

ALTERATION HYDROTHERMALE ET DEFORMATION DUCTILE DES ROCHES VOLCANIQUES ACIDES ASSOCIEES AU GISEMENT SULFURE DE DRAA SFAR (JEBILET CENTRALES, MAROC)

L. Ben Aissi*, A. El Boukhari*, M. Hibti**, M. Elharfi***, L. Maacha***, Y. Zinbi

RESUME

Les roches volcaniques et volcanoclastiques de Draa Sfar (Jebilet centrales, Maroc hercynien) sont affectées par une déformation ductile accompagnée d'un métamorphisme de faible degré (faciès schistes verts) et d'une altération hydrothermale. Des zones de cisaillement de direction N-S, ont affecté localement ces formations tout en étant vecteurs d'une importante activité hydrothermale. Le suivi de ces transformations à partir de la rhyodacite non ou peu déformée, montre qu'à travers ces zones de cisaillements ductiles : (1) l'assemblage minéralogique d'altération hydrothermale est formé essentiellement de chlorite, de séricite, de quartz et de magnétite ; (2) l'augmentation graduelle des indices d'altération s'exprime par la destruction des phénocristaux au profit d'une matrice recristallisée en phyllosilicates et quartz ; (3) le transfert progressif de la matière est plus intense dans les zones déformées où Ti, Al et Zr restent constants. Ces zones de cisaillements ductiles ont joué un rôle très important dans la circulation des fluides à l'origine de la transformation en phyllosilicates de la rhyodacite de Draa Sfar.

Mots-clés : *Rhyodacite, Zone de cisaillement ductile, Altération hydrothermale, Mobilité chimique, Hercynien, Maroc.*

ABSTRACT

The volcanics and volcanoclastic rocks of Draa Sfar (Central Jebilet, Moroccan hercynian belt) are affected by ductile stress and hydrothermal alteration accompanied by a weak degree of metamorphism (greenschist facies). Some N-S oriented shearing zones, affect locally these formations while being the site of an important hydrothermal activity. The consequences of these transformations from a non to slightly- deformed rhyodacite, show that through these ductile shearing zones: (1) the mineralogical assemblage of hydrothermal alteration is essentially formed by chlorite, sericite, quartz and magnetite; (2) the gradual increase of the alteration indexes is accompanied by the destruction of the phenocrists and the recrystallization of the matrix by phyllosilicates and quartz; (3) the progressive transfer of material is more intense in the more deformed zones where the values of Ti, Al and Zr remain constant. These shearing zones played a very important role in the circulation of fluids and the transformation of the rhyodacite of Draa Sfar.

Key-words: *Rhyodacite, Shear zones, hydrothermal alteration, chemical mobility, Hercynian, Morocco.*

Introduction

Dans les roches affectées par une déformation ductile hétérogène, les réactions métamorphiques synschisteuses et les activités hydrothermales apparaissent préférentiellement dans les zones les plus

déformées, là où un fort amollissement local a accompagné la déformation progressive (Lagarde, 1985). Ces zones peuvent être le siège d'une mobilité chimique non négligeable. L'étude des transformations minéralogiques et chimiques dans les zones déformées permet de reconstituer l'évolution des

* Département de Géologie, Faculté des Sciences Semlalia. BP 2390, Marrakech, Maroc.

** Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech, Maroc.

*** Réminex / Managem, groupe ONA, 52 avenue Hassan II. Casa Blanca, Maroc.

systèmes hydrothermaux associés et de vérifier certaines modalités de préconcentration métallogénique ainsi que leurs liaisons éventuelles avec la formation d'amas sulfurés (Courioux, 1983).

La transformation de la rhyodacite du secteur de Draa Sfar (Jebilet Centrales, Maroc), est appréhendée par l'analyse de la composition minéralogique et géochimique d'échantillons prélevés à travers des zones déformées. La méthode d'altération, « Box Plot » (Large et al., 2001) et le bilan géochimique global de la transformation de la rhyodacite (MacLean et Barrett, 1993), sont appliqués pour estimer le taux d'altération en fonction de la déformation et ceci par le biais des éléments majeurs et traces, analysés par ICP, complétés par la Diffraction X et le Microscope Electronique à Balayage.

Contexte géologique

La série de Sarhlef couvre une grande surface et constitue l'unité centrale des Jebilet (fig. 1), elle est composée de grésopélites avec parfois alternance de bancs gréseux et pélitiques et avec, au sommet, l'apparition d'une sédimentation calcaire. D'après Bordonaro et al. (1979), cette formation renferme des tuffites acides et basiques, des volcanites acido-basiques et des amas sulfurés polymétalliques. Elle passe verticalement à la série transgressive de Teksim formée de schistes, calcaires bioclastiques et grès (Viséen-supérieur). De nombreux amas sulfurés d'importance économiques (Kettara, Ben Sliman, Koudiat Aïcha et Draa Sfar) sont présent dans la série de Sarhlef, entre le complexe volcanique et volcano-clastique et la base du complexe supérieur calcaireux.

L'étude concerne le massif volcanique de Draa Sfar, situé à 22 Km au Nord-Ouest de la ville de Marrakech et de 40 Km du gisement polymétallique de Hajjar (Zn, Pb, Cu et Ag), classé parmi les 10 premiers gisements de zinc au monde (fig. 1). Ce gisement, localisé au niveau de la partie médiane des Jebilet centrales, est encaissé dans des formations volcano-sédimentaires attribuées à la série de Sarhlef d'âge Viséen supérieur-Namurien (Huvelin, 1961) et qui a été datée 330,5 Ma par la méthode U-Pb sur zircon (Essaifi et al., 2003).

Ce massif est représenté par un pointement du socle paléozoïque orienté NS (environ 2,5 Km/500 m), émergeant de la couverture mio-pliocène et quaternaire et où affleurent des chapeaux de fer matérialisés par des zones rubéfiées et blanchies. Le massif comprend un ensemble volcanique et volcanoclastique acide constituant l'unité intermédiaire et comprenant la masse minéralisée. Cette unité est surmontée par des schistes calcaireux, corrélés à la

formation de Teksim (Bordonaro, 1983). Le complexe volcanique et volcano-clastique acide est concordant sur les pélites gréseuses de base (fig. 2), et il est composé de :

(a) Rhyodacites qui se présentent en succession de coulées massives dont le toit est parfois souligné par des passages centimétriques à métriques bréchiques et vacuolaires. Elles forment un ensemble de puissance cumulée moyenne de 200 mètres.

L'assemblage minéralogique comprend (1) le quartz, d'aspect rhyolitique, se présente en phénocristaux avec des golfs de corrosion et cupules de résorption (< 0,25 à 1,5 mm) ; (2) le feldspath potassique très altéré en séricite et minéraux argileux (< 2,5 mm) ; (3) les plagioclases en phénocristaux (1 à 2 mm) souvent albitisés, sont relativement plus rares que les précédents. La matrice, de nature quartzo-feldspathique, est très finement recristallisée et intensément altérée en chlorite et séricite qui soulignent les plans de la schistosité. Les minéraux accessoires sont représentés par le zircon, l'apatite et le sphène partiellement transformé en leucoxène.

Les passages bréchiques du sommet montrent la même constitution minéralogique avec en plus l'abondance des éléments lithiques anguleux de même composition que la roche hôte.

(b) Une dacite en coulées empilées massives de teinte gris-sombre (de puissance moyenne de 150 m), caractérisée par la présence de vésicules ; Sa texture est microlitique porphyrique avec une minéralogie dominée par (1) des phénocristaux de plagioclases (< 2,5 mm), le plus souvent altérés en séricite, chlorite et épidote ; (2) de feldspath potassique (sanidine) (< 1,5 mm) à contour résorbé et totalement altéré en séricite et minéraux argileux ; (3) de quartz moins représenté que les précédents, à caractères rhyolitique (1,5 mm) ; (4) de biotite transformée en chlorite et envahie de granules d'oxydes.

La mésostase est composée de microlites de plagioclases albitisés (< 0,25 mm) (8% du volume totale de la roche), baignant dans un verre dévitrifié en minéraux felsiques avec de la séricite soulignant les plans de la schistosité.

On note aussi la présence de vésicules (< 1,80 mm) aplaties selon les plans de S1 et remplies de silice, chlorite, épidote, muscovite, sulfures et calcite.

(c) Une rhyodacite ignimbritique amygdalaire à aspect bréchique (épaisseur moyenne de 80 m), associée à des structures en fiammes aplaties et soudées. Ce faciès est caractérisé par une teinte gris-sombre à brun rougeâtre sur patine. Il est riche en cristaux de quartz à facture pyroclastique. Aucun tri granulométrique ni concentration particulière des cristaux et des échardes ne sont observables à

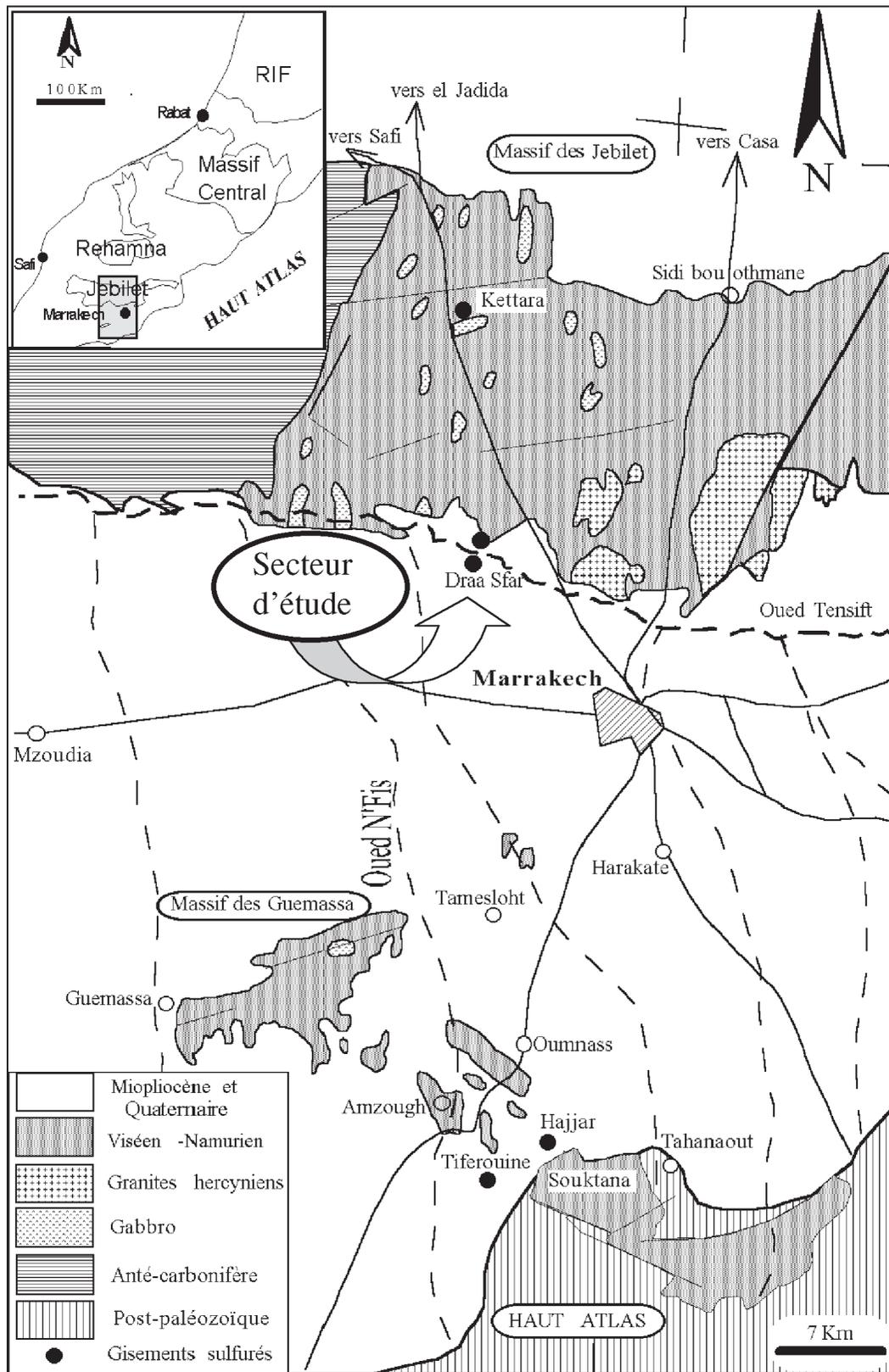


Fig. 1.—Carte de localisation géographique de secteur étudié dans la partie sud-occidentale de la méséta marocaine.

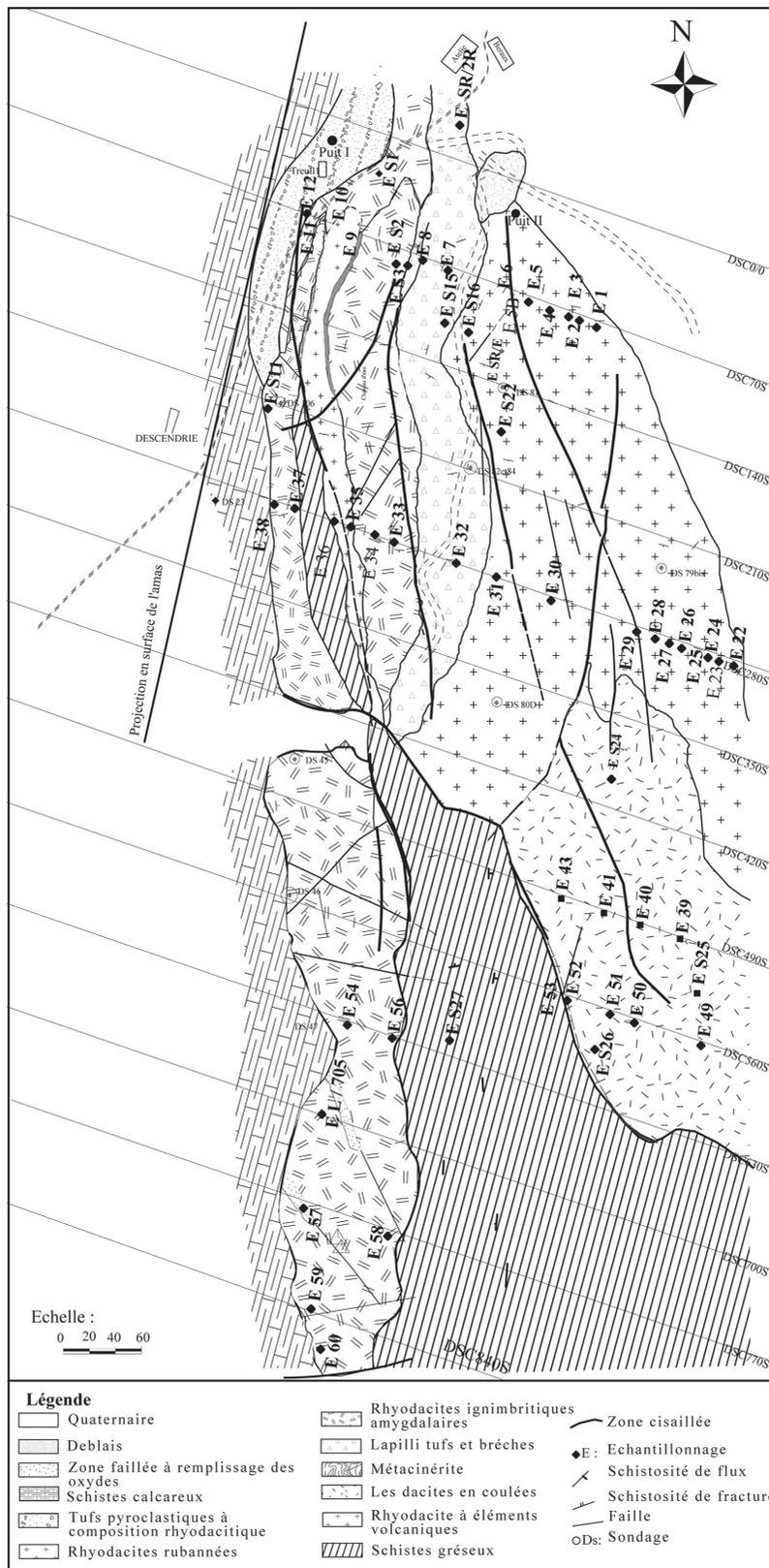


Fig. 2.—Carte géologique synthétique du secteur minier de Draa Sfar (Jebilet centrales, Maroc).

l'échelle de l'affleurement ou de lame mince. Ce faciès est composé par des phénocristaux de (1) Quartz abondant en éclats à caractères rhyolitique (golf de corrosion, cassé) (< 1,5 mm) ; (2) de plagioclase (albite) (< 3,80 mm) cassés et corrodés relativement moins altérés en séricite que le feldspath potassique ; (3) de feldspath potassique résorbé et subarrondi, se caractérise par une transformation intense en séricite ; (4) de biotite, moins représentée et le plus souvent chloritisée.

La matrice vitroclastique est de nature quartzofeldspathique, très silicifiée et séricitisée, avec la présence d'épidote et de leucoxène en baguettes. Les minéraux accessoires sont représentés par le zircon. Les fiammes (5/1,5 mm), en proportion très importante, déchiquetées, effilochées et aplaties dans les plans de la schistosité, ces échardes renferment des phénocristaux de quartz automorphe.

(d) Lapilli tuf et brèches de couleur verdâtre (épaisseur moyenne de 50 m), présentent des éléments lithiques (quelques mm à 8 cm) de nature et taille variée. Ces éléments, de couleur blanchâtres, contraste avec celle de la matrice soulignant plus l'aspect bréchique de la roche. Ces éléments sont répartis dans la matrice sans aucun granoclassement visible et avec des contours effilochés. La matrice est vitreuse recristallisée en quartz et feldspaths, intensément séricitisée et chloritisée. Les éléments noyés dans la matrice sont constitués par : (1) Le quartz d'habitus rhyolitique avec une taille voisine de 1,2 mm. (2) Les feldspaths en amas ou cristaux individuels (0,5 à 2,5 mm), souvent altérés en séricite. (3) Les échardes de verres dévitrifiées en silice (0,2 à 3,5 mm) et séricitisées.

(e) Cinérite litée, c'est un faciès très massif, lité et ayant une couleur sombre. Les lits grossiers composés de plus de 80% de quartz en éclats (quelques μm à 1mm) et à caractères rhyolitiques (cassé et corrodé) ; de feldspath (albite) en débris de cristaux de taille < 0,2 mm ; d'oxydes, de sulfures disséminés et de zircon fréquent. Les lits fins sont composés de plus de 90% de chlorite associée à la séricite en paillettes soulignant le plan de S1. Ces lits contiennent quelques rares clastes de quartz et feldspaths. L'aspect pyroclastique se dégage par la présence de fragments de cristaux très anguleux triés et granoclassés.

D'après le diagramme bilogarithmique $[\text{Zr}/\text{TiO}_2]$ - $[\text{Nb}/\text{Y}]$ de Winchester et Floyd (1977) (fig. 3), Les analyses chimiques de ces roches volcaniques se situent dans le domaine de rhyodacite à dacite. Ce diagramme permet de constater un bon regroupement des analyses au sein d'une même population caractérisée par un rapport Zr/TiO_2 constant.

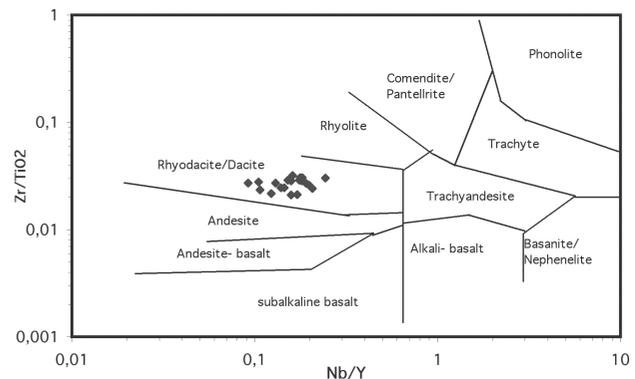


Fig. 3.—Classification géochimique des volcanites de la série volcano-sédimentaire de Draa Sfar dans le diagramme bi-logarithmique $[\text{Zr}/\text{TiO}_2]$ - $[\text{Nb}/\text{Y}]$ de Winchester et Floyd (1977).

Ces formations volcaniques et volcanoclastiques s'intercalent au sein de roches sédimentaires constituées de pélites, siltites, grès quartzitique, et des schistes calcaireux.

Une masse minéralisée, étendue sur environ 1,5 Km et plus de 1.000 m de profondeur, a été reconnue par sondages carottés et travaux miniers, actuellement réalisés par la compagnie minière des Guemassa (CMG, Groupe ONA). Elle est formée par plusieurs lentilles de sulfures massifs polymétalliques, dominés par la pyrrhotite. Ces lentilles ont été complètement dilacérées et allongées suivant une direction NS, puissante de 1 à 30 m, avec un plongement de 80 à 85° vers l'Est. Cette minéralisation repose, en contact normal, sur l'ensemble volcanique acide et les pyroclastites associées. Cependant, son contact avec l'ensemble détritique sommital est généralement faillé. Elle présente une paragenèse essentiellement à pyrrhotite, sphalérite, galène, chalcoppyrite, arsénopyrite, pyrite, glaucodot, marcassite, stannite et magnétite. Les minéraux de la gangue sont représentés par de la sidérite, du quartz, de la chlorite, de la séricite, du talc et de la calcite. La mise en place de ces minéralisations sulfurées a été accompagnée d'un hydrothermalisme précoce caractérisé par une forte chloritisation et silicification localisées particulièrement à la base des lentilles minéralisées et affectant principalement le complexe volcanique (cf. description pétrographique).

Déformation syn et post-schisteuse

Dans le massif des Jebilet et particulièrement sa partie centrale, la déformation hercynienne majeure est caractérisée par un plissement synschisteux ayant succédé la formation de plis d'axes

subméridiens. Ce plissement majeur est suivi par des chevauchements, des cisaillements ductiles et des failles cassantes dont l'intensité et la géométrie sont variables (Huvelin, 1977; Bordonaro, 1983).

Dans le massif de Draa Sfar sud, les formations volcaniques et volcano-sédimentaires ont subi une déformation ductile qui se traduit à l'échelle de la zone par le redressement à la verticale (pendage 80° vers l'Est) de l'ensemble de la succession lithologique. Une schistosité régionale de flux (S1) est matérialisée par la néoformation des cristaux de séricite, de chlorite, du quartz et d'épidotes. Cette déformation qui s'est déroulée dans un climat métamorphique épizonal a provoqué la transposition de la stratification (S0) parallèlement aux plans de la schistosité S1 (direction N10 à N30). Les lentilles minéralisées sont également parallèles aux plans de S1/S0. La forte transposition, la schistosité pénétrative, les linéations d'étirements bien développées et la destruction presque complète des textures (pétrographiques) primaires soulignent l'intensité de cette déformation d'âge post-Viséen supérieur. Les sulfures massifs montrent aussi des indices élevés de déformation (recristallisation, rubannement) et des remobilisations mécaniques et chimiques (sulfures en percement, boudinage, bréchification). On y observe fréquemment une tectonique de même âge qui se manifeste par des zones de cisaillements ductiles (ZCD), d'une largeur moyenne avoisinant 2m et d'extensions kilométriques. Ces zones, orientées N-S, sont caractérisées par un jeu dextre et accompagnées par la formation de fentes à quartz, chloritite et/ou calcite. En lame mince, la déformation ductile se traduit par le développement de bandes à grains fins recristallisés qui soulignent les plans de la schistosité de flux. Ces bandes limitent des domaines moins déformés où les phénocristaux (quartz et feldspath potassique) sont bien préservés (grain moyen < 2,5 mm). Lorsque l'on s'approche des termes les plus déformés les phases minéralogiques secondaires deviennent de plus en plus dominantes. Le produit final de la déformation et de l'altération est une roche à plus de 60% des phyllosilicates (à chlorite dominante, avec de la séricite).

Les mouvements tardi-hercyniens sont enregistrés dans la majorité des affleurements du massif. Ils sont essentiellement marqués par des crénulations de la schistosité S1 à proximité des zones déformées et par l'apparition d'une schistosité de fracture (S2), très développée dans tout le secteur, et présentant une direction moyenne N 110. Une famille de failles de direction WNW-ESE décale légèrement en jeu dextre l'ensemble des formations du massif.

Variation minéralogique au cours de l'altération et la déformation

Le massif a subi une altération hydrothermale en liaison avec la mise en place des minéralisations sulfurées, qui a été datée 301 Ma (2s uncertainty) par la méthode $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sur la biotite « hydrothermales » (Watanabe, 2002) sur des échantillons prélevés à Hajjar (40 Km au sud de Draa Sfar). Nous considérons qu'il s'agit du même épisode de transformation qui affecte aussi les terrains du secteur étudié. Selon les auteurs ayant travaillé sur l'hydrothermalisme dans la région ils considèrent ces biotites comme une transformation d'anciennes chlorites hydrothermales sous l'effet d'un métamorphisme tardif de type périplutonique, caractéristique de district Jebilet-Guemassa et qui est lié en grande partie à la mise en place des granitoïdes contrôlés par le fonctionnement des zones de cisaillement ductiles (Lagarde, 1985) (âge de mises en place 295 ± 15 Ma par la méthode Rb-Sr sur biotite, Mrini et al., 1992).

Cette altération est plus exprimée lorsqu'on s'approche des zones les plus déformées (cisaillements ductiles). Depuis les rhyodacites les moins déformées, vers les ZCD, l'ensemble des minéraux primaires de la roche a été le siège d'une transformation postmagmatique plus ou moins importante en relation avec la circulation de fluides hydrothermaux et le métamorphisme régional. La rhyodacite la moins déformée (plus éloignée de la ZCD) est une roche massive très compacte et peu vésiculée. En lame mince, cette dernière montre une texture microlitique-porphyrrique (Photo. a) avec des phénocristaux formés de:

Le feldspath potassique, de taille avoisinant 2,5 mm, est représenté par l'orthose perthitique. Ce dernier est souvent altéré avec l'apparition de la séricite en fines paillettes associées à une kaolinitisation, masquées en deuxième phase par des plages de la calcite, liée à une altération supergène (photos a, b, c et d). le plagioclase souvent albitisé, est relativement plus rare que le précédent.

Le quartz, de forme ovoïde et montrant des golfes d'arrêt de croissance souvent recristallisé sur les bordures, présente une taille comprise entre 0,2 et 1,2 mm (photo a et c).

La matrice, finement recristallisée, est constituée par un assemblage quartzo-feldspathique (quartz, orthose et l'albite), de fines lamelles de biotite chloritisée, de fines paillettes de séricite, de sphène transformé partiellement en leucoxène, de l'apatite, de la pistachite et du zircon qui apparaît souvent en inclusion dans le feldspath. Les opaques se présentent sous forme de tâches millimétrique, soit disséminées au sein de la matrice soit en remplis-

Tableau 1.—Pourcentages minéralogiques des échantillons de la rhyodacite de Draa Sfar (Profil DSC70S, Fig. 2).
Laboratoire de caractérisation Minéralogique Unité Diffraction X Centre de Recherche REMINEX

Désignation	Orthose KAlSi ₃ O ₈	Albite NaAlSi ₃ O ₈	Clinocllore (Fe _{6.87} Mg _{2.94} Al _{2.29})(Si _{4.9} Al _{3.06})O ₂₀ (OH) ₈	Muscovite KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂	Calcite CaCO ₃	Quartz SiO ₂
E / 1	24,97	8,00	2,01	11,22	—	50,91
E / 2	20,36	7,61	4,78	14,17	0,81	54,97
E / 3	22,63	10,14	4,05	11,56	—	45,27
E / 4	9,46	14,03	3,68	19,91	1,55	54,35
E / 5	11,64	13,18	3,49	20,59	1,19	52,55
E / 6	—	—	16,93	18,88	—	55,88

sage des microfractures. La calcite d'altération supergène quant-à elle, forme des plages de l'ordre de 0,3 mm.

L'évolution minéralogique au cours de l'altération et de la déformation, est marquée par une séricitisation croissante des phénocristaux de feldspath potassique (photo b). Ceci s'accompagne du développement de la chlorite sous forme des fines paillettes et/ou en gerbes, des quartz néoformés, des fins cristaux d'argile, des hydroxydes de fer et parfois des plages de calcite concentrées dans les fractures. Les paillettes de séricite et de chlorite ainsi que les agrégats de quartz recristallisé, soulignent généralement les plans de la schistosité régionale. Pour une déformation plus intense (dans la ZCD) de la même roche, la composition minéralogique de la matrice recristallisée a changé et devient caractérisée par une forte diminution des feldspaths. Ceci est accompagné par une réduction du volume des phénocristaux, avec un développement important des phyllosilicates, qui peuvent constituer plus de 60% du produit final (tableau 1).

Hydrothermalisme

Effet géochimique de l'altération et de la déformation

L'altération hydrothermale est un phénomène commun dans les roches volcaniques entourant les gisements massifs de sulfure des Jebilet et des Gue-massa (Maroc hercynien) et les zones de cisaillement ductiles associées (Leblanc, 1993; Hibti et al., 1995; Essaifi, 1995 ; Essaifi et al., 1995; Ben Aissi, 2001). A travers ces zones nous avons effectué à Draa Sfar un échantillonnage systématique (62 échantillons fig. 2), des analyses chimiques (éléments majeurs et traces), des analyses par le microscope électronique à balayage et la diffraction X et ceci afin de suivre les effets de l'altération hydrothermale sur la composition chimique et minéralogique de la roche mère rhyodacitique.

Des indices d'altération, tels que l'indice d'altération d'Ishikawa [AI = 100*(MgO + K₂O)/(MgO + K₂O + Na₂O + CaO)] et l'indice d'altération chlorite - carbonate - pyrite [CCPI = 100*(MgO + FeO)/(MgO + K₂O + Na₂O + FeO)] avec FeO = (FeO + Fe₂O₃), ont été développés pour mesurer l'intensité de la chlorite, des carbonates (dolomite, ankérite et sidérite), de la séricite, de la pyrite, de la magnétite et de l'hématite en fonction de l'altération hydrothermale proximale aux dépôts de sulfures massifs volcanogènes (VMS). Large et al., en 2001(a), ont développé une représentation graphique simple, combinant l'indice d'altération d'Ishikawa (AI) en fonction de l'indice d'altération (CCPI), nommée « l'altération Box Plot ». Cette représentation est employée pour caractériser les différentes tendances d'altérations hydrothermales liées aux VMS. De plus, elle peut constituer un outil de distinction entre ces dernières et les changements liés au métamorphisme régional. En effet, l'indice Box Plot a été testé efficacement sur plusieurs matériaux volcaniques altérés entourant les dépôts de sulfures massifs dans les boucliers Australiens, Canadiens et Européens (Gemmell et al., 2001 ; Doyle, 2001 ; Large et al., 2001(b) et Barrett et al., 2001).

La représentation des concentrations des oxydes et quelques éléments traces en fonction de la perte au feu (P.F.) montre que cette dernière croît proportionnellement avec l'indice d'altération CCP et atteint des valeurs maximales au niveau des ZCD (fig. 4). Ce diagramme (fig. 4), montre l'effet de l'altération et de la déformation sur la distribution de certains éléments. En effet, les concentrations en Na, Si, Ca et K montrent une diminution nette au cœur des zones de cisaillements, alors que les concentrations en Fe, Mg, Mn et P montrent une forte augmentation au cœur de ces zones, avec un taux maximal de PF = 3,47%. Il est donc très important de noter que ces résultats obtenus sont analogues à ceux relevés sur les autres ZCD affectant la série, avec une perte au feu de 2,26% et 3,71%, par ailleurs, nous avons souligné le caractè-

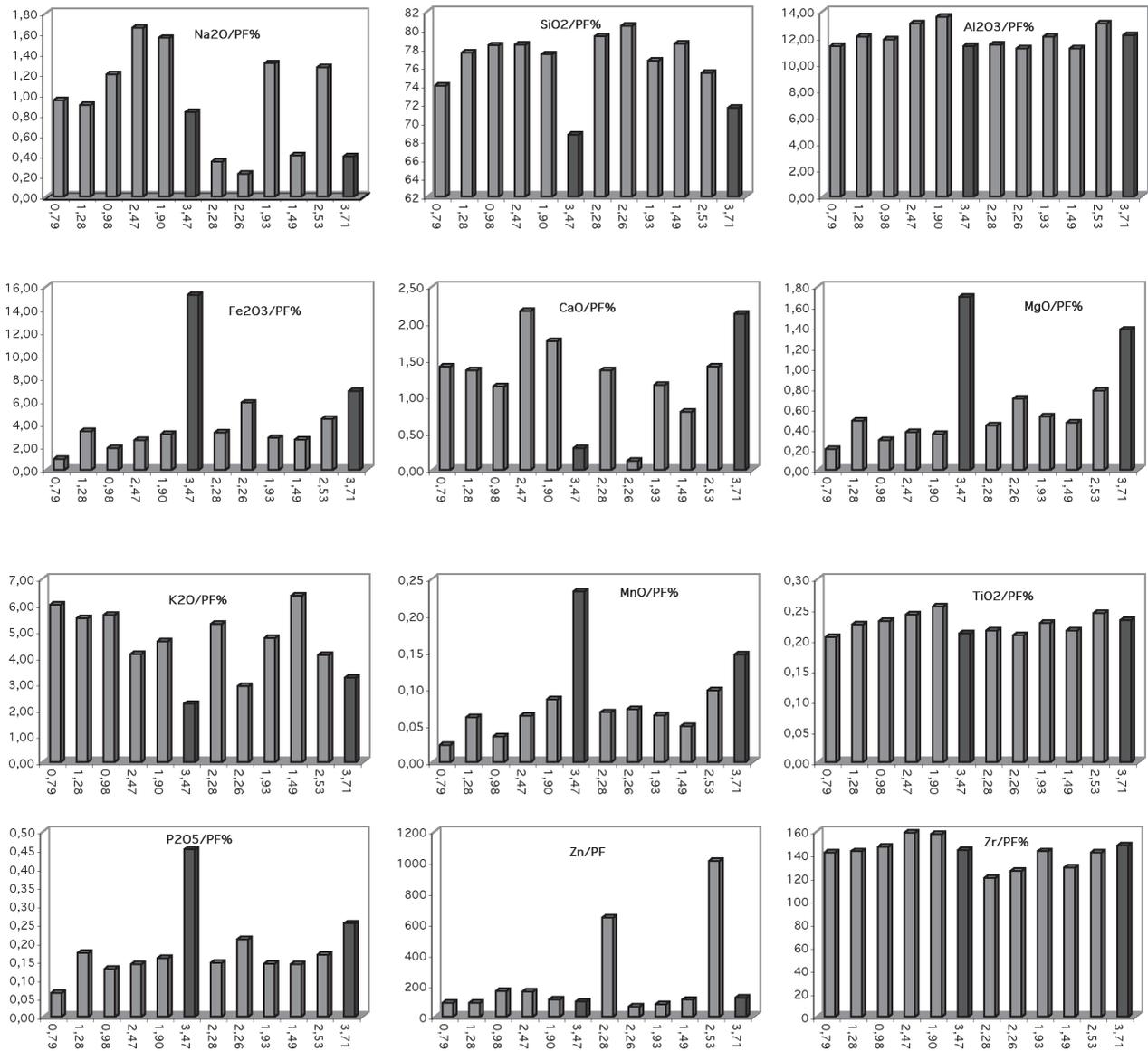


Fig. 4.—Rapport des concentrations des éléments en % ou en ppm en fonction de la perte au feu %. Précisément repérés à travers des zones de cisaillement ductiles, en noir (ZCD).

re singulier du comportement antagoniste de CaO dans les deux ZCD présentées (fig. 4) ainsi que des variations mineures des teneurs en F₂O₃, P₂O₅, Na₂O et MnO, ceci irait dans le sens de certains traits majeurs des zones considérées, à savoir le protolithe qui diffère sur le plan minéralogique (rhyodacite et rhyodacite ignimbrétique amygdalaire), la structure macroscopique de la roche, le taux d'altération précoce et l'échelle différent de deux zones de déformation ductile. En outre, certains éléments tel que Al, Ti et Zr ne présentent pas de variations significatives en fonction de la PF. Leur

comportement apparaît inerte au cours des transformations hydrothermales et la déformation. Ils peuvent ainsi être considérés comme immobiles (fig. 4). Conformément aux tests d'immobilité de ces éléments effectués sur les roches volcaniques altérées liées aux dépôts de massifs de sulfures (Gresens, 1967 ; Ferry, 1979 ; Mac Lean et Kranioti, 1987 ; Mac Lean, 1990 ; Mac Lean et Barrett 1993; Herrmann et al., 2001), les essais ont prouvé que les éléments Al, Ti, et Zr étaient immobiles pendant l'altération hydrothermale de ces roches volcaniques.

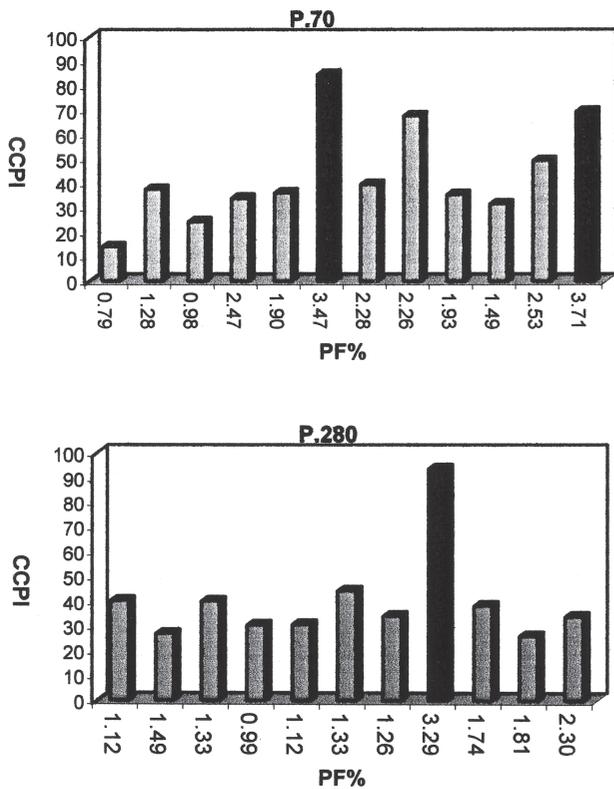


Fig. 5.—Variation de l'indice d'altération CCPI en fonction de la taux de PF% de massif de Draa Sfar (profil DSC70S voir fig. 2). Précisément repérés à travers des zones de cisaillement ductiles en noir (ZCD).

L'indice d'altération CCP des rhyodacites étudiées montre une corrélation synergique avec le taux de la perte au feu. L'augmentation de CCPI (= 84) au cœur des ZCD se traduit par une augmentation de PF (= 3,47%). Par contre, dans les rhyodacites les moins altérées le CCPI (= 14) se traduit par une valeur minimale de PF (= 0,80%) (fig. 5). Ces résultats suggèrent une altération moins intense dans les rhyodacites moins déformées que celles intensément déformées. En outre, il semble raisonnable d'attribuer les variations des teneurs de ICCP et PF% dans les autres roches à l'effet de la composition minéralogique et la structure de la roche sur l'importance des migrations d'éléments mobiles, ainsi que l'effet du métamorphisme et l'intensité de l'altération précoce.

Le diagramme d'altération « Box Plot » (Large et al., 2001) utilisant l'indice d'Ishikawa (AI) en fonction de l'indice chlorite-carbonate-pyrite (CCPI) dénote une augmentation progressive de l'effet de l'altération en fonction de l'intensité de la déformation (CCPI = 26 et AI = 55), jusqu'aux valeurs maximales au cœur de ZCD (CCPI = 97 et AI = 98) (fig. 6). Ces variations sont induites par un transfert de matière plus prononcé à l'approche de ces zones.

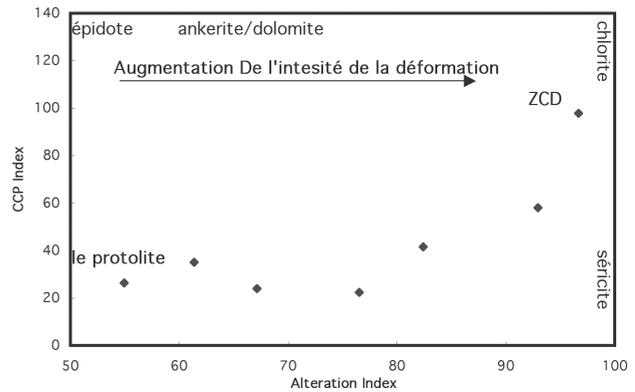


Fig. 6.—Evaluation de l'effet de la déformation progressive sur l'altération de la rhyodacite dans le diagramme de l'altération Box Plot. Depuis les rhyodacites les moins déformées (Protolite), vers la zone de cisaillement ductile (ZCD).

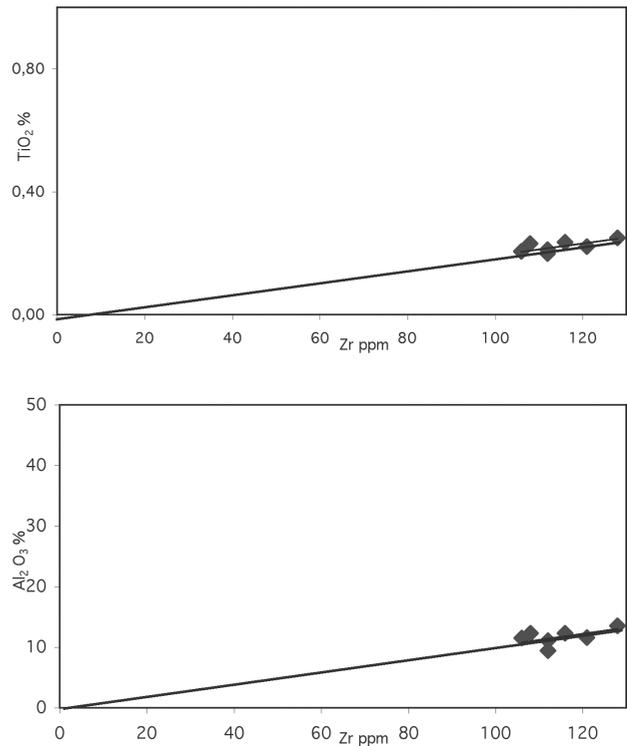


Fig. 7.—Teneurs en TiO₂% et Al₂O₃% en fonction de Zr ppm dans la rhyodacite traversée par une zone de cisaillement ductile.

Les rhyodacites les plus éloignées de la ZCD peuvent être considérées comme les équivalents les moins altérés (protolites) et la mobilité des éléments peut être évaluée en comparant sa composition à celle d'une roche plus altérée (Stolz, 1995).

Les rapports entre les trois éléments, considérés comme immobiles, Ti, Al et Zr restent constants quel que soit le degré d'altération, du métamorphisme et de déformation (fig. 7). Ces éléments consti-

Tableau 2.—Teneurs en éléments majeurs pour des échantillons du massif de Draa Sfar (profil DSC70S. Fig. 2) précisément repérés à travers des zones de cisaillement ductiles

Désignation	P.F. %	Na2O %	SiO2 %	Al2O3 %	Fe2O3 %	CaO %	MgO %	K2O %	MnO %	P2O5 %	TiO2 %	Nb _{GT}	Y _{GT}	Zr _{GT}	AI	ICCP
E/1	0,79	0,95	73,99	11,40	0,95	1,41	0,21	6,02	0,02	0,06	0,21	12,00	60,4	142	72,55	14,25
E/2	1,28	0,90	77,57	12,10	3,37	1,36	0,48	5,50	0,06	0,17	0,23	7,89	75,3	143	72,57	37,57
E/3	0,98	1,20	78,35	11,90	1,91	1,14	0,29	5,62	0,04	0,13	0,23	9,94	76,6	147	71,64	24,41
E/4	2,47	1,66	78,44	13,10	2,60	2,17	0,37	4,13	0,06	0,14	0,24	2,41	92,1	159	54,04	33,93
E/5	1,90	1,56	77,38	13,60	3,14	1,76	0,35	4,62	0,09	0,16	0,26	11,00	78,9	158	59,96	36,10
E/6	3,47	0,83	68,67	11,40	15,30	0,30	1,70	2,23	0,23	0,45	0,21	11,40	124	144	77,67	84,74
E/7	2,28	0,34	79,31	11,50	3,27	1,36	0,44	5,28	0,07	0,15	0,22	12,50	71,3	120	77,04	39,73
E/8	2,26	0,23	80,47	11,20	5,88	0,13	0,70	2,90	0,07	0,21	0,21	16,70	94,1	126	91,12	67,80
E/9	1,93	1,31	76,70	12,10	2,79	1,16	0,52	4,75	0,06	0,14	0,23	10,20	67,3	143	68,10	35,35
E/10	1,49	0,41	78,54	11,20	2,66	0,79	0,46	6,36	0,05	0,14	0,22	13,50	74,6	129	85,04	31,59
E/11	2,53	1,27	75,35	13,10	4,47	1,41	0,78	4,09	0,10	0,17	0,24	14,60	52,9	142	64,49	49,47
E/12	3,71	0,39	71,58	12,20	6,88	2,13	1,38	3,23	0,15	0,25	0,23	15,40	75,3	148	64,62	69,51

PF : Perte au feu ; AI : Indice d'altération d'Ishikawa ; CCPI : l'index d'altération de chlorite-carbonate-pyrite

L'indice d'altération d'Ishikawa : Ishikawa et al. (1976).

[AI = 100*(MgO + K₂O)/(MgO + K₂O + Na₂O + CaO)]

L'indice d'altération chlorite - carbonate - pyrite : Large et al. (2001). [CCPI = 100*(MgO + FeO)/(MgO + K₂O + Na₂O + FeO)] avec FeO = (FeO + Fe₂O₃)

tuent la mémoire de la roche initiale. De ce fait, leur abondance peut être employée pour estimer les variations de la masse et du volume lors de l'altération hydrothermale (Winchester et Floyd, 1977 ; Mac Lean et Barrett, 1993).

Les évaluations quantitatives du changement de la masse des éléments, peuvent être déterminées pour une unité homogène de roche ou des séries volcaniques continues (Mac Lean et Barrett, 1993). Les changements de masse des concentrations d'oxydes fournis par les analyses chimiques de la rhyodacite transformée (échantillon E2, E3, E4, E5 et E6) (tableau 2), et la rhyodacite la moins altérée, considérée comme protolithe (échantillon E1), sont calculés par la relation donnée par Mac Lean et Barrett (fig. 8). Les gains et les pertes au cours de l'altération sont ainsi déterminés et calculés en se basant sur l'immobilité du Zr.

Les histogrammes de la figure 8 illustrent l'importance des gains en Fe₂O₃ et en MgO (jusqu'à + 14,14% et + 1,47% respectivement) et des pertes en K₂O, Na₂O CaO et SiO₂ (jusqu'à -3,82% ; -0,12% ; -1,12% et -6,27% respectivement) causés par la chloritisation et la rubéfaction au cœur des ZCD. La silicification s'exprime par le gain en SiO₂ dans les volcanites les moins déformées (altération régionale), confirmant les observations faites aussi bien à l'échelle de la lame mince que de l'affleurement.

Géochimie des chlorites d'altération

La chloritisation est le type le plus commun des altérations hydrothermales liées aux gisements de

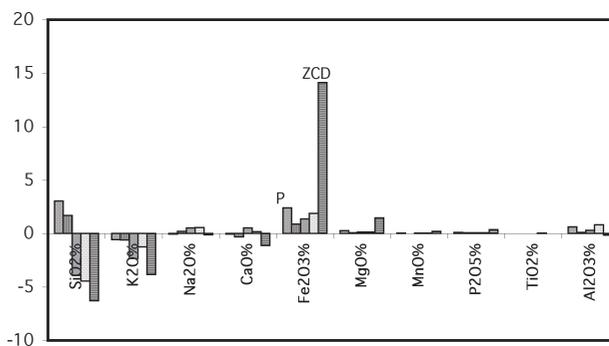


Fig. 8.—Evaluation des gains et de pertes en % des éléments majeurs de la rhyodacite traversée par une zone de cisaillement ductile, calculée à Zr constant. Méthode précurseur par Mac Lean et Barrett (1993).

sulfures massifs volcaniques hercyniens du Maroc (Hibti, 2001). A Draa Sfar la chlorite se présente sous deux types morphologiques à teintes différentes (Photo. d et e) : en lamelles flexueuses, de teinte brun-sombre, disposées parallèlement à la schistosité régionale ou en gerbes, de teinte bleu-foncée, associée aux épidotes et/ou aux plages de sulfures tout en recoupant et envahissant la séricite et la chlorite flexueuse.

Les analyses chimiques par microscopie électronique à balayage, (laboratoire de Caractérisation Minéralogique, Centre de Recherche de REMINEX), montrent un caractère magnésien et manganésifère des chlorites précoces (à teinte brun sombre) avec un rapport FM allant de 0,61 à 0,64 et des chlorites tardives à caractère ferrifère (de teinte bleu foncée) dont le rapport est assez élevé (de 0,68 à 0,78) (fig. 9). Les analyses effectuées par Hibti

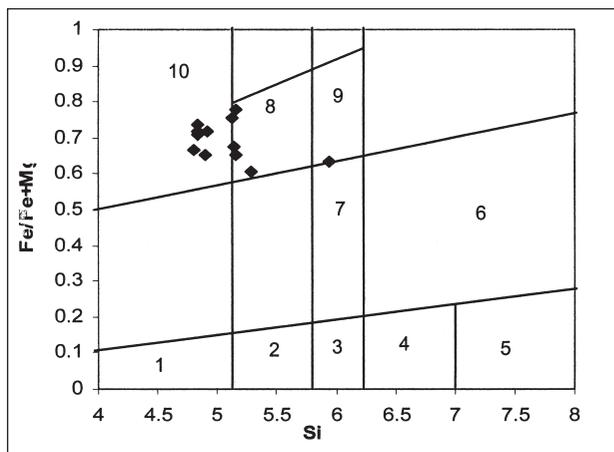


Fig. 9.—Distribution des chlorites de Draa Sfar dans le diagramme de [Si]-[Fe/Fe+Mg], (HEY, 1954).

(2001) sur les chlorites des rhyodacites du même gisement, ont montré un caractère ripidolitiques (diagramme de Hey, 1954) de ces dernières avec un rapport FM variant de 0,60 à 0,72. La composition chimique des chlorites des zones de cisaillement ainsi que celles du mur de l'amas sulfuré sont semblables. Ces résultats nous permettent ainsi de conclure que l'altération hydrothermale liée aux ZCD ayant affectée le massif acide de Draa Sfar est comparable à l'hydrothermalisme précoce et ceci en raison du rééquilibrage très intense accompagnant le fonctionnement de ces zones. Ces phénomènes de rééquilibrage seraient à l'origine du caractère très ferrifère des chlorites particulièrement localisées dans les zones à fortes activités tectoniques (ZCD).

Discussion et conclusions

Nos observations montrent que l'activité du mécanisme de déformation et d'altération se manifeste par un transfert de matière à différentes échelles. La diffusion intracristalline est soulignée par le changement de la composition des phénocristaux de feldspath. Le transfert intercristallin est impliqué par la néogenèse minérale dans la matrice recristallisée et par le changement croissant de la composition chimique globale en fonction de la déformation et de l'altération. Etheridge et al. (1983) ont souligné que la déformation devrait favoriser l'accroissement de la porosité interconnectée et de la perméabilité dans les roches métamorphiques. Le développement de phyllosilicates (la chlorite et la séricite), à l'approche des ZCD, indique l'augmentation de l'intensité de l'altération (perte au feu = 3,47% et l'indice d'altération chlorite-carbonate-pyrite = 97). Les changements de masse de la rhyodacite étudiée,

montrent des variations de teneurs en éléments mobiles peu significatives dans les roches légèrement altérées et déformées. Néanmoins, ces teneurs s'accroissent dans les zones qui montrent des déformations plus importantes. Il semble raisonnable d'attribuer cette mobilité à l'augmentation de la perméabilité au niveau des zones de déformations et à la circulation de fluides évolués (Gallinatti, 1984). L'appauvrissement de la silice dans les zones de cisaillement ductile est le résultat de la solubilité élevée du verre dévitrifié de la matrice de la rhyodacite du fait que la solubilité de la silice à l'état amorphe est beaucoup plus élevée que celle du quartz en liaison avec des augmentations de la température et du taux du rapport fluide/roche (Mac Lean et Barrett 1993). Ces auteurs ont souligné que cet appauvrissement se produit dans les zones où l'activité hydrothermale liée au dépôt de sulfures massifs est la plus intense.

Le fort accroissement des teneurs en éléments mobiles et la perte au feu dans ces zones de cisaillements ductiles peut être interprété ainsi, en liaison avec le développement des phyllosilicates à grain fin. Les réactions de ces transformations, qui sont consommatrices d'eau, produisent un matériel plus déformable que la roche mère du fait de la taille réduite des phénocristaux et de l'augmentation de la quantité de phyllosilicates et de quartz néoformé qui accentuent la ductilité de la phase recristallisée (Marquer et al., 1992). Ces zones sont accompagnées par la formation des fentes de tension à chlorite, quartz et/ou calcite témoignant d'une forte activité hydrothermale (photo c). L'assemblage minéralogique d'altération au niveau de ces zones, est formé essentiellement de chlorite, de séricite, de quartz et de magnétite. Cependant, nos observations et nos résultats incitent à infirmer une circulation très poussée d'un fluide hydrothermal dans les ZCD que dans le matériel peu déformé et moins transformé. A cette échelle, la migration des fluides, et donc la migration des ions en solution, doit plus répondre à des effets de réactions locales (néogenèse des phyllosilicates) qu'à des effets de percolation généralisée (Etheridge et al., 1984).

Les assemblages secondaires observés dans la rhyodacite de Draa Sfar et les changements de la masse calculée sont comparables à ceux des zones d'altérations associées à des dépôts de sulfures massifs d'âge Archéen-Paléozoïque, étudiés par plusieurs auteurs dans des districts miniers canadien, australien, européens et africain. Dans le district minier de Noranda au Québec, les failles syn-volcaniques ont joué un rôle très important dans la circulation des fluides à l'origine des dépôts de sulfures massifs volcanogènes à Cu, Zn, Pb, Ag et Au [de Horne, Delbridge, Corbet, Ansil, Norbec et

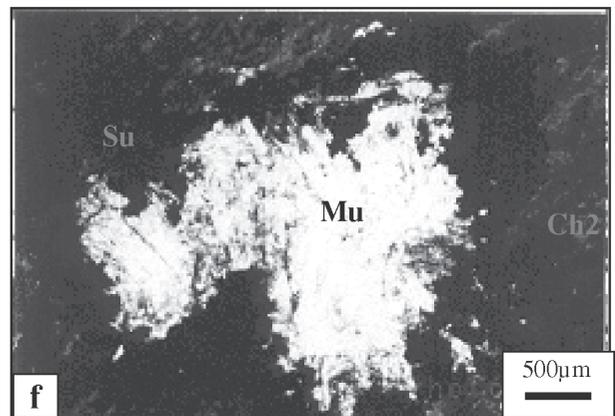
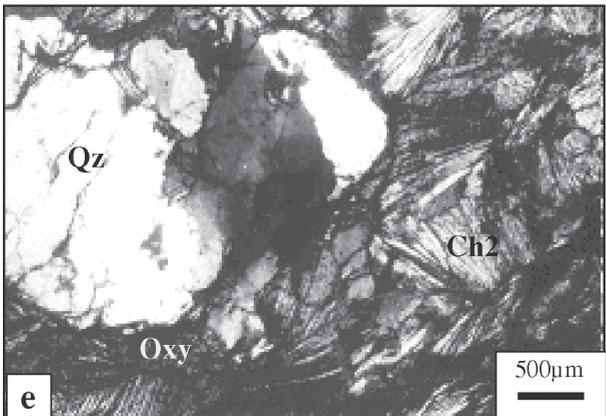
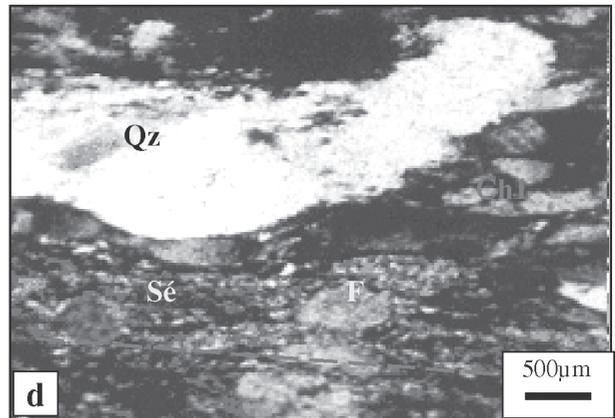
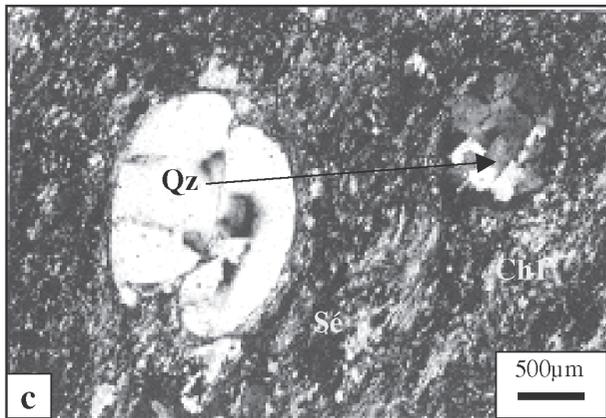
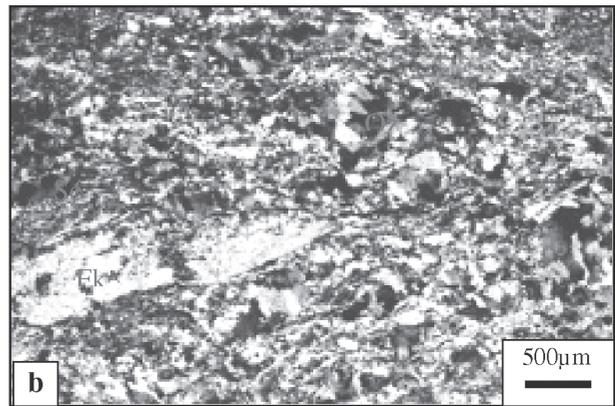
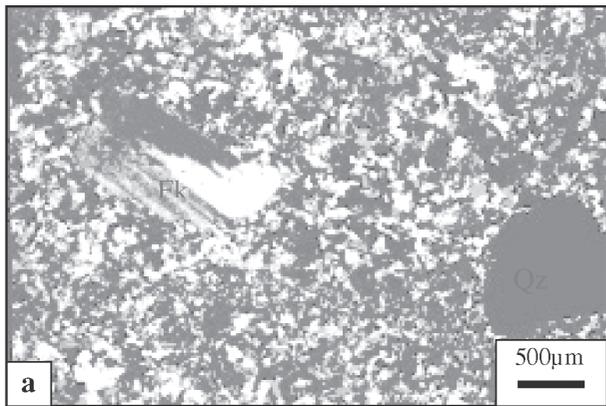


Planche 1.—Quelques aspects microscopiques de la rhyodacite altérée du mur de la minéralisation de Draa Sfar avec des minéraux d'altération hydrothermale associés. (a). Phénocristaux de feldspaths (F) séricitisés et silicifiés. (b). Phénocristal de feldspath potassique séricitisé et kaolinisé avec une forte diminution des feldspaths de la matrice ainsi que le volume des phénocristaux. Noter le caractère anti-cinématique des feldspaths. (c). Le fort changement minéralogique de la matrice par la néo-cristallisation de fines paillettes de séricite, de chlorite et du quartz, soulignant les plans de la schistosité S1. (d). Chlorite en éventails et rosettes, déformée et développée dans les zones cisailées. Elle est associée au quartz, boudinés et déformés, à la séricite, l'ensemble souligne les plans de la schistosité (S1). Noter la présence de reliques feldspathiques. (e). Chlorite tardive en éventails et rosettes, développée dans les zones cisailées, cette dernière est associée au quartz et aux oxydes. Noter le caractère post-schisteux de cette association. (f). Chlorite tardive à caractère ferrière observée au mur de l'amas sulfuré de Draa Sfar en association avec la muscovite et les sulfures.

Abréviations :

Ch 1 : Chlorite anti-schisteuse ; Ch 2 : Chlorite post-schisteuse ; Su : Sulfures ; Sé : Séricite ; Mu : muscovite ; Qz : quartz ; Fk : feldspath potassique ; S1 : plan de la schistosité de flux.

Mobrun] (Hoy, 1993). L'assemblage d'altération de ces VMS, est formée de quartz, albite, séricite, chlorite et carbonate (Barrett et MacLean, 1994). Les changements de masse de la rhyolite altérée du mur de la minéralisation de Delbridge Deposit, résultent d'un enrichissement en silice ($\pm 30\%$) accompagné d'une perte significative de Na₂O et CaO et d'un gain important de K₂O, FeO et MgO. Barrett et al. (2001) ont montré que la rhyolite et les shales du mur des amas sulfurés à Zn, Pb et Cu de la mine de Parys Mountaine, d'âge Ordovicien supérieur à Silurien inférieur d'Inglesey, (United Kingdom), présentent un assemblage d'altération à séricite, chlorite, quartz, carbonate et pyrite avec un enrichissement en FeO et MgO et un appauvrissement en K₂O, Na₂O et CaO. Dans les dépôts cambriens des amas sulfurés polymétalliques de Hellyer, (Ouest de Tasmania, Australia), des assemblages d'altération hydrothermale à silice, chlorite et séricite ont été soulignés par Schardt et al. (2001).

Dans la rhyodacite de Draa Sfar, les gradients d'altération sont soulignés par des variations caractéristiques de la composition initiale en fonction de l'approche de la zone intensément déformée. On note une diminution graduelle des teneurs en Na₂O, SiO₂, K₂O et CaO ; une augmentation significative des teneurs en Fe₂O₃ et MgO. Ces variations de la composition traduisent l'effet de la déformation, qui active les réactions et favorise les transferts en solution au sein d'un système fluide/solide. Elles s'accompagnent de transformations minéralogiques typiques du faciès schistes verts et d'altérations associées à des dépôts de sulfures massifs. On montre en effet qu'elles altèrent fortement la mémoire magmatique de la rhyodacite.

Dans le cas étudié, nous avons montré que l'analyse des relations entre la circulation du fluide hydrothermal évolué et les zones de cisaillements ductiles, fournit des résultats exploitables quantitativement. Ce type d'approche doit être développé sur toute la série volcano-sédimentaire à travers la zone minéralisée. Des investigations à la microsonde électronique sur les chlorites du mur de l'amas sulfuré et des zones de cisaillement de Draa Sfar ainsi que des études thermobarométriques (inclusions fluides) sont en cours, afin de cerner la nature du fluide hydrothermal qui parcourt ces zones et son lien avec la minéralisation sulfurée de Draa Sfar.

Références

Barrett, T. J. and Mac Lean, W. H. (1994). Mass changes in hydrothermal alteration zones associated with VMS deposits of the Noranda Area. *Explor. Mining. Geol.*,

- 3: 131-160.
- Barrett, T. J.; Mac Lean, W. H and Tennant, S. C. (2001). Volcanic sequence and alteration at the Pary Mountain volcanic-hosted massive sulfide deposit, wales, United Kingdom : applications of immobile element lithogeochemistry. *Econ. Geol.*, 96: 1279-1305.
- Ben Aissi, L. (2001). *Gisement de Draa Sfar Sud : Etude géologique et métallogénique des minéralisations et des altérations hydrothermales associées (Jebilet centrales, Maroc)*. Mémoire de DESA. Université. Cadi Ayyad. Marrakech, 82 pp.
- Bordonaro, M. (1983). Tectonique et pétrographie du district à pyrrhotite de Kettara (Paléozoïque des Jebilet, Maroc). *Thèse de 3ème cycle*, Université. Strasbourg, 132 pp.
- Courroux, G. (1983). Le Tungstène dans le granite hercynien de Puentedeume. Relations entre teneurs et déformation. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 296: 1523-1526.
- Doyl, M. G. (2001). Volcanic influences on hydrothermal and diagenetic alteration : evidence from highway-reward, Mount Windsor subprovince, Australia. *Econ. Geol.*, 96: 1133-1148.
- Essafi, A. (1995). *Relations entre magmatisme, déformation et altération hydrothermale, l'exemple des Jebilet centrales (hercynien, Maroc)*. Thèse de Docteur d'Etat Es-Sciences, Université. Cadi Ayyad. Marrakech, 308 pp.
- Essafi, A.; Capdevila, R. and Lagarde, J. L. (1995). Transformation de leucogabbros en chloritoschistes sous l'effet de l'altération hydrothermale et de la déformation dans l'intrusion de Kettara Jebilet (Maroc). *C. R. Acad. Sc. Paris*, 320, série II a: 189-196.
- Essaifi, A.; Potrel, A.; Capdevila, R and Lagarde, J. L. (2003). U-Pb dating : emplacement age of the bimodal magmatism of central Jebilet (Variscan Belt, Morocco). Geodynamic implications, *Comptes Rendus. Geosciences.*, 335: 193-203.
- Etheridge, M. A.; Wall, V. J and Cox, S. F. (1984). High fluid pressures during regional metamorphism and deformation : implication for mass transport and deformation mechanism. *J. Geophys. Res.*, 89: 4344-4358.
- Etheridge, M. A.; Wall, V. J and Vernon, R. H. (1983). The role of the fluid phase during regional metamorphism and deformation. *J. Metamorphic. Geol.*, 1: 205-226.
- Ferry, J. M. (1979). Reaction mechanism, physical conditions and mass transfer during hydrothermal alteration of mica and feldspar in granite rocks from South Central Maine. USA. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 68: 125-139.
- Gallinatti, B. C. (1984). Initiation and collapse of active circulation in a hydrothermal system at the Mid-Atlantic Ridge, 23°N. *J. Geophys. Res.*, 89: 3275-3289.
- Gemmell, L. B and Hermann, W. (2001). The spectrum of ore deposit types, volcanic environments, alteration halos, and related exploration vectors in submarine volcanic successions: some exemples from Australia. *Econ. Geol.*, 96: 909-912.
- Gresens, R. L. (1967). Composition-Volume relationships of metasomatism. *Chem. Geol.*, 2: 47-65.
- Herrmann, W.; Black, M.; Doly, M.; Huston, D.; Kamparad, J.; Merry, N and Pontual, S. (2001). Short wavelength infrared (SWIR) spectral analysis of hydrothermal zones associated with base metal sulfide

- deposite at Rosebery and Western Tharsis, Tasmania, and Highway-Reward, Queensland. *Econ. Geol.*, 96: 939-955.
- Hey, M. H. (1954). A new review of the chlorites. *Mineral. Mag.*, 30: 277-292.
- Hibti, M. (2001). *Les amas sulfurés des Guemassa et des Jebilet (Meseta Sud-Occidentale, Maroc) : Témoins de l'hydrothermalisme précoce dans le bassin mesetien. Thèse de Docteur d'Etat Es-Sciences.* Université. Cadi Ayyad. Marrakech, 296 pp.
- Hibti, M.; Bouabdelli, M.; Dupuy, J. J.; Chouhaidi, M. Y. and Mouttaqi, A. (1995). Zonalité et évolution des phases d'altération hydrothermales dans l'amas sulfuré de Hajjar (Guemassa Orientale, Maroc). *Géologique de France*, abstract, p. 60.
- Hoy, L. D. (1993). Regional evolution of hydrothermal fluids in the Noranda District, Quebec: evidence from ^{18}O values from volcanogenic massive sulfide deposits. *Econ. Geol.*, 88: 1526-1541.
- Huvelin, P. (1961). Sur l'âge Viséen Supérieur des Schistes de Kettara et de Djebel Sarhlef (Djebilet Centrales, Maroc). *C. R. Sommaire Soc. Géol. France*, 10: 290-291.
- Huvelin, P. (1977). Etude géologique et géochimique du massif hercynien des Jebilet (Maroc occidental). *Notes et Mem. Serv. Géol. Maroc*, 232 bis.
- Ishikawa, Y.; Sawaguchi, T.; Iwaya, S. and Horiuchi, M. (1976). Delineation of prospecting targets for Kuroko deposits based on modes of volcanism of underlying dacite and alteration halos. *Mining Geology*, 26: 105-117 (in Japanese with English abs).
- Lagarde, J. L. (1985). Cisaillements ductiles et plutons granitiques contemporains de la déformation hercynienne post-Viséenne de la meseta Marocaine. *Hercynica. L.1*, 29-37.
- Large, R. R.; J. Bruce Gemmel; Holger Paulik and Huston, D. L. (2001). (a). The Alteration Box Plot: A simple approach to understanding the relationship between alteration mineralogy and lithochemistry associated with volcanic-hosted massive sulfide deposits. *Econ. Geol.*, 96: 957-971.
- Large, R. R.; Rodney, L. Allen.; Michal D. Black and Herrmann, W. (2001). (b). Hydrothermal alteration and volatil element halos for the rosebery K lens volcanic-hosted massive sulfide deposit, Western Tasmania. *Econ. Geol.*, 96: 1055-1072.
- Leblanc, M. (1993). Amas sulfuré formé par injection de sills dans des sédiments : Exemples d'Hajjar (Marrakech, Maroc). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 316 (II): 499-504.
- Mac Lean, W. H. (1990). Mass change calculations in altered rock series. *Mineralium Deposita*, 25: 44-49.
- Mac Lean, W. H. et Barrett, T. J. (1993). Lithochemical techniques using immobile elements. *J. Geochim. Expl.*, 48: 109-133.
- Mac Lean, W. H. et Kranidiotis, P. (1987). Immobile elements as monitors of mass transfer in hydrothermal alteration : Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. *Econ. Geol.*, 82: 951-962.
- Mrini, Z.; Rafi, A.; Duthou, J. L. and Vidal, P. (1992). Chronologie Rb-Sr des granitoïdes Hercyniens du Maroc : conséquence : *Bull. Soc. Géol. France*, 163: 281-291.
- Schardt, C.; Cook, D. R.; Bruce Gemmel, J.; Large, R. R. (2001). Geochemical modeling of the zoned footwall alteration pipe, Hellyer volcanic-hosted-massif Sulfide deposit, Western Tasmania. *Econ. Geol.*, 96: 1037-1054.
- Stolz, A. J. (1995). Geochemistry of the Mount Windsor volcanics: Implications for the tectonic setting of Cambro-Ordovician volcanic hosted massive sulfid mineralisation in nrtheastern Australia. *Econ. Geol.*, 90: 1080-1097.
- Watanabe, Y. (2002). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronologie constraints on the timing of massive sulfide and vein-type Pb-Zn mineralization in the Western Meseta of Morocco. *Econ. Geol.*, 97: 145-157.
- Winchester, J. A. and Flody, P. A. (1977). Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements: *Chemical Geol.*, 20: 325-344.

Recibido el 16 de julio de 2004
Aceptado el 11 de julio de 2005