

# Analyse de la dynamique de mise en place et de la différenciation par écoulement d'un filon de rhyolite de la région d'Azegour (Haut-Atlas occidental - Maroc).

Iz-Eddine EL AMRANI EL HASSANI

عز الدين العمراني الحسني

## ملخص

تحليل الديناميكية والتخلق الناتجان عن السيلا ن لأحد عروق الريوليت الموجودة بمنطقة أزكور (الأطلس الكبير الغربي). تتميز عروق الريوليت الموجودة بمنطقة أزكور بتخلق ميكانيكي عرضي جد مهم. التحليل الدقيق لهذا التخلق، على ضوء بعض مفاهيم البترولوجية البنيوية، مكننا من توضيح اتجاه تدفق الصهير وتقدير بعض خصائصه الريولوجية خلال المرحلة الأخيرة من تموضعه. تخلق ميكانيكي طولي خفي لكنه جد معبر تم اكتشافه كذلك بداخل هذه العروق.

## RESUME

Les filons de rhyolite de la région d'Azegour se caractérisent par une importante différenciation mécanique transversale. L'analyse de celle-ci, sur un filon-type, à l'aide des concepts de la Pétrologie Structurale, nous a permis de préciser le sens d'écoulement du magma dans son conduit filonien et d'estimer ses caractéristiques rhéologiques vers le dernier stade de sa mise en place. Une deuxième différenciation mécanique, cette fois-ci longitudinale, assez discrète mais très significative, a été mise en évidence au sein de ce même filon.

## SUMMARY

**Analysis of dynamics and flow differentiation of a rhyolitic dyke in Azegour Area (Western High Atlas -Morocco).** The rhyolitic dykes in Azegour area are characterized by an important transverse mechanical differentiation. The analysis of the latter permitted, with help of the concept of structural petrology to precise the flow sense of the magma and estimate its rheologic characteristics during the last stage of its flow. A second mechanical differentiation, this time longitudinal, too discrete but very significant has been evidenced within the same dyke.

## INTRODUCTION

La région d'Azegour, appartenant au versant Nord du segment occidental de la chaîne du Haut Atlas, correspond à un socle paléozoïque formé d'une épaisse série volcano-sédimentaire, tectonisée et percée par un petit massif granitique : le granite d'Azegour. Ces terrains primaires, recouverts vers le Sud par une importante transgression crétacée, sont parcourus par un réseau filonien très dense et d'extension kilométrique (fig. 1).

Différentes familles de roches filoniennes y ont été distinguées (PERMINGEAT, 1957 ; EL AMRANI, 1984) : lamprophyres ; microgranites ; rhyolites etc... Pratiquement tous ces filons se caractérisent par une certaine organisation structurale symétrique. Cette organisa-

tion intrafilonienne, particulièrement plus nette sur les filons de rhyolite, peut être schématisée comme suit : une zone centrale porphyrique passant rapidement et progressivement à des bordures aphanitiques.

De nombreux filons et sills présentant ce type d'organisation sont décrits dans la littérature. Parmi les exemples typiques :

— les dykes et sills basiques à phénocristaux d'olivine de l'île de Skye en Ecosse (GIBB, 1968) ;

— les filons de dolérite et de microgranite des Vosges en France (GAGNY, 1968 ; BLANCHARD, 1979 ; EL AMRANI, 1981 ; ANDRE et GAGNY, 1982).

— les filons de dolérite et de microgranite de Guevgueli en Grèce (BEBIEN et GAGNY, 1980 ;

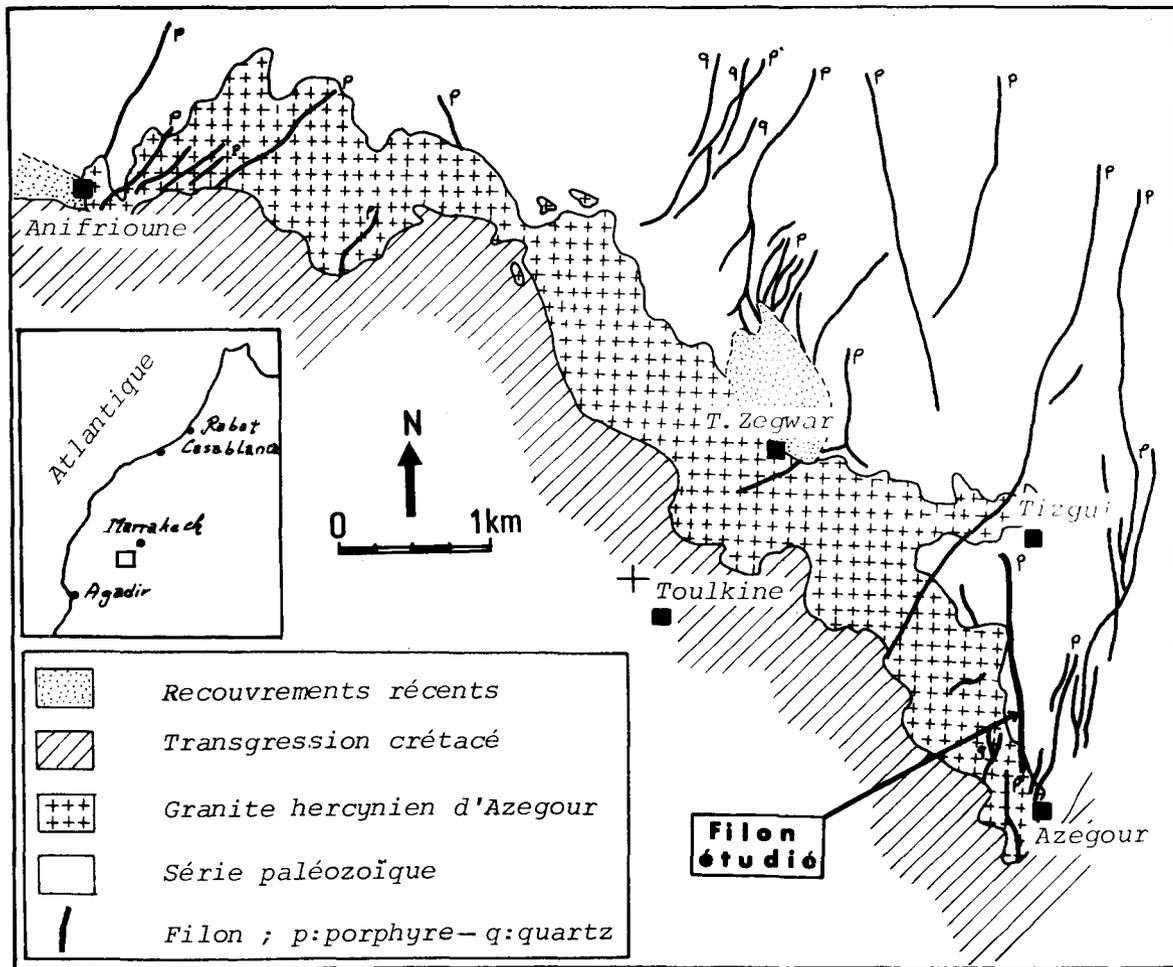


Figure 1 : Carte d'affleurements du réseau filonien dans la région d'Azegour (d'après PERMINGEAT, 1957, simplifiée).

BEBIEN, 1982).

Des considérations portant sur la texture et la minéralogie de ces roches ont permis de rejeter l'hypothèse d'une mise en place successive de magmas pauvres puis riches en phénocristaux ainsi que celle d'un simple effet thermique pour expliquer cette organisation intrafilonienne. Il est actuellement admis que cette organisation est le résultat d'une migration des phénocristaux, vers la zone axiale du conduit filonien, sous l'effet de l'écoulement.

Ce concept de différenciation liée à l'écoulement ("flowage differentiation"), apparu pour la première fois dans les travaux de W.R.A. BARAGAR (1960), a été appuyé, par la suite, par les travaux expérimentaux et théoriques de : S. BHATTACHARJI et C.H. SMITH (1964); S. BHATTACHARJI (1967); P.D. KOMAR (1972) a et

b) et (1976); M. BARRIERE (1976); J.Ph. BLANCHARD et al. (1979); A. FERNANDEZ et al. (1983); etc...

## PRESENTATION DU FILON ETUDE

### BUT – CHOIX – ECHANTILLONNAGE

Le but principal de ce travail est d'analyser la dynamique de mise en place et les phénomènes de différenciation par écoulement, qui sont derrière l'organisation structurale observée sur les filons d'Azegour.

Notre étude sera menée sur un filon de rhyolite (fig. 2), choisi comme filon-type pour les nombreux avantages qu'il présente :

– une grande extension (1,5 km) avec une

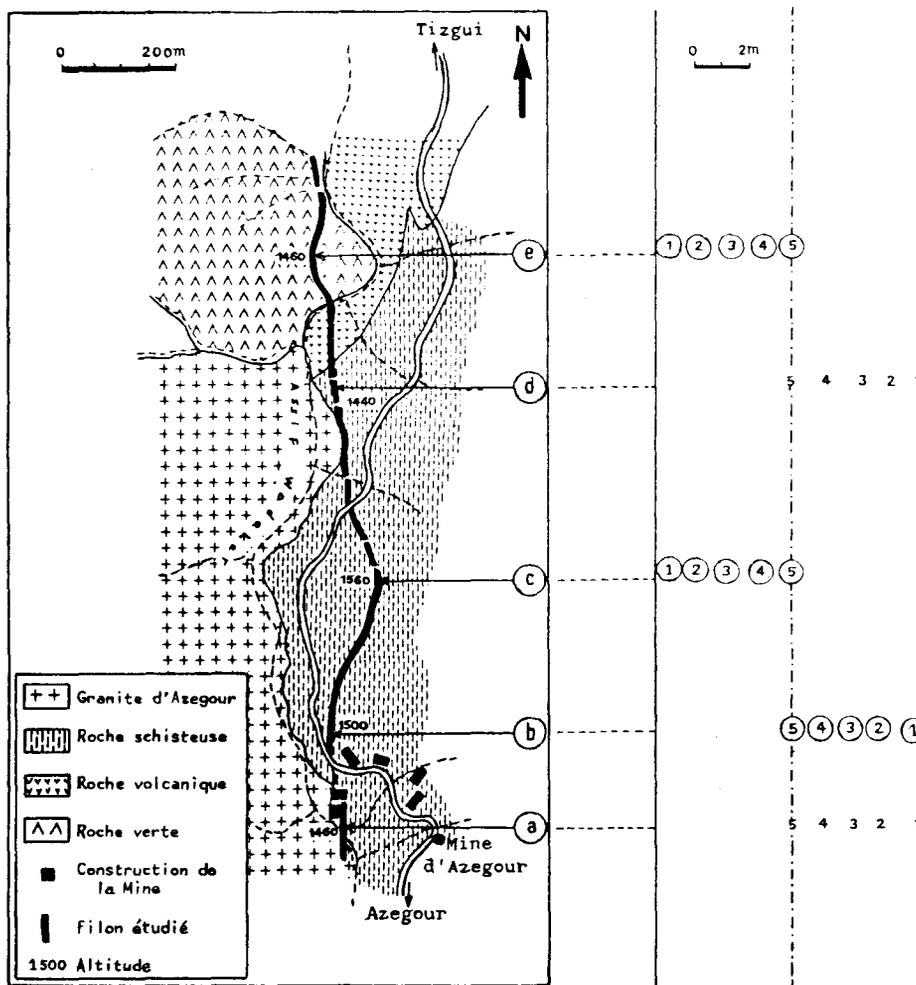


Figure 2 : Affleurement du filon-type de rhyolite et plan d'échantillonnage. Les données relatives à chaque station sont portées sur le tableau 3 - à la fin de l'article.

orientation constante (N 170E, 80°E) et une puissance peu variable (8 à 10 m) ;

— une facilité d'accès et d'échantillonnage sur toute son étendue.

Cinq stations d'échantillonnage notés (a), (b), (c), (d), et (e) ont été fixées le long de ce filon de rhyolite. Au niveau de chaque station un échantillonnage orienté et régulier a été effectué suivant une coupe transversale allant de l'éponte au centre. Toutes les informations concernant ces stations d'échantillonnages sont groupées sur le tableau 3.

La parfaite connaissance de la nature du matériel filonien est nécessaire pour notre analyse. Ainsi une étude pétrographique et chimique classique a été menée, au préalable, sur ce filon de rhyolite. Ci-dessous nous présen-

tons brièvement les principaux résultats de cette étude.

## PETROGRAPHIE ET MINERALOGIE

A l'affleurement la roche filonienne montre un aspect frais et une grande résistance aux chocs du marteau. Un système de diaclases assez dense entraîne, par endroit, son débit en blocs de taille décimétrique à métrique.

La zone centrale du filon est composée d'une roche de couleur brune et à texture microgrenue porphyrique : sur la fraction fine, correspondant à une mosaïque quartzofeldspathique, se détachent des cristaux de feldspath ( $< 2$  cm), des grains globuleux de quartz ( $< 7$  mm) et quelques paillettes de mica noir ( $< 5$  mm). En allant vers les épontes, la

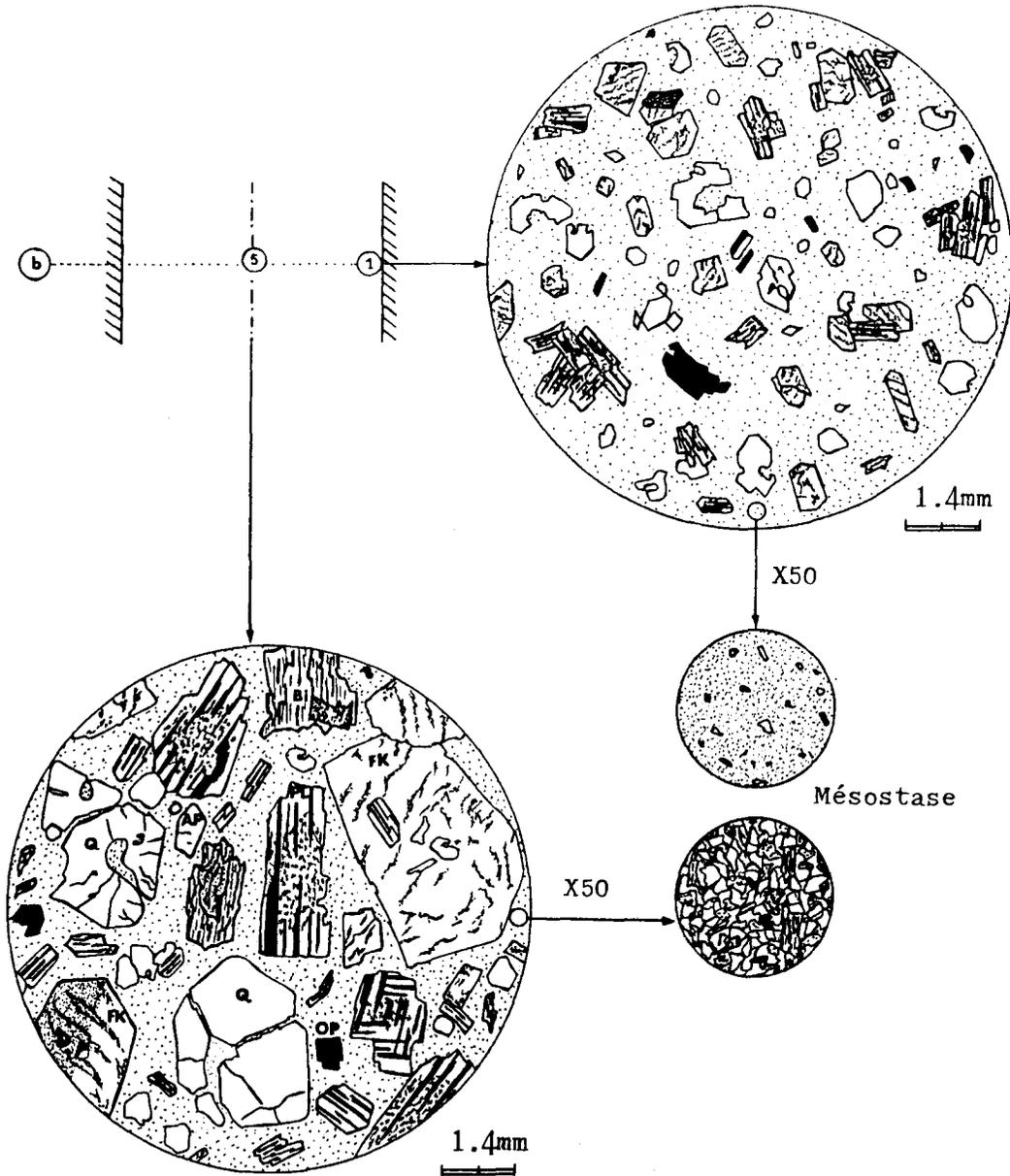


Figure 3 : Observations microscopiques du faciès de l'éponte (1) et du centre (5) du filon-type de rhyolite.

roche devient rosâtre et acquiert progressivement une texture vitreuse aphanitique : l'observation microscopique révèle la présence de petits cristaux inframillimétriques noyés dans une mésostase cryptocristalline (fig. 3).

### Les phénocristaux

**La biotite :** se présente en paillettes totalement chloritisées et muscovitisées. Quelques individus rencontrés en inclusion dans du

quartz, semblant avoir échappés à l'altération, présentent un polychroïsme net (marron-brun suivant Nm-Ng et jaune-orange suivant Np). Leur analyse à la microsonde électronique affirme leur nature magnésienne et titanifère.

**Le plagioclase :** en lattes rectangulaires, à macles polysynthétiques et à cœur séricitisé. Par ses teneurs en anorthite largement comprises entre  $An_5$  et  $An_{10}$  il correspond à une albite.

**Le feldspath potassique :** en tablettes perthi-

tiques et riche en inclusion d'albite. Il s'agit, d'après leur chimisme, d'une orthose légèrement sodique.

Le quartz : en grains subautomorphes parfois éclatés et présentant de nombreux golfes de corrosion, typiques des quartz rhyolitiques.

### Les minéraux accessoires

Quelques cristaux d'apatite, d'hématite et de pyrite, de taille minuscule, se rencontrent soit en inclusion dans les minéraux de cristallisation précoce (Biotite, Albite, Quartz) soit en dissémination dans la mésostase.

### La mésostase

Les quelques analyses ponctuelles, effectuées à la microsonde sur la mésostase du centre du filon et de son éponte, ont montré qu'il s'agissait, à chaque fois, soit de quartz, soit d'orthose.

A la suite de cette étude, des observations portant sur la texture et les relations mutuelles entre les minéraux nous ont conduit à établir la course de cristallisation de cette roche (cf. tableau 1).

### GEOCHIMIE

Le chimisme global de cette roche filonienne correspond à celui d'une rhyolite alcaline

Tableau 1 : Schéma de la course de cristallisation apparente établie pour le filon-type de rhyolite.

1 <sup>er</sup> temps : Phénocristaux	2 <sup>ème</sup> t. : Mésostase	
biotite	chlorite	muscovite
<An5 plagioclase		
quartz		
feldspath-K		
apatite	hématite	pyrite

(SiO<sub>2</sub> = 77%, Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O = 9%).

Des variations chimiques très importantes s'observent entre les échantillons d'une même coupe transversale (tab. 2). Les courbes de fluctuations chimiques entre l'éponte et le centre (fig. 4), relatives à la station (b), tracent une évolution caractérisée par :

- un palier qui s'étend sur environ un mètre de l'éponte et où tous les éléments restent constants à l'exception de Na<sub>2</sub>O qui baisse et du P.F. qui augmente ;

- une tendance qui continue jusqu'au centre et qui se marque par une chute de SiO<sub>2</sub> et K<sub>2</sub>O et une augmentation de tous les autres éléments.

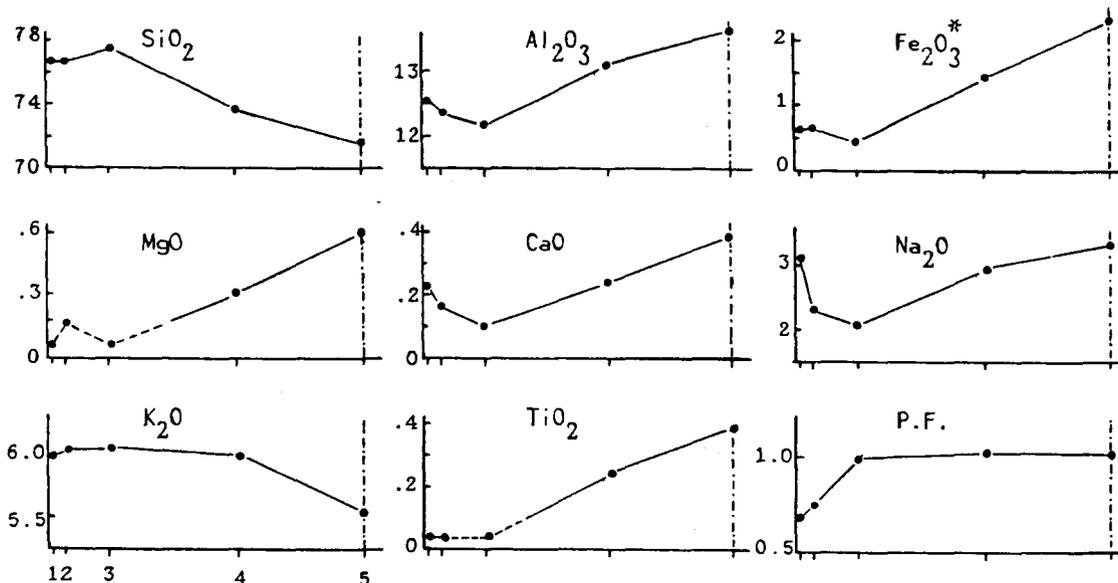


Figure 4 : Courbes d'évolution des compositions chimiques entre l'éponte (1) et le centre (5) du filon-type de rhyolite (cf. Tableau. 2).

Tableau 2 : Compositions chimiques des échantillons des stations (e), (b) et (c) du filon-type de rhyolite - Analyses faites par MONTANARI à l'Université de Nancy I.

ANALYSE	station e					station b					station c				
	épointe	→ centre			centre	épointe	→ centre			centre	épointe	→ centre			centre
	E.1	E.2	E.3	E.4	E.5	B.1	B.2	B.3	B.4	B.5	C.1	C.2	C.3	C.4	C.5
SiO <sub>2</sub>	75.74	76.20	74.41	72.93	72.70	76.48	76.84	77.43	73.85	71.77	75.50	75.62	72.76	72.41	72.53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.63	11.89	12.42	13.28	12.83	12.55	12.34	12.18	13.16	13.68	12.42	12.29	13.12	13.23	13.27
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.87	0.98	1.61	1.95	2.46	0.58	0.61	0.47	1.48	2.37	0.53	0.52	1.54	1.57	1.93
MnO	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.01	0.05	0.05	0.01	0.01	0.03	0.04	0.04
MgO	0.10	0.12	0.28	0.45	0.53	0.03	0.09	0.03	0.26	0.66	0.07	0.07	0.28	0.31	0.42
CaO	0.17	0.15	0.29	0.34	0.33	0.23	0.16	0.10	0.24	0.38	0.18	0.15	0.27	0.34	0.37
Na <sub>2</sub> O	1.31	2.96	3.52	3.62	3.26	3.12	2.61	2.10	2.99	3.34	2.28	2.44	2.46	3.18	1.93
K <sub>2</sub> O	8.39	5.91	5.13	4.93	5.02	5.95	6.08	6.09	6.01	5.59	7.03	6.67	6.62	6.02	6.36
TiO <sub>2</sub>	0.08	0.08	0.25	0.39	0.36	0.09	0.09	0.09	0.25	0.39	0.08	0.08	0.34	0.35	0.38
P.F.	0.68	0.70	1.27	1.45	1.69	0.55	0.73	1.00	1.09	1.09	0.61	0.62	1.38	1.47	1.38
TOTAL	98.98	99.01	99.21	99.37	99.21	99.59	99.57	99.50	99.38	99.32	98.71	98.47	98.80	98.92	98.61

## PETROLOGIE STRUCTURALE

### VECTEUR DE MISE EN PLACE DU MAGMA

#### Rappels

Si la direction de mise en place d'un magma dans sa caisse filonienne est souvent facile à préciser, par l'observation de l'orientation des minéraux aciculaires (représentant la fluidalité linéaire), le sens est en revanche plus difficile. Parmi les nombreux critères proposés pour cet effet celui du pincement des minéraux aux épontes, élaboré par J.Ph. BLANCHARD *et al.* (1979) est le plus déterminant. Son application aussi bien sur le terrain qu'au laboratoire, sur des lames minces orientées, le rend très pratique. En effet des études par simulation sur ordinateur ont amené ces derniers auteurs à montrer que dans le cas d'un cisaillement simple (cas de l'écoulement magmatique), la fluidalité planaire, marquée par les minéraux forme un angle ( $\alpha$ ) avec le plan de l'éponte. Cet angle définit le pincement des minéraux aux épontes et se caractérise par :

- une valeur théorique comprise entre  $10^\circ$  et  $20^\circ$  ;
- une valeur maximum située près de l'éponte où le cisaillement est important ;
- une ouverture qui indique le sens d'injection du magma.

#### Application

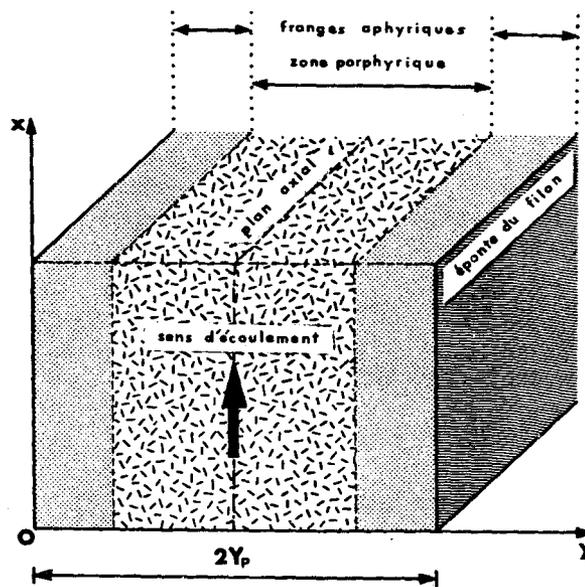
Le vecteur de mise en place du magma, déterminé par le critère de pincement des minéraux aux épontes, pour ce filon de rhyolite d'Azegour serait orienté N160 à N170E, incliné de  $70$  à  $80^\circ$  N et dirigé vers le haut. L'homogénéité des résultats obtenus à plusieurs reprises et dans différentes stations confirme ce sens d'injection du magma dans sa caisse filonienne. La connaissance de ce vecteur est d'un intérêt capital pour la suite de notre analyse.

### DIFFERENCIATION MECANIQUE TRANSVERSALE

#### Rappels théoriques

##### 1— Aspect qualitatif

R.A. BAGNOLD (1954) a montré que : pour toute suspension de particules solides en écoulement, à travers un conduit, les interactions



- P : Pression dispersive  
 $\eta$  : Viscosité de la fraction fluide de la suspension  
 U : Vitesse d'écoulement de la suspension  
 C : Concentration volumique des particules solides en suspension dans le fluide  
 $C_0$  : Concentration volumique maximale possible  
 $\lambda$  : Concentration linéaire des particules solides  
 a : Coefficient de proportionnalité qui dépend de la taille et de la forme des cristaux  
 r : Rayon du minéral supposé sphérique  
 $V_{y\max}$  : Vitesse de migration latérale suivant l'axe OY  
 $Y_p$  : Demi-largeur du filon

Figure 5 : Schéma de l'organisation structurale (différenciation mécanique transversale) liée à l'écoulement. Au-dessous : définitions des paramètres utilisés dans le texte.

mécaniques entre les grains donnent naissance à une pression dispersive ("grain dispersive pressure"). Cette pression dispersive dépend principalement du taux de cisaillement et de la concentration en particules de la suspension.

En raison du taux de cisaillement variable le long d'un profil transversal du filon, (cisaillement maximum près de l'éponte et nul au centre) il s'installe au sein de la suspension homogène traversant le premier segment de ce conduit, un gradient de pression dispersive. Ce gradient provoque un état de déséquilibre qui ne pourra être résorbé qu'une fois la concentration des particules dans la zone axiale du conduit devient suffisante pour contrebalancer le taux de cisaillement plus élevé au niveau des épontes ; d'où une migration centripète des particules (c'est l'effet Bagnold). La figure 5 schématise le type d'organisation résultant de cet effet Bagnold.

## 2 — Aspect quantitatif

Dans le but d'une quantification de cette pression dispersive, admise alors comme le principal moteur de la migration des cristaux vers l'axe de l'écoulement, R.A. BAGNOLD (1954) a proposé l'équation semi-empirique suivante :

$$(1) \quad P = 1,3(1 + \lambda) \left(1 + \frac{1}{2}\lambda\right)\eta \frac{dU}{dy}$$

où  $\lambda$  est la concentration linéaire

$$(2) \quad \lambda = \frac{1}{(C_0/C)^{1/3} - 1}$$

(cf. notation sur la figure 5).

Dans le cas des particules uniformes l'équation (1) peut s'écrire :

$$(3) \quad P = a\lambda^{3/2}\eta \frac{dU}{dy}$$

L'état d'équilibre de la suspension est caractérisé par une valeur constante de la pression dispersive à travers toute la largeur de la caisse filonienne ( $P = \text{Cte}$ ).

D'où l'équation :

$$(4) \quad P = a\lambda^{3/2}\eta \frac{dU}{dy} = \text{cte}$$

En tenant pour négligeable les petites variations de la viscosité, l'équation (4) montre que pour maintenir la pression dispersive constante alors à toute variation de gradient de vitesse doit correspondre une variation, en sens contraire, de la concentration linéaire (par exemple vers l'axe de l'écoulement où

$$du/dy \rightarrow 0 \text{ alors } \lambda \rightarrow \infty$$

## 3 — Rôle de la taille des particules

La taille des particules joue un grand rôle quant à leur vitesse de migration sous l'effet Bagnold. Les équations développées par M. BARRIERE (1976) rendent compte de l'importance de ce facteur :

$$(5) \quad V_{y\text{max}} = \frac{4}{3} \frac{r^2}{Y_p^2} \lambda^{3/2} U_{\text{max}}$$

Selon cette équation les cristaux de grande taille migrent à des vitesses beaucoup plus élevées que celles des petits cristaux. A titre

d'exemple la vitesse de déplacement des cristaux de taille centimétrique serait cent fois plus importante que celle des cristaux millimétriques. Ainsi dans le cas des écoulements de courtes distances où le déplacement des grands cristaux n'excède pas les quelques centimètres, celui des cristaux inframillimétriques pourrait être tenu pour négligeable.

## Analyse du filon de rhyolite

Des observations basées sur la taille et la répartition des cristaux, au sein du filon-type de rhyolite, nous ont permis de distinguer deux populations :

1— Une première population : composée de cristaux de taille inférieure à 1mm. Sa distribution est homogène à travers la largeur du filon. La cristallisation tardive ainsi que la taille minuscule de ces cristaux expliquent leur réponse discrète voire nulle aux phénomènes mécaniques liés à l'écoulement.

2— Une deuxième population : composée de cristaux de taille supérieure à 1 mm. La courbe de concentration volumique, de cette seconde population, montre un accroissement graduel depuis l'éponte (1,5%) jusqu'au centre (35,7%), accroissement qui traduit leur répartition sous l'effet Bagnold (fig. 6A).

La courbe de distribution de cette deuxième population de cristaux peut ainsi être admise comme étant une conséquence de l'équilibrage de la pression dispersive. Son exploitation, selon le modèle proposé par P.D. KOMAR (1972 et 1976), permettra d'approcher les caractéristiques rhéologiques du magma filonien vers le dernier stade de son écoulement.

### 1 — Variation du gradient de vitesse.

La valeur constante de la pression dispersive atteinte à l'équilibre étant inconnue, nous ne pouvons pas alors déterminer la valeur absolue de  $(du/dy)$  donnée par l'équation (4). Par contre le choix arbitraire d'une position de référence, qui doit être selon P.D. KOMAR (1976) assez loin de l'éponte et avant la zone d'augmentation rapide de la concentration des phénocristaux, permet de décrire les variations de  $(du/dy)$  par rapport à sa valeur dans cette position de référence.

Admettant que  $r$ ,  $n_r$ ,  $a_r$  et  $(du/dy)_r$  représentent les valeurs de ces paramètres à la position de référence, noté "r" et qui a été choisie à

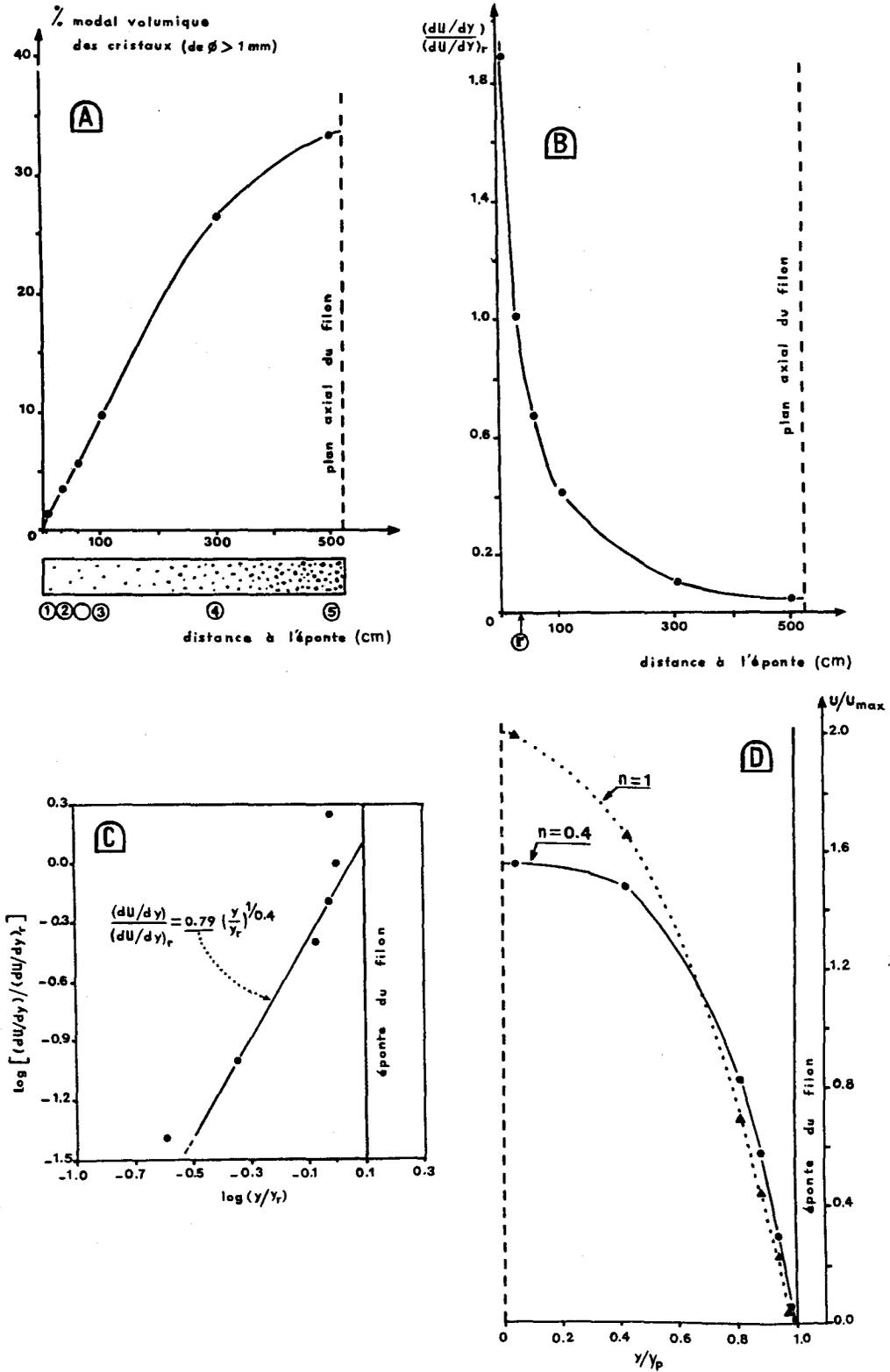


Figure 6 : Courbes pour la détermination des caractéristiques rhéologiques du magma rhyolitique du filon-type : A : Courbe de distribution des cristaux ( $> 1\text{mm}$ ) entre l'épente et le centre. B : Profil du gradient de vitesse relatif en fonction de la distance à l'épente. C : Diagramme log-log donnant les caractéristiques rhéologiques du magma lors de sa mise en place. D : Allure du profil de vitesse calculé pour un comportement pseudoplastique ( $n = 0,40$ ). En pointillé : profil de vitesse d'un corps à comportement newtonien ( $n = 1$ ) -pour comparaison.

30 cm de l'éponte, l'équation (4) permet d'écrire :

$$(6) \quad P = a \lambda^{3/2} \eta \frac{dU}{dy} = a_r \lambda^{3/2} \eta_r \left( \frac{dU}{dy} \right)_r = \text{cte}$$

Après arrangement :

$$(7) \quad \frac{(dU/dy)}{(dU/dy)_r} = \frac{a_r}{a} \left( \frac{\lambda_r}{\lambda} \right)^{3/2} \frac{\eta_r}{\eta}$$

Si on admet la constance de  $a$  et  $n$  à travers toute la largeur de la caisse filonienne,  $a/a$  et  $\eta_r/\eta$  seront égales à l'unité. L'équation (7) devient :

$$(8) \quad \frac{(dU/dy)}{(dU/dy)_r} = \left( \frac{\lambda_r}{\lambda} \right)^{3/2}$$

A partir de cette équation nous avons pu établir le profil de gradient de vitesse relatif en fonction de la distance à l'éponte (fig. 6B)<sup>1</sup>. L'allure non parabolique de ce profil montre qu'il s'agit d'un écoulement de fluide à viscosité non newtonienne.

## 2 — Profil de vitesse d'écoulement

L'équation donnant le profil de vitesse d'écoulement d'un fluide pseudoplastique, non newtonien, qui a été proposée par W.L. WILKINSON (1960) est la suivante :

$$(9) \quad U = U_{\max} \frac{3n+1}{n+1} \left[ 1 - \left( \frac{y}{y_p} \right)^{n+1/n} \right]$$

Où  $U_{\max}$  est la vitesse maximale d'écoulement au centre du conduit (où  $y = 0$ ),  $Y_p$  est la demi largeur du filon et  $n$  est une constante qui dépend du degré de pseudo-plasticité du magma ( $n = 1$  pour un fluide newtonien,  $n < 1$  pour les autres).

Dérivée puis rapportée à sa valeur à sa position de référence, l'équation (9) devient :

$$(10) \quad \frac{(dU/dy)}{(dU/dy)_r} = \left( \frac{y}{y_r} \right)^{1/n}$$

Le diagramme  $\log (du/dy) / (du/dy)_r$  en fonction de  $\log (y/y_r)$  (fig. 6C) a permis de calculer la droite de regression linéaire suivante :

$$\log \left[ \frac{(dU/dy)}{(dU/dy)_r} \right] = 2,5 \log \left( \frac{y}{y_r} \right) - 0,10$$

$$(11) \quad \frac{(dU/dy)}{(dU/dy)_r} = e^{-0,1} \left( \frac{y}{y_r} \right)^{2,5} = 0,79 \left( \frac{y}{y_r} \right)^{1/0,4}$$

Théoriquement la valeur 0,79 devrait être égale à l'unité. Cette déviation serait liée au choix de la position de référence et aux fluctuations de la viscosité que nous avons tenu pour négligeable. Toutefois cette imprécision reste sans grande influence sur notre analyse.

La valeur (0,40) obtenue pour le paramètre  $n$  montre le caractère pseudoplastique fortement marqué de ce magma rhyolitique.

La détermination de  $n$  permet d'écrire l'équation (9) sous la forme suivante :

$$(12) \quad \frac{U}{U_{\max}} = 1,57 \frac{Y^{3,5}}{Y_p}$$

A partir de cette équation (12) on a pu représenter l'image de la vitesse d'écoulement de ce magma filonien (fig. 6D).

La comparaison de cette courbe avec celle établie, dans les mêmes conditions, pour un corps newtonien ( $n = 1$ ) vient confirmer le caractère pseudoplastique fortement marqué de ce magma, lors de sa mise en place.

## 3 — Différenciation chimique

L'évolution géochimique transversale mise en évidence au sein du filon de rhyolite (cf. Géochimie) serait une conséquence directe de la différenciation mécanique. En effet, la migration vers l'axe de l'écoulement, des premiers minéraux cristallisés (Biotite et plagioclase) permet d'expliquer l'augmentation des teneurs de FeO, MgO, TiO<sub>2</sub> et Na<sub>2</sub>O vers le centre du filon. L'élévation des taux de SiO<sub>2</sub> et K<sub>2</sub>O, vers les épontes est liée par contre à l'accumulation, à ce niveau, du liquide résiduel engendré sur place et celui chassé de la zone centrale qui s'enrichit en phénocristaux. Cette tendance géochimique, rencontrée dans tous les filons montrant une différenciation mécanique, correspond à une différenciation chimique (GAGNY, 1978).

A l'issue de cette analyse de l'activité dynamique accompagnant l'écoulement des magmas filoniens se dégage une remarque importante quant à la représentativité chimique des roches filoniennes : en raison de la dissociation des phénocristaux et du liquide résiduel et de leur migration en sens opposés, aucun échantillon du filon ne pourra fournir une image correcte de la

1) Les valeurs des différents paramètres utilisés dans cette analyse sont consignées sur le tableau 4 à la fin de l'article.

composition chimique du magma initial.

**DIFFERENCIATION MECANIQUE LONGITUDINALE**

**Introduction**

Le phénomène d'organisation longitudinale intrafilonienne a été évoqué par de nombreux géologues (GIBB, 1968 ; GAGNY, 1978 ; RICHARDSON, 1979 ; BEBIEN, 1982). Malgré le grand intérêt que revêt ce phénomène les travaux qui lui ont été réservés restent très rares. Le manque, assez souvent, de conditions d'affleurement favorables en est une cause principale.

Théoriquement, toute variation de la concentration des phénocristaux et/ou de la géométrie du conduit filonien empêche l'acquisition de l'état d'équilibre, au sein de la suspension, et maintient la migration transversale des cristaux. Ainsi, sur une distance d'écoulement assez importante une différenciation mécanique longitudinale est fort envisageable.

Dans le but de détecter et de caractériser une éventuelle différenciation longitudinale au sein de ce filon de rhyolite nous avons procédé à une étude, pétrographique et chimique, comparée des produits des cinq stations d'échantillonnage.

Nous signalons, tout d'abord, que la projection de ces stations d'échantillonnage selon leur niveau topographique, sur le vecteur de mise en place du magma, déterminé plus haut (N165E, 75°N, vers le haut), a révélé leur étalement, depuis la station (e) jusqu'à la station (c), sur environ 100m (fig.7).

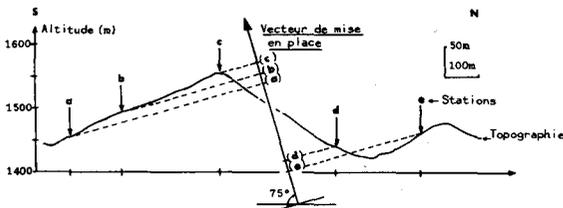


Figure 7 : Projection des cinq stations d'échantillonnage sur le vecteur de mise en place du magma dans sa caisse filonienne.

**Evolution longitudinale du filon de rhyolite**

Les principales variations pétrographiques et chimiques qui ont été décelées entre les deux stations extrêmes (e) et (c), sont :

**1 — Pétrographie**

**Faciès du centre du filon**

- Une augmentation notable de la concentration des cristaux.
- La biotite devient rare et de plus en plus chloritisée.
- Les plagioclases augmentent de taille sans changer de composition.
- Les oxydes de fer deviennent plus abondants.

**Faciès de l'éponte**

- Une légère diminution de la concentration des cristaux, avec une faible augmentation de leur taille.
- Une accentuation de la séricitisation des plagioclases.

**2 — Géochimie (fig. 8) :**

- Une augmentation de  $Al_2O_3$
- Une diminution de  $Fe_2O_3$  et  $MgO$
- $Na_2O$  montre une tendance croissante au niveau de l'éponte et une autre décroissante dans la zone intermédiaire et centrale du filon.  $K_2O$  varie en sens inverse de  $Na_2O$ .

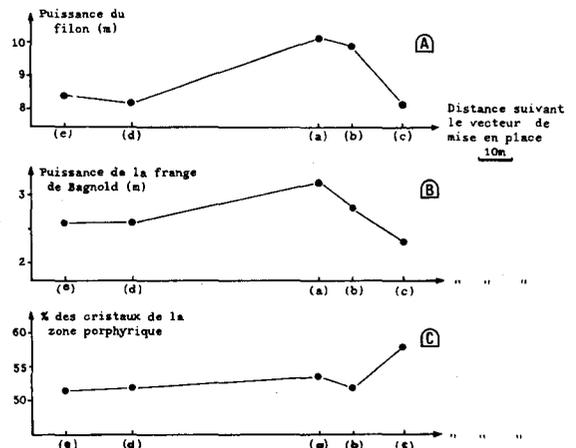


Figure 8 : Courbes de variation de la puissance du filon (A), de la puissance de la frange de Bagnold (B) et de la concentration en phénocristaux de la zone porphyrique (C).

Les variations pétrographiques et chimiques ainsi mise en évidence le long du filon de rhyolite sont relativement très peu marquées, par rapport aux variations transversales, mais elles sont nettement significatives. Elles correspondent respectivement à des différenciations mécaniques et chimiques longitudinales, liées à l'écoulement du magma dans son conduit filonien. La faible ampleur de ces différenciations serait due à la courte distance observable, suivant le vecteur de mise en place du magma, qui ne dépasse pas les 100 mètres.

## Discussion

Dans le cas d'un filon à puissance constante et sur une longue distance d'écoulement du magma, les migrations transversales des cristaux entraînent une augmentation de la frange de Bagnold et une élévation de la concentration de la zone porphyrique. (BLANCHARD *et al.*, 1977 ; GAGNY, 1978 ; BEBIEN, 1982).

L'organisation longitudinale observée sur notre filon de rhyolite, à puissance légèrement variable, est très différente de ce cas théorique ;

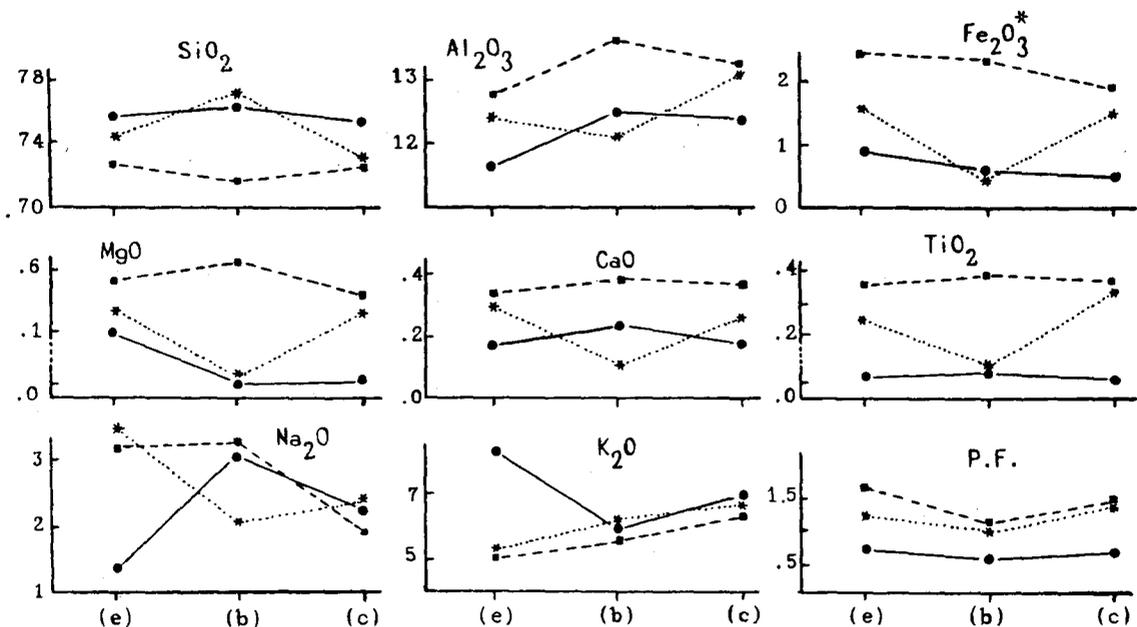


Figure 9 : Courbes d'évolution des compositions chimiques le long du vecteur de mise en place du magma (e → c) (cf. Tableau. 2). (Trait continu : échantillons de l'éponte - pointillé : échantillons de la zone intermédiaire - tireté : échantillons du centre).

la largeur de la frange de Bagnold ainsi que la concentration de la zone porphyrique apparaissent étroitement liées à la puissance du filon (fig. 9). En effet l'augmentation de la largeur du filon entre les stations (d) et (a) s'accompagne d'une augmentation de la frange de Bagnold et d'une légère élévation de la concentration de la zone porphyrique. A partir de la station (a), le rétrécissement du conduit filonien provoque une réduction de la frange de Bagnold alors que la concentration de la zone porphyrique présente un fléchissement suivi d'une augmentation importante.

Comme mécanisme probable ayant conduit à une telle organisation longitudinale, nous pensons que au sein du magma traversant l'élément (e)-(a) du filon, la pression dispersive était assez

proche de l'équilibre et les migrations des cristaux se font de plus en plus rares. La diminution brusque de la largeur du filon à partir de la station (a) aurait provoqué une perturbation de cet état d'équilibre. Un nouveau gradient serait ainsi établi et aurait entraîné de nouvelles migrations qui seraient à l'origine de l'augmentation de la concentration de la zone porphyrique comprise entre les stations (b) et (c).

## CONCLUSION GENERALE

L'organisation structurale observée à travers la largeur du filon de rhyolite de la région d'Azegour est le résultat de migrations centripètes de cristaux, d'assez grande taille (> 1mm), sous l'effet Bagnold. l'exploitation de la courbe de distribution de ces cristaux, selon les

modèles proposés par BAGNOLD, BARRIERE, KOMAR et WILKINSON, nous ont amené à montrer qu'au moment de sa mise en place, ce magma rhyolitique avait un comportement pseudoplastique fortement marqué avec un coefficient de non idéalité (n) égal à 0,4.

L'utilisation du critère de pincement des minéraux aux épontes élaboré par BLANCHARD et al., nous a permis de déterminer le vecteur de mise en place du magma dans sa caisse filo-

nienne. Les paramètres moyens de ce vecteur sont : N165E, 75°N, vers le haut.

Le long de ce vecteur, nous avons pu mettre en évidence l'existence de différenciations mécanique et chimique nettes. Les variations de la géométrie du conduit filonien perturbent l'état d'équilibre du magma et réactivent l'effet Bagnold. Le maintien de celui-ci sur une certaine distance d'écoulement serait à l'origine de ces différenciations longitudinales.

Tableau 3 : Principales données relatives aux cinq stations d'échantillonnage du filon-type de rhyolite.

Stations	a	b	c	d	e
Coordonnées					
X :	223.00	223.00	223.10	223.00	221.90
Y :	66.10	66.30	66.50	66.80	67.10
Z :	1460m	1500m	1560m	1440m	1460m
Orientation	N160E,80W	N175E,80E	N10E,70E	N170E,85W	N170E,80E
Puissance	10.10m	10.43m	8.00m	8.20m	8.40m
Encaissant	Granite	Schiste	Schiste	Schiste	Amphibolite
Echantillons					
Eponte N°	Est a1,a2,a3,a4,a5	Est b1,b2,b3,b4,b5	Ouest c1,c2,c3,c4,c5	Est d1,d2,d3,d4,d5	Ouest e1,e2,e3,e4,e5
position	éponte → centre	épt → ct	épt → ct	épt → ct	épt → ct
An. chimiques					
.R.	- - - - -	+ + + + +	+ + + + +	- - - - -	+ + + + +
.Minéraux	- - - - +	+ + - - +	- - - - +	- - - - +	- - - - -

Tableau 4 : Valeurs des différents paramètres utilisés dans l'analyse quantitative du phénomène de différenciation mécanique transversale du filon-type de rhyolite (données relatives à la station (b), position de référence.

N°	Distance à l'éponte (cm)	[c] %	λ	y (cm) dist. au centre	du/dy (du/dy) <sub>r</sub>	y/y <sub>r</sub>	log(y/y <sub>r</sub> )	log(du/dy (du/dy) <sub>r</sub> )	y/y <sub>p</sub>	U/U <sub>max</sub>	
										n=0.4	n=1
1	5	1.5	0.40	515	1.88	1.05	0.02	0.27	0.99	0.06	0.04
2*	30	3.5	0.61	490	1.00	1.00	0.00	0.00	0.94	0.31	0.23
.	60	5.7	0.80	460	0.67	0.94	- 0.03	- 0.17	0.88	0.57	0.44
3	100	9.8	1.14	420	0.39	0.86	- 0.07	- 0.41	0.81	0.82	0.69
4	300	26.4	2.85	220	0.10	0.45	- 0.35	- 1.00	0.42	1.50	1.65
5	500	35.7	4.52	20	0.05	0.24	- 0.60	- 1.40	0.04	1.55	2.00

Remerciements

Ce travail a été effectué au laboratoire de Pétrologie Structurale et Métallogénie - Nancy, dans le cadre de la préparation de ma thèse de 3<sup>ème</sup> cycle. Que Monsieur le

Professeur Claude GAGNY, directeur de ce laboratoire qui a pris en charge tous les frais de mes analyses et qui m'a fait bénéficier de sa grande compétence dans ces problèmes de différenciations liées à l'écoulement, trouve à l'issue de cette note l'expression de mes plus vifs remerciements.

## REFERENCES

- ANDRE F. et GAGNY Cl., (1982). — Structure d'écoulement dans une caisse filonienne : le mécanisme d'intrusion télescopique et le concept d'intra-éponge. *Canad. Jour. Ear. Sci.*, 19, n°12, pp. 2387-2399.
- BAGNOLD R.A., (1954).- Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a newtonien fluide under shear. *Proceedings of the Royal Soc of London*, 225, pp. 49-63.
- BARRIERE M., (1976).- Flowage differentiation : limitation of the Bagnold effect to the narrow intrusion. *Contr. Miner. Petrol.*, 55, pp.133-145.
- BEBIEN J., (1982).- *L'association ignée de Guevgueli (Macédoine grecque). Expression d'un magmatisme ophiolitique dans une déchirure continentale.* Thèse d'Etat, Univ. Nancy I, 467p.
- BEBIEN J. et GAGNY Cl., (1980).- Différenciation des magmas ophiolitiques : l'exemple du cortège de Guevgueli. *International ophi. Symp., ophiolites, Cyprus, 1979, Proceedings 1980*, pp.351-359.
- BHATTACHARJI S., (1967).- Scale model experiments of flowage differentiation in sills. "Ultramafic and related rocks". Ed.by P.J. Wyllie, John Wiley and sons, inc, pp. 69-70.
- BHATTACHARJI S., et SMITH C.H., (1964).- Flowage differentiation. *Science*, 145, pp.150-153.
- BLANCHARD J.Ph.; BOYER P. et GAGNY Cl., (1977).-Reflexions sur des critères de sens de mise en place dans une caisse filonienne. *C.R. A cad. Sci. Paris*, t.284, série D, pp.2071-2074.
- BLANCHARD J. Ph.; BOYER P. et GAGNY Cl., (1979).-Un nouveau critère de sens de mise en place dans une caisse filonienne : "le pincement des minéraux aux éponges". *Tectonophysics*, 1979, vol.53, pp.1-25.
- EL AMRANI E.I., (1981).- Etude d'un filon de microgranite à pyroxène au col de Grosse Pierre (Vosges méridionales) : Pétrologie, Géochimie, Pétrologie Structurale et problème de différenciation dans une caisse filonienne. D.E.A., Univ. Nancy I, 63p.
- EL AMRANI E.I., (1982).- Mise en place d'un filon avec broyage de l'encaissant à ses éponges (exemple du cas limite du bouchon de Bingham "plus large" que la caisse filonienne). *9ème R.A.S.T.*, Paris, p.229.
- EL AMRANI E.I., (1984).- *Contribution à l'étude pétrologique, minéralogique, métallogénique et de pétrologie structurale des formations de la région d'Azegour (Haut Atlas occidental - Maroc).* Thèse de 3ème cycle. Univ. Nancy I, 210p.
- FERNANDEZ A.; FEYBESSE J.L. et MESURE J.E., (1983).-Theoretical and experimental study of fabrics developed by different shaped markers in tow-dimensional simple shear. *Bull. Soc. géol. France*, (7), t.XXV, n°3, pp.319-326.
- GAGNY Cl., (1968).- Petrogenèse du granite des crêtes (vosges méridionales- France). Thèse d'Etat, Fac. Sci. Univ. de Nantes, 546p.
- GAGNY Cl., (1978).- Quelques réflexions sur la pétrologie structurale appliquée à l'étude des filons. 103ème Congrès Nat. Soc. Sav. Nancy. Sci., Fasc. IV, pp. 9-20.
- GIBB F.G.F., (1968).- Flow differentiation in the xenolithic ultrabasic dikes of the cuillins and the strathaird peninsula, Isle of skye, Scotland. *Jour. of Petrol.*, 9, pp.411-443.
- KOMAR P.D., (1972 a).- Mechanical interactions of phenocrysts and differentiation of igneous dikes and sills. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 83, pp.973-988.
- KOMAR P.D., (1972b). - Flow differentiation in igneous dykes and sills : profiles of velocity and phenocryst concentration. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 83, pp. 3443-3448.
- KOMAR P.D., (1976).- Phenocryst interactions and the velocity profile of magma flowing through dikes on sills. *Geol. Soc Am. Bull.*, 87, pp.1336-1342.
- PERMINGEAT F. et BOURG P., (1957).- Le gisement de molybdène, tungstène et cuivre d'Azegour (Haut Atlas). Etude pétrographique et Métallogénique. *Notes et Mém. Serv. Géol., Maroc*, n°141.
- RICHARDSON S.H., (1979).- Chemical variation induced by flow differentiation in an extensive karroo dolerite sheet, southern Namibia. *Geoch. Cosmo. Acta.*, 43, pp. 1433-1441.
- WILKINSON W.L.,(1960).- Newtonien fluids, fluid mechanics, mixing and heat transfer. Pergamon Press. New-York, NY, 138p.

Manuscrit déposé le 15.4.1987

## Adresse de l'auteur :

Iz-Eddine EL AMRANI EL HASSANI  
 Département de Géologie  
 Institut Scientifique  
 B.P. 703 Rabat-Agdal.