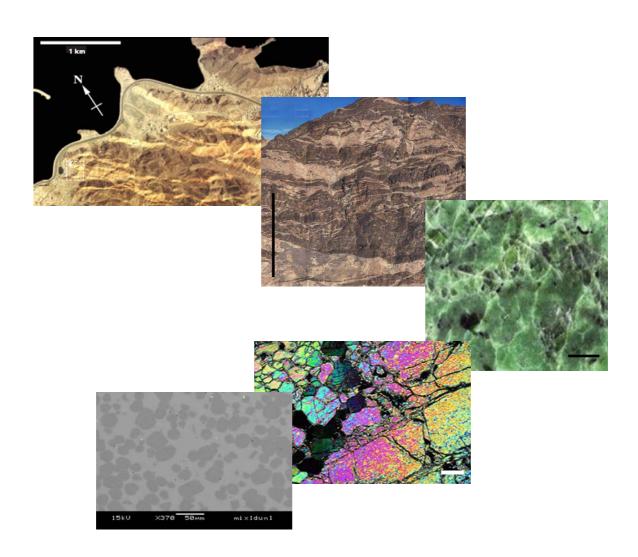




Sarah Lambart Master 2 ST Juin 2006

Approche expérimentale du rôle de la focalisation du magma sous les rides médio-océaniques :

Implications pour la genèse des MORB



Encadrants:

Didier Laporte Pierre Schiano

Jury:

Patrick Bachélery

Nathalie Bolfan-Casanova

Jean-Yves Cottin Franck Donnadieu

Tahar Hammouda (spécialiste)

Hervé Martin Estelle Rose-Koga

SOMMAIRE

I.	Introductio	on a contract of the contract	p.2-4
II.	Techniques	expérimentales et analytiques	p.5-8
	II.1)	Stratégie expérimentale	p.5
	II.2)	Matériaux de départ	p.6
	II.3)	Chargement des capsules	p.6-7
	II.4)	Les expériences : choix des conditions expérimentales	p.8
	II.5)	Techniques analytiques	p.8
III.	Résultats		p.9-27
	III.1)	Les microdykes	p.9-10
	III.2)	Série DUN : expériences de fusion partielle d'un manteau fertile	p.10-14
		a) <u>Textures et équilibres de phases</u>	p.10-1 1
		b) <u>Compositions des phases</u>	p.11.14
	III.3)	Série MIX : expérience de focalisation du magma	p.15-20
		a) Série MIX2 : facteur de focalisation $\Omega_2=3$	p.15-17
		b) Série MIX1 : facteur de focalisation $\Omega_1 = 6$	p.18-20
	III.4)	Série REF : expériences de refroidissement du magma	p.21-27
		a) Série MIX2 : facteur de focalisation $\Omega_2=3$	p.22-23
		b) Série MIX1 : facteur de focalisation $\Omega_1 = 6$	p.23-25
		c) <u>Influences sur la composition chimique des phases</u>	p.26
		d) <u>Focalisation et refroidissement</u>	p.26-27
IV.	Calculs pM	ELTS	p.28-34
	IV.1)	Conditions initiales et procédure numérique	p.28-29
	IV.2)	Résultats	p.29-30
		a) Fusion partielle d'une péridotite de composition MBK	p.29-31
		b) <u>Focalisation du magma</u>	p.31-32
		c) <u>Refroidissement de la lithosphère</u>	p.32-34
V.		et implications pétrologiques	p.35-42
	V.1)	Focalisation du liquide : explication de la	
		composition des MORB ?	p.35-41
		a) <u>Liquides primaires d'une péridotite vs. MORB</u>	p.37-38
		b) <u>Focalisation du liquide : implications pour la genèse des MORB</u>	p.38-41
	V.2)	Focalisation du liquide : une explication des compositions	
		de certains résidus mantelliques ?	p.41-42
VI.	Conclusion		p.43
		ANNEXES	p.44-48
A)	Calculs d'eri	reurs	p.44
B)		s initiales des différents produits de départ	p.45
C)	=	s sur les projections	p.45
D)	Liste des figu	<u>. </u>	p.46-47
E)	Liste des tab		p.47

F) Bibliographie I. Introduction

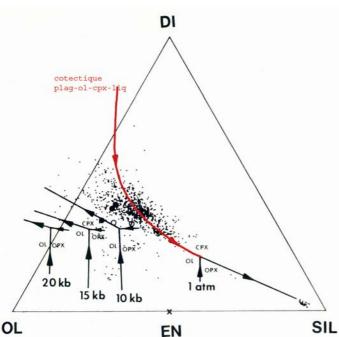


Fig.1: Compositions de 960 verres de MORB compilées par Melson & al. (1977) comparés avec les limites de phases entre 0 et 20 kbar (*Stolper, 1980*). Projection à partir du plagioclase sur le plan diopside-olivine-silice. L'algorithme utilisé pour calculer les projections est donné dans l'Annexe C.

Dans leurs région-sources, les liquides basaltiques sont à l'équilibre avec des assemblages minéralogiques à olivine + orthopyroxène $(opx) \pm$ clinopyroxène (cpx) ± spinelle (ou ± grenat selon la pression). La chute de pression qui résulte de l'ascension des basaltes vers la surface s'accompagne augmentation importante volume liquidus de l'olivine dans le tétraèdre olivine-silice-diopsideplagioclase (Stolper, 1980; Fig.1). Au cours de leur ascension, les basaltes deviennent donc de plus en plus soussaturés en pyroxènes et vont donc avoir tendance à dissoudre ces derniers dans les péridotites encaissantes. Les effets de cette sous-saturation seront particulièrement marqués dans le cas où l'ascension se fait par écoulement en milieu poreux : elle peut en effet aboutir à la formation de chenaux dunitiques de

haute perméabilité qui pourraient jouer un rôle majeur dans le transport des basaltes sous les rides médio-océaniques (Fig.2).

Les interactions entre basaltes et péridotites encaissantes et la formation des chenaux dunitiques ont fait l'objet d'un certain nombre d'études géologiques (Suhr & al., 2003), théoriques (Asimow & Stolper, 1999), et expérimentales (Morgan Liang, 2003, 2005). Plusieurs hypothèses ont été proposées quant à l'origine de ces dunites: (1) dunites résiduelles, provenant d'une partielle de très haut degré (Jackson & Ohnenstetter, 1991), (2) dunites cumulatives, correspondant remplissage de fractures par des olivines précipitant à partir d'un liquide ascendant (Takahashi, 1992), et (3) dunites de remplacement, provenant de la formation de canaux de haute perméabilité par dissolution de pyroxènes pendant la focalisation du liquide lors de son

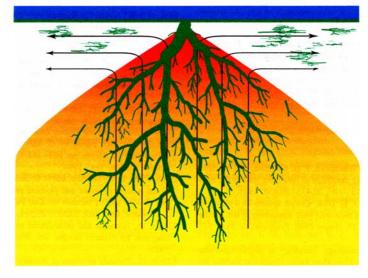


Fig.2: Illustration d'un réseau de dunite sous une ride médio-océanique basé sur les observations de l'ophiolite d'Oman (le liquide est présent partout dans la région grisée). Braun & Kelemen, 2002

ascension (Kelemen & al., 1990).

Kelemen et al. (1995) ont montré que la plupart des dunites sont formées à basse pression (<1.5 GPa) par ce dernier mécanisme, et, Spiegelman & al. (2001) expliquent la formation du réseau dunitique (Fig.2) par une instabilité se créant durant la réaction d'infiltration et aboutissant à la focalisation du liquide dans les chenaux : la circulation de volumes importants de liquide dans ces chenaux aurait pour conséquences la dissolution complète des pyroxènes et une augmentation de la perméabilité du chenal. Le transport des magmas basaltiques sous les rides médio-océaniques se ferait donc principalement dans des conduits de haute perméabilité plutôt que par écoulement en milieu poreux (avec une faible fraction volumique de liquide) ou par des fractures.

Les principaux arguments qui peuvent être avancés en faveur de ce modèle sont :

- 1) Les basaltes de rides ne sont pas à l'équilibre avec les péridotites résiduelles à basse pression (c'est-à-dire aux pression du Moho) : en effet, ils ne sont pas saturés en orthopyroxènes (opx) alors que ce minéral est un constituant majeur des péridotites résiduelles (Stolper, 1980).
- 2) Des dunites, de tailles et de formes variables, ont été observées dans les grands massifs ophiolitiques comme en Oman (Suhr & al, 2003, 2005).
- 3) Le mg# [=Mg²⁺/(Mg²⁺+Fe²⁺)] de l'olivine et le cr# [=Cr³⁺/(Cr³⁺+Al³⁺)] du spinelle dans les dunites sont équilibre avec les MORB (ex. Kelemen & al., 1995, Tommasi & al., 2004.)

Outre, les études numériques et géologiques, les travaux expérimentaux ont consisté à juxtaposer un cylindre de péridotite/harzburgite et un cylindre de basalte et à étudier la cinétique des interactions entre les deux composants : dissolution, infiltration, etc. Ces études ont permis, entre autres, de mieux comprendre ce qui se passe à la bordure des chenaux dunitiques, à l'interface entre la dunite et son encaissant, mais leur transposition au cas naturels est compliquée par les problèmes d'échelle et les valeurs du rapport magma/roche nécessaire à la production de dunites restent mal contraintes.

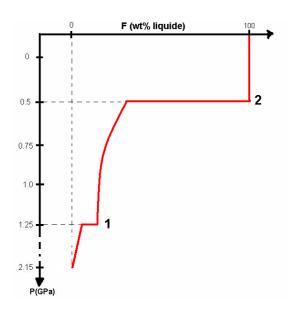


Fig.3 : Schéma de la formation et du transport du magma dans notre modèle

Nous avons réalisé une série d'expérience en piston-cylindre pour simuler de manière très schématique le processus de focalisation du magma sous les rides médio-océaniques. Le modèle d'ascension et de focalisation du magma est illustré sur la figure 3. Les principales étapes du modèle sont les suivantes: 1) Début de fusion du manteau ascendant à P=2.15 GPa, ce qui correspond à la pression à laquelle le solidus est franchi pour une température potentielle du manteau de 1350°C (Fig.4). La température potentielle du manteau est la température extrapolée à pression atmosphérique, en supposant que la parcelle du manteau est transportée à la surface par un processus isentrope; la température potentielle du manteau sous les rides est de 1300 à 1500°C (McKenzie & O'nions, 1991). Avec la baisse de pression le degré de fusion augmente. 2) Focalisation instantanée du magma à 1.25 GPa (valeur de pression correspondant à une fraction pondérale de liquide égale à environ 10%).

A ce stade, la masse de liquide dans le système est multipliée par un facteur Ω , appelé facteur de focalisation. Après cette focalisation instantanée, la fraction pondérale de liquide continue à augmenter avec la baisse de pression. 3) Changement de régime marqué par la propagation de fracture et la création de filons qui vont permettre l'ascension rapide du magma vers la surface. On admet que ce changement se produit à 0.5 GPa (si on fait abstraction de la différentiation à basse pression au niveau de la ride : fractionnement à olivine + cpx + plagioclase). Le choix de 0.5 Gpa est quelque peu arbitraire mais, sur le plan conceptuel, il traduit le fait que, sous la ride médio-océanique, le régime thermique doit passé d'un régime convectif en profondeur à un régime de refroidissment conductif vers la surface (par ex., Nui & Hékinian, 1997).

Dans le cadre de ce modèle, nous avons fait une étude du rééquilibrage entre péridotite et basalte en fonction de la pression et du rapport magma/roche. L'objectif est de caractériser pour différentes valeurs du rapport massique magma/roche, l'évolution du système en fonction de la pression, depuis des équilibres à olivine \pm opx \pm cpx \pm spinelle jusqu'à des paragenèses olivine \pm spinelle. Les informations visées sont de quatre types :

- (1) Les effets de focalisation des magmas dans les conduits de haute perméabilité sur la composition des basaltes en surface (MORB). Il s'agit de comparer l'évolution compositionnelle de la phase liquide en fonction de la pression pour des rapports magma/roche variant de 0 (pas de focalisation du magma) à 1. On pourra ainsi évaluer si la composition des magmas parentaux des MORB est significativement affectée par les interactions avec les péridotites encaissantes.
- (2) Les conditions de formation des chenaux dunitiques (par exemple, les rapports magma/roche nécessaires pour consommer les pyroxènes des lherzolites encaissantes).
- (3) Les compositions chimiques, modales et minéralogiques des péridotites résiduelles, après fusion et percolation des magmas. En jouant sur le paramètre température, on essaiera de reproduire des assemblages lherzolitiques ou wherlitiques avec des phases minérales très enrichies en fer (mg#=80-85) par rapport aux compositions typiques du manteau, responsables, selon Tommasi & al., (2004), d'anomalies de vitesses sismiques.

II. Techniques expérimentales et analytiques

II.1) Stratégie expérimentale

La stratégie expérimentale a comporté trois phases. La première a consisté en une expérience de fusion d'une péridotite fertile (MBK) à 1.25 GPa et 1310° C (telle que la fraction de liquide soit proche de 10%): cette expérience a permis de définir l'état initial du système (en particulier la composition du liquide de référence, B_0), avant focalisation du magma. A ce stade, nous avons préparé trois compositions synthétiques en mélangeant, en différentes proportions la péridotite de départ et un gel basaltique de composition B_0 , afin de simuler des facteurs de focalisation de 3, 6 et 11 c'est-à-dire à des augmentations de la masse de liquide dans le système à 1.25 GPa par des facteurs de 3, 6 et 11. La fraction de liquide dans la péridotite à 1.25 GPa étant de 0.09, ces facteurs correspondent à des rapports magma/roche R_2 =0.18 (MIX2), R_1 =0.44 (MIX1) et R_3 =0.88 (MIX3). La deuxième phase a consisté à rééquilibrer la péridotite de départ et les deux premières compositions synthétiques (MIX1 et MIX2) à trois couples (P,T) correspondant à un trajet de décompression adiabatique (voir ci-dessous) : P=1.0 GPa/ 1290° C; 0.75 GPa/ 1270° C; 0.5 GPa/ 1250° C.

Enfin, la troisième phase a consisté à étudier le comportement des mélange magma/roche pour des températures inférieures à celle préveues dans le cas d'un trajet de décompression adiabatique. Six expériences ont été réalisées à 0.75 GPa et une température comprise entre 1250 et 1170°C. Ces expériences peuvent correspondrent dans un cas naturel à un refroidissement dû par exemple à une interaction thermique avec la lithosphère.

Nous avons donc quatre séries principales d'expériences : la série DUN correspondant aux expériences de fusion partielle sans focalisation, la série MIX2 correspondant aux expériences de focalisation avec une facteur de 3, la série MIX1 correspondant aux expériences de focalisation avec un facteur de 6 et la série REF qui correspond aux expériences de refroidissement pour différents valeurs du rapport magma/roche.

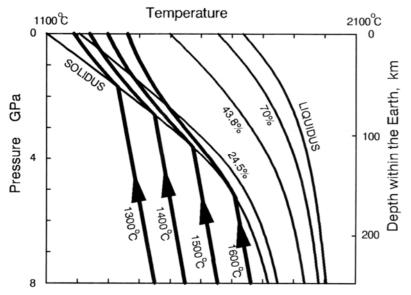


Fig.4: Trajets isentropes d'une remontée de manteau, calculés en utilisant les paramètres données par McKenzie & Bickle (1988) avec une entropie de fusion de 400 J.kg⁻¹.°C⁻¹ pour 4 Tp. *McKenzie & O'nions (1991)*

Le trajet adiabatique a été trouvé graphiquement à l'aide d'une figure de McKenzie & O'nions (1991) qui présente les adiabats pour des températures potentielles de 1300°C à 1600°C (Fig.4). Nous avons choisis une température potentielle Tp=1350°C, proche de la température potentielle du manteau à l'origine des N-MORB (McKenzie & O'nions, 1991) et du modèle d'Asimow & Stolper (1999) dont la plupart des calculs ont été fait à 1300°C.

II.2) Matériaux de départ

Deux types de matériaux de départ ont été utilisés.

La composition MBK choisie pour les expériences de la série DUN est une composition de péridotite fertile légèrement enrichie en potassium (Annexe B). C'est une péridotite de Mont Briançon qui a été broyée pour obtenir une taille de cristaux de 2-4 μ m en moyenne, à laquelle on a ajouté un peu de liquide basaltique afin de représenter au mieux un manteau primitif (~300ppm de K_2O).

Les compositions synthétiques MIX1, MIX2 et MIX3 sont constituées d'un mélange entre cette poudre MBK et le gel basaltique qui a la composition du liquide formé par 9% de fusion (déterminé par bilan de masse : Albarede & Provost, 1977) de la péridotite MBK (Annexe B). Cette composition a été précédemment déterminée expérimentalement à partir de l'expérience DUN1 à 1.25 GPa et 1310 °C. Un gel synthétique ayant presque la même composition que le verre de l'expérience DUN1 (le sodium a été légèrement surestimé) a été préparé par Jean-Luc Devidal (Tabl.1). La poudre de MBK et le gel synthétique ont été chauffés pendant 6 h à 900°C dans un flux CO2/H2 avec des débits ajustés afin d'obtenir une fugacité d'oxygène entre magnétite-wüstite et ferwüstite pour réduire la totalité du fer en Fe²⁺. Les mélanges ont ensuite été stockés sous vide pour minimiser l'absorption en eau.

Tabl. 1 : Compositions du verre de DUN1 et du gel synthétisé :

	DUN1		Gel DUN1	Erreure
	fond conten	ieur / 5µm	ICP-AES ^b	
	Moyenne ^c	Incertitude ^d	Moyenne ^c	%
Na ₂ O	2,81	0,18	3,01	7,12
MgO	11,35	0,42	11,42	0,62
K_2O	0,50	0,09	0,50	0,00
CaO	11,27	0,37	11,69	3,73
TiO ₂	0,84	0,13	0,87	3,57
FeO	7,17	0,31	7,16	0,14
MnO	0,14	0,08	0,14	0,00
Cr_2O_3	0,12	0,09	0,12	0,00
SiO ₂	49,01	0,57	48,52	1,00
Al_2O_3	16,80	0,41	16,57	1,37
Total	97,93	0,64	94,87	3,12
mg#	73,83	0,55	73,98	0,20

^a les compositions sont les compositions normalisées à 100 % et sont données en % pondéraux.

II.3) Chargement des capsules

Les expériences ont été réalisées pour des durées comprises entre 72 et 120 heures dans un piston-cylindre ¾" (19.1mm; Fig.5). L'assemblage est constitué de l'extérieur vers l'intérieur d'une cellule de sel drapée d'une feuille de plomb, d'un cylindre de pyrex externe, d'un four en graphite, d'un cylindre de pyrex interne et de pièces de MgO entourant la capsule de platine contenant l'échantillon (Laporte, 2004). Toutes les pièces sont conservées à l'étuve à 150°C et, avant chaque expérience, l'assemblage est placé pendant 24 heures à 300°C. La température est contrôlée à ± 1°C à la pointe du thermocouple W95Re5/W74Re26. Cependant, il existe un gradient thermique pendant les expériences : il est d'environ 5°C à l'intérieur de l'échantillon (Laporte & al., 2004).

^b analyste : M.Benbakkar

c la moyenne est faite à partir de 12 analyses

^d l'incertitude calculée correspond au maximum entre l'erreur analytique et 2 fois l'écart-type

^e l'erreur calculée est l'erreur relative entre les deux compositions en prenant pour référence la composition de DUN1

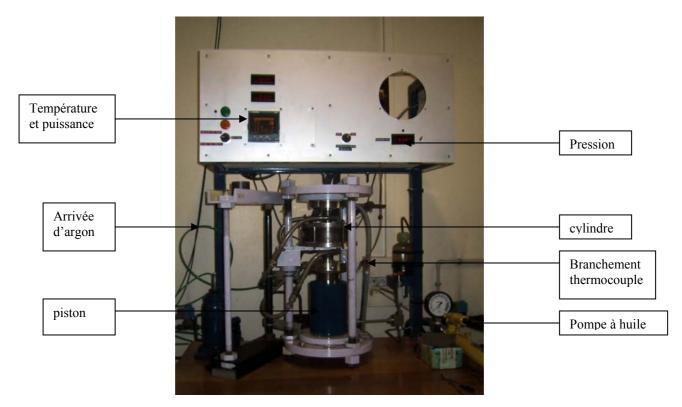


Fig. 5: Photographie du piston-cylindre PC1 3 du LMV

La capsule en platine a un diamètre externe de 5 mm et une épaisseur de 0.2 mm et contient un conteneur en graphite qui renferme lui-même la poudre d'échantillon choisie (Fig.6). La masse de poudre placée dans le conteneur a été précisément pesée avant chaque expérience et varie entre 20.4 mg et 23.8 mg.

La capsule en platine est séchée pendant 24 heures avant soudure à 300°C et rapidement soudée pendant qu'elle est

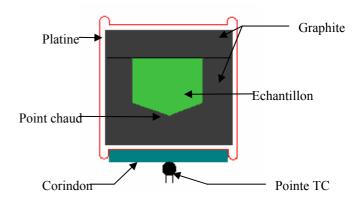


Fig.6: Géométrie du conteneur

encore chaude afin d'éviter toute contamination en eau par l'air. Pour s'assurer de la reproductibilité en température, l'échantillon est placé exactement à la même hauteur dans le four en graphite dans toutes les expériences : le fond de la chambre à échantillon est placée au point chaud du four. Le bout du thermocouple est séparé de la capsule en Pt par une lamelle de corindon de seulement 0.5 mm d'épaisseur et la soudure est la plus petite possible.

II.4) Les expériences : choix des conditions expérimentales

Le tableau 2 résume les conditions expérimentales de toutes les expériences et donne les paragenèses ainsi que les modes des différentes phases dans chaque échantillon. Les modes ont été calculés par bilan de masse à partir des compositions chimiques des phases et de la roche totale (Albarède & Provost, 1977). Pour les expériences de focalisation (séries MIX1 et MIX2), les fractions modales des phases ont été calculées à 1.25 GPa. En effet, à cette pression, le liquide est à l'équilibre avec le résidu. La composition chimique des phases n'est donc pas modifiée par l'ajout de liquide. Nous avons donc estimé les proportions des différentes phases par bilan de masse en changeant uniquement la composition totale de la roche.

Tabl.2 : Récapitulatif des conditions expérimentales et fractions modales des phases de tous les échantillons

Série	Run	Compo	Р	Т	T (°C) Tps (h)	Paragenèses et modes (wt%) ^a							
Serie	Kuii	Compo	(GPa)	(°C)		Liquide	Olivine	Орх	Срх	Spinelle	PI		
	DUN1		1.25	1310	94	8.80 (91)	58.34 (193)	21.02 (406)	11.07 (296)	0.78 (32)	Absent		
DUN	DUN2	MBK	1	1290	72	15.83 (80)	60.58 (125)	18.49 (287)	4.63 (217)	0.47 (16)	Absent		
2011	DUN3	IIIDIX	0.75	1270	98.5	19.99 (71)	62.05 (121)	17.6 (172)	Absent	0.36 (11)	Absent		
	DUN4		0.5	1250	119	22.44 (55)	65.28 (94)	12.06 (131)	Absent	0.22 (7)	Absent		
	DUN1 ap.focal ^b		1.25	1310		23.42 (117)	51.97 (183)	14.82 (423)	9.59 (304)	0.66 (34)	Absent		
MIX2	MIX2DUN3	0.85	1	1290	97.3	26.31 (89)	52.02 (151)	14.90 (330)	6.51 (232)	0.25 (21)	Absent		
WIIAZ	MIX2DUN2	MBK + 0.15 B₀	0.75	1270	99	33.29 (131)	56.29 (198)	9.87 (325)	Absent	0.45 (22)	Absent		
	MIX2DUN1	0.10 00	0.5	1250	107.5	36.43 (68)	62.11 (113)	1.22 (186)	Absent	0.25 (9)	Absent		
	DUN1 ap.focal ^b	0.00	1.25	1310		37.45 (121)	42.79 (170)	11.36 (356)	8.24 (218)	0.49 (28)	Absent		
MIX1	MIX1DUN3	0.66 MBK + 0.44 B ₀	1	1290	109	43.31 (174)	47.12 (265)	4.15 (518)	5.23 (285)	0.18 (25)	Absent		
WIIA	MIX1DUN2		0.75	1270	100.5	47.52 (115)	50.74 (168)	0.10 (320)	1.49 (181)	0.37 (15)	Absent		
	MIX1DUN1	0.11 B ₀	0.5	1250	113.5	51.37 (58)	48.63 (49)	Absent	Absent	Absent	Absent		
	MIX2REF1	0.85 MBK +		1250	96.2	35.96 (55)	56.95 (84)	6.92(142)	Absent	0.17 (7)	Absent		
	MIX2REF2	0.15 B ₀		1230	111.7	25.83 (44)	56.06 (65)	12.03 (119)	5.35 (77)	0.76 (7)	Absent		
	MIX1REF1	0.66		1250	98	48.59 (84)	51.02 (106)	0.06 (182)	Absent	0.36 (11)	Absent		
REF	MIX1REF2	MBK +	0.75	1230	~97.3	37.59 (52)	48.82 (70)	4.53 (143)	8.55 (94)	0.51 (9)	Absent		
	MIX1REF3	0.44 B ₀		0.70	1170	110.3	8.98 (313)	51.67 (490)	7.66 (433)	15.39 (427)	0.68 (5)	16.02 (293)	
	MIX3REF	0.53 MBK + 0.47 B ₀		1170	96,3	12.25 (292)	46.68 (322)	0 .10 (522)	18.85 (347)	0.27 (12)	21.62 (303)		

a les erreurs correspondent à deux fois l'écart-type : ex.8.80(91) représente 8.80±0.91 (2σ) (Annexe A)

II.5) Techniques analytiques :

A la fin de l'expérience, les échantillons sont trempés avec une vitesse de l'ordre de 50°C/s. Les capsules sont ensuite inclues dans l'époxy, sectionnées dans la longueur, de nouveau montées en résine et imprégnées, polies et métallisées pour être observées au microscope électronique à balayage (MEB : JEOL JSM-5910) et analysées à la microsonde électronique (Cameca SX100).

A la microsonde électronique, pour les phases cristallines, une tension accélératrice de 15 kV, un courant de 15 nA, un temps de comptage de 10 secondes et un faisceau focalisé sont utilisés. Pour l'analyse des verres, le courant est de 8 nA et le faisceau est défocalisé à 5 μm quand la taille de la plage de verre est suffisamment grande, à 2 μm dans les autres cas (Fig.7). Des analyses qui ont été réalisées sur le standard JDF-D2 (Laporte & al., 2004) ont montré qu'aucune correction pour la perte en sodium n'est nécessaire, même pour les analyses à 2 μm. Néanmoins, la très petite taille de certains filons peut parfois aboutir à de mauvais totaux analytiques (quand le faisceau électronique « mord » sur le conteneur en graphite ; Tab.3).

^b modes estimés en % pondéraux par bilan de masse avec les compositions chimiques des phases de l'expérience DUN1

III. Résultats

Dans ce qui suit, nous utilisons la même définition pétrologique des roches qu'Asimow & Stolper (1999) *i.e.* le terme harzburgite est utilisé pour les résidus qui contiennent des opx mais pas de cpx et le terme dunite pour les résidus ne contenant ni opx, ni cpx. Ces termes diffèrent de la nomenclature pétrologique standard selon laquelle les harzburgites sont des roches contenant moins de 5% de cpx et les dunites, des roches contenant moins de 10% de cpx + opx.

III.1) Les microdykes

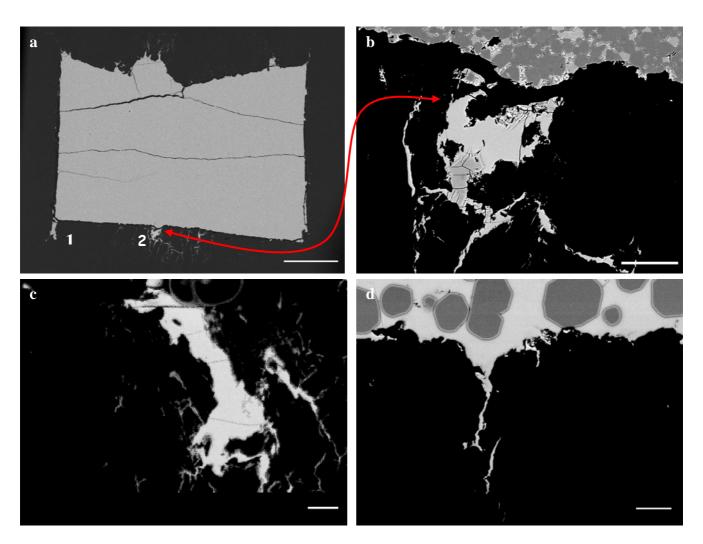


Fig.7: Images MEB en électrons rétrodiffusés de a) section longitudinale de l'échantillon DUN1 avec 1- un filon cristallisé sur le coin et 2- un filon rempli de verre (barre d'échelle : $500 \, \mu \text{m}$); b-d) filons de tailles variables dans différents échantillons. b) filon dans le fond de l'échantillon DUN1 (barre d'échelle : $50 \, \mu \text{m}$) pouvant être analysé avec un faisceau de $5 \, \mu \text{m}$. c) filon au fond de l'échantillon MIX2DUN1 (barre d'échelle : $20 \, \mu \text{m}$). d) très petit filon dans l'échantillon MIX1DUN1 ne pouvant être analysé qu'à $2 \, \mu \text{m}$ et donnant de mauvais bouclages analytiques (barre d'échelle : $20 \, \mu \text{m}$).

Pour analyser la composition du liquide à l'équilibre avec les phases minérales, nous avons utilisé la technique développée par Laporte & al. (2004) qui consiste à extraire le liquide dans de petites fractures du conteneur de graphite. Dans toutes les expériences nous avons pu observer un

certain nombre de petits filons partant de la charge vers le conteneur. Certains filons partent des coins de la charge et d'autres partent de la partie centrale du toit ou du fond de la chambre (Fig.7a). Les filons sur les coins ne sont pas étudiés car ils sont systématiquement cristallisés. Au contraire, ceux sur le toit et le fond de la chambre contiennent du verre (Fig.7b-c). Ces filons sont de tailles très variables : de quelques dizaines à plusieurs centaines de microns de long et de quelques microns à plusieurs dizaines de microns de large. Ces microfilons se forment en deux temps (Laporte & al., 2004) : 1) formation de fractures dans le conteneur de graphite lors de la pressurisation de l'assemblage piston-cylindre et 2) remplissage de ces fractures par les liquides issus de la fusion partielle de la péridotite en début d'expérience. Pour les taux de fusion et les durées de nos expériences, les liquides sont à l'équilibre avec l'assemblage minéralogique voisin.

III.2) Série DUN : expériences de fusion partielle d'un manteau fertile

a) <u>Textures et équilibres de phases</u>

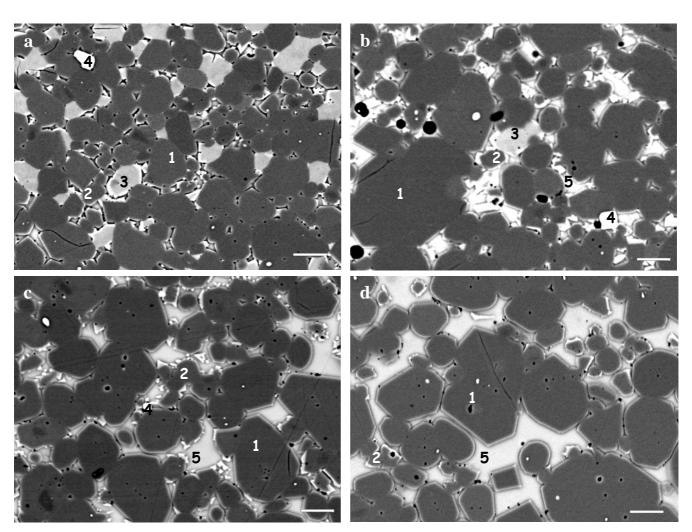
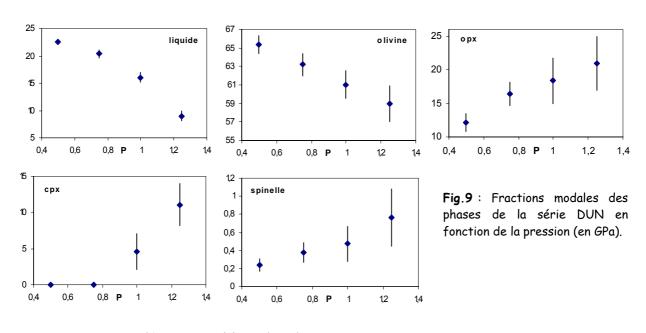


Fig.8: Evolution texturale de la série DUN: a) 1.25 GPa, $1310^{\circ}C$; b) 1 GPa, $1290^{\circ}C$; c) 0.75 GPa, $1270^{\circ}C$; d) 0.5 GPa, $1250^{\circ}C$ (1-olivine, 2-opx, 3-cpx, 4-spinelle, 5-verre). Barre d'échelle: $10 \mu m$.

Les textures de la péridotite partiellement fondue sont montrées dans la figure 8 et l'évolution des fractions modales des phases dans la figure 9 et le tableau 2. Nous pouvons voir qu'une croissance significative de la taille des grains d'olivine a eu lieu : certains dépassent les 30 µm de diamètre et les cristaux d'olivine et d'opx sont polygonaux avec des interfaces planes bien développées ou faiblement courbées. Ces caractéristiques laissent à penser que l'on a des textures proches de l'équilibre.

En terme de stabilité de phases, deux domaines sont à distinguer :

- Jusqu'à 1 GPa (1290°C), nous avons un assemblage lherzolitique (liquide + olivine + opx + cpx + spinelle). La fraction de cpx diminue de moitié tandis que celle du liquide double presque (Fig.9). Le liquide interstitiel est facilement identifiable à 1 GPa sous forme de plage de liquide (Fig.8b) tandis qu'il n'est présent qu'à l'intersection de trois grains ou à l'interface entre deux grains à 1.25 GPa (Fig.8a).
- Pour DUN3 et DUN4 (0.75 GPa, 1270°C, Fig.8c; 0.5 GPa, 1250°C, Fig.8d), le cpx n'est présent que sous forme de surcroissance de trempe et l'assemblage à l'équilibre est harzburgitique (liquide + olivine + opx + spinelle).



b) Compositions des phases

Composition du liquide : Le tableau 3 donne les compositions des liquides de tous les échantillons et la figure 10 présente les évolutions des concentrations des différents oxydes dans le liquide. Avec les diminutions de pression et de température, MgO, Na₂O, FeO, K₂O, TiO₂ et Al₂O₃ diminuent : MgO de 11.35 à 10.89%, Na₂O de 2.81 à 1.61%, FeO de 7.17 à 6.33%, K₂O de 0.5 à 0.21%, TiO₂ de 0.84 à 0.54% et Al₂O₃ de 16.8 à 15.8%. Les concentrations en Cr₂O₃ et SiO₂, quant à elles, augmentent de 0.12 et 49%, respectivement à 1.25 GPa et 1310°C à 0.31 et 51.9% à 0.5 GPa et 1250°C. La concentration en CaO montre un profil concave vers le haut avec une valeur maximum de 12.3% proche de 0.75 GPa cohérente avec la limite expérimentale de disparition du cpx (Fig.9).

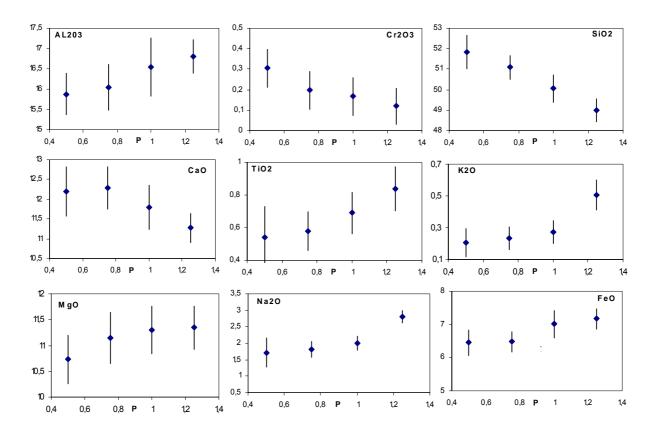
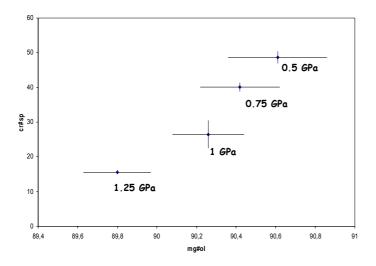


Fig. 10: Moyennes des concentrations d'oxydes dans le verre de la série DUN en fonction de la pression (GPa).

Compositions des phases solides: Les concentrations des différents oxydes dans chaque phase sont données dans le tableau 4. Nous avons retenu certains points permettant de caractériser au mieux la composition du résidu.



- (1) Les olivines, les opx et les cpx montrent une faible variabilité de composition à l'intérieur d'un même échantillon. Au contraire, les spinelles ont des compositions un peu plus variables qui témoignent probablement d'un rééquilibrage seulement partiel de cette phase.
- (2) Des variations plus significatives de la composition de toutes les phases sont observées avec la chute de pression. Les mg# des olivines et des opx passent de 89.8 à 90.6 et de 90.1 à 91 respectivement et le cr# des spinelles croît de 15.6 à 48.6 entre 1.25 GPa et 0.5 GPa (Fig.11).
- (3) Les concentrations en CaO des olivines et des opx montrent des spectres concaves avec un pic proche des conditions expérimentales de la disparition du cpx.

Tabl. 3 : Moyennes et incertitudes des compositions des verres (% pds) mesurées sur les filons basaltiques^a

	n ^b	s.s ^c	Na2O	MgO	K20	CaO	TiO2	FeO	MnO	Cr2O3	SiO2	Al2O3	Total ^d	mg#liq ^e	mg#ol ^e	cr#sp ^f
DUN1	12	5	2,81 (18)	11,35 (42)	0,50 (9)	11,27 (37)	0,84 (13)	7,17 (31)	0,14 (8)	0,12 (9)	49,01 (57)	16,80 (41)	97,93 (64)	73,94 (55)	89,8 (53)	15,56 (53)
DUN2	6	2	2,00 (21)	11,30 (46)	0,27 (7)	11,79 (56)	0,69 (13)	7,01 (42)	0,15 (11)	0,17 (9)	50,07 (67)	16,54 (73)	94,73 (248)	74,18 (74)	90,26 (18)	26,46 (396)
DUN3	10	2	1,82 (24)	11,14 (49)	0,23 (7)	12,29 (53)	0,58 (12)	6,48 (30)	0,11 (8)	0,20 (9)	51,10 (58)	16,04 (57)	98,18 (126)	75,40 (62)	90,42 (20)	40,13 (126)
DUN4	6	2	1,61 (66)	10,89 (92)	0,21 (8)	12,21 (58)	0,54 (17)	6,33 (73)	0,16 (12)	0,31 (9)	51,94 (93)	15,80 (60)	93,28 (439)	75,40 (56)	90,61 (25)	48,61 (174)
MIX2DUN3	9	5	2,67 (18)	10,54 (26)	0,44 (9)	11,38 (37)	0,83 (13)	6,68 (30)	0,17 (8)	0,14 (9)	49,64 (57)	17,51 (31)	98,49 (194)	73,76 (47)	89,98 (49)	28,00 (62)
MIX2DUN2 ^g	6	2	2,18 (22)	10,77 (109)	0,35 (10)	12,09 (127)	0,69 (13)	6,86 (30)	0,15 (8)	0,21 (16)	51,23 (59)	15,47 (54)	96,30 (315)	73,89 (254)	90,43 (56)	36,81 (49)
MIX2DUN1	7	5	1,98 (22)	10,00 (26)	0,34 (9)	11,32 (40)	0,64 (12)	5,92 (29)	0,11 (9)	0,31 (11)	53,41 (60)	15,96 (30)	99,11 (170)	75,07 (47)	90,42 (43)	49,50 (48)
MIX1DUN3 ⁹	6	2	2,59 (45)	10,27 (119)	0,43 (9)	10,85 (71)	0,78 (13)	7,20 (65)	0,11 (8)	0,23 (9)	51,34 (210)	16,22 (66)	97,76 (489)	71,74 (372)	90,22 (58)	28,29 (51)
MIX1DUN2	14	2	2,28 (16)	10,33 (35)	0,41 (5)	11,47 (26)	0,73 (9)	6,47 (21)	0,12 (4)	0,26 (6)	52,00 (41)	15,94 (19)	98,23 (234)	74,00 (125)	90,3 (48)	33,51 (109)
MIX1DUN1 ⁹	7	2	2,24 (25)	11,68 (103)	0,40 (9)	11,07 (44)	0,72 (15)	6,66 (31)	0,12 (8)	0,38 (10)	51,61 (112)	15,11 (29)	95,82 (556)	75,74 (201)	90,85 (24)	-
MIX2REF1	8	2	2,08 (23)	11,69 (53)	0,32 (8)	11,48 (75)	0,66 (15)	6,49 (45)	0,13 (9)	0,33 (11)	51,48 (111)	15,34 (44)	97,28 (169)	76,24 (63)	90,48 (32)	41,77 (479)
MIX2REF2	11	2	2,84 (23)	8,03 (79)	0,43 (6)	11,98 (47)	0,75 (7)	6,19 (40)	0,12 (4)	0,09 (9)	51,49 (58)	18,08 (81)	98,93 (142)	69,74 (140)	90,19 (12)	25,48 (229)
MIX1REF1	6	2	2,48 (10)	11,59 (44)	0,40 (5)	11,49 (27)	0,70 (4)	6,54 (15)	0,13 (4)	0,25 (7)	51,13 (25)	15,29 (23)	98,45 (97)	75,95 (54)	90,39 (24)	42,03 (291)
MIX1REF2	13	2	3,05 (43)	9,30 (77)	0,54 (10)	10,97 (36)	0,85 (57)	5,94 (29)	0,10 (11)	0,11 (9)	50,86 (93)	18,29 (50)	99,00 (259)	73,59 (198)	89,68 (12)	23,26 (293)
MIX1REF3 ^g	4	2	4.25 (17)	6.75 (40)	1.12 (4)	8.53 (30)	1.55 (18)	6.19 (13)	0.15 (6)	0.04 (4)	53.46 (170)	17.97 (75)	61,23 (821)	66.03 (380)	87.64 (33)	18.35 (85)
MIX3REF ^g	6	2	4.79 (37)	5.94 (33)	1.90 (18)	7.28 (36)	2.04 (18)	5.45 (28)	0.10 (10)	0.08 (5)	54,96 (140)	17.44 (110)	44.65 (845)	66.02 (299)	87.07 (34)	25.29 (84)

^a Toutes les compositions sont normalisées à 100% et l'erreur correspond au maximum entre deux fois l'écart-type et l'erreur analytique (Annexe A)

b Nombre d'analyses

^c Taille du faisceau en μ m (spot size)

d Les totaux exprimés sont les totaux analytiques

 $[^]e$ rapports mg# =100Mg²+/(Mg²+Fe²+) dans l'olivine et dans le liquide en considérant que tout le fer est sous forme Fe²+

f rapport cr# = $100Cr^{3+}/(Cr^{3+}+Al^{3+})$ dans le spinelle

 $[^]g$ charges où les filons étaient très petits (<2 $\mu \rm m$ de large) ce qui explique le mauvais bouclage des analyses

Tabl.4: Moyennes et incertitudes des compositions des phases solides (% pds) ^a

		Na20	MgO	CaO	TiO2	FeO	MnO	cr203	SiO2	Al2O3	Total ^b
	ol	-	48,63 (27)	0,30 (7)	0,02 (3)	9,82 (18)	0,15 (7)	0,11 (6)	40,72(35)	0,09 (3)	99,77 (56)
DUN1	орх	_	30,59 (29)	2,27 (11)	0,02 (5)	6,00 (12)	0,13 (7)	0,11 (0)	53,62 (60)	6,28 (67)	99,99 (47)
		0.52 (6)			0,12 (6)		0,14 (3)		51,83 (42)		100,09 (52)
	срх	0,53 (6) 0,01 (3)	19,91 (45) 21,21 (63)	15,29 (68) 0,04 (4)	0,23 (6)	4,23 (28) 9,02 (33)	0,13 (8)	1,14 (12) 14,91 (223)	,	6,70 (33) 54,29 (200)	98,26 (53)
	sp ol	-	,		0,13 (3)				40,51 (17)		. , ,
DUN2		-	49,16 (20)	0,32 (6)		9,44 (18)	0,14 (5)	0,16 (4)		0,08 (3)	100,61 (81)
	орх	- 0.00 (4.4)	31,40 (31)	2,41 (30)	0,07 (5)	5,81 (22)	0,14 (5)	1,09 (24)	54,46 (43)	4,53 (54)	100,99 (52)
	срх	0,38 (11)	20,40 (129)	15,69 (154)	0,18 (5)	4,16 (31)	0,12 (6)	1,33 (17)	52,10 (49)	5,63 (41)	100,84 (68)
	sp	0,02 (3)	19,93 (33)	0,09 (5)	0,16 (5)	9,68 (49)	0,10 (8)	24,35 (315)		45,45 (338)	97,97 (122)
DUN3	ol	-	49,20 (30)	0,33 (14)	0,02 (3)	9,31 (19)	0,15 (5)	0,21 (5)	40,65 (29)	0,06 (3)	100,44 (55)
	орх	-	31,75 (45)	2,49 (30)	0,07 (3)	5,73 (11)	0,13 (2)	1,10 (15)	55,09 (38)	3,60 (37)	100,59 (35)
	sp	0,00 (3)	18,46 (27)	0,10 (10)	0,18 (9)	10,46 (27)	0,18 (6)	35,20 (95)	0,19 (5)	35,22 (91)	97,39 (121)
DUN4	ol	-	49,30 (35)	0,27 (3)	0,01 (3)	9,11 (23)	0,14 (6)	0,27 (7)	40,83 (22)	0,06 (2)	100,35 (64)
	орх	-	32,05 (79)	2,29 (24)	0,09 (8)	5,67 (14)	0,14 (5)	1,21 (26)	55,36 (78)	3,17 (113)	100,64 (60)
	sp	0,01 (3)	17,58 (45)	0,11 (5)	0,21 (6)	10,74 (29)		41,55 (133)		29,47 (115)	96,94 (75)
MIX2DUN3	ol	-	49,20 (16)	0,26 (3)	0,02 (5)	9,67 (8)	0,18 (4)	0,16 (5)	40,43 (34)	0,06 (5)	99,66 (33)
	орх	-	31,53 (99)	2,18 (76)	0,13 (4)	5,89 (7)	0,096 (3)	1,09 (53)	54,01 (75)	5,07 (66)	99,92 (39)
	срх	0,46 (9)	20,57 (89)	15,52 (130)	0,22 (8)	4,28 (40)	0,12 (8)	1,38 (26)	51,78 (42)	5,67 (56)	99,59 (71)
	sp	0 (0)	19,52 (27)	0,10 (5)	0,15 (5)	9,66 (27)	0,12 (6)	25,76 (67)	0,25 (5)	44,44 (41)	97,98 (13)
MIX2DUN2	ol	-	48,91 (32)	0,31 (4)	0,02 (5)	9,23 (20)	0,15 (10)	0,20 (11)	41,10 (29)	0,06 (1)	100,46 (43)
	орх	-	31,45 (88)	2,53 (9)	0,12 (3)	5,71 (8)	0,14 (3)	1,12 (46)	54,98 (63)	3,94 (102)	100,78 (52)
	sp	0,02 (2)	18,79 (13)	0,15 (2)	0,25 (3)	10,31 (16)		32,56 (54)	0,27 (4)	37,51 (56)	97,81 (34)
MIX2DUN1	ol	-	49,06 (26)	0,29 (7)	0,02 (6)	9,27 (27)	0,14 (6)	0,31 (8)	40,85 (39)	0,05 (3)	100,51 (48)
	орх	-	32,05 (69)	2,23 (69)	0,10 (5)	5,83 (28)	0,14 (6)	1,08 (24)	55,66 (52)	2,90 (78)	100,68 (96)
	sp	0,00 (2)	17,37 (27)	0,14 (5)	0,35 (6)	10,98 (28)	0,17 (6)	41,99 (63)	0,27 (5)	28,73 (21)	97,17 (138)
MIX1DUN3	ol	-	49,09 (36)	0,32 (6)	0,01 (2)	9,49 (26)	0,16 (7)	0,24 (9)	40,59 (51)	0,10 (3)	99,99 (75)
	орх	-	31,06 (15)	2,51 (27)	0,14 (2)	5,77 (18)	0,16 (3)	1,16 (10)	53,87 (59)	5,31 (80)	100,19 (26)
	срх	0,49 (11)	20,71 (26)	15,00 (85)	0,22 (4)	4,23 (18)	0,14 (7)	1,45 (10)	52,09 (26)	5,67 (67)	100,17 (41)
	sp	0,13 (50)	19,73 (85)	0,13 (5)	0,23 (6)	9,59 (70)	0,15 (6)	25,85 (604)		43,97 (577)	98,08 (79)
MIX1DUN2	ol	-	49,21 (26)	0,31 (6)	0,02 (5)	9,40 (28)	0,15 (6)	0,23 (8)	40,60 (39)	0,07 (5)	99,87 (19)
	орх	-	31,50 (125)	2,35 (94)	0,14 (4)	5,85 (21)	0,13 (6)	1,11 (66)	54,54 (66)	4,39 (41)	100,38 (82)
	срх	0,43 (34)	19,37 (234)	16,73 (367)	0,37 (26)	3,99 (105)	0,13 (8)	1,29 (49)	51,93 (62)	5,77 (188)	100,47 (73)
	sp	0,01 (3)	18,98 (20)	0,17 (11)	0,28 (6)	9,96 (33)	0,16 (9)	30,13 (278)	0,21 (8)	40,11 (246=	97,42 (87)
MIX1DUN1	ol	-	49,53 (36)	0,30 (9)	0,01 (2)	8,91 (25)	0,14 (6)	0,35 (7)	40,69 (39)	0,07 (3)	100,06 (52)
MIX2REF1	ol	-	49,22 (29)	0,30 (7)	0,02 (4)	9,23 (32)	0,14 (5)	0,28 (4)	40,73 (35)	0,06 (2)	100,16 (54)
	орх	-	31,85 (43)	2,34 (24)	0,10 (7)	5,66 (29)	0,13 (6)	1,28 (21)	54,73 (71)	3,78 (83)	99,95 (96)
	sp	0,00(0)	18,33 (80)	0,12 (9)	0,26 (7)	10,29 (48)	0,17 (11)	36,45 (367)	0,26 (6)	34,11 (330)	97,91 (85)
MIX2REF2	ol	-	48,99 (14)	0,29 (6)	0,01 (1)	9,50 (12)	0,13 (5)	0,16 (2)	40,80 (18)	0,06 (1)	100,35 (22)
	орх	-	31,85 (51)	1,83 (53)	0,12 (4)	5,93 (16)	0,15 (2)	0,77 (24)	54,80 (50)	4,51 (53)	100,71 (17)
	срх	0,58 (38)	18,45 (171)	17,91 (154)	0,32 (2)	3,81 (37)	0,12 (7)	1,03 (29)	51,99 (51)	5,79 (53)	100,50 (52)
	sp	0,01 (3)	20,16 (46)	0,14 (7)	0,13 (21)	9,86 (19)	0,15 (4)	23,39 (194)	0,25 (13)	45,91 (180)	98,02 (82)
MIX1REF1	ol	-	49,29 (22)	0,31 (4)	0,01 (2)	9,34 (24)	0,15 (4)	0,24 (4)	40,57 (24)	0,07 (1)	99,71 (119)
	орх	-	32,27 (70)	1,97 (109)	0,12 (7)	5,80 (34)	0,15 (7)	1,00 (59)	54,80 (77)	3,88 (94)	99,96 (99)
	sp	0,01 (2)	18,11 (34)	0,11 (2)	0,27 (5)	10,54 (21)	0,18 (4)	36,67 (220)	0,16 (5)	33,94 (205)	97,87 (80)
MIX1REF2	ol	-	48,39 (13)	0,32 (3)	0,01 (1)	9,92 (12)	0,13 (4)	0,16 (5)	40,96 (20)	0,07 (1)	100,21 (26)
	орх	-	31,06 (102)	2,45 (70)	0,15 (8)	6,05 (15)	0,13 (5)	0,86 (23)	54,67 (50)	4,60 (83)	100,25 (75)
	срх	0,41 (8)	19,34 (52)	16,81 (81)	0,34 (12)	4,18 (13)	0,12 (5)	1,24 (16)	51,66 (77)	5,90 (53)	100,37 (71)
	sp	0,01 (1)	20,10 (36)	0,14 (6)	0,20 (2)	9,65 (35)	0,14 (5)	21,63 (256)	0,24 (15)	47,89 (224)	97,91 (87)
	ol	0,01 (3)	46,97 (36)	0,30 (17)	0,02 (4)	11,81 (34)	0,17 (6)	0,09 (5)	40,54 (25)	0,08 (8)	99,86 (62)
	орх	0,08 (0)	31,46 (53)	1,57 (78)	0,28 (11)	7,20 (33)	0,15 (3)	0,57 (8)	54,81 (12)	3,87 (68)	99,73 (14)
MIX1REF3	срх	0,61 (12)	17,75 (167)	18,41 (251)	0,88 (43)	4,30 (63)	0,14 (9)	1,00 (41)	51,01 (151)	5,88 (99)	100,09 (111)
	sp	0,03 (3)	20,27 (27)	0,18 (5)	0,64 (5)	11,26 (26)	0,12 (7)	16,83 (33)	0,44 (5)	50,21 (33)	98,86 (113)
	plag	4,25 (40)	0,35 (31)	12,36 (28)	0,12 (10)	0,53 (13)	0,01 (4)	0,00 (0)	52,74 (76)	29,25 (57)	99,91 (108)
MIX3REF	ol	0,02 (6)	46,42 (39)	0,35 (15)	0,04 (6)	12,29 (34)	0,17 (6)	0,11 (13)	40,37 (26)	0,21 (38)	100,01 (70)
	орх	0,14 (21)	30,23 (279)	2,04 (141)	0,29 (9)	7,44 (16)	0,16 (9)	0,57 (23)	54,13 (122)	4,97 (203)	100,16 (40)
	срх	0,56 (17)	17,78 (46)	17,90 (55)	0,78 (12)	4,74 (25)	0,16 (8)	0,99 (29)	51,03 (37)	6,06 (47)	100,04 (1,00)
	sp	0,01 (2)	18,55 (110)	0,16 (9)	0,48 (8)	12,31 (17)	0,15 (9)	22,76 (53)	0,50 (33)	45,09 (135)	98,69 (113)
	plag	3,97 (37)	0,28 (11)	13,01 (54)	0,09 (12)	0,51 (18)	0,01 (3)	0,02 (5)	52,19 (75)	29,68 (72)	100,35 (69)
		·		•				•	·		·

^a Toutes les compositions sont normalisées à 100% et l'erreur correspond au maximum entre deux fois l'écarttype et l'erreur analytique (Annexe A); ^b Les totaux exprimés sont les totaux analytiques

III.3) Séries MIX : expériences de focalisation du magma

a) Série MIX2 : facteur de focalisation Ω =3

i) Textures et équilibres de phase

Les fractions modales des phases sont données dans le tableau 2 et la figure 13 et la figure 12 illustre l'évolution texturale de la série.

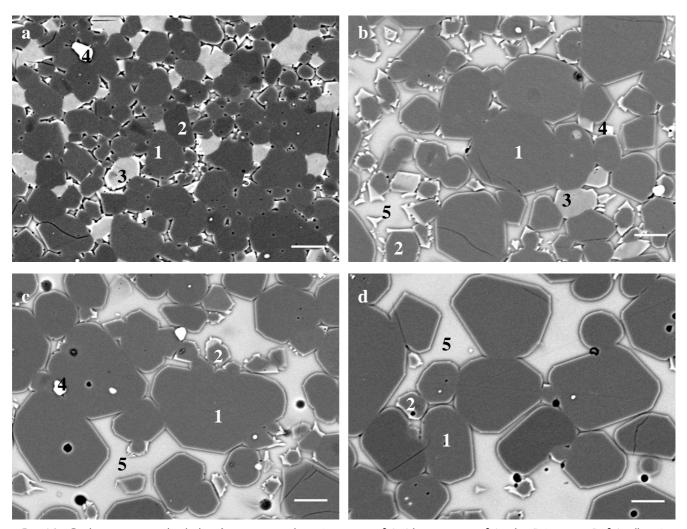


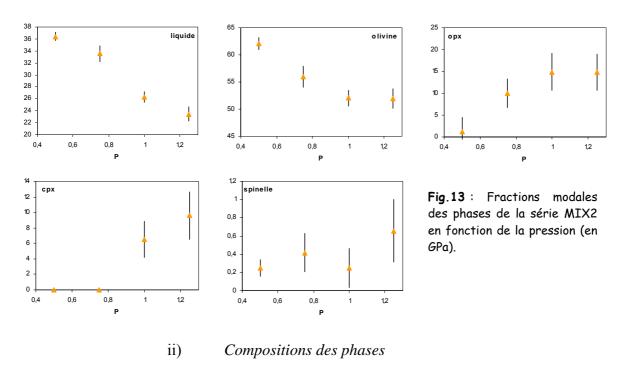
Fig.12: Evolution texturale de la série MIX2: a) 1.25 GPa, 1310°C; b) 1 GPa, 1290°C; c) 0.75 GPa, 1270°C; d) 0.5 GPa, 1250°C (1-olivine, 2-opx, 3-cpx, 4-spinelle, 5-verre). Barre d'échelle: 10 μ m.

Les mêmes domaines que dans la série DUN, sans focalisation du liquide, sont distinguables :

- Jusqu'à 1 GPa, le cpx est présent et l'assemblage à l'équilibre est donc liquide + olivine + opx + cpx + spinelle. La principale différence avec la série DUN concerne la fraction modale de ces différentes phases : la fraction de cpx est par exemple plus grande dans l'échantillon MIX2DUN3 que dans DUN2 qui ont pourtant été portés aux mêmes conditions de pression et de température. Inversement, la fraction d'opx est plus faible. Ces deux exemples attestent du rôle joué par la modification de la composition initiale du système induite par la focalisation du liquide.

- Entre 0.75 et 0.5 GPa, l'assemblage à l'équilibre est liquide + olivine + opx + spinelle. Le cpx n'est présent que sous forme de surcroissance de trempe.

L'évolution de la fraction modale du spinelle n'est pas régulière en fonction de la pression contrairement aux autres phases. En effet au lieu de diminuer avec la chute de pression et l'augmentation du taux de fusion, comme le prévoit la théorie (Asimw & al., 2001) et comme observée dans la série DUN, elle ré-augmente entre 1 et 0.75 GPa de 0.25 à 0.45% (Tabl.2 et Fig.13) mais vu l'erreur sur sa fraction, cette évolution n'est pas significative. Nous pouvons également noter que l'opx voit tout d'abord sa fraction modale augmenter entre 1.25 et 1 GPa avant de diminuer sur le reste du trajet (Fig.13). Une légère sous-estimation de SiO₂ à la microsonde peut expliquer les pourcentages pondéraux anormaux de l'expérience à 1 GPa.



Composition du liquide: Les compositions des différents verres sont données dans le tableau 3 et les évolutions sont reportées en fonction de la pression dans la figure 14. Comme dans le cas de la série DUN, avec la chute de pression, TiO₂, K₂O, MgO, FeO et Na₂O diminuent (MgO de 11.4 à 10%, Na₂O de 2.8 à 2%, K₂O de 0.5 à 0.34%, TiO₂ de 0.84 à 0.64% et FeO de 7.2 à 5.9%) tandis que SiO₂ et Cr₂O₃ augmentent (de 49 et 0.12% à 53 et 0.31%). CaO a un spectre de concentration concave avec un pic de 12.2% à 0.75 GPa cohérent avec la disparition du cpx. Enfin, Al₂O₃ montre tout d'abord une légère augmentation de sa concentration entre 1.25 et 1 GPa, puis elle diminue entre 1 et 0.75 GPa pour ré-augmenter jusqu'à 0.5 GPa. Cette dernière observation est cohérente avec l'évolution de la fraction modale du spinelle (Fig.13).

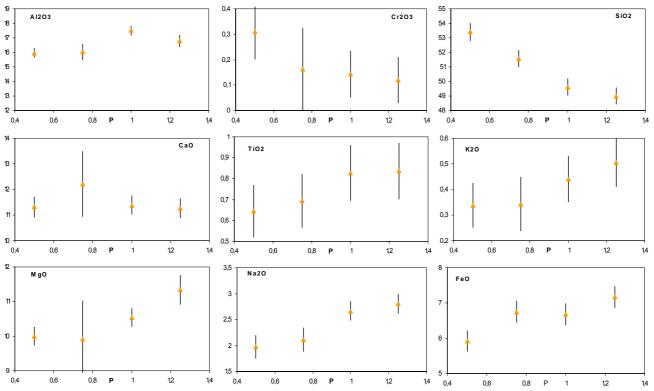
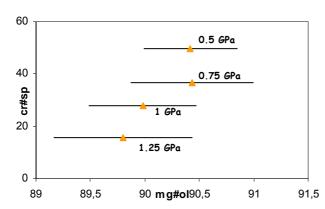


Fig.14: Moyennes des concentrations d'oxydes dans le verre de la série MIX2 en fonction de la pression (GPa).

Compositions des phases solides :



Les phases solides, quelles qu'elles soient, sont relativement homogènes dans un même échantillon. Avec la diminution de la pression, on observe une très légère augmentation du mg# de l'olivine (de 89.8 à 90.4) et de l'opx, et surtout une augmentation très marquée du cr# du spinelle : de 15.6 à 1.25 GPa à 49.5 à 0.5 GPa (Fig.15).

Fig.15: Evolution du cr# du spinelle vs. mg# de l'olivine. Les barres d'erreur pour le cr# ne sont pas visibles car elles sont inférieures à la taille du symbole.

b) Série MIX1 : facteur de focalisation Ω_1 =6

i) Textures et équilibres de phase

Les fractions modales des phases sont données dans le tableau 2 et la figure 17. Nous avons observé une évolution texturale très forte entre 1.25 GPa sans focalisation et 1 GPa après focalisation du liquide d'un facteur Ω_1 =6 (Fig.16a-b). Les cristaux d'olivine passent de 10 μ m en moyenne à 1.25 GPa à plus de 50 μ m de diamètre dès 1 GPa. Par contre cette évolution est beaucoup moins marquée entre 1 et 0.5 GPa (Fig.16b-d).

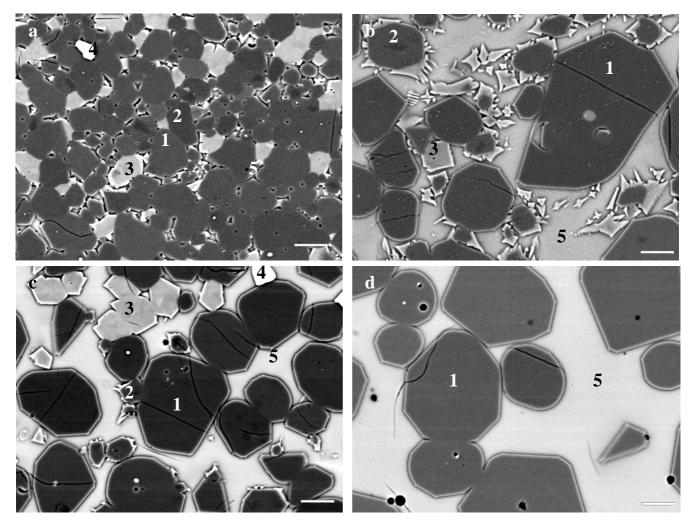


Fig.16: Evolution texturale de la série MIX1: a) 1.25 GPa, 1310°C; b) 1 GPa, 1290°C; c) 0.75 GPa, 1270°C; d) 0.5 GPa, 1250°C (1-olivine, 2-opx, 3-cpx, 4-spinelle, 5-verre). Barre d'échelle: 10 μ m.

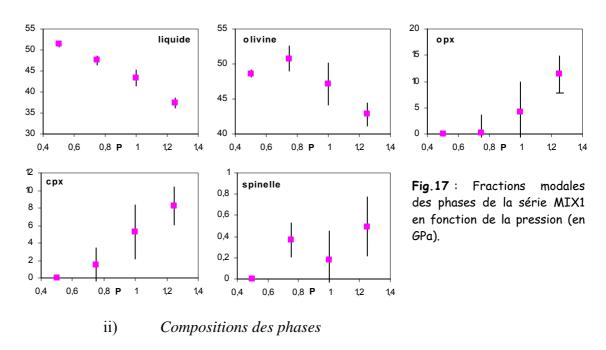
En terme de stabilité des phases plusieurs points sont à noter :

- (1) Le liquide voit sa fraction massique augmenter très régulièrement entre 1.25 et 0.5 GPa.
- (2) L'opx est présent en beaucoup plus petite quantité. En effet, entre 1.25 GPa et 1 GPa, la fraction d'opx passe de plus de 10% à ~2%.
- (3) L'olivine présente une évolution très particulière : elle a un profil de forme concave vers le haut entre 1.25 et 0.5 GPa avec un maximum à 0.75 GPa.
- (4) Le cpx est encore présent à 0.75 GPa contrairement aux autres séries.

(5) On remarque qu'une nouvelle fois l'évolution de la fraction de spinelle n'est pas régulière. L'analyse des échantillons MIX1DUN3 et MIX2DUN3 (1 GPa) ayant été faites le même jour, une légère surestimation de la teneur en Al₂O₃ dans le liquide à la microsonde peut expliquer ces évolutions.

Nous avons donc cette fois trois domaines à distinguer :

- A 1.25 GPa (1310°C, Ω=1), l'assemblage à l'équilibre est olivine + opx + cpx + spinelle + liquide. Ce dernier n'est présent qu'à l'intersection de trois grains ou à l'interface entre deux grains (Fig.16a).
- Entre 1 et 0.75 GPa, (1290-1270°C, Ω₁=6, Fig.16b-c), l'assemblage est le même mais ce sont les proportions de chaque phases qui changent et notamment, le cpx devient majoritaire devant l'opx.
- A 0.5 GPa (1250°C, Ω₁=6; Fig.16d), l'assemblage minéralogique n'est plus le même et l'on a enfin obtenu une dunite: olivine + liquide, et, comme la fraction massique de l'olivine l'atteste, on a même commencé à consommer de l'olivine dans la réaction de fusion: sa fraction passe de 51.1% à 0.75 GPa à 48.5% à 0.5 GPa.



Composition du liquide : Les compositions des verres sont données dans le tableau 3. Pour l'échantillon MIX1DUN, nous avons analysé à la fois le verre dans les microfilons et le verre interstitiel entre les grains d'olivine. En effet, les plages de liquide étant très grandes dans cet échantillon, nous avons voulu savoir si ce dernier était encore affecté par la trempe lorsque l'analyse est faite le plus loin possible des cristaux (jusqu'à 25 µm).

Entre 1.25 et 0.5 GPa, Al_2O_3 , K_2O et Na_2O diminuent avec la chute de pression : Al_2O_3 passe de 16.8 à 15.1%, K_2O de 0.5 à 0.37% et Na_2O de 2.8 à 2.2%. Cr_2O_3 augmente de 0.12 à 0.38%. Les autres éléments présentent des profils plus complexes (Fig.18) :

- SiO₂ présente un profil concave avec un maximum à 0.75 GPa de 52.1%
- CaO voit sa teneur diminuer entre 1.25 et 1 GPa, puis elle augmente entre 1 et 0.75 GPa pour atteindre un maximum de 11.2% et décroît entre 0.75 et 0.5 GPa.
- Les concentrations en MgO, FeO et TiO₂ présentent des spectres convexes vers le haut avec un minimum de 10.3, de 6.3 et de 0.70% à 1, 0.75 et 0.75 GPa

respectivement, concordants avec le début de fusion de l'olivine (entre 1 et 0.75 GPa; Fig.17).

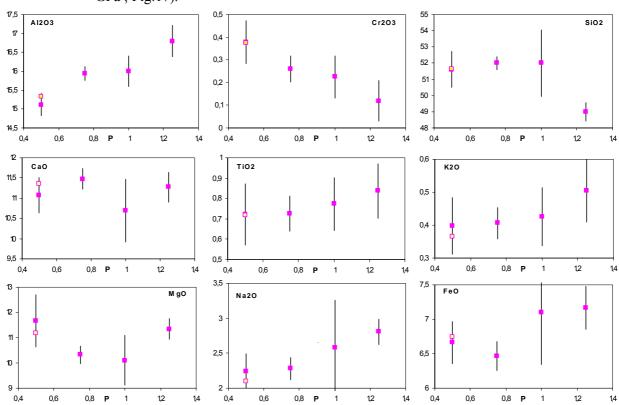


Fig.18: Moyennes des concentrations d'oxydes dans le verre de la série MIX1 en fonction de la pression (GPa). Les carrés vides correspondent aux analyses du verre interstitiel dans MIX1DUN1.

Les analyses du verre interstitiel (symbolisées par les carrés vides dans la figure 18) montrent un enrichissement en CaO et un appauvrissement en MgO mais qui ne sont pas significatifs devant l'erreur. Nous pouvons donc considérer que le liquide n'est plus affecté par la trempe.

Compositions des phases solides :

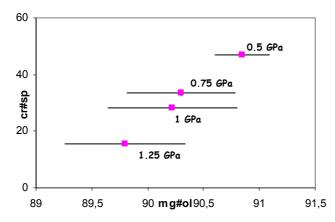


Fig.19 : Evolution du cr# du spinelle vs. mg# de l'olivine. L'erreur sur le cr#sp est inférieure à la taille du symbole

Une nouvelle fois, nous observons une nette augmentation du cr# du spinelle corrélée à une légère évolution du mg# de l'olivine (Fig.19). Les compositions de chaque phase sont données dans le tableau 4. Cependant, à la différence de la série MIX2, on observe une nette augmentation du mg# de l'olivine entre 0.75 et 0.5 GPa, c'est-à-dire lorsque l'on passe d'un assemblage lherzolitique à une dunite.

III.4) Série REF : expériences de refroidissement du magma : interaction avec la lithosphère.

Nos observations expérimentales ont permis de montrer que la focalisation du liquide mène à la formation de dunites de façon relativement rapide et augmente la stabilité du clinopyroxène. Ce dernier point n'a pas pu être véritablement étudié dans les expériences précédentes en raison de la disparition trop précoce des pyroxènes. En diminuant la température des expériences, on devrait observer cette augmentation de la stabilité du clinopyroxène plus facilement grâce à la diminution du taux de fusion et donc à la disparition plus tardive des pyroxènes. La diminution du taux de fusion devrait également avoir comme conséquence d'augmenter la teneur en fer du résidu, un des buts de cette étude étant de vérifier si les interactions entre magma ascendant et péridotites encaissantes peuvent aboutir à la formation de résidus enrichis en fer (Tommasi & al., 2004). Ces expériences peuvent correspondrent dans un cas naturel à un écart du trajet adiabatique dû à un refroidissement conductif à proximité de la surface. Les conditions expérimentales sont précisées pour chaque échantillon dans le tableau 2.

Au cours de la réalisation des expériences, j'ai noté des relations anormales entre températures et compositions modales et/ou chimiques des phases suggérant une anomalie dans la température dans certaines expériences. Pour comprendre l'origine de ce problème, j'ai calculé les températures théoriques des expériences en utilisant le géothermomètre de Ford & al. (1983). Ces calculs suggèrent un décalage d'une trentaine de degrés entre les deux pistons-cylindres du LMV. Les températures calculées sont comparées aux températures expérimentales dans le tableau 5. Il y a toujours un décalage ΔT entre ces températures (en raison des incertitudes du géothemomètre de Ford & al.) mais ce décalage est beaucoup plus maqué pour les expériences faites avec le piston-cylindre PC2 que celles réalisées avec le PC1: en moyenne 65° vs. 36°, respectivement. De plus, des vérifications du régulateur de température sur les deux piston-cylindres ont été réalisées par Didier Laporte et les premiers résultats suggèrent un décalage de 25° en moyenne entre les deux appareils. Compte tenu de des erreurs sur le calcul des taux de fusion de nos expériences et sur le décalage mesuré entre les deux régulateurs, les deux approches donnent le même ΔT. Pour circonvenir ce problème technique, on utilise le degré de fusion F à la place de la température dans les diagrammes chimiques et modaux qui suivent.

Tabl.5: comparaison entre les températures et les températures théoriques du géothermomètre de Ford & al. (1983).

	Tsum ^a	Техр	ΔT^b
dun1	1362,97	1310	52,97
dun2	1332,08	1290	42,08
mix1dun3	1317,58		27,58
mix2dun3	1325,32		35,32
dun3	1311,20	1270	41,20
mix1dun2	1312,20		42,20
mix2dun2	1286,24		16,24
dun4	1285,70	1250	35,70
mix1dun1	1305,32		55,32
mix2dun1	1278,25		28,25
mix1rev1	1338,73		88,73
mix2rev1	1332,10		82,10
mix1rev2	1289,29	1230	59,29
mix2rev2	1286,29		56,29
mix1rev3	1230,23	1170	60,23
mix3rev	1231,52		61,52

^{*} Les colonnes en gras correspondent aux expériences fait sur le PC2, les autres sur le PC1

^aTsum est calculée à partir des équilibres olivine-liquide, de la pression et des coefficients de parage des cations Mg²⁺, Fe²⁺, Mn²⁺ et Ca²⁺.

 $^{^{}b}\Delta T$ est la différence entre les températures théoriques et expérimentales.

a) Série MIX2: facteur de focalisation Ω_2 =3

i) Textures et équilibres de phase

La figure 20 montre l'évolution texturale de la série en fonction du taux de fusion. On voit nettement l'augmentation de la stabilité du clinopyroxène avec la diminution de température.

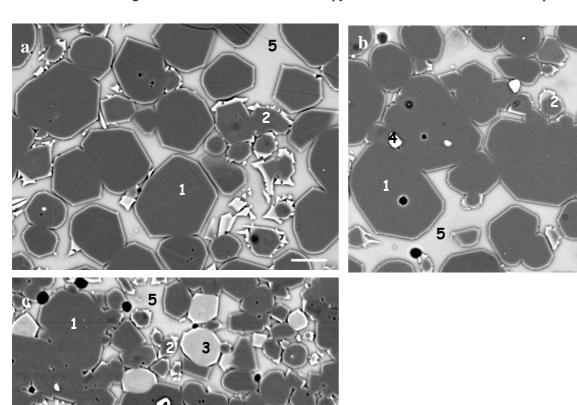
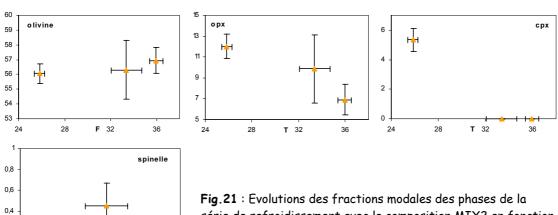


Fig.20: Evolution texturale de la série de refroidissement MIX2 à 0.75 GPa:a) MIX2REV1: F=36wt%; b) MIX2DUN2: F=33wt%; c) MIX2REV2: F=25.8wt% (1-olivine, 2-opx, 3-cpx, 4-spinelle, 5-verre). Barre d'échelle: 10 μ m.



0,2

série de refroidissement avec la composition MIX2 en fonction du taux de fusion F (wt%).

ii) Composition du liquide

Les compositions des verres sont données dans le tableau 3. La figure 22 présente l'évolution de la concentration des différents oxydes dans le liquide en fonction du taux de fusion. Les concentrations en MgO et Cr_2O_3 diminuent avec la chute de température de 11.7 à 8% et de 0.3 à 0.1% respectivement. Na₂O, K_2O , TiO_2 et Al_2O_3 augmentent de 2.1 à 2.9%, de 0.3 à 0.4%, de 0.65 à 0.75% et de 15.3 à 18.1%. CaO et FeO présentent des profils concaves vers le haut avec des pic respectivement à 12.1 et 6.9%. Enfin SiO_2 présente un profil globalement plat avec une valeur moyenne de 51.5%.

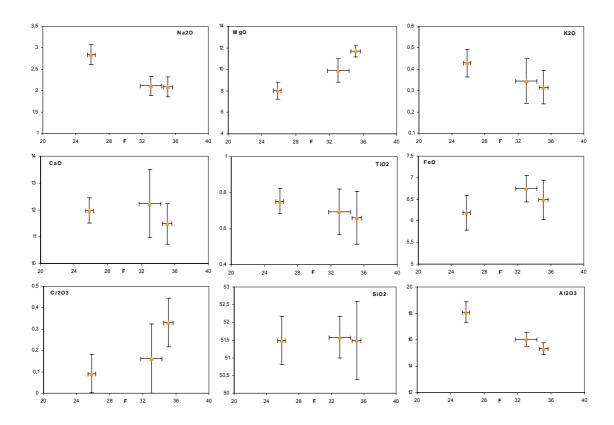


Fig.22 : Moyennes des concentrations d'oxydes dans le verre de la série de refroidissement avec la composition MIX2 en fonction du taux de fusion F (wt%).

b) Série MIX1: facteur de focalisation Ω_1 =6

i) Textures et équilibres de phase

La figure 23 montre l'évolution texturale de la série. Le cpx qui est absent au départ voit sa fraction modale augmenter rapidement tandis que l'opx reste au début qu'une phases accessoire (<1%). L'augmentation du champ de stabilité du clinopyroxène est encore plus marquée ici et la fraction de cpx devient deux fois plus importante que celle de l'opx à basse température (Fig.24). A 1170°C (MIX1REV3) le liquide a presque disparu et on observe également la cristallisation d'une nouvelle phase : plagioclase (Fig.23d).

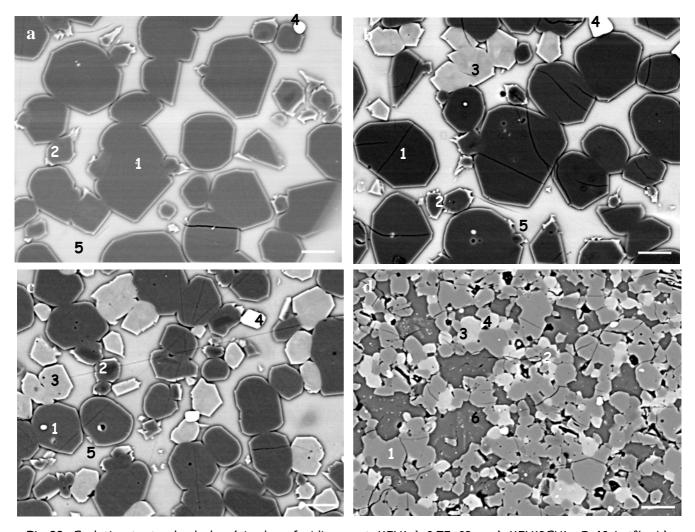
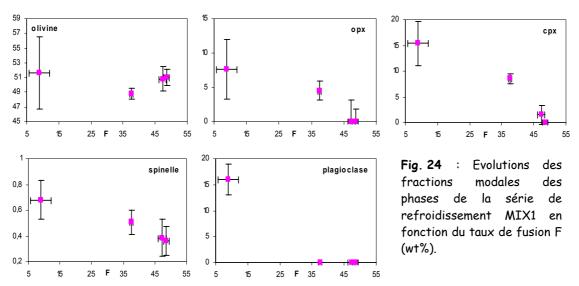


Fig.23 : Evolution texturale de la série de refroidissement MIX1 à 0.75 GPa: a) MIX1REV1 : F=48.6wt% ; b) MIX1DUN2 : F=47.5% ; c) MIX1REV2 : F=37.6% ; d) MIX1REV3 : F=9% (1-olivine, 2-opx, 3-cpx, 4-spinelle, 5-verre, 6-plagioclase). Barre d'échelle : 10 μ m.



ii) Composition du liquide

Les compositions des verres sont données dans le tableau 3. La figure 25 présente l'évolution de la concentration des différents oxydes dans le liquide en fonction du taux de fusion.

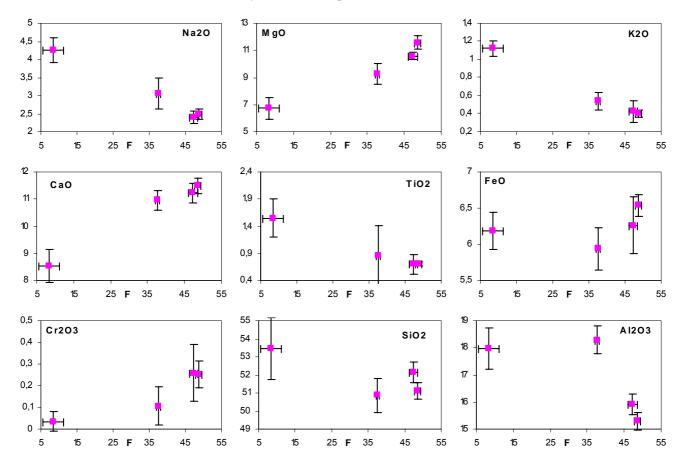
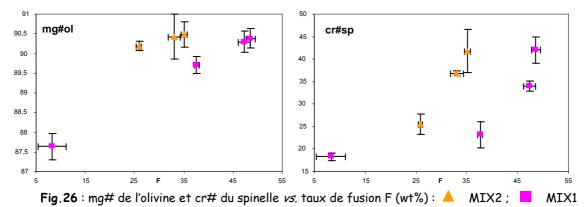


Fig.25 : Moyennes des concentrations d'oxydes dans le verre de la série de refroidissement MIX1 en fonction du taux de fusion F (wt%)

Les évolutions sont globalement les mêmes que pour la série MIX2 mais les tendances sont plus marquées. Quatre éléments cependant présentent des évolutions différentes. Al₂O₃ présente un profil concave vers le haut dû à la cristallisation de plagioclase. SiO₂ présente globalement un profil convexe vers le haut avec un minimum à 50% aux alentours de 30% de fusion. Cette tendance coïncide bien avec une augmentation du taux de fusion partielle (Laporte & al., 2004) à basse pression avec à basse température des liquides à l'équilibre avec du plagioclase (MIX1REV3, F=9%). L'augmentation de la teneur en silice à haute température est plus importante que dans le cas d'une fusion partielle de péridotite. Ceci est sans doute à cause de la stabilité plus importante de cpx par rapport à l'opx (inversement, lors d'une fusion partielle de péridotite on déstabilise beaucoup plus le cpx que l'opx). Enfin, FeO, qui présentait un profil concave vers le haut dans la série MIX2, présente un profil convexe vers le haut (minimum à 36% de fusion).

c) <u>Influences sur les compositions chimiques des phases</u>

La figure 26 présente le mg# de l'olivine et le cr# du spinelle pour les deux séries MIX2 et MIX1 en fonction du taux de fusion. On observe que l'évolution du mg# de l'olivine est directement proportionnelle au taux de fusion alors que le cr# du spinelle augmente beaucoup plus rapidement avec le taux de fusion. On observe également que l'évolution du mg# de l'olivine est plus marquée dans le cas de la série MIX1 et tend donc à montrer que la focalisation tend à enrichir les résidus en fer. Néanmoins, cet enrichissement est limité (mg#olivine=87.6 à F=9%).



d) Focalisation et refroidissement

Afin de confirmer nos évolutions, nous avons cherché à savoir quel est l'effet d'une forte focalisation soumis à un fort refroidissement. En plus de l'expérience MIX1REF3 (Ω =6), nous avons fait une seconde expérience à 1170°C et 0.75 GPa : MIX3REF avec Ω =11 (Tabl.2-4). La figure 27 illustre l'évolution texturale de ces deux expériences.

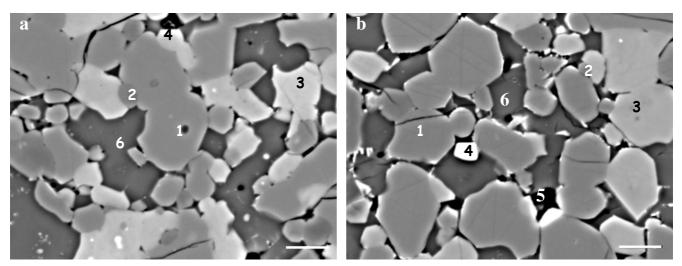


Fig.27: Evolution texturale à 1170°C et 0.75 GPa en fonction de la focalisation : a) MIX1REF3: Ω =6; b) MIX3REF: Ω =11 (1-olivine, 2-opx, 3-cpx, 4-spinelle, 6-plagioclase). Barre d'échelle : 5 μ m.

A 1170°C, les textures sont caractérisées par des degrés de cristallisation beaucoup plus élevé avec des tailles de cristaux plus petites. Le liquide n'est présent qu'à l'intersection de trois grains ou à l'interface entre deux grains. L'assemblage à l'équilibre est le même pour les deux expériences (Ω =6 et 11) : liquide + olivine + cpx + spinelle + plagioclase ± opx. Les quantités de plagioclase et de cpx

augmentent avec la focalisation tandis que les quantités d'opx et de spinelle ainsi que d'olivine diminuent malgré l'augmentation du taux de fusion (9 \rightarrow 12.2%). L'opx dans l'expérience à Ω =11 est devenu une phases accessoire (<1%).

Les assemblages minéralogiques sont très calciques et enrichis en fer et le sont d'autant plus que le facteur de focalisation est grand. Néanmoins, la différence entre les mg# de l'olivine pour Ω =6 et Ω =11 est faible. On atteint un mg# d'olivine de 87.6 pour Ω =6 et de 87 pour Ω =11 (Tabl.3).

Le liquide montre une évolution vers des teneurs plus pauvres en fer, magnésium et calcium, plus riche en sodium, potassium, titane, chrome et silice et son mg# est constant.

IV. Calculs pMELTS

Afin de tester la validité de nos résultats et d'extrapoler nos données à des facteurs de focalisation beaucoup plus élevés, nous les avons comparés aux prévisions du programme pMELTS (Ghiorso & al., 2002).

pMELTS est un algorithme thermodynamique basé sur des données expérimentales permettant de calculer des assemblages minéralogiques à l'équilibre le long d'un trajet thermodynamique (Ghiorso & Sack, 1995). Contrairement aux modèles empiriques, de Langmuir et al. (1995) par exemple, il prend en compte les changements de proportions des phases dans la minéralogie résiduelle de la source et les variations de la productivité qui en découlent ainsi que la conservation de l'énergie. Ce logiciel va nous permettre d'extrapoler nos données et de faire varier rapidement les principaux paramètres (P, T, Ω) .

Il faut savoir que, malgré les améliorations qui sont périodiquement apportées, le programme n'est pas « parfait ». Par exemple, dans les calculs de fusion mantellique, le programme sous-estime le degré de fusion à une température donné ; de même, en présence de Cr_2O_3 , le spinelle reste stable a des températures très supérieures à la limite de stabilité déterminée expérimentalement. Enfin, la fO_2 a dans pMELTS une très forte influence sur les compositions chimiques des phases issues de la fusion mantellique. Dans les conditions mantelliques et dans nos expériences, la fO_2 se situe entre FQM-1 (Fayalite-Quartz-Magnétite) et FQM-2 (Christie & al., 1986 ; Laporte & al., 2004). Or les compositions chimiques obtenues avec pMELTS pour cet interval de fO_2 sont totalement fausses. La figure 28 donne, par exemple les teneurs en silice, fer et magnésium dans le liquide pour une fusion partielle de péridotite de composition MBK. On voit nettement que es teneur en MgO et FeO sont largement surestimé et inversement que la concentration en SiO₂ est sous-estimée.

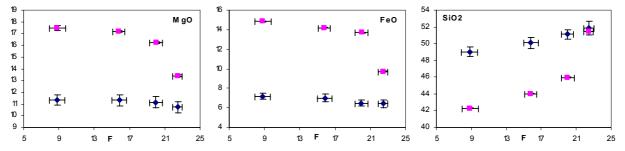


Fig.28 : Concentrations en MgO, FeO et SiO_2 dans le liquide en fonction du taux de fusion pour nos expériences (*) et selon pMELTS (•) avec une FO_2 = FQM-1

IV.1) Conditions initiales et procédure numérique

Pour le calcul des phases (paragenèse, mode et composition chimique) dans une expérience réalisée à une pression P et une température T, on a utilisé le mode isobare du logiciel et suivi une démarche en trois temps :

- 1) on a défini la composition globale du système, la pression et la fugacité d'oxygène (nous avons donc choisis FQM dans la suite de nos calculs afin de ne pas trop s'éloigner des conditions mantelliques et d'obtenir des résultats cohérents);
- 2) puis on a calculé l'état du système sur la gamme de température entre le liquidus et le solidus ;
- 3) enfin, comme les températures théoriques ne sont pas directement comparables aux valeurs expérimentales, on a utilisé le taux de fusion comme base de comparaison en

retenant les résultats du calcul correspondant au degré de fusion mesuré dans l'expérience.

Nous avons également utilisé le programme pour extrapoler les résultats expérimentaux à des facteur de focalisation de 11 et 21 (fixés arbitrairement) et jusqu'aux températures de solidus. Ne connaissant pas les taux de fusion correspondant à ces facteurs de focalisation, nous avons fixé la température correspondant au calcul avec le facteur de focalisation de 6.

IV.2) Résultats

a) Fusion partielle d'une péridotite de composition MBK

i) Proportions de phases

La figure 29 donne les proportions des phases solides en fonction de la faction de liquide dans nos expériences et les calculs de pMELTS. On observe nettement que pMELTS surestime fortement la fraction modale du spinelle et note une légère surestimation des pyroxènes aux dépend de l'olivine par rapport à nos expériences. Enfin, le champ de stabilité du cpx est plus grand que dans nos expériences et qui permet la conservation d'un assemblage lherzolitique jusqu'à 0.5 GPa.

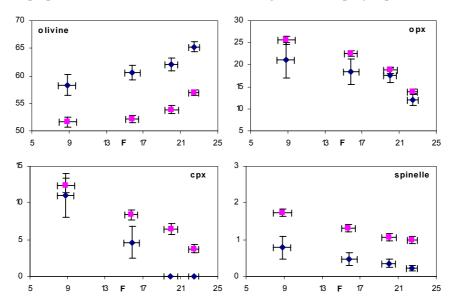


Fig.29 : Fractions modales des phases solides en fonction du taux de fusion F dans nos expériences (\bullet) et dans pMELTS (\blacksquare).

ii) Composition du liquide

La figure 30 donne les concentrations moyennes des différents oxydes dans le liquide en fonction du taux de fusion dans nos expériences et selon pMELTS. Nous observons que pour les éléments incompatibles tels que K_2O , Na_2O et TiO_2 les évolutions sont tout à fait concordantes. Pour les autres éléments, seul Cr_2O_3 montre une évolution très différente (problème de stabilité du spinelle) dans les deux approches : il augmente avec la chute de pression dans nos expériences alors qu'il diminue faiblement dans pMELTS. Les autres éléments montrent les mêmes tendances. Néanmoins, FeO et MgO sont surestimés et Al_2O_3 et SiO_2 sont sous-estimés. Ceci est en accord avec l'étude

d'Asimow & Stolper (1999) qui montre que l'opx est surestimé par rapport à l'olivine, ce qui aboutit à une surestimation de la teneur en MgO dans le liquide et une sous-estimation de la silice. Les mêmes observations peuvent être faites sur la sur-stabilité du cpx et la teneur en CaO.

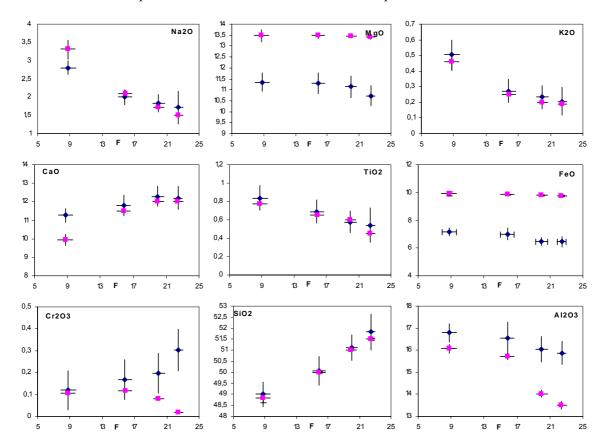


Fig.30: Moyennes des concentrations des différents oxydes dans le liquide en fonction du taux de fusion F dans nos expériences (*) et dans pMELTS(*).

iii) Compositions des phases solides

La figure 31 donne les mg# de l'olivine et de l'opx et le cr# du spinelle en fonction du taux de fusion pour les deux approches.

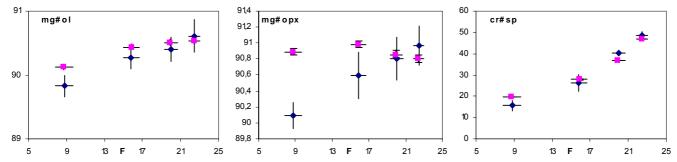


Fig.31: Evolutions des mg# de l'olivine et de l'opx et du cr# du spinelle en fonction du taux de fusion F dans nos expériences (♦) et selon pMELTS(■)

Pour l'olivine et le spinelle les évolutions sont assez cohérentes. Néanmoins, l'évolution du mg# de l'opx selon pMELTS n'est pas approprié à l'augmentation du degré de fusion partielle. En effet, pMELTS propose un profil concave vers le haut tandis que les expériences une nette

augmentation du mg# avec le taux de fusion. Ces résultats sont donc à prendre avec précautions. De plus, les gammes de variations sont plus faibles dans les calculs que dans nos expériences (contrairement aux tendances observées pour la composition du liquide).

b) Focalisation du magma

i) Proportions de phases :

Dans nos expériences, à 0.5 GPa, nous obtenons des dunites à partir de Ω =6. Pour des facteurs de focalisation plus faibles nous avons des harzburgites (opx + olivine + spinelle). pMELTS ne propose pas les même assemblages. Comme nous l'avons vu précédemment, à 0.5 GPa sans focalisation et jusqu' à Ω =3, il conserve un assemblage lherzolitique (olivine + opx + cpx + sp) mais une dunite est néanmoins obtenue à Ω =6. Enfin, le spinelle reste présent dans les dunites selon pMELTS contrairement à nous.

ii) Composition du liquide

La figure 32 donne l'évolution de la composition du liquide en fonction du taux de fusion à 0.5 GPa pour des facteurs de focalisation de 1, 3, et 6 dans nos expériences et de 1, 3, 6, 11 et 21 selon pMELTS.

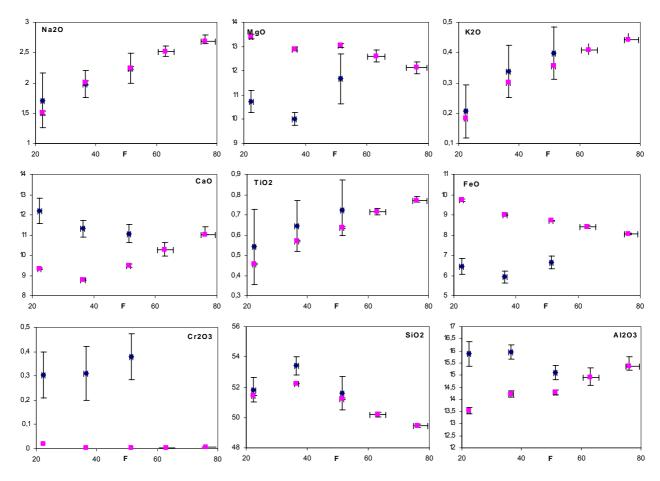


Fig.32 : Moyennes des concentrations des différents oxydes dans le liquide dans nos expériences (◆) pour des facteurs de focalisation de 1 à 6 et selon pMELTS (■) pour des facteurs de 1 à 21, en fonction du taux de fusion F.

Une nouvelle fois, pour K₂O, TiO₂, Na₂O et SiO₂, les évolutions sont tout à fait concordantes. Dans nos expériences nous avons associé la forme « en cloche » du profil de SiO₂ à la disparition de l'opx et le changement de régime de fusion. La même interprétation peut être faite pour pMELTS mais avec la disparition de l'opx et du cpx. Les autres éléments (MgO, FeO, CaO et Al₂O₃) montrent globalement la même évolution mais les concentrations sont encore différentes. Le Cr₂O₃ est encore extrêmement sous-estimé dans pMELTS car il est considéré par le logiciel comme un élément totalement compatible, ce qui explique la surstabilité des spinelles.

iii) Compositions des phases solides

La figure 33 donne le mg# de l'olivine et le cr# du spinelle en fonction du taux de fusion pour les deux approches. Les évolutions coı̈ncident assez bien Après Ω =6, le mg# de l'olivine tend à diminuer (comme celui du liquide) mais les valeurs restent relativement élevées (>90). Le cr# du spinelle chute significativement malgré l'augmentation du taux de fusion montrant l'effet de la modification de la de la composition du système.

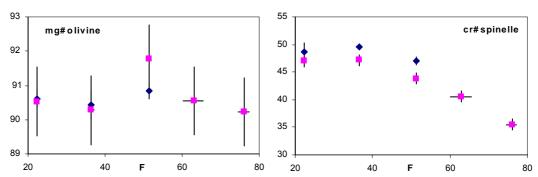


Fig.33: Evolutions du mg# de l'olivine et du cr# du spinelle en fonction du taux de fusion F: expériences (\blacklozenge) et pMELTS (\blacksquare)

c) Refroidissement de la lithosphère

i) Proportions de phases :

Nous allons comparer nos donnée expérimentales pour Ω =6. Nous avons pu observer que lors du refroidissement, le système cristallise plus de cpx que d'opx. A 1170°C, cette évolution se confirme et on a deux fois plus de cpx que d'opx. Enfin, le système cristallise également du plagioclase dans les mêmes proportions que le cpx, ce qui permet de qualifier cette roche de gabbro noritique.

pMELTS propose une évolution de la proportion des phases similaires à nos expériences. Les deux approches diffèrent surtout pour l'opx qui ne cristallise dans pMELTS uniquement en l'absence de liquide.

ii) Composition du liquide

La figure 34 donne la composition du liquide dans nos expériences et selon pMELTS, pour le mélange MIX1, en fonction du taux de fusion. La concordance entre les deux approches est encore une fois relativement juste mais les tendances sont toujours plus marquées dans pMELTS, notamment à basse température.

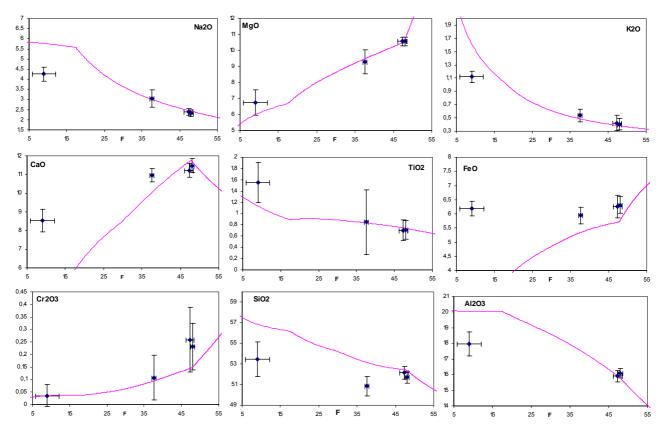
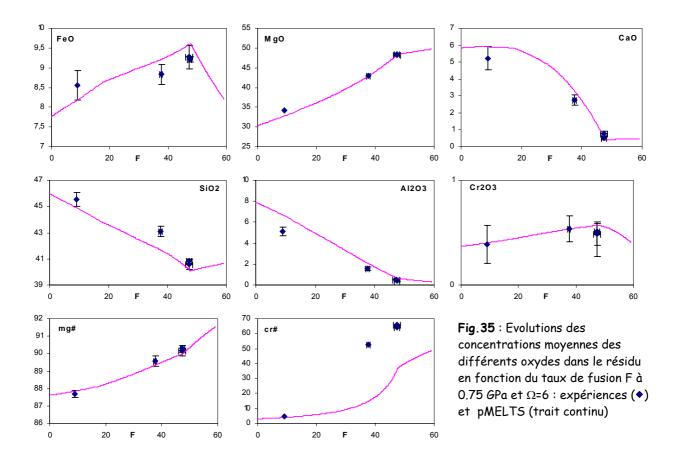


Fig.34: Evolutions des concentrations moyennes des différents oxydes dans le liquide en fonction du taux de fusion (wt%) à 0.75 GPa: expériences (*) et pMELTS (trait continu)

Cette figure montre également la bonne corrélation avec l'assemblage minéralogique entre les deux approches car la première rupture de pente (pour F=47%) correspond au début de cristallisation du clinopyroxène, et la seconde correspond (F=17%) au plagioclase.

iii) Composition du résidu :

Nous avons cherché à extrapoler nos données afin de vérifier s'il est possible d'obtenir des résidus fortement enrichis en fer. La figure 35 donne les concentrations des principaux oxydes dans le résidu calculé pour pMELTS et obtenues dans nos expériences ainsi que le mg# et le cr#. On observe que celui-ci à tendance à s'appauvrir en fer, magnésium et chrome et à s'enrichir en calcium, aluminium et silice avec la chute de température. Ceci est directement corrélé à l'augmentation des phases telles que le plagioclase et le cpx. En outre, on voit que les valeurs du mg# du résidu ne sont jamais inférieure à 87. Même au solidus, l'enrichissement en fer est donc limité.

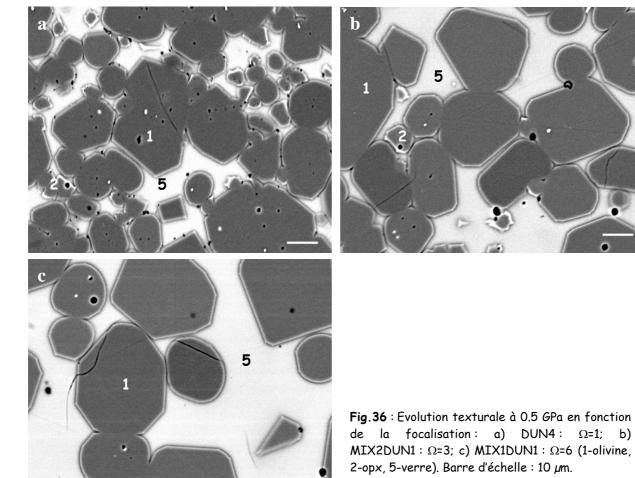


V. Discussion et implications pétrologiques

V.1) Focalisation: une explication de la composition des MORB?

La fusion partielle d'une péridotite entraîne une augmentation des mg# du liquide et des phases solides. Si le taux de fusion est suffisant pour créer une harzburgite, la teneur en CaO du liquide et des phases solides restantes diminue par dilution à partir de la disparition du cpx. Au contraire, la focalisation minimise l'enrichissement en magnésium des phases. Dans nos expériences il y a donc compétition entre trois paramètres : la pression qui tend à diminuer la teneur en fer des phases lorsque le magma remonte vers la surface (Langmuir & al., 1992), le taux de fusion qui tend à augmenter la teneur en magnésium et la focalisation qui tend à la diminuer.

La figure 36 donne l'évolution texturale et la figure 37, les fractions modales des phases à 0.5 GPa en fonction de la focalisation. L'olivine et le liquide évoluent très régulièrement en fonction de la focalisation. Le liquide montre même une évolution quasi linéaire ($R^2>0.99$). L'évolution de la fraction modale de l'olivine est moins linéaire mais nous avons observé qu'à 0.5 GPa et $\Omega=6$, l'olivine a déjà commencé à fondre (Fig.17). L'opx et le spinelle montrent des évolutions beaucoup plus courbes. L'opx voit sa fraction modale chuter entre $\Omega=1$ et $\Omega=3$ (elle passe de ~12% à ~1%) jusqu'à sa disparition à $\Omega=6$. La fraction modale du spinelle diminue également mais plus doucement. Ces observations mettent l'accent sur le rôle de la focalisation sur l'opx qui tend à diminuer sa stabilité.



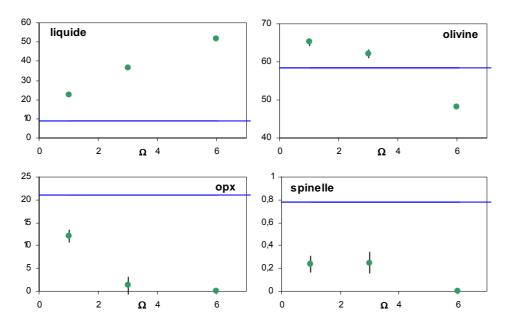


Fig. 37 : Fractions modales des phases en fonction de la focalisation Ω à 0.5 GPa (\bullet). Le trait continu montre la fraction à 1.25 GPa avant la focalisation.

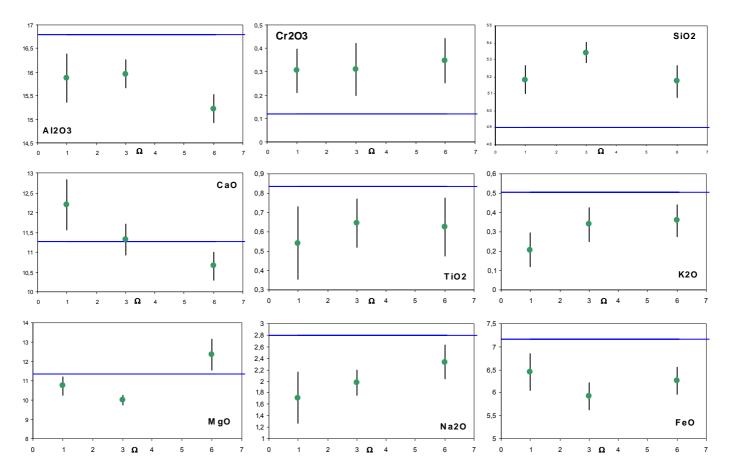


Fig.38 : Moyennes des concentrations des différents oxydes dans le liquide à 0.5 GPa en fonction de la focalisation (\bullet) Le trait continu représente la composition de référence du liquide, c'est-à-dire la composition avant focalisation dans l'expérience DUN1 à 1.25 GPa/1310°C

La figure 38 nous permet d'évaluer l'effet de la focalisation sur la composition des liquides magmatiques. En effet, selon notre modèle, les liquides qui arrivent en surface sont ceux équilibrés à 0.5 GPa et non le liquide primaire au moment de la focalisation à 1.25 GPa (Fig.3). L'allure des évolutions de SiO₂, MgO et FeO à 0.5 GPa en fonction de la focalisation (respectivement, concave, convexe et convexe vers le haut) est due à la formation de dunite pour Ω =6 où l'on change de réaction de fusion : olivine (\pm spinelle) \rightarrow liquide. Si l'on compare la composition du liquide primaire à 1.25 GPa et la composition des liquides extraits à 0.5 GPa, on note une nette augmentation de la teneur en Cr₂O₃ et SiO₂ entre 1.25 et 0.5 GPa et une diminution de la teneur en Al₂O₃, TiO₂, K₂O, Na₂O, MgO et FeO. Néanmoins, les teneurs en TiO₂, K₂O et Na₂O tendent à converger vers la concentration du liquide primaire (1.25 GPa, Ω =1) lorsque la focalisation augmente. Au contraire Al₂O₃ tend à s'éloigner de la composition du magma primaire. Il en est de même pour SiO₂, MgO et FeO tant que l'on n'a pas formé de dunite, après quoi les teneurs en magnésium et en fer augmentent et la teneur en silice diminue par fusion de l'olivine.

Nous avons donc mis en évidence l'effet de la focalisation sur la composition des liquides basaltiques et notamment sur les teneurs en Al_2O_3 , SiO_2 , FeO et MgO ainsi que sur le mg# du liquide.

- Sous le régime de fusion opx ± cpx ± spinelle → olivine + liquide, Al₂O₃, FeO et MgO diminuent et SiO₂ augmente avec la focalisation. Le mg# du liquide quant à lui reste globalement constant.
- Sous le régime olivine (± spinelle) → liquide (lorsque l'on a formé des dunites), FeO et MgO augmentent et SiO₂ diminue; le mg# du liquide augmente fortement et s'éloigne de la valeur initiale.

a) Liquides primaires d'une péridotite vs. MORB

Il est maintenant admis par beaucoup d'auteurs que les MORB sont formés par fusion intégrée à savoir, la fusion se produit sur une large gamme de profondeurs qu'on appelle « colonne de fusion » avec un taux de fusion moyen aux alentours de 10% (Langmuir & al., 1992, Fig.39).

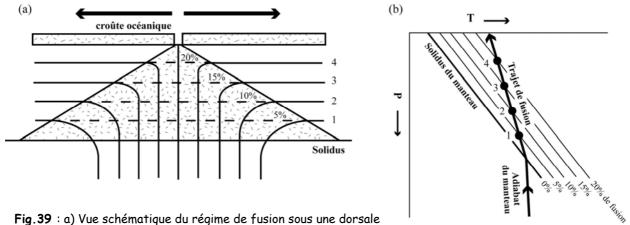


Fig.39: a) Vue schématique du régime de fusion sous une dorsale médio-océanique résultant de la remontée passive du manteau en réponse à l'expansion. Les lignes pleines représentent le flux mantellique, la région en tiretés, la zone de fusion; b) Schéma d'un trajet P-T pour une remontée adiabatique du manteau. Langmuir & al. (1992)

Or Stolper (1980) a montré que même les MORB les plus primitifs n'ont pas les compositions attendues pour des magmas primaires de péridotites c'est-à-dire pour des liquides saturés en olivine-opx ou en olivine-opx-cpx à basse pression : ils sont systématiquement sous-saturés en opx et significativement trop riche en composant diopside (Fig.40) et sont à l'équilibre avec olivine (\pm cpx \pm plagioclase).

Différentes études ont visé à comprendre l'origine de ce décalage entre les MORB primitifs et les compositions des magmas primaires du manteau. Stolper (1980) explique ce décalage par le fractionnement de l'olivine, en raison du refroidissement lors de la remontée du liquide, qui voit son volume liquidus augmenter dans le tétraèdre plagioclase-diopside-silice-olivine. Asimow & Stolper (1999) proposent, eux, que la composition des MORB et notamment la sous-saturation en opx soit due à la formation de dunite en profondeur ($P \ge 0.8$ GPa).

Sur la figure 40 sont projetées nos compositions de liquides basaltiques (série DUN). Elles concordent bien avec les données expérimentales de Stolper (1980) et confirment que les MORB ne sont pas formés simplement par fusion à l'équilibre d'une colonne de manteau péridotitique. La théorie prévoit, en effet, que dans le cas de la fusion à l'équilibre, comme dans notre cas, le liquide doit être à l'équilibre avec les phases du résidu c'est-à-dire dans notre cas, de 1.25 à 1 GPa, à l'équilibre avec l'assemblage olivine + opx + cpx + spinelle, et de 0.75 à 0.5 GPa, à l'équilibre avec olivine + opx + spinelle. Ainsi, dans l'hypothèse où l'équilibre entre le liquide et le résidu péridotitique serait maintenu jusqu'à 0.5 GPa, par exemple, les MORB les plus primitifs devraient coïncider avec notre composition DUN4, ce qui n'est pas le cas.

b) Focalisation du liquide : implication pour la genèse des MORB.

Les MORB primitifs sont fortement sous-saturés en pyroxènes. Cette observation implique que les MORB ne restent pas en contact constant avec la lherzolite ou le résidu harzburgitique au cours de leur ascension. En effet, il est possible de mélanger des liquides à l'équilibre avec les pyroxènes pour produire un mélange qui n'est pas saturé en pyroxène. Cependant, si ce mélange s'établit en présence de pyroxènes, il évoluera de nouveau vers la saturation. Il est maintenant bien établi que, dans un système partiellement fondu à olivine dominante, le liquide est interconnecté et peut donc percoler pour des fractions de liquide de l'ordre de 1% (Kohlstedt, 1991). Néanmoins dans le cas d'une percolation en milieu poreux, le déplacement est relativement lent de telle sorte que l'équilibre liquide/solide est maintenu. Une simple percolation ne peut donc pas expliquer les compositions sous-saturées en opx des MORB. L'hypothèse émise par Asimow & Stolper (1999) est que la composition des MORB est contrôlée par la focalisation du magma et la formation de chenaux dunitiques de haute porosité (Figs.1-2). Nous avons donc cherché à savoir si une focalisation du liquide modifie suffisamment la composition des liquides pour expliquer les compositions des MORB et, si tel est le cas, quel rapport magma/roche est nécessaire.

Dans notre modèle, en faisant abstraction du fractionnement de basse pression, nous avons fait l'hypothèse que les liquides qui arrivent en surface sont les liquides équilibrés à 0.5 GPa (Fig.3). A cette pression, quel que soit le facteur de focalisation nous n'avons plus de cpx. Néanmoins nos expériences montrent que jusqu'à Ω =3, l'opx est encore présent. pMELTS conserve, quant à lui, un assemblage lherzolitique jusqu'à Ω =3. Ces premiers résultats semblent indiquer qu'un facteur de focalisation supérieur à trois est nécessaire pour expliquer la sous-saturation des MORB en opx mais n'expliquent pas leur forte teneur en diopside. Néanmoins, avec l'augmentation de la focalisation, le champ de stabilité du cpx augmente (il est encore présent à 0.75 GPa pour Ω ≥6) tandis que celui de

l'opx diminue. Un facteur de focalisation plus grand permettrait donc éventuellement de saturer le liquide en cpx.

Nos expériences et pMELTS (Fig.32) montrent qu'avec la focalisation, les concentrations en Na₂O, K₂O, TiO₂ augmentent. Les évolutions des autres éléments sont plus compliquées. Trois phénomènes entre en jeu successivement : 1) la dissolution de pyroxènes pour de faibles facteurs de focalisation, 2) la formation de dunite et le changement de régime de fusion, et 3) un phénomène de « dyking » pour des forts facteurs de focalisation où le rapport magma/roche est trop important et où la composition de la roche n'influe plus sur celle du liquide. En effet, si le taux de fusion est trop élevé, on aura une séparation solide-liquide et on passera d'un chenal à forte perméabilité au cas d'un filon. MgO, FeO, CaO et SiO₂ sont les éléments les plus affectés par la dissolution des pyroxènes (1). MgO, FeO et CaO diminuent et SiO₂ augmentent en raison de la dissolution de l'opx et de l'augmentation de la focalisation. Lorsque le régime de fusion change (2), au moment de la création de dunite, ces 4 éléments montrent l'évolution inverse due à la disparition de l'opx et du cpx et au début de la fusion de l'olivine comme expliqué précédemment. . Enfin, pour des facteurs de focalisation supérieurs à 6, CaO et SiO2 conservent les mêmes évolutions (leur concentrations dans le liquide augmentent et diminuent respectivement) car ils ne sont plus affectés par les phases en présence (olivine ± spinelle). Au contraire FeO et MgO « re-diminuent » malgré la fusion de l'olivine. Il semble que l'on ne soit plus dans un phénomène d'écoulement poreux mais que l'on se rapproche du phénomène de « dyking » (3). Nous devons donc nous « focaliser » sur des facteurs Ω <11, les compositions avec Ω ≥11 correspondent en effet à un taux de fusion trop important et n'ont pas de signification pétrologique dans ce modèle : nous nous trouvons en réalité dans le cas d'une remontée de magma « pure » sur un trajet adiabatique sans (ou presque) interaction chimique avec l'encaissant.

Sur la figure 40 nous avons reporté les compositions (série MIX) des liquides expérimentaux à 0.5 GPa pour Ω =3 (régime de fusion : opx \pm cpx \pm spinelle \rightarrow olivine + liquide) et pour Ω =6 (régime de fusion : olivine (\pm spinelle) \rightarrow liquide), ainsi que des compositions de liquides calculées pour des facteurs de focalisation de 11 et de 21 (Annexe C). On observe que pour un facteur de focalisation de 3, la composition du liquide tend à s'éloigner de la composition des MORB primitifs. Au contraire, pour un facteur de focalisation de 6, les liquides s'éloignent du pôle silice et « remontent » la courbe de fractionnement des MORB. On retourne vers des compositions de MORB plus primitives. Cette projection semble montrer que la formation de dunite est nécessaire pour expliquer la composition de ces MORB et l'extrapolation de nos données (MELTS) confirme ce résultat. Nous pouvons donc proposer un modèle de formation des MORB primitifs :

- La focalisation du liquide permet la création de chenaux dunitiques qui aboutit, par réaction entre ces dunites et les liquides, à des compositions de MORB primitifs ;
- le taux de fusion continue à augmenter (à cause de l'augmentation de la focalisation) et atteint une valeur critique où l'on passe d'un écoulement en milieu poreux à un filon et où la composition du liquide (*ie.* la composition des MORB primitifs) n'évolue plus.

De plus, ces deux projections (Fig.40a-b) nous permettent de contraindre le facteur de focalisation nécessaire à la formation de MORB primitifs dans notre modèle à une valeur comprise entre 6 et 11 (6 étant la valeur nécessaire pour créer des dunites et 11, la valeur pour laquelle le chenal de haute perméabilité est supposé se déstabiliser en filon), ce qui correspond au régime de fusion olivine (\pm spinelle) \rightarrow liquide.

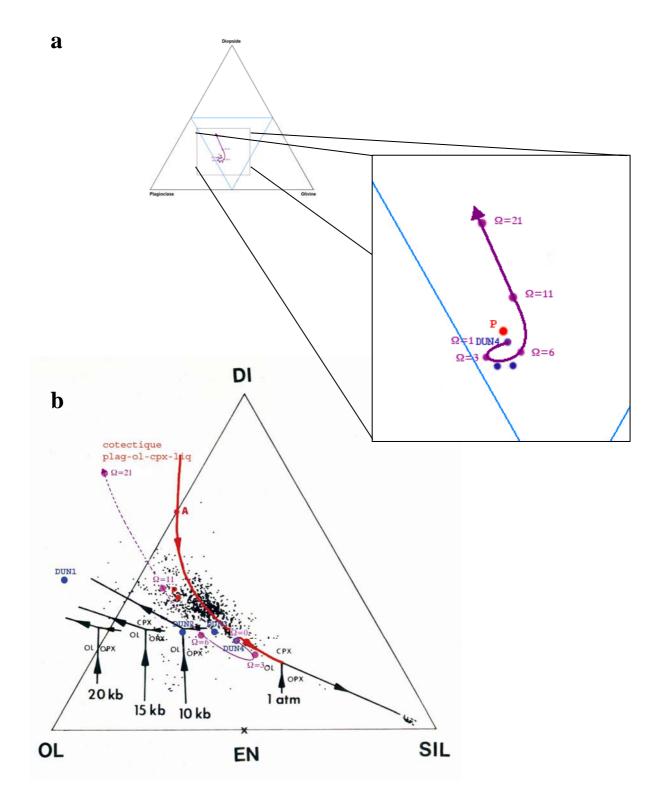


Fig.40: Compositions de 960 verres de MORB compilées par Melson & al. (1977) dont la composition P qui correspond à la composition d'un des MORB les plus primitifs (ALV-519-4-1: zone de Famous) comparés avec les limites de phases entre 0 et 20 kbar, des compositions expérimentales obtenues à partir d'une fusion adiabatique de péridotite MBK \bullet et des compositions de liquide soumis à une augmentation de la focalisation à 0.5 Gpa \bullet (Annexe C).

- a) Projection depuis le pôle silice sur le plan plagioclase-diopside-olivine (Annexe C)
- b) Projection depuis le pôle plagioclase sur le plan diopside-olivine-silice (Annexe C)

Néanmoins, contraindre le facteur de focalisation dans un cas réel est très compliqué en expérimentation en raison des nombreux paramètres physiques intervenant. Tout d'abord, nous ne prenons pas du tout en compte, dans ce modèle, le déplacement relatif du magma par rapport à l'encaissant. De plus nous considérons le cas d'une focalisation discontinue où tout le liquide est ajouté à la même profondeur or, une focalisation continue est sans doute plus réaliste et plus efficace en ce qui concerne la formation des dunites et la modification de la composition du liquide basaltique (Asimow & Stolper, 1999). Toutes ces considérations ne nous permettent pas de donner une valeur quantitative du facteur de focalisation nécessaire pour expliquer la composition des MORB mais notre étude montre que l'hypothèse de focalisation d'Asimow & Stolper (1999) est cohérente qualitativement et permet de proposer un modèle génétique quant à la formation des MORB primitifs en soulignant la nécessité de formation des dunites.

V.2) Focalisation du liquide : une explication des compositions de certains résidus mantelliques ?

L'étude théorique de la fusion partielle montre que les dunites des massifs ophiolitiques pourraient être des résidus de très haut degré de fusion (relation génétique entre lherzolite, harzburgite et dunite; Jackson & Ohnenstetter, 1981). Néanmoins, Asimow & Stolper (1999) ont montré que ceci nécessite une température potentielle de manteau excessivement haute. Un autre mécanisme a donc été proposé pour la formation de ces dunites: la focalisation. Des évidences structurales (Tommasi & al., 2004; Nicollet & al., 2001) et géochimiques (Kelemen & al., 1995; Tommasi & al.,2003) confirment cette hypothèse. Comme nous l'avons dit précédemment, il est difficile de contraindre expérimentalement le facteur de focalisation nécessaire pour former ces dunites. Néanmoins, dans notre modèle, à 0.5 GPa, le facteur de focalisation est contraint entre 6 et 11. Ceci est bien inférieur aux valeurs prévues par Asimow & Stolper (1999) qui requièrent des facteurs de focalisation de plusieurs dizaines à plusieurs centaines. Ainsi, même si certains paramètres de leur modèle tendent à retarder la formation de dunites (migration du liquide par rapport à l'encaissant, surstabilité de l'opx, sous-estimation de la température du solidus du manteau), un facteur de focalisation de plusieurs centaines paraît quelque peu « exagéré ».

En outre, nous pouvons noter que nos résultats expérimentaux sont en accord, chimiquement, avec les résultats numériques d'Asimow & Stolper (1999) et avec les études géologiques de Kelemen & al.(1995) et de Suhr & al.(2003) : le mg# des dunites résultant d'une focalisation en milieux poreux est assez élevé. Selon leurs travaux, il varie entre 90.8 et 91.9 et nous en obtenons un de 90.9 pour l'olivine des dunites (MIX1DUN1 ; Tabl.3). Nous remarquons que cette valeur de mg# n'est pas excessivement haute et reste proche des mg# d'olivine dans les péridotites issues de la fusion partielle du manteau, c'est-à-dire entre 89.8 et 90.6. Ceci est en accord avec l'étude de Kelemen & al.(1995) qui montre que les dunites de l'ophiolite d'Oman ont des mg# d'olivine proches de ceux du manteau résiduel.

Tommasi & al. (2004) ont étudié des dunites provenant de contexte complètement différent des ophiolites. Il s'agit d'une suite d'enclaves de péridotites, harzburgites, wherlites et dunites provenant de contexte géologique de points chauds (Society Islands, Rapa, îles Australes, archipel des Marquises). Ils ont obtenu des résultats très différents. Les gammes de compositions des olivines sont assez large : les mg# des olivines varient entre 86 et 91 dans les lherzolites et les harzburgites tandis que dans les dunites et les wherlites, le mg# des olivines varie de 83 à 86. Morgan & Liang (2003 ; 2005) obtiennent également des mg# d'olivine de 86 dans leurs études expérimentales de formation

des dunites. Cependant, toutes les études fournissent la même information minéralogique : dans ces dunites, le cpx (<5%) ne se présente que sous forme de grains interstitiels et l'opx est toujours absent. En outre, nous avons montré expérimentalement que l'augmentation de la focalisation du liquide tend à accroître la stabilité du cpx. Ces trois points sont en accord et confirment l'hypothèse de Tommasi & al. (2004) que les wherlites sont formées par cristallisation secondaire de clinopyroxène due à la percolation de liquide basaltique dans les dunites à basse pression, quelle que soit l'origine de la dunite (cumulative ou par dissolution-cristallisation).

Pour essayer de comprendre l'origine des faibles valeurs de mg# dans les dunites et wherlites de Tommasi & al.(2004), nous avons étudié l'effet d'un simple refroidissement après focalisation. Les expériences de la série REF ont montré que, quel que soit le facteur de focalisation (3, 6 ou 11), nous cristallisons de l'opx. Néanmoins, la fraction modale de cpx devient supérieure à celle de l'opx dans nos expériences à partir de Ω =6. Ceci confirme l'augmentation de la stabilité du cpx du liquide avec la focalisation. De plus, nous avons calculé numériquement l'effet d'un refroidissement sur le liquide afin de simuler sa cristallisation à basse pression et on observe bien une cristallisation d'olivines et de cpx et l'absence totale d'opx avec la chute de température ce qui est tout à fait cohérent avec l'étude de Tommasi & al. (2004).

Enfin, nous avons regarder l'évolution de la composition du résidu en fonction du refroidissement et montré que ce dernier n'implique pas une diminution significative du mg# du résidu (Fig.35). Il ne semble pas possible de créer des résidus notablement enrichis en fer dans un contexte de ride, même avec un facteur de focalisation relativement élevé et un refroidissement important. En effet, nous obtenons des mg# d'olivine d'environ 87 dans nos expériences à 1170° C mais cette valeur reste globalement constante entre Ω =6 et Ω =11. Ceci signifie que l'enrichissement en fer de ces résidus est surtout dû au fort refroidissement et non à la focalisation. De plus il est important de noter que dans ce cas, les résidus correspondent à des gabbros noritiques (Fig.27) et pas à des dunites. A ce stade, nous n'arrivons pas à expliquer la formation de dunites avec un mg# \leq 86 par une combinaison de focalisation et de refroidissement.

Un certain nombre de conclusions ressortent donc de cette étude :

- (1) la focalisation permet de créer des résidus dunitiques assez rapidement.
- (2) les wherlites peuvent bien être crées par cristallisation secondaire à basse pression de clinopyroxènes dans les chenaux de dunites.
- (3) la formation de dunite induit une augmentation du mg# de l'olivine mais qui reste proche des valeurs mantelliques.
- (4) un refroidissement permet d'enrichir le résidu en fer mais cet enrichissement est limité (mg#>87).
- (5) la focalisation permet à basse température de créer des assemblages minéralogiques très calciques, correspondant à des gabbros à olivine.

La focalisation ne semble donc pas avoir beaucoup d'effet sur les compositions chimiques des phases mais influe beaucoup sur les compositions minéralogiques des résidus. Elle permet donc de confirmer les hypothèses sur la formation des dunites et des wherlites en donnant une preuve expérimentale de l'effet d'une forte interaction magma-roche. Elle permet également de montrer que la focalisation d'un magma issue de la fusion d'un manteau lherzolitique à relativement basse pression ne permet pas d'enrichir le résidu significativement en fer et montre donc le rôle de la composition chimique du magma sur les variations compositionnelles du manteau. Notre étude suggère donc qu'un magma alcalin est nécessaire à la formation de ces dunites enrichies en fer, ce qui nécessite une focalisation de magma d'origine plus profonde.

VI. Conclusion

Parmi les nombreuses preuves du déséquilibre entre les MORB et le manteau résiduel, une des principales reste la sous-saturation en opx des MORB alors que l'opx est un constituant majeur des péridotites résiduelles. Il faut donc trouver un mécanisme permettant la disparition de l'opx dans l'assemblage à l'équilibre avec des MORB. Cette étude a permis de confirmer qu'une fusion partielle adiabatique « simple » d'un manteau lherzolitique ne permet pas de supprimer l'opx et a montré que la focalisation des liquides est nécessaire à sa disparition. En effet nous obtenons des dunites à partir de 0.5 GPa, pour un facteur de focalisation de 6. En outre, nos résultats expérimentaux ainsi que les simulations données par pMELTS prévoient une augmentation de la teneur en CaO du liquide magmatique pour un facteur de focalisation supérieur à 6, l'enrichissement en calcium étant une autre condition nécessaire pour expliquer la composition des MORB primitifs qui sont significativement trop riches en composant diopside par rapport aux magmas primaires du manteau. Ainsi, bien que notre modèle soit très simplifié car il ne prend pas en compte un certain nombre de paramètres physiques, nous avons pu contraindre le facteur de focalisation nécessaire à la formation de MORB primitifs, dans notre cas, à une valeur comprise entre 6 et 11. Cette étude est donc en accord avec différentes études géologiques, qui suggèrent que la composition des MORB primitifs est acquise en réponse à des interactions magma/roche au cours de l'ascension, est contrôlée par des équilibres olivine (± spinelle) → liquide. Elle renforce donc l'hypothèse que des chenaux de forte porosité constituent le moyen principal du transport des MORB sous les rides.

La seconde partie de cette étude était consacrée aux compositions chimiques et minéralogiques des résidus formés par la focalisation. En particulier il s'agissait d'établir si des résidus dunitiques ou wherlitiques très enrichis en fer (avec des mg#≤86 dans l'olivine) pouvaient être produits par interactions magma :roche comme l'ont proposé Tommasi & al.(2004). Nous avons pu montré que la focalisation peut significativement changé la composition minéralogique du résidu. Cependant, dans notre configuration expérimentale qui simule un contexte de ride, nous n'avons pas observé d'enrichissement en fer aussi marqué que celui décrit par Tommasi & al. (2004) dans les nodules/xénolites échantillonnés en contexte de points chauds. De tels enrichissement pourraient être spécifiques aux interactions magma:roche dans le cas de magma alcalins formés à haute pression. Il serait intéressant d'étudier les effets de variations compositionnelles de la source ainsi que du magma pour quantifier leurs rôles sur le facteur de focalisation nécessaire à la formation de dunite et sur la composition des résidus. Par exemple, des expériences avec certains liquides issus de la fusion de pyroxénite (riche en magnésium) pourraient avoir l'effet inverse de celui d'un liquide alcalin sur les résidus. De plus, étant également très riche en calcium et pauvre en silice (Schiano & al., 2000), ces liquides devraient minimiser la valeur du facteur de focalisation nécessaire à la formation de dunites et de MORB de compositions primitives.

ANNEXES

A) Calculs d'erreurs

1) Calcul d'erreur sur les compositions chimiques des phases analysées :

Le calcul de l'incertitude associée à la concentration d'un élément dans une phase prend en comte l'erreur analytique α (calculée à partir des statistiques de comptages sur les standards et sur les échantillons et l'écart-type δ de la population de n analyses (le nombre d'analyse par phase est typiquement entre 10 et 15 pour les phases solides et entre 5 et 15 pou le liquide). Nous avons choisi, afin d'être au plus proche de la réalité, de prendre la valeur maximale du couple $(\alpha, 2\delta)$.

Tabl.6: Formules pour le calcul de l'erreur analytique α (en % relatif) en fonction de la concentration de l'élément x (en % pds) pour les différentes phases (D.Laporte, communication écrite).

	verre		spinelle		срх		орх	olvine
	%		%		%		%	%
Na	$y = 11,456x^{-0,5395}$	Na	$y = 5,2964x^{-0,8947}$	Na2O	$y = 7,9116x^{-0,6371}$	MgO	y = -0,0098x + 0,9437	y = 0,527
Mg	$y = 8,4982x^{-0,5196}$	Mg	y = -0,0745x + 2,8551	MgO	y = -0.0193x + 1.6851	CaO	$y = 8,7181x^{-0,5751}$	$y = 7,0264x^{-0,8062}$
к	$y = 12,625x^{-0,5795}$	Ca	$y = 6,6999x^{-0,8413}$	CaO	y = -0.078x + 3.2488	TiO2	$y = 6,8095x^{-0,9052}$	$y = 5,557x^{-0,9561}$
Ca	$y = 12,109x^{-0,5399}$	Ti	$y = 6,6838x^{-0,8773}$	TiO2	$y = 6,3548x^{-0,9122}$	Cr2O3	$y = 8,8447x^{-0.8278}$	$y = 7,7138x^{-0,8959}$
Ti	$y = 13,991x^{-0,7393}$	Fe	y = -0,18x + 4,4915	Cr2O3	$y = 10,77x^{-0.54}$	FeO	y = -0.234x + 4.9226	y = -0,138x + 4,0801
Fe	$y = 13,985x^{-0,5932}$	Mn	$y = 5,4901x^{-1,0762}$	FeO	y = -0,4414x + 6,0458	MnO	$y = 5,6198x^{-1,0256}$	$y = 5,8808x^{-1,0079}$
Mn	$y = 8,1367x^{-1,0021}$	Cr LLIF	$y = 9,8813x^{-0,5039}$	MnO	$y = 6,0204x^{-0,9758}$	SiO2	y = -0,0109x + 1,4352	y = -0,0127x + 1,484
Cr LLIF	$y = 10,027x^{-0,949}$	Si	$y = 6,0484x^{-0,8607}$	SiO2	y = 0,817	Al2O3	y = -0,1392x + 2,2659	$y = 3,4014x^{-0,924}$
Si	y = -0,0071x + 1,5013	Al	y = -0,0055x + 0,8951	Al2O3	y = -0,262x + 3,1586			
Al	$y = 8,133x^{-0,527}$							

2) Calcul d'erreurs sur les fractions modales :

Le calcul d'erreur sur les fractions modales est fait à partir des erreurs sur les compositions chimiques des phases et de la roche totale. L'erreur donnée correspond au calcul de 2σ par le bilan de masse d'Albarède & Provost (1977).

3) Calcul d'erreur sur la composition chimique de la péridotite :

L'erreur sur la composition chimique de la péridotite été trouvée à partir d'une base de données de « The national institut of standards and technologies » (www.cstl.nist.gov). Le tableau 6 donne les pourcentages d'erreur sur les différents oxydes :

Tabl.7: pourcentage d'erreur sur la composition de la péridotite MBK

oxyde	SiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	Cr2O3
%	1	3	1	5	-	10	-	10	20	10

4) Erreur sur la composition chimique du gel basaltique B_0 :

Le gel basaltique a été analysé à l'ICP-AES par M.Benbakkar. Le tableau 1 donne la composition de ce verre et l'erreur. Cette dernière est l'erreur relative e entre les deux compositions (verre de DUN1 et gel synthétique) en prenant comme référence DUN1 : $e = |X_{DUN1} - X_{GEL}|/X_{DUN1}*100$.

5) Erreur dans les calculs pMELTS :

Les barres d'erreurs sur les calculs de pMELTS sont trouvées en prenant comme référence le taux de fusion et l'incertitude (2σ) calculés pour nos expériences.

B) Compositions initiales des différents produits de départ

Tabl.8: Composition du mélange BRI 3 - K (alias MBK) composé de 98,58 % de la péridotite BRI 3 et de 1,42% du gel B2 (programme DORS2)

Tabl.9: Compositions^a des mélanges MIX1, MIX2 et MIX3 correspondant respectivement à des facteurs de focalisation de 6, 3 et 11.

	MBK	
	analyse	incertitude ^a
SiO ₂	44,88	0,90
Al_2O_3	4,08	0,24
FeO	8,01	0,16
MnO	0,13	0,01
MgO	38,63	0,00
CaO	3,26	0,65
Na ₂ O	0,35	0,00
K_2O	0,04	0,01
TiO ₂	0,14	0,05
Cr_2O_3	0,48	0,10

	MIX1	=	MIX2	=	MIX3	
	moyenne	incertitude ^b	moyenne	incertitude ^b	moyenne	incertitude ^b
0	1,16	0,11	0,75	0,05	1,60	0,23
)	30,3	0,08	34,55	0,04	25,82	0,18
	0,18	0,03	0,11	0,02	0,26	0,06
)	5,84	0,57	4,52	0,61	7,23	0,47
2	0,36	0,08	0,25	0,07	0,48	0,11
)	7,75	0,23	7,89	0,2	7,61	0,31
)	0,13	0,03	0,13	0,02	0,14	0,06
)3	0,37	0,09	0,43	0,1	0,31	0,09
2	45,99	1,45	45,43	1,17	46,59	2,06
)3	7,9	0,33	5,95	0,29	9,96	0,42

MIX3: 0.468-0.532.

C) Informations sur les projections

1) Algorithme de projection utilise dans les diagrammes ternaires (Walker & al, 1979)

$$\begin{split} & Plagioclase = Na_2O + K_2O + Al_2O_3 \\ & Diopside = CaO - Al_2O_3 + Na_2O + K_2O \\ & Olivine = (FeO + MgO + MnO + Al_2O_3 - CaO - Na_2O - K_2O)/2 \\ & Silice = SiO_2 - (Al_2O_3 + FeO + MgO + MnO + 3CaO + 11Na_2O + 11K_2O)/2 \end{split}$$

2) Compositions du liquide MELTS et du MORB ALV-519-4-1

Tabl.10: compositions des compositions à 0.5 GPa pour Ω =11 et Ω =21 et du MORB ALV-519-4-1

	p	ALV-519-4-1 ^b	
	Ω=11	Ω=21	ALV-519-4-1
Na ₂ O	2,5	2.7	2,07
MgO	11,5	11.2	9,61
K ₂ O	0,42	0.475	0,09
CaO	11,6	13.2	12,5
TiO ₂	0,78	0.85	0,77
FeO	6,3	6	9
MnO	0,12	0.12	0,2
Cr ₂ O ₃	0,41	0.52	0,04
SiO ₂	50	48.5	49,37
Al_2O_3	14	13	15,95

a les compositions ont été calculées avec pMELT5 et corrigées des sur-saturations (ou sous-saturation) de ce derniers par rapport à nos liquides expérimentaux en s'appuyant sur les évolutions données dans la figure 32.
b composition d'un des MORB les plus primitifs de la région de

Famous. (Stolper & al., 1980)

^a l'incertitude a été calculée à partir des données du NIST.

a les compositions sont les compositions normalisées à 100 %
 b les incertitudes ont été calculées à partir des incertitudes de
 DUN1 et de la composition MBK en fonction des proportions massiques de chacun: MIX1: 0.306-0.694; MIX2: 0.15-0.85;

D) Liste des figures

Fig.1: Compositions de 960 verres de MORB compilées par Melson & al. (1977) comparés avec les limites de phases entre 0 et 20 kbar (*Stolper, 1980*). Projection à partir du plagioclase sur le plan diopside-olivine-silice. L'algorithme utilisé pour calculer les projections est donné dans l'Annexe C.

Fig.2: Illustration d'un réseau de dunite sous une ride médio-océanique basé sur les observations de l'ophiolite d'Oman (le liquide est présent partout dans la région grisée). *Braun & Kelemen*, 2002

Fig.3: Schéma de la formation et du transport du magma dans notre modèle.

Fig.4: Trajets isentropes d'une remontée de manteau, calculés en utilisant les paramètres données par McKenzie & Bickle (1988) avec une entropie de fusion de 400 J.kg⁻¹.°C⁻¹ pour 4 Tp. *McKenzie & O'nions* (1991)

Fig.5: Photographie du piston-cylindre 3/4" du LMV

Fig.6 : Géométrie du conteneur

Fig.7: Images MEB en électrons rétrodiffusés de a) section longitudinale de l'échantillon DUN1 avec 1- un filon cristallisé sur le coin et 2- un filon rempli de verre (barre d'échelle : $500~\mu m$); b-d) filons de tailles variables dans différents échantillons. b) filon dans le fond de l'échantillon DUN1 (barre d'échelle : $50\mu m$) pouvant être analysé avec un faisceau de $5~\mu m$. c) filon au fond de l'échantillon MIX2DUN1 (barre d'échelle : $20~\mu m$). d) très petit filon dans l'échantillon MIX1DUN1 ne pouvant être analysé qu'à $2~\mu m$ et donnant de mauvais bouclages analytiques (barre d'échelle : $20~\mu m$).

Fig.8: Evolution texturale de la série DUN: a) 1.25 GPa, 1310°C; b) 1 GPa, 1290°C; c) 0.75 GPa, 1270°C; d) 0.5 GPa, 1250°C (1-olivine, 2-opx, 3-cpx, 4-spinelle, 5-verre). Barre d'échelle: 10 μ m.

Fig.9: Fractions modales des phases de la série DUN en fonction de la pression (en GPa).

Fig.10: Moyennes des concentrations d'oxydes dans le verre de la série DUN en fonction de la pression (GPa).

Fig.11: Evolution du cr# des spinelles vs. le mg# des olivines pour la série DUN

Fig.12: Evolution texturale de la série MIX2: a) 1.25 GPa, 1310°C; b) 1 GPa, 1290°C; c) 0.75 GPa, 1270°C; d) 0.5 GPa, 1250°C (1-olivine, 2-opx, 3-cpx, 4-spinelle, 5-verre). Barre d'échelle: 10 μ m.

Fig.13: Fractions modales des phases de la série MIX2 en fonction de la pression (en GPa).

Fig.14: Moyennes des concentrations d'oxydes dans le verre de la série MIX2 en fonction de la pression (GPa).

Fig.15 : Evolution du cr# du spinelle vs. mg# de l'olivine. Les barres d'erreur pour le cr# ne sont pas visibles car elles sont inférieures à la taille du symbole.

Fig.16: Evolution texturale de la série MIX1 : a) 1.25 GPa, 1310°C ; b) 1 GPa, 1290°C ; c) 0.75 GPa, 1270°C ; d) 0.5 GPa, 1250°C (1-olivine, 2-opx, 3-cpx, 4-spinelle, 5-verre). Barre d'échelle : 10 μ m.

Fig.17: Fractions modales des phases de la série MIX1 en fonction de la pression (en GPa).

Fig.18: Moyennes des concentrations d'oxydes dans le verre de la série MIX1 en fonction de la pression (GPa). Les carrés vides correspondent aux analyses du verre interstitiel dans MIX1DUN1.

Fig.19 : Evolution du cr# du spinelle vs. mg# de l'olivine. L'erreur sur le cr#sp est inférieure à la taille du symbole

Fig.20: Evolution texturale de la série de refroidissement MIX2 à 0.75 GPa: a) MIX2REV1: F=36wt%; b) MIX2DUN2: F=33wt%; c) MIX2REV2: F=25.8wt% (1-olivine, 2-opx, 3-cpx, 4-spinelle, 5-verre). Barre d'échelle: 10 µm.

Fig.21: Evolutions des fractions modales des phases de la série de refroidissement avec la composition MIX2 en fonction du taux de fusion F (wt%).

Fig.22: Moyennes des concentrations d'oxydes dans le verre de la série de refroidissement avec la composition MIX2 en fonction du taux de fusion F (wt%).

Fig.23: Evolution texturale de la série de refroidissement MIX1 à 0.75 GPa: a) MIX1REV1: F=48.6%; b) MIX1DUN2: F=47.5%; c) MIX1REV2: F=37.6%; d) MIX1REV3: F=9% (1-olivine, 2-opx, 3-cpx, 4-spinelle, 5-verre, 6-plagioclase). Barre d'échelle: 10 μm.

Fig. 24: Evolutions des fractions modales des phases de la série de refroidissement MIX1 en fonction du taux de fusion F (wt%).

Fig.25: Moyennes des concentrations d'oxydes dans le verre de la série de refroidissement MIX1 en fonction du taux de fusion F (wt%)

Fig.26: mg# de l'olivine et cr# du spinelle *vs.* taux de fusion F (wt%): ▲ MIX2; ■ MIX1

Fig.27: Evolution texturale à 1170° C et 0.75 GPa en fonction de la focalisation : a) MIX1REF3 : Ω =6;

b) MIX3REF : Ω =11 (1-olivine, 2-opx, 3-cpx, 4-spinelle, 6-plagioclase). Barre d'échelle : 5 μ m.

Fig.28: Concentrations en MgO, FeO et SiO₂ dans le liquide en fonction du taux de fusion pour nos expériences (\blacklozenge) et selon pMELTS (\blacksquare) avec une fO₂ = FQM-1

Fig.29: Fractions modales des phases solides en fonction du taux de fusion F dans nos expériences (◆)et selon pMELTS (■)

Fig.30: Moyennes des concentrations des différents oxydes dans le liquide en fonction du taux de fusion F dans nos expériences (◆) et dans pMELTS(■).

Fig.31: Evolutions des mg# de l'olivine et de l'opx et du cr# du spinelle en fonction du taux de fusion F dans nos expériences (◆) et selon pMELTS(■)

Fig.32: Moyennes des concentrations des différents oxydes dans le liquide dans nos expériences (◆) pour des facteurs de focalisation de 1 à 6 et selon pMELTS (■) pour des facteurs de 1 à 21, en fonction du taux de fusion F

Fig.33: Evolutions du mg# de l'olivine et du cr# du spinelle en fonction du taux de fusion F : expériences (*);pMELTS (*)

Fig.34: Evolutions des concentrations moyennes des différents oxydes dans le liquide en fonction du taux de fusion (wt%) à 0.75 GPa : expériences (◆) et pMELTS (trait continu)

Fig.35: Evolutions des concentrations moyennes des différents oxydes dans le résidu en fonction du taux de fusion F à 0.75 GPa et Ω =6 : expériences (\blacklozenge) et pMELTS (trait continu)

Fig.36: Evolution texturale à 0.5 GPa en fonction de la focalisation : a) DUN4 : Ω =1; b) MIX2DUN1 : Ω =3; c) MIX1DUN1 : Ω =6 (1-olivine, 2-opx, 5-verre). Barre d'échelle : 10 μm.

Fig. 37: Fractions modales des phases en fonction de la focalisation Ω à 0.5 GPa (•). Le trait continu montre la fraction à 1.25 GPa avant la focalisation.

Fig.38: Moyennes des concentrations des différents oxydes dans le liquide à 0.5 GPa en fonction de la focalisation (•) Le trait continu représente la composition de référence du liquide, c'est-à-dire la composition avant focalisation dans l'expérience DUN1 à 1.25 GPa/1310°C Fig.39: a) Vue schématique du régime de fusion sous une dorsale médio-océanique résultant de la remontée passive du manteau en réponse à l'expansion. Les lignes pleines représentent le flux mantellique, la région en tiretés, la zone de fusion; b) Schéma d'un trajet P-T pour une remontée adiabatique du manteau. *Langmuir & al.* (1992)

Fig.40: Compositions de 960 verres de MORB compilées par Melson & al. (1977) dont la composition P qui correspond à la composition d'un des MORB les plus primitifs (ALV-519-4-1: zone de Famous) comparés avec les limites de phases entre 0 et 20 kbar, des compositions expérimentales obtenues à partir d'une fusion adiabatique de péridotite MBK ● et des compositions de liquide soumis à une augmentation de la focalisation à 0.5 Gpa ● (Annexe C). a) Projection depuis le pôle silice sur le plan plagioclase-diopside-olivine (Annexe C); b) Projection depuis le pôle plagioclase sur le plan diopside-olivine-silice (Annexe C)

E) Liste des tableaux

Tabl.1: Compositions^a du verre de DUN1 et du gel synthétisé: ^a les compositions sont les compositions normalisées à 100 wt%; ^b analyste: M.Benbakkar; ^c la moyenne est faite à partir de 12 analyses; ^d l'incertitude calculée correspond au maximum entre l'erreur analytique et 2 fois l'écart-type; ^e l'erreur calculée est l'erreur relative entre les deux compositions en prenant pour référence la composition de DUN1

Tabl.2 : Récapitulatif des conditions expérimentales et fractions modales des phases de tous les échantillons : a les erreurs correspondent à deux fois l'écart-type : ex.8.80(91) représente 8.80±0.91 (2σ) (Annexe A); b modes estimés en % pondéraux par bilan de masse avec les compositions chimiques des phases de l'expérience DUN1

Tabl.3: Moyennes et incertitudes des compositions des verres (% pds) mesurés sur les filons basaltiques³: ¹ Toutes les compositions sont normalisées à 100% et l'erreur correspond au maximum entre deux fois l'écart-type et l'erreur analytique (Annexe A); ੈ Nombre d'analyses ; ˚ Taille du faisceau en μm (spot size) ; d Les totaux exprimés sont les totaux analytiques ; e rapports mg# =100Mg²+/(Mg²++Fe²+) dans l'olivine et dans le liquide en considérant que tout le fer est sous forme Fe²+ ; f rapport cr# = 100Cr³+/(Cr³+Al³+) dans le spinelle; g charges où les filons étaient très petits (<2 μm de large) ce qui explique le mauvais bouclage des analyses

Tabl.4: Moyennes et incertitudes des compositions des phases solides (% pds) ^a : ^a Toutes les compositions sont normalisées à 100% et l'erreur correspond au maximum entre deux fois l'écart-type et l'erreur analytique (Annexe A); ^b Les totaux exprimés sont les totaux analytiques

Tabl.5: comparaison entre les températures et les températures théoriques du géothermomètre de Ford & al. (1983): * Les colonnes en gras correspondent aux expériences fait sur le PC2, les autres sur le PC1; ^aTsum est calculée à partir des équilibres olivine-liquide, de la pression et des coefficients de parage des cations Mg²⁺, Fe²⁺, Mn²⁺ et Ca²⁺; ^bΔT est la différence entre les températures théoriques et expérimentales.

Tabl.6: Formules pour le calcul de l'erreur analytique α (en % relatif) en fonction de la concentration de l'élément x (en % pds) pour les différentes phases (D.Laporte, communication écrite).

Tabl.7: pourcentage d'erreur sur la composition de la péridotite MBK

Tabl.8: Composition du mélange BRI 3 - K (alias MBK) composé de 98,58 % de la péridotite BRI 3 et de 1,42% du gel B2 (programme DORS2): ^a l'incertitude a été calculée à partir des données du NIST.

Tabl.9: Compositions^a des mélanges MIX1, MIX2 et MIX3 correspondant respectivement à des facteurs de focalisation de 6, 3 et 11: ^a les compositions sont les compositions normalisées à 100 wt%; ^b les incertitudes ont été calculées à partir des incertitudes de DUN1 et de la composition MBK en fonction des proportions massiques de chacun: MIX1: 0.306-0.694; MIX2: 0.15-0.85; MIX3: 0.468-0.532.

Tabl.10: compositions des compositions à 0.5 GPa pour Ω =11 et Ω =21 et du MORB ALV-519-4-1 : ^a les compositions ont été calculées avec pMELTS et corrigées des sursaturations (ou sous-stauration) de ce derniers par rapport à nos liquides expérimentaux en s'appuyant sur les évolutions données dans la figure 32 ; ^b composition d'un des MORB les plus primitifs de la région de Famous (Stolper & al., 1980)

F) Bibliographie

- **Albarède F, Provost A** (1977): "Petrological and geochemical mass-balance equations: An algorithm for least-square fitting and general error analysis", *Comput. Geosci.*, **3**, 309–326.
- **Asimow PD, Hirschmann MM, Stolper EM** (2001): "Calculations of peridotite partial melting from thermodynamic models of minerals and melts, IV. Adiabatic decompression and the composition and mean properties of Mid-ocean Ridge Basalts", *Journal of Petrology*, **42(5)**, 963-998.
- **Asimow PD, Stolper E** (1999): "Steady-state mantlemelt interactions in one dimension: equilibrium, transport and melt focusing.", *Journal of Petrology*, **40(3)**, 475-494.
- **Braun MG, Kelemen PB** (2002): "Dunite distribution in the Oman Ophiolite: Implications for melt flux through porous dunite conduits.", *Geochem.Geophys.Geosyst.*, **3(11)**, 8603.
- Christie DM, Carmichael ISE, Langmuir CH (1986): "Oxidation states of mid-ocean ridge basalt glasses", *Earth and Planetary Science Letters*, **79**, 397-411.
- Ford CE, Russell DG, Craven JA, Fisk MR (1983): "Olivine-liquid equilibria: temperature, pressure and composition dependence of the crystal/liquid cation partition coefficients for Mg, Fe2+, Ca and Mn", *Journal of Petrology*, **24(3)**, 256-265.
- Ghiorso MS, Hirschmann MM, Reiners PW, Kress VC (2002): "A revision of MELTS for improved calculation of phase relations and major element partitioning related to partial melting of the mantle to 3 GPA.", Geochem. Geophys. Geosyst., 3, n°1030
- Ghiorso MS, Sack RO (1995): "Chemical mass transfer in magmatic processes IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquid-solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures.", Contrib.Mineral.Petrol., 119(2/3), 197-212.
- **Jackson MD, Ohnenstetter M** (1981): "Peridotite and gabbroic structures in the Monte Maggiore Massif, Alpine Corsica.", *Journal of Geology*, **89**, 703-719.
- Kelemen PB, Hirth G, Shimizu N, Spiegelman M, Dick HJB (1997): "A review of melts migration processes in the adiabatically upwelling mantle beneath oceanic spreading ridges.", *Phil.Trans.R.Soc.Lond.A.*, **355**, 283-318.
- **Kelemen PB, Joyce DB, Webster JD, Holloway** JR (1990): "Reaction between ultramafic wall rock and fractionating basaltic magma: Part II, Experimental investigation of reaction between olivine tholeiite and harzburgite at 1150 and 1050°C and 5 kbar.", *Journal of Petrology*, **31**, 99-134.
- **Kelemen PB, Shimizu N, Salters VJM** (1995): "Extraction of mid-ocean-ridge basalt from the upwelling mantle by focused flow of melt in dunite channels.", *Nature*, **375**, 747-753.
- **Kohlsedt DL** (1991): "Structure, rheology, and permeability of partially molten rocks at low melts fractions.", *AGU Monograph*, **71**, 103-122.
- **Langmuir CH., Klein EM, Plank** T (1992): "Petrological Systematics of Mid-Ocean Ridge Basalts: Constraints on Melt Generation Beneath Ocean Ridges.", *AGU Monograph*, **71**, 183-280.

- **Laporte D** (2004): "Physisco-chimie des processus magmatiques : approche expérimentale.", *Mémoire présenté en vue de l'HDR*, *Univ.Blaise Pascal, Clermont-Fd*, 92p.
- **Laporte D, Toplis MJ, Seyler M, Devidal JL** (2004): "A new experimental technique for extracting liquids from peridotite at very low degrees of melting: application to partial melting of depleted peridotite.", *Contrib.Mineral.Petrol.*, **146**, 463-484.
- **McKenzie D, O'Nions RK** (1991): "Partial melt distributions from inversion of rare Earth element concentrations.", *Journal of Petrology*, **32**, 1021-1091.
- Melson WG, Byerly GR,Nelen JA, O'Hearn T, Wright TL, Vallier T (1977): "A catalog of the major element chemistry of abyssal volcanic glasses.", Smithson Contrib.Earth Sci., 19, 31-60.
- Morgan Z, Liang Y (2005): "An experimental study of the kinetics of lhezolite reactive dissolution with applications to dunite dike formation.", *Contrib.Mineral.Petrol.*, **150**, 369-385.
- Morgan Z, Liang Y (2003): "An experimental study of the kinetics of harzburgite reactive dissolution with applications to dunite dike formation.", *Earth and Planetary Science Letters*, **214**, 59-74.
- Nicollet C, Chazot G, Cloquet C (2001): "Le Trajet Pression Température Temps des lherzolites et gabbros associés du Monte Maggiore, Cap Corse", poster LMV.
- **Nui Y, Hékinian R** (1997): "Spreading-rate dependence of the extent of mantle melting beneath ocean ridges.", *Nature*, **385**, 326-329.
- Schiano P (2000): "Primitive CaO-rich, silicaundersturated melts in island arcs: Evidence for the involment of clinopyroxene-rich lithologies in the petrogenesis of arc magmas.",
- Geochem.Geophys.Geosyst., 1, n°1999GC000032.
- **Spiegelman M, Kelemen PB, Aharonov E** (2001): "Causes and consequences of flow organization during melt transport: The reaction infiltration instability in copactible media.", *JGR*, **106(B2)**, 2061-2077.
- **Stolper E** (1980): "A phase diagram for Mid-Ocean Ridge Basalts: Preliminary results and implications for pétrogenesis.", *Contrib.Mineral.Petrol.*, **74** (1), 13-27.
- Suhr G, Hellebrand E, Snow JE, Seck, HA, Hofmann, AW (2003): "Significance of large, refractory dunite bodies in the upper mantle of the Bay of Islands Ophiolite.", Geochem. Geophys. Geosyst., 4 (3), 8605.
- **Takahashi N** (1992): "Evidence for melt segregation towards fractures in Horoman mantle peridotite complex", *Nature*, **359**, 52-58.
- Tommasi A, Godard M, Coromina G, Dautria JM, Barsczus H (2004): "Seismic anisotropy and compositionally induced velocity anomalies in the lithosphere above mantle plumes: a petrological and microstructural study of mantle xenoliths from French Polynesia.", *Earth and Planetary Science Letters*, 227, 539-556
- Walker D, Shibata T, Delong SE (1979): "Abyssal tholeiites from the Oceanographer Fracture Zone II. Phase equilibria and mixing.", *Contrib. Mineral. Petrol*, **71**, 111-125.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier sincèrement Didier Laporte pour m'avoir confier ce sujet et pour son aide, sa disponibilité et ses conseils précieux.

Je remercie également Pierre Schiano pour ses conseils.

Un grand merci aussi à Jean Luc Devidal pour la synthèse du gel basaltique, pour son aide à la microsonde et pour avoir fait en sorte que je puisse obtenir toutes mes données à temps.

Je remercie Jean Marc Hénot pour m'avoir initier au MEB ce qui m'a permis d'économiser beaucoup de temps.

Je remercie Ken Koga pour son aide sur pMELTS et lors de petits problèmes techniques avec les piston-cylindres.

Je remercie Murielle Laubier pour m'avoir accorder de son temps pour mes problèmes sur pMELTS et pour les discussion sur nos résultats.

Je remercie Mammed Benbakkar pour l'analyse à l'ICP AES du gel basaltique

.Je remercie Etienne Médard, Ariel Provost et Pierre Boivin pour leurs macros exel.

Enfin, un très grand merci à toutes les personnes de cette promo et particulièrement à Audray, à Audrey, à Bikett, à Cyntia, à Débo, à Flo, à Lucile, à Lyde, à Lydie, à Marion, à Maurice, à Tom et à Zina, ainsi qu'à Anais, Dédée, Nicotine, July, Tof et tous les DESS, sans lesquelles l'ambiance cette année n'aurait pas été aussi bonne et je leur souhaite, à tous, bonne chance.

Résumé

Le transport des magmas basaltiques sous les rides médio-océaniques se ferait principalement dans des chenaux dunitiques de haute perméabilité résultant de la dissolution complète des pyroxènes dans un encaissant péridotitique. C'est la focalisation de l'écoulement magmatique dans des zones privilégiées du manteau qui aboutirait à la formation de ces chenaux. Une série d'expériences en piston-cylindre a été réalisée afin de simuler le processus de focalisation du magma sous les rides médio-océaniques et d'étudier le rééquilibrage entre péridotite et basalte en fonction de la pression et du rapport magma/roche. Les résultats ont ensuite été comparés aux prévisions du programme pMELTS.

Cette étude nous permet de valider un modèle pour la formation des MORB primitifs aux rides médio-océaniques impliquant: 1) la fusion d'un manteau lherzolitique en profondeur, 2) la focalisation du magma qui entraîne la formation de chenaux dunitiques et une évolution des compositions des liquides vers des compositions de MORB primitifs par interaction avec l'encaissant dunitique. 3) La déstabilisation de ces chenaux de haute perméabilité en filons est envisageable pour de forts facteurs de focalisation. Cette étude confirme donc la nécessité d'invoquer formation de dunites sous les rides médio-océaniques pour expliquer la sous-saturation en opx des MORB à basse pression; elle renforce l'hypothèse que des chenaux de forte porosité constituent le moyen principal du transport des magmas sous les rides. En outre, ces expériences montrent que la focalisation du magma a une forte influence sur la composition minéralogique du résidu pouvant conduire à la formation d'assemblages dunitiques, wherlitiques et gabbroïques. Enfin, les résultats suggèrent que la composition du liquide joue un rôle important dans la modification des compositions chimiques des résidus.

Mots clés : dunite ; focalisation ; rides médio-océaniques ; MORB primitifs ; interactions magma/roche.

Abstract

The transport of basaltic melts beneath oceanic spreading centres occurs predominantly in high-porosity dunitic channels, resulting from the complete dissolution of pyroxenes in peridotites mantle. The formation of dunitic assemblages is due to magma focussing that is, to the circulation of important melt volumes in these channels. Many experiments were run in a piston-cylinder apparatus to simulate magma focussing processes beneath oceanic spreading centres, and to study the reaction between peridotites and basalt, as function of pressure and magma:rock ratio. Then, results were compared with pMELTS predictions.

This study proposes a primitive MORBs formation model, implying: 1) partial melting of lherzolitic mantle at depth, 2) magma focussing involving the formation of dunitic channels and liquids evolution toward primitive MORBs composition by interaction with surrounding dunites. 3) Destabilization of high-porosity channels to form dykes is possible at high degrees of melting. Thus, this study confirms the necessity of dunites formation beneath the oceanic ridges and strengthens the hypothesis that high-porosity channels constitute the main mean of magma transport at oceanic spreading centres. Moreover, these experiments show that magma focussing has a strong influence on residue mineralogical composition leading to the formation of dunitic, wherlitic and gabbroic assemblages. At last, results suggest that melt composition has an important role on chemical compositions of residues.

Keywords: dunite; magma focussing; oceanic spreading centres; primitive MORBs; melt:rock interactions.