



**HAL**  
open science

**Altération sous climat méditerranéen et réactivité différentielle de deux microgranites filoniens et d'un granite d'anatexie de la partie orientale du massif des Maures (Sud-Est de la France)**

Yves Chevalier, Claude Martin

► **To cite this version:**

Yves Chevalier, Claude Martin. Altération sous climat méditerranéen et réactivité différentielle de deux microgranites filoniens et d'un granite d'anatexie de la partie orientale du massif des Maures (Sud-Est de la France). *Etudes de Géographie Physique*, 1991, XX, pp.87-95. hal-00464646

**HAL Id: hal-00464646**

**<https://hal.science/hal-00464646>**

Submitted on 17 Mar 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## ALTERATION SOUS CLIMAT MEDITERRANEEN ET REACTIVITE DIFFÉRENTIELLE DE DEUX MICROGRANITES FILONIENS ET D'UN GRANITE D'ANATEXIE DE LA PARTIE ORIENTALE DU MASSIF DES MAURES (SUD-EST DE LA FRANCE)

par Y. CHEVALIER \* et C. MARTIN \*\*

**RÉSUMÉ :** L'altération météorique récente observée sur deux microgranites filoniens et sur un granite d'anatexie de la partie orientale du massif des Maures (Sud-Est de la France) souligne le rôle déterminant du facteur roche mère [géochimie et texture, basicité du plagioclase] pondéré par le facteur climatique. L'évolution conduit à un cortège minéralogique argileux original, sans gibbsite ni minéraux gonflants. Sur les microgranites, la métahalloysite, la kaolinite et les interstratifiés 14C-14V prédominent ; l'illite et la vermiculite ne représentent que 10 % environ du mélange argileux. Sur granite d'anatexie, la fraction fine des arènes est plus riche en kaolinite, métahalloysite, illite et vermiculite ; l'interstratifié 14C-14V est alors faiblement représenté. Cependant le degré d'altération des matériaux reste modeste en comparaison des arènes sur roches identiques sous climat tropical.

**MOTS CLÉS :** microgranite, granite, filon, anatexie, action hydrothermale, arénisation, altération, argile.

**ABSTRACT :** The recent weathering effect observed on two microgranite dykes and a little body of anatectic granite closely associated with migmatites in the eastern Maures massif (South eastern France) shows the primary effect of the source rock (geochemistry and texture, plagioclasic alkalinity) balanced by climatic factor. In clay mineral fraction, gibbsite and swelling clays don't appear. The bisiallitic process leads to the association of illite, interstratified minerals, kaolinite, metahalloysite and vermiculite. On microgranite rocks, kaolinite and interstratified minerals 14C-14V predominate, whereas the highest contents of kaolinite, illite and vermiculite are registered for the anatectic granite, where the interstratified 14C-14V are very low. Globally, the weathering intensity remains quite limited if we compared with the results obtained on similar rocks under tropical conditions.

**KEY WORDS :** microgranite, granite, dyke, anatexis, hydrothermal effect, sandy processes, weathering, clays.

### I - INTRODUCTION

Dans la partie orientale du massif des Maures, au sein de la zone d'affleurement des migmatites, il a semblé intéressant de suivre l'altération de deux microgranites en position filonienne, mais de compositions chimiques et minéralogiques assez différentes (microgranites du col de Vignon-La Moure et de Minuty-Bélieu), et de la comparer à celle d'un granite d'anatexie (Ramatuella) mis en place en poche dans l'encaissant métamorphique (Fig. 1). Les recherches (Y. CHEVALIER, 1984) ont porté sur des arènes dont les caractères démontrent qu'elles résultent, au moins en grande partie, d'une altération récente : faible épaisseur, texture grossière, évolutions chimique et minéralogique modestes, absence de rubéfaction.

### II - LES ROCHES MÈRES

#### 1. Le microgranite calco-alkalin du col de Vignon-La Moure

Le micro-granite de Vignon-La Moure est une roche moyennement quartzique, subplagioclasique, et leucocrate au sens de J. JUNG et R. BROUSSE (1959). Le point représentatif de cette roche dans le diagramme Q.A.P. de A.L. STRECKEISEN (1968) se trouve dans le champ des microgranodiorites.

D'après J.P. PUPIN (1982 - communication personnelle), la typologie du zircon indique une teneur en

\* U.R.A. 903 du C.N.R.S. et Laboratoire de Pétrologie-Minéralogie de l'Université de Nice, Parc Valrose, 06034 Nice Cédex

\*\* U.R.A. 903 du CNRS, Institut de Géographie, 29 Avenue Robert Schuman, 13621 Aix-en-Provence, Cédex France.

cau assez forte du magma (il en est de même à Minuty). Les manifestations hydrothermales ont abouti à la formation de muscovite secondaire

En lame mince et au microscope polarisant, ce granite apparaît comme une roche microgrenue porphyrique. Il est constitué des minéraux suivants :

- Quartz : en phénocristaux rarement automorphes, souvent corrodés.
- Plagioclases : rarement automorphes, fréquemment séricitisés et parfois zonés (An 30-32 andésine au coeur, An 20 oligoclase sur le bord). Le contour des cristaux a un aspect déchiqueté. Les plagioclases sont souvent associés à la biotite.
- Biotite : xénomorphe, souvent chloritisée, voire muscovitisée. Il y a un passage presque continu entre biotite et muscovite par altération hydrothermale.
- Feldspath potassique : dans les micropegmatites. La présence relativement fréquente de micropegmatites résultant de la cristallisation contemporaine de quartz et de feldspath potassique contigus et interstitiels est propre aux formations filoniennes.
- Zircon et apatite : en inclusion dans les minéraux cardinaux. La roche présente en outre une mésotase constituée d'un fond microgrenu de micas et de plagioclases. Celle-ci est très peu affectée par l'hydrothermalisme.

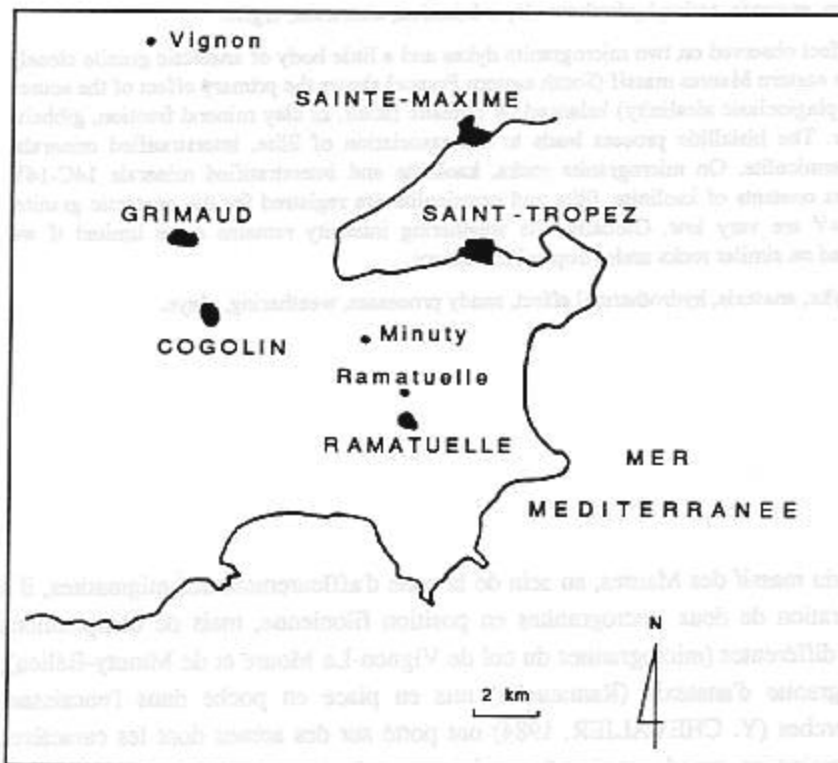


Figure 1  
Schéma de localisation

## 2. Le microgranite calco-alcalin de Minuty-Béliu

Le microgranite de Minuty-Béliu est une roche monzonitique leucocrate très fortement quartzique dans la classification de JUNG et BROUSSE, et un vrai microgranite pour STRECKEISEN.

L'étude au microscope polarisant montre, comme à Vignon, une roche microgrenue porphyrique :

- Le quartz, subautomorphe, non cataclaté, apparaît en phénocristaux englobant des résidus hydrothermaux. Mais la corrosion des cristaux est plus développée qu'à Vignon.
- Les plagioclases, de type oligoclase (An 20 à 30), sont en phénocristaux subautomorphes, séricitisés et souvent associés à la biotite.
- La biotite est plus chloritisée et muscovitisée qu'à Vignon.
- Comme minéraux accessoires, on note le zircon, l'apatite et la pyrite.

• La mésostase est plus fine qu'à Vignon. Séricite et calcite hydrothermales y occupent une place importante. Le plagioclase est l'oligoclase (An 15). Le feldspath potassique est du microcline.

### 3. Le granite d'anatexie de Ramatuelle

Le granite de Ramatuelle est un granite leucocrate fortement quartzique pour JUNG et BROUSSE, et un granite monzonitique selon la classification de STRECKEISEN. L'étude des zircons indique qu'il s'agit d'un granite d'anatexie peu évolué, presque migmatitique, car il n'y a pas beaucoup de surcroissances.

L'étude au microscope polarisant fournit les indications suivantes :

• Le quartz forme des îlots de grains recristallisés, s'emboîtant par des indentations. Il présente une extinction roulante et est toujours xénomorphe. - Le feldspath potassique apparaît en grandes plages mâclées, souvent perthitiques, quelquefois Carlsbad. Il englobe parfois des cristaux de plagioclase, de quartz ou de biotite.

• Les plagioclases se présentent en phénocristaux, rarement séricitisés, mâclés polysynthétiques et subautomorphes, de basicité An 18-24 (oligoclase). Ils sont parfois associés à la biotite.

• La biotite, parfois chloritisée, montre des exsudations d'oxyde de fer dans les clivages, liées à un début d'altération superficielle. Elle est automorphe et se transforme en muscovite par altération hydrothermale.

• Les minéraux accessoires sont le zircon, l'apatite et la monazite.

### 4. La chimie des roches mères

En considérant les faciès dans l'ordre Vignon-Ramatuelle-Minuty, la série apparaît de plus en plus siliceuse, de moins en moins alumineuse et ferrifère (Tab. I). En outre, les taux de calcium, de magnésium et de sodium, élevés à Vignon, diminuent fortement de Vignon à Minuty. Nous avons donc une séquence de roches microgrenues porphyrique et anatectique d'acidité croissante depuis le granite de Vignon jusqu'à celui de Minuty, avec le granite de Ramatuelle en position intermédiaire.

Tableau I - Composition chimique des roches mères et des arènes

Les teneurs sont exprimées en % du poids de l'échantillon séché à 105°C

	VIGNON			RAMATUELLE		MINUTY	
	Roche mère	Arène bas	Arène haut	Roche mère	Arène	Roche mère	Arène
SiO <sub>2</sub>	66,60	63,91	61,77	69,40	67,65	72,90	72,91
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,60	17,05	18,79	14,80	15,85	13,60	13,98
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,58	3,90	4,63	0,33	2,74	0,22	1,68
FeO	3,05	0,58	0,45	2,50	0,87	2,15	0,65
CaO	2,85	1,51	0,26	1,65	0,22	0,90	0,25
MgO	1,98	2,14	1,59	1,20	1,11	1,00	0,69
Na <sub>2</sub> O	3,28	2,39	1,68	3,06	1,70	2,20	2,49
K <sub>2</sub> O	3,42	3,27	3,84	4,30	4,45	3,42	3,86
TiO <sub>2</sub>	0,55	0,62	0,60	0,44	0,49	0,36	0,23
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,26	0,23	0,09	0,28	0,15	0,22	0,08
H <sub>2</sub> O+	1,28	3,78	5,52	1,10	4,11	2,43	2,46
Total	99,45	99,38	99,22	99,06	99,34	99,40	99,28
Fer total	4,00	4,54	5,12	3,10	3,71	2,60	2,40
Fer "libre"	-	1,82	3,00	-	1,80	-	1,10
Ki	7,26	6,37	5,59	7,97	7,26	9,15	8,86
pH	-	7,46	7,40	-	7,61	-	7,71
Somme bases m.moles	189	150	112	155	106	113	103
Fer total : exprimé en Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fer "libre" : méthode DEB    Ki : rapport moléculaire SiO <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>							

Les trois faciès étudiés ne sont pas alcalins, comme le montre le rapport moléculaire  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / \text{Al}_2\text{O}_3$  qui est inférieur à 1. Par ailleurs,  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  est inférieur à  $\text{SiO}_2 / 6$ . Mais à l'intérieur de cette série, on constate, de Vignon à Minuty, une dominante de plus en plus grande de  $\text{K}_2\text{O}$  sur  $\text{Na}_2\text{O}$  et de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sur  $(\text{CaO} + \text{MgO})$ .

A Minuty, l'influence hydrothermale est nettement confirmée par la teneur relativement élevée en  $\text{H}_2\text{O}^+$  (2,43 %), soit deux fois plus que dans les autres faciès, ainsi que par une proportion notable de corindon normatif traduisant l'apparition de muscovite secondaire aux dépens de la biotite, et par la présence de calcite.

### III - PRÉSENTATION DES PROFILS D'ALTÉRATION ET GRANULOMÉTRIE DES ARÈNES

#### 1. Arènes sur microgranite de Vignon

L'échantillonnage a été réalisé à 1,8 km à l'Est du hameau de Vignon (43,2°N - 6,3°E), sur le mamelon de la Brie (461 m), en haut de versant. On dispose, en cet endroit, d'une coupe de 12 m de haut sur 40 m de long, avec un talus en pente forte (60 %). Le versant sur lequel est située la coupe, constitue le flanc ouest d'un vallon d'orientation NW-SE, qui fait partie du système hydrographique du ruisseau de Sartouresse. Dans ce secteur, les précipitations annuelles moyennes avoisinent 1000-1100 mm et la température moyenne, 13°C (climat méditerranéen humide).

Deux niveaux ont été retenus au centre de l'affleurement : le premier à la base de la coupe (Vignon bas), et le second immédiatement sous les niveaux pédologiques (horizon C) : Vignon haut.

Les analyses granulométriques (Tab. II) portent sur l'arène tout-venant. En comparant les deux niveaux, on note :

- La suprématie des phases grossières > 200  $\mu\text{m}$  dans la partie basse de la coupe (84,3 %).
- Et l'affinement du matériel vers le haut du profil. Les fractions < 200  $\mu\text{m}$  deviennent prédominantes (51 % de l'arène tout-venant). L'ensemble < 20  $\mu\text{m}$  (limons fins + argile) passe de 1,8 à 19 % entre le bas et le haut du profil. La médiane confirme ce comportement : elle est de 890  $\mu\text{m}$  en bas de coupe dans les altérites les moins évoluées, et atteint 250  $\mu\text{m}$  dans l'arène de l'horizon C.

Tableau II - Analyse mécanique des arènes

Les résultats sont exprimés en % du poids des échantillons tout-venant séchés à l'air

	CX + GR	SG	Sg	SF	LG	LF	A
Vignon Bas	35,00	49,20	7,80	3,70	2,50	1,80	0,01
Vignon Haut	9,00	40,00	10,00	10,50	11,30	15,00	4,00
Ramatuelle	29,00	51,00	5,50	3,10	3,00	8,20	0,25
Minuty	36,00	42,30	4,50	3,80	5,30	7,30	0,70

CX + GR : cailloux et graviers (>2000 $\mu\text{m}$ )	SF : sables fins (100 $\mu\text{m}$ à 50 $\mu\text{m}$ )	LF : limons fins (20 à 2 $\mu\text{m}$ )
SG : sables grossiers (2000 $\mu\text{m}$ à 200 $\mu\text{m}$ )	LG : limons grossiers (50 à 20 $\mu\text{m}$ )	A : argile (< 2 $\mu\text{m}$ )
Sg : sables gréseux (200 à 100 $\mu\text{m}$ )		

#### 2. Arènes sur microgranite de Bélieu-Minuty

Sur la départementale 61, légèrement en retrait de la route, à 5 km au Nord de Ramatuelle (42,25°N - 6,6°E), à 20 m d'altitude, une carrière permet d'observer plusieurs faciès pétrographiques diversement altérés. Les arènes atteignent jusqu'à 3 m d'épaisseur.

Le profil retenu, sur microgranite, n'est arénisé que sur 50 cm d'épaisseur. Les horizons humifères sont très minces (lithosol).

Dans l'arène, les phases grossières (> 200  $\mu\text{m}$ ), essentiellement constituées de quartz, représentent 78 % du total. La médiane de la distribution granulométrique est de 800  $\mu\text{m}$ .

#### 3. Arènes sur granite d'anatexie de Ramatuelle

Plus au sud, sur la même départementale 61, à 130 m d'altitude, 1,3 km avant Ramatuelle (43,22°N - 6,62°E), une petite carrière exploitée pour l'empierrement montre une roche affleurant en amphithéâtre semi-

circulaire sur 50 m de long et 7 à 10 m de puissance. Près de Ramatuelle, comme à Minuty, les précipitations annuelles moyennes dépassent 900 mm ; la température moyenne est de l'ordre de 15-16°C.

Seule la partie superficielle (1 à 1,5 m) du profil de Ramatuelle est altérée. Partout ailleurs, la roche est massive et peu fissurée.

Dans l'arène (horizon C), graviers et sables grossiers (> 200 µm) représentent 80 % du total. La médiane est ici de 1250 µm.

#### 4. Synthèse sur les analyses granulométriques

En considérant les arènes les plus évoluées de la série Vignon- Ramatuelle-Minuty, on constate que c'est le faciès le plus basique (Vignon) qui présente le taux des éléments > 200 µm le plus faible (49 %), alors que ceux des sables entre 50 et 20 µm (20,5 %) et des particules < 20 µm (19,0 %) y sont les plus élevés.

Pour les mêmes phases granulométriques, le faciès le plus acide (Minuty) présente respectivement les valeurs de 78,3 ; 8,4 et 8,1 %.

Les arènes sur granite d'anatexis de Ramatuelle occupent une position intermédiaire.

Cependant ces comparaisons n'ont pas forcément grande signification, car rien ne permet d'affirmer que les profils d'altération n'ont pas subi de troncature. Et, dans cette optique, nous devons souligner l'extrême grossièreté du matériel de la base de la coupe de Vignon.

### IV - TRANSFORMATIONS CHIMIQUES ET MINÉRALOGIQUES

#### 1. L'évolution géochimique

Le tableau I fait ressortir, pour tous les profils étudiés, une augmentation ou une bonne stabilité des teneurs en fer total et en alumine entre les roches mères et les arènes. L'alumine se concentre partout, mais davantage à Vignon (+ 20 %, en valeur relative par rapport à la roche mère) qu'à Minuty (+ 2 %). De même, l'altération provoque un accroissement des teneurs en fer "libre" (méthode DEB) et en fer ferrique lié au réseau des minéraux ; mais le fer total reste constant, à Minuty, ou se concentre, à Vignon et Ramatuelle. Il est vrai que dans des conditions non réductrices, avec des pH compris entre 7,11 et 7,61, les arènes constituent des milieux peu favorables à la lixiviation du fer et de l'aluminium (G. PEDRO, 1964 ; P. SEGALÉN, 1964). Par ailleurs, nous n'avons pas observé de traces d'illuviation de ces éléments, sous forme d'hydroxydes ou de minéraux argileux. Il est donc possible de les utiliser comme invariants dans l'étude des évolutions géochimiques. L'alumine étant beaucoup mieux représentée que le fer, nous avons opté pour la méthode isoalumine (J. DEJOU et al., 1977).

Le tableau III présente, selon cette méthode, l'évolution des teneurs entre les roches mères et les arènes. Il permet d'établir les échelles de mobilité croissante suivantes :

VIGNON BAS	: Fer total < Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> < TiO <sub>2</sub> < MgO < SiO <sub>2</sub> - K <sub>2</sub> O < Na <sub>2</sub> O < CaO
VIGNON HAUT	: Fer total < Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> < K <sub>2</sub> O < TiO <sub>2</sub> < SiO <sub>2</sub> < MgO < Na <sub>2</sub> O < CaO
RAMATUELLE	: Fer total < Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> < K <sub>2</sub> O < TiO <sub>2</sub> < SiO <sub>2</sub> < MgO < Na <sub>2</sub> O < CaO
MINUTY	: K <sub>2</sub> O - Na <sub>2</sub> O < SiO <sub>2</sub> < Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> < Fer total < MgO < TiO <sub>2</sub> < CaO

L'augmentation de certaines teneurs isoalumine entre les roches mères et les arènes (fer total à Vignon et Ramatuelle, Na<sub>2</sub>O et K<sub>2</sub>O à Minuty) ne manque pas de surprendre. Elle résulte vraisemblablement de l'hétérogénéité des roches. A Minuty, la diminution de la teneur isoalumine en eau de constitution vers le haut du profil pourrait être le signe d'un lessivage des particules fines des arènes. Mais cette évolution se serait également traduite par un appauvrissement des matériaux en alumine, ce qui est démenti dans le tableau I.

En dépit de ces réserves, les séquences obtenues font ressortir la grande mobilité du calcium, la bonne stabilité du fer total et la faible mobilité du potassium.

Tableau III - Composition chimique des roches mères et des arènes

Les teneurs sont exprimées en g pour 100g de roche mère séchée à 105°C, sauf pour la somme des bases (en m.moles / 100g)  
 Les variations relatives (entre parenthèses) sont exprimées en % de la concentration de l'élément dans la roche mère.  
 Le signe - marque les pertes et le signe +, les gains.

	VIGNON				RAMATUELLE			MINUTY		
	Roche mère	Arène bas	Arène haut		Roche mère	Arène		Roche mère	Arène	
SiO <sub>2</sub>	66,60	58,47 (-12,2)	51,28 (-23,0)		69,40	63,17 (-9,0)		72,90	70,93 (-2,7)	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,60	15,60 (0,0)	15,60 (0,0)		14,80	14,80 (0,0)		13,60	13,60 (0,0)	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,58	3,57 (+516)	3,84 (+562)		0,33	2,56 (+676)		0,22	1,63 (+641)	
FeO	3,05	0,53 (-82,6)	0,37 (-87,9)		2,50	0,80 (-67,6)		2,15	0,63 (-70,7)	
CaO	2,85	1,38 (-51,6)	0,22 (-92,3)		1,65	0,20 (-87,3)		0,90	0,24 (-73,3)	
MgO	1,98	1,96 (-1,0)	1,32 (-33,3)		1,20	1,04 (-13,3)		1,00	0,67 (-33,0)	
Na <sub>2</sub> O	3,28	2,19 (-33,2)	1,39 (-57,6)		3,06	1,59 (-48,0)		2,20	2,42 (+10,0)	
K <sub>2</sub> O	3,42	2,99 (-12,6)	3,19 (-6,7)		4,30	4,16 (-3,3)		3,42	3,76 (+9,9)	
TiO <sub>2</sub>	0,55	0,57 (+3,6)	0,50 (-9,1)		0,44	0,46 (+4,5)		0,36	0,22 (-38,9)	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,26	0,21 (-19,2)	0,07 (-73,1)		0,28	0,14 (-50,0)		0,22	0,08 (-63,6)	
H <sub>2</sub> O+	1,28	3,46 (+170)	4,58 (+258)		1,10	3,84 (+249)		2,43	2,39 (-1,6)	
Total	99,45	90,93 (-8,6)	82,38 (-17,2)		99,06	92,76 (-6,4)		99,40	96,58 (-2,8)	
Fer	4,00	4,15 (+3,8)	4,25 (+6,3)		3,10	3,46 (+11,6)		2,60	2,33 (-10,4)	
Bases	189	137 (-27,5)	93 (-50,8)		155	99 (-36,1)		113	100 (-11,5)	

Fer : fer total, exprimé en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Bases : somme des bases (en m.moles pour 100g de roche mère).

Les pertes de silice sont inversement proportionnelles à l'acidité du faciès : la diminution des teneurs isoalumine atteint 12,2 et 23,0 % à Vignon ; 9,0 % à Ramatuelle et 2,7 % à Minuty. L'appauvrissement des matériaux en silice est, de toute façon, toujours très faible, comparé à celui observé dans les pays tropicaux sur faciès voisins (généralement plus de 50 % - M. BONIFAS, 1959 ; N. LENEUF, 1959 ; J. HERVIEU, 1968 ; etc.).

Sur tous les faciès, les bases sont éliminées. De la roche mère aux arènes, les concentrations isoalumine, exprimées en millimoles pour 100 g de roches mères, passent de 189 à 137 et 93 à Vignon, de 155 à 99 à Ramatuelle et de 113 à 100 à Minuty. Calcium et magnésium sont lixiviés sur tous les faciès ; mais le calcium l'est davantage dans le sens acide-basique (- 73 % à Minuty, - 87 % à Ramatuelle, - 92 % à Vignon haut). Le sodium se concentre sur le faciès le plus acide (Minuty). Même en invoquant une certaine hétérogénéité des roches, il faut admettre que cet élément se conserve bien sur le faciès où la basicité normative du plagioclase est la plus faible. Son élimination augmente sur les faciès plus basiques (- 48 % à Ramatuelle, - 33 et - 58 % à Vignon). Ces valeurs sont un peu plus fortes que celles obtenues dans le Morvan et sur une grande partie du Massif Central (D. COLLIER, 1961 ; J.M. DAUTRIA, 1970 ; F. SEDDOH, 1973), nettement plus élevées que sur les granites des Vosges (A. MEILHAC, 1970), mais comparables à celles du Limousin occidental (J.P. DUTREUIL, 1978). En revanche, elles sont moins fortes qu'en pays tropicaux (J. HERVIEU, 1968) où, sur des faciès comparables, le calcium et le sodium sont éliminés à plus de 80-90 % de façon constante.

Le potassium subit des pertes très faibles ou se concentre légèrement. Les teneurs isoalumine diminuent de 12,6 et 6,7 % à Vignon et de 3,3 % à Ramatuelle. En revanche, on observe une augmentation de 9,9 % sur le profil de Minuty, pour lequel nous avons déjà évoqué l'influence de l'hétérogénéité des roches. La bonne stabilité du potassium est à rapprocher, sur tous les faciès, de l'abondance des feldspaths potassiques, peu altérables, de la muscovitisation hydrothermale des biotites et d'une évolution assez peu poussée des micas noirs (voir *infra*, paragraphe 3-a).

Lors de l'altération, l'alcalinisation des matériaux par rapport aux alcalino-terreux et par rapport à l'aluminium est croissante en allant du faciès le plus basique (Vignon) au plus acide (Minuty). De même, avec l'augmentation de l'acidité du faciès, les arènes deviennent de plus en plus potassiques par rapport au magnésium.

Comme le fer et l'aluminium, le titane est peu mobile à Vignon (évolutions isoalumine : + 3,6 et - 9,1 %) et à Ramatuelle (+ 4,5 %). Le résultat concernant Minuty (- 38,9 %) n'a pas, lui, grande signification, compte

tenue de la faible teneur des roches en cet élément et de l'hétérogénéité des matériaux.

Enfin, la teneur isoalumine en acide phosphorique baisse nettement sur le granite d'anatexie de Ramatuelle (- 50 %) et plus encore sur les microgranites de Minuty (- 64 %) et de Vignon (-73 % au sommet du profil). Ce comportement témoigne de l'extrême sensibilité de l'apatite à l'altération chimique.

## 2. Les minéraux argileux

Les analyses par diffractométrie des rayons X des phases < 2 µm (Tab. IV), ont fourni les résultats suivants :

- Absence de chlorite, de smectite, d'interstratifiés gonflants ou de gibbsite.
- L'interstratifié 14C-14V est bien représenté dans les arènes des deux microgranites (Vignon et Minuty), alors qu'il est presque toujours absent sur le granite d'anatexie de Ramatuelle.
- L'interstratifié 10-14V est partout peu abondant, moins que la vermiculite qui représente en général 10 à 20 % du mélange. La plus forte teneur en vermiculite est rencontrée dans les altérites sur granite d'anatexie de Ramatuelle.

Tableau IV - Minéraux argileux de la fraction < 2µm des arènes.

Analyse semi-quantitative par diffractométrie des rayons X.

Les résultats sont exprimés en dixièmes de la somme des minéraux argileux.

	Kaolinite et Métalloysite	Illite	10 - 14 V	14C - 14V	Vermiculite
Vignon Haut	4	1	traces	4	1
Ramatuelle	5	2	0,5	0,5	2
Minuty	2	1,5	0,5	5	1

Une détermination plus précise de la composition des mélanges argileux a été tentée en attribuant tout le  $K_2O$  de la phase < 2 µm à l'illite (1% de  $K_2O$  équivaut dans ce cas à 10 % d'illite - O.P. MEHRA et M.L. JACKSON, 1959) et en évaluant la proportion de kaolinite par analyse thermopondérale. Appliquées à des mélanges argileux aussi complexes que ceux du massif des Maures, ces méthodes ne sont pas d'une fiabilité totale. Elles fournissent cependant des résultats intéressants :

• Pour les fractions < 2µm, en ne considérant que les niveaux les plus altérés de chaque faciès, on constate que les concentrations en illite sont maximales à Minuty (27 %), sur le microgranite le plus acide, alors qu'elles atteignent 23 % sur le microgranite de Vignon et 22 % sur le granite d'anatexie de Ramatuelle (Tab. V). En suivant le même ordre des faciès, la kaolinite augmente de 38 à 47 %, et le restant (chlorite, vermiculite et interstratifiés C-V) passe de 35 à 31 %. Cette évolution s'accompagne d'une hydratation décroissante (de 16,5 à 14 %) et d'une diminution du Ki de 2,61 à 2,41.

Tableau V - Données complémentaires sur la composition chimique et minéralogique de la fraction < 2µm des arènes.

Les teneurs (minéraux et  $H_2O^+$ ) sont exprimées en % du poids de la fraction < 2µm.

	Illite	Kaolinite et	Autres minéraux	$H_2O^+$	Ki
Vignon Haut	23	43	34	15,6	2,42
Ramatuelle	21,8	47,2	31	14,0	2,41
Minuty	27	38	35	16,5	2,61

Ki : rapport moléculaire  $SiO_2 / Al_2O_3$ .

• Les éléments < 2 µm ne représentent qu'une infime partie des arènes (4 % en haut du profil de Vignon, 0,25 % à Ramatuelle et 0,7 % à Minuty). Il est donc très important d'étendre les investigations à des



fractions plus grossières (Tab.VI). Si l'on compare les résultats obtenus pour les différentes phases granulométriques, il s'avère que la concentration en kaolinite, maximale dans la fraction  $< 2 \mu\text{m}$ , diminue régulièrement vers les sables grossiers, dans tous les niveaux d'arènes considérés et sur tous les faciès. Quelles que soient les phases granulométriques, c'est le granite d'anatexie de Ramatuelle qui présente les concentrations en kaolinite les plus élevées.

Tableau VI - Teneur en kaolinite des différentes classes granulométriques et de l'arène tout-venant.

Les valeurs sont exprimées en % du poids de la fraction considérée.

	$< 2 \mu\text{m}$	2 - 50 $\mu\text{m}$	50 - 100 $\mu\text{m}$	100 - 315 $\mu\text{m}$	Arène tout-venant
Vignon Bas	44,6	16,7	9,3	1,8	1,21
Vignon Haut	43,2	25	13,3	11,2	10,9
Ramatuelle	47,2	29,6	20,5	16,6	5,0
Minuty	38,3	20,5	11,2	6,5	3,7

• L'estimation de la teneur en kaolinite des arènes tout-venant prend en considération les proportions des différentes phases granulométriques analysées et les teneurs en kaolinite de chacune de ces phases. Elle pose donc comme hypothèse que la kaolinite est essentiellement représentée dans les fractions  $< 315 \mu\text{m}$ . Une hiérarchisation des richesses en kaolinite des arènes les plus évoluées existe entre les différents faciès. Les teneurs diminuent dans le sens basique-acide : elles décroissent de 10,9 % sur le microgranite de Vignon-La Moure à 3,7 % sur celui de Minuty-Bélieu (le plus riche en silice, mais aussi en sodium et en potassium). Notons par ailleurs que sur le profil de Vignon, la teneur en kaolinite passe de 1,21 % à 10,9 % entre la base et le sommet de la coupe, sous l'effet d'une altération plus poussée des matériaux. Celle-ci a pour autres conséquences notables la diminution de la taille des éléments granulométriques (médiane = 200  $\mu\text{m}$ , contre 890) et l'abaissement du rapport moléculaire  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  (5,59 ; contre 6,37).

### 3. Synthèse : influence des facteurs de l'altération

La porosité et la perméabilité des roches n'ont pas été mesurées. Mais leur influence est sans doute plus sensible sur la vitesse d'abaissement du front d'altération que sur les caractères des évolutions minéralogiques. En revanche, sur ce dernier point, les observations effectuées permettent d'appréhender le rôle de deux facteurs essentiels : la composition minéralogique des roches et le climat.

#### a) Le facteur minéralogique

D'après les évolutions des teneurs isoalumine en CaO et en  $\text{Na}_2\text{O}$ , l'anorthite est toujours beaucoup plus vulnérable que l'albite : elle subit des pertes comprises entre 52 et 92 % de la teneur initiale, alors que la plus forte diminution de la teneur en albite s'élève à 58 %.

La stabilité du  $\text{K}_2\text{O}$  confirme la bonne résistance des feldspaths potassiques et des micas blancs. Mais elle témoigne également du faible entraînement du potassium des ferromagnésiens. L'évolution de ces minéraux se traduit essentiellement par l'oxydation du fer ferreux en fer ferrique (avec une diminution des teneurs isoalumine en FeO comprise entre 68 et 88 %), le passage d'une partie du fer sous forme "libre" et l'augmentation de l'hydratation des matériaux. Enfin, le magnésium est éliminé entre 1 et 33 %. Au total, l'ensemble minéralogique ferromagnésien apparaît fortement affecté par l'altération. Cependant celle-ci ne semble pas provoquer une destruction des minéraux primaires. Les évolutions se font par transformation.

Des observations ci-dessus, il ressort que la fragilité des minéraux s'établit dans l'ordre croissant suivant :

---- Orthose et Micas blancs - Ferromagnésiens - Albite - Anorthite --->

Les pertes totales d'oxydes calculées à partir des bilans isoalumine (après soustraction de l'eau de constitution et en exprimant tout le fer sous forme ferrique) varient entre 3 et 21 %. Les valeurs maximales sont enregistrées à Vignon (11 % à la base de la coupe et 21 % au sommet du profil ; contre 9 % à Ramatuelle et 3 % seulement à Minuty). La fragilité du faciès le plus basique (Vignon) est donc évidente, puisqu'à la base du profil, où les arènes ont pourtant une granulométrie très grossière, les pertes chimiques globales sont déjà très sensibles. Certes, pour la plupart des éléments, les pertes relatives sont plus faibles au bas de la coupe de Vignon qu'à

Ramatuelle et Minuty, mais le granite de Vignon est, de beaucoup, le plus riche en élément mobiles.

#### b) Le facteur climatique

Sur le terrain d'étude, les températures moyennes annuelles avoisinent 13 à 16°C et les précipitations annuelles moyennes 900-1100 mm. De telles conditions climatiques correspondent, selon I. BARSHAD (1966), à un domaine bisiallitique avec apparition de minéraux à deux couches, sans exclure cependant l'apparition de kaolinite. Toutefois les études hydrochimiques menées dans le massif des Maures (Y. CHEVALIER, 1984 ; C. MARTIN, 1986, 1989) définissent une altération actuelle très nettement bisiallitique : les indices RE(1) d'Y. TARDY (1969) dépassent 3,0.

La bisiallittisation se traduit par la présence, dans les matériaux altérés, d'illite, d'interstratifiés 10-14V et 14C-14V, et d'un peu de vermiculite. Mais il n'y a jamais de smectite.

La kaolinite est en quantité non négligeable. Elle représente, selon les cas, 17 à 45 % de la fraction < 2 µm. Dans cette même fraction, le rapport moléculaire SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> est compris entre 2,41 et 2,61 - valeurs assez proches du rapport théorique (2,0) de la kaolinite. Ces résultats conduisent à évoquer une monosiallittisation ménagée (Y. TARDY, 1969). Cependant la kaolinite est peut-être en grande partie héritée de phases d'altération monosiallitiques antérieures à l'altération bisiallitique actuelle, comme l'a montré C. MARTIN (1986) dans la partie occidentale du massif des Maures.

## VII - CONCLUSION

La réactivité des faciès par rapport aux agents d'altération supergènes apparaît en grande partie réglée par la chimie de la roche mère, à laquelle on peut d'ailleurs relier la basicité normative du plagioclase et la teneur en ferromagnésiens. L'intensité de l'altération est plus élevée sur le microgranite "basique" de Vignon, que sur celui "acido-alcalin" de Minuty. La texture de la mésostase, plus grossière à Vignon qu'à Minuty, joue peut-être également un rôle. Le granite d'anatexie de Ramatuelle, qui occupe une position intermédiaire sur le plan chimico-minéralogique, subit une altération moindre qu'à Vignon, mais plus poussée qu'à Minuty.

Le facteur climatique ne doit pas non plus être négligé. En effet, les précipitations sont un peu plus abondantes à Vignon qu'à Ramatuelle et Minuty.

La kaolinite est présente dans tous les profils. Sa relative abondance oblige même à se poser la question d'un éventuel héritage. En effet, les conditions climatiques actuelles appellent une altération de type nettement bisiallitique. L'illite, la vermiculite et les interstratifiés 10-14V et 14C-14V constituent certainement le cortège minéralogique représentatif des évolutions géochimiques en cours. L'influence de la topographie, très favorable au drainage à Vignon (haut de versant), plus favorable au confinement à Minuty (à 20 m d'altitude seulement), ne se manifeste pas nettement.

**Remerciements :** Nous sommes reconnaissants à M. ICOLE de sa lecture attentive du manuscrit et de ses remarques pertinentes.

(1)  $RE = (6 K_2O + 6 Na_2O + 2 CaO - SiO_2) / (K_2O + Na_2O + CaO)$ , les pertes d'éléments minéraux étant exprimées en valeurs molaires.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARSHAD I. - 1966. The effect of variation in precipitation on the nature of clay mineral formation in soils from acid and basic igneous rocks. *Proc. Int. Clay Conf. Jerusalem*, vol. 1, p. 167-173.
- BONIFAS M. - 1959. Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique. *Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lor.*, n° 17, 159 p.
- CHEVALIER Y. - 1964. *Altération météorique actuelle et paléaltérations du socle provençal (France). Evolution comparée des roches et des eaux de lessivage correspondantes*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Nice, 691 p.
- COLLIER D. - 1961. Mise au point sur les processus d'altération des granites en pays tempéré. *Ann. Agron.*, vol. 12, p. 273-331.
- DAUTRIA J.M. - 1970. *Contribution à l'étude de la dynamique pédologique de quelques éléments majeurs et mineurs en milieu granitique de la zone tempérée humide*. Thèse Doct. Spéc., Université de Clermont-Ferrand, 245 p.
- DEJOU J., GUYOT J., ROBERT M. et PEDRO G. - 1971. *Evolution superficielle des roches cristallines et cristallophylliennes dans les régions tempérées*. I.N.R.A., Paris, 464 p.
- DUTREUIL J.P. - 1978. *Les granites de l'ouest du Limousin, leur pétrologie, leur altération, leurs sols*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Limoges, 537 p.
- HERVIEU J. - 1968. Contribution à l'étude de l'alluvionnement en milieu tropical. *Mém. ORSTOM*, Paris, n° 24, 466 p.
- JUNG J. et BROUSSE R. - 1959. *Classification modale des roches éruptives utilisant les données fournies par le compteur de points*. Masson, Paris, 112 p.
- LENEUF N. - 1959. *L'altération des granites calcoalcalins et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés*. Thèse Doctorat d'Etat, Paris, 210 p.
- MARTIN C. - 1986. *Contribution à l'étude de la dynamique des versants de roches métamorphiques ; l'exemple du massif des Maures*. Thèse Doctorat d'Etat, Université de Paris I, 935 p.
- MARTIN C. - 1989. Erosion et altération chimiques actuelles sur roches métamorphiques dans le massif des Maures (Var, France). *Sci. Géol. Bull.*, vol. 42, n° 2, p. 91-106.
- MEHRA O.P. et JACKSON M.L. - 1959. Constancy of the sum of mica unit cell potassium surface and interlayer sorption surface in vermiculite-illite clays. *Soil Sc. Soc. Amer. Pr.*, vol. 23, n° 2, p. 101-105.
- MEILHAC A. - 1970. *Origine et évolution des minéraux phylliteux dans les altérations des granites en pays tempérés. Bilan minéralogique et géochimique sur deux massifs des Vosges*. Thèse 3<sup>ème</sup> Cycle, Université de Strasbourg, 71 p.
- PEDRO G. - 1964. *Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines*. Thèse Doctorat d'Etat, Paris, 344 p.
- SEDDOH F. - 1973. *Altération des roches cristallines en Morvan (granites, granophyres, rhyolites). Etude minéralogique et micromorphologique*. Thèse Doctorat d'Etat, Université de Dijon. *Mém. Géol. Université de Dijon*, n° 1, 377 p.
- SEGALEN P. - 1964. Le fer dans les sols. Initiations-Documentations techniques, *ORSTOM*, Paris, 150 p.
- STRECKEISEN A.L. - 1968. Account of classification and nomenclature of igneous rocks. Propositions à l'IUGS pour le colloque d'août 1968 à Prague, 68 p.
- TARDY Y. - 1969. *Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique*. Thèse Doctorat d'Etat, Université de Strasbourg. *Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lor.*, n° 31, 274 p.