

RÉPARTITION ET COMPORTEMENT DES ÉLÉMENTS DE TRANSITION DANS LES ROCHES VOLCANIQUES

II. TITANE ET VANADIUM

par ANDRIAMBOLOLONA D. Richard
Maître de Conférences
Service de Géologie
EES Sciences, Antananarivo

Résumé :

L'étude du comportement et de la répartition du titane et du vanadium dans les roches volcaniques et leurs minéraux a montré que, d'un type basaltique à l'autre les teneurs moyennes en titane varient, alors que celles du vanadium sont sensiblement comparables. Dans les basaltes tholéiitiques, les concentrations moyennes en titane diffèrent selon le contexte géotectonique. Les valeurs du rapport Ti/V distinguent les basaltes alcalins ($Ti/V > 40$) des basaltes tholéiitiques ($Ti/V < 40$). Dans les roches liées aux zones orogéniques, les teneurs en titane ainsi que les valeurs du rapport Ti/V sont comparables à celles des tholéiites.

Au cours des processus de différenciation, les concentrations en Ti et V évoluent de façon analogue au sein d'une même série magmatique, mais cette évolution diffère toutefois d'une série à l'autre.

Il est démontré que le comportement de Ti et V est essentiellement lié aux stades auxquels les minéraux opaques (magnétite et ilménite) précipitent au cours de la différenciation. Au niveau des termes les plus primitifs, les différences de teneurs en Ti font intervenir une répartition hétérogène de cet élément dans le manteau supérieur. A l'inverse, il semblerait que le vanadium se distribue de façon homogène au sein du manteau supérieur.

Abstract :

A systematic study of abundances and behaviours of titanium and vanadium in volcanic rocks and in the rock-forming mineral shows that alkaline basalts differ from tholeiitic ones by their high TiO_2 content and their Ti/V ratio higher than 40. Rocks from orogenic areas are similar to tholeiitic rocks. During differentiation process, Ti and V show variable trend from one magmatic type to another.

It is demonstrated that the behaviours of Ti and V are mostly related to the stage at which iron oxides (magnetite and ilmenite) precipitate. The variable Ti contents in the most primitive rocks of each magmatic type imply a heterogeneous distribution of this element in the upper mantle. On the other hand, the comparable V contents in different basalts reflect a homogeneous content of vanadium in the mantle source regions.

I. — INTRODUCTION

L'intérêt des éléments en trace pour aborder les problèmes pétrogénétiques, a été démontré depuis longtemps et surtout depuis les publications de GAST [1] et SHAW [2]. La plupart des études géochimiques font intervenir les éléments incompatibles, autrement dit, ceux ayant une grande affinité pour la phase liquide. De ce fait, le comportement de ces éléments au cours des deux principaux processus (fusion partielle et cristallisation fractionnée) est bien connu. D'autre part, GAST [1] a démontré que les tholéiites océaniques dérivent de la fusion partielle du manteau supérieur, à partir d'une source déjà appauvrie en éléments incompatibles. KAY et GAST [3] suggèrent que les basaltes alcalins proviennent d'une source plus profonde contenant du grenat.

Les autres éléments en trace, en particulier les éléments de transition, présentent une répartition moins systématique entre les phases liquide et solide mises en présence. Ainsi, dans certains cas, ils peuvent présenter une grande affinité pour les phases solides, ce qui leur confère un intérêt supplémentaire par rapport aux autres éléments en trace. Toutefois, peu de travaux [4 ; 5 ; 6 ; 7] utilisent tous les renseignements que peut apporter l'étude des éléments de transition.

C'est dans cet état d'esprit que nous nous proposons de présenter une étude systématique du comportement et des teneurs en titane et en vanadium dans les différentes séries volcaniques. Cette étude fait suite à une première consacrée au cuivre et au zinc [8]. Elle est fondée sur des travaux personnels publiés [9 ; 10 ; 11 ; 12] ou en voie de publication, ainsi que sur une très large compilation bibliographique.

II. — COMPORTEMENT DE TI ET V AU COURS DE LA DIFFERENCIATION MAGMATIQUE

A. Répartition dans les phases minérales

Au cours d'une différenciation magmatique, les éléments vont se répartir entre les minéraux et le liquide résiduel. Aussi, la connaissance du partage de ces éléments entre les différentes phases coexistantes est essentielle pour comprendre leur comportement tout au long de la différenciation. Pour cela, nous avons établi des valeurs des coefficients de partage solide/liquide à partir de nos propres données [11 ; 12 ; 13, non publiées] et celles publiées par les auteurs [6 ; 14 - 27]. Les résultats ainsi obtenus sont présentés dans le tableau I.

Les valeurs des coefficients de partage sont souvent très fragmentaires et très dispersées. Leurs variations, souvent irrégulières, résultent de plusieurs paramètres (physico-chimiques, représentativité et degré de pureté des phases) [28 - 31]. Aussi, seul un intervalle de variation est présenté.

On constate que :

- les valeurs des coefficients de partage en Ti et V des minéraux olivine, orthopyroxène et clinopyroxène sont généralement inférieures à l'unité. Ces basses valeurs expriment la difficulté qu'ont ces éléments à se

stabiliser dans les sites cristallins des premiers minéraux qui précipitent à partir d'un magma ;

- à l'exception de l'ilménite, les valeurs des coefficients de partage du titane sont systématiquement plus faibles que celles du vanadium. Cela traduit une plus grande affinité du Ti pour le liquide, comparé au vanadium ;
- pour toutes les phases minérales, les valeurs des coefficients de partage en Ti et V ont tendance à augmenter des termes basiques aux roches plus différenciées.

B. Variations des teneurs en Ti et V dans les séries différenciées

1^o Présentation des résultats

Pour étudier le comportement de Ti et V au cours de la différenciation magmatique, les teneurs en ces éléments sont portées sur des diagrammes rectangulaires (fig. 1 et 2), en fonction des valeurs de l'indice de différenciation FeO^*/MgO [32 ; 33] dans lequel $\text{FeO}^* = \text{FeO} + 0,9 \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Série tholéiitique : Comme l'ont signalé MIYASHIRO et SHIDO [33] les teneurs en titane (fig. 1A) et en vanadium (fig. 2A) augmentent dans les séries tholéiitiques au cours des premiers stades de la différenciation, pour diminuer ensuite lorsque ces séries renferment des termes différenciés.

D'autre part, les graphiques 1A et 2A permettent des constatations complémentaires :

- dans les séries tholéiitiques effusives, les teneurs en TiO_2 et en V passent par un maximum pour des valeurs de FeO^*/MgO voisines de 3 ;
- dans les tholéiites intrusives, la diminution s'amorce plus tardivement ($\text{FeO}^*/\text{MgO} > 4$).

Série calco-alcaline et roches d'affinité tholéiitique : Dans les séries calco-alcalines (fig. 1A et 2A), les concentrations en Ti et V diminuent en fonction des valeurs croissantes de FeO^*/MgO . Pour le vanadium, la décroissance des teneurs s'effectue rapidement. Le comportement de cet élément diffère alors nettement de celui du titane dont les teneurs varient dans un intervalle plus restreint.

Dans les roches d'affinité tholéiitique (tholéiites des arcs insulaires) les deux éléments (fig. 1A et 2A) montrent un léger accroissement des teneurs, des basaltes aux andésites, ce qui différencie nettement ce type de roches du précédent. Par contre, une diminution, plus importante en vanadium, affecte les teneurs de ces deux éléments au niveau des dacites.

Série alcaline et transitionnelle : L'évolution des teneurs en Ti et V au cours de la différenciation magmatique peut montrer deux tendances (fig. 1B et 2B) :

- la première consiste en une décroissance systématique des teneurs au cours de la différenciation comme c'est le cas à Tristan da Cunha [34] et à Gough [35].
- la seconde se manifeste par une augmentation des teneurs dans les premiers stades de la différenciation pour décroître ensuite au niveau des Hawaïtes. Cette tendance caractérise les îles de Ross [36], de Sainte-Hélène [37]. Elle est mieux marquée dans les séries dites « transitionnelles » [38] telles que celles de l'île Maurice [39], de l'île de Pâques [40] ou celle de Boina [20]. On y retrouve une tendance semblable à celle enregistrée dans les séries tholéitiques, mais la diminution des teneurs en Ti et V s'amorce pour une valeur de FeO^*/MgO inférieure à 2,5.

2° *Interprétation des résultats*

Ces comportements variables du titane et du vanadium au cours de la différenciation corroborent les distinctions entre les divers types magmatiques. La cristallisation fractionnée étant le principal moteur de la différenciation magmatique [41] [42] [12], il en résulte que les différences de comportement impliquent, en accord avec les valeurs des coefficients de partage, la précipitation des minéraux opaques (magnétite et ilménite) à des stades variables de la différenciation selon chaque type magmatique.

Dans les tholéiites, l'accroissement des teneurs en Ti et V s'explique par l'absence de précipitation des minéraux opaques dans les stades précoces de la différenciation. Si dans ce type de roche, la différenciation est très avancée, les oxydes ferro-titanés peuvent apparaître et entraîner alors une diminution des teneurs comme c'est le cas au Skaergaard [43].

Dans les séries alcalines, la précipitation très précoce de ces phases entraîne une diminution rapide de Ti et V dès le début de la différenciation. Dans ce type de roches, l'amphibole et le mica peuvent également abaisser les concentrations de ces deux éléments. Le léger accroissement qui peut se manifester dans certaines séries alcalines au début de la différenciation est probablement en relation avec un retard dans la précipitation des minéraux opaques.

Les valeurs différentes des coefficients de partage de Ti et de V dans la magnétite explique la diminution plus rapide du vanadium dans les roches volcaniques liées aux zones orogéniques. Dans celles ayant des affinités tholéitiques, la magnétite apparaît aussi dans les stades précoces (andésite basique ou andésite) de la différenciation [21], ce qui explique les différences entre ce type de roches et les autres tholéiites. D'autre part, dans les tholéiites d'arc, la faible variation des teneurs en Ti et V des basaltes aux andésites est en relation avec des coefficients de partage globaux proches de l'unité à cause de l'abondance du plagioclase. La brutale diminution des teneurs en vanadium traduit dans les séries calco-alcalines, l'intervention d'une quantité d'oxydes ferro-titanés plus importante que dans les tholéiites d'arc. Une telle remarque, proposée par ailleurs [27] est pleinement en accord avec l'absence d'un enrichissement en fer sur le diagramme AFM.

Il en résulte que l'apparition et la proportion des phases telles que

minéraux opaques, amphiboles et micas dans les séries alcalines, magnétite dans les séries tholéitiques et dans les roches liées aux zones orogéniques, sont déterminantes dans le comportement de Ti et V au cours de la différenciation. Les différences que nous avons décrites, résultent de l'absence de ces phases dans certaines séries et des stades variables à partir desquelles elles précipitent dans d'autres. Elles témoignent des conditions thermodynamiques variables (P_T , P_{H_2O} , fO_2 , $T^\circ C$) qui règnent dans les chambres magmatiques [33; 44 - 47].

III. — COMPARAISON DES TENEURS MOYENNES EN TITANE ET EN VANADIUM DANS LES ROCHES MAGMATIQUES

A. Présentation des données

Les teneurs moyennes des différents types de basaltes sont calculées, en tenant compte, dans la mesure du possible, de leur contexte géotectonique. Une autre subdivision, faisant intervenir le degré de différenciation, est introduite dans chaque série. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.

1° Titane

A l'exception des basaltes d'Hawaï [48] et ceux de Karroo [49 - 51] qui sont particulièrement enrichis en titane (respectivement 2,23 et 3,01 %), les séries tholéitiques ont des teneurs en cet élément relativement faibles, mais différentes selon le contexte géotectonique. Elles sont plus élevées (1,8 %) dans les basaltes tholéitiques continentaux, et plus faibles (1,3 %) dans leurs équivalents océaniques (abyssaux et insulaires).

Les roches des zones orogéniques présentent aussi des teneurs variables en titane selon le contexte géotectonique; les roches des marges continentales sont plus enrichies (1,45 %) en cet élément alors que celles des arcs insulaires (calco-alcalins et d'affinité tholéitique) ont, en accord avec JAKES et WHITE [52], des teneurs plus faibles (0,9 %).

Les séries alcalines se caractérisent par des teneurs plus élevées en titane, variant de 3,26 % dans les roches des îles océaniques à 2,6-2,7 % dans les séries alcalines continentales et dans les basaltes transitionnels. Ces valeurs moyennes dans les séries alcalines sont comparables à celles proposées par ailleurs [53] [54].

2° Vanadium

Le vanadium n'étant déterminé que de façon sporadique, les exemples rassemblés sont relativement restreints, en particulier pour les tholéiites continentales et celles des îles océaniques. Néanmoins, on constate que les différences mises en évidence avec le titane n'apparaissent ou sont estompées avec le vanadium. Notre compilation montre que les moyennes en cet élément sont voisines d'un type de basalte à l'autre, avec cependant des teneurs qui tendent à être plus élevées dans les basaltes transitionnels et les basaltes alcalins des îles océaniques.

Ces teneurs comparables en vanadium, celles du titane étant variables d'un type basaltique à l'autre, se traduisent par des valeurs du rapport

Ti/V individualisant nettement les différents types de basaltes. Ainsi, les basaltes tholéitiques ($Ti/V < 40$) se distinguent des basaltes alcalins et transitionnels ($Ti/V > 40$). Les basaltes liés aux zones orogéniques sont, sur la base de ce rapport ($Ti/V < 40$) à rapprocher des tholéiites.

Cette distribution du titane, différente selon les types basaltiques, affecte surtout les termes les plus primitifs et disparaît au niveau des termes les plus évolués. Cela pose divers problèmes, en particulier celui de la répartition de cet élément dans le manteau supérieur, source des magmas basaltiques [55 - 58], et dans les phases minéralogiques constituant ce manteau.

Pour apporter des éléments de réponse à ces problèmes, nous aborderons, dans le paragraphe suivant, la genèse des magmas basaltiques, en calculant des modèles théoriques de fusion partielle du manteau supérieur.

B. Modèles théoriques de fusion partielle : implications sur la répartition de Ti et V dans le manteau supérieur

Les calculs des modèles théoriques de fusion partielle du manteau supérieur sont effectués en utilisant l'équation 15 (« batch melting ») de SHAW [2], en accord avec la plupart des auteurs [59] [30].

Selon cette équation, la concentration en un élément i du magma produit par la fusion partielle (C_i) est liée à celle du matériel de départ (C_i^0) par la relation :

$$C_i = \frac{C_i^0}{D + F(1 - P)}$$

dans laquelle :

D = coefficient de partage global de l'élément en trace considéré entre la phase solide et la phase liquide formée ;

F = fraction massique du magma produit (= masse de magma/masse initiale du solide) ;

P = exprime la proportion en élément i produit par la fusion des phases minérales.

Nous admettrons, en accord avec les auteurs [1, 3, 53 - 58] que les magmas tholéitiques résultent de la fusion partielle du manteau supérieur dans le domaine de stabilité des périclites à spinelle ou à plagioclase avec un degré de fusion partielle compris entre 20 et 30 %. Les magmas alcalins se formeraient à plus grande profondeur (domaine de stabilité des assemblages minéralogiques à Grenat) avec un degré de fusion plus faible (1 à 10 %).

Les résultats sont reportés graphiquement (fig. 3) en même temps que les domaines de variation des teneurs en Ti et V dans les termes les plus primitifs des basaltes. Les détails des calculs sont donnés en légende de la figure 3.

Cette figure montre qu'il y a une bonne concordance entre les valeurs calculées et celles observées, compte tenu des concentrations choisies pour le manteau supérieur (cf. légende de la figure 3). Il semblerait que

les différences entre basaltes alcalins et tholéitiques se justifient par le calcul, à condition d'admettre des sources de composition différente en titane. En effet, nous avons pu vérifier que la nature et la proportion des phases minéralogiques majeures qui entrent en fusion rendent difficilement compte des différences entre les deux types de basaltes. La différence de teneur à la source, en ce qui concerne le titane, pourrait donc résulter soit de la présence d'une phase minérale mineure riche en cet élément dans les zones de fusion produisant les basaltes alcalins, soit d'une hétérogénéité de sa répartition dans le manteau supérieur.

C. Discussion

Pour les basaltes alcalins, la fusion des phases hydratées telles que amphibole et micas, peut provoquer dans des cas particuliers un enrichissement en titane dans le liquide. Nous avons calculé le modèle de fusion partielle du manteau supérieur avec un assemblage minéralogique contenant 1 p. 100 de phlogopite [60] [61]. Nous avons, par ailleurs, supposé que la phlogopite avait complètement fondu lorsque le degré de fusion atteint 2 p. 100. Dans ce cas précis, on peut atteindre des teneurs en TiO_2 comprises entre 2 et 3 p. 100 à partir d'un matériel de départ ayant 1 230 ppm [62]. Ces considérations suggéreraient donc que les teneurs élevées en titane dans les basaltes alcalins s'expliquent par un très faible degré de fusion partielle d'un matériel originel contenant de la phlogopite. Cela implique aussi la présence systématique et exclusive de cette phase minérale dans le matériel à partir duquel dérivent les basaltes alcalins. En fait, l'existence de la phlogopite dans le manteau supérieur signifie déjà par elle-même des teneurs élevées en titane à la source. Aussi, il semble difficile d'attribuer les teneurs élevées en Ti des basaltes alcalins, uniquement par la seule présence de la phlogopite.

Une hétérogénéité de la répartition du titane dans le manteau supérieur peut également être envisagée pour expliquer les teneurs variables en cet élément dans les magmas primaires. En effet, les différences de teneurs en Ti entre les basaltes tholéitiques et alcalins vont dans le même sens que celles enregistrées pour les éléments incompatibles [1]. Comme l'ont suggéré divers auteurs [63] [64], le titane se comporte comme un élément incompatible et les valeurs des coefficients de partage (en particulier celles de l'olivine qui est la phase dominante dans le manteau supérieur) ne font que le confirmer (cf. légende fig. 3).

Par conséquent, si on admet un enrichissement des éléments incompatibles dans les zones profondes du manteau [1], il est probable que les basaltes alcalins qui dérivent à plus grande profondeur que les basaltes tholéitiques, correspondent à une source plus enrichie en titane, quel que soit l'assemblage minéralogique. L'hypothèse d'une distribution hétérogène du titane dans le manteau supérieur est corroborée par les travaux de GREEN et RINGWOOD [55] et ceux de Mc GREGOR [65] lesquels ont trouvé une corrélation positive entre les teneurs en TiO_2 et la pression. De plus, HUBBARD [66] propose pour les tholéiites d'Hawaï, dont les teneurs en TiO_2 sont particulièrement élevées, une source à partir d'une zone profonde du manteau (> 70 km). Toutes ces données concordent à penser à un enrichissement en titane en fonction de la profondeur.

LANGMUIR et al. [67] arrivent à des conclusions identiques à partir des basaltes des rides médio-océaniques, et suggèrent une répartition hétérogène non seulement du titane, mais aussi du vanadium dans le manteau supérieur. Nos résultats ne sont pas en accord avec les conclusions de ces auteurs pour le vanadium. En effet, l'affinité de cet élément pour le liquide au cours du processus de fusion partielle dans le manteau supérieur est moins nette. Cela apparaît à partir des valeurs des coefficients de partage (cf. légende fig. 3) lesquelles sont plus élevées que celles du titane, en particulier dans les spinelles. D'autre part, les teneurs en cet élément, sensiblement identiques dans les différents types de basaltes suggèrent une répartition plus homogène du vanadium dans le manteau supérieur. Enfin, les résultats de nos calculs des modèles théoriques de fusion partielle, à partir d'une concentration unique quel que soit le type d'assemblage minéralogique considéré, abondent dans le même sens.

CONCLUSION

Cette étude systématique sur le comportement et la répartition du titane et du vanadium dans les roches volcaniques a permis de mettre en évidence que :

- les évolutions de ces éléments au cours de la différenciation magmatique diffèrent selon le type basaltique. Ces différences peuvent s'expliquer par la précipitation des minéraux opaques (magnétite, ilménite) à des stades variables de la différenciation.
- les teneurs moyennes en TiO_2 ainsi que les valeurs du rapport Ti/V discriminent nettement les différents types basaltiques ;
- ces différences s'accordent, en ce qui concerne le titane, avec des teneurs variables à la source selon le type magmatique. Par contre, l'hétérogénéité de la répartition du vanadium dans le manteau supérieur est, à notre sens, particulièrement restreinte par rapport à celle du titane.

	Ol/l	Cpx/l	Opx/l	H ^{de} /l	Bi/l	Plg/l	Mt/l	Ilm/l
Basaltes	Ti	0.2-0.7	0.1-1.2	1.2-1.9	2.3-6	<0.10	5-13	15-35
	V	0.6-1.3	0.2-1.3	0.9-2	1.8-12	0.1	8-25	0.8-1.4
Roches de composition intermédiaire	Ti	0.02-0.1	0.3-1.5	5-10	10-18	—	10-20	—
	V	0.1-0.7	0.8-2.9	5-15	14-25	—	15-38	—

TABLEAU 1

Coefficients de partage (solide/liquide) du titane et du vanadium dans les principales phases minérales des roches volcaniques (Ol: olivine; Cpx: clinopyroxène; Opx: orthopyroxène; Hde: hornblende; Bi: biotite; Plg: plagioclase; Mt: magnétite; Ilm: ilménite). Cette compilation est effectuée à partir de diverses données publiées [6; 8; 12 - 27].

TABLEAU 2

Teneurs moyennes en TiO_2 (%) et en V (ppm) et valeurs moyennes des rapports Ti/V dans les termes basiques des divers types magmatiques, groupés selon leur contexte géotectonique et définis comme suit :

— pour les séries tholéitiques

Picrites: $IS_{(1)} \geq 45$

Basaltes: $45 > IS_{(1)} \geq 35$.

— pour les séries alcalines et transitionnelles

Basaltes: $DI_{(2)} \leq 35$;

— pour les roches des zones orogéniques (calco-alcalines et roches d'affinité tholéitique).

Basaltes: $\% SiO_{2(3)} \leq 53$.

Compte tenu de la variabilité des teneurs en titane et pour faciliter les comparaisons, nous avons introduit une subdivision supplémentaire au sein des séries tholéitiques, alcalines et transitionnelles. Cette subdivision est fondée sur les valeurs du rapport atomique: $mg = Mg/Mg + Fe^{2+}$. Les roches basiques seront donc classées de la façon suivante :

		$mg > 0.72$	$0.72 > mg > 0.66$	$0.66 > mg > 0.60$	$mg < 0.60$
Séries tholéitiques.	$IS > 45$	Picrites PI	Picrites PII		
	$45 > IS > 35$	Basaltes BI	Basaltes BII	Basaltes BIII	Basaltes BIV
Séries alcalines et transitionnelles.	$DI < 35$	Basaltes BI	Basaltes BII	Basaltes BIII	Basaltes BIV

Pour les basaltes des zones orogéniques, cette subdivision ne présente aucun intérêt et ne sera pas utilisée car les valeurs de mg y sont systématiquement inférieures à 0.60.

Les valeurs anormalement élevées du rapport Ti/V dans les tholéites continentales effusives sont dues aux teneurs particulièrement élevées en titane dans les roches du Karroo.

n = nombre d'échantillons

() = écart-type.

(1) : Subdivision que nous avons établie selon les valeurs de :

$IS = 100 MgO/MgO + FeO + Fe_2O_3 + Na_2O + K_2O$ [95]

(2) : Selon la nomenclature adoptée par MAURY [96] et fondée sur les valeurs de :

$DI = Q + Ne + Le + Ab + Or$ [97].

(3) : D'après la classification de TAYLOR [98].

		Mg/Mg + Fe ²⁺	n	TiO ₂ (%)	n	V(ppm)	n	Ti/V
Tholéiites continen- tales effusives [24 ; 49 ; 50 ; 51 ; 75]	PI	0.80	31	1.77(0.48)	13	226(34)	13	72(16)
	PII	0.71	4	1.79(0.05)	—	—	—	—
	BII	0.69	8	2.26(1.13)	4	260(64)	4	63(31)
	BIII	0.61	3	1.99(0.57)	1	350	1	43
Tholéiites des îles océaniques [48 ; 72 ; 75 ; 76 ; 77]	PI	0.80	33	0.87(0.20)	—	—	—	—
	PII	0.69	6	1.74(0.16)	—	—	—	—
	BII	0.69	16	0.98(0.48)	11	235(71)	11	23(13)
	BIII	0.62	16	1.79(0.35)	7	275(66)	7	28(10)
	BIV	0.57	4	2.47(0.21)	1	308	1	39
Tholéiites abyssales à olivine [5 ; 6 ; 78 ; 79 ; 80]	PI	0.77	6	0.69(0.18)	2	176(34)	2	20(4)
	PII	0.68	14	0.85(0.41)	14	204(34)	14	25(13)
	BII	0.68	12	1.14(0.22)	12	245(32)	12	28(6)
	BIII	0.62	14	1.53(0.19)	14	292(37)	14	31(5)
	BIV	0.58	1	1.42	1	291	1	29
Tholéiites abyssales à plagioclase [5 ; 6 ; 78 ; 79]	PI	0.73	4	0.78(0.20)	—	—	—	—
	PII	0.69	5	0.75(0.40)	5	195(20)	5	23(12)
	BII	0.69	7	0.99(0.23)	7	218(29)	7	27(7)
	BIII	0.63	11	1.24(0.20)	11	290(14)	11	26(4)
	BIV	0.58	2	1.42(0.35)	2	300(49)	2	28(8)
Basaltes transition- nels [20 ; 39 ; 40 ; et données non publiées sur la Réunion]	BI	0.73	4	2.42(0.01)	4	264(8)	4	55(3)
	BII	0.67	12	2.65(0.10)	12	268(11)	12	59(3)
	BIII	0.64	18	2.73(0.28)	18	268(22)	18	61(8)
	BIV	0.54	10	3.03(0.30)	10	351(49)	10	52(9)
Basaltes alcalins [12 ; 34 → 37 ; 81 → 83 ; et données non publiées sur le Hoggar]	BI	0.76	4	2.08(0.15)	4	242(33)	4	51(8)
	BII	0.68	25	2.80(0.79)	25	257(44)	25	65(21)
	BIII	0.62	13	2.89(0.86)	13	259(59)	13	67(25)
	BIV	0.55	16	3.24(0.75)	16	279(47)	16	69(20)
		SiO ₂ (%)						
Basaltes calco- alcalins des marges continentales [13 ; 70 ; 84 → 88]	B	51.34	13	1.29(0.46)	—	—	—	—
Basaltes calco- alcalins des arcs insulaires [19 ; 71 ; 89 ; 90]	B	50.38	43	0.97(0.27)	43	255(73)	43	23(8)
Tholéiites des arcs insulaires [69 ; 91 → 94]	B	49.73	32	0.88(0.90)	32	329(140)	32	16(18)

FIGURES

Fig. 1: Variations des teneurs en TiO_2 en fonction de FeO^*/MgO dans quelques séries représentatives de chaque type magmatique.

Fig. 1A:

Tholéiites îles océaniques: (1) Hawaï [48; 68].

Tholéiite continentale effusive: (2) Snake River [24; 25].

Tholéiite continentale intrusive: (3) Skaergaard [43].

Tholéiites abyssales: aire entourée par le trait discontinu.

Tholéiites arcs insulaires: (4) Kermadec [69]; (5) Tonga [21].

Séries calco-alcalines: (6) Mexico [70]; (7) Sardaigne [71].

Fig. 1B:

Séries alcalines: (8) Sainte-Hélène [37]; (9) Hoggar (non publiées); (10) Nuku Hiva [12].

Série transitionnelle: (11) Ile Maurice [39].

Fig. 2: Variations des teneurs en V en fonction de FeO^*/MgO dans quelques séries représentatives de chaque type magmatique.

Fig. 2A:

Tholéiites îles océaniques: (1) Islande [72].

Tholéiites continentales intrusives: (2) Skaergaard [43].

Tholéiites abyssales: aire entourée par le trait discontinu.

Tholéiites arcs insulaires: (3) Kermadec [69]; (4) Tonga [21].

Séries calco-alcalines: (5) Sardaigne [71]; (6) Pérou [13].

Fig. 2B:

Séries alcalines: (7) Hoggar (non publiés); (8) Nuku Hiva [12]; (9) Rapa [12].

Série transitionnelle: (10) Ile Maurice [39].

Fig. 3: Concentrations en Ti et V, dans les liquides produits par fusion partielle du manteau supérieur comparées aux teneurs en ces mêmes éléments dans les basaltes.

Les concentrations initiales en Ti et V sont:

— Pour les basaltes alcalins:

Ti = 3 115 ppm [73]

V = 59 ppm [62];

— Pour les basaltes tholéiitiques:

Ti = 1 230 ppm [62]

V = 59 ppm [62].

Les calculs sont effectués à partir des assemblages minéralogiques [74] et des valeurs des coefficients de partage (établies d'après les données du tableau 1) ci-dessous :

Lherzolites à plagioclase				Lherzolite à spinelle				Lherzolite à Grenat				Éclogite		
	OL	OPx	Cpx	Pl	OL	OPx	CPx	SP	OL	OPx	CPx	Gt	Cpx	Gt
x_0	0.55	0.20	0.15	0.10	0.51	0.21	0.23	0.05	0.55	0.20	0.15	0.10	0.50	0.50
Pl	0.10	0.20	0.40	0.30	0.10	0.20	0.60	0.10	0.10	0.20	0.40	0.30	0.50	0.50

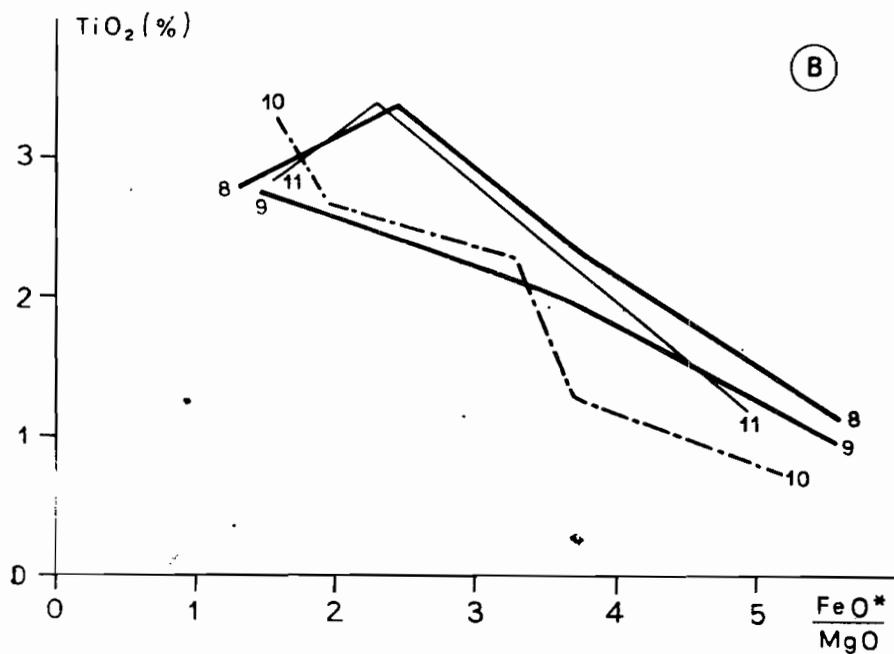
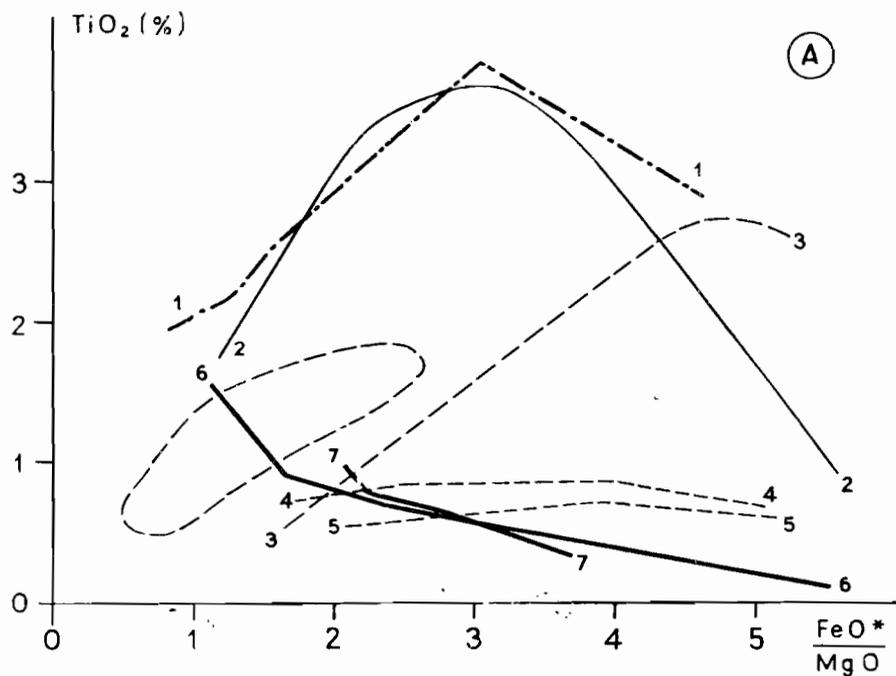
x_0 = pourcentage modale des assemblages minéralogiques de départ.
 Pl = proportions dans lesquelles les minéraux entrent en fusion.

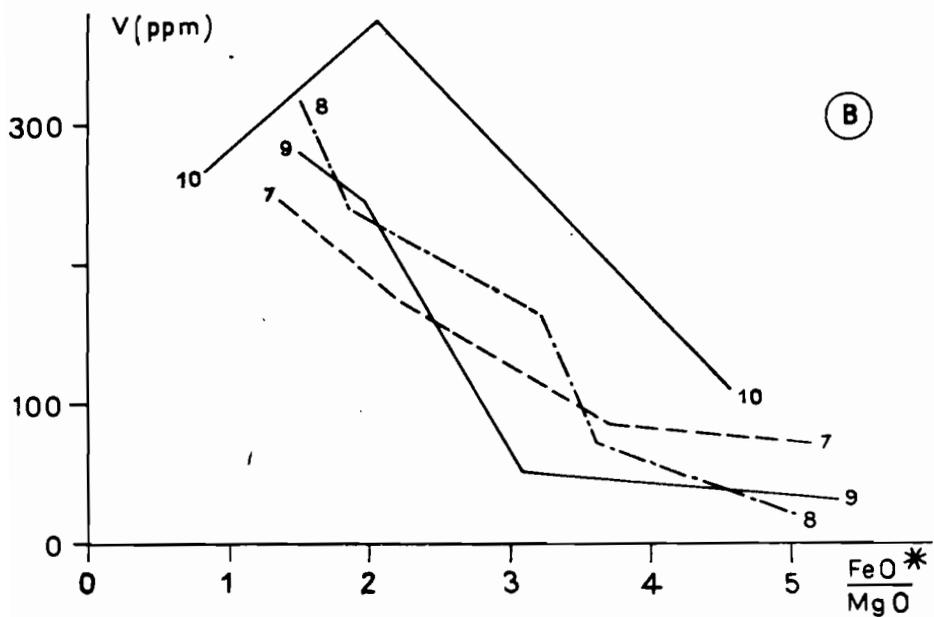
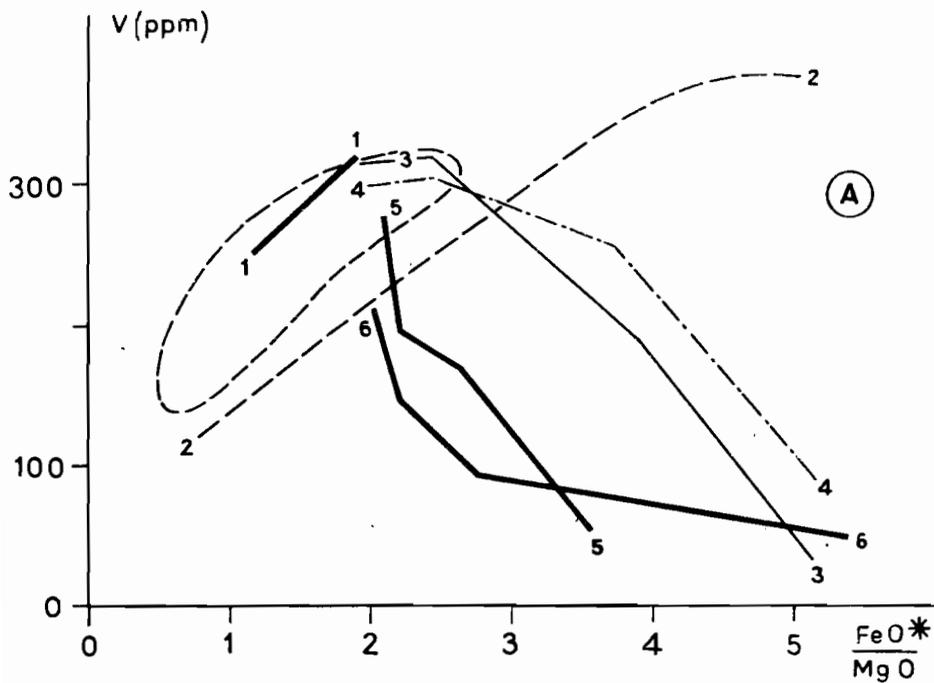
	OL/l	OPx/l	CPx/l	SP/l	Gt/l	Pl/l
Ti.....	0.03	0.15	0.40	0.20	0.40	0.01
V.....	0.06	0.80	0.90	1.60	0.30	0.10

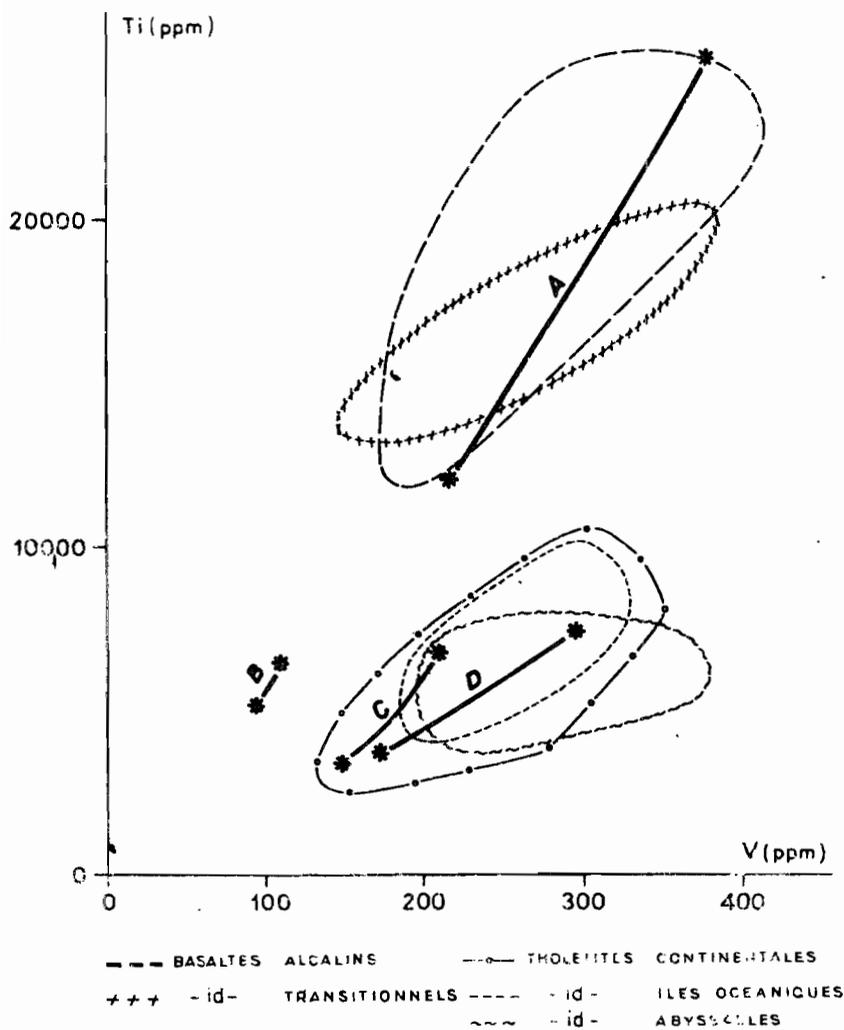
OL : olivine ; OPx : orthopyroxène ; CPx : clinopyroxène ; Sp : spinelle ; Gt : grenat ;
 Pl : plagioclase.

- A: représente la fusion partielle (F compris entre 0,01 et 0,10) des lherzolites à grenat.
- B: représente la fusion partielle (F compris entre 0,01 et 0,10) des éclogites.
- C: représente la fusion partielle (F compris entre 0,1 et 0,30) des lherzolites à spinelle.
- D: représente la fusion partielle (F compris entre 0,1 et 0,30) des lherzolites à plagioclase.

On notera en particulier que la fusion partielle des éclogites (B) ne peut pas rendre compte des teneurs en Ti et V rencontrées dans les basaltes.







BIBLIOGRAPHIE

1. GAST P.-W. (1968). — *Trace element fractionation and the origin of tholeiitic and alkaline magma types*. Geochim. Cosmochim., Acta, 32, 1057-1086.
2. SHAW D.-M. (1970). — *Trace element fractionation during anatexis*. Geochim. Cosmochim. Acta, 34, 237-243.
3. KAY R.-W. et GAST P.-W. (1973). — *The rare-earth content and origin of alkali-rich basalts*. J. Geol., 81, 653-682.
4. ALLEGRE J.-C., JAVOY M. et MICHARD G. (1973). — *Etude de la distribution et de l'abondance des éléments de transition dans l'écorce terrestre comparées à celles des Terres rares*. In: Origin and distribution of the elements (L.-H. Ahrens, Ed.), Pergamon Press, 913-928.
5. THOMPSON G., SHIDO F. et MIYASHIRO A. (1972). — *Trace element distributions in fractionated oceanic basalts*. Chem. Geol., 9, 89-97.
6. BOUGAULT H. et HEKINIAN R. (1974). — *Rift valley in the atlantic ocean near 36°50' N: petrology and geochemistry of basaltic rocks*. Earth Planet. Sci. Letters, 24, 249-261.
7. FREY F.-A., BRYAN W.-B., THOMPSON G. (1974). — *Atlantic ocean floor: geochemistry and petrology of basalts from legs 2 and 3 of the Deep sea Drilling Project*. J. Geophys. Res., 79, 5507-5527.
8. ANDRIAMBOLOLONA D.-R. et DUPUY C. (1978). — *Repartition et comportement des éléments de transition dans les roches volcaniques*.
1. *Cuivre et Zinc*. Bull. BRGM (2), II, 2, 121-138.
9. ANDRIAMBOLOLONA D.-R., DUPUY C. et LEYRELOUP A. (1977). — *Les éléments de transition dans les enclaves catazonales de Bournac (Velay, Massif Central français)*. CR Acad. Sci., Paris, 284, 875-878.
10. LEYRELOUP A., DUPUY C. et ANDRIAMBOLOLONA D.-R. (1977). — *Catazonal xenoliths in French neogene volcanic rocks: constitution of the lower crust*.
2. *Chemical composition and consequences of the evolution of the French Massif central Precambrian crust*. Contrib. Minéral. Petrol., 62, 283-300.
11. ANDRIAMBOLOLONA D.-R., LEFEVRE C., DUPUY C. (1975). — *Coefficient de partage des éléments de transition dans les minéraux ferromagnésiens extraits des dacites*. CR Acad. Sc. Paris, 281, 1797-1800.
12. MAURY R.-C., ANDRIAMBOLOLONA D.-R. et DUPUY C. (1978). — *Evolution comparée de deux séries alcalines du Pacifique central: rôle de la fugacité d'oxygène et de la pression d'eau*. Bull. Volcanol., 41, 2, 1-22.

13. ANDRIAMBOLOLONA D.-R. (1976). — *Les éléments de transition dans les suites andésitiques et shoshonitiques du sud du Pérou*. Thèse 3^e Cycle, Montpellier, 98 pp.
14. WALKER K.-R. (1969). — *The Palisades sill, New Jersey: a reinvestigation*. Geol. Soc. Am. Special paper, III, 178 pp.
15. DUNCAN A.-R. et TAYLOR S.-R. (1968). — *Trace element analyses of magnetites from andesitic and dacitic lavas from Bay of Plenty, New-Zealand*. Contrib. Mineral. and Petrol., 20, 30-33.
16. ATKINS F.-B. (1969). — *Pyroxenes of the Bushveld intrusion, South Africa*. J. Petrol., 10, 222-249.
17. GUNN B.-M., COY III R., WATKINS N.-D., ABRANSON C.-E. et NOUGIER J. (1970). — *Geochemistry of an Oceanite-Ankaramite-basalt suite from East Island, Crozet Archipelago*. Contrib. Mineral. Petrol., 28, 319-339.
18. GUNN B.-M. (1972). — *The fractionation effect of Kaersutite in basaltic magmas*. Can. Mineral., 11, 840-850.
19. COLE J.-W. (1973). — *High-alumina basalts of Taupo volcanic zone, New Zealand*. Lithos 6, 53-64.
20. BARBERI F., SANTACROCE R., FERRARA G., TREUIL M. et VARET J. (1975). — *A transitional basalt — Pantellerite sequence of fractional Crystallization, the Boina centre (Afar rift, Ethiopia)*. J. Petrol., 16, 22-56.
21. EWART A., BRYAN W.-B. et GILL J.-B. (1973). — *Mineralogy and Geochemistry of the younger volcanic islands of Tonga, S-W pacific*. J. Petrol., 14, 429-465.
22. MATHISON C.-I. (1975). — *Magnetites and ilmenites in the somerset Dam layered basic intrusion, southeastern Queensland*. Lithos, 8, 93-112.
23. BAXTER A.-N. (1975). — *Petrology of the older series lavas from Mauritius, Indian Ocean*. Geol. Soc. Am. Bull., 86, 1449-1458.
24. LEEMAN W.-P. et VITALIANO C.-J. (1976). — *Petrology of Mc Kinney basalt, Snake River Plain, Idaho*. Geol. Soc. Am. Bull., 12, 1777-1792.
25. LEEMAN W.-P., VITALIANO C.-J. et PRINZ M. (1976). — *Evolved lavas from the snake river Plain: Craters of the Moon National Monument, Idaho*. Contrib. Mineral. Petrol., 56, 35-60.
26. IMSLAND P., LARSEN J.-G., PRESTVIK T. et SIGMOND F.-M. (1977). — *The geology and petrology of Bouvetoya Atlantic Ocean*. Lithos, 10, 213-244.
27. LEEMAN W.-P., MA M.-S., MURALI A.-V. et SCHMITT R.A. (1978). — *Empirical estimation of Magnetite/liquid distribution coefficients for some transition elements*. Contrib. Mineral. Petrol., 65, 269-272.

28. ALBAREDE (F.) et BOTTINGA Y. (1972). — *Kinetic disequilibrium in trace element partitioning between phenocrysts and host lava*. Geochim. Cosmochim. Acta, 36, 141-156.
29. MYSEN B.-O. (1978). — *Experimental determination of nickel partition coefficients between liquid, pargasite, and garnet peridotite minerals and concentration limits of behavior according to Henry's law at high pressure and temperature*. Am. J. Sci., 278, 217-243.
30. HART S.-R. et DAVIS K.-E. (1978). — *Nickel partitioning between olivine and silicate melt*. Earth Planet. Sci. Lett., 40, 203-219.
31. LIOTARD J.-M. (1978). — *Contribution à l'étude des coefficients de partage des éléments en trace entre verre et phases minérales. Exemples pris dans la série calco-alcaline du Pérou*. Thèse, 3^e Cycle, Montpellier, 87 pp.
32. MIYASHIRO A., SHIDOF. et EWING M. (1969). — *Diversity and origin of abyssal tholeiites from the Mid-Atlantic ridge near 24° and 30° north latitude*. Contrib. Mineral. and Petrol., 23, 38-52.
33. MIYASHIRO A. et SHIDO F. (1975). — *Tholeiitic and calc-alkalic series in relation to the behaviors of titanium, vanadium, chromium and nickel*. Am. J. Sci., 275, 265-277.
34. BAKER P.-E., GASS I.-G., HARRIS P.-G., LE MAITRE R.-W. 1964. — *The volcanological report of the royal society expedition to Tristan da Cunha, 1962*, Phil. Trans. Royal Soc. London, 256, 439-578.
35. LE MAITRE R.-W. (1962). — *Petrology of volcanic rocks, Gough island, south atlantic*. Geol. Soc. Am. Bull., 73, 1309-1340.
36. GOLDICH S.-S., TREVES S.-B., SUHR N.-H. et STOCKLESS J.-S. (1975). — *Geochemistry of the cenozoic volcanic rocks of Ross island and vicinity, Antarctica*. J. Geol., 83, 415-435.
37. BAKER I. (1969). — *Petrology of the volcanic rocks of Saint Helena island, south Atlantic*. Geol. Soc. Am. Bull., 80, 1283-1310.
38. COOMBS D.-S. (1963). — *Trends and affinities of basaltic magmas and pyroxenes as illustrated on the diopside-olivine-silica diagram*. Min. Soc. Amer. Special Paper, 1, 227-250.
39. BAXTER A.-N. (1975). — *Petrology of the older series lavas from Mauritius, indie Ocean*. Geol. Soc. Am. Bull., 86, 1449-1458.
40. BAKER P.-E., BUCKLEY F. et HOLLAND J.-G. (1974). — *Petrology and Geochemistry of Easter Island*. Contrib. Mineral. and Petrol., 44, 85-100.
41. TREUIL M. et VARET J. (1973). — *Critères volcanologiques, pétrologiques et géochimiques de la genèse et de la différenciation des magmas basaltiques: exemple de l'Afar*. Bull. Soc. Geol., France, XV, 401-644.

42. ZIELINSKI R.-A. (1974). — *Trace element evaluation of a suite of rocks from Reunion island, Indian Ocean*. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 39, 713-739.
43. WAGER L.-R. et MITCHELL R.-L. (1951). — *The distribution of trace elements during strong fractionation of basic magma — a further study of the Skaergaard intrusion, East Greenland*. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1, 129-208.
44. OSBORN E.-F. (1959). — *Role of oxygen pressure in the crystallization and differentiation of basaltic magma*. *Am. J. Sci.*, 256, 609-647.
45. OSBORN E.-F. (1962). — *Reaction series for subalkaline igneous rocks based on different oxygen pressure conditions*. *Am. Mineral.*, 47, 211-266.
46. ANDERSON A.-T. (1968). — *The oxygen fugacity of alkaline basalt and related magmas, Tristan da Cunha*. *Amer. J. Sci.*, 266, 704-727.
47. FLOWER M.-F.-J. (1971). — *Evidence for the role of phlogopite in the genesis of alkali basalts*. *Contrib. Mineral. and Petrol.*, 32, 126-137.
48. Mac DONALD D.-A. et KATSURA T. (1964). — *Chemical composition of Hawaiian lavas*. *J. Petrol.*, 5, 82-133.
49. COX K.-G. Mac DONALD R. et HORNING G. (1967). — *Geochemical and petrographic provinces in the Karroo basalts of southern Africa*. *Am. Miner.*, 52, 1451-1474.
50. VAIL J.-R., HORNING G. et COX K.-G. (1969). — *Karoo basalts of the Tuli Syncline, Rhodesia*. *Bull. volcanol.*, 23, 398-418.
51. COX K.-G. et JAMIESON B.-G. (1974). — *The olivine-rich lavas of Nuanetsi: a study of polybaric magmatic evolution*. *J. Petrol.*, 15, 269-301.
52. JAKES P. et WHITE A.-J.-R. (1972). — *Major and trace element abundances in volcanic rocks of orogenic areas*. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 83, 29-40.
53. MANSON V. (1967). — *Geochemistry of basaltic rocks: major elements*. In *Basalts: The Poldervaart treatise on rocks of basaltic composition* (Hess H.-H. ed.), 215-269.
54. SCHWARZER R.-R. et ROGERS J.-J.-W. (1974). — *A worldwide comparison of alkali olivine basalts and their differentiation trends*. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 23, 286-296.
55. GREEN J.-H. et RINGWOOD A.-E. (1967). — *The genesis of basaltic magmas*. *Contrib. Mineral. and Petrol.*, 15, 103-190.
56. GREEN D.-H. (1970). — *A review of experimental evidence on the origin of basaltic and nephelinitic magmas*. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 3, 221-235.

57. GREEN D.-H. (1971). — *Composition of basaltic magmas as indicators of conditions of origin : application to oceanic volcanism*. Phil. Trans. Royal. Soc. London, A, 268, 707-725.
58. GREEN D.-H. (1973). — *Experimental melting studies on a model upper mantle composition at high pressure under water-saturated and water-undersaturated conditions*. Earth Planet. Sci. Lett., 19, 37-53.
59. LEEMAN W.-P. et SCHEIDEGGER K.-F. (1977). — *Olivine/liquid distribution coefficients and a test for crystal-liquid equilibrium*. Earth Planet Sci. Lett., 35, 247-257.
60. GRIFFIN W.-L. et MURTHY V.-R. (1969). — *Distribution of K, Rb, Sr and Ba in some minerals relevant to basalt genesis*. Geochim. Cosmochim. Acta., 33, 1389-1414.
61. HOFMANN A.-W. et HART S.-R. (1978). — *An assessment of local and regional isotopic equilibrium in the mantle*. Earth Planet. Sci. Lett., 38, 44-62.
62. KAY R.-W. et HUBBARD N.-J. (1978). — *Trace elements in ocean ridge basalts*. Earth Planet. Sci. Lett., 38, 95-116.
63. GREEN T.-H. et RINGWOOD A.-E. (1968). — *Origin of garnet phenocrysts in calc-alkaline rocks*. Contrib. Mineral. and Petrol., 18, 163-174.
64. CHAZEN S.-I. et VOGEL T.-A. (1974). — *Distribution of Ti and P in oceanic basalts as a test of origin*. Contrib. Mineral. and Petrol., 43, 307-316.
65. Mac GREGOR I.-D. (1969). — *The system MgO — SiO₂ — TiO₂ and its bearing on the distribution of TiO₂ in basalts*. Am. J. Sci., 267-A (Schaerer vol.) 342-363.
66. HUBBARD N.-J. (1969). — *A chemical comparison of oceanic ridge, Hawaiian alkalic basalts*. Earth. Planet. Sci. Lett., 5, 346-352.
67. LANGMUIR C.-H., BENDER J.-F., BENCE A.-E., HANSON G.-N. et TAYLOR S.-R. (1977). — *Petrogenesis of basalts from the Famous area : mid-atlantic ridge*. Earth. Planet. Sci. Lett., 36, 133-156.
68. WRIGHT T.-L. et FISHER S. (1971). — *Origin of the differentiated and hybrid lavas of Kilauea volcano*. Hawai. J. Petrol., 12, 1-65.
69. EWART A., BROTHERS R.-N. et MATEEN A. (1977). — *An outline of the geology and geochemistry, and the possible petrogenetic evolution of the volcanic rocks of the Tonga — Kermadec — New Zealand island arc*. J. Volcanol. Geo. Res., 2, 205-250.
70. GUNN B.-M. et MOOSER F. (1970). — *Geochemistry of the volcanics of central Mexico*. Bull. volcanol., 24, 577-616.
71. COULON C. (1977). — *Le volcanisme calco-alcalin cénozoïque de Sardaigne (Italie) : Pétrographie, Géochimie et genèse des laves*

andésitiques et des Ignimbrites — Signification géodynamique. Thèse
Etat, Marseille, 288 pp.

72. SIGVALDASON G.-E. (1974). — *Basalts from the centre of the assumed Icelandic mantle plume.* J. Petrol., 15, 497-524.
73. MYSEN B.-O. et KUSHIRO I. (1976). — *Compositional variation of coexisting phases with degree of melting of peridotite under upper mantle conditions.* Carn. Inst. Wash. Year book, 75, 546-555.
74. LEEMAN W.-P. (1976). — *Petrogenesis of Mc Kinney (Snake river) olivine tholeiite in light of rare-earth element and Cr/Ni distributions.* Geol. Soc. Am. Bull., 87, 1582-1586.
75. CLARKE D.-B. (1970). — *Tertiary basalts of Baffin bay: Possible primary magma from the mantle.* Contrib. Mineral. and Petrol., 25, 203-224.
76. GUNN B.-M. (1971). — *Trace element partition during olivine fractionation of Hawaiian basalts.* Chem. Geol., 8, 1-13.
77. GUNN B.-M., ABRANSON C.-E., NOUGIER J., WATKINS N.-D. et HAJASH A. (1971). — *Amsterdam Island, an isolated volcano in the southern indian Ocean.* Contrib. Mineral. and Petrol., 32, 79-92.
78. FLOWER M.-F.-J., ROBINSON P.-T., SCHMINCKE H.-U. et OHNMACHT W. (1977). — *Magma fractionation systems beneath the Mid-Atlantic ridge at 36-37°N.* Contrib. Mineral. and Petrol., 64, 167-195.
79. CZAMANSKE G.-K. et MOORE J.-G. (1977). — *Composition and phase chemistry of sulfide globules in basalt from the mid-Atlantic ridge rift valley near 37°N lat.* Geol. Soc. Am. Bull., 88, 587-599.
80. HAWKINS J.-W.-Jr. (1976). — *Petrology and geochemistry of basaltic rocks of the Lau basin.* Earth Planet. Sci. Lett., 28, 283-297.
81. BISHOP A.-C. et WOOLEY A.-R. (1973). — *A basalt — trachyte — phonolite series from Ua Pu, Marquesas islands, Pacific ocean.* Contrib. Mineral. and Petrol., 39, 309-326.
82. PRICE R.-C. et CHAPPELL B.-W. (1975). — *Fractional crystallisation and the petrology of Dunedin Volcano.* Contrib. Mineral. and Petrol., 53, 157-182.
83. BAXTER A.-N. (1976). — *Geochemistry and petrogenesis of primitive alkali basalt from Mauritius, indian Ocean.* Geol. Soc. Am. Bull., 87, 1028-1034.
84. LAMBERT R., St. J., HOLLAND J.-G. et OWEN P.-F. (1974). — *Chemical petrology of a suite of calc-alkaline lavas from Mount Ararat, Turkey.* J. Geol., 82, 419-438.
85. PECCERILLO A. et TAYLOR S.-R. (1976). — *Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey.* Contrib. Mineral. and Petrol., 58, 63-81.

86. SIEGERS A., PICHLER H. et ZEIL W. (1969). — *Trace element abundances in the « Andesite » formation of northern Chile*. Geochim. Cosmochim. Acta, 33, 882-887.
87. LOPEZ-ESCOBAR L., FREY F.-A. et VERGARA M. (1974). — *Andesites from central-south Chile: Chile element abundances and petrogenesis*. Proc. Symposium in « Andean and Antarctic volcanology problems » Santiago, Chile, 725-761.
88. LOPEZ-ESCOBAR L., FREY F.-A. et VERGARA M. (1977). — *Andesites and high-alumina basalts from the central-south Chile high Andes: Geochemical evidence bearing on their petrogenesis*. Contrib. Mineral. and Petrol., 63, 199-228.
89. HEMING R.-F. (1974). — *Geology and Petrology of Rabaul Caldera, Papua New-Guinea*. Geol. Soc. Amer. Bull., 85, 1253-1264.
90. COASTS R.-R. (1959). — *Geologic reconnaissance of Semisopochnoi island, western Aleutian islands, Alaska*. Geol. Survey Bull., 1028-O, 477-519.
91. GILL J.-B. (1970). — *Geochemistry of Viti Levu, Fiji and its evolution as an island arc*. Contrib. Mineral. and Petrol., 27, 179-203.
92. HAWKESWORTH C.-J., O'NIONS R.-K., PANKHURST R.-J., HAMILTON P.-J. et EVENSEN N.-M. (1977). — *A geochemical study of island-arc and back-arc tholeiites from the Scotia Sea*. Earth Planet. Sci. Lett., 36, 253-262.
93. GILL J.-B. (1976). — *Composition and age of Lau Basin and ridge volcanic rocks: Implications for evolution of an interarc basin and remnant arc*. Geol. Soc. Am. Bull., 87, 1384-1395.
94. NOCKOLDS S.-R. et ALLEN R. (1956). — *The geochemistry of some igneous rock series-III*. Geochim. Cosmochim. Acta., 9, 34-77.
95. KUNO H. (1968). — *Differentiation of basalt magmas in Hess, H.-H. et Poldervaart, A. (eds): Basalts (vol. 2), Interscience (Wiley) New York, p. 623-688*.
96. MAURY R.-C. (1976). — *Contamination et cristallisation fractionnée des séries volcaniques alcalines, continentales et océaniques: l'origine des laves acides*. Thèse doctorat Etat, Paris XI, Orsay, 455 pp.
97. THORNTON C.-P. et TUTTLE O.-F. (1960). — *Chemistry of igneous rocks. I: Differentiation index*. Amer. J. Sci., 258, 664-684.
98. TAYLOR S.-R. (1969). — *Trace element chemistry of andesites and associated calc-alkaline rocks*. Proceedings of the Andesite conference Int. Upper mantle Project. Scientific report, 16, 43-63.