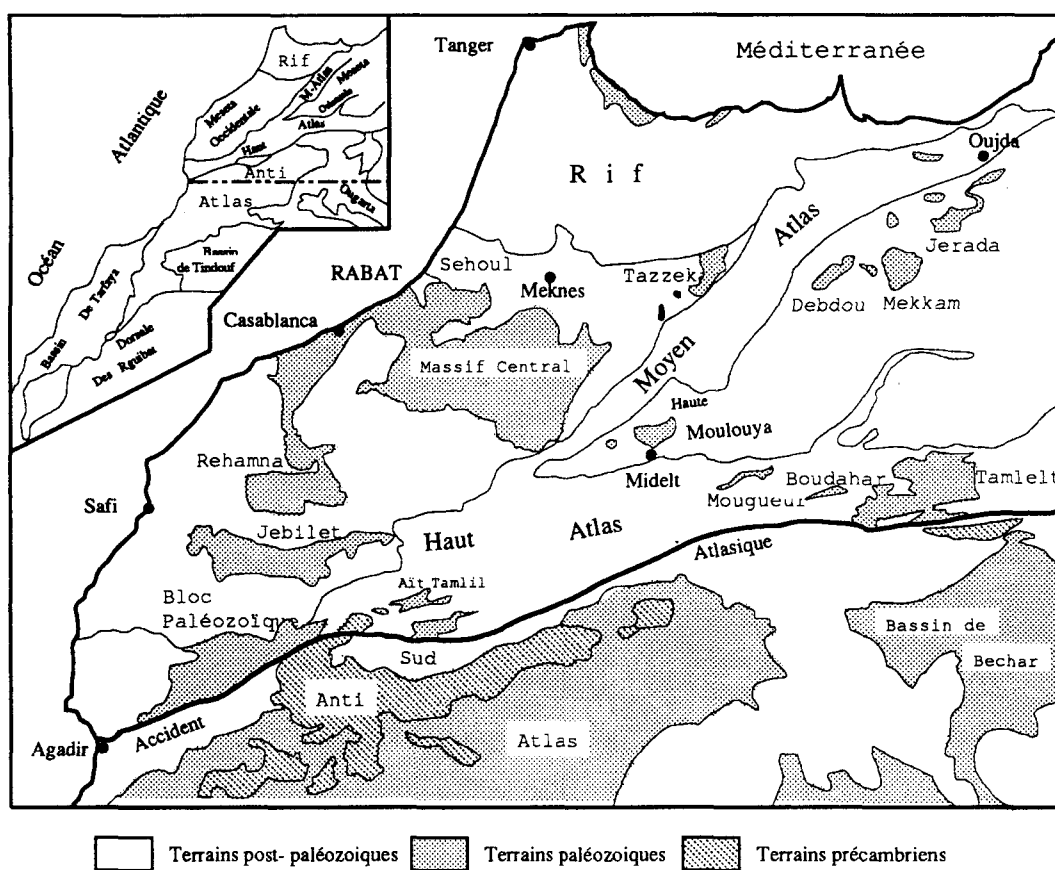


Fig. 1: Carte des Massifs paléozoïques du Maroc; (Provinces du Nord).
Carte insérée: Domaines structuraux du Maroc

Considérant, (1) la présence de deux croûtes de nature chimique différente de part et d'autre de la limite entre les deux zones, orientale et occidentale, de la Méséta Marocaine, (2) l'âge précambrien de la croûte orientale (1245 - 1520 et 1804 Ma), calculé sur les noyaux des zircons hérités par les granitoïdes d'Aouli en Haute Moulouya, et si à ces résultats, on ajoute (3) ceux de Nasloubi (1993), (4) la continuité de cette croûte, de la Haute Moulouya vers le SE sous le Haut Atlas et au delà (Wigger et al., 1992), et (5) la présence d'un alignement de magmatisme calcoalcalin carbonifère, dont on évoque des paléo-subductions pour en expliquer les occurrences, il semble alors que la limite, qui oppose la zone orientale et la zone occidentale de la chaîne hercynienne du Maroc, soit beaucoup plus importante qu'on ne le pense. Elle peut ainsi être considérée comme une limite entre deux blocs continentaux et dans ce cas la chaîne hercynienne du Maroc considérée comme intracontinentale a épousé une suture intercontinentale anté paléozoïque, probablement due à une subduction parallèle et non loin de la ligne Tichka-Oujda dont les évidences n'apparaissent nul part au Maroc. Cette ligne pourrait aussi correspondre à une branche en continuité, vers le nord-est, de l'accident majeur de Tizi n'Test, dont le raccord peut se faire d'après Matté (1986) avec les grandes failles séparant la chaîne appalachienne du nord des Appalaches du sud. Mais, l'activité de cette branche de faille transformante intracontinentale devrait cesser bien avant le Cambrien. En effet, d'autres études géochimiques, géochronologiques, géophysiques et paléomagnétiques, dans ce segment de la chaîne hercynienne du Maroc, sont encore indispensables pour étayer cette hypothèse.

BIBLIOGRAPHIE

- Allary, A. Lavenu, A., et Ribeyrolles, M., 1976. La chaîne hercynienne du Maroc central Sud-Est: Notes et Mémoires du service géologique du Maroc, Rabat, **261**, 170p.
- Bouabdelli, M. 1982. Stratigraphie et évolution structurale du Paléozoïque d'Azrou (NE du Maroc central): thèse 3^{ème} cycle, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 164p.
- Clauer, N., Jeannette, D. et Tisserant, D. 1980. Datations isotopiques des cristallisations successives d'un socle cristallin et cristallophyllien (Haute-Moulouya, Moyen Maroc). *Geologische Rundschau*, Stuttgart, **5**: 383-399.
- Diot, H. et Bouchez J.L., 1989. Les granitoïdes hercyniens de la Haute-Moulouya (Maroc): leur structure primaire déduite de l'ASM. Indications sur leur mise en place. *Bulletin de la Société Géologique de France*, (8), t. V, **4**: 705-716.
- Emberger, A. 1965. Introduction à l'étude des minéralisations plombifères de la Haute-Moulouya. Notes et Mémoires du Service Géologique (Rabat), **181**: 167-180, 1 carte H.t.
- Ganzeef, A., Grouzdef, V. et Mitiaev A. 1978. Structure géologique de la Haute-Moulouya. Mines, Géologie et Energie, Rabat , **44**: 111-114.
- Hoepffner, Ch. 1987. La tectonique hercynienne dans l'Est du Maroc. Thèse de doctorat ès-Sciences, Université Louis Pasteur, Strasbourg.
- Huvelin, P. 1969a. Mouvements hercyniens précoces et structure du Jebel Hadid près de Khénifra (Maroc). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, **269 D**: 2305-2308.
- Huvelin, P. 1969b. Mouvements hercyniens précoces dans la région de Mrirt (Maroc). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, **271 D**: 953-955.
- Huvelin, P. 1973. Déformations hercyniennes précoces dans la région comprise entre Azrou, Aguélmous et Khénifra (Massif hercynien central). Notes et mémoires du service géologique du Maroc, Rabat, **34**, **254**: 93-107.
- Huvelin, P. 1977. Etude géologique et gîtologique du Massif hercynien des Jebilet (Maroc occidental). Notes et mémoires du service géologique du Maroc, Rabat, **232**.

- Jenny, J. et Le Marrec, A. 1980. Mise en évidence d'une nappe à la limite méridionale du domaine hercynien dans la boutonnière d'Ait-Tamlil (Haut-Atlas Central, Maroc). *Eclogae Geologiae Helvetiae*, **73**: 681-696.
- Leblanc, M. et Lancelot, L.R. 1980. Interprétation géodynamique du domaine pan-africain (Précambrien Terminal) de l'Anti Atlas (Maroc) à partir de données géologiques et géochronologiques. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **17**: 142-155.
- Lorenz, V. et Nicholls, I.A. 1984. Plate and intraplate processes of Hercynian Europe during the Late Paleozoic, *Tectonophysics*, **107**: 25-26.
- Matté, P. 1986. La chaîne varisque parmi les chaînes paléozoïques péri-atlantiques, modèle d'évolution et position des grands blocs continentaux au Permo-Carbonifère. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **1**: 9-29.
- Michard, A. 1976. *Eléments de Géologie Marocaine. Notes et mémoires du service géologique du Maroc, Rabat*, **252**.
- Michard, A.; Yazidi, A.; Benziane, F.; Hollard, H. et Willefert, S. 1982. Foreland thrusts and olistostromes on the pre-Saharan margin of the Variscan orogen, Morocco. *Geology*, **10**: 253-256.
- Nasloubi, M. 1993. Genèse et modélisation des minéralisations plombifères de la Haute Moulouya. *Maîtrise en Sciences de la Terre. Université du Québec à Montréal*.
- Ouazzani, H. et Lapière, H. 1984. Le magmatisme carbonifère de la zone briançonnaise (Alpes internes). Essai sur la lecture des magmatismes calcoalcalins tardifs dans les chaînes de collision continentale. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **302**, **II**: 1171-1176.
- Oukemeni, D. 1987. Les nappes hercyniennes des Jebilet Orientales et leur substratum carbonifère. Thèse 3^{ème} cycle, Université Aix-Marseille III, 125 p., 4 planches H.T.
- Piqué, A. 1983. Structural domains of the Hercynian belt in Morocco, in Schenk, P., ed.: *Regional trends in the geology of the Appalachian-Caledonian-Hercynian-Mauritanide Orogen*. Dordrecht, Reidel, 339-345.
- Piqué, A. et Michard, A. 1981. Les zones structurales du Maroc hercynien. *Sci. Géol. Bull.*, **34**: 135-146, Strasbourg.

- Puga, E. 1980. Hypothèses sur la genèse des magmatismes calcoalcalins intraorogéniques et postorogéniques alpins dans les cordillères Bétiques. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **2**: 243-250.
- Sougy, J. 1969. Grandes lignes structurales de la chaîne des Mauritanides et de son avant-pays (socle précambrien et sa couverture infracambrienne et paléozoïque), Afrique de l'Ouest. *Bulletin de la Société Géologique de France*, (série 7), **9**: 133-149.
- Tisserant, D. 1977. Les isotopes et l'histoire hercynienne du Maroc: étude de quelques massifs atlasiques et mésétiens. thèse 3^{ème} cycle, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France. 103p.
- Vauchez, A. 1976. Les déformations anté-triasiques dans la boutonnière d'Aouli Mibladen (Midelt, Maroc). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **282 D**: 425-428.
- Wigger, P., Asch, G. Giese, P., Heinsohn, W.-D., El Alami, O. et Ramdani, F. 1992. Crustal structure along a traverse across the Middle and High Atlas mountains derived from seismic refraction studies. *Geologische Rundschau* **81/1**: 237-248.

ANNEXE

Tableau I: Données d'analyses chimiques du pluton d'Aouli.

#&type	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	LOI	Fb	Ba	Sr	Ga	Nb	Zr	Y	F
201e	57.37	0.92	17.16	2.12	4.45	0.12	4.08	4.36	2.22	4.67	0.26	1.80	165	290	721	20	16	310	34	855
202e	58.95	0.78	16.56	1.84	3.85	0.11	3.90	4.29	2.42	4.40	0.21	1.49	160	148	802	25	16	244	30	735
203e	58.72	0.79	16.99	1.88	3.96	0.10	4.14	4.47	2.52	4.69	0.24	1.60	168	230	829	24	15	235	28	750
204e	59.42	0.74	16.49	1.74	3.65	0.11	3.62	3.99	2.49	4.61	0.19	1.48	182	57	758	21	15	224	26	665
205e	60.25	0.75	16.41	1.82	3.82	0.12	3.76	4.16	2.49	4.61	0.23	1.39	178	90	764	21	16	214	29	660
206e	58.51	0.87	17.97	1.84	3.86	0.10	3.13	4.76	2.35	3.88	0.20	1.18	136	913	725	20	15	190	38	630
207e	59.06	0.87	17.76	1.82	3.82	0.10	3.21	4.72	2.34	3.67	0.23	1.49	135	870	700	22	14	189	29	615
208e	55.97	0.83	17.51	1.99	4.17	0.12	4.03	5.08	2.64	3.98	0.22	1.79	144	330	879	23	15	266	22	825
209e	61.36	0.68	16.29	1.63	3.41	0.10	3.39	4.07	2.59	4.53	0.17	0.89	153	165	773	21	14	195	27	620
210e	59.58	0.71	16.32	1.74	3.65	0.10	3.73	3.99	2.56	4.44	0.20	1.30	157	957	881	24	14	193	26	630
212e	61.62	0.67	16.32	1.67	3.51	0.11	3.64	3.85	2.24	4.72	0.19	1.59	167	32	756	21	15	209	27	695
1g	67.50	0.60	15.31	1.16	2.44	0.08	1.16	2.25	3.86	4.29	0.22	0.40	184	573	225	21	17	207	32	510
2g	67.24	0.63	15.36	1.23	2.58	0.09	1.22	2.31	4.05	4.31	0.26	0.79	188	502	242	21	18	220	33	555
11g	66.96	0.62	15.36	1.22	2.57	0.09	1.19	2.15	3.87	4.35	0.24	0.59	200	644	262	16	18	230	34	595
12g	67.26	0.62	15.16	1.19	2.49	0.09	1.14	2.18	3.82	4.49	0.20	0.39	188	603	240	17	17	223	35	610
13g	67.75	0.62	15.01	1.22	2.56	0.09	1.15	2.28	3.64	4.32	0.22	0.59	194	565	232	19	18	200	30	715
13.1g	69.47	0.52	14.74	1.01	2.12	0.08	0.93	1.93	3.50	4.42	0.17	0.39	219	536	218	21	19	185	33	710
16g	71.57	0.39	13.58	0.73	1.52	0.05	0.63	1.67	3.34	4.57	0.12	0.49	175	377	172	16	14	122	21	235
17g	67.50	0.63	15.46	1.23	2.58	0.08	1.29	2.36	3.82	4.07	0.21	0.59	172	552	239	17	18	216	34	480
18g	66.22	0.66	15.14	1.28	2.68	0.09	1.33	2.12	3.36	4.63	0.24	0.68	201	617	248	19	18	208	32	510
19g	73.36	0.28	13.34	0.56	1.18	0.04	0.38	1.04	3.63	5.04	0.10	0.39	214	350	90	16	17	169	29	380
21g	70.55	0.42	14.42	0.87	1.83	0.08	0.79	1.69	3.72	4.49	0.15	0.78	216	379	169	18	18	190	36	375
24g	76.94	0.07	12.20	0.20	0.43	0.01	0.09	0.22	2.72	6.23	0.03	0.30	255	294	52	16	11	60	24	90
26g	75.70	0.09	12.04	0.29	0.62	0.01	0.10	0.35	2.97	5.85	0.06	0.48	256	138	37	13	13	82	26	100
30g	71.65	0.41	13.62	0.82	1.72	0.08	0.74	1.56	3.45	4.71	0.17	0.47	225	359	124	15	18	186	36	450
31g	69.67	0.45	13.97	0.98	2.05	0.08	0.89	1.65	3.71	4.58	0.14	0.48	232	457	152	19	21	222	40	380
32g	71.19	0.41	14.12	0.89	1.88	0.07	0.80	1.68	3.84	4.59	0.14	0.37	241	481	152	18	20	212	38	415
33g	69.07	0.49	14.52	1.06	2.22	0.07	1.07	2.04	3.71	4.39	0.15	0.38	200	474	175	20	19	203	37	430
34g	71.71	0.39	14.31	0.80	1.67	0.06	0.75	1.57	3.70	4.96	0.15	0.19	214	333	118	21	17	183	30	340
35g	66.93	0.67	15.10	1.30	2.72	0.09	1.29	2.26	3.62	4.40	0.24	0.36	185	538	240	21	18	212	32	450
36g	67.18	0.64	15.43	1.19	2.49	0.09	1.29	2.14	3.69	4.53	0.25	0.49	193	617	247	25	17	204	29	485
38g	74.87	0.21	12.57	0.41	0.86	0.04	0.21	0.66	3.62	4.66	0.08	0.57	258	232	53	21	23	123	37	210
39g	68.14	0.58	15.10	1.15	2.42	0.08	1.10	2.07	3.67	4.40	0.22	0.60	191	561	240	22	18	203	32	480
40g	67.96	0.56	15.20	1.19	2.49	0.08	1.00	2.10	3.63	4.37	0.21	0.40	185	562	247	21	17	213	49	470
41g	69.00	0.52	14.85	1.01	2.12	0.08	1.10	2.00	3.82	4.39	0.23	0.50	209	528	213	20	18	185	37	460

Tableau I: Données d'analyses chimiques du pluton d'Aouli (suite).

42g	71.11	0.38	14.18	0.81	1.69	0.06	0.70	1.70	3.53	4.33	0.18	0.30	204	437	189	17	16	145	31	460
45g	73.51	0.27	13.13	0.62	1.30	0.04	0.39	0.92	3.58	4.78	0.10	0.30	220	305	93	13	16	171	29	390
46g	73.55	0.24	13.35	0.58	1.21	0.05	0.51	0.92	3.70	5.01	0.08	0.60	240	300	91	14	15	159	22	300
47g	74.55	0.17	12.63	0.46	0.97	0.04	0.31	0.85	3.42	4.70	0.06	0.40	217	289	86	15	12	123	21	10
52g	76.31	0.09	12.50	0.29	0.60	0.02	0.15	0.56	3.26	5.47	0.04	0.10	255	278	61	14	13	74	27	200
66g	71.67	0.32	14.47	0.56	1.17	0.05	0.40	0.98	3.90	4.73	0.11	0.90	240	428	143	18	17	167	28	435
67g	76.51	0.10	12.61	0.32	0.67	0.03	0.13	0.51	3.77	5.08	0.05	0.20	256	225	31	16	20	102	42	85
77g	75.07	0.14	12.81	0.43	0.91	0.04	0.17	0.61	3.57	5.14	0.06	0.20	318	195	40	19	22	117	43	415
78g	74.60	0.16	13.37	0.44	0.92	0.03	0.29	0.77	3.81	5.11	0.10	0.50	285	336	64	17	20	132	29	330
82g	72.01	0.31	13.70	0.73	1.53	0.06	0.49	1.51	3.75	4.52	0.11	0.30	198	322	115	17	16	183	27	395
84g	69.67	0.43	14.04	0.92	1.93	0.07	0.84	1.50	3.46	4.86	0.15	0.79	206	442	174	19	18	215	32	430
85g	71.64	0.37	14.03	0.80	1.67	0.06	0.67	1.70	3.73	4.55	0.13	0.70	206	443	151	17	17	192	39	480
89g	70.87	0.38	14.51	0.83	1.73	0.07	0.68	1.50	3.84	4.81	0.09	0.59	241	379	142	18	19	217	38	475
92g	69.90	0.42	14.32	0.91	1.91	0.07	0.75	1.85	3.99	4.10	0.10	0.50	225	500	158	20	19	222	36	460
93g	71.71	0.36	14.08	0.82	1.71	0.06	0.72	1.58	3.81	4.46	0.11	0.40	233	410	144	19	19	206	36	520
94g	70.94	0.36	13.88	0.79	1.66	0.06	0.64	1.39	3.46	4.84	0.05	0.40	252	477	135	18	20	183	34	425
98g	71.53	0.34	14.29	0.77	1.61	0.06	0.71	1.64	3.81	4.56	0.08	0.50	212	384	152	17	15	176	26	370
100g	70.78	0.41	14.93	0.89	1.86	0.07	0.73	1.91	4.20	4.19	0.09	0.50	227	500	161	19	18	207	32	475
112g	70.38	0.40	14.83	0.89	1.86	0.07	0.67	1.69	3.92	4.45	0.17	0.70	252	504	157	17	18	207	36	440
114g	69.89	0.44	14.29	0.98	2.07	0.07	0.82	2.17	3.70	4.09	0.15	0.20	202	411	171	15	17	191	39	500
115g	69.59	0.50	14.74	1.04	2.18	0.08	0.92	2.20	3.78	4.10	0.13	0.29	216	436	178	15	19	206	37	530
121g	70.42	0.47	13.80	0.94	1.98	0.07	0.73	1.50	3.41	4.57	0.11	0.50	225	478	167	15	19	243	34	560
123g	69.87	0.48	14.53	0.98	2.07	0.09	0.98	1.74	3.78	4.62	0.13	0.50	238	517	183	15	19	235	37	555
125g	72.01	0.34	13.54	0.77	1.62	0.06	0.67	1.53	3.68	4.34	0.11	0.20	224	390	130	15	17	185	33	465
126g	72.32	0.33	13.86	0.74	1.56	0.07	0.65	1.55	3.77	4.39	0.09	0.49	232	426	139	16	18	188	36	460
127g	70.94	0.35	14.07	0.79	1.65	0.06	0.65	1.56	3.80	4.66	0.09	0.60	231	420	149	15	17	193	33	470
128g	71.23	0.36	14.30	0.77	1.63	0.06	0.84	1.52	3.88	4.69	0.11	0.70	231	430	142	15	17	195	29	430
138g	65.79	0.74	15.85	1.41	2.97	0.10	1.46	2.50	3.96	4.07	0.27	0.90	177	759	349	20	19	248	33	690
139g	73.64	0.25	12.79	0.60	1.27	0.05	0.47	0.90	3.01	5.36	0.04	0.30	255	399	101	16	23	166	52	320
140g	72.53	0.26	14.54	0.59	1.23	0.04	0.46	1.31	3.99	4.45	0.09	0.59	221	299	133	15	13	170	21	445
141g	74.33	0.18	13.12	0.42	0.88	0.03	0.26	0.77	3.39	5.11	0.02	0.30	263	333	85	15	17	142	46	220
142g	72.23	0.36	14.20	0.76	1.60	0.08	0.74	1.52	3.70	4.65	0.08	0.50	263	412	145	16	18	203	38	525
143g	71.31	0.37	13.80	0.81	1.70	0.07	0.65	1.40	3.46	4.63	0.08	0.40	236	412	132	16	18	202	35	550
145g	73.03	0.30	14.02	0.67	1.41	0.06	0.55	1.26	3.41	4.97	0.11	0.40	260	402	131	14	17	166	36	465
149g	69.99	0.39	14.26	0.79	1.66	0.07	0.71	1.66	3.59	4.45	0.09	0.89	232	465	159	18	19	208	39	595
155g	72.45	0.26	13.37	0.62	1.30	0.06	0.43	0.97	3.49	5.07	0.07	0.60	246	407	108	13	17	164	33	465

Tableau I: Données d'analyses chimiques du pluton d'Aouli (suite).

157g	73.08	0.27	12.95	0.62	1.29	0.04	0.35	0.89	3.56	4.89	0.07	0.59	250	341	88	15	19	184	39	495
160g	75.79	0.09	12.44	0.29	0.60	0.02	0.14	0.43	3.34	5.19	0.01	0.49	309	225	26	18	20	114	40	85
161g	76.70	0.17	12.41	0.41	0.85	0.05	0.17	0.59	3.18	4.97	0.03	0.30	297	228	45	14	18	123	33	375
162g	75.33	0.12	12.43	0.39	0.82	0.05	0.16	0.65	3.55	4.95	0.04	0.50	315	218	50	13	18	123	41	410
164g	75.27	0.16	12.53	0.44	0.92	0.05	0.16	0.61	3.51	4.98	0.04	0.40	333	302	53	15	18	132	42	340
165g	75.55	0.16	12.66	0.45	0.94	0.06	0.21	0.60	3.48	5.03	0.05	0.39	331	286	49	16	19	138	41	380
177g	67.53	0.62	15.12	1.16	2.43	0.08	1.07	2.40	3.62	4.20	0.19	0.50	175	618	249	21	18	224	33	570
178g	67.52	0.66	15.84	1.21	2.54	0.09	1.32	2.32	3.68	4.17	0.21	0.50	175	563	245	20	17	221	33	540
179g	65.84	0.71	16.02	1.35	2.84	0.10	1.54	2.26	3.80	4.05	0.23	0.59	169	663	338	23	17	240	31	555
183g	72.37	0.32	14.00	0.74	1.56	0.06	0.74	1.52	3.77	4.46	0.07	0.30	215	355	129	20	19	188	39	300
187g	67.71	0.62	14.80	1.16	2.44	0.08	1.42	2.03	3.43	4.33	0.17	0.70	186	550	233	20	17	196	32	480
188g	67.46	0.61	15.81	1.15	2.41	0.09	1.21	2.37	3.69	4.53	0.18	0.70	187	559	236	20	17	193	32	505
189g	65.91	0.65	15.45	1.22	2.56	0.09	1.37	2.26	3.77	4.41	0.25	0.89	189	662	274	21	18	213	33	480
190g	67.44	0.70	15.68	1.27	2.66	0.09	1.37	2.46	3.75	4.23	0.23	0.40	193	615	250	21	21	220	34	475
192g	67.29	0.60	15.30	1.09	2.29	0.08	1.12	2.28	3.44	4.59	0.19	0.49	179	608	254	21	15	187	29	480
194g	67.54	0.58	14.93	1.13	2.37	0.09	1.25	2.10	3.68	4.29	0.21	0.79	179	560	302	23	17	197	29	500
196g	66.76	0.66	15.66	1.28	2.70	0.09	1.38	2.29	3.68	4.10	0.20	1.10	174	554	260	22	18	222	34	585
197g	65.54	0.78	15.72	1.48	3.11	0.09	1.45	2.75	3.87	3.59	0.26	0.60	158	648	277	24	18	277	33	625
198g	66.56	0.72	15.94	1.34	2.82	0.09	1.39	2.80	3.87	3.79	0.24	0.50	152	667	275	21	17	237	30	590
199g	67.66	0.64	14.93	1.18	2.47	0.09	1.33	2.30	3.59	3.93	0.19	0.79	172	586	244	21	17	210	32	510
216g	67.62	0.62	15.73	1.13	2.37	0.08	1.27	2.35	3.79	4.25	0.19	0.40	172	643	265	24	16	206	27	585
217p	71.63	0.19	15.18	0.56	1.17	0.05	0.32	0.83	3.37	4.30	0.19	1.20	267	291	145	26	18	100	15	455
218p	72.10	0.17	15.11	0.50	1.06	0.05	0.35	0.88	3.35	4.57	0.21	1.18	267	233	102	28	18	89	0	470
219p	71.51	0.16	15.23	0.48	1.01	0.06	0.29	0.89	3.41	4.59	0.20	0.89	281	312	129	29	17	90	14	420
220p	71.77	0.16	15.18	0.56	1.18	0.05	0.44	0.92	3.80	4.27	0.18	1.00	188	327	151	13	14	92	13	165
221p	71.12	0.19	15.32	0.57	1.20	0.05	0.50	1.23	3.51	4.28	0.15	0.40	177	366	180	20	14	99	14	260
3r	76.57	0.07	12.40	0.26	0.55	0.02	0.06	0.61	3.99	4.63	0.05	0.39	304	99	14	16	20	71	33	170
3.1r	75.87	0.05	12.38	0.32	0.67	0.01	0.01	0.33	3.80	5.13	0.03	0.20	347	44	5	20	26	93	57	120
5r	75.71	0.15	12.89	0.40	0.83	0.03	0.17	0.73	3.72	5.02	0.04	0.30	252	180	50	17	15	109	31	285
6r	73.33	0.31	12.52	0.67	1.40	0.04	0.42	0.61	2.66	6.10	0.10	0.49	242	435	96	13	21	147	43	315
7r	75.97	0.07	12.53	0.39	0.82	0.05	0.11	0.52	3.82	4.83	0.03	0.50	455	40	10	19	31	81	38	445
8r	75.98	0.07	12.55	0.30	0.63	0.04	0.01	0.44	3.76	4.92	0.01	0.29	365	47	15	17	26	96	47	285
9r	76.77	0.05	12.54	0.25	0.52	0.03	0.01	0.37	3.82	5.00	0.01	0.30	399	66	12	17	25	92	56	290
10r	75.98	0.05	12.46	0.26	0.55	0.02	0.01	0.44	3.99	4.86	0.01	0.20	354	27	12	14	26	69	47	170
14r	76.39	0.07	12.96	0.20	0.42	0.02	0.02	0.44	3.59	5.08	0.03	0.49	336	37	21	17	20	65	42	200
20r	72.60	0.25	13.45	0.59	1.23	0.05	0.41	0.91	3.62	5.07	0.07	0.59	219	319	95	16	14	161	25	345

Tableau I: Données d'analyses chimiques du pluton d'Aouli (suite).

25r	76.87	0.05	12.41	0.26	0.55	0.01	0.01	0.42	3.66	5.08	0.04	0.29	235	57	11	15	40	91	50	50
27r	76.59	0.06	12.34	0.25	0.52	0.01	0.09	0.46	3.44	5.46	0.04	0.29	277	107	20	15	14	47	20	45
29r	75.46	0.13	12.47	0.28	0.58	0.02	0.12	0.50	3.69	5.14	0.02	0.19	276	78	23	16	22	112	46	75
44r	76.67	0.09	12.58	0.30	0.64	0.02	0.12	0.48	3.72	5.05	0.04	0.01	251	125	24	16	20	106	40	80
48r	75.76	0.09	12.54	0.32	0.68	0.04	0.08	0.51	3.87	5.00	0.05	0.59	311	111	28	16	23	112	50	330
49r	75.77	0.08	12.30	0.28	0.59	0.03	0.09	0.48	3.22	5.44	0.02	0.40	233	68	23	16	18	80	42	170
50r	76.87	0.05	12.41	0.29	0.60	0.02	0.07	0.59	3.95	5.03	0.03	0.20	315	28	14	16	21	88	48	95
51r	76.00	0.06	12.36	0.29	0.60	0.02	0.02	0.45	3.63	5.08	0.02	0.30	273	46	15	18	16	67	30	140
53r	75.75	0.12	12.47	0.25	0.53	0.01	0.10	0.39	3.90	4.90	0.04	0.40	341	26	12	20	28	94	50	80
54r	76.29	0.05	12.64	0.24	0.50	0.01	0.04	0.42	3.82	5.16	0.03	0.40	310	133	15	21	22	83	39	80
55r	76.15	0.05	12.44	0.21	0.43	0.01	0.08	0.41	3.81	4.95	0.04	0.20	328	32	8	19	22	73	31	85
57r	77.14	0.08	11.81	0.27	0.57	0.01	0.12	0.39	3.13	5.21	0.03	0.40	265	155	31	17	24	82	39	105
58r	75.36	0.05	12.32	0.32	0.67	0.06	0.02	0.38	3.96	4.87	0.01	0.50	478	236	8	19	27	101	53	300
61r	76.47	0.08	12.39	0.26	0.54	0.02	0.10	0.51	3.61	5.02	0.04	0.50	265	133	35	17	16	64	30	90
63r	76.33	0.06	12.55	0.23	0.48	0.01	0.10	0.48	3.76	5.02	0.03	0.40	293	44	20	15	19	80	48	60
65r	76.76	0.04	12.40	0.18	0.38	0.01	0.07	0.46	3.32	5.64	0.01	0.10	233	400	36	15	21	80	38	60
68r	73.49	0.32	13.07	0.55	1.15	0.03	0.35	0.83	3.61	4.66	0.10	0.50	239	304	93	16	19	194	35	400
69r	74.96	0.17	13.36	0.40	0.84	0.02	0.27	0.82	3.84	4.96	0.07	0.40	230	230	66	16	20	129	35	200
72r	78.10	0.07	11.29	0.30	0.62	0.03	0.06	0.34	3.41	4.69	0.01	0.30	358	41	10	18	28	95	58	240
74r	76.16	0.11	12.54	0.33	0.69	0.04	0.22	0.49	3.46	5.49	0.04	0.40	310	121	33	17	17	89	29	320
75r	75.79	0.15	12.26	0.40	0.83	0.04	0.14	0.64	3.36	5.03	0.06	0.40	275	165	48	17	18	118	33	300
76r	77.61	0.05	12.29	0.17	0.36	0.01	0.04	0.34	3.95	4.92	0.07	0.30	386	26	7	18	29	149	45	60
79r	75.81	0.09	12.19	0.33	0.69	0.04	0.08	0.50	3.76	4.80	0.03	0.40	355	83	20	18	24	105	59	365
81r	76.33	0.08	12.68	0.30	0.64	0.02	0.09	0.53	3.96	5.03	0.04	0.50	295	139	29	16	25	105	44	130
83r	76.39	0.06	13.01	0.24	0.50	0.03	0.06	0.49	4.64	4.36	0.05	0.50	368	18	15	19	21	85	62	230
86r	76.59	0.07	12.08	0.29	0.60	0.01	0.01	0.31	3.26	5.36	0.02	0.40	259	44	22	15	19	65	26	95
87r	76.30	0.05	12.44	0.37	0.78	0.01	0.05	0.42	3.81	5.03	0.04	0.40	390	23	12	15	22	101	44	130
88r	76.05	0.04	12.38	0.35	0.73	0.01	0.03	0.41	3.75	4.86	0.01	0.20	401	14	9	16	25	93	44	100
95r	76.84	0.05	12.51	0.30	0.63	0.01	0.01	0.43	3.96	4.85	0.01	0.20	296	125	15	19	18	81	47	40
96r	75.95	0.08	12.41	0.30	0.62	0.02	0.01	0.50	3.59	5.05	0.01	0.60	270	111	29	18	21	97	47	90
99r	76.23	0.07	12.30	0.29	0.60	0.01	0.01	0.44	3.63	5.21	0.02	0.20	228	65	18	18	16	80	31	50
101r	75.98	0.05	12.45	0.29	0.60	0.03	0.01	0.41	3.88	4.69	0.01	0.39	395	13	7	18	24	95	51	255
102r	76.86	0.04	12.69	0.25	0.52	0.04	0.04	0.43	3.91	5.01	0.01	0.30	379	156	12	17	23	109	57	170
104r	75.98	0.05	12.43	0.30	0.63	0.04	0.01	0.37	3.91	4.77	0.01	0.30	449	43	7	19	31	103	55	260
105r	76.65	0.06	12.55	0.29	0.60	0.02	0.01	0.45	4.25	4.55	0.05	0.49	365	67	15	15	19	144	49	100
108r	73.12	0.12	13.93	0.43	0.91	0.04	0.14	0.63	3.63	4.98	0.15	0.50	320	222	65	17	18	82	26	400

Tableau I: Données d'analyses chimiques du pluton d'Aouli (suite).

109r	74.45	0.12	13.99	0.41	0.85	0.05	0.23	0.57	3.36	5.17	0.20	0.79	339	270	72	17	18	85	26	325
110r	72.94	0.22	13.56	0.60	1.25	0.06	0.38	1.06	3.69	4.55	0.10	0.40	290	336	105	15	18	126	30	375
116r	73.14	0.17	13.74	0.44	0.93	0.04	0.22	0.86	3.82	4.84	0.10	0.30	278	265	78	14	17	103	28	370
120r	76.52	0.06	12.57	0.29	0.61	0.01	0.01	0.43	3.71	5.22	0.01	0.50	245	36	17	13	19	87	29	65
132r	76.18	0.05	12.48	0.27	0.57	0.01	0.01	0.62	3.40	5.22	0.01	0.40	212	107	36	13	18	67	40	70
147r	74.25	0.14	13.77	0.38	0.79	0.04	0.23	0.72	3.48	4.95	0.07	0.10	311	395	81	15	16	108	31	441
148r	73.68	0.13	13.77	0.40	0.84	0.04	0.21	0.76	3.89	4.89	0.09	0.40	293	385	82	17	16	112	33	435
150r	76.99	0.07	12.64	0.25	0.52	0.03	0.13	0.42	3.50	5.05	0.02	0.50	399	57	17	15	21	95	47	225
151r	75.53	0.05	12.42	0.27	0.57	0.02	0.01	0.49	3.67	5.08	0.01	0.60	285	22	12	15	18	95	57	50
152r	77.00	0.05	12.63	0.30	0.62	0.01	0.01	0.50	3.47	5.15	0.01	0.10	307	54	13	14	23	79	45	50
153r	76.27	0.05	12.59	0.29	0.62	0.01	0.06	0.42	3.82	4.82	0.01	0.30	346	32	14	14	21	93	60	70
154r	77.33	0.07	12.68	0.26	0.55	0.02	0.08	0.56	3.46	5.20	0.01	0.20	301	68	19	13	18	87	38	115
156r	77.04	0.13	12.24	0.30	0.62	0.03	0.17	0.36	3.42	4.98	0.02	0.89	263	124	27	15	19	118	46	110
159r	76.08	0.10	12.76	0.37	0.77	0.05	0.06	0.48	3.53	4.95	0.02	0.60	360	64	18	17	23	93	58	240
163r	76.80	0.05	12.65	0.25	0.52	0.02	0.01	0.45	3.54	5.02	0.04	0.60	366	47	15	15	22	92	40	75
166r	74.89	0.17	12.74	0.41	0.86	0.04	0.28	0.61	3.42	5.19	0.02	0.39	292	169	46	16	21	121	40	190
167r	77.24	0.12	12.06	0.29	0.62	0.02	0.11	0.46	3.11	5.31	0.02	0.50	280	187	39	14	20	84	36	120
168r	74.41	0.20	12.70	0.46	0.97	0.03	0.22	0.78	3.19	5.03	0.04	0.69	237	245	72	18	16	138	37	255
169r	73.72	0.28	13.61	0.54	1.14	0.04	0.35	1.05	3.79	4.85	0.11	0.60	230	309	92	17	17	175	31	335
170r	75.62	0.11	12.43	0.29	0.60	0.02	0.04	0.45	3.38	5.44	0.04	0.40	300	111	20	16	24	93	46	115
171r	75.45	0.16	12.94	0.39	0.83	0.03	0.28	0.61	3.53	5.30	0.06	0.60	289	162	42	16	21	112	39	195
172r	74.74	0.16	12.77	0.38	0.80	0.04	0.19	0.60	3.47	5.19	0.05	0.70	292	168	42	17	21	117	39	195
176r	66.09	0.73	16.19	1.37	2.87	0.09	1.36	2.79	3.92	3.84	0.26	0.60	162	585	288	21	17	232	28	570
193r	67.11	0.63	15.69	1.19	2.51	0.09	1.47	2.06	3.67	4.44	0.22	0.99	185	524	259	20	17	192	33	520
215r	67.02	0.63	15.05	1.26	2.65	0.08	1.21	2.42	3.86	3.80	0.24	0.59	166	579	251	22	18	232	33	650

Tableau II: Coordonnées de localisation des échantillons analysés du pluton d'Aouli.
(Carte topographique au 1/50 000, feuille: NI-30-II-3c, Aït Iloussane)

Ech	Y	X
1g	362420	32070
2g	362455	32150
3r	363340	31655
3-1r	363045	31615
5r	363280	31700
6r	363210	31940
7r	363130	31650
8r	363130	31630
9r	363125	31535
10r	363200	31575
11g	362535	32153
12g	362570	32215
13g	362615	32285
13-1g	362570	32300
14r	362625	32230
16g	362815	32615
17g	362830	32700
18g	362780	32715
19g	362985	32735
20r	362965	32770
21g	362950	32805
24g	363140	32790
25r	363130	32800
26g	362420	32815
27r	363100	32815
29r	363100	32940
30g	363390	33020
31g	363365	32965
32g	363330	32945
33g	363285	32940
34g	363205	32925
35g	362660	32290
36g	362735	32350
38g	362750	32125
39g	362740	32185
40g	362705	32250
41g	362805	32345
42g	362870	32295
44r	362885	32400
45g	362870	32545
46g	362920	32475

47g	362920	32550
48r	362945	32460
49r	362965	32415
50r	363035	32330
51r	363095	32565
52g	363090	32530
53r	363115	32445
54r	363125	32325
55r	363095	32195
57r	363210	32170
58r	363165	32135
61r	363115	32660
63r	363050	32720
65r	363045	32700
66g	363015	32685
67g	362975	32555
68r	362955	32580
69r	362960	32630
72r	363170	31870
74r	363225	31860
75r	363415	31705
76r	363405	31715
77g	363390	31730
78g	363080	31710
79r	363135	31750
81r	363445	32860
82g	363430	32855
83r	363355	32870
84g	363330	32850
85g	363340	32820
86r	363320	32780
87r	363280	32740
88r	363240	32735
89g	363270	32750
92g	363580	32425
93g	363555	32660
94g	363565	32535
95r	363500	32700
96r	363550	32740
98g	363600	32675
99r	363600	32625
100g	363620	32520
101r	363314	32065
102r	363265	32125
104r	363315	32095
105r	363640	32240

108r	363835	32250
109r	363865	32305
110r	363880	32250
112g	363765	32175
114g	363750	32245
115g	363795	32205
116r	363810	32200
120r	363430	33015
121g	363425	32975
123g	363505	32905
125g	363550	32860
126g	363560	32845
127g	363565	32830
128g	363620	32810
132r	363655	32760
138g	363625	32720
139g	363660	32650
140g	363655	32555
141g	363700	32435
142g	363680	32510
143g	363690	32600
145g	363780	32115
147r	363730	32050
148r	363690	31960
149g	363600	31870
150r	363530	31815
151r	363480	33045
152r	363580	33105
153r	363505	33270
154r	363445	33325
155g	363425	33335
156r	363470	33400
157g	363455	33430
159r	363630	33410
160g	363660	33325
161g	363705	33310
162g	363760	33310
163r	363875	33345
164g	363905	33255
165g	363810	33285
166r	363325	33195
167r	363255	33155
168r	363335	33115
169r	363360	33070
170r	363405	33105
171r	363445	33140

172r	363425	33220
176r	362900	33450
177g	362920	33410
178g	362970	33370
179g	362960	33335
183g	362925	33530
187g	363165	33325
188g	363110	33290
189g	363090	33335
190g	363025	33360
192g	363000	33440
193r	392990	33400
194g	363125	33540
196g	363005	33530
197g	363000	33570
198g	362980	33600
199g	363045	33590
201e	363820	34745
202e	363805	34760
203e	363805	34785
204e	363780	34820
205e	363735	34845
206e	363925	34700
207e	363915	34610
208e	363875	34570
209e	363655	34630
210e	363640	34695
211e	363635	34060
212e	363630	34715
215r	363290	33770
216g	363355	33680
217p	363230	34525
218p	363225	34560
219p	363215	34630
220p	363450	34970
221p	363470	34980

e: granodiorite

g: granite gris

r: granite rose

p: granite à muscovite