

## QUANTIFICATION ET BILAN DE MATIERE DE LA REACTION CLINOPYROXENE-SPINELLE LORS DE LA FORMATION DU PLAGIOCLASE DANS LES LHERZOLITES A SPINELLE

A. Ibhi \*, H. Nachit \*, M. Berrahma \*\*, H. Abia \* y J. Hernández \*\*\*

### RESUME

L'apparition du plagioclase sodique (Pl) et du verre dans certaines péridotites, récoltées dans les laves alcalines de Saghro, Anti-Atlas marocain et dans celles de La Palma, Iles Canaries, est expliquée comme étant le produit d'un métasomatisme et d'une fusion de clinopyroxène (Cpx) et de spinelle (Spl) selon la réaction suivante:



Les proportions volumiques des différentes phases impliquées dans cette réaction ont été estimées et des bilans de matière ont été réalisés. Ils montrent que la réaction s'effectue à volume constant et traduit les échanges d'éléments suivants:

- Apports de Na, Ti, Fe<sup>2+</sup> et Fe<sup>3+</sup>.
- Pertes de Si, Ca, Mg et O<sub>2</sub>.

**Mots-clés:** plagioclase, péridotite, métasomatisme, lave alcaline, bilan de matière, Anti-atlas marocain, La Palma, Iles Canaries.

### RESUMEN

La formación de plagioclasa sódica (Pl) y de vidrio en las peridotitas de Saghro (Anti-Atlas marroquí) y de La Palma (Islas Canarias) se puede explicar como resultado de un proceso de metasomatismo y de fusión parcial de clinopyroxeno (Cpx) y espinela (Spl), según la reacción:



Se han calculado las proporciones volumen de las diferentes fases implicadas en la reacción y se han realizado los balances de masa. Se demuestra que la reacción se produce a volumen constante y traduce los siguientes intercambios:

- Aporte de Na, Ti, Fe<sup>2+</sup> y Fe<sup>3+</sup>.
- Pérdida de Si, Ca, Mg y O<sub>2</sub>.

**Palabras clave:** plagioclasa, peridotita, metasomatismo, balance de materia, Anti-Atlas marroquí, La Palma, Islas Canarias.

### Introduction

Le massif volcanique de Saghro, situé dans la partie orientale de l'Anti-Atlas marocain, est constitué d'une série de laves alcalines d'âge plio-quaternaire (Berrahma *et al.*, 1993). Les cônes volcaniques les plus récents et les coulées qui en sont

issues sont formés de néphéline à olivine. Des enclaves de péridotites ont été découvertes, d'une part dans l'un de ces cônes dans la région de Oulili, à 15 kilomètres au Sud-Est de Bou-Gafer et, d'autre part, dans les coulées inférieures de Fom Elkouss à 10 kilomètres à l'Ouest de Tinghir (fig. 1). Les xénolites de péridotite y sont associés

\* Département de Géologie. Faculté des Sciences BP 28/S. Université Ibn Zohr. Agadir. Maroc.

\*\* Département de Géologie. Ecole Normale Supérieure. Takaddoum. Rabat. Maroc.

\*\*\* Institut de Minéralogie. Université de Lausanne. BFSH CH-1015. Lausanne.

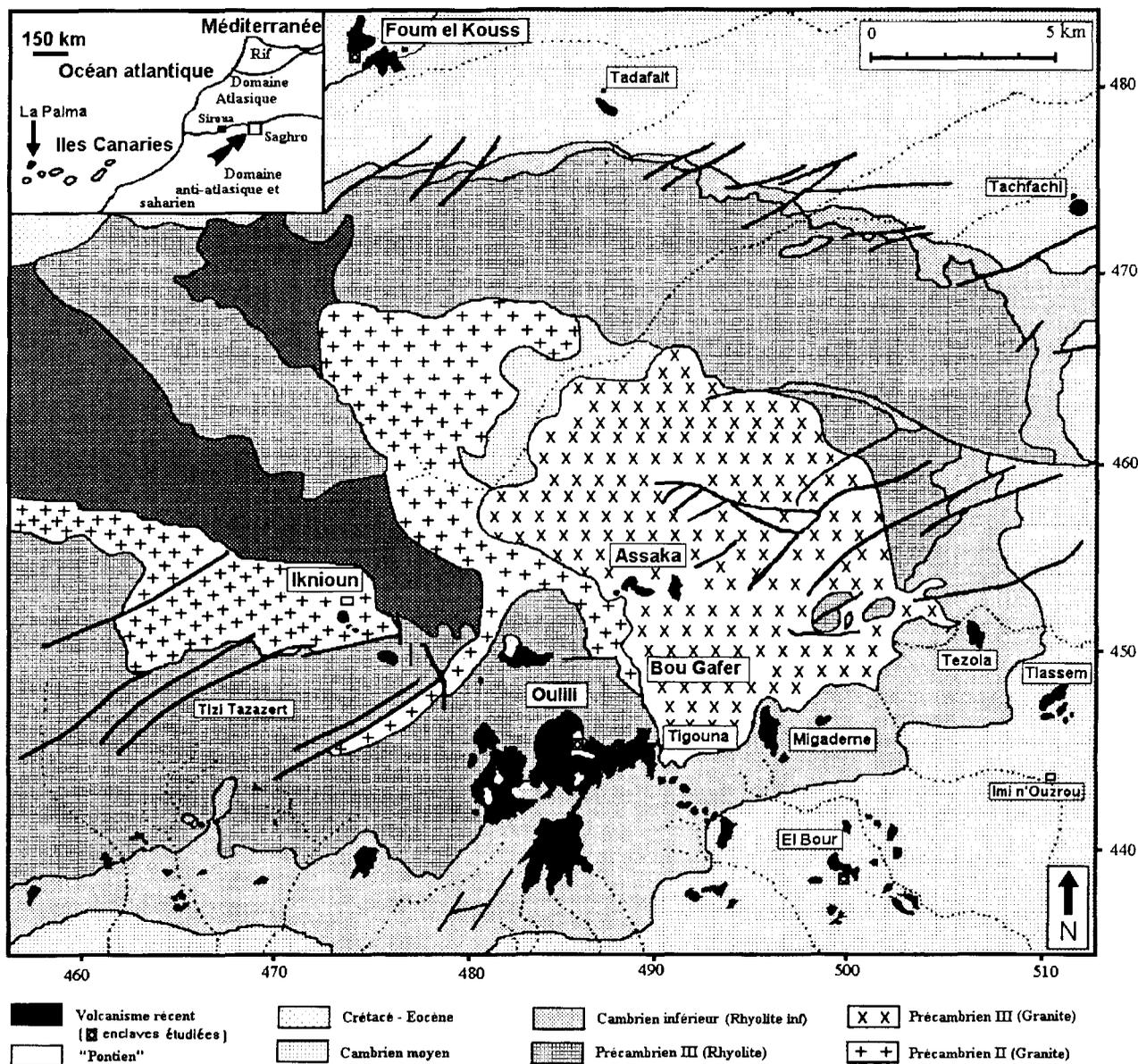


Fig. 1.—Carte géologique du Sagro et localisation des enclaves étudiées.

à des mégacrists et à des cumulats de nature pyroxénitique et amphibolitique (Ibhi *et al.*, 1997; Ibhi *et al.*, 1998). Les grandes structures tectoniques régionales (failles NW-NE et EE-EW) contrôlant l'activité volcanique du Sagro forment un couloir de cisaillement qui semble se prolonger vers l'ouest aux Iles Canaries. Ces îles possèdent également un volcanisme plio-quadernaire à caractère hyperalcalin (Schmincke, 1986). Les laves basaltiques de La Palma portent des enclaves de péridotite dont le diamètre peut atteindre 40 cm (Dantria et Girod, 1987).

L'étude de quelques échantillons représentatifs de ces péridotites montre qu'il s'agit de lherzolites à spinelle, de texture porphyroblastique à granulo-blastique. Certaines nodules contiennent, en plus de spinelle comme phase aluminieuse, un plagioclase relativement sodique ( $An_{50}$  à  $An_{60}$ ), se développant entre le spinelle et le clinopyroxène déstabilisés, et jamais au contact du spinelle-olivine ou spinelle-orthopyroxène. Le plagioclase se présente en cristaux subautomorphes auxquels sont associés (jusqu'à 20 %) des microcristaux automorphes d'olivine, des granules de spinelle chromifère

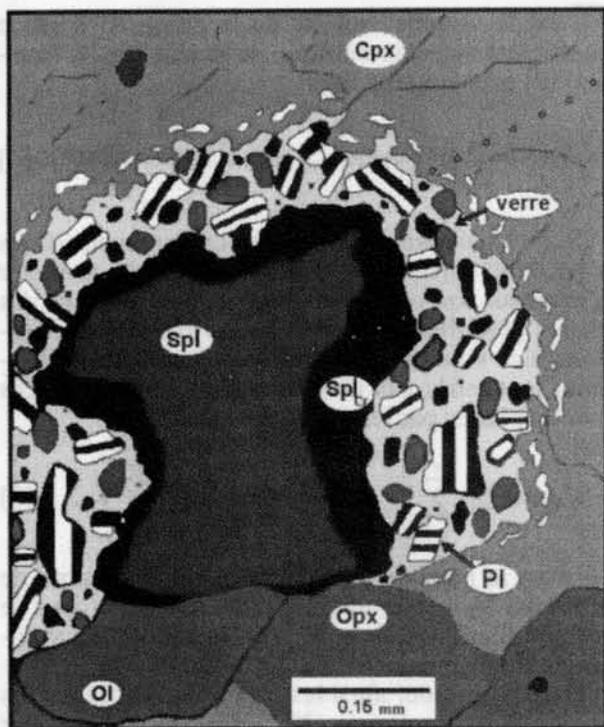


Fig. 2.—Apparition du plagioclase et du verre dans les enclaves de lherzolite.

(15 %) et un verre brun (27 %) comme représenté dans la figure 2. L'origine de plagioclase reste encore un sujet de discussion. Certains auteurs envisagent deux hypothèses: un rééquilibrage de la nodule à l'état solide (Dautria et Girod, 1986) et/ou une imprégnation à un instant donné par un liquide feldspathique.

L'objet de cette note est d'apporter de nouvelles observations sur la déstabilisation du clinopyroxène et de spinelle dans les lherzolites, d'écrire la réaction observée, et ainsi d'essayer de quantifier la mobilité des éléments chimiques et les transferts impliqués dans la réalisation de telle structure.

### Chimisme des phases

Toutes les phases ont été analysées à la microsonde électronique (Camebax Sx50 de CAMPARIS), l'erreur absolue estimée à 1,5 % en poids d'oxyde. Les formules structurales représentatives des minéraux impliqués dans la réaction sont reportées sur le tableau 1. Les rapports Mg/Mg+Fe des coeurs des porphyroclastes de clinopyroxène et orthopyroxène sont bien corrélés avec ceux de l'olivine associée et témoigneraient donc d'un équilibre initial.

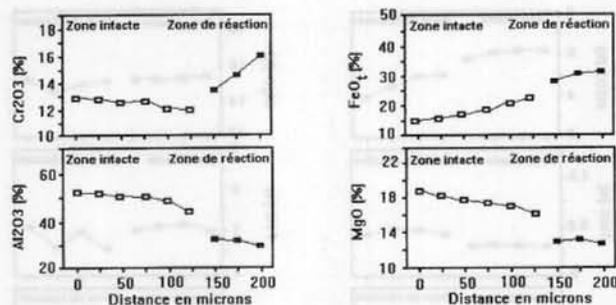


Fig. 3.—Profils de variation de la composition chimique de spinelle (instable) en fonction de la distance.

L'étude détaillée au microscope électronique à balayage (MEB) de la zone coronitique montre que la déstabilisation du clinopyroxène et de spinelle présente une structure festonnée, avec des variations brutales des éléments chimiques intervenant dans la genèse du plagioclase, contrairement aux minéraux des nodules sans plagioclases. Les traversées à la microsonde sur les différentes phases, permettent d'établir des profils de zonation qui résultent de la diffusion des éléments chimiques dans les phases déstabilisées (Wang et Wu, 1995):

Le passage du coeur brun à la bordure opaque des cristaux de spinelle montre un enrichissement en Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et en FeO ainsi qu'une diminution corrélative de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et de MgO comme représenté dans la figure 3.

La clinopyroxène est une diopside montrant des variations nettes pour Na<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et CaO (éléments fondamentaux pour la genèse des plagioclases). Les teneurs en Na<sub>2</sub>O et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diminuent du coeur du minéral vers sa bordure. En revanche, les teneurs en CaO et TiO<sub>2</sub> augmentent légèrement (fig. 4).

Le verre interstitiel se présente sous forme de petites plages brunes; les analyses à la microsonde montrent des teneurs élevées en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O et K<sub>2</sub>O et des teneurs faibles en CaO et FeO. Ceci a été également souligné dans les enclaves de péridotites de différentes localités (Adrian *et al.*, 1983; Xu et Mercier, 1991; Ionov *et al.*, 1994; Kepezhinskas *et al.*, 1995). La faible teneur en CaO (1 %) du verre reflète l'épuisement de celui-ci au cours de la cristallisation du plagioclase néoformé. La teneur élevée en K<sub>2</sub>O (5 %) est due au fait qu'aucune phase contenant cet élément n'a pu être cristallisée. La forte teneur de cet élément, élimine l'hypothèse que la provenance de ce verre est due à la fusion d'une partie du plagioclase, contrairement à ce qu'ont écrit Dautria et Girod (1986).

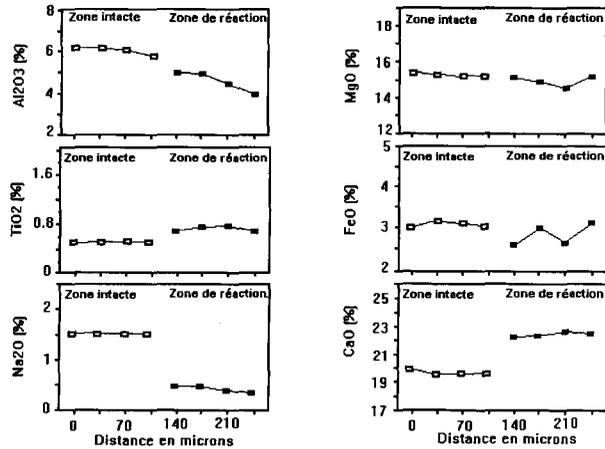
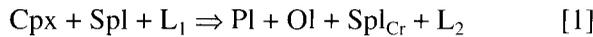


Fig. 4.—Profils de variation de la composition chimique de clinopyroxène (au contact du spinelle instable) en fonction de la distance.

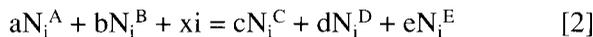
### Quantification de la réaction

La déstabilisation du clinopyroxène (Cpx) et du spinelle (Spl) implique tout d'abord la libération de leurs éléments chimiques constitutifs dans la phase interstitielle en suite à l'obtention du plagioclase (Pl), de l'olivine (Ol) et du spinelle chromifère (Spl<sub>Cr</sub>). Il s'est avéré nécessaire d'évaluer avec précision le comportement de ces éléments en fonction des variations du volume. D'où la réaction:



où  $L_1$  et  $L_2$  représentent respectivement le liquide métasomatique et le liquide résiduel.

La réaction [1] peut être décrite quantitativement par la relation suivante:



où  $xi = L_1 + L_2$ ,

$N_i^A$  est le nombre de moles de l'élément  $i$  dans la phase minérale  $A$ ;  $a, b, c, \dots$  sont les coefficients stoechiométriques des phases  $A, B, C, \dots$  et  $xi$ : le nombre de moles de l'élément  $i$  échangé par le système avec le milieu extérieur.

Pour faciliter le calcul, les proportions des phases seront exprimées dans l'équation [2] en terme de volume. Les coefficients stoechiométriques sont reliés aux volumes des phases mises en jeu par l'équation suivante:

$$V_A = a\bar{V}_A \quad [3]$$

$\bar{V}_A$  est le volume molaire de la phase  $A$ ;  $a$  est le coefficient stoechiométrique de la réaction. L'équation [2] peut s'écrire alors:

$$\left[ \frac{V_A}{V_A} N_i^A + \frac{V_B}{V_B} N_i^B \right] + xi = \left[ \frac{V_C}{V_C} N_i^C + \frac{V_D}{V_D} N_i^D + \frac{V_E}{V_E} N_i^E \right] \quad [4]$$

Si on a  $n$  élément et  $m$  phases on aura  $n$  équations à  $(n + m)$  inconnus. Pour réduire le nombre d'inconnus, on estime les proportions relatives des phases produites grâce à l'analyse modale des produits. Les volumes molaires des réactifs et des produits sont reliés aux proportions volumiques de ces mêmes phases par les équations suivantes:

$$V_R = X_{\text{vol}}^R \cdot \sum_{i=1}^r V_i \quad V_P = X_{\text{vol}}^P \cdot \sum_{i=1}^p V_f \quad [5]$$

où  $r$  est le nombre de réactifs,  $p$  est le nombre de produits,  $V_R$  est le volume d'un réactif,  $V_P$  est le volume d'un produit et  $X_{\text{vol}}$  est la proportion volumique d'une phase.

On peut évaluer ainsi les proportions volumiques des produits impliqués ( $X_{\text{vol}}^P$ ) dans la réaction par analyse d'image. L'équation [4] peut s'écrire alors:

$$\begin{aligned} & \left[ V_i \left( X_{\text{vol}}^A \left( \frac{N_i^A}{V_B} \right) + \left( \frac{N_i^B}{V_B} \right) \right) \right] + xi = \\ & = V_f \left[ X_{\text{vol}}^C \left( \frac{N_i^C}{V_C} \right) + X_{\text{vol}}^D \left( \frac{N_i^D}{V_D} \right) + X_{\text{vol}}^E \left( \frac{N_i^E}{V_E} \right) \right] \quad [6] \end{aligned}$$

Cette équation comporte  $n+3$  inconnus ( $xi, \dots, x_n, V_i, V_f$  et  $X_{\text{vol}}$ ). Si on introduit la variation de volume, définie par Gresens (1967) comme étant le rapport du volume final des produits sur le volume initial des réactifs:

$$F_v = \frac{\sum_{i=1}^p V_f}{\sum_{i=1}^r V_i} \quad [7]$$

dans l'équation [6], tout en considérant que  $X_{\text{vol}}^A + X_{\text{vol}}^B = 1$ , on obtient l'équation [8]:

$$\begin{aligned} & \left[ X_{\text{vol}}^A \left( \frac{N_i^A}{V_A} - \frac{N_i^B}{V_B} \right) + \frac{N_i^B}{V_B} \right] + xi = \\ & = F_v \left[ X_{\text{vol}}^C \left( \frac{N_i^C}{V_C} \right) + X_{\text{vol}}^D \left( \frac{N_i^D}{V_D} \right) + X_{\text{vol}}^E \left( \frac{N_i^E}{V_E} \right) \right] \quad [8] \end{aligned}$$

Tableau 1.—A: Formules structurales des minéraux impliqués dans la réaction; les proportions volumiques (% Vol.) des produits ont été estimées par comptage de points et analyses d'image.  
B: Calcul du nombre de moles d'élément par unité de volume pour chaque minéral impliqué dans la réaction ainsi que leurs volumes molaires. Données tirées de Holland et Powell (1990).

A	Cpx	Spl	Pl	Ol	Spl <sub>cr</sub>	B	Cpx	Spl	Pl	Ol	Spl <sub>cr</sub>
Si	1.80	0.00	2.39	1.00	0.00	Si/dm <sup>3</sup>	27.19	0.00	23.80	22.17	0.00
Al	0.29	1.30	1.60	0.00	1.01	Al/dm <sup>3</sup>	4.38	3.65	15.9	0.00	2.83
Fe <sup>3+</sup>	0.00	0.26	0.00	0.00	0.33	Fe <sup>3+</sup> /dm <sup>3</sup>	0.00	0.73	0.00	0.00	0.93
Fe <sup>2+</sup>	0.26	0.37	0.00	0.25	0.23	Fe <sup>2+</sup> /dm <sup>3</sup>	3.92	2.81	0.00	5.54	2.81
Mg	0.64	0.61	0.00	1.74	0.77	Mg/dm <sup>3</sup>	9.67	1.71	0.00	38.58	2.16
Ca	0.86	0.00	0.60	0.00	0.00	Ca/dm <sup>3</sup>	12.99	0.00	9.96	0.00	0.00
Na	0.07	0.00	0.36	0.00	0.00	Na/dm <sup>3</sup>	1.06	0.00	3.58	0.00	0.00
Ti	0.03	0.00	0.00	0.00	0.13	Ti/dm <sup>3</sup>	0.45	0.00	0.00	0.00	0.36
Cr	0.02	0.32	0.00	0.00	0.42	Cr/dm <sup>3</sup>	0.30	0.90	0.00	0.00	1.18
O <sub>2</sub>	6.00	4.00	8.00	4.00	4.00	O/dm <sup>3</sup>	90.65	11.23	79.68	88.69	11.23
% Vol.			42	30	16	V <sub>mol</sub> /cm <sup>3</sup>	66.19	356.19	100.40	45.10	356.19

Mis à part la mobilité  $x_i$  des éléments  $i$ , ce système d'équations ne comporte plus que deux inconnues  $X_{vol}^A$  et  $F_v$ , ( $X_{vol}^R$  étant connue grâce à l'analyse d'image). Pour un facteur de volume ( $F_v$ ) donné et en considérant un élément immobile ( $x_i = 0$ ), on peut calculer la proportion relative de A et par conséquent celle de B. Ayant les proportions relatives des minéraux réactants, on peut calculer la mobilité de tous les éléments. La solution la plus probable est celle qui minimise la mobilité de tous les éléments.

On calcule le nombre de moles d'élément par unité de volume (dm<sup>3</sup>) pour chaque minéral impliqué dans la réaction (Tableau 1). Les volumes molaires sont tirés des données de Holland et Powell (1990).

Deux types de diagrammes sont présentés pour interpréter les résultats (Gresen, 1967; Sicard *et al.*, 1986; Potdevin et Marquer, 1987; Cottonian *et al.*, 1988):

1.  $X_i = f(F_v)$  le premier diagramme montre, en moles d'atomes, la mobilité absolue des éléments en fonction de la variation du volume (fig. 5A). Le deuxième montre la courbe traduisant la somme d'éléments échangés avec le liquide au cours de la réaction (fig. 5B).

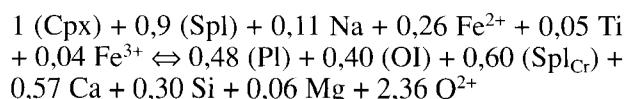
2.  $X_i/N_i = f(F_v)$  montre la mobilité relative des éléments, en pourcentage de la teneur initiale de ces éléments dans les réactants (fig. 5C).

Ces diagrammes permettent d'évaluer l'importance des transferts et les comportements des éléments lors de la déstabilisation du clinopyroxène et de spinelle en fonction du facteur de volume.

L'étude des diagrammes (figs. 5A-5C), montre que Ti, Fe<sup>3+</sup>, Na et Fe<sup>2+</sup> sont toujours extraits du liquide et ceci quelle que soit la variation de volume. En revanche, le Ca est toujours libéré dans le liquide, la même remarque est valable pour Si sauf pour une forte augmentation de volume ( $F_v > 1,3$ ).

En fin Al, Cr et Mg montrent un comportement identique; les rapports de leurs gains ou pertes sont égaux aux rapports de leurs teneurs initiales. Cette uniformité de comportement de trois éléments aussi différents, ajoutée au fait qu'ils apparaissent immobiles pour une valeur de  $F_v$  proche de l'unité (fig. 5C), indiqueraient une conservation du volume lors de la résorption du clinopyroxène et de spinelle. Cette solution est confirmée sur le diagramme où sont reportées la somme des gains et la somme des pertes en fonction du volume (fig. 5B). En effet, la courbe qui traduit le total d'éléments échangés avec le liquide au cours de la réaction présente sa valeur minimale pour une transformation à volume constant. Cette valeur est normalement celle qui minimise le transfert total de matière.

En retenant l'hypothèse d'une transformation à volume constant et d'une mobilité très limitée de Al, Cr et Mg (Ashworth, 1993), la réaction de déstabilisation de clinopyroxène au contact du spinelle est la suivante:



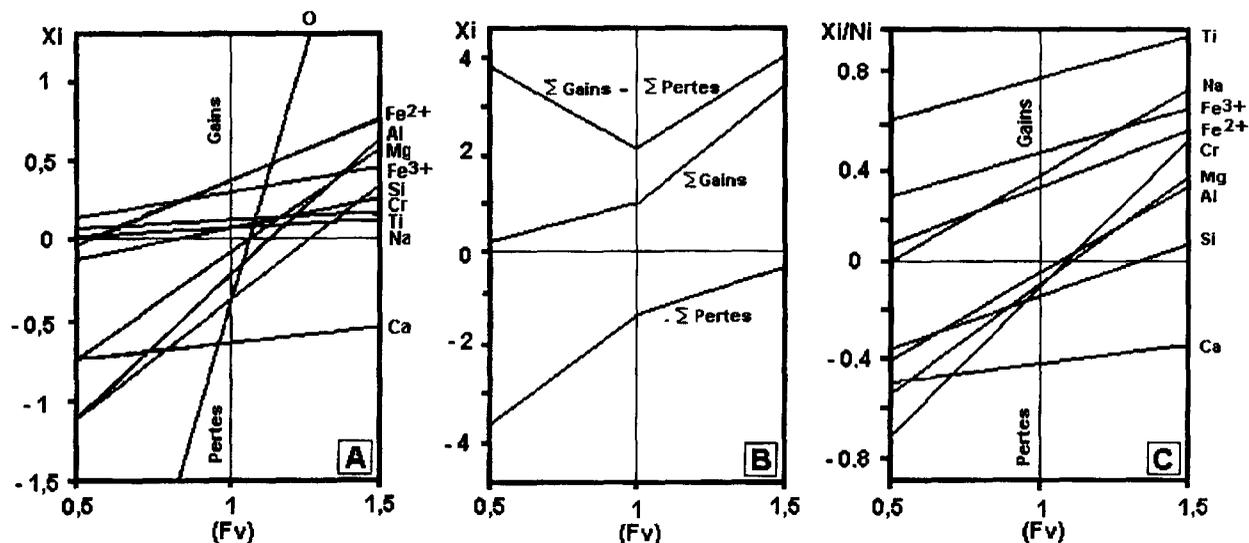


Fig. 5.—Diagrammes illustrant la mobilité des éléments en fonction des facteurs de volume (Fv).

A: Diagramme de la mobilité absolue des éléments en nombre d'atomes.

B: Courbe traduisant le transfert total de matière au cours de la réaction.

C: Diagramme de la mobilité relative des éléments en pourcentage de la teneur initiale dans les réactants.

## Conclusion

On admet, dans l'écriture de cette réaction, une incertitude absolue de l'ordre de 0,03 mole pour les gains ou les pertes de chaque élément. Ce qui permet de négliger les faibles variations en éléments immobiles. L'équation donnée est équilibrée, aux incertitudes près, en masse et en charge.

Le bilan montre que l'apparition du plagioclase (An<sub>50</sub> - An<sub>60</sub>) dans les lherzolites à spinelle ne dépend pas uniquement de la fusion du clinopyroxène et de spinelle, mais nécessite l'intervention simultanée d'autres phénomènes:

1. Une imprégnation des nodules ultrabasiques par un liquide métagénétique riche en Na et Fe, Ceci a été également souligné par Kepezhinskas *et al.* (1995) en URSS. Les travaux de Willie (1979) et Ryabchikov et Boettcher (1980) ont montré que l'eau susceptible de circuler dans le manteau supérieur pouvait contenir des concentrations importantes de silice et d'alcalins.
2. Une lixiviation, in situ, du composant jadéitique de clinopyroxène instable. Ceci est en accord avec les travaux de Ryabchikov *et al.* (1982).
3. Le liquide ainsi formé doit cristalliser dans le domaine de stabilité du plagioclase, en assemblages olivine + plagioclase + spinelle chromifère.
4. En fin la réaction se déroule en conservant au

maximum la charpente silicatée des phases parentes conformément aux études de Ashworth (1993).

Ces phénomènes sont probablement liés à la remontée des enclaves par le magma. La rareté de ces réactions coronitiques à plagioclase dans les nodules ultrabasiques, peut être due à la difficulté de réalisation de ces phénomènes simultanément.

Finalement, on notera que l'établissement de bilans de matière par des méthodes graphiques simples assure une quantification précise des réactions. Ces bilans permettent d'apprécier les échanges avec le milieu extérieur.

## REMERCIEMENT

Les auteurs tiennent à remercier vivement le Professeur R. Kienast du Laboratoire de Pétrologie, Université Pierre et Marie Curie, Paris, pour les analyses de microsonde effectuées à CAMPARIS.

## References

- Adrian, P. J.; Joseph V. S. and Dawson, J. B. (1986). Glasses in mantle xenoliths from Olmani, Tanzania. *J. Geol.*, 91, 167-178.
- Ashworth, J. R. (1993). Fluid-absent diffusion kinetics of Al inferred from retrograde metamorphic coronas. *Amer. Mineral.*, 78, 331-337.

- Berrahma, M.; Delaloye, M.; Faure-Muret, A. et Rachdi, H. E. N. (1993). Premières données géochronologiques sur le volcanisme alcalin du Jbel Saghro, Anti-Atlas, Maroc. *J. African Earth Sci.*, 17, 333-341.
- Cotonian, C.; Potdevin, J. L.; Bertrand, H. et Lombardo, N. (1988). Pseudomorphoses coronitiques d'amphibole dans le trachyte de Monac (Veley oriental). Bilan de matière, réaction magmatique. *Bull. Minéralogie*, 111, 89-95.
- Dautria, J. M. et Girod, M. (1986). Les enclaves de lherzolite à spinelle et plagioclase du volcan de Dibi: des témoins d'un manteau anormal. *Bulletin de Minéralogie*, 109, 275-288.
- Gresens, R. L. (1967). Composition-volume relationship of metasomatism. *Chem. Geol.*, 2, 47-65.
- Dantria, J.M. et Girod, M. (1987). Cenozoic volcanism associated with swells and rifts. In: *Mantle Xenoliths*, by P. H. Nixon, John Wiley and Sons Ltd (eds.), 195-214.
- Holland, J. J. B. and Powell, L. (1990). An enlarged and updated internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: the system  $K_2O-Na_2O-CaO-MgO-MnO-FeO-Fe_2O_3-Al_2O_3-TiO_2-SiO_2-C-H_2-O_2$ . *J. Metamorphic Geol.*, 8, 89-124.
- Ibhi, A.; Nachit, H., et Berrahma, M. (1997). Existence des nodules ultrabasiques et des mégacristaux dans le volcanisme quaternaire de Saghro (Anti-Atlas, Maroc). *14<sup>ème</sup> Colloque de Géologie*, Kénitra, Maroc, 200-210.
- Ibhi, A.; Hernández, J., et Khatib, D. (1998). Application de la loi de Fick pour évaluer le temps de séjour des méga-olivines dans les laves alcalines. *Ann. Chimie Sc. Matériaux*, 23, 549-555.
- Ionov, D. A.; Hofmann, A. W., et Scimizu, N. (1994). Metasomatism-induced Melting in Mantle Xenoliths from Mongolia. *J. Petrol.*, 35, 753-785.
- Kepezhinskas, P. K.; Defaut, M. J., et Drummond, M. S. (1995). Na Metasomatism in the Island- Arc Mantle by slab Melt-Peridotite Interaction: Evidence from Mantle Xenoliths in the North Kamchatka Arc., *J. Petrol.*, 36, 1505-1527.
- Potdevin, J. L., et Marquer, D. (1987). Méthode de quantification des transferts de matière par les fluides dans les roches métamorphiques déformées. *Geodynamica Acta*, 1, 193-206.
- Ryabchikov, I. D., et Boettcher, A. I. (1980). Experimental evidence et high pressure for potassic metasomatism in the mantle of the Earth. *Amer. Mineral.*, 65, 915-919.
- Ryabchikov, I. D.; Schreyer, W., et Abraham, K. (1982). Compositions of aqueous fluids in equilibrium with pyroxenes and olivine at mantle pressures and temperatures. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 79, 80-84.
- Schmincke, H. U. (1986). Volcanic and chemical evolution of the Canary Islands. In: *Geology of the Northwest African Continental Margin*, by U. Von Rad K. Hinz, M. Sarnthein, E. Seibold (eds). Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 273-306.
- Sicard, E.; Caron, J. M.; Potdevin, J. L., et Dechomet, R. (1986). Transfert de matière et déformation symétrique dans un pli. Pseudomorphoses de lawsonite et caractérisation des fluides interstitiels. *Bull. Minéralogie*, 109, 411-422.
- Wang, J. H., et Wu, J. P. (1995). Oscillatory zonation of minerals and self-organisation in silicates solid-solution systems: a new non-linear dynamic model. *European J. Miner.*, 7, 1089-1100.
- Willie, P. J. (1979). Magmas and volatile components. *American Mineralogist*, 64, 469-500.
- Xu, X. G., et Mercier, J. C. C. (1991). Interaction between the upper mantle and penetrating melts: formation of wehrlite suite from Yitong, North China. *Terra Abstracts*, 3, 429.

Recibido el 1 de abril de 1998.  
Aceptado el 20 de octubre de 1998.