



Università degli Studi di Ferrara

DOTTORATO DI RICERCA IN
"Scienze della Terra"

CICLO XXII

COORDINATORE Prof. **Luigi BECCALUVA**

**COMPARAZIONE DEL MANTELLO
LITOSFERICO AFRICANO: STUDIO
DEGLI XENOLITI DI MANTELLO
DEI DISTRETTI VULCANICI DEL
MAROCCO E DEL
MAIN ETHIOPIAN
RIFT**

Settore Scientifico Disciplinare **GEO/07**

Dottorando

Dott. Santato Alessandro

Tutore

Prof. Beccaluva Luigi

Anni 2007/2009



Università degli Studi di Ferrara

DOTTORATO DI RICERCA IN
"Scienze della Terra"

CICLO XXII

COORDINATORE Prof. **Luigi BECCALUVA**

**COMPARAZIONE DEL MANTELLO
LITOSFERICO AFRICANO: STUDIO
DEGLI XENOLITI DI MANTELLO
DEI DISTRETTI VULCANICI DEL
MAROCCO E DEL
MAIN ETHIOPIAN
RIFT**

Settore Scientifico Disciplinare **GEO/07**

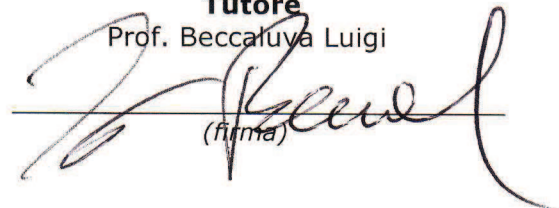
Dottorando

Dott. Santato Alessandro


(firma)

Tutore

Prof. Beccaluva Luigi


(firma)

Anni 2007/2009

INDICE

1 INTRODUZIONE E SCOPO	1
2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO	3
2.1 LA FASCIA SAHARIANA	5
2.1.1 VULCANISMO CENOZOICO	6
2.2 L'ATLANTE	12
2.2.1 VULCANISMO DELL'ATLANTE MEDIO	14
2.3 LA RIFT VALLEY	
2.3.1 ASSETTO TETTONICO	17
2.3.2 IL MAIN ETHIOPIAN RIFT (MER)	19
2.3.3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE	20
3 PETROGRAFIA E CHIMISMO DEGLI ELEMENTI MAGGIORI	
3.1 NODULI DI MANTELLO DI AZROU (Atlante Medio, Marocco)	
3.1.1 DESCRIZIONE PETROGRAFICA	23
3.1.2 ANALISI DEGLI ELEMENTI MAGGIORI SU ROCCIA TOTALE (XRF)	26
3.1.3 ANALISI DEGLI ELEMENTI MAGGIORI "IN SITU" (EPMA)	29
3.2 NODULI DI MANTELLO DI MEGA (Rift Valley, Etiopia)	
3.2.1 DESCRIZIONE PETROGRAFICA	37
3.2.2 ANALISI DEGLI ELEMENTI MAGGIORI SU ROCCIA TOTALE (XRF)	40
3.2.3 ANALISI DEGLI ELEMENTI MAGGIORI "IN SITU" (EPMA)	43
3.3 GEOTERMOBAROMETRIE	52
4 ANALISI DEGLI ELEMENTI IN TRACCE	
4.1 NODULI DI MANTELLO DI AZROU (Atlante Medio, Marocco)	
4.1.1 ANALISI DEGLI ELEMENTI IN TRACCE SU ROCCIA TOTALE (ICP_MS)	55
4.1.2 ANALISI DEGLI ELEMENTI IN TRACCE "IN SITU" (LA-ICP-MS)	59

4.2 NODULI DI MANTELLO DI MEGA (Main Ethiopian Rift, MER)	
4.2.1 ANALISI DEGLI ELEMENTI IN TRACCE SU ROCCIA TOTALE	63
4.2.2 ANALISI DEGLI ELEMENTI IN TRACCE “IN SITU” (LA-ICP-MS)	66
5 MODELLISTICA ED AGENTI METASOMATICI	74
6 SISTEMATICA ISOTOPICA	
6.1 GENERALITA’	82
6.2 NODULI DI MANTELLO DI AZROU (Atlante Medio, Marocco)	87
6.3 NODULI DI MANTELLO DI MEGA (Rift Valley, Etiopia)	91
7 DISCUSSIONE E CONCLUSIONI	
7.1 NODULI DI MANTELLO DI AZROU (Atlante Medio, Marocco)	95
7.2 NODULI DI MANTELLO DI MEGA (Rift Valley, Etiopia)	97
APPENDICE A	
TABELLE DATI	
BIBLIOGRAFIA	

1 INTRODUZIONE E SCOPO

Il mantello terrestre è stato da sempre oggetto di intense ricerche e discussioni che hanno interessato più discipline nel campo delle scienze della Terra, spaziando dalla geofisica alla planetologia, passando per la petrografia e la geochimica.

Se la geofisica ha permesso di investigare in profondità l'interno del pianeta, caratterizzando il mantello terrestre sulla base del suo comportamento reologico, distinguendo principalmente tra mantello superiore e mantello inferiore, è attraverso lo studio delle peridotiti abissali oceaniche, delle associazioni ofiolitiche e degli xenoliti di mantello, che si è potuto avere testimonianza diretta della natura dei materiali costituenti la sua parte subcrostale.

In particolare gli xenoliti di mantello, essendo caratterizzati da un processo di messa in posto molto veloce, permettono di escludere, nella stragrande maggioranza dei casi, contaminazioni crostali o alterazioni sia della tessitura che del chimismo originali, costituendo uno strumento molto importante per comprendere la natura e l'importanza dei fenomeni petrologici, passati od attuali, del mantello terrestre. Essi possono essere intesi come la registrazione istantanea in termini di caratteristiche tessiturali, composizionali e mineralogiche delle porzioni di mantello dalle quali sono stati campionati.

Lo studio di queste tipologie mantelliche ha evidenziato come il mantello sia costituito da rocce peridotitiche, costituite, a seconda della facies in questione, da quattro fasi mineralogiche principali: olivina, ortopirosseno e clinopirosseno, e in quantità minori, di una fase alluminifera, rappresentata, a seconda delle condizioni di profondità (e pressione) da plagioclasio, spinello o granato.

Dal punto di vista composizionale, il mantello, originariamente pensato come omogeneo, appare invece contraddistinto da eterogeneità che si manifestano a vario grado e scala. Questo, sembra, a causa dei numerosi processi “*differenziativi*” susseguitisi nel corso della sua storia geologica a partire da una composizione immaginata omogenea (*Primordial Mantle*) che al momento non sembra essere più reperibile in nessuna porzione terrestre. Le modifiche composizionali che possono essere intervenute sul mantello primordiale, in termini di contenuti degli elementi maggiori, degli elementi in tracce e delle impronte isotopiche, sono essenzialmente imputabili a due processi ben distinti come dimostrato ampiamente dal gruppo di ricerca di Ferrara (Beccaluva et al., 2001, 2004, 2007, 2008; Bianchini et al., 2007, 2009; Coltorti et al., 1999, 2000, 2004, 2005, 2007; Siena et al.,

1991): processi di impoverimento chimico-mineralogico del mantello primordiale per eventi di fusione parziale ed estrazione di magmi basici; e processi di arricchimento chimico-mineralogico (metasomatismo) riconducibili all'interazione della matrice peridotitica di mantello con fluidi metasomatizzanti di origine profonda percolati al suo interno.

Nel corso dell'ultimo decennio uno dei dibattiti più accesi ha riguardato i plumes di mantello e in particolare la loro natura, profondità di provenienza, i meccanismi di innesco, la forma e le dimensioni del mantello convettivo in relazione a particolari fenomeni geologici quali gli “*hot spot*”, le grandi province magmatiche (Large Igneous Provinces – LIP) ed il vulcanismo di rift (Ernest & Buchan, 2001; Foulger et al., 2005; Beccaluva et al., 2007b; Foulger & Jurdy, 2007). A tal proposito l’Africa con i suoi distretti vulcanici cenozoici risulta essere un ottimo laboratorio naturale per meglio comprendere queste problematiche.

In questo contesto lo studio degli xenoliti di mantello, oggetto di questa tesi, provenienti dal distretto vulcanico di Azrou-Timahdite, nell’Atlante Medio (Marocco) e di quelli provenienti dal sito di Mega, nel Main Ethiopian Rift (regione del Sidamo), può essere utile al fine di caratterizzare meglio la natura dei domini mantellici sottostanti l’Atlante Medio e il Main Ethiopia Rift (MER). In particolare il confronto tra gli xenoliti di Azrou-Timahdite con quelli di altri importanti province vulcaniche già studiate della fascia sahariana (Hoggar, Algeria e Gharyan, Libia), a Nord, e il confronto tra gli xenoliti di Mega con quelli del vicino plateau etiopico (Injibara, Gojam e Dedessa, Wollega), nel corno d’Africa, può fornirci importanti indicazioni sulle caratteristiche delle sorgenti di mantello della litosfera africana, valutarne i processi metasomatici e la natura degli agenti causativi, nonché il possibile coinvolgimento e tipologia di eventuali “*mantle plumes*”.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L'Africa è un grande continente caratterizzato da cratoni, zone di rifting, vulcani, rigonfiamenti crostali (*swells*) e ampi plateau. Questa grande varietà di ambienti tettonici è il risultato di processi geologici che hanno interessato il continente negli ultimi due miliardi di anni; dalla formazione dei cratoni, quali quelli del West Africa, Congo, Tanzania a Kalahari, fino ai più recenti fenomeni di magmatismo del Cenozoico (Sebai et al., 2006) (fig 2.1).

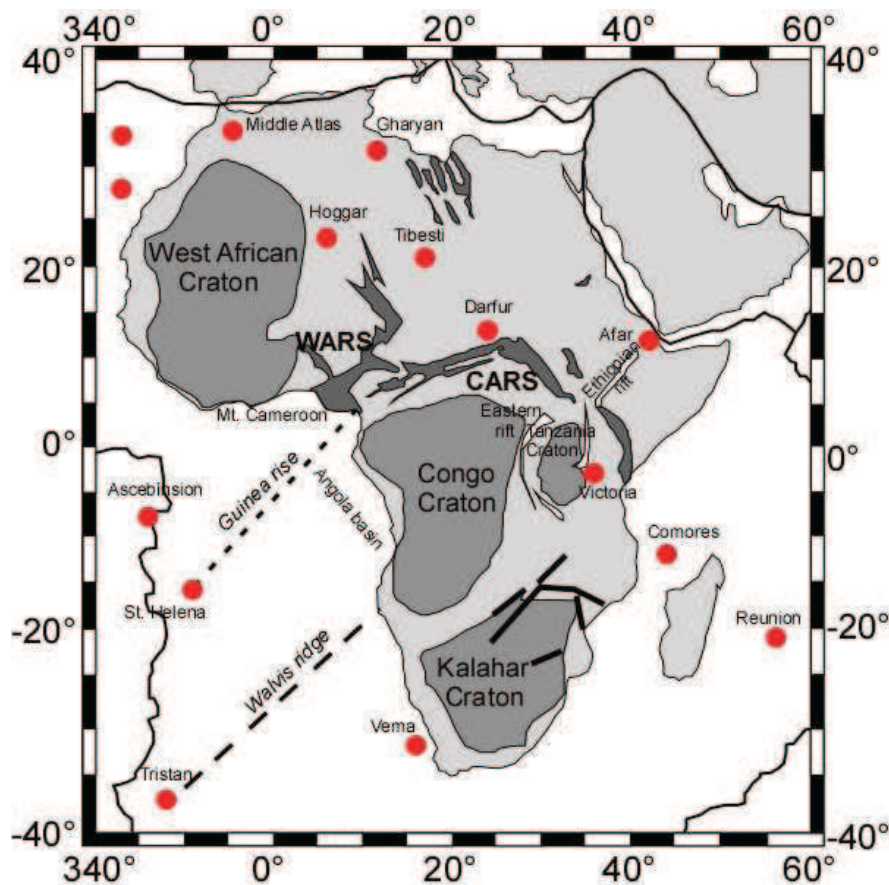


Figura 2.1 – Mapa tettonica dell’Africa: il West African (WARS), il Central African (CARS) e l’Anza Rift System corrispondono a bacini di rift mesozoici. L’Ethiopian e L’Eastern rifts hanno un’età approssimativa di 30 Ma. Con i punti rossi sono evidenziati gli hotspot mentre con il colore grigio scuro i cratoni (da Sebai et al., 2006).

L’attività vulcanica cenozoica si è diffusa principalmente nella parte settentrionale della placca africana. Nella parte meridionale del continente il vulcanismo Cenozoico risulta essere scarso. E’ presente nelle Province di Namaqualand-Bushmanland e di Cape, nel Sudafrica occidentale, dove si rinvencono numerosi piccole guglie melilititiche di età dai 77 ai 54 Milioni di anni (Ma) (Duncan et al., 1978; Moore and Verwoerd, 1985; Verwoerd et

al., 1990) ed in Namibia, co una età da 50 a 48 Ma (Reid et al., 1990). Fonoliti e melilititi di età più giovane sono presenti nel sudovest della Namibia (37-35 Ma; Kröner, 1973). Nel resto dell’Africa il vulcanismo Cenozoico può essere suddiviso in 4 gruppi: 1) la grande catena vulcanica legata all’East African Rift (EAR) (800,000 km³; Ebinger & Sleep, 1998); 2) la Cameroon line; 3) le province vulcaniche localizzate all’interno del basamento Precambriano dell’Africa nord occidentale, qualche volta legate a rigonfiamenti e 4) le province associate alla catena alpina dell’Atlas. In questi 4 gruppi il vulcanismo ha inizio circa 45 Ma e arriva fino al presente (Liégeois et al., 2005; e referenze ivi contenute). Il vulcanismo cenozoico africano ha una composizione principalmente alcalina. Le associazioni ricche in Na includono queste serie: basalti alcalini-trachiti-rioliti peralcaline; basalti alcalini-fonoliti e carbonatiti; mentre le associazioni ricche in K caratterizzano principalmente il settore occidentale dell’ EAR. I basalti tholeitici o transazionali rappresentano i componenti principali dell’area vulcanica dell’Afar (Barberi *et. al.*, 1975), di altre parti dell’Etiopia (Mohr, 1983 a, b) e della provincia vulcanica del lago Kivu (Holmes, 1940; Baily, 1974). Attività vulcaniche siliciche sono state riscontrate solo nel Tibesti (Vincent, 1970; Raffone, 2003).

2.1 LA FASCIA SAHARIANA

Uno studio che verta sul distretto vulcanico di Azrou-Timhadite (Atlante Medio) non può prescindere da una valutazione della situazione geologica a grande scala, oltre che da una lettura critica della bibliografia scientifica disponibile per l'area Nord africana (fig. 2.1.1).

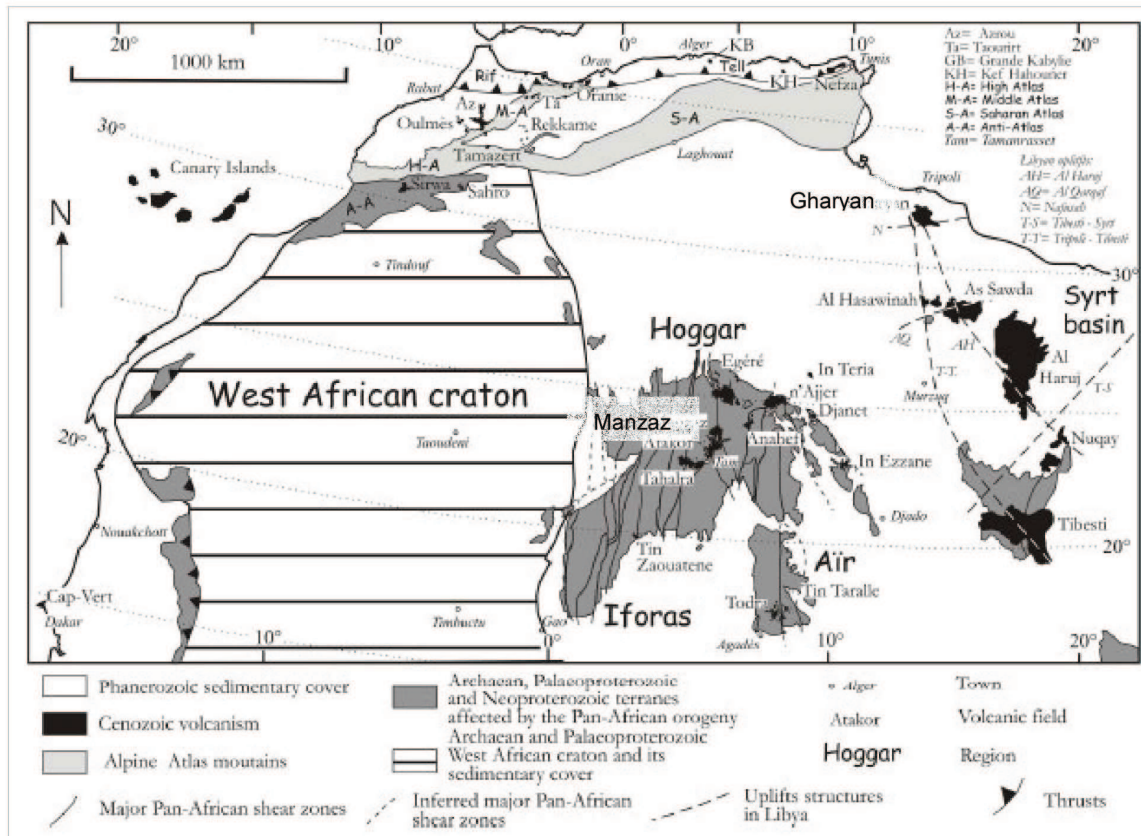


Figura 2.1.1 - Sketch map della regione del Sahara Nord – occidentale (da Liégeois et al., 2005). Sono riportati i principali elementi tettonici e strutturali del West African Craton (WAC) e Saharan Meta – Craton (SMC), oltre che le province vulcaniche di Hoggar e Libia occidentale.

La fascia sahariana ricade in un contesto litosferico, la placca africana, che include aree cratoniche anche estremamente antiche, risalenti in alcuni casi all'Archeano e spesso al Proterozoico, oltre che terreni successivamente rimobilizzati ed aree magmatiche di recente (Terziario) e recentissima (Quaternario) origine. I dati pubblicati di tomografia sismica in tre dimensioni (GEMOC, 2005; Liégeois, 2005; Davaille et al., 2005; Sebai et al., 2006), per la fascia sahariana, anche se in modo non completamente concorde nell'interpretazione,

permettono comunque di individuare alcune ben distinte strutture litosferiche di scala regionale:

- il West African Craton (WAC) occupa la parte preponderante della porzione Nord occidentale della placca africana, estendendosi dal Golfo di Guinea sino a lambire i confini territoriali di Marocco ed Algeria, costeggiando i limiti continentali lungo l'Oceano Atlantico. Tutte le fonti di letteratura, nel caso di questo importante elemento della Placca Africana, concordano su di un punto essenziale, e cioè a proposito delle profonde radici litosferiche, le quali sembrano addirittura superare i 300 km.

- lungo i margini del WAC, soprattutto per ciò che riguarda i settori orientali, sono presenti porzioni interessate da un assottigliamento litosferico più o meno marcato, costituite probabilmente da terreni di origine cratonica, ma spesso tagliati da profondi lineamenti crostali, rimobilizzati in periodi successivi al Proterozoico e che costituiscono quello che in letteratura è definito col nome di Sahara Meta-Craton (SMC), il quale si estende a tutta l'Africa settentrionale (Liégeois, 2005).

- il SMC, come detto, è caratterizzato da processi di assottigliamento litosferico anche molto marcati, ai limiti esterni del cratone, come testimoniato a Nord dalle province vulcaniche collegate alla catena montuosa dell'Atlante (facente parte dell'orogenesi alpina), e a Sud, da province vulcaniche di notevoli dimensioni, come la Cameroon Line, che dalla parte centrale del Golfo di Guinea si estende in direzione Nord – Est congiungendosi con il braccio Nord – occidentale del sistema dalla Rift Valley etiopica in corrispondenza della provincia vulcanica del Darfour (GEMOC, 2005).

2.1.1 VULCANISMO CENOZOICO

Il Tibesti e la provincia vulcanica Libica

L'insieme dei prodotti vulcanici del **Tibesti** copre una superficie di 30000 km² per un volume totale di circa 3100 km³ (Liegeois et al., 2005 e referenze ivi contenute) che sono messi in posto al centro del "Tibesti swell", nel quale l'erosione ha messo a nudo il basamento Precambriano (a 2000 m di altitudine sul livello del mare) oltre che uno spesso strato di sedimenti paleozoici; la superficie di erosione è coperta dalla formazione delle arenarie nubiane, del Cretaceo Inferiore. Tutto ciò a testimoniare differenti stadi di innalzamento crostale. L'attività effusiva è però estremamente più recente, risale infatti al Miocene Inferiore con la costruzione dell'edificio vulcanico di Ehi Toussidé (che attualmente mantiene una saltuaria attività fumarolica), mentre il centro eruttivo più

importante, Emi Koussi (60-70 km di diametro e 3415 m di altezza), è datato tra 2.3 e 1.3 Ma (Liegeois et al., 2005 e referenze ivi contenute).

Dal punto di vista vulcanologico la storia evolutiva del Tibesti è distinguibile in quattro eventi differenti, costituiti tutti da prodotti relativamente primari di serie alcalina e tholeiitica, nonché dei relativi differenziati.

Questi ultimi diminuiscono quantitativamente passando dai due eventi più antichi a quelli più recenti, costituendo solo il 2% dei materiali dell'intero complesso (Liegeois et al., 2005 e referenze ivi contenute).

Jabal Nuqay (anche detta **Eghei**) è il più meridionale dei distretti vulcanici di pertinenza geografica libica e probabilmente è quello meno trattato nella letteratura scientifica; esso è spesso associato al massiccio del Tibesti, non solo per vicinanza, ma anche dal punto di vista dei prodotti effusivi, consistenti di colate basaltiche che sovrastano sedimenti dell'Eocene medio, gemelle di quelle reperibili proprio nel Tibesti Swell (Liegeois et al., 2005 e referenze ivi contenute).

Jabal Al Haruj Al Aswad (più semplicemente detto **Al Haruj**) oltre ad essere, in assoluto il distretto vulcanico più esteso della Provincia Libica, ma anche dell'Africa occidentale (la superficie totale ammonta a circa 45000 km², Busweril e Wadsworth, 1980), è il più studiato tra tutti i distretti libici; i prodotti eruttati, le cui datazioni K/Ar coprono un intervallo temporale abbastanza ristretto (6 – 0.4 Ma, Ade-Hall et al., 1974) sono distribuiti in due eventi costituiti entrambi da basalti alcalini (Busweril & Wadsworth, 1980).

Lavori più recenti (Liegeois et al., 2005 e referenze ivi contenute), invece, rilevano come ad Al Haruj i prodotti vulcanici coprano un intervallo che va dai basalti subalcalini a quelli alcalini e come, inoltre, non siano presenti differenziati.

Questa caratteristica, unita alla grande quantità di lave eruttate, può essere spiegata con la presenza contemporanea di tre distinti sistemi strutturali distensivi, i quali hanno favorito l'uscita a giorno dei magmi prodotti.

Il Distretto Vulcanico di **Jabal As Sawdah** si estende per una superficie di circa 6000 km², probabilmente superiori ai 10000 km² in origine (Liegeois et al., 2005; e referenze ivi contenute) ed è situato all'intersezione di due importanti strutture di innalzamento, di cui la principale, con direzione NNO – SSE, si estende da Tripoli sino al distretto di Nuqay e, perpendicolarmente ad essa, si trova il sistema di faglie di Qarqaf, contraddistinto da una direzione OSO - ENE (Liegeois et al., 2005 e referenze ivi contenute).

As Sawdah, come Al Haruj, è costituito esclusivamente da rocce effusive, poco differenziate, caratterizzate prevalentemente da un sistema di alimentazione di tipo fissurale; oltre ai plateau basaltici, al centro della provincia vulcanica, sono presenti anche centri eruttivi allineati secondo la direzione di sollevamento.

Dal punto di vista composizionale, le rocce più comuni sono basalti s.l., i quali coprono un intervallo dalle olivin-tholeiiti alle basaniti, con una tendenza all'aumento della sottosaturazione in silice e alla diminuzione dei volumi eruttati per i prodotti più recenti (Liegeois et al., 2005 e referenze ivi contenute).

Sia le evidenze stratigrafiche che le datazioni K/Ar (Liegeois et al., 2005 e referenze ivi contenute) concordano per una collocazione temporale delle lave di As Sawdah successiva all'Oligocene, per un periodo variabile tra i 15.2 e 8.7 Ma.

Al Hasawinah è il meno importante dei distretti vulcanici libici; geograficamente molto vicino ad As Sawdah, è situato proprio in coincidenza dell'intersezione del lineamento Tripoli – Tibesti (di direzione NNO – SSE) con il sistema di sollevamento di Al Qarqaf, con direzione OSO – ENE (Busrewil e Oun, 1991; Liegeois et al., 2005).

I prodotti eruttati, a differenza di As Sawdah, oltre a basaniti e basalti alcalini ad olivina mostrano anche differenziati quali trachiti e fonoliti (Busrewil e Oun, 1991; Liegeois et al., 2005 e referenze ivi contenute).

Le datazioni radiometriche disponibili in letteratura (K/Ar, Liegeois et al., 2005 e referenze ivi contenute) indicano una messa in posto precedente a quella della provincia gemella di As Sawdah e coprono un intervallo temporale che si estende dai 24.9 ai 15.7 Ma.

Il distretto vulcanico del **Gharyan** consiste in un vecchio (55-50 Ma) plateau basaltico di 3000 km² di estensione, di duomi fonolitici risalenti circa a 40 Ma, e in giovani centri vulcanici (12-1 Ma). I basalti del plateau sono transazionali tra tholeitici e alcalini. I duomi fonolitici sono esclusivamente localizzati a Nord e a Nord-Est del plateau (Jaball Nefusah area; Bausch, 1978; Bausch & Medusa, 1991), e i prodotti sono fortemente sottosaturi in silice e peralcalini (Busweril & Wadsworth, 1980b). I centri vulcanici più recenti sono costituiti principalmente da lave basanitiche ma comprendono anche mugeariti e hawaiiti.

L'Hoggar

La Provincia Vulcanica del Hoggar, detto anche Ahaggar, è situata in terreni archeani e proterozoici, con un diametro di circa 1000 km, rimobilizzati nel corso dell'orogenesi Pan – africana che prendono il nome di scudo Tuareg (Tuareg shield), occupando la porzione più

occidentale del Saharan Meta – Craton (SMC), a sua volta confinante col West African Craton (WAC); l'intera area è percorsa da sistemi di mega – faglie litosferiche (Liégeois et al.,

2005; e referenze ivi contenute).

Durante il Cenomaniano Superiore ed il Turoniano (95-90 Ma) un braccio di mare collegante il sistema Tetide – Mediterraneo con il nascente Oceano Atlantico ha diviso i massicci di Hoggar e Tibesti (Liégeois et al., 2005; e referenze ivi contenute), che già nel Cretaceo erano in situazione di alto strutturale, in quanto molto poco dei sedimenti continentali precedentemente messi in posto si è conservato.

Il sollevamento cretacico è collegato ad una serie di lineamenti che delimitano sia ad Ovest che ad Est la Provincia di Hoggar, anche se i movimenti verticali di maggiore importanza sono avvenuti nel Cenozoico, tant'è che i terreni risalenti al Cretaceo attualmente sono posti a 2000 – 3000 m sul livello marino (Liégeois et al., 2005; e referenze ivi contenute).

L'attività magmatica per le province vulcaniche del Hoggar inizia nel tardo Eocene – Oligocene inferiore (35-30 Ma; Aït – Hamou et al., 2000) e continua almeno sino al Neolitico; sono state infatti trovate ceramiche risalenti a quel periodo all'interno di alcune colate laviche (Liégeois et al., 2005); la copertura vulcanica sembra piuttosto sottile (con uno spessore medio di 100 metri circa) se si escludono alcuni casi particolari, come per il plateau basaltico di **Anahef**.

In Hoggar si possono identificare tre principali episodi magmatici, distribuiti per i diversi distretti vulcanici della regione.

Il primo episodio vulcanico in Hoggar (Eocene superiore – Oligocene, 30 – 35 Ma, Aït – Hamou et al., 2000) è osservabile esclusivamente nel plateau tholeiitico di Anahef che ricopre una superficie di 400 km². Esso è associato ad un sistema di alimentazione di tipo fissurale ed è caratterizzato da una elevata produzione di magmi (con un volume stimato attuale di 200 km³, ma stimato originariamente di 1000 km³), tale che, unico caso per la regione del Hoggar, lo spessore del plateau supera i 700 m (Liégeois et al., 2005).

A quest'ultimo è anche associata una dozzina di **complessi subvulcanici anulari** (Liégeois et al., 2005; e referenze ivi contenute) con magmi differenziati caratterizzati da un intervallo composizionale che dai gabbri passa alle nefelin – sieniti; l'età dei complessi anulari, come dimostrato dal fatto che sono erosi sino alle loro porzioni più profonde, è coeva al sollevamento dell'area.

Il secondo episodio magmatico (di età miocenica, 20 – 12 Ma, e mio – pliocenica, 8.5 – 4 Ma; Liégeois et al., 2005 e referenze ivi contenute) è quello quantitativamente più rilevante dal punto di vista dell'attuale superficie ed è costituito per circa l'80% di basalti alcalino – transizionali, per il 18% di trachiti e fonoliti e la restante parte di rioliti. Questo evento è ben rappresentato sia nel massiccio di **Atakor** (2150 km²) che di **Manzaz** (1500 km²): nel primo caso, è evidente una distribuzione areale, con le lave meno differenziate nella zona centrale del massiccio e le altre ad occupare preferenzialmente le porzioni periferiche; a Manzaz, invece, questo evento magmatico è osservabile come una diffusa copertura di lave basaltiche molto vescicolate che hanno attraversato il basamento granitico Pan – africano. Per questi prodotti le datazioni radiometriche indicano un intervallo temporale risalente al Miocene Superiore (8.4 – 6.8, nel caso dell'area di **Djanet**; Morten et al., 1978; Liégeois et al., 2005).

Il terzo evento vulcanico è avvenuto tra il tardo Pliocene ed il tardo Quaternario (da 3 Ma sino in epoca preistorica) ed è presente in diversi distretti vulcanici presenti in Hoggar; di seguito, per esigenze di chiarezza espositiva, vengono descritti esclusivamente quelli più importanti dal punto di vista dei volumi prodotti e/o studiati in letteratura. Nel distretto vulcanico di **Atakor** i magmi prodotti sono quasi interamente costituiti da basaniti, spesso vescicolari e con un abbondante contenuto di analcime; scarse colate di natura nefelinitica possono coprire le valli e i terrazzi del Paleolitico superiore.

A **Tahalra** (circa 1800 km² di superficie totale), un unico episodio vulcanico Plio – Quaternario ha costruito piccoli strato-vulcani ad attività stromboliana che hanno eruttato prodotti da basalti – hawaiiiti, basaniti a nefeliniti (e relativi differenziati) nelle seguenti proporzioni: basaniti 80 %, nefeliniti 15 %, hawaiiiti – mugariti 2 %, trachiti 1 % e rioliti 2% (Liégeois et al., 2005). **In Teria** è senza dubbio uno dei distretti vulcanici meno rilevanti dal punto di vista della quantità di magmi prodotta (solo 100 km² di superficie totale; Liégeois et al., 2005), ma riveste un importante ruolo dal punto di vista della tipologia dei prodotti eruttati. Esso, infatti, è composto di una ventina di diatremi, alcuni di questi sono circondati da tufi di origine freatomagmatica, ed è posto in posizione periferica rispetto al corpo principale del Hoggar.

I prodotti piroclastici presenti nella regione, spesso inglobati in cemento calcitico, variano da blocchi di lava (fino a 1 m di dimensioni massime), lapilli, megacristalli di olivina e flogopite e vari xenoliti, sia di origine mantellica che crostale; secondo gli autori i blocchi di

lava di composizione melilitica potrebbero rappresentare la lava originaria (Dautria et al., 1992; e referenze ivi contenute).

Oltre ad In Teria, l'unico ulteriore distretto eruttivo conosciuto in Hoggar per il quale è segnalata la presenza di xenoliti di mantello (di tipo sia peridotitico che pirossenitico) è **Manzaz**, più precisamente, in corrispondenza di alcuni piccoli coni effusivi di tipo stromboliano, costituiti per il 95 % di basalti alcalini, basaniti ed hawaiiiti appartenenti alla serie alcalino – sodica (Liégeois et al., 2005).

2.2 L'ATLANTE

La catena dell'Atlante è un raro esempio di un sistema orogenetico recente di intraplacca in stretta vicinanza ad una catena montuosa di interplacca (dominio del Rif), messi in posto sul bordo settentrionale del cratone dell'Africa occidentale (Morel et al., 2000). Si estende da NE a SW fra 34° e 31° parallelo N (Kabbaj et Combe, 1977) dalle coste atlantiche del Marocco fino a quelle mediterranee della Tunisia, e viene tradizionalmente suddivisa, da N a S, in Atlante Medio, Alto Atlante e Anti Atlante.

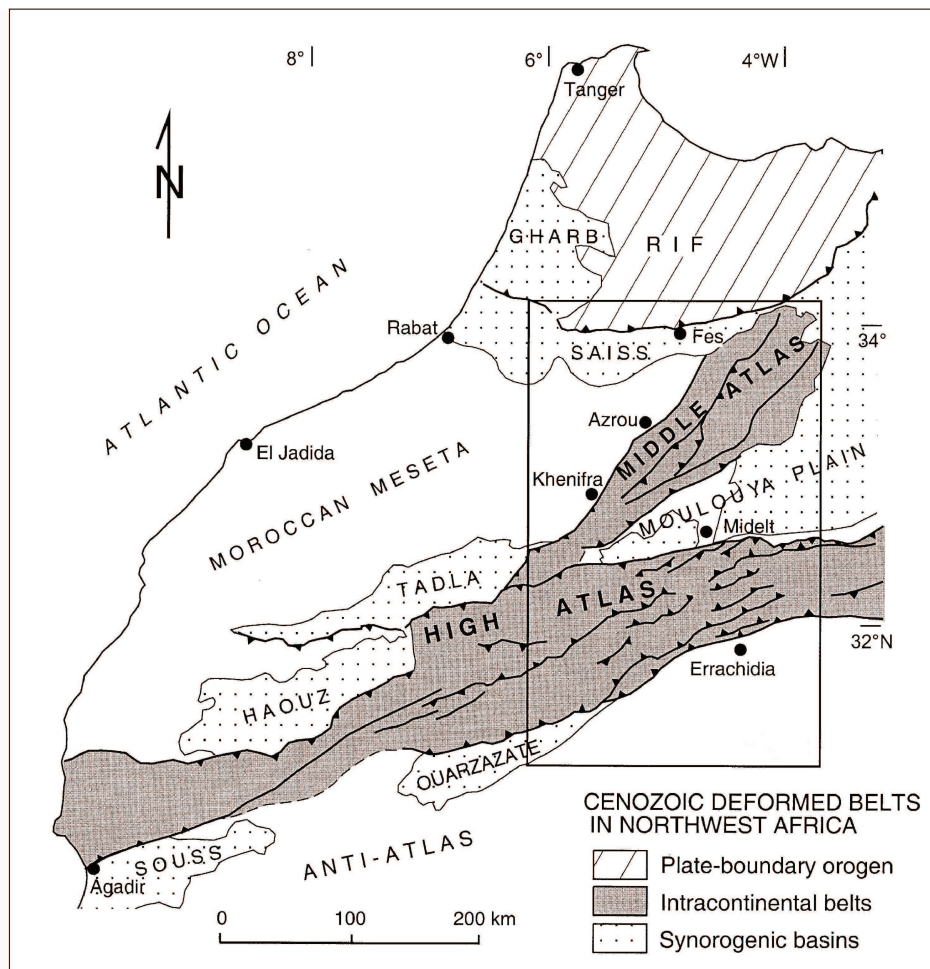


Figura 2.2.1 – Mappa tettonica del Marocco indicante l'assetto geologico della catena montuosa dell'Atlas (Arboleyla et al., 2004).

Il dominio dell'Atlante rappresenta anche una zona di transizione tra la piattaforma sahariana, dove si trovano terreni mesozoici dalla morfologia tabulare, e domini del Rif, caratterizzato da una tettonica a falde (fig. 2.2.1).

L'Alto Atlante

Le montagne dell'Alto Atlante sono le più alte della catena, con altezze massime di 4100m (Seber et al., 1996a). Sono caratterizzate da una potente serie calcareo-dolomitica del Lias-Baiociano che affiora quasi ininterrottamente sull'intera catena. Questa serie è sormontata da "red beds" di età bathoniano-cretacica, talvolta anche da sedimenti marini del Cretaceo superiore- Paleocene; tuttavia, questi ultimi sono limitati generalmente ai margini settentrionale della catena (Morel et al., 2000).

L'Atlante Medio

L'Atlante Medio è una catena di deformazione recente che si estende su una superficie di 13200km² (Moukadiri, 1983). La sua deformazione maggiore si è verificata durante l'Oligocene-Miocene (Michard, 1976) e per questo motivo è sede di un'importante attività neotettonica e sismica (Ramdani & Tadili, 1980; Ramdani, 1998; Fedan, 1989). Tale unità corrisponde (Moukadiri, 1983) alla zona delimitata a Nord dal solco della porzione meridionale del Rif e dal corridoio di Taza-Oujda, a Sud dalla parte mediana dell'Alto Atlante, a Est dalla Meseta orientale e a Ovest dalla Meseta occidentale (Plateau centrale). Tale catena è generalmente interpretata come una conseguenza orogenetica dell'inversione positiva di una fossa mobile che si formò durante le fasi distensive del Trias-Giura inferiore, collegate alla prima apertura dell'Oceano Atlantico (Laville & Piqué, 1991, Mattauer et al., 1977). L'inversione positiva che portò alla formazione della catena dell'Atlante Medio iniziò durante il Cretaceo-Paleogene (Du Dresnay, 1988, Mattauer et al., 1977). Tuttavia, importanti deformazioni compressive furono attivate anche durante il Neogene, contemporaneamente alla formazione della catena del Rif.

L'Anti Atlante

L'Anti Atlante marocchino marca il confine settentrionale del cratone dell'Africa occidentale (WCA). Tale regione è stata interessata dalle orogenesi panafricana, ercinica e alpina, con le ultime due che hanno riguardato principalmente il dominio Meseta-Atlante a Nord della South Atlas Fault (SAF) e secondariamente il dominio dell'Anti Atlante, situato a Sud della SAF.

L'Anti Atlante è costituito da un basamento cristallino precambriano sovrastato, in modo non uniforme, da rocce sedimentarie fanerozoiche debolmente piegate. La maggior parte degli studi hanno suddiviso quest'area in due parti separate da una faglia denominata "Anti-

Atlas Major Fault (AAMF), delineata dall'ofiolite panafricana di Bou Azzer (Leblanc, 1981): le rocce del basamento panafricano (700-600 Ma) che si trovano a nord-est della faglia. Tuttavia, questa semplice suddivisione è complicata dalla presenza dei graniti panafricani che affiorano a sud-est dell'AAMF (Aït Malek et al, 1998) e dalle litologie solo debolmente affette dall'orogenesi panafricana che si trovano a nor-est dell'AAMF (Choubert, 1963; Fekkak et al., 1999).

Ennih & Liégeois (2001), tuttavia, sulla base della letteratura recente e delle osservazioni fatte nelle località di Zenaga e Saghro, concludono che tutta la crosta dell'Anti Atlas appartiene al basamento eburniano, con una copertura sedimentaria inferiore risalente al Neoproterozoico, sottile a Sud ma più spessa a Nord della AAMF, con un assemblaggio di frammenti alloctoni di crosta oceanica di età panafricana a di graniti post-collisionali (585-560 Ma) alcalini e calcalcalini (ricchi in K) associati a rocce vulcaniche. Il magmatismo è contemporaneo alla principale fase di accatastamento dei terreni appartenenti allo scudo del Tuareg che provocò uno stress addizionale in corrispondenza del confine settentrionale del WAC (Ennih & Liégeois, 2001).

2.2.1 IL VULCANISMO DELL'ATLANTE MEDIO

Le prime descrizioni relative a questa provincia vulcanica sono state fatte da Gentil (1916), mentre i primi studi petrografici risalgono a Termier (1936). Gli studi geocronologici basati sul metodo K-Ar, fatti da Harmand & Cantagrel (1984), hanno permesso di individuare le attività vulcaniche principali che hanno interessato la regione in esame (fig 2.2.2).

Dall'Eocene (circa 35 ± 3 Ma), la regione è stata la sede di un vulcanismo alcalino che ha dato origine ad una quindicina di apparati affioranti, attualmente, sotto forma di corpi largamente erosi. Alcuni pensano che queste strutture siano collegate al complesso sienitico-carbonatitico di Bou-Agrao situato nell'Alto Atlante (Jeremine, 1949; Agard, 1956). In effetti, età di 40 Ma (Rb-Sr e K-Ar, Charlot et al., 1967) sono state ottenute sulle biotiti di questo massiccio. La composizione delle lave è essenzialmente melanefelinitica a olivine (\pm meliliti), e solo in un caso ijolitica (Termier et al., 1948; Harmand & Cantagrel, 1984). Si tratta di un'attività poco importante, la maggior parte della quale verrà mascherata da quella quaternaria.

Durante il Miocene medio-superiore (tra 15 e 6 Ma), una diffusa attività vulcanica, contemporaneamente all'orogenesi del Rif e alla risalita del Marocco centrale, interessa

l'Atlante Medio. I vulcani sono distribuiti in corrispondenza di una linea tettonica con orientazione N 40-60, riattivata dalla tettonica miocenica, e sono associati a lave con una composizione da melanefelinitica a ijolitica (Morel et al., 1983).

Durante il Pliocene superiore-Quaternario medio (1.8 – 0.5 Ma), un vulcanismo essenzialmente effusivo viene prodotto da circa 90 vulcani allineati secondo l'asse Azrou-Timahdite (Moukadiri, 1983) con orientazione N 170 (fig 2.2.3). Quest'ultima attività è stata interpretata da Harmand & Cantagrel (1984) come una risposta tettonica alla collisione delle placche europea e africana.

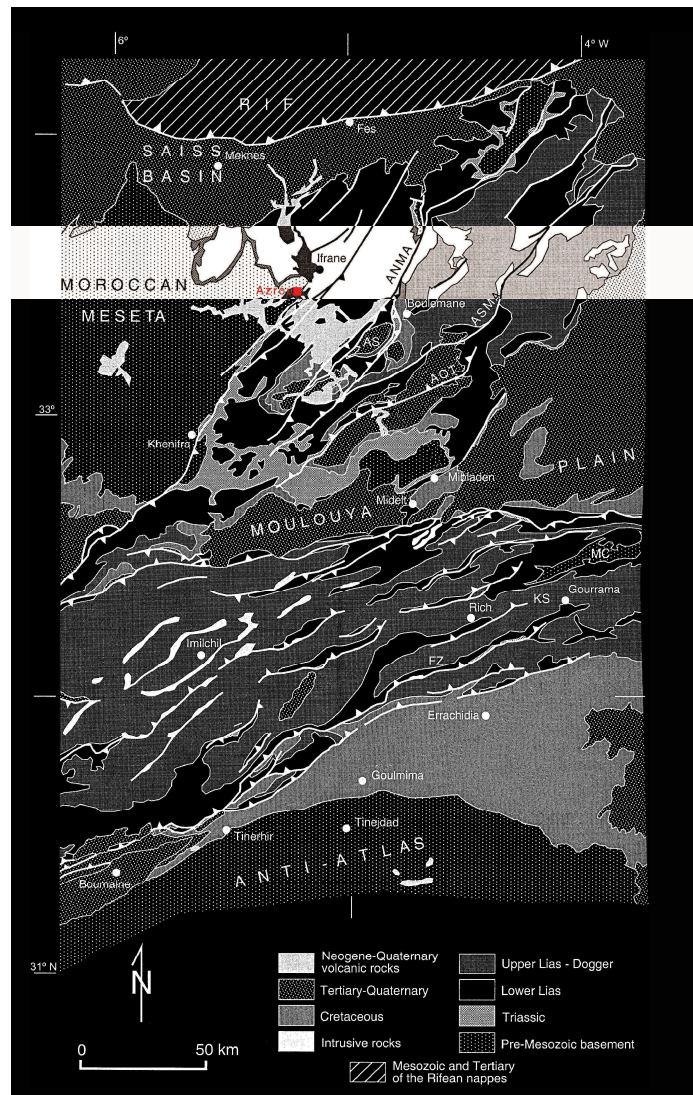


Figura 2.2.2 – Mappa geologica dell'area, dove: ANMA: North Middle Atlas fault; AS: Ain Nokra syncline; ASMA: South Middle Atlas fault; AOT: Oufella thrust; MC: Mougueur basement culmination; KS: Kerrando syncline; FZ: Foum Zabel thrust (da Arboleya et al., 2004).

Gli apparati vulcanici, morfologicamente ben conservati, sono costituiti per due terzi da coni di scorie, spesso saldati tra loro, e per un terzo da maar (Harmand & Moukadiri, 1986). Quest'ultima fase vulcanica, volumetricamente molto abbondante (circa 80 Km³ su una superficie di quasi 1500 km²), con lave con composizione essenzialmente basaltico-alcalina e basanitica con bassa percentuale di nefeliniti (5%), ha interessato tre tipi di substrati pre-vulcanici: a Nord, l'altopiano calcareo liassico mostra la più alta densità (80%) dei punti di emissione; al centro una dozzina di vulcani sono sparsi sull'Atlante Medio detto "Corrugato" (Moyen Atlas "plissé"); infine a Sud, i fianchi del graben dell'Alta Moulouya sono sottolineati da numerose bocche vulcaniche (El Azzouzi et al., 1999).

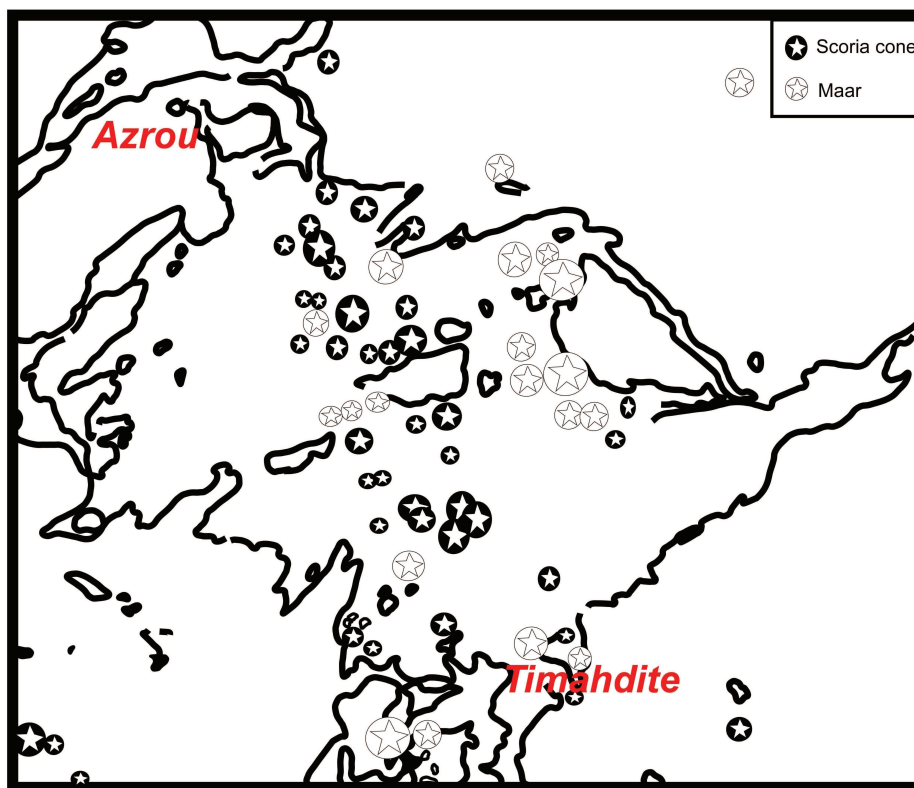


Figura 2.2.3 – Distribuzione degli apparati vulcanici nel distretto vulcanico di Azrou-Timahdite, il principale dell'Atlante Medio (da Moukadiri, 1983).

2.3 LA RIFT VALLEY

2.3.1 ASSETTO VULCANO-TETTONICO

La provincia magmatica oligocenico-quadernaria dell'Etiopia costituisce una delle grandi LIP (Large Igneous Province) della Terra, ossia una delle aree del pianeta dove, in momenti apparentemente casuali durante la storia della Terra, si è verificato un fenomeno magmatico di enorme magnitudo, caratterizzato dall'eruzione di grandissimi volumi di magmi. L'ipotesi generalmente accettata (es. Morgan, 1972; Shen et al.,1998; Bijward e Spakman,1999) è che le LIP siano da relazionare alla risalita di plumes che, generati nel mantello profondo al limite col nucleo per cause ancora sconosciute, diventano gravitativamente instabili e risalgono verso l'alto fino a collidere la litosfera a pressione relativamente bassa, provocandone la fusione parziale, con conseguente generazione di enormi volumi di magmi basaltici eruttati in tempi anche molto brevi.

Il sistema di rift etiope si trova sul vasto plateau etiope-yemenita, che si dev'essere sviluppato al di sopra di uno o due plumes mantellici del Paleogene (Ebinger and Sleep,1998; George et al.,1998; fig. 2.3.1). La composizione dei basalti oligo-miocenici di plateau va da tholeiitici a transizionali; associati ad essi ci sono minori quantità di ignimbriti riolitiche, seguite dalla formazione di enormi vulcani centrali di basalti transizionali e alcalini e da un esteso magmatismo plio-quadernario messo in posto durante le fasi principali di apertura del rift. Quest'ultimo ha prodotto essenzialmente piroclastiti acide iperalcaline cui si alternano modeste quantità di prodotti basici transizionali e alcalini.

Una sintesi dei dati geocronologici basati sul rapporto $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ indica che i flood basalts furono eruttati su una regione di circa 1000 Km di diametro, 31 Ma fa (Baker et al.,1996; Hofman et al.,1997). Il magmatismo degli scudi basaltici intervenne immediatamente dopo l'inizio del rifting nel Golfo di Aden e prima o contemporaneamente all'inizio della distensione nel Mar Rosso (e.g., Bott et al., 1991; Menzies et al.,1997). La produzione di crosta oceanica in direzione NE nel Golfo di Aden si propagò verso ovest nella depressione dell'Afar a partire da 25 Ma (Manighetti et al., 1998). La produzione di crosta oceanica con direzione NE nel Mar Rosso cominciò circa 4 Ma fa (Cochran, 1983). La connessione fra i centri di emissione del Mar Rosso e del Golfo di Aden avviene nella depressione dell'Afar, ad ovest della microplacca Danakil (Acton et al., 2000).

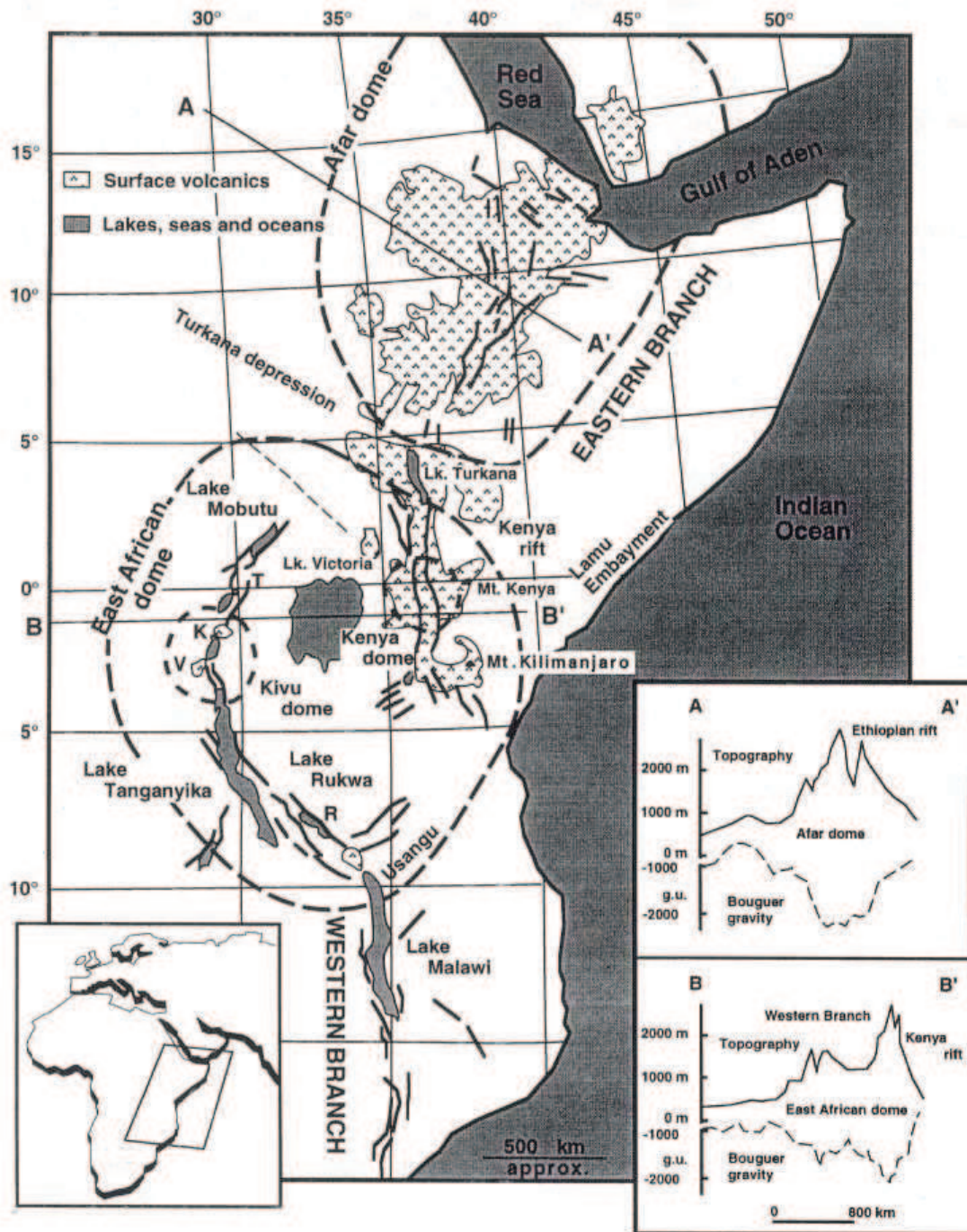


Figura 2.3.1 - Mappa del rift etiopo-yemenita e delimitazione dei plumes mantellici con indicazione (nei riquadri) dell'anomalia topografica e di gravità da essi provocata (Ebinger et al., 1989).

Il Main Ethiopian Rift (MER), orientato N-NE, cominciò ad aprirsi nel tardo Miocene e si sta distendendo tutt'ora con direzione $108^\circ \pm 10^\circ$ ad una velocità di 4 mm/anno (Bilham et al., 1999). I dati geofisici indicano che l'anomalia termica associata con il plume mantellico persiste tutt'ora. Knox et al. (1999) hanno riportato velocità delle onde S anormalmente basse nel mantello superiore sottostante l'Afar a profondità fra 60 e 130 Km,

cosa che comporta la presenza di zone di fusione parziale. Ritsema e Van Heijst (2000) hanno individuato tomograficamente una zona a bassa velocità che risale dal limite nucleo-mantello al di sotto dell’Africa meridionale fino alla base della litosfera sotto l’East Africa. In sintesi, nonostante sia molto complesso, il magmatismo oligocenico-quadernario dell’Etiopia può essere schematicamente suddiviso in tre fasi principali.

La prima, costituita da eruzioni fissurali di basalti tholeiitici e transizionali dominanti, a cui si alternano alcuni estesi espandimenti ignimbrici di composizione riolitica. La maggior parte dei basalti di plateau si è messa in posto in tempi molto brevi, tra circa 31-30 Ma fa (Hofmann et al.,1997).

La seconda, nel Miocene-Pliocene, presenta un cambiamento nelle modalità di eruzione e nella composizione dei magmi, a dare vulcani a scudo costituiti da basalti transizionali, alcalini e da pochi prodotti evoluti.

La terza e ultima fase, pliocenico-quadernaria, è quella più direttamente legata alla formazione del rift e porta in superficie prodotti a chimismo acido iperalcalino con scarse quantità di basalti prevalentemente transizionali. I prodotti intermedi sono quasi inesistenti all’interno del rift, mentre si concentrano sui margini, sotto forma di grandi vulcani (Wachacha, Ziquala, Wonchii, Yerer, Cilallo), con composizione apparentemente monotona di tipo trachitico.

2.3.2 II MAIN ETHIOPIAN RIFT (MER)

L’East African Rift System (EARS) è un esempio classico di un giovane (Terziario sup.-Quadernario) rift intracontinentale dove l’apertura del continente non si è ancora completata. Esso è suddiviso in un ramo occidentale e uno orientale. Insieme con i rift oceanici del Mar Rosso e il Golfo di Aden esso costituisce l’Afro-Arabian rift system (vedi figura 2.3.1).

L’Ethiopian Rift (ER) è la porzione più settentrionale dell’EARS che lo connette alla giunzione tripla dell’Afar. Cominciò a svilupparsi nel Miocene (Davidson and Rex,1980; WoldeGabriel et al., 1990), in seguito ad un ampio processo di doming centrato sull’attuale depressione dell’Afar (Ebinger et al., 1989). Si distinguono due settori dell’ER, il Main Ethiopian Rift (MER) verso nord, e il South Ethiopian Rift (SER) a sud-ovest. Il primo settore è caratterizzato da un generale andamento NE-NNE e dalla presenza di un esteso vulcanismo Quadernario nel “rift floor”. Il settore meridionale, invece, presenta un trend N-S

che costituisce la propagazione settentrionale del rift del Kenia (Moore e Davidson, 1978; WoldeGabriel e Aronson, 1987) e un magmatismo quaternario molto meno abbondante.

2.3.3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE

Il MER (lat 5°N - 9°N), lungo circa 800 Km e largo dai 60 agli 80 Km, ha un'elevazione media di 1600 m. I bordi del rift costituiscono degli altopiani alti fino a 2200 m, su cui si ergono edifici vulcanici come il Chike, il Chilallo e il Kaka, che raggiungono quote di 4200 m.

Il MER, che si estende in direzione S-SW dalla giunzione tripla rappresentata dal Lake Abbe, nella regione dell'Afar (Mohr e Wood, 1976), alla regione del Lake Turkana, è un graben asimmetrico compreso fra il plateau etiope e quello somalo: il margine orientale, infatti, è caratterizzato, in tutta la sua lunghezza, da ripide faglie con rigetti importanti (se confrontati con la distanza fra un blocco tettonico e l'altro); il margine occidentale invece mostra bruschi dislocamenti solo nel suo settore di NE, mentre in quello di SW le faglie hanno rigetti più ridotti, ribassamenti che via via vanno scomparendo verso sud. L'asimmetria è inoltre rimarcata dall'allineamento di giovani faglie del rift floor, che si colloca molto a ridosso del margine orientale.

Nel MER i prodotti vulcanici recenti sono marcatamente prevalenti rispetto a quelli più antichi, che, invece, affiorano con volumi maggiori nel settore sud-occidentale (SER).

Il MER, come già accennato, cominciò a svilupparsi nel tardo Miocene (Ebinger et al., 1993) e la sua distensione attuale stimata (~ 20%, β factor ~ 1.2: Ebinger et al., 1993) è considerevolmente piccola rispetto a quella dell'Afar, dove dovrebbe eccedere il 100% (β factor ~ 2: Berckhemer et al., 1975).

Nel MER si possono individuare tre distinti bacini di rift miocenici, entro cui si trovano i segmenti magmatici più recenti ossia Quaternari (figura 2.3.2):

- la faglia bordiera di Asela limita il bacino di Koka (Koka Magmatic Segment);
- quella di Guraghe limita il bacino di Ziway (Nazret Magmatic Segment);
- la faglia bordiera di Kesem è all'intersezione del rift oligo-miocenico del Mar Rosso con il Main Ethiopian Rift (Sabure Magmatic Segment).

I segmenti magmatici quaternari in essi compresi sono centri magmatici e zone di faglia normali, attive, strette, confinate entro la zona centrale della rift valley. Il loro rigetto verticale è dell'ordine di diverse decine di metri (Gibson, 1969; Acocella et al., 2001). La direzione media di estensione è circa N52°W (Acocella and Korme, 2002). Questo sistema

vulcano-tettonico, allungato NNE-SSW entro il rift floor, è denominato “Wonji Fault Belt” (WFB: Mohr, 1967a, Mohr, 1967b, Mohr,1987). Il vulcanismo di questi segmenti magmatici cominciò circa 1.6 Ma fa; la maggior parte delle colate fuoriuscì da fessure o piccoli coni di cenere (WoldeGabriel et al.,1990; Boccaletti et al., 1999).

Nel MER quindi si sono distinti due principali sistemi di faglia: uno orientato N30°-N40°E, che caratterizza soprattutto i margini del rift, e uno orientato N-S, N20°E, il Wonji Fault Belt (WFB) di Mohr (1962, 1967, 1987). L’importante asse vulcano-tettonico del WFB, collocato come detto entro la più ampia rift valley, secondo Meyer et al. (1975) cominciò a svilupparsi all’inizio del Pleistocene inferiore (~1.6 Ma fa), determinando l’importante discordanza esistente fra le “Wonji Series” (Pleistocene-Olocene) e le sottostanti “Nazareth Series”, i cui più recenti prodotti sono di circa 1.8 Ma fa (Bigazzi et al.,1993).

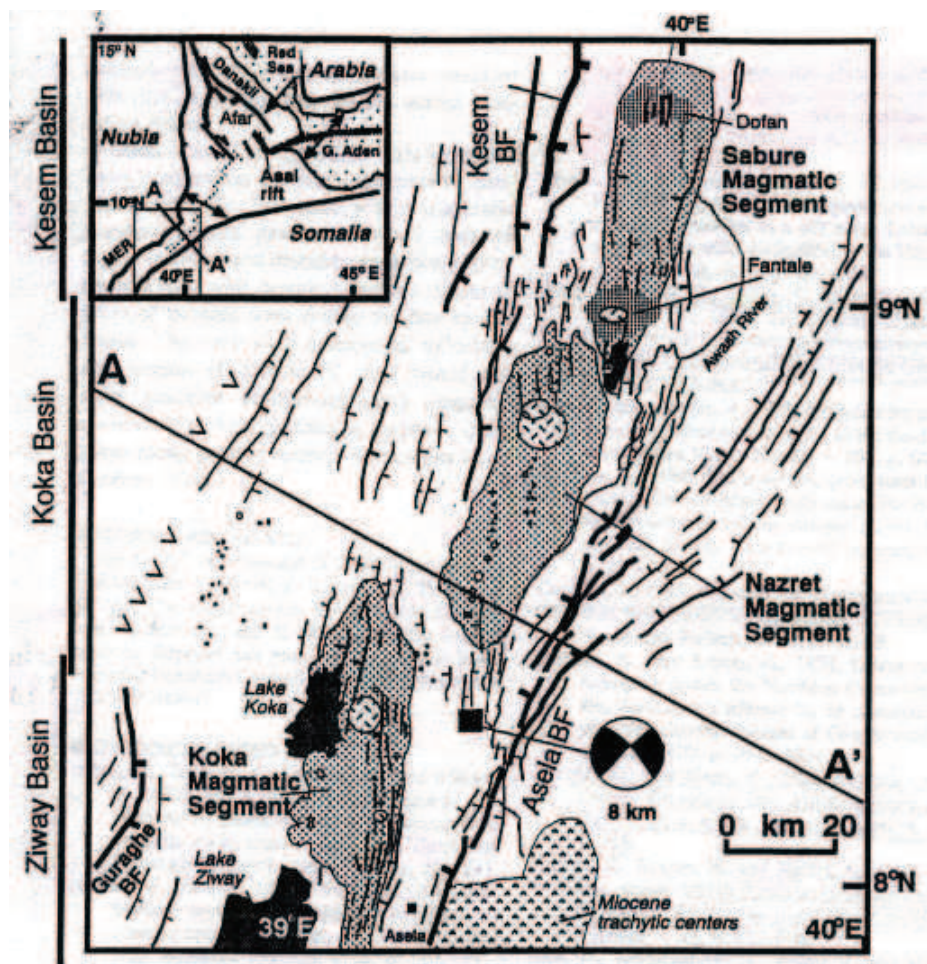


Figura 2.3.2 – Mappa dei segmenti magmatici quaternari (ombreggiato) e dei centri eruttivi (ellissi) rispetto alle faglie bordiere mioceniche (BF) nel Main Ethiopian Rift (MER) (Boccaletti et al., 1999; Berhe & Kazmin, 1978; Ebinger & Casey, 2001).

L'evoluzione tettonica del MER è stata in genere ricondotta ad un meccanismo distensivo di tipo pure shear (McKenzie et al.,1970; Le Pichon e Francheteau, 1978; Mohr, 1938; Ebinger et al., 1993). Tuttavia ci sono dati strutturali che indicano che la direzione d'estensione nel Quaternario era approssimativamente orientata est-ovest, a formare un angolo di circa 50° rispetto ai bordi del rift (Boccaletti et al., 1992, 1994, 1998; Abebe, 1993; Bonini et al., 1997). Questa direzione di estensione è confermata dalle orientazioni dei paleostress locali determinati con l'analisi di indicatori cinematici sugli specchi di faglia (Boccaletti et al., 1992, 1998). La distensione obliqua determinò una componente di taglio sinistra lungo il rift floor, che, a sua volta, provocò la formazione del sistema di faglie WFB (Mohr, 1968; Gibson,1969; Gibson e Tazieff, 1970; Boccaletti et al.,1992; Abebe et al.,1998b).

Vulcani compositi sono prevalentemente collocati sui bordi del rift; le strutture calderiche, invece, cui sono associati grandi orizzonti ignimbrici, si trovano nel settore centrale del rift, per lo più allineate lungo discontinuità strutturali (e.g. Mohr,1983,1987; Kazimin,1980).

3 PETROGRAFIA E CHIMISMO DEGLI ELEMENTI MAGGIORI

3.1 NODULI DI MANTELLO DI AZROU (Atlante Medio, Marocco)

3.1.1 DESCRIZIONE PETROGRAFICA

I noduli di mantello sono stati campionati in un maar di circa 1 km di diametro situato nei pressi di Ibalrhatene, nel distretto vulcanico di Azrou-Timahdite, nell'Altante Medio (Marocco, Latitudine 33° 21' N e Longitudine 5° e 08' O) (fig. 3.1.1).

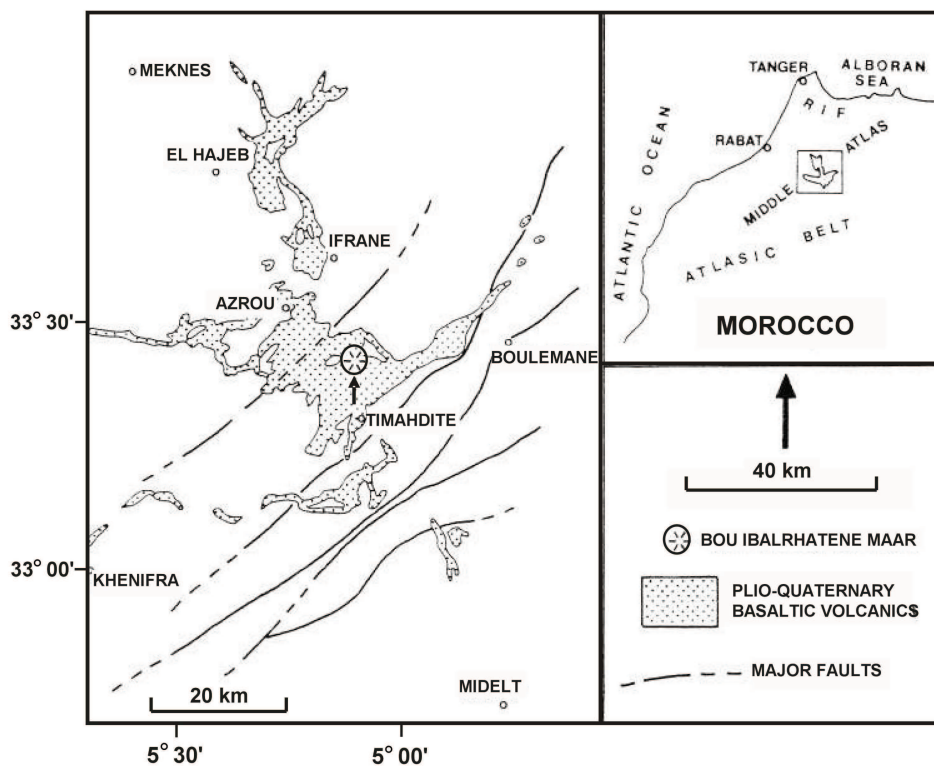


Figura 3.1.1 – Mappa del distretto vulcanico di Azrou-Timahdite (modificata da Raffone et al., 2009).

Gli xenoliti, inclusi in basalti plio-quadernari, risultano avere dimensioni modeste con diametro variabile da 1 a 3 centimetri; la paragenesi primaria individuata è composta da olivina (ol), ortopirosseno (opx), clinopirosseno (cpx) e spinello (sp) come fase alluminifera.

Già dall'osservazione macroscopica una parte consistente della campionatura è apparsa in avanzato stato di alterazione, in particolar modo, le olivine, sembrano aver subito uno spinto processo di ossidazione presentandosi a volte completamente trasformate in minerali

secondari di colore giallo ocra, lasciando invece pressoché intatti i due pirosseni. Questi ultimi risultano infatti facilmente distinguibili: gli ortopirosseni, di colore miele e i clinopirosseni dal caratteristico colore verde smeraldo. In altri casi i processi di alterazione non sembrano aver svolto un ruolo determinante, permettendo di distinguere senza problemi colore e grana originaria delle quattro fasi mineralogiche (olivina, ortopirosseno, clinopirosseno e spinello). Per le fasi successive di questo studio sono stati pertanto selezionati esclusivamente gli xenoliti quindi poco o per nulla alterati. Sono state quindi ricavate le sezioni sottili per l'osservazione al microscopio ottico da 12 campioni, a composizione peridotitica (prevalentemente lherzolitica con il campione AT4: olivin-websterite).

Microscopicamente (fig. 3.1.2), i noduli sono caratterizzati da struttura che va da protogranulare a porfiroclastica con sovrainposte strutture pirometamorfiche dovute a reazioni metasomatiche. Le olivine si presentano nelle zone protogranulari generalmente a grana grossa con bordi lobati e con kink-banding. Le olivine delle zone porfiroclastiche si presentano in grandi cristalli fortemente deformati (porfiroclasti) e piccoli cristalli privi di deformazione (neoblasti). L'ortopirosseno è di norma presente in cristalli di grandi dimensioni di colore rosa - giallastro (per spessori maggiori di 100 μm), a volte con lamelle di essoluzione, e con contorni curvilinei. Anche per gli ortopirosseni delle zone porfiroclastiche vale la distinzione in porfiroclasti deformati e piccoli neoblasti. I clinopirosseni hanno dimensioni variabili; nelle zone pirometamorfiche risultano spesso caratterizzati da aspetto spugnoso (spongy) e a volte presentano bordi di reazione con formazione di corone di microcristalli prevalentemente di olivina. Gli spinelli presentano spesso un nucleo marrone e un bordo nero di reazione. Nelle zone protogranulari mostrano tipicamente bordi lobati a foglia di agrifoglio, mentre in alcuni campioni (AT3 e AT12) risultano completamente destabilizzati tendendo a divenire aggregati di piccoli cristalli neri. Altre strutture di reazione (pirometamorfiche) sono date da plaghette vetrose contenenti talvolta microcristalli non facilmente risolvibili al microscopio. Alcuni campioni risultano pervasi da vene e chiazze di basalto.

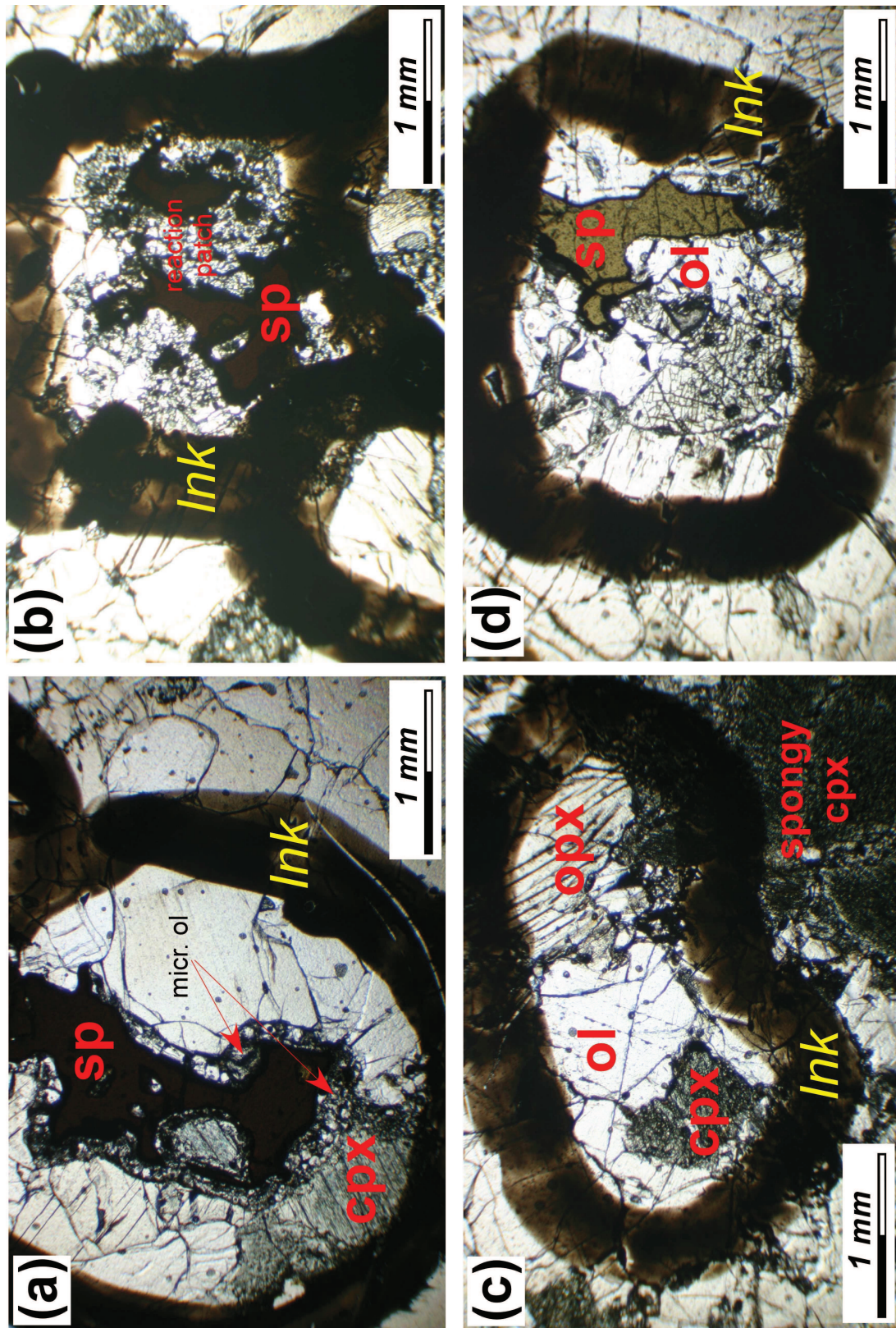


Figura 3.1.2 – Micrografie rappresentative delle tessiture e strutture degli xenoliti di Azrou.

3.1.2 ANALISI DEGLI ELEMENTI MAGGIORI SU ROCCIA TOTALE (XRF)

Per il sito di Azrou sono state effettuate le analisi in fluorescenza di raggi X (XRF) degli elementi maggiori (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 e di Pb, Zn, Ni, Co, Cr, V, Rb, Sr, Ba, Nb, Zr e Y) sono state condotte presso il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Ferrara, secondo le modalità e le specifiche analitiche descritte in Appendice A, su tutti e 12 i campioni da cui si era in precedenza ricavata la sezione sottile.

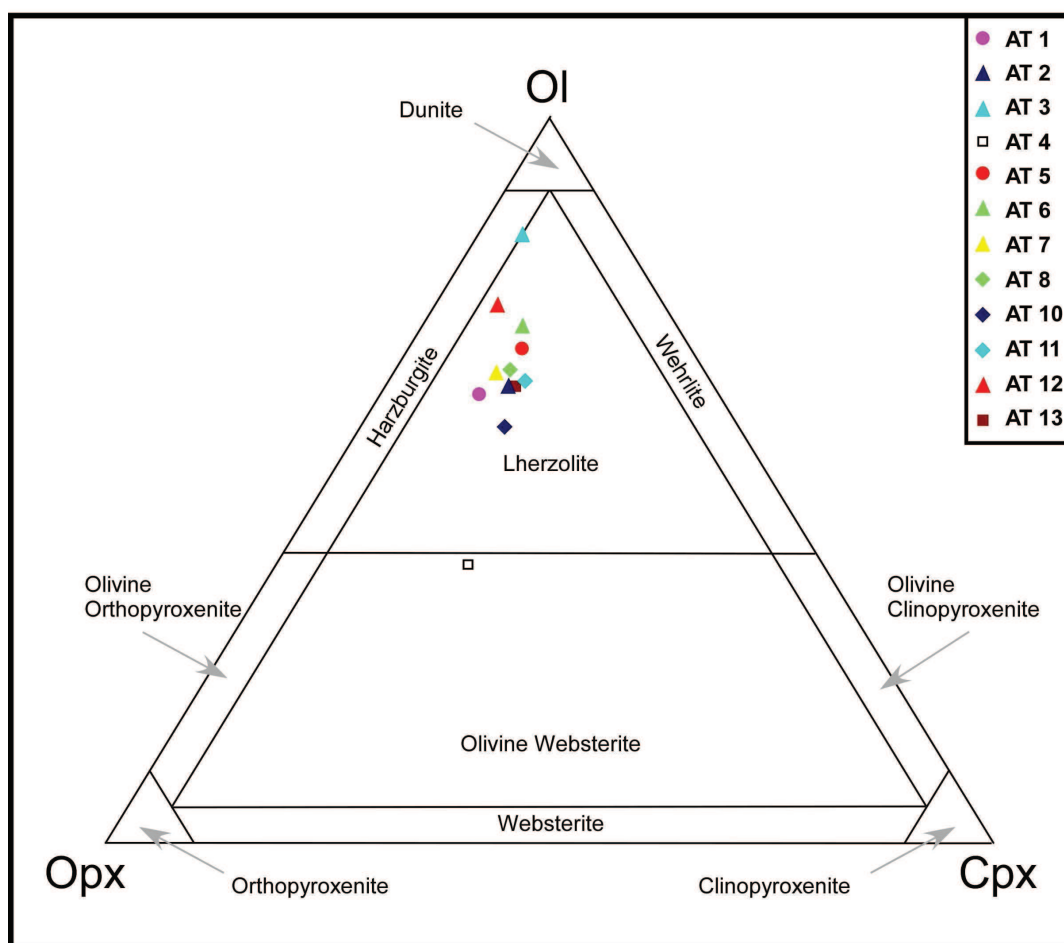


Figura 3.1.3 – Diagramma di classificazione delle rocce ultrafemiche, composizione modale degli xenoliti di mantello di Azrou in termini di olivina (Ol), ortopirosseno (Opx) e clinopirosseno (Cpx).

I valori degli ossidi ottenuti sono stati poi corretti considerando la L.O.I. (Loss On Ignition, letteralmente perdita al fuoco, calcolata per via ponderale) che è sempre risultata inferiore all'1 in percentuale in peso. Dalla classificazione effettuata su base normativa (dove le mode CIPW sono state riarrangiate come suggerito da Niu 1997 per la paragenesi ultrafemica) si evince che la campionatura è costituita da 9 lherzoliti variamente fertili con

contenuto in clinopirosseno variabile tra 11 e 16 wt%, 1 lherzolite impoverita con contenuto in clinopirosseno pari al 7 wt% (AT12), 1 harzburgite (AT3) e 1 olivin-websterite (AT4) (fig. 3.1.3).

Dai diagrammi di variazione degli ossidi principali (SiO_2 , CaO , FeO_{tot} , Al_2O_3 , TiO_2) e degli elementi in tracce più significativi (Ni e V) (fig. 3.1.4 e 3.1.5), si nota come tutti i campioni risultano essere compatibili con un'unica serie di xenoliti di mantello caratterizzati da un solo trend di fusione parziale. Questo trend è particolarmente visibile nell'andamento dell' Al_2O_3 e del CaO dove i campioni ben si sposano con i trend di fusione parziale di Niu (1997). Le analisi in fluorescenza su roccia totale sono contenute in tabella 1A.

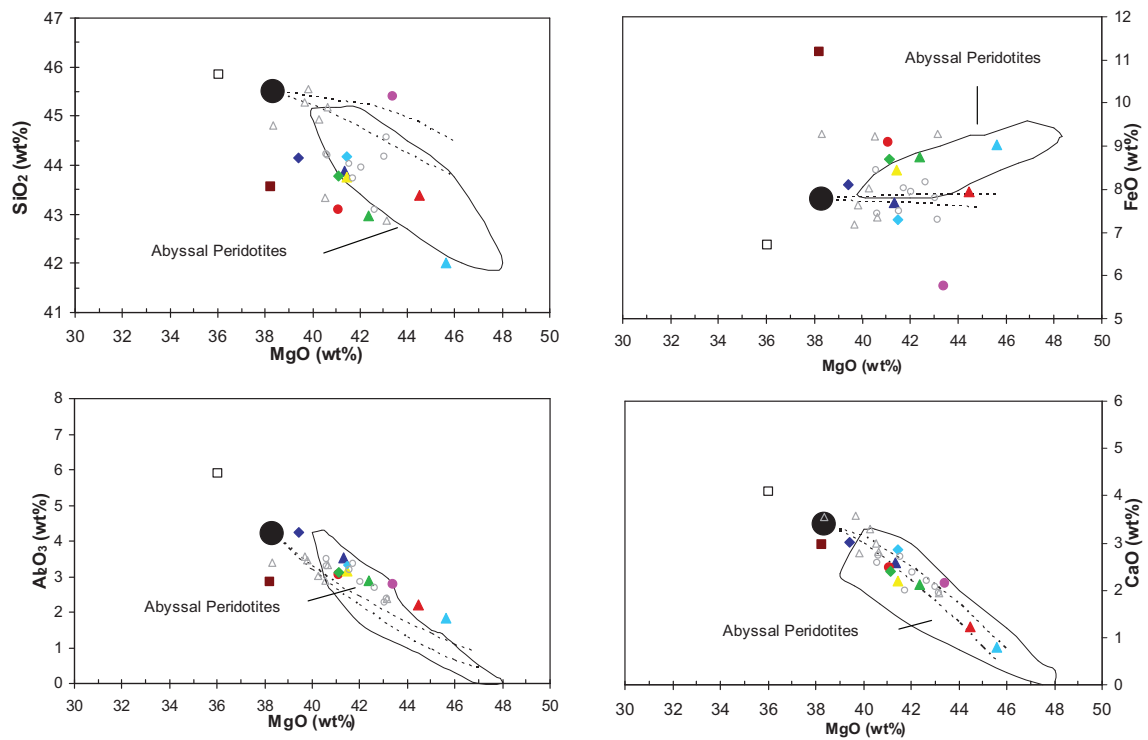


Figura 3.1.4 – Diagrammi di variazione degli elementi maggiori vs MgO (wt%) degli xenoliti del sito di Azrou Per confronto sono rappresentati anche gli xenoliti di Hoggar (cerchi) e Gharyan (triangoli). I campi delle peridotiti abissali (linee nere), i trend di fusione parziale (linee tratteggiate) e la composizione della sorgente lherzolite fertile (cerchi neri) estratte da Niu (1997).

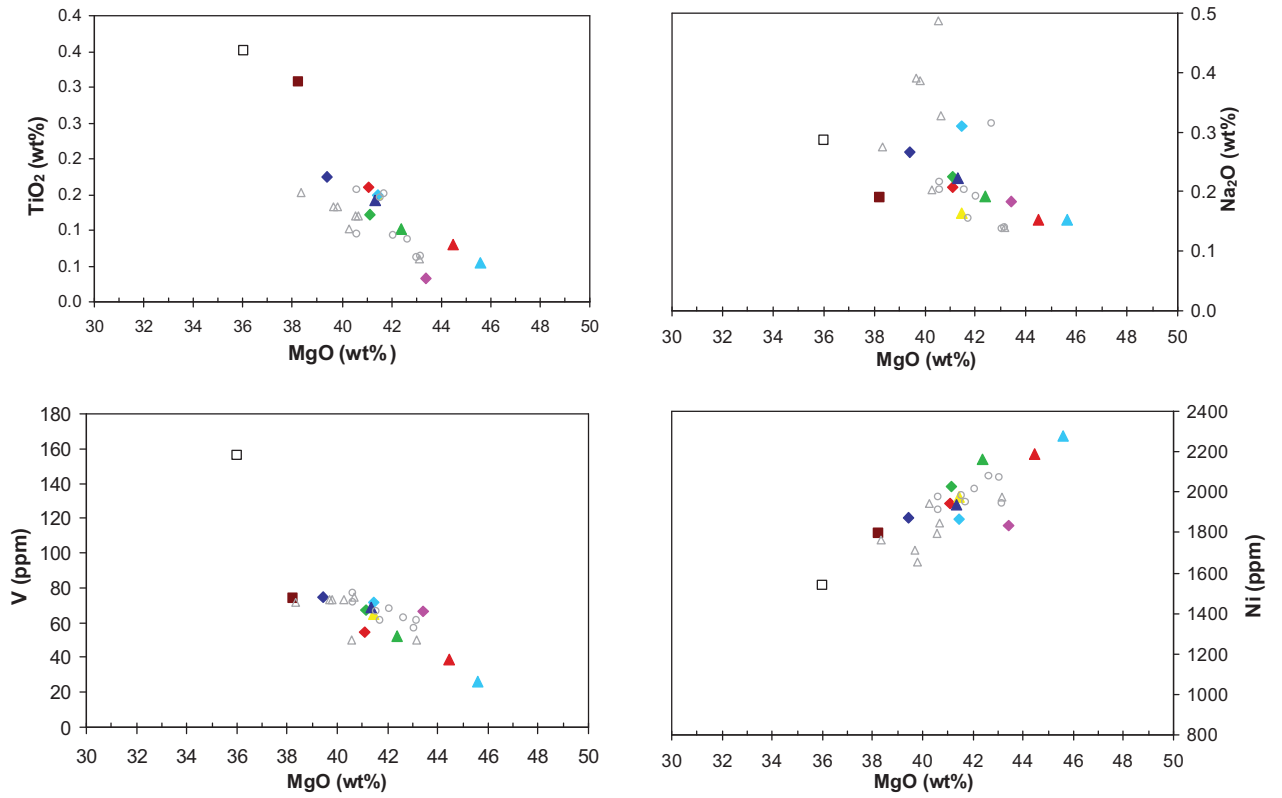


Figura 3.1.5 – Diagrammi di variazione degli elementi maggiori e in tracce vs MgO (wt%) degli xenoliti del sito di Azrou. Per confronto sono rappresentati anche gli xenoliti di Hoggarr (cerchi) e Gharyan (triangoli).

3.1.3 ANALISI DEGLI ELEMENTI MAGGIORI “*IN SITU*” (EPMA)

Le analisi di microsonda elettronica degli elementi maggiori (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5) sono state condotte presso il laboratorio di microanalisi dell'IGG-CNR presso il Dipartimento di Mineralogia dell'Università di Padova, secondo le modalità analitiche e le specifiche tecniche descritte in Appendice A. Sono stati analizzati 7 campioni dal sito di Azrou, di cui: 5 lherzoliti (AT1, AT6, AT7, AT10 e AT12), l'harzburgite (AT3) e l'olivin-websterite (AT4) per un totale di 32 analisi su olivine, 33 analisi su ortopirosseni, 40 su clinopirosseno e 25 su spinello. Non vi è una netta differenza composizionale tra le lherzoliti e l'harzburgite. Le analisi sulle singole fasi sono riportate in tabella 2A.

Olivine

Le olivine dei campioni lherzolitici hanno un contenuto in forsterite (Fo) che va da 88.7 a 90.7, mentre nell'harzburgite l'Fo va da 90.2 a 91.8 e nell'olivin-websterite l'Fo va da 89.2 a 90.0. Non si notano grosse differenze composizionali tra le analisi fatte al nucleo e quelle fatte al bordo dei cristalli.

Ortopirosseni

Gli ortopirosseni dei campioni di Azrou sono stati tutti classificati come enstatite, con un contenuto massimo in ferrosilite pari a 11% (fig. 3.1.6). Nelle lherzoliti l'enstatite (En) varia da 88.2 a 90.0, la ferrosilite (Fs) va da 9.1 a 10.7 e la wollastonite (Wo) va da 0.8 a 1.9. Nell'harzburgite si registrano invece i seguenti valori: En da 88.9 a 89.5, Fs da 9.7 a 10.4, Wo da 0.7 a 0.9; mentre nell'olivin-websterite si ha: En da 88.0 a 89.3, Fs da 9.9 a 10.7 e Wo da 0.8 a 1.3.

Il numero di magnesio, $\text{Mg}\#$ ($\text{Mg}/\text{Mg}+\text{Fe}$), registrato nelle lherzoliti va da 89 a 91, nell'harzburgite va da 89 a 90 e nell'olivin-websterite va da 89 a 91. Anche negli ortopirosseni, come nelle olivine, si riscontra una sovrapposizione dei valori tra lherzoliti e harzburgiti. Questa assunzione viene supportata anche dalle correlazioni tra il Mg e l'Al a.p.f.u. (atomi per formula unit) (fig. 3.1.7) e tra l' $\text{Mg}\#$ e il $\text{Cr}\#$ ($\text{Cr}/\text{Cr}+\text{Al}$) figura 3.1.8. L'olivin-websterite invece sembra dissociarsi da ciò andando a disporsi lungo tutto il campo dei campioni analizzati.

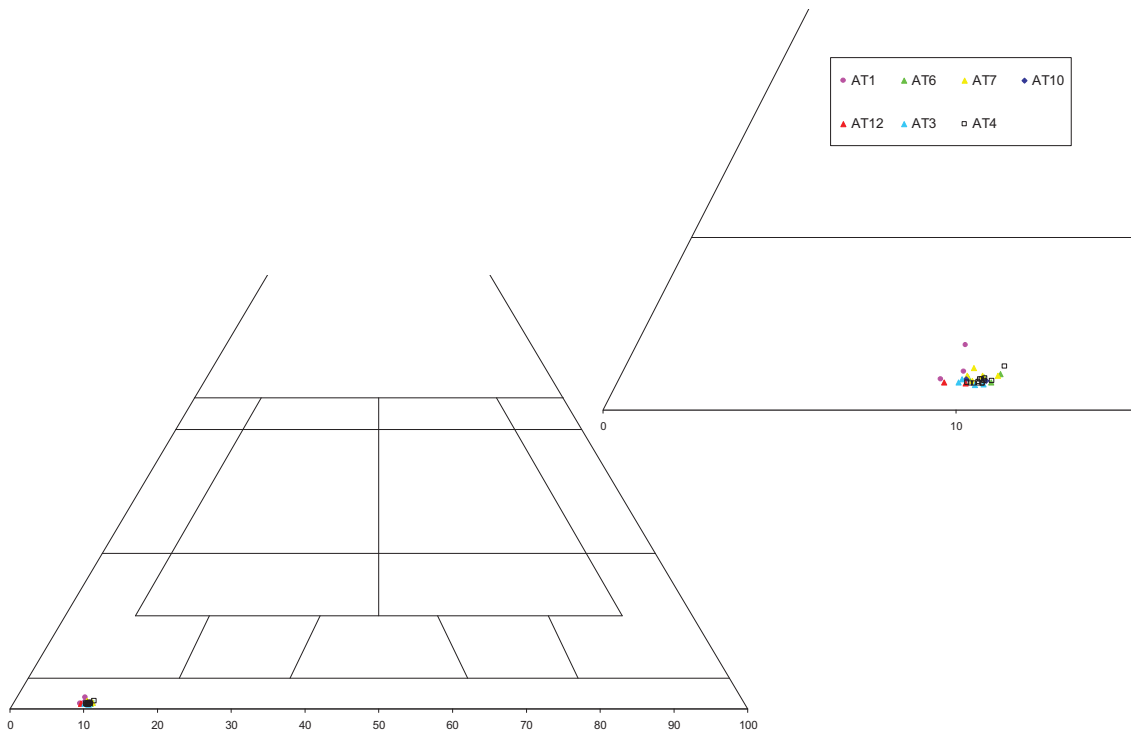


Figura 3.1.6 – Classificazione degli ortopirosseni del sito di Azrou.

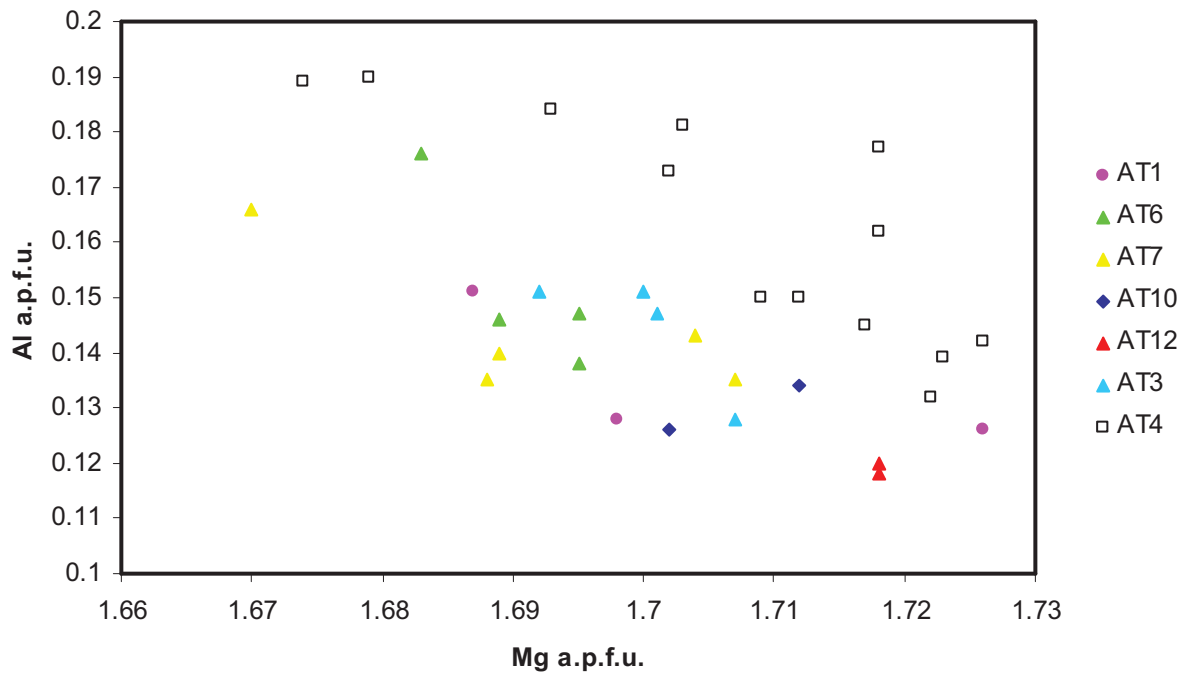


Figura 3.1.7 – Variazione composizionale del Al (a.p.f.u.) rispetto al Mg (a.p.f.u.) negli ortopirosseni degli xenoliti di mantello di Azrou.

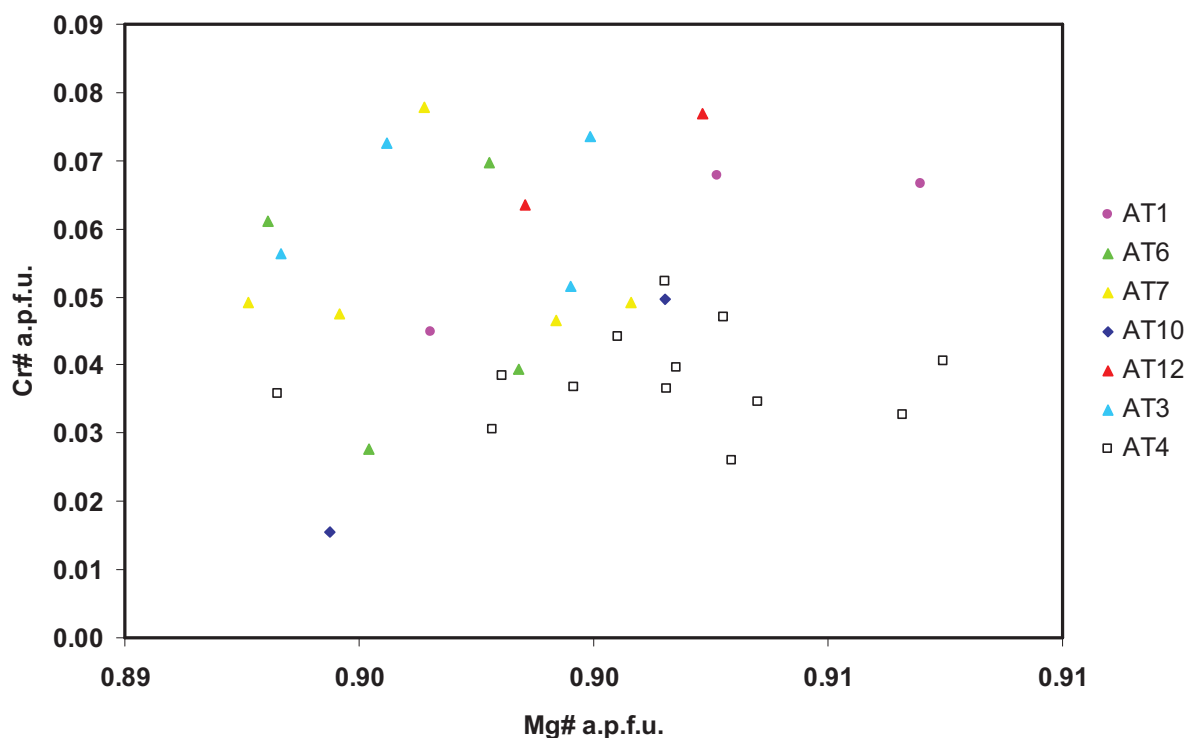


Figura 3.1.8 – Variazione composizionale del Cr# (a.p.f.u.) rispetto al Mg# (a.p.f.u.) negli ortopirosseni degli xenoliti di mantello di Azrou.

Clinopirosseni

Per quel che riguarda i clinopirosseni del distretto di Azrou-Timahdite, nel diagramma classificativo a quadrilatero (Morimoto et al., 1988) si evince che non vi sono particolari differenze composizionali tra i clinopirosseni stabili, contenuti nei campioni lherzolitici, nell'harzburgite e nell'olivin-websterite, ricadendo tutti nel campo del diopside. I clinopirosseni che manifestano evidenze petrografiche di reazione dei campioni AT3, AT6 e AT7 vanno invece a collocarsi nel campo dell'endodiopside (fig. 3.1.9). Per quel che riguarda i valori di enstatite, ferrosilite e wollastonite nelle lherzoliti troviamo: En da 45.6 a 52.9, Fs da 4.4 a 6.0 e Wo da 41.3 a 49.0; per l'harzburgite troviamo: En da 47.4 a 50.1, Fs da 4.6 a 5.3 e Wo da 44.5 a 48.0; mentre nell'olivin-websterite si ha: En da 46.2 a 47.1, Fs da 5.0 a 5.7 e Wo da 47.2 a 48.6. Il numero di magnesio (Mg#) risulta essere omogeneo in tutte e tre le tipologie di campioni variando da 89 a 92 nelle lherzoliti, tra 91 e 92 nell'harzburgite e tra 90 e 92 nell'olivin-websterite. Analogo comportamento si registra per il Cr#; dove nelle lherzoliti troviamo valori tra 3 e 14 (20 per un cpx in reazione del campione AT6), nell'harzburgite si ha Cr# tra 9 e 11 e nell'olivin-websterite

tra 4 e 6. I valori maggiori di TiO₂ (in percentuale peso) vengono registrati nell'olivin-websterite (intervallo composizionale tra 0.87 e 1.15 wt%) mentre i valori inferiori vengono registrati nel campione lherzolitico AT1 (intervallo tra 0.05 e 0.14 wt%).

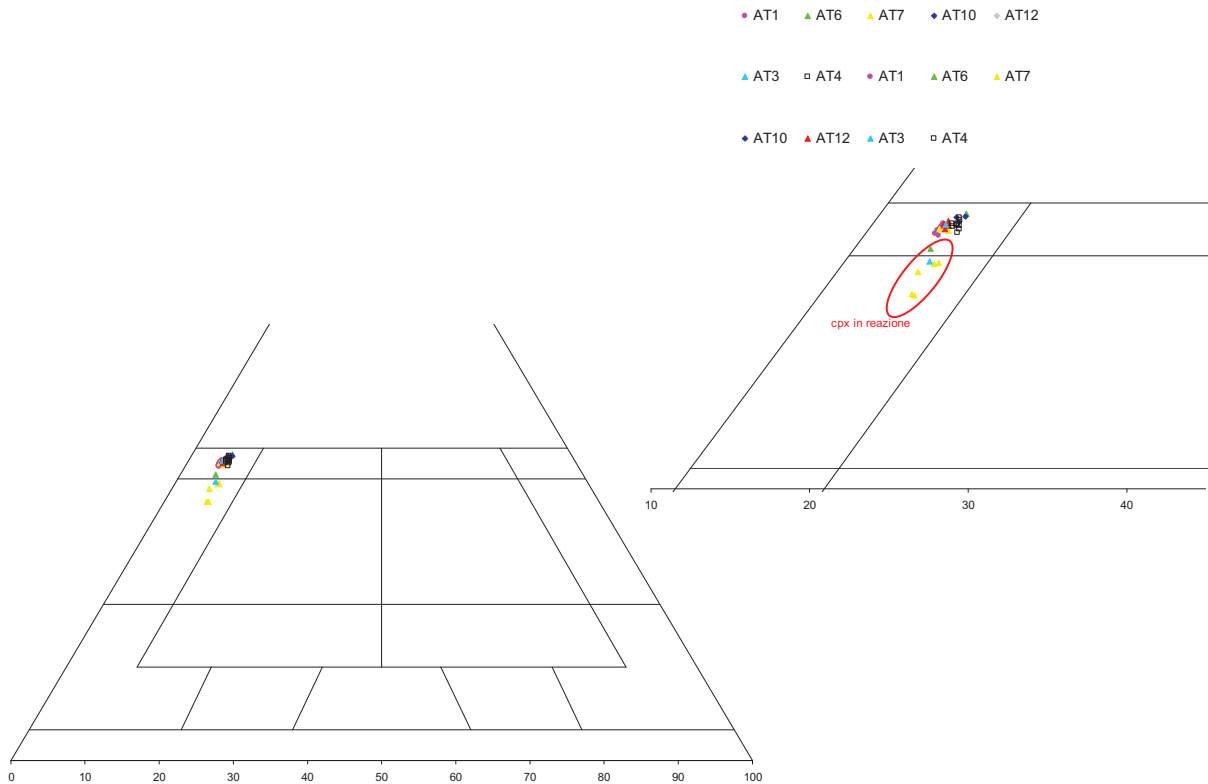


Figura 3.1.9 – Classificazione dei clinopirosseni del sito di Azrou.

Le restanti lherzoliti e l'harzburgite mostrano un intervallo composizionale del TiO₂ che va da 0.19 a 0.72, non riscontrando sensibili differenze tra i campioni più refrattari e non (fig. 3.1.10).

Dal diagramma in figura 3.1.11 si può notare come i clinopirosseni stabili dei campioni analizzati tendono a disporsi secondo una linea di tendenza negativa tra il Mg e Al (a.p.f.u.); i clinopirosseni in reazione escono invece da questo trend. Per contro dalla comparazione tra Al e Na (a.p.f.u.) si nota un trend negativo (fig. 3.1.12).

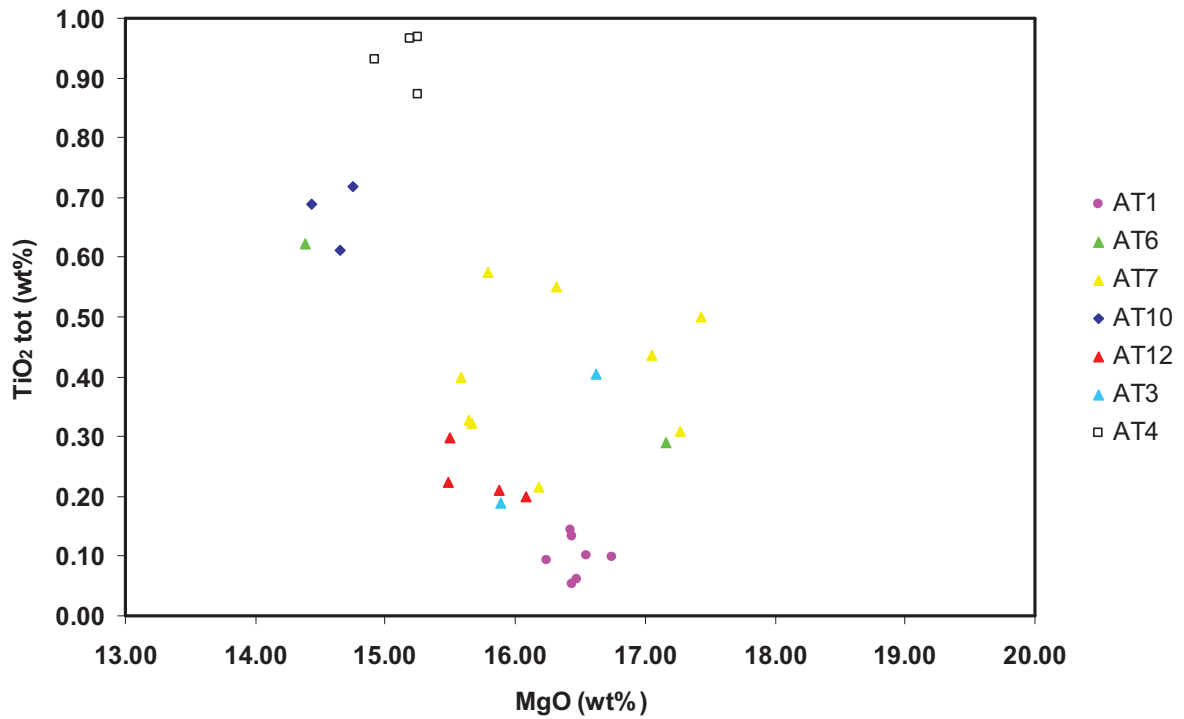


Figura 3.1.10 – Variazione composizionale del TiO_2 (wt%) rispetto all' MgO nei clinopirosseni degli xenoliti di Azrou.

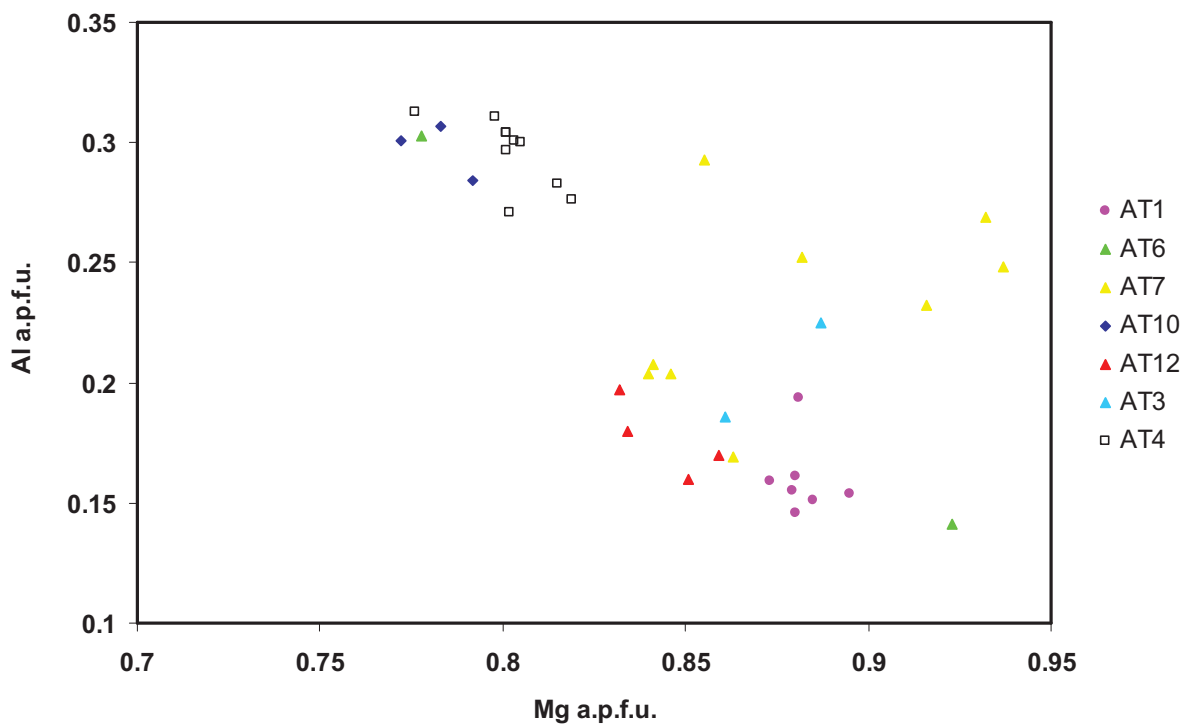


Figura 3.1.11 – Variazione composizionale dell' Al (a.p.f.u.) rispetto all' Mg (a.p.f.u.) nei clinopirosseni degli xenoliti di Azrou.

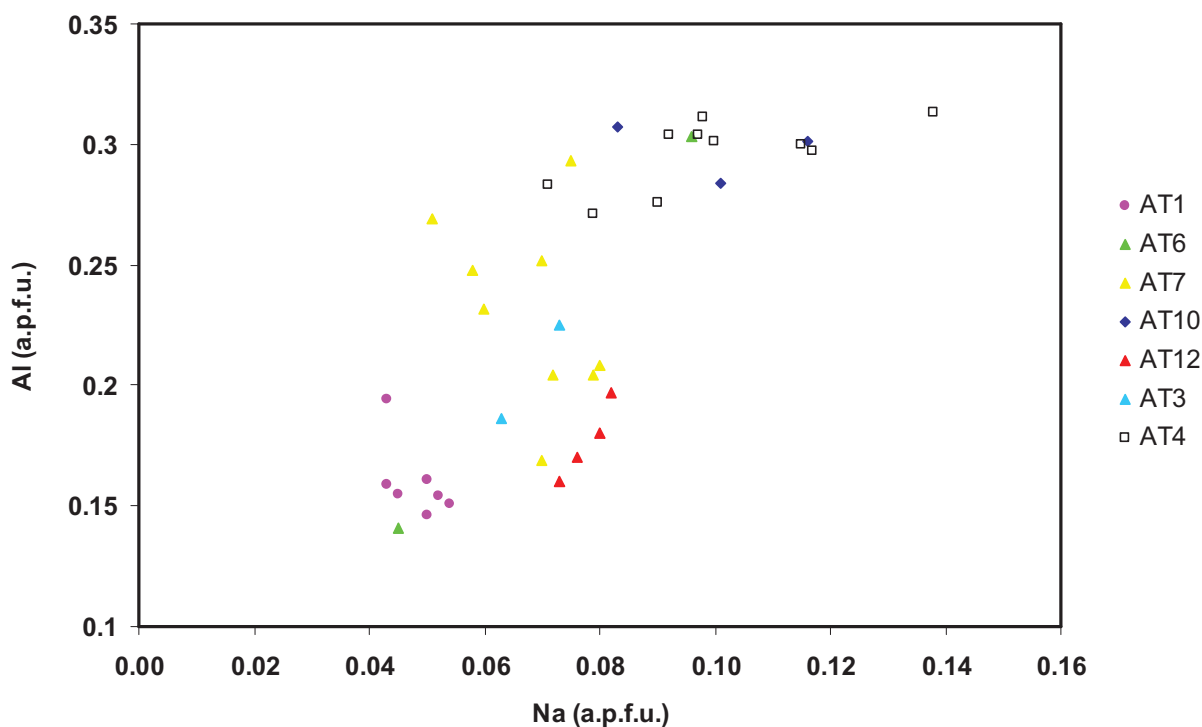


Figura 3.1.12 – Variazione composizionale dell'Al (a.p.f.u.) rispetto all'Na (a.p.f.u.) nei clinopirosseni degli xenoliti di Azrou.

Spinelli

Gli spinelli degli xenoliti ultramafici di Azrou sono caratterizzati da omogeneità composizionale; questo lo si evince dal diagramma classificativo Haggerty (1991) (fig. 3.1.13), dove tutti gli ossidi analizzati ricadono nel campo degli spinelli in s.s. Il rapporto $Mg/(Mg+Fe)$ ($Mg\#$) nelle lherzoliti va da 72 a 80, nell'harzburgite (AT3) ha valori compresi tra 76 e 77 mentre nell'olivin-websterite (AT4) si registrano i valori più alti andando da 78 a 84. Il rapporto $Cr/(Cr+Al)$ ($Cr\#$) invece va da 8 a 32 nelle lherzoliti, è compreso tra 14 e 16 nell'harzburgite e tra 6 e 7 nell'olivin-websterite. I valori più alti di $Cr\#$ si registrano nel campione AT12 con un intervallo composizionale che va da 27 a 32. Non vi è la correlazione negativa che ci si aspetterebbe tra l' $Mg\#$ e il $Cr\#$ legata all'incremento della fusione parziale (Dick & Bullen, 1984); questo probabilmente è dovuto a un metasomatismo modale (osservato già al microscopio). Il contenuto in Ti degli spinelli è molto basso e presenta valori simili sia nelle lherzoliti ($0.001\div 0.005$ a.p.f.u.) sia nella harzburgite (0.001 a.p.f.u.) che nell'olivin-websterite ($0.001\div 0.003$ a.p.f.u.).

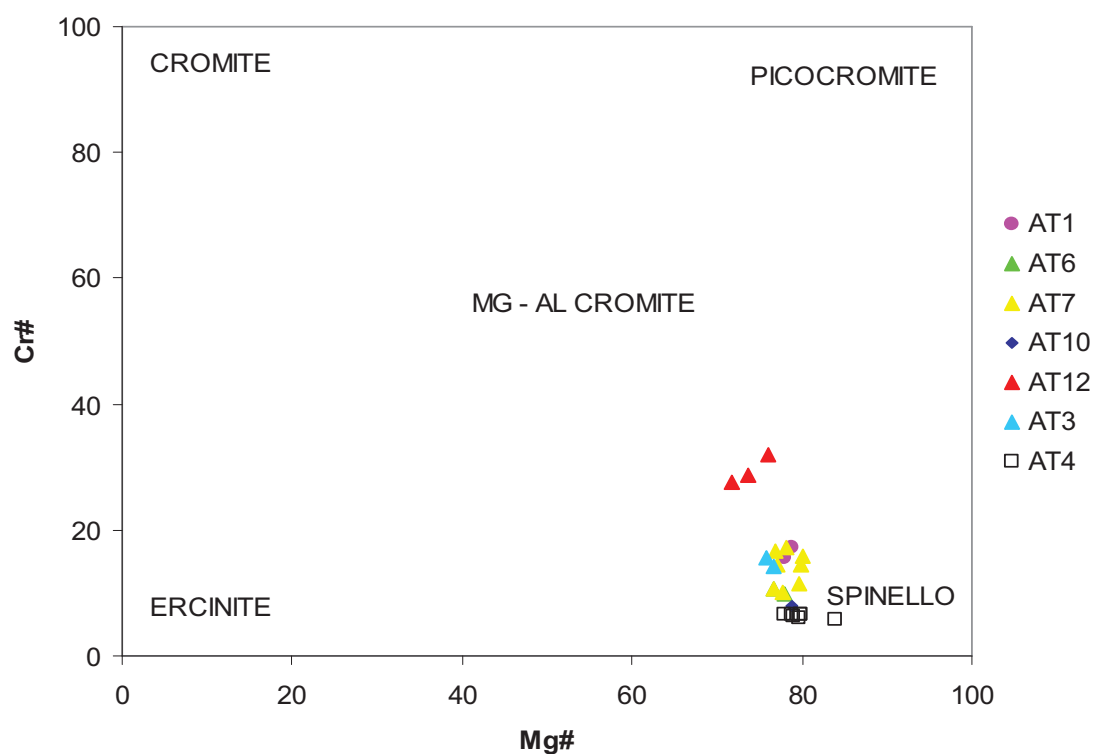


Figura 3.1.13 – Classificazione degli spinelli degli xenoliti di mantello di Azrou secondo la nomenclatura di Haggerty (1991).

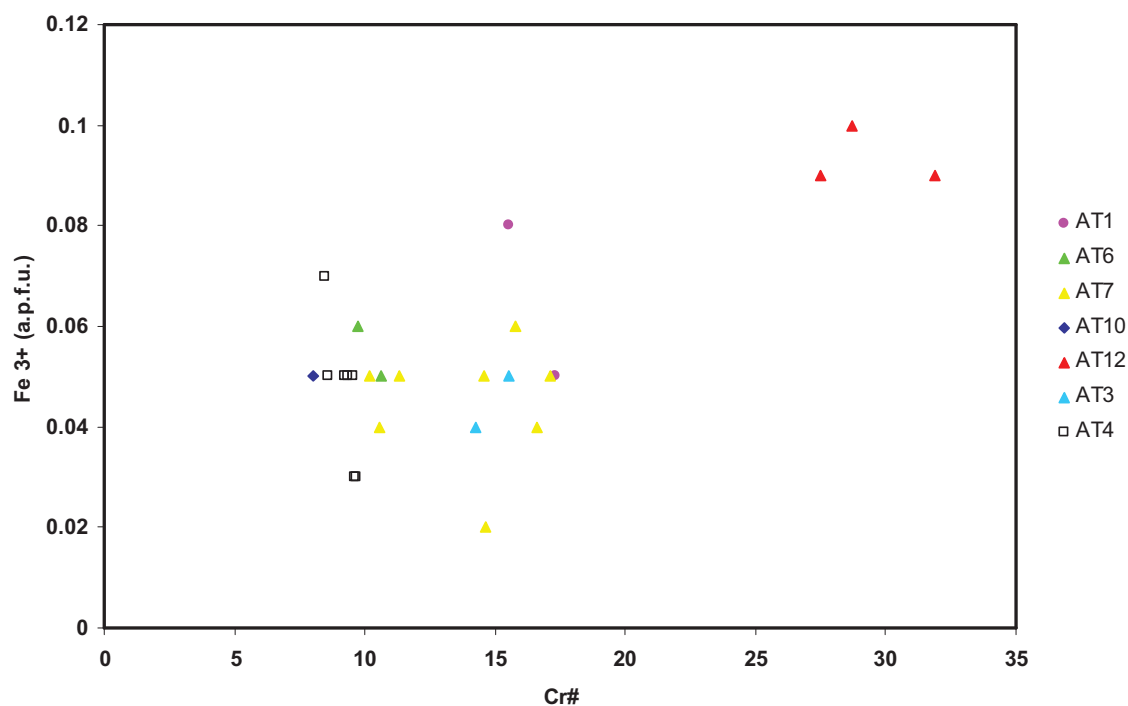


Figura 3.1.14 – Variazione composizionale di Cr# rispetto a Fe³⁺ negli spinelli degli xenoliti di mantello di Azrou.

Dal diagramma Cr# contro il Fe^{3+} (fig. 3.1.14) si nota che il campione AT12 risulta essere quello che presenta non solo i maggiori valori di Cr#, come visto in precedenza, ma anche i maggiori valori di Fe^{3+} , questo risultato mette in risalto la differenza del campione AT12 rispetto a tutto il resto della popolazione di xenoliti. Tale differenza del campione AT12 viene evidenziata anche nel diagramma forsterite versus Cr# (fig. 3.1.15) dove tutti i campioni ricadono alla base dei campi di OSMA (Olivine Spinel Mantle Array; Arai, 1994) ad eccezione appunto del solo AT12.

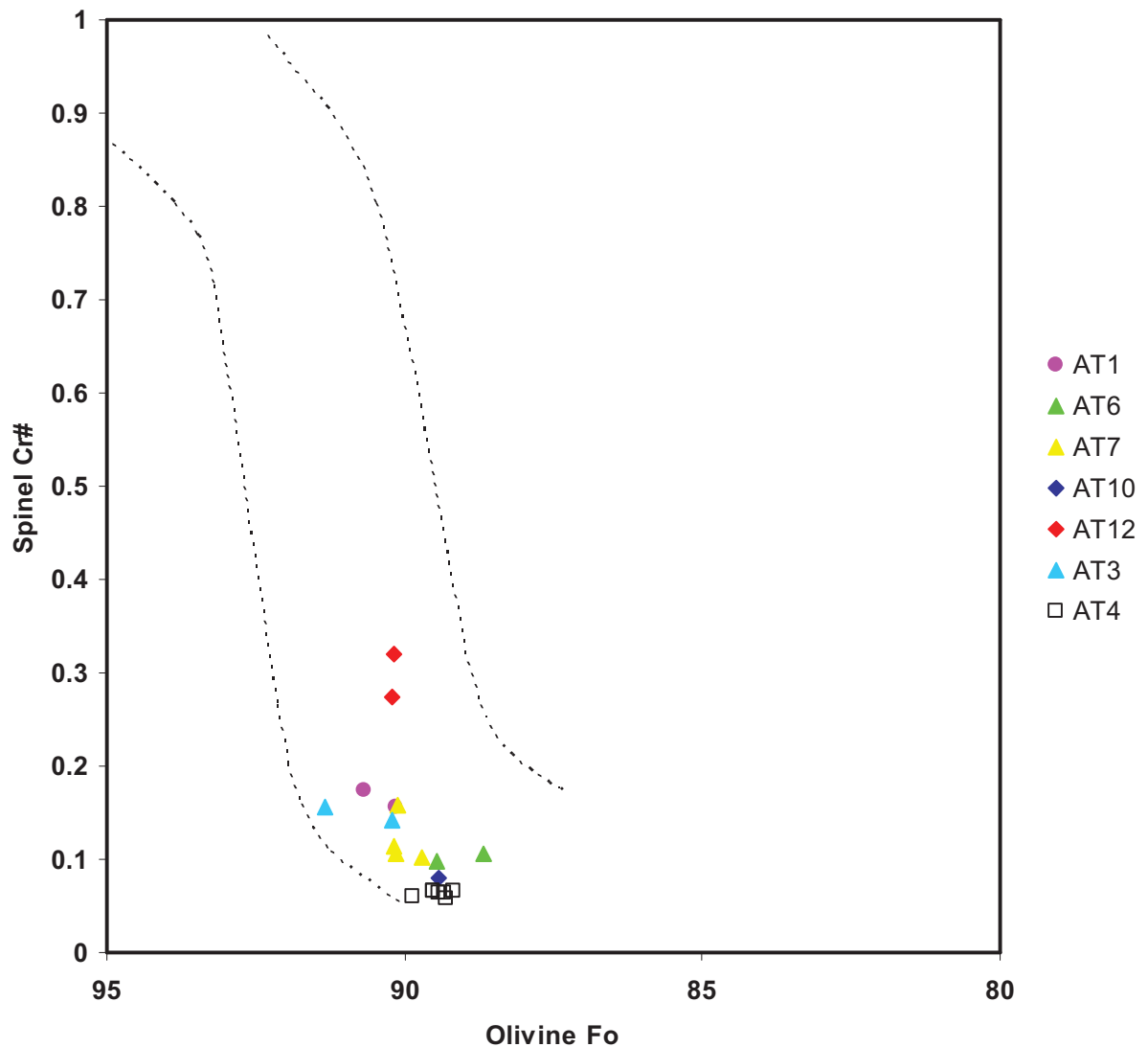


Figura 3.1.15 – Relazione tra il contenuto in forsterite (Fo) nelle olivine e il Cr# negli spinelli degli xenoliti di mantello di Azrou. Le linee tratteggiate rappresentano l'OSMA (Olivine Spinel Mantle Array) estratto da Arai (1994).

3.2 NODULI DI MANTELLO DI MEGA (Main Ethiopian Rift, MER)

3.2.1 DESCRIZIONE PETROGRAFICA

I noduli di mantello del sito di Mega sono inclusi in lave alcaline di età Pleistocenica; il campionamento è stato effettuato lungo il Main Ethiopian Rift (MER) a Sud dell'abitato di Mega, nella regione del Sidamo (Etiopia meridionale) vicino al confine tra Kenya e Etiopia (Fig.3.2.1).

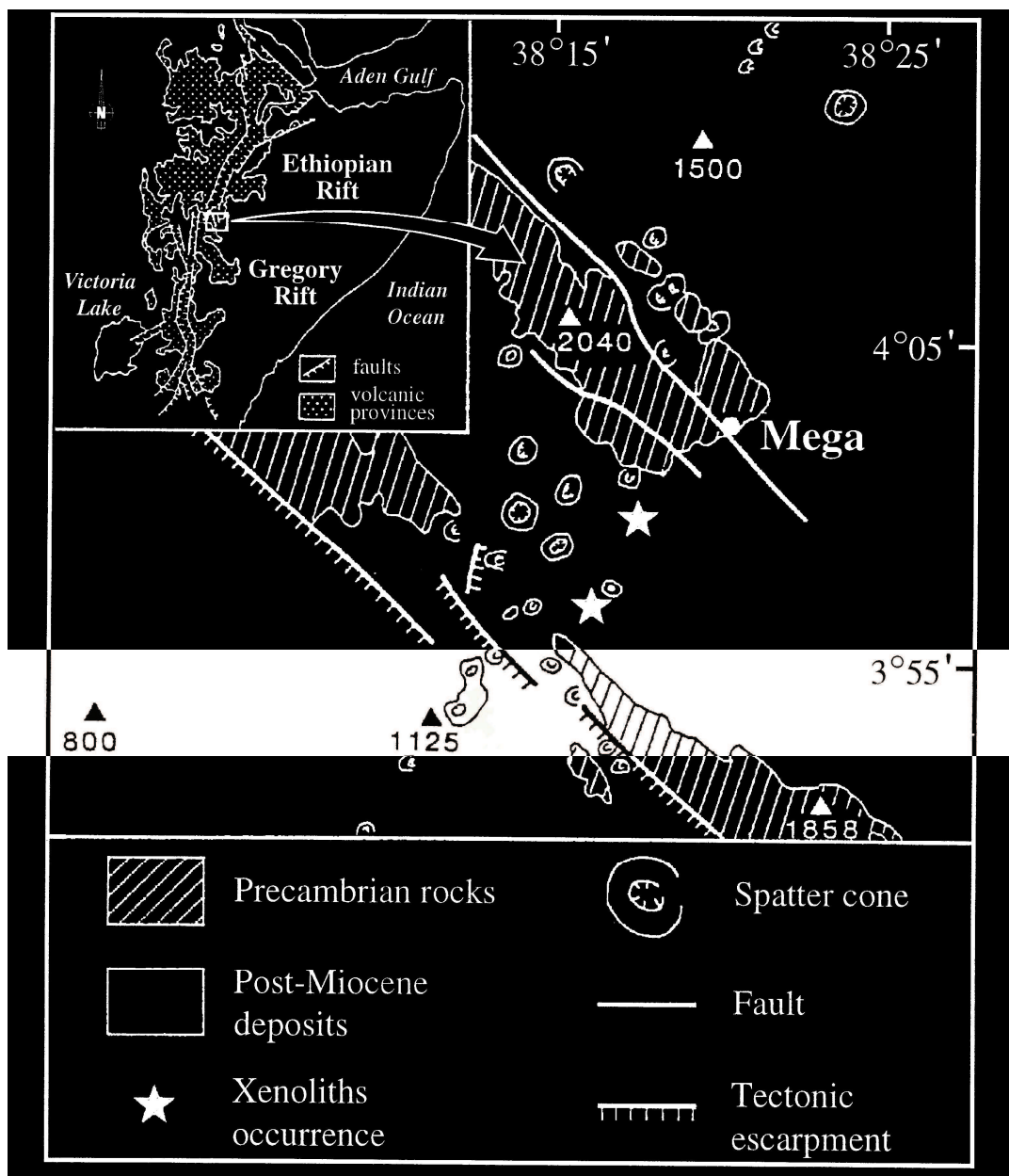


Figura 3.2.1 – Mappa geologica dell'area di Mega, dopo Morten et al., 1992.

Gli xenoliti risultano essere di notevole dimensione con un diametro medio che va dai 7 ai 10 centimetri. La popolazione studiata è costituita da 71 campioni dai quali sono state ricavate le sezioni sottili per l'osservazione petrografica al microscopio ottico (fig. 3.2.2).

La paragenesi primaria identificata è composta da tre fasi mineralogiche silicatiche quali: olivina (ol), ortopirosseno (opx) e clinopirosseno (cpx) più una fase alluminifera costituita da spinello (sp). I campioni di Mega, tutti a composizione peridotitica (da harzburgitica a lherzolitica con eccezione fatta per il solo campione MA18: olivin-websterite), sono prevalentemente caratterizzati da una tessitura protogranulare, a tratti equigranulare in alcuni campioni, con diversi gradi di deformazione e ricristallizzazione, a grana media con cristalli dai bordi ben definiti che non presentano rilevanti evidenze di processi di reazione. Punti tripli di giunzione a 120 gradi tra i bordi dei cristalli sono presenti nei campioni che hanno subito fenomeni di ricristallizzazione. Le olivine si mostrano generalmente in grandi cristalli lobati con strutture di king-banding nei campioni più deformati. Anche l'ortopirosseno risulta in grandi cristalli (fino a 3-4 mm di diametro) con bordi curvilinei e scarse sottili lamelle di mescolamento di clinopirosseno.

I clinopirosseni, di dimensioni da medie a piccole, si presentano sia in cristalli stabili ben definiti, sia in cristalli "spongy", come pure con bordi di reazione, talune volte anche abbastanza vistosi. Gli spinelli, generalmente interstiziali, risultano prevalentemente di colore marrone con bordi lobati; talvolta è possibile identificare un sottile orlo di reazione che porta alla formazione di microcristalli secondari di olivina e pirosseno. In alcuni casi risultano invece completamente opacizzati. Le loro dimensioni vanno da media a piccola.

Le evidenze di processi metasomatici sono scarse e per lo più legate alla presenza di vene di clinopirosseno e piccole zone di reazioni che sono obliterate da sovrainposti processi di ricristallizzazione.

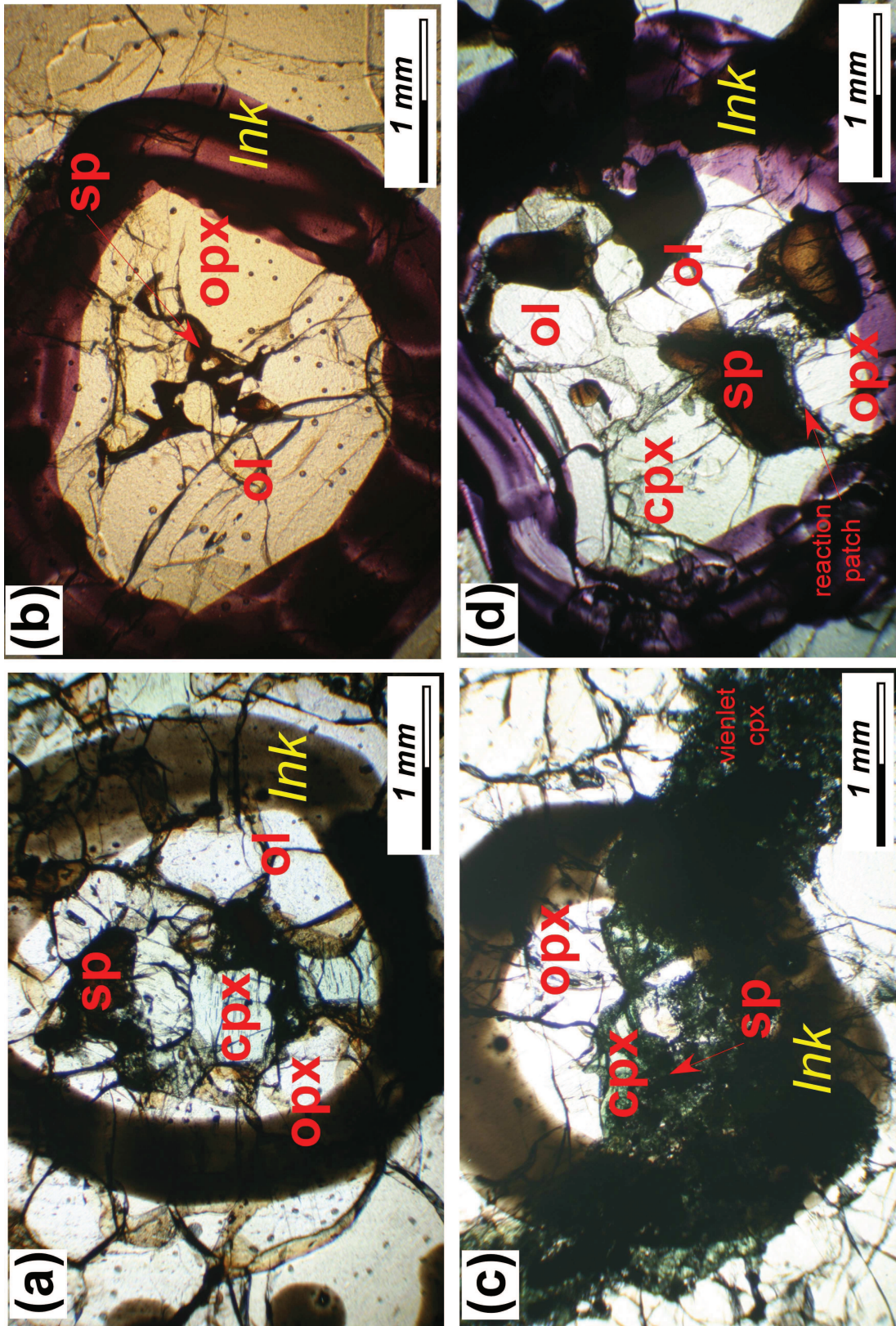


Figura 3.2.2 – Micrografie delle tessiture e strutture degli xenoliti del sito di Mega.

3.2.2 ANALISI DEGLI ELEMENTI MAGGIORI SU ROCCIA TOTALE (XRF)

Le analisi in fluorescenza a raggi X (XRF) degli elementi maggiori (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 e di Pb , Zn , Ni , Co , Cr , V , Rb , Sr , Ba , Nb , Zr e Y) su roccia totale sono state condotte presso il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Ferrara secondo le modalità e le specifiche analitiche descritte in Appendice A.

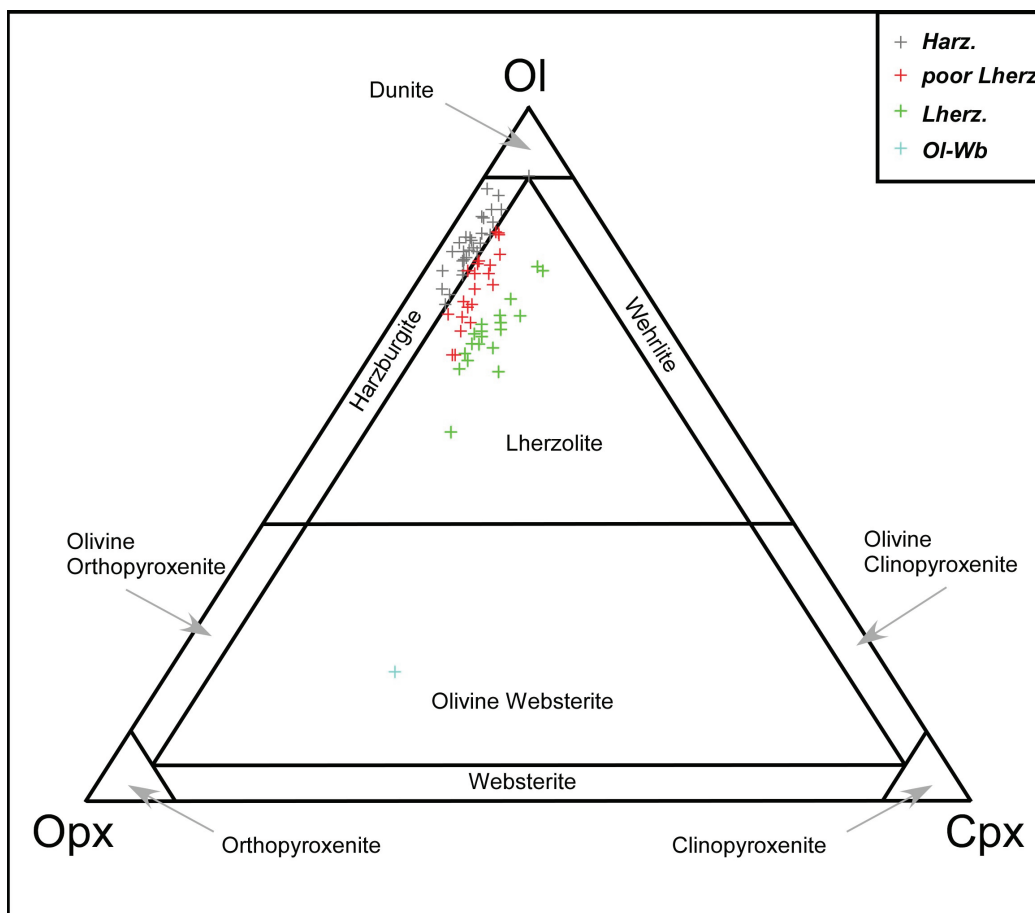


Figura 3.2.3 – Diagramma di classificazione delle rocce ultrafemiche, composizione modale degli xenoliti di mantello di Mega in termini di olivina (Ol), ortopirosseno (Opx) e clinopirosseno (Cpx).

Sono stati sottoposti a questo tipo di analisi tutti e 71 i campioni di xenoliti di mantello da cui si era precedentemente ricavate le sezioni sottili per l'osservazione ottica. I dati analitici di fluorescenza a raggi X (tabella 1B) in termini di ossidi maggiori sono stati corretti considerando la L.O.I. (Loss On Ignition), determinata per via ponderale, e successivamente è stata effettuata una prima classificazione mineralogica basata sul contenuto normativo (norma ICPW) delle tre fasi silicatiche contenute nelle peridotiti

(olivina, ortopirosseno e clinopirosseno). Più nello specifico, le mode CIPW sono state riarrangiate come suggerito da Niu 1997 per le paragenesi untrafemiche. Successivamente si è interpolato le composizioni mineralogiche così ottenute con quelle dei bilanci di massa calcolati dalle analisi sulle singole fasi minerali. Dalla classificazione così ottenuta emerge che la popolazione degli xenoliti di Mega è costituita prevalentemente da lherzoliti (40) da variamente fertili (10-18 wt% cpx modale) a mediamente povere in clinopirosseno (poor lherzolite, 5-10 wt%), da 30 harzburgiti e da una sola olivin-websterite (fig. 3.2.3).

L'osservazione dei diagrammi di variazione (fig. 3.2.4 e 3.2.5), degli elementi maggiori e in tracce plottati contro l'MgO (wt%), suggerisce per la campionatura analizzata un unico trend di fusione parziale.

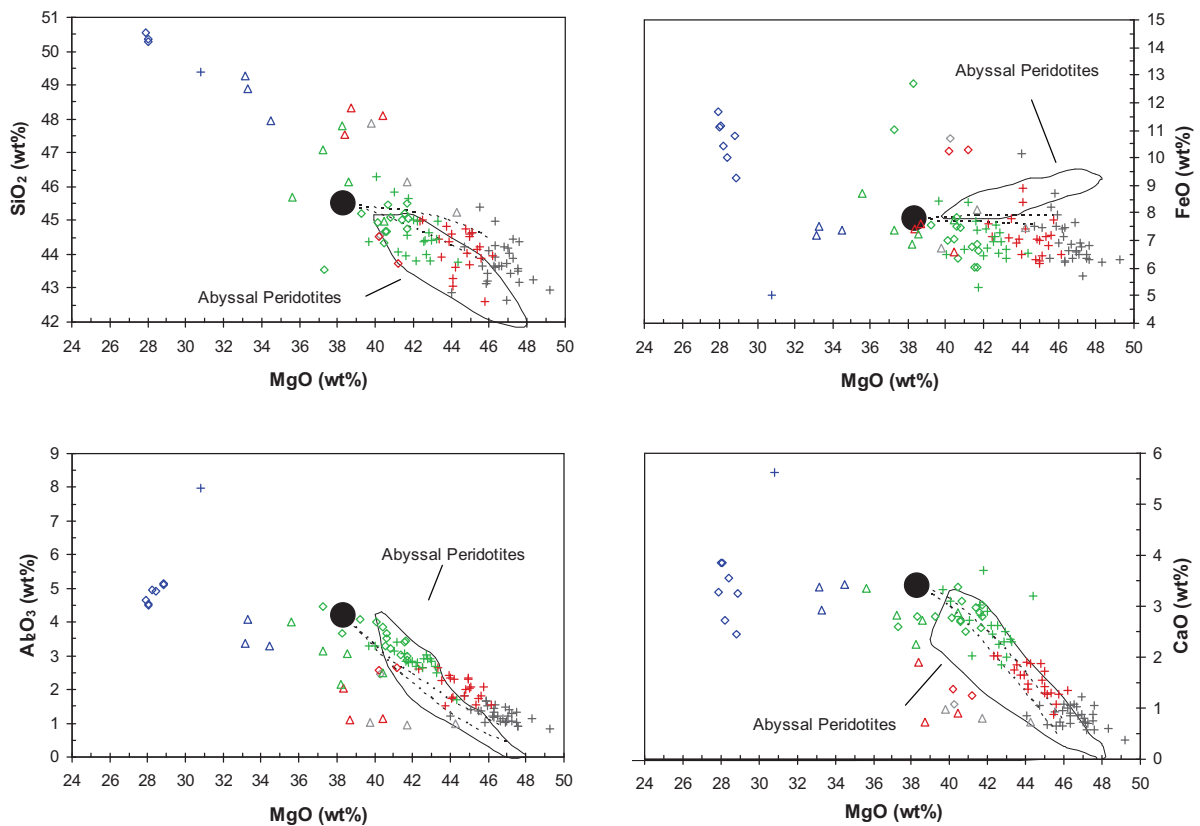


Figura 3.2.4 – Diagrammi di variazione degli elementi maggiori su MgO (wt%) degli xenoliti del sito di Mega. Per confronto sono rappresentati anche gli xenoliti di Injibara (rombi) e Dedessa (triangoli). I campi delle peridotiti abissali (linee nere), i trend di fusione parziale (linee tratteggiate e la composizione della sorgente lherzoliteica fertile (circoli neri) estratte da Niu (1997).

Tale tendenza è messa ben in evidenza nei diagrammi Al₂O₃ vs MgO e CaO vs MgO, dove oltre ai campioni di Mega sono riportati per confronto il campo delle peridotiti

abissali, i trend di fusione parziale e la composizione teorica del Mantello Primordiale estratte da Niu (1997).

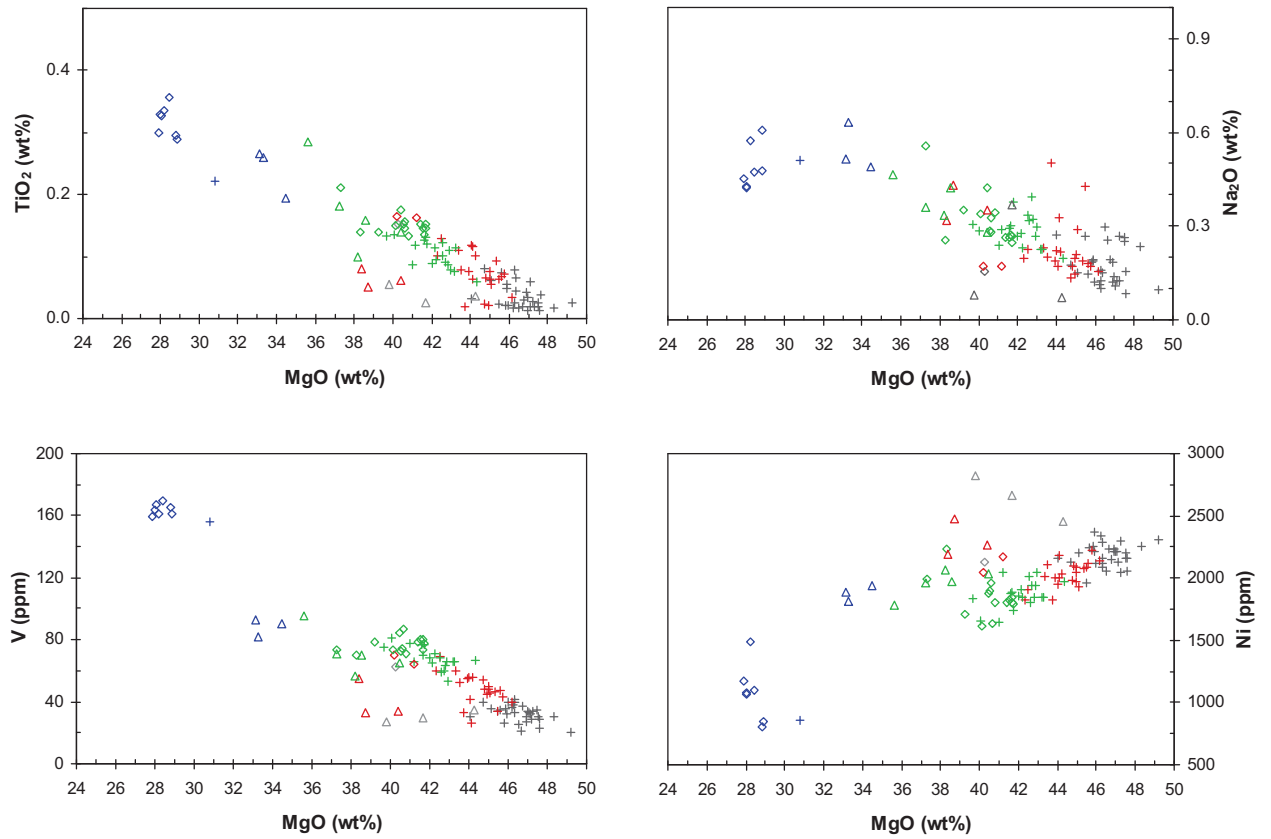


Figura 3.2.5 – Diagrammi di variazione degli elementi maggiori e in tracce su MgO (wt%) degli xenoliti del sito di Mega. Per confronto sono rappresentati anche gli xenoliti di Injibara (rombi) e Dedessa (triangoli).

3.2.3 ANALISI DEGLI ELEMENTI MAGGIORI “*IN SITU*” (EPMA)

Le analisi quantitative degli elementi maggiori (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5) sono state condotte presso il laboratorio di microanalisi dell'IGG-CNR presso il Dipartimento di Mineralogia dell'Università di Padova, secondo le modalità e specifiche tecniche descritte in Appendice A. Per questa analisi sono stati selezionati 18 campioni del sito di Mega; di cui 9 campioni a composizione lherzolitica (MA 9, MA 10, MA 15, MA 17, MA 27, MA 32, MA 35, MA 38, MA 40), 5 a composizione harzburgitica (MA 11, MA 24, MA 26, MA 42, MA 47, MA 48) e l'olivin-websterite (MA 18). I dati ottenuti sulle singole fasi minerali (tabella 2B) mostrano solo una lieve differenza composizionale tra le lherzoliti e le harzburgiti, questo probabilmente dovuto al marcato trend di fusione parziale che spesso non permette di distinguere perfettamente tra i due campi.

Olivine

Le olivine degli xenoliti ultramafici di Mega hanno una composizione forsteritica con l'indice Fo che va da 88.4 a 91.1 nelle lherzoliti (senza netta distinzione tra i termini più o meno fertili in cpx) mentre nelle harzburgiti l'Fo varia da 89.3 a 91.8; nell'olivin-websterite il valore della forsterite varia dal nucleo al bordo passando da 89.3 a 89.7. Questa variabilità composizionale in termini del contenuto in Fo nelle olivine suggerisce un unico trend di fusione parziale per tutta la popolazione di Mega.

Ortopirosseni

Gli ortopirosseni analizzati ricadono, in termini di *end-member* nel campo composizionale dell'enstatite (fig 3.2.6) con un valore massimo in ferrosilite pari a 11%. Nelle lherzoliti l'enstatite (En) varia da 88.1 a 90.5, la ferrosilite (Fs) da 8.2 a 10.9 e la wollastonite (Wo) da 0.6 a 1.7; nelle harzburgiti l'En varia da 89.3 a 91.5, la Fs da 7.6 a 9.5 e la Wo da 0.9 a 1.4. En da 88.7 a 89.5, Fs 9.5 a 10.1 e Wo 0.9 a 1.2 per l'olivin-websterite. Per quanto riguarda il numero di magnesio, Mg# ($\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$), questo varia da 89 a 92 nelle lherzoliti, da 90 a 93 nelle harzburgiti e assume il valore di 90 per l'olivin-websterite. Come nelle olivine anche per gli ortopirosseni si riscontra una sovrapposizione dei valori tra le lherzoliti e le harzburgiti suggerendo un unico trend di fusione parziale per tutti gli xenoliti di Mega, dato evidenziato anche dalla correlazione tra Mg a.p.f.u. (atomic per formula unit) e Al a.p.f.u. (fig. 3.2.7) e tra Mg# e Cr# (fig. 3.2.8); dove tutti i campioni

si dispongono lungo una linea di tendenza dai termini più fertili in cpx (Iherzoliti) verso i più refrattari (harzburgiti).

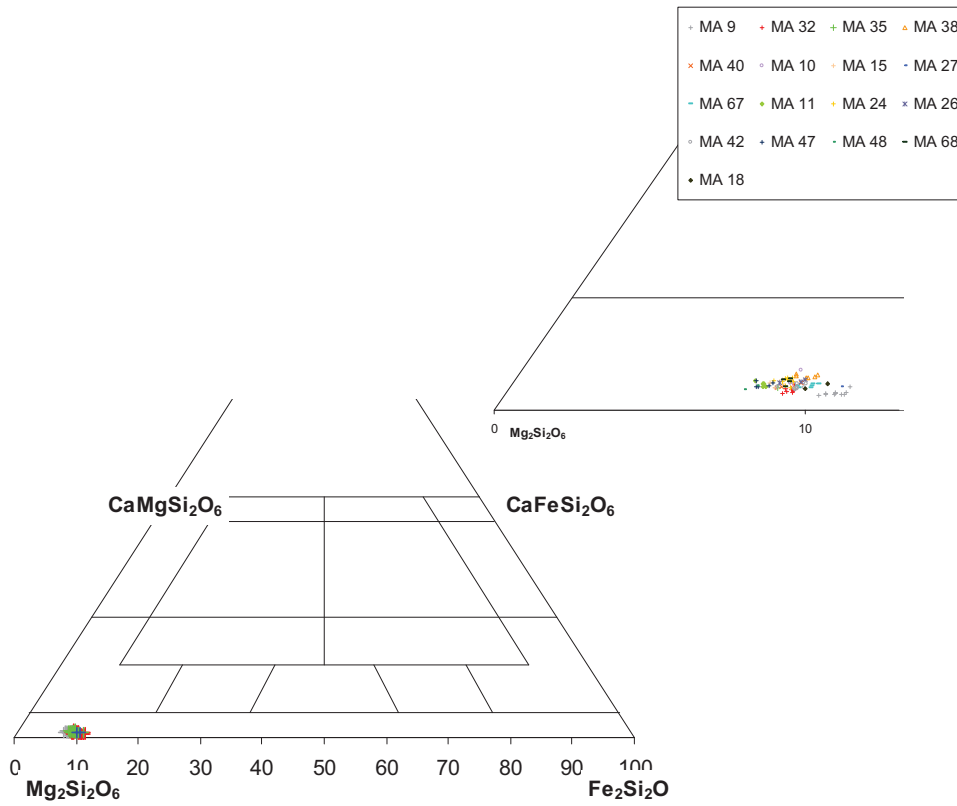


Figura 3.2.6 – Classificazione degli ortopirosseni del sito di Mega.

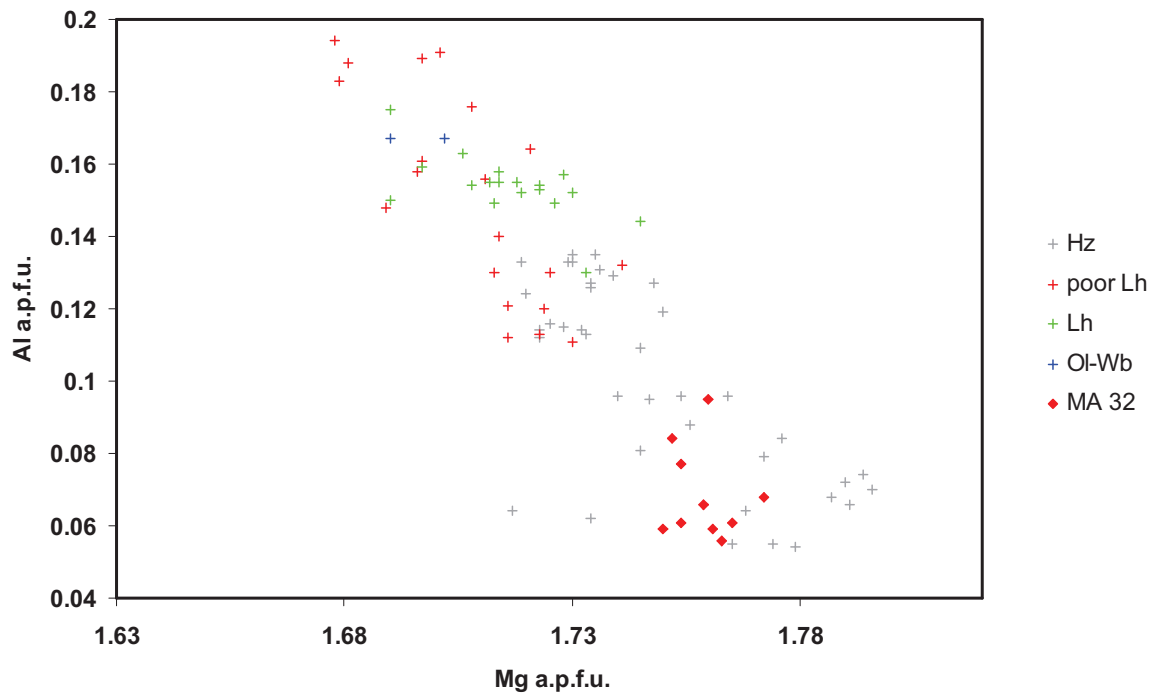


Figura 3.2.7 – Variazione composizionale del Al (a.p.f.u.) rispetto al Mg (a.p.f.u.) negli ortopirosseni degli xenoliti di mantello di Mega.

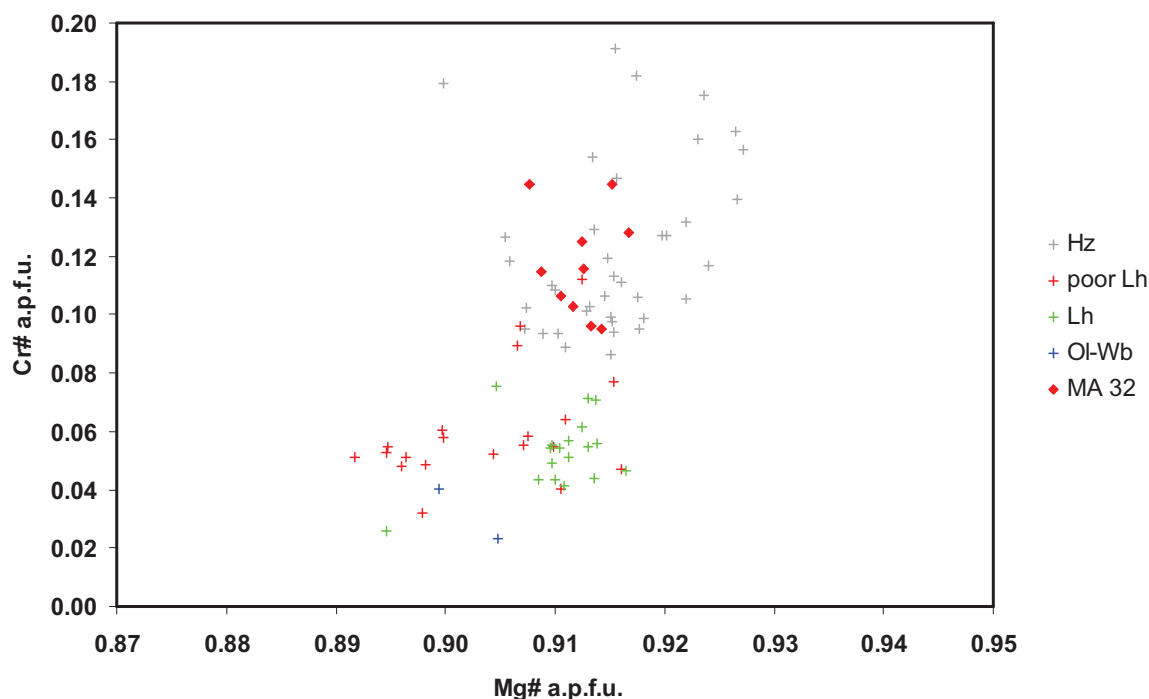


Figura 3.2.8 – Variazione composizionale del Cr# (a.p.f.u.) rispetto al Mg# (a.p.f.u.) negli ortopirosseni degli xenoliti di mantello di Mega.

Clinopirosseni

I clinopirosseni analizzati risultano essere composizionalmente piuttosto omogenei sia nelle lherzoliti che nelle harzburgiti; nel diagramma di Morimoto *et.al.* (1988) ricadono nella maggior parte nel campo del diopside (fig. 3.2.9), con variabili contenuti in ferrosilite ed enstatite, mentre alcuni campioni, tra i più refrattari e in reazione, cadono parzialmente o totalmente nel campo dell'endiopside.

Nelle lherzoliti i valori di enstatite, ferrosilite e Wollastonite sono rispettivamente: En da 47.0 a 50.6, Fs da 3.2 a 5.4 e Wo da 42.9 a 47.3, non vi sono sostanziali differenze nei valori tra i campioni più fertili in cpx e quelli più refrattari. Per le harzburgiti i valori sono: En da 48.4 a 52.1, Fs da 3.0 a 5.4, Wo da 42.9 a 47.2; mentre nell'olivin-websterite: En va da 48.0 a 49.2, Fs va da 4.3 a 4.9 e la Wo va da 46.1 a 47.6. Il numero di magnesio dei clinopirosseni dei noduli lherzolitici varia da 90 a 94 mentre nelle harzburgiti va da 91 a 95 e nell'olivin-websterite ha un valore medio di 92; il Cr# (Cr/Cr+Al) varia tra 7 e 32 nelle lherzoliti (con i valori più alti nei campioni più refrattari) e da 12 a 36 nelle harzburgiti; nell'olivin-websterite il Cr# ha un valore medio di 4. Per tutti i campioni di

Mega non si riscontrano particolari differenze tra le analisi fatte al nucleo del cristallo e quelle fatte al bordo.

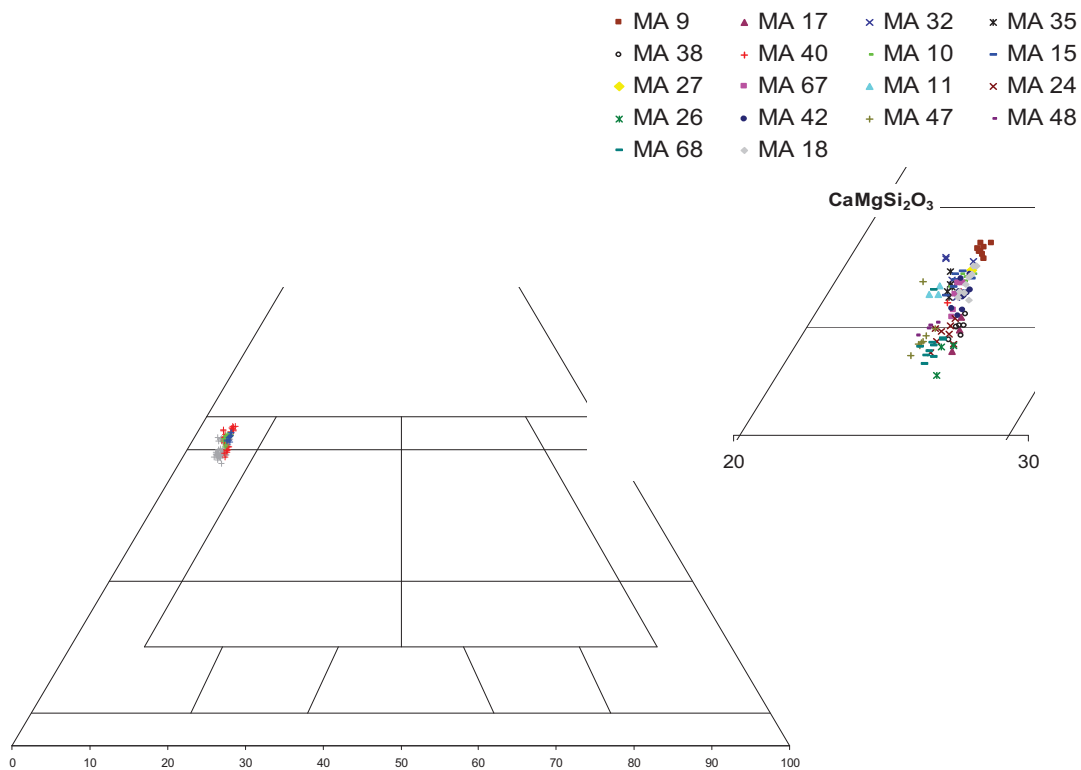


Figura 3.2.9 – Classificazione dei clinopirosseni del sito di Mega.

Il TiO_2 (in percentuale peso) varia anche sensibilmente da campione a campione; generalmente i valori maggiori si riscontrano nelle lherzoliti dove l'intervallo va da 0.4 a 0.8 mentre nelle harzburgiti si hanno i valori minori (intervallo da 0.04 a 0.5) con tenori di TiO_2 inferiori allo 0.1. Eccezioni risultano essere le lherzoliti MA17 e MA35 i cui valori di TiO_2 (compresi tra 0.07 e 0.1) risultano essere molto più bassi della media e confrontabili con quelli nelle harzburgiti; per contro il campione MA42 risulta essere particolarmente ricco in TiO_2 con valori tra 0.5 e 0.7 confrontabile con le più fertili lherzoliti (fig. 3.2.10).

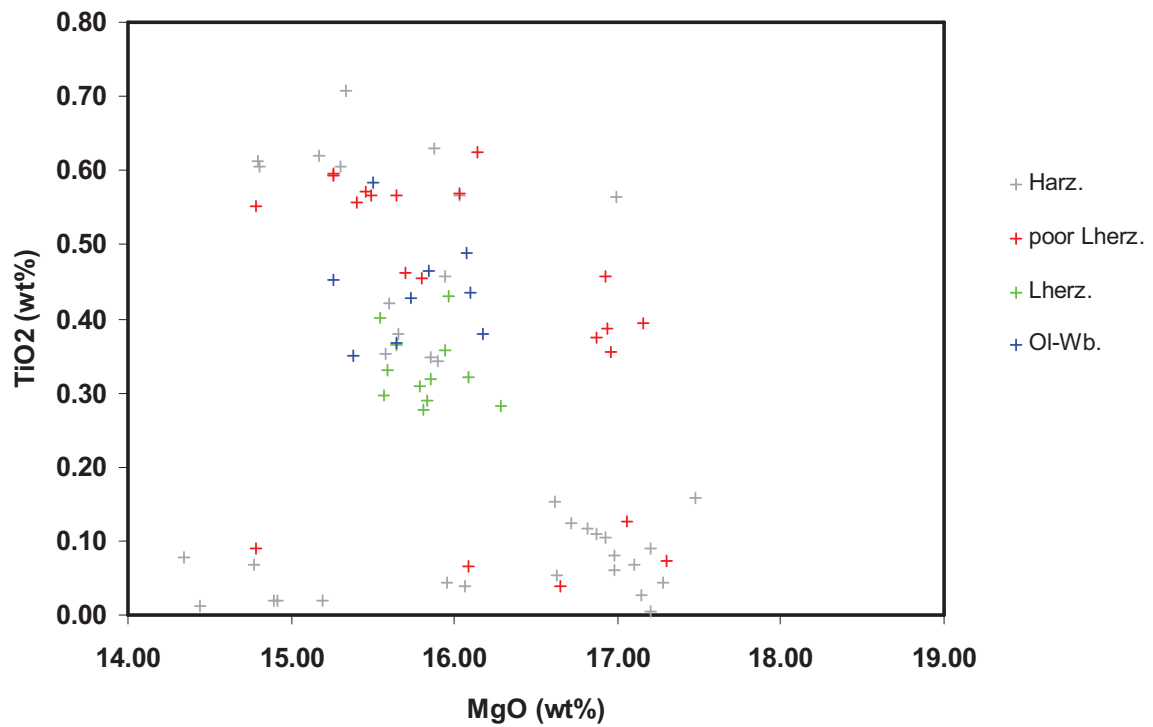


Figura 3.2.10 – Variazione composizionale del TiO₂ (wt%) rispetto all'MgO nei clinopirosseni degli xenoliti di Mega.

Dal confronto tra Mg e Al in unita per formula atomica (a.p.f.u.) si evince, come visto anche dagli ortopirosseni, che i campioni di Mega sono interessati da un unico trend di fusione parziale (Fig. 3.2.11). E' interessante notare come nel diagramma in fig. 3.2.12, dove in ascissa viene plottato il Na (a.p.f.u.) e in ordinata l'Al (a.p.f.u.), i campioni interessati maggiormente dal metasomatismo tendono a distribuirsi in un proprio trend diversamente da tutti gli altri xenoliti.

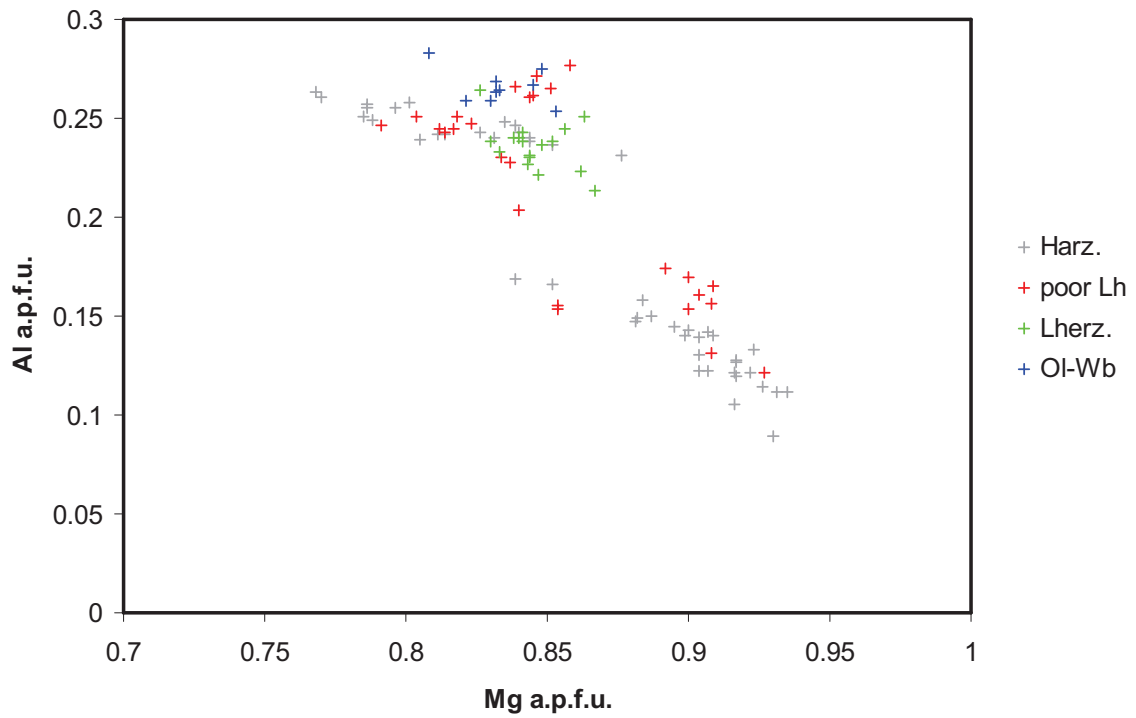


Figura 3.2.11 – Variazione composizionale dell'Al (a.p.f.u.) rispetto all'Mg (a.p.f.u.) nei clinopirosseni degli xenoliti di Mega.

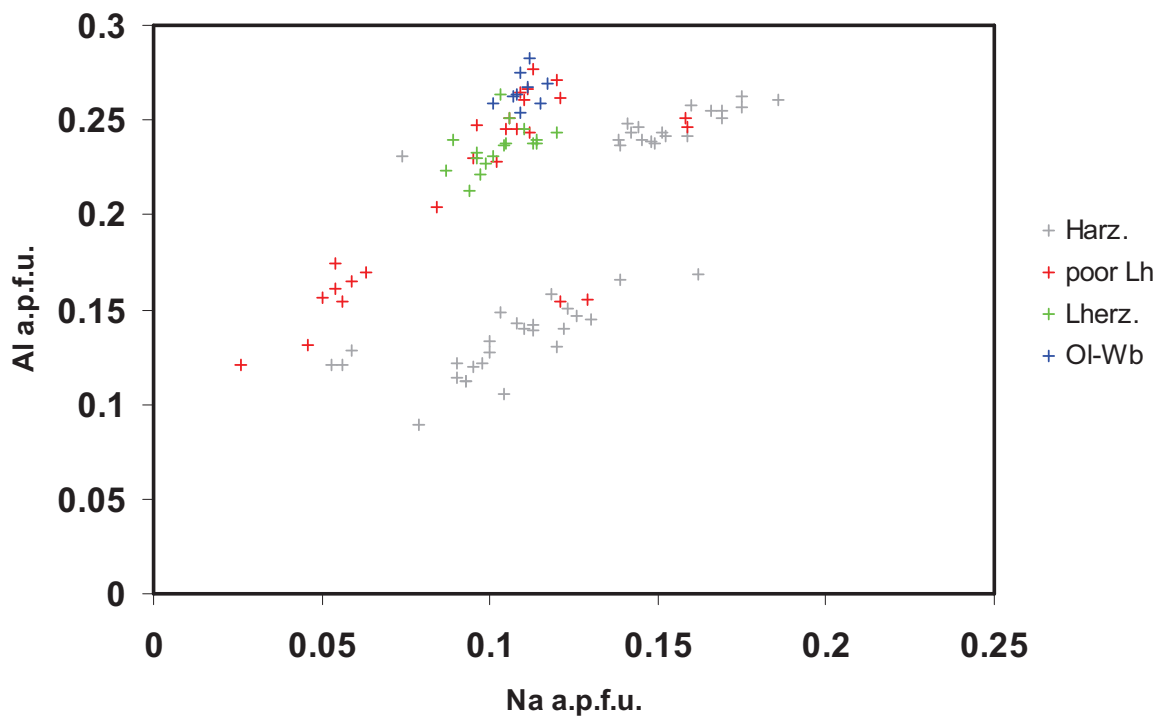


Figura 3.2.12 – Variazione composizionale dell'Al (a.p.f.u.) rispetto all'Na (a.p.f.u.) nei clinopirosseni degli xenoliti di Mega.

Spinelli

Gli spinelli degli xenoliti ultramafici di Mega sono caratterizzati da una grande variazione composizionale (fig. 3.2.13) infatti dalla correlazione tra Mg# e Cr# in base alla classificazione di Haggerty (1991), passiamo dagli spinelli in s.s. delle lherzoliti più fertili a cromiti magnesio-alluminifere nelle harzburgiti. L'Mg# nelle lherzoliti varia da 72 a 83 (nei campioni più fertili in cpx) mentre nelle harzburgiti varia da 60 a 79 e nell'olivin-websterite l'Mg# va da 81 a 83. Il Cr# va da 8 nelle lherzoliti più fertili a 58 nelle lherzoliti più povere, mentre nelle harzburgiti va da 38 a 79; nell'olivin-websterite il Cr# è compreso tra 38 e 40. Il contenuto in titanio negli spinelli è molto basso e presenta valori simili: nelle lherzoliti $Ti = 0.001 \div 0.005$ a.p.f.u.; nelle harzburgiti $Ti = 0.001 \div 0.007$ a.p.f.u. e nell'olivin-websterite 0.001 a.p.f.u.. La figura 3.2.14 mostra la correlazione positiva esistente tra il Cr# e Fe^{3+} , passando dalle lherzoliti caratterizzate dai valori più bassi (tra 0.01 e 0.06 a.p.f.u.) alle harzburgiti (da 0.01 fino a 0.12, campione MA68) mentre nell'olivin-websterite va da 0.01 a 0.04.

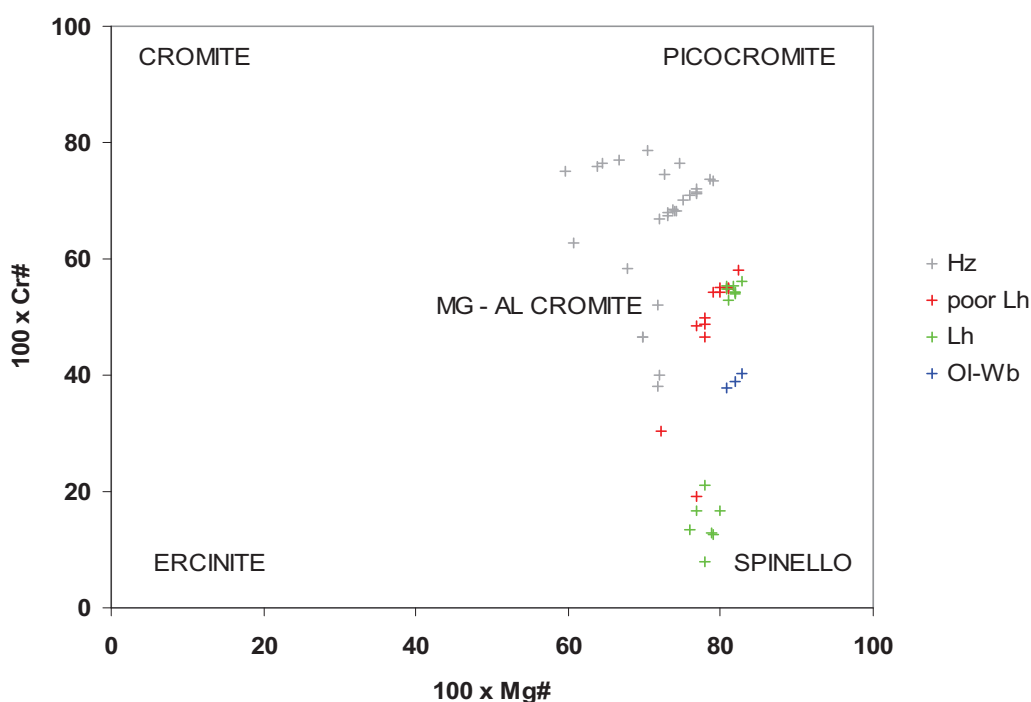


Figura 3.2.13 – Classificazione degli spinelli degli xenoliti di mantello di Mega secondo la nomenclatura di Haggerty (1991).

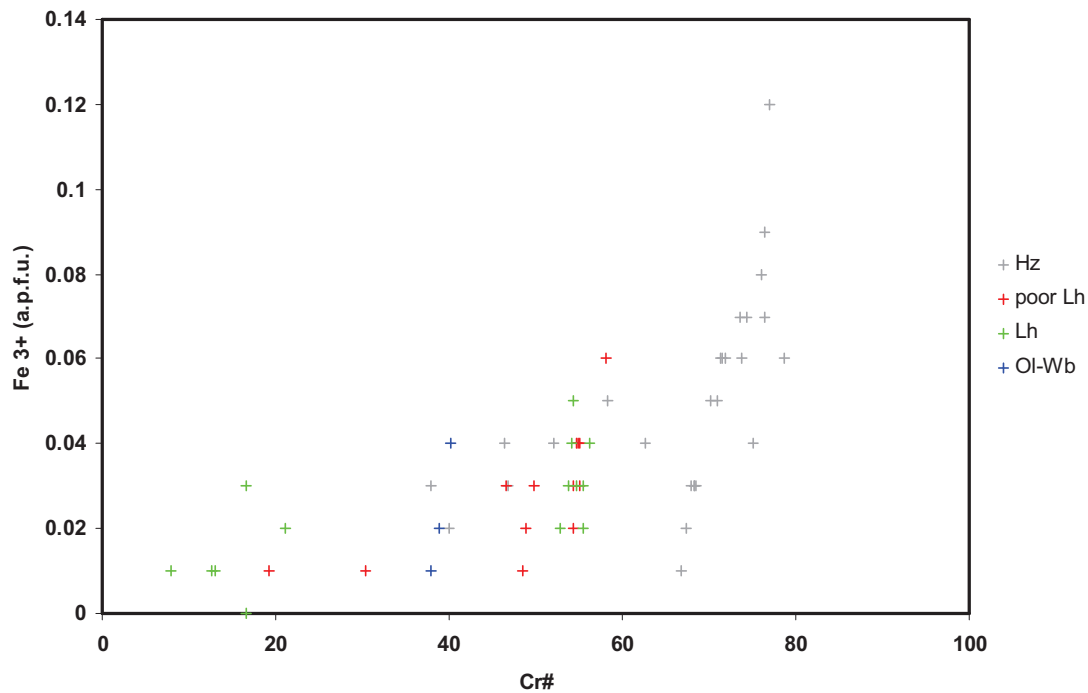


Figura 3.2.14 – Variazione composizionale di Cr# rispetto a Fe³⁺ negli spinelli degli xenoliti di mantello di Mega.

Osservando il diagramma di Fo dell'olivine versus Cr# degli spinelli, con i campi di OSMA (Arai, 1994) per riferimento, si nota come il Cr# aumenti in modo direttamente proporzionale al grado di fusione parziale a cui il campione è stato sottoposto (fig. 3.2.15). Eccezioni sono i campioni MA26, MA9 e MA42 che ricadono fuori dall'OSMA; per il primo campione questo è spiegato dal metasomatismo modale ben evidente in sezione sottile e emerso anche dall'analisi dei clinopirosseni. Per i restanti due campioni invece questo andamento discordante rispetto al trend può essere spiegato dall'elevato grado di ricristallizzazione del campione stesso che ha mascherato in parte o in toto i processi di impoverimento della peridotite per fusione parziale.

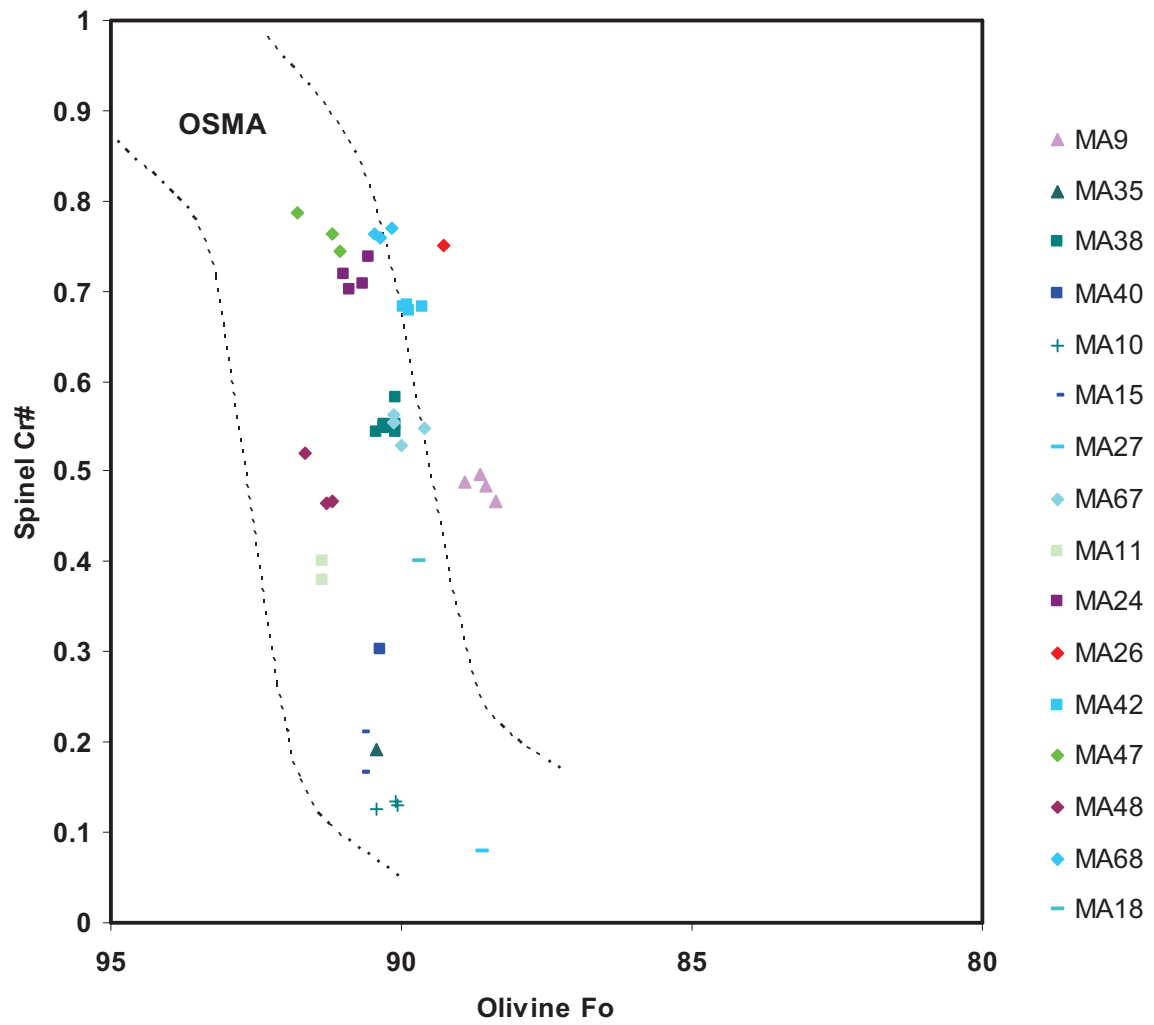


Figura 3.2.15 – Relazione tra il contenuto in forsterite (Fo) nelle olivine e il Cr# negli spinelli degli xenoliti di mantello di Mega. Le linee tratteggiate rappresentano l'OSMA (Olivine Spinel Mantle Array) estratto da Arai (1994).

3.3 GEOTERMobarOMETRIA

La modellizzazione delle condizioni di temperatura del mantello che soggiace le zone di studio è stata effettuata applicando il geotermometro ortopirosseno-clinopirosseno proposto da Brey e Köhler (1990) che si basa sull'equilibrio del componente enstatite tra i due pirosseni. Per modellizzare la profondità alla quale questo equilibrio si verifica abbiamo invece utilizzato il geobarometro di Köhler e Brey (1990) che considera la ripartizione del calcio tra olivina e clinopirosseno dipendente dalla pressione. E' importante evidenziare comunque che per le peridotiti a spinello i geobarometri hanno sempre mostrato alcuni problemi legati alla limitata affidabilità delle pressioni barometriche ottenute. Detto ciò, l'assenza di plagioclasio e di granato nei campioni analizzati suggerisce un intervallo di pressioni di equilibrio per le peridotiti nel campo di stabilità dello spinello, lontano cioè dalle zone di transizione tra le fasi granato/spinello e spinello/plagioclasio; il che vuol dire un intervallo di pressione tra gli 8 e i 20 Kb.

Con queste premesse si è cercato di individuare le temperature e pressioni di equilibrio ottimali per entrambe le popolazioni investigate. I noduli del sito di Mega (Sidamo) hanno tessiture protogranulari e non presentano interazioni con il magma incassante o tessiture pirometamorfiche tali da destabilizzare il reticolo dei pirosseni come invece si riscontra nei noduli campionati nel sito di Azrou (Atlante Medio). L'applicazione dei geotermometri e geobarometri risulta quindi ottimale principalmente per il sito di Mega che mostra, anche all'osservazione petrografica al microscopio ottico, di possedere i migliori requisiti per l'applicazione dei modelli di Brey e Köhler (1990) e Köhler e Brey (1990).

Il geotermometro si basa sulla formula:

$$T_{BKN} [^{\circ}K] = \left\{ \frac{23664 + [24,9 + (126,3 \cdot X_{Fe}^{Cpx})] \cdot P}{13,38 + Ln(K_D^*)^2 + (11,59 \cdot X_{Fe}^{Opx})} \right\}$$

dove:

$$K_D^* = \frac{(1 - Ca^*)^{Cpx}}{(1 - Ca^*)^{Opx}} \quad Ca^* = \frac{Ca^{M2}}{(1 - Na^{M2})} \quad X_{Fe}^{Opx, Cpx} = \frac{Fe}{(Fe + Mg)}$$

Dove la P è la pressione all'equilibrio delle due fasi clinopirosseno e ortopirosseno.

Per quanto riguarda il sito di Azrou, le temperature sono state calcolate su 6 campioni (5 lherzoliti e 1 harzburgite) mostrando un intervallo che va dagli 850 ai 960 °C nelle lherzoliti e di 1087 °C per l'harzburgite (AT3). Per il sito di Mega invece sono stati calcolati le temperature su 11 campioni (5 lherzoliti e 6 harzburgiti); dai dati così ricavate si nota che la differente composizione modale (harzburgiti-lherzoliti) non si riflette in due differenti range di temperatura, ma al contrario sono interdigerati e uniformati in un unico campo che pone le condizioni termometriche del mantello soggiacente il sito di Mega in un intervallo di temperature tra i 860 e 1120 °C.

Secondo il modello geotermobarometrico di Köhler e Brey (1990), la pressione di equilibrio viene calcolata utilizzando la ripartizione del calcio tra olivina e clinopirosseno ed è descritta dalla formula:

$$P[\text{Kb}] = \left[\frac{-T \cdot \ln(D_{Ca}) - 5792 - 1,25 \cdot T}{42,5} \right]$$

per $T[^\circ\text{K}] \leq (1275,25 + 2,827 \cdot P)$

dove: $D_{Ca} = \frac{Ca^{Ol}}{Ca^{Cpx}}$

con Ca_{Ol} , Ca_{Cpx} : proporzioni atomiche di Ca nella formula strutturale di olivina e clinopirosseno basate su 4 e 6 ossigeni rispettivamente. L'incertezza del geobarometro è valutata nell'intorno di $\pm 1,7$ Kbar (1σ), in accordo con Köhler e Brey (1990).

Considerando l'elevata velocità di diffusione del calcio in olivina rispetto ai pirosseni, questo barometro risulta essere molto sensibile al raggiungimento dell'equilibrio tra le fasi. Un leggero disequilibrio sarebbe infatti responsabile di barometrie troppo basse, non realistiche per la facies in cui ci troviamo. Per i noduli di Azrou (Atlane Medio) l'intervallo di pressione calcolato va da 11 a 14 Kbar, corrispondenti a profondità tra i 35 e i 45 km; mentre l'intervallo barometrico nel quale ricadono i noduli di Mega (Sidamo) si pone tra i 9 e i 18 Kbar di pressione, corrispondenti a profondità tra i 30 e i 60 km.

I dati così ottenuti sono stati poi inseriti in un grafico P-T (fig. 3.3.1), dove in ascissa troviamo le temperature espresse in gradi celsius ed in ordinata troviamo le pressioni espresse in Kb. Per confronto sono state inserite la geoterma continentale calcolata attraverso il flusso di calore di Pollak & Chapman (1977); e la geoterma ricavata da Conticelli et al., 1999 sugli xenoliti etiopici.

Si può osservare che i valori di temperatura e pressione dei campioni di Mega, analizzati in questa tesi, si distribuiscono nel grafico P-T in accordo con la geoterma di Conticelli et al., 1999; mentre i campioni di Azrou tendono invece a disporsi secondo un diverso allineamento, suggerendo un diverso andamento della geoterma locale.

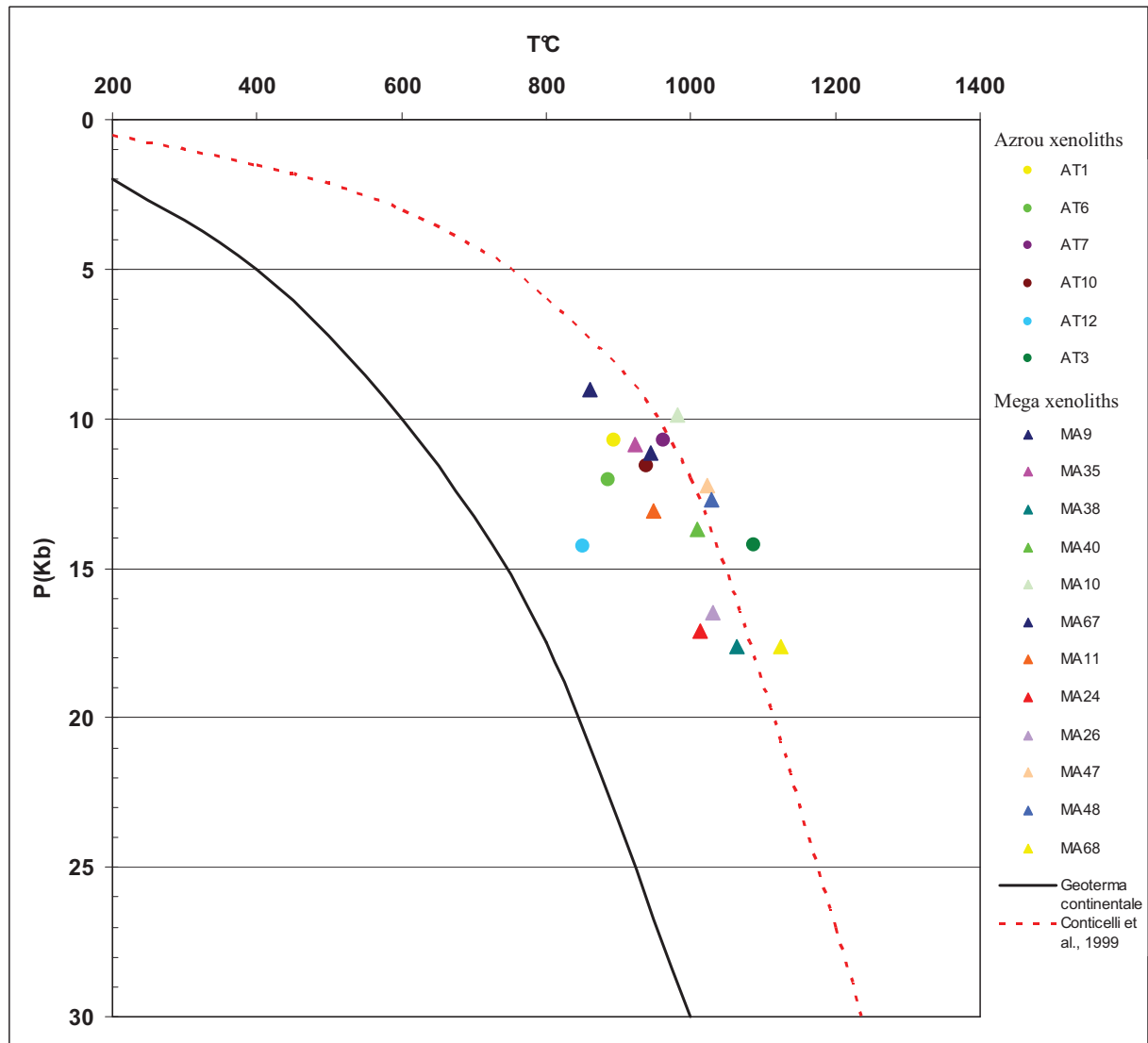


Figura 3.3.1 – Diagramma P-T di equilibrio per gli xenoliti di mantello dei siti di Azrou (cerchi) e di Mega (triangoli), comparati con la geoterma continentale di Pollack & Chapman, 1977 (linea continua) e la geoterma ricavata da Conticelli et al., 1999 (linea tratteggiata).

4 ANALISI DEGLI ELEMENTI IN TRACCE

4.1 NODULI DI MANTELLO DI AZROU (Atlante Medio, Marocco)

4.1.1 ANALISI DEGLI ELEMENTI IN TRACCE SU ROCCIA TOTALE (ICP-MS)

Sono stati analizzati in spettrometria di plasma massa (ICP-MS) tutti e 12 i campioni di xenoliti di mantello (10 lherzoliti, 1 harzburgite e 1 olivin-websterite) provenienti dal sito di Azrou di cui si era precedentemente fatta la sezione sottile, secondo le modalità e le specifiche analitiche descritte in Appendice A. Le analisi degli elementi in tracce su roccia totale sono rappresentate in tabella 3A.

Gli spiderdiagram (fig. 4.1.1) delle terre rare (Rare Earth Elements, REE), normalizzate alle condriti C1 (McDonough e Sun, 1995), mostrano una distribuzione delle terre rare pesanti (Heavy REE, HREE) piatta con valori da 0.6 a 2.0 volte le condriti. Le terre rare leggere (Light REE, LREE) invece risultano essere variamente arricchite, specialmente in La e Ce con un rapporto La_N/Yb_N compreso tra 1.1 e 15.6, dove il valore più alto viene registrato nell'harzburgite (AT3).

I campioni analizzati possono essere suddivisi in 4 gruppi; il primo è costituito dalle lherzoliti fertili, che mostrano un pattern delle HREE e delle Medie REE (MREE) piatto, con il Tb in lieve anomalia positiva, e un frazionamento positivo nelle LREE variabile con valori in La anche superiori al 10 condritico (campione AT10). Il secondo gruppo comprende l'harzburgite AT3, la lherzolite povera in clinopirosseno (cpx normativo 7wt%) AT12 e la lherzolite AT1. Per quel che riguarda le prime due, anche in questo caso i patterns delle HREE risultano piatti, sebbene con valori inferiori all'1 condritico, e presentano un frazionamento positivo nelle MREE e LREE, ben più marcato nell'harzburgite, a conferma della maggiore permeabilità ai fusi metasomatici delle peridotiti più refrattarie. Il campione AT1 mostra invece un lieve frazionamento negativo dal Lu fino all'Eu con un deciso arricchimento nelle LREE fino a 3 condritico nel La, similmente a quanto già visto per l'harzburgite. Nel terzo gruppo troviamo i campioni AT5 e AT13, questi risultano essere arricchiti in tutte le terre rare mostrando un pattern piatto delle HREE a circa 2 condritico e un frazionamento positivo delle MREE (Sm_N/Dy_N 2.3 condritico, AT5) e LREE, in quest'ultime meno deciso (La_N/Nd_N 1.3 condritico, AT5). L'olivin-websterite mostra un pattern piatto delle HREE e MREE fino al Tb, un

frazionamento negativo in Gd e Eu e un arricchimento in LREE, indicatore di metasomatismo.

Per quel che riguarda gli elementi in trace si nota che nel gruppo delle lherzoliti (fig. 4.1.2) il Nb è in anomalia negativa, lo Sr in positiva e non si registrano anomalie in Zr e Ti. Per contro nel gruppo misto (lherzolute-harzburgite) (fig. 4.1.2) si nota che l'harzburgite AT3 mostra anomalie negative in Nb, Zr, Hf e Ti; comportamento analogo anche per le lherzoliti AT1 e AT12. Nel terzo gruppo (fig. 4.1.2) i campioni AT5 e AT13 hanno un comportamento antitetico; il primo presenta anomalia negativa in Zr, Hf e Ti ma non in Nb, il secondo anomalia negativa in Nb ma non in Zr, Hf e Ti. Nell'olivin-websterite si hanno anomalie negative in Nb e Zr e una forte anomalia positiva in Sr e Ti.

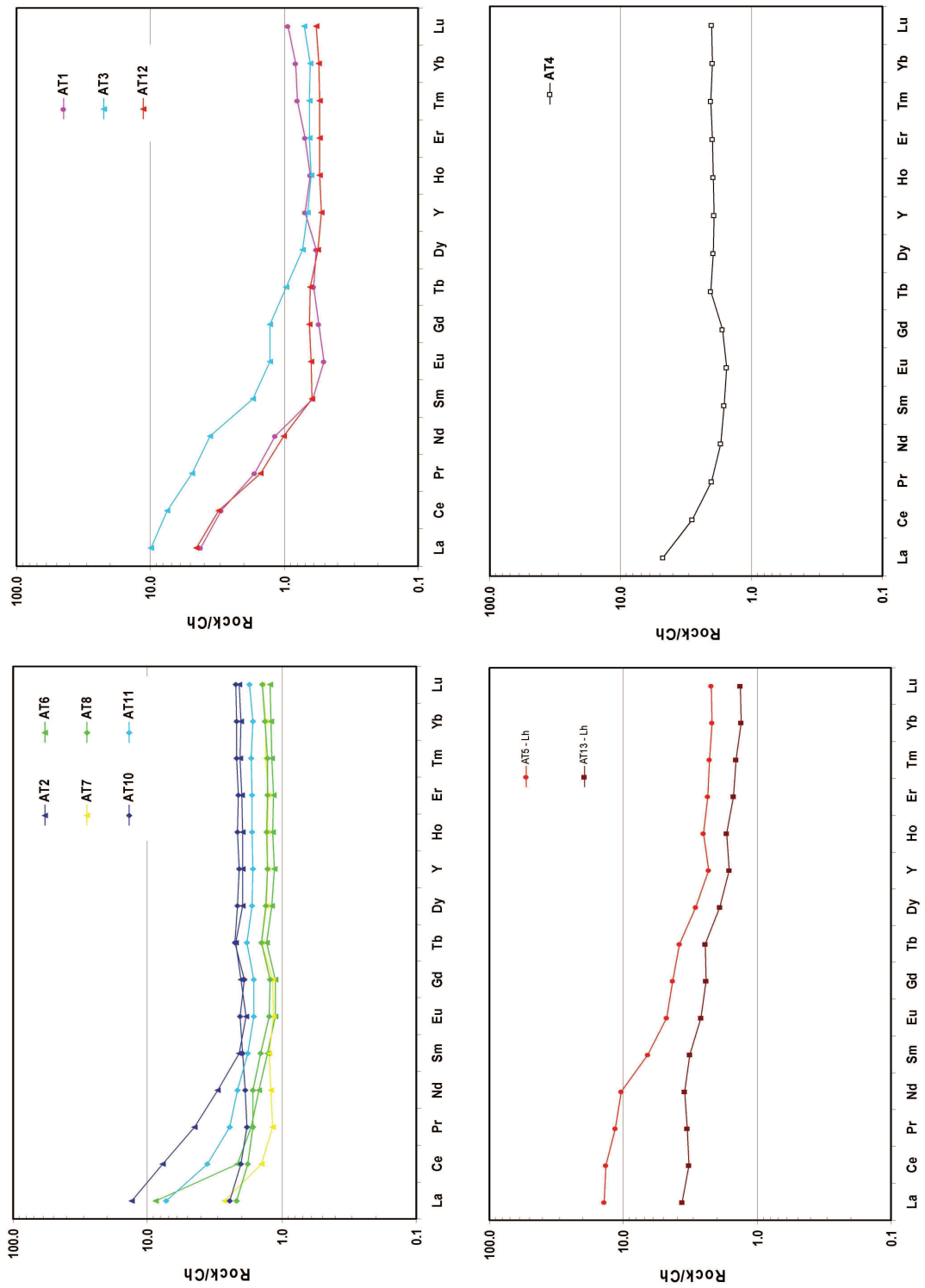


Figura 4.1.1 – Distribuzione delle terre rare normalizzate alla composizione delle condriti (McDonough & Sun, 1995) del sito di Azrou.

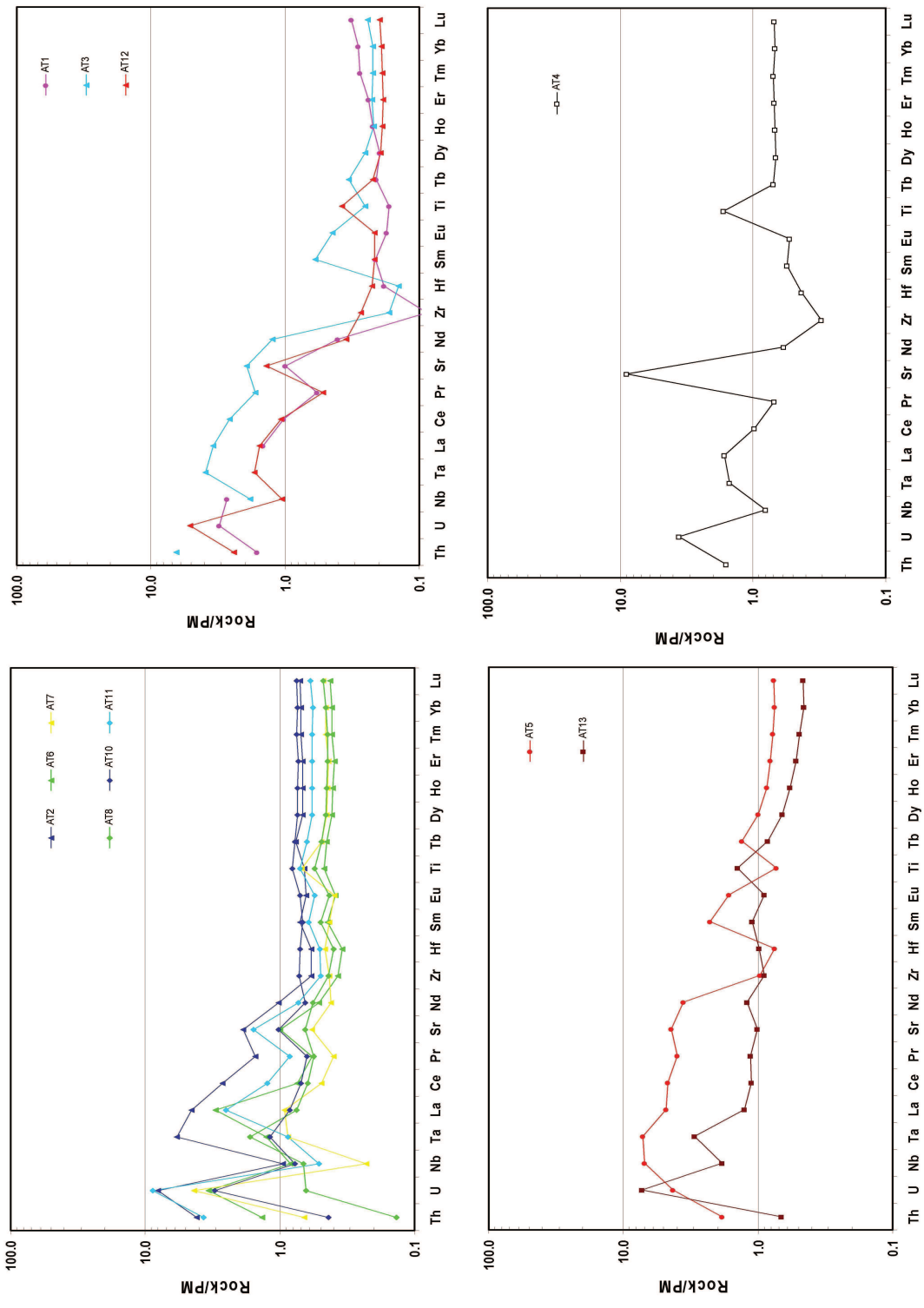


Figura 4.1.2 – Distribuzione degli elementi incompatibili normalizzati alla composizione del mantello primordiale (Sun & McDonough, 1989) del sito di Azrou.

4.1.2 ANALISI DEGLI ELEMENTI IN TRACCE “*IN SITU*”(LA-ICP-MS)

Per il sito di Azrou sono stati analizzati clinopirosseni di 7 campioni (5 lherzoliti tra cui l'AT12 povera in cpx, l'harzburgite e l'olivin-websterite), secondo le specifiche analitiche descritte in Appendice A. Le analisi sono riportate in tabella 4A.

I clinopirosseni analizzati mostrano patterns delle terre rare (normalizzate alle condriti, McDonough & Sun, 1995) generalmente concordi con quelli delle rispettive analisi in roccia totale, le differenze quando presenti sono riconducibili essenzialmente al gruppo delle terre rare leggere. Solo i clinopirosseni del campione AT4 (olivin-websterite) mostra un pattern delle terre rare leggere completamente diverso da quello visto dall'analisi di roccia totale.

Le terre rare pesanti (HREE) e medie (MREE) sono caratterizzate da patterns piatto con intervallo composizionale che va da 3 a poco oltre il 10 volte il valore delle condriti (fig. 4.1.3). Le terre rare leggere (LREE) presentano invece un variabile arricchimento con rapporto La_N/Yb_N che va dallo 0.4 della lherzolite più ricca in cpx (AT10) al 23.7 della più refrattaria harzburgite (AT3); La_N/Yb_N pari a 0.1 nell'olivin-websterite. Come nelle analisi ICP-MS in roccia totale anche dalle analisi in situ sui clinopirosseni i campioni di Azrou possono essere divisi in distinti gruppi analogamente a quanto visto in precedenza. I campioni AT1, AT3 e AT12, presentano i maggiori arricchimenti delle LREE, registrando i più alti valori di La_N/Yb_N ; peculiare il pattern quasi magmatico convesso verso l'alto dell'harzburgite a testimonianza di una forte interazione del campione con i fusi metasomatici. Il campione AT7 mostra invece un tipico pattern a cucchiaio (*spoon-shape REE pattern*) con andamento piatto delle HREE e MREE (con valori al 10 condritico), frazionamento negativo in Ce, Pr, Nd e arricchimento in La. L'harzburgite AT6 invece mostra un frazionamento positivo nelle LREE con pattern concavo verso l'alto e valori al 10 condritico per le MREE e HREE. Sembra invece non aver subito alcun processo di estrazione di fuso o arricchimento metasomatico il campione AT10, il quale presenta un pattern REE pressoché piatto attorno al 10 condritico con lieve impoverimento in La e Ce tipico dei cpx di peridotiti primordiali. L'olivin-websterite (AT4) mostra per i clinopirosseni un pattern piatto nelle HREE e MREE (10 x condritico), analogamente alla roccia totale (2 x condritico), ma un deciso impoverimento nelle LREE (fino all'1 condritico del La) contrariamente alla roccia totale dove invece si registra un arricchimento nelle LREE.

Gli elementi incompatibili normalizzati al PM (Sun & McDonough, 1989) (fig. 4.1.4) mostrano una marcata anomalia negativa in Nb in tutti i campioni analizzati; anomalie negative più o meno marcate in Zr, Hf e Ti per i campioni AT1, AT3, AT12 e AT6; mentre solo anomalia negativa in Ti viene riscontrata nella lherzolite AT7. Il campione AT10 non mostra evidenti anomalie se non in Nb e Ta, come detto in precedenza. L'olivin-websterite mostra un pattern concorde con quello dei campioni che hanno subito estrazione di fuso.

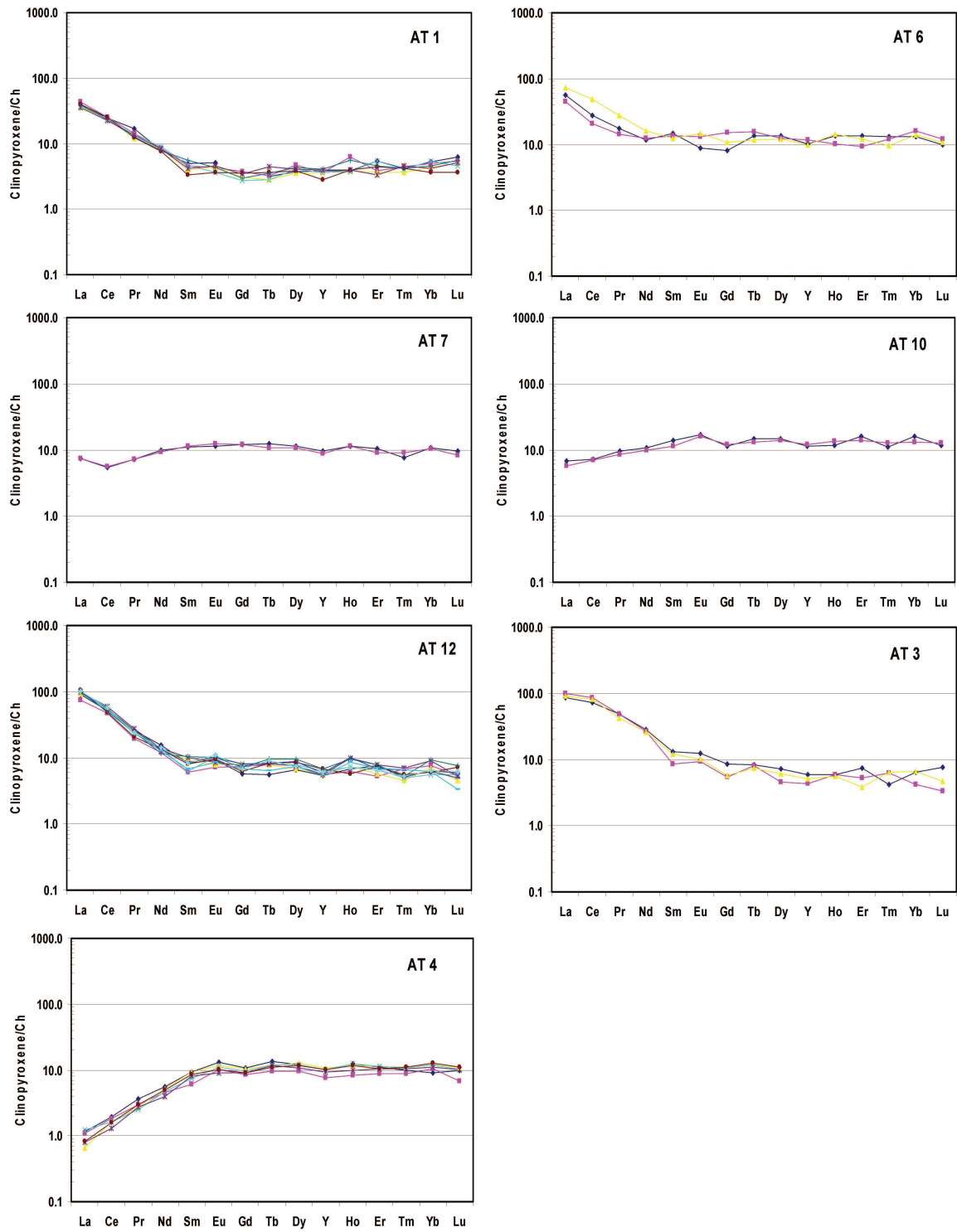


Figura 4.1.3 – Distribuzione delle terre rare normalizzate alle condriti (McDonough & Sun, 1995) dei clinopirosseni degli xenoliti di Azrou.

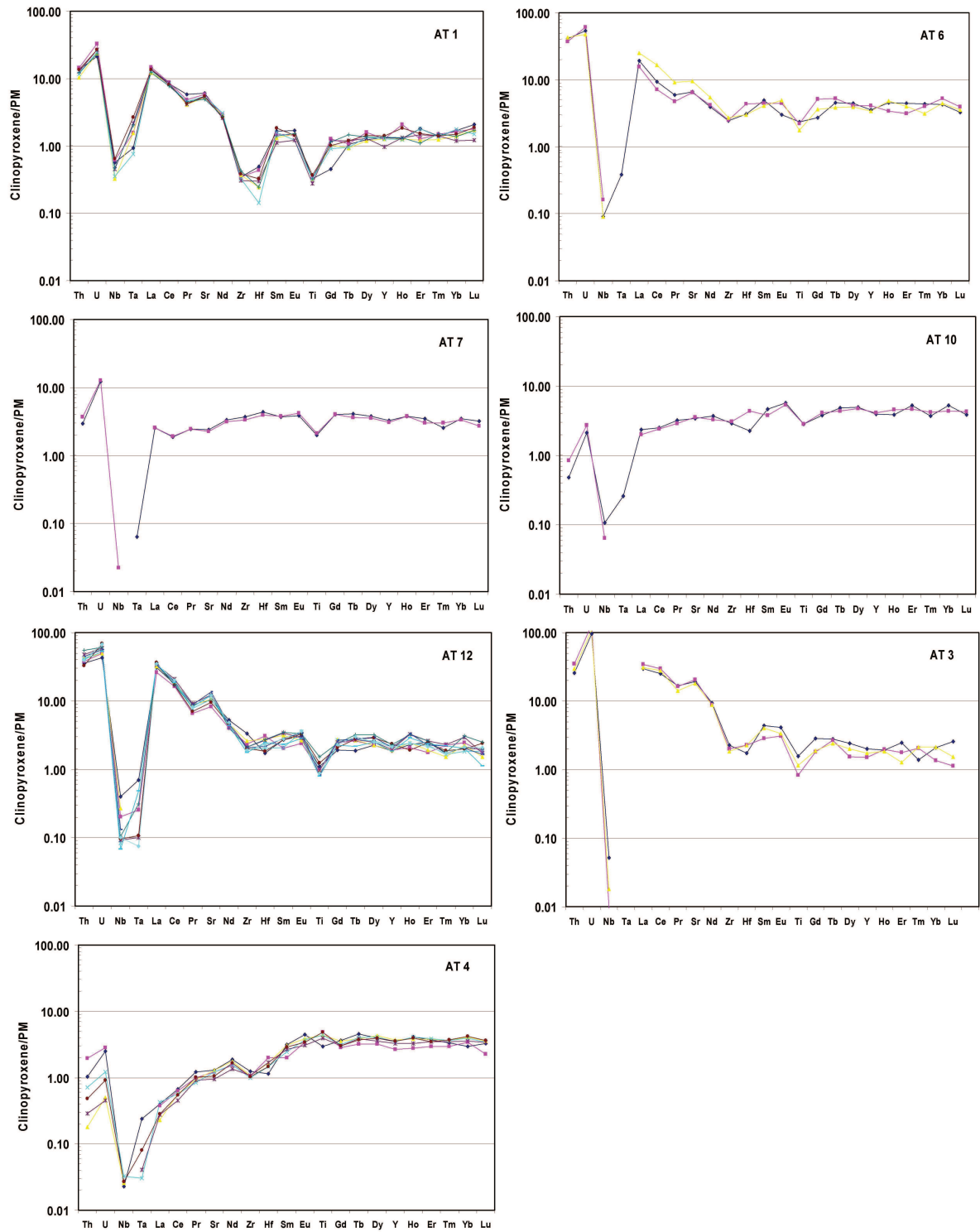


Figura 4.1.4 – Distribuzione degli elementi incompatibili normalizzati al mantello primordiale (Sun & McDonough, 1995) dei clinopirosseni di Azrou.

4.2 NODULI DI MANTELLO DI MEGA (Main Ethiopian Rift, MER)

4.2.1 ANALISI DEGLI ELEMENTI IN TRACCE SU ROCCIA TOTALE (ICP-MS)

Sono stati analizzati con questa tecnica 33 campioni di xenoliti di mantello (14 harzburgiti, 18 tra lherzoliti impoverite e fertili, e l'olivin-websterite) provenienti dal sito di Mega (tabella 3B). Le modalità e le specifiche analitiche sono descritte in Appendice A. I risultati delle analisi delle terre rare (Rare Earth Elements, REE) sono stati normalizzati al valore delle condriti indicati da McDonough e Sun (1995). Gli spiderdiagram (fig. 4.2.1) mostrano un pattern delle terre rare pesanti (Heavy REE, HREE) generalmente piatto con valori variabili da 2 a 0.14 volte il valore delle condriti passando dalle più fertili lherzoliti alle più refrattarie harzburgiti, compatibile con un progressivo impoverimento del mantello attraverso l'estrazione di fusi basici.

Per contro si ha un variabile arricchimento nelle terre rare leggere (Light REE, LREE), molto probabilmente dovuto a processi metasomatici, con un rapporto La_N/Yb_N variabile da 0.1 a 41.5 dove i rapporti più alti si registrano nelle harzburgiti. L'olivin-websterite risulta invece essere completamente estranea alle peridotiti di mantello, mostrando un sostanziale arricchimento nelle terre rare pesanti con un pattern piatto con valore di circa 3 volte quello delle condriti e un impoverimento in La, Ce e Pr.

Andando ad osservare gli spiderdiagram degli elementi in tracce (fig. 4.2.2) normalizzati al mantello primordiale (Sun & McDonough, 1989) viene confermato il generale arricchimento degli elementi incompatibili nelle peridotiti più refrattarie ma con la presenza di anomalie negative in Zr, Hf e Ti nei campioni che presentano il maggior frazionamento (MA43, MA47, MA48).

Tali anomalie vengono solitamente imputate ad una natura carbonatitica degli agenti metasomatici (Coltorti et al., 1999). Questi agenti metasomatici, se non vere e proprie silico-carbonatiti erano magmi fortemente alcalini, e sottosaturi in silice (nefeliniti, basaniti, melilititi) e caratterizzati da un alto grado di carbonatazione.

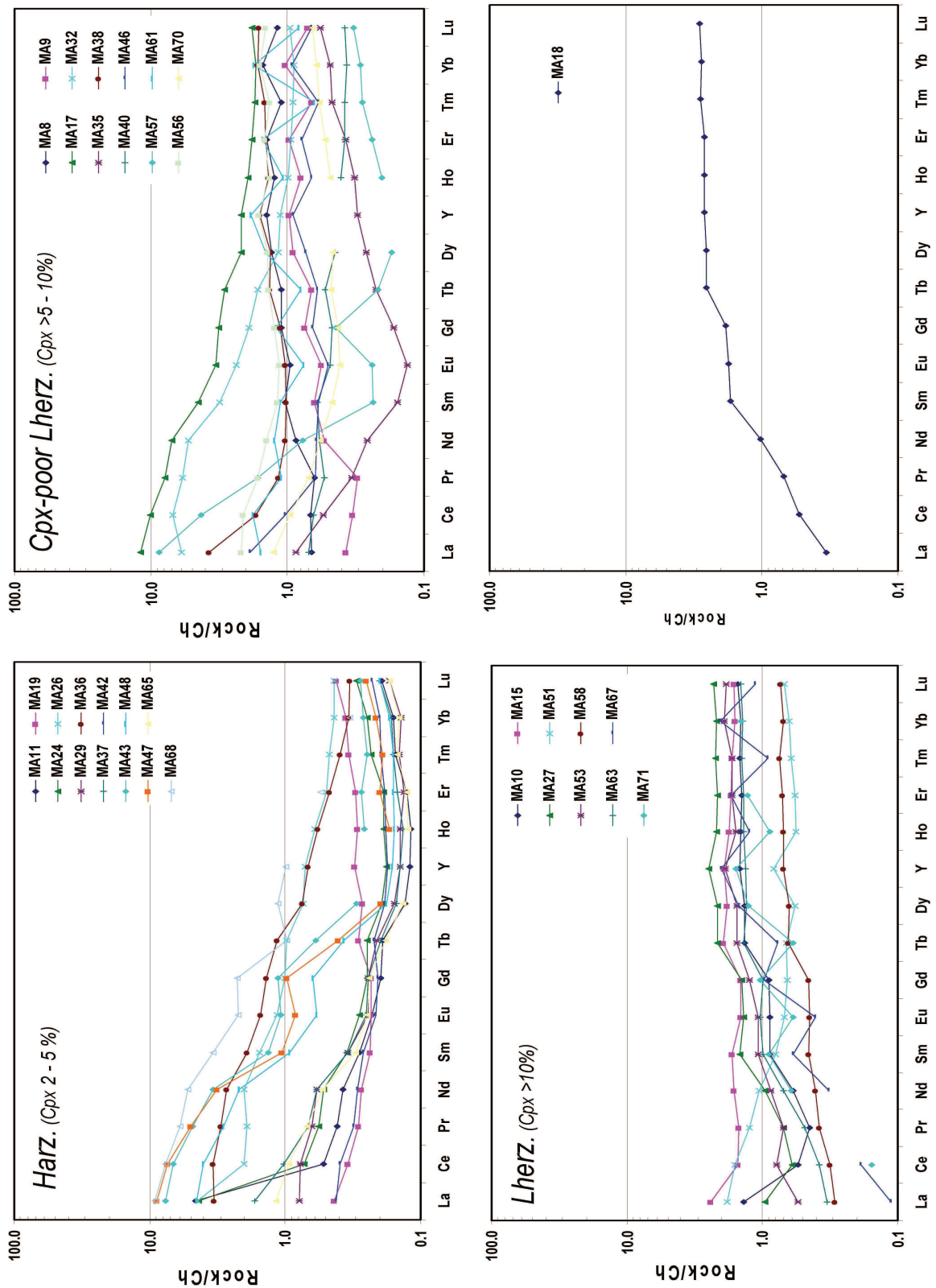


Figura 4.2.1 – Distribuzione delle terre rare normalizzate alla composizione delle condriti (McDonough & Sun, 1995) del sito di Mega.

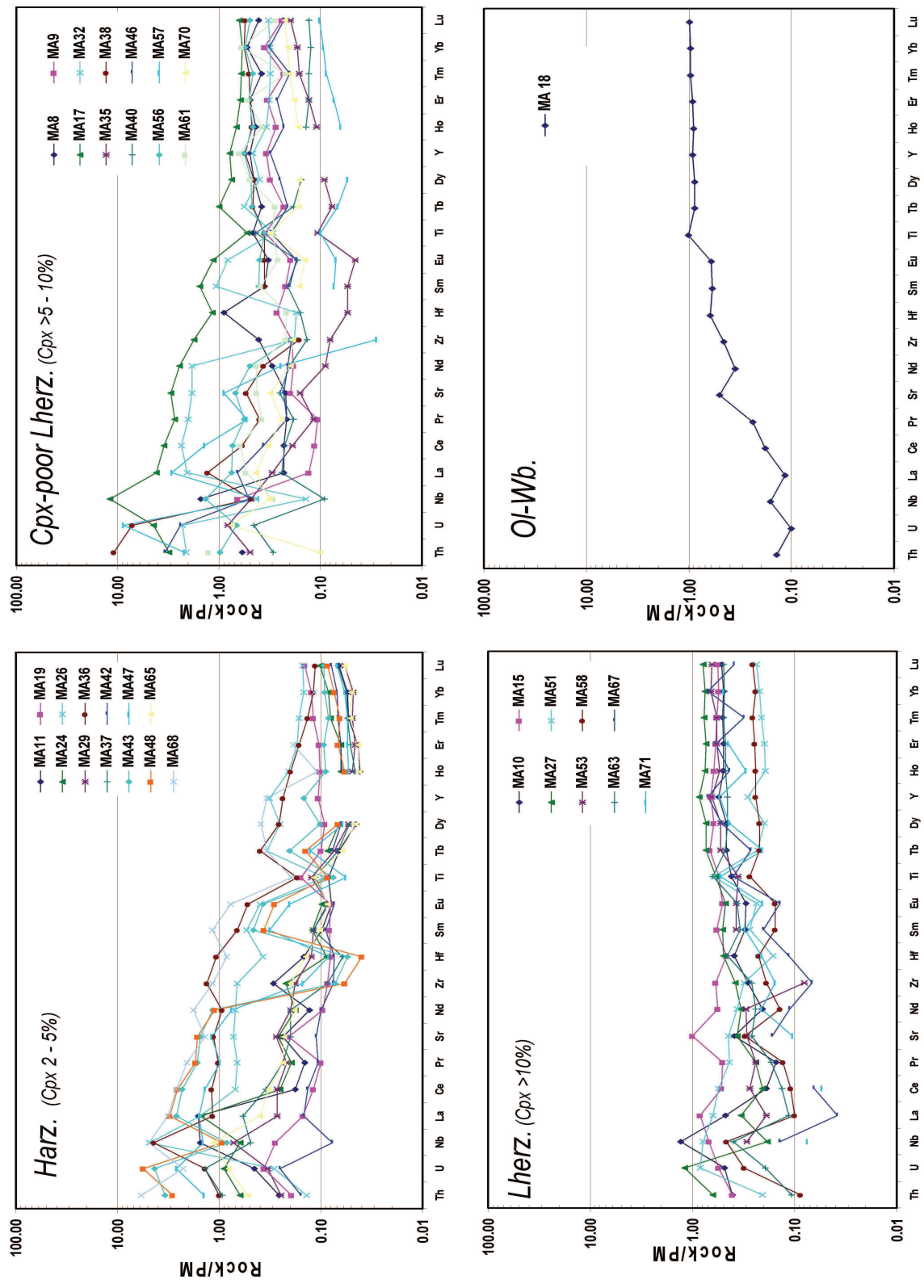


Figura 4.2.2 – Distribuzione degli elementi incompatibili normalizzati alla composizione del mantello primordiale (Sun & McDonough, 1989) del sito di Mega.

4.2.2 ANALISI DEGLI ELEMENTI IN TRACCE “*IN SITU*”(LA-ICP-MS)

Le analisi degli elementi in tracce e ultratracce eseguite su singole fasi mineralogiche sono state effettuate secondo le modalità e le specifiche analitiche descritte in Appendice A. Le analisi sono state effettuate su clinopirosseni di 18 campioni (10 lherzoliti, 7 harzburgiti e 1 olivin-websterite) provenienti dal sito di Mega (tabella 4B).

I clinopirosseni analizzati mostrano una distribuzione delle terre rare concorde con le rispettive analisi di roccia totale, le differenze, quando presenti, sono essenzialmente riconducibili al gruppo di elementi più mobili, in particolare al La. Le terre rare pesanti (HREE) sono generalmente caratterizzate da andamenti piatti e si distribuiscono in un intervallo compreso tra 2 e 10 condritico; eccezione è il campione MA17 che risulta particolarmente arricchito in HREE arrivando a circa 20 volte il valore delle condriti. Come visto anche nella roccia totale gli xenoliti di mantello di Mega mostrano un variabile arricchimento nelle terre rare leggere (LREE) e per alcuni campioni anche nelle terre rare medie (MREE), con un rapporto La_N/Yb_N che va dallo 0.1 nelle lherzoliti più fertili in clinopirosseno al 64.4 delle harzburgiti più refrattarie. Il rapporto La_N/Eu_N varia invece da 0.1 a 15.8, anche qui concordemente con il grado di fusione parziale a cui i campioni sono stati sottoposti, e il successivo arricchimento metasomatico.

Osservando i campioni analizzati nel loro complesso, è possibile distinguere diverse tipologie di patterns. Un primo gruppo di campioni, che interessa le lherzoliti da povere (6-7 cpx) a fertili (oltre 10 cpx), (fig. 4.2.3, a) mostra il tipico pattern a cucchiaio, tipicamente definito “*spoon-shape REE pattern*”, con un andamento delle MREE e HREE piatto, con valore attorno al 10 condritico, un leggero impoverimento in Pr ed Eu ed un variabile arricchimento in La e Ce. Questo profilo è stato interpretato come il risultato di uno o più episodi di impoverimento per estrazione di fusi basici, ai quali è seguito almeno un evento metasomatico, che ha reintrodotto nel sistema gli elementi più incompatibili per la paragenesi peridotitica, intendendo con questi non solo le LREE, ma anche Th, U, Ba, K, Nb, etc.

Una seconda famiglia (fig. 4.2.4, a), che interessa invece i campioni più refrattari (cpx tra 2 e 5), mostra un andamento delle HREE piatto con valori dal 2 (MA11) al 5 condritico, e un frazionamento lineare positivo nelle MREE e LREE crescente verso il La. I campioni MA47 e MA48 (fig. 4.2.4, b) mostrano un patterns a uncino, con le HREE piatte tra il 2 e il 3 volte il valore delle condriti, e un frazionamento positivo delle MREE e LREE fino a valori di circa 150 volte quello delle condriti. I clinopirosseni presenti in piccole vene

nell'harzburgite MA26 (fig. 4.2.4, c) sono caratterizzati da un frazionamento positivo delle MREE/HREE e un pattern convesso verso l'alto delle LREE paragonabile a quello dei pirosseni cristallizzati da magmi alcalini (Jeffries et al., 1995; Foley et al., 1996; Dobosi & Jenner, 1999). Il campione MA35 (fig. 4.2.3, b) mostra una particolare forma a V del pattern, sia nella roccia totale che nei cpx; il frazionamento negativo in MREE può essere attribuito a una precedente fase di impoverimento a seguito dell'estrazione di fuso mentre l'arricchimento in LREE (La_N/Eu_N 14) deve essere connesso all'interazione con un agente metasomatico alcalino. L'MA68 (fig. 4.2.4, d) mostra invece un continuo frazionamento positivo verso La dalle terre rare medie alle leggere, in particolare il particolare trend di arricchimento nelle HREE, già osservato per altro in roccia totale, può suggerire un arricchimento della peridotite dovuto a un magma proveniente da una sorgente peridotitica a granato. Il campione MA17 (fig. 4.2.3, b), come detto in precedenza, risulta particolarmente ricco in HREE, fino a 20 condritico, e un frazionamento LREE/HREE positivo con valori del La e del Ce superiore al 100 condritico. L'olivin-websterite (fig. 4.2.5, a) invece mostra un pattern delle HREE piatto attorno al 10 condritico e un frazionamento negativo delle LREE, presumibilmente dovuto a processi di impoverimento dovuto a estrazione di fuso. Un discorso a parte va fatto per i clinopirosseni analizzati del campione MA32 (fig. 4.2.5, b); dai dati LA-ICP-MS è emersa una grande concentrazione del Rb e Ba ad indicare che i pirosseni analizzati sono derivati dal fuso e non danno quindi alcuna indicazione sulla peridotite che li contiene.

Gli spiderdiagram dei clinopirosseni normalizzati al mantello primordiale (Sun & McDonough, 1989) degli incompatibili evidenziano come tutti i campioni, generalmente arricchiti in tutti gli elementi, presentano anomalie negative più o meno marcate in Nb, Zr e Ti, spesso accompagnate da anomalie negative anche in Ta e Hf (fig. 4.2.6, 4.2.7 e 4.2.8). Analogamente con quanto visto per la roccia totale, tali patterns sono spesso interpretati in letteratura (Coltorti et al., 1999) come evidenza di un metasomatismo a natura carbonatitica. Questi agenti metasomatici, se non vere e proprie silico-carbonatiti erano magmi fortemente carbonatati alcalini e sottosaturi in silice (nefeliniti, basaniti, melilititi).

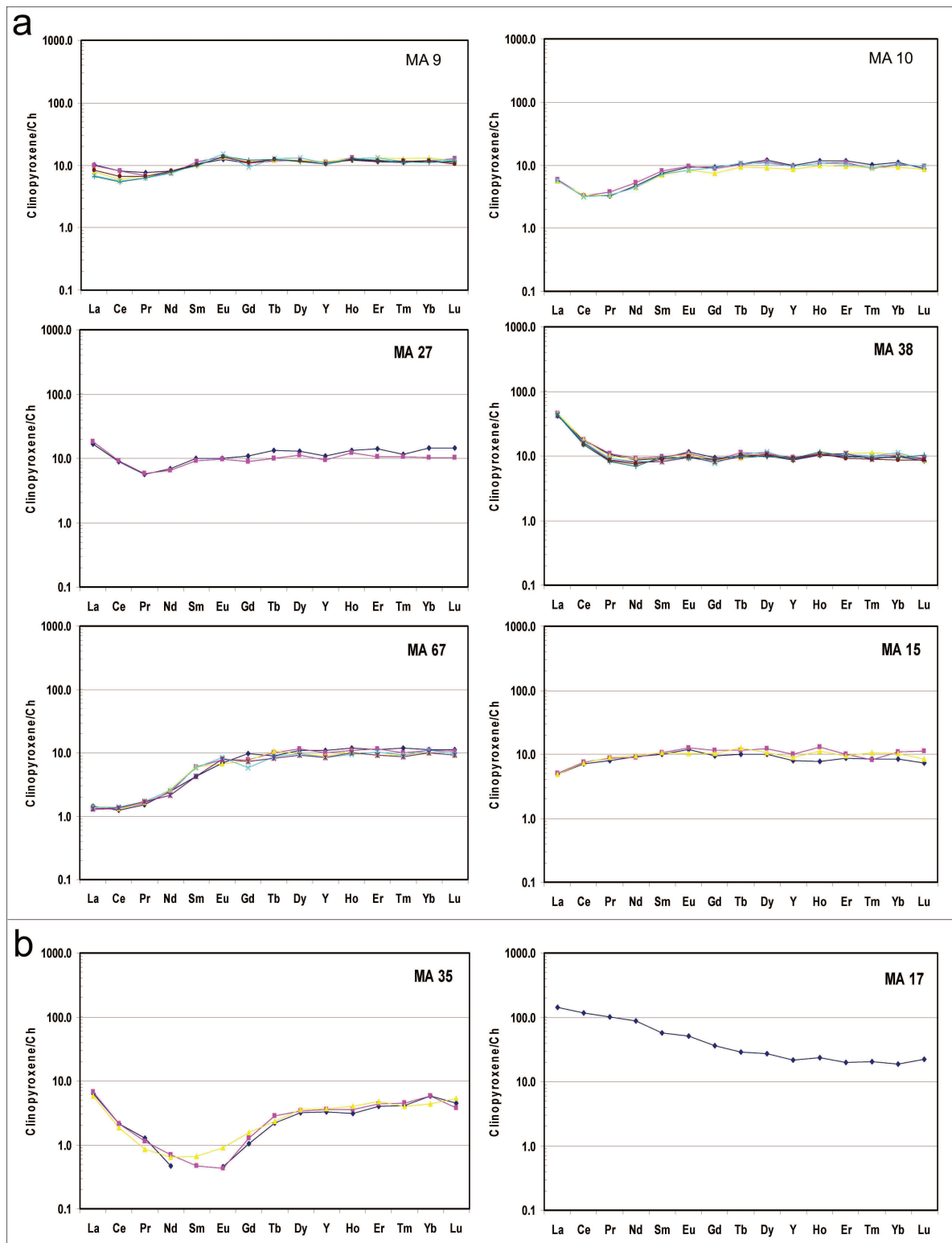


Figura 4.2.3 – Distribuzione delle terre rare normalizzate alle condriti (McDonough & Sun, 1995) delle ilherzoliti di Mega.

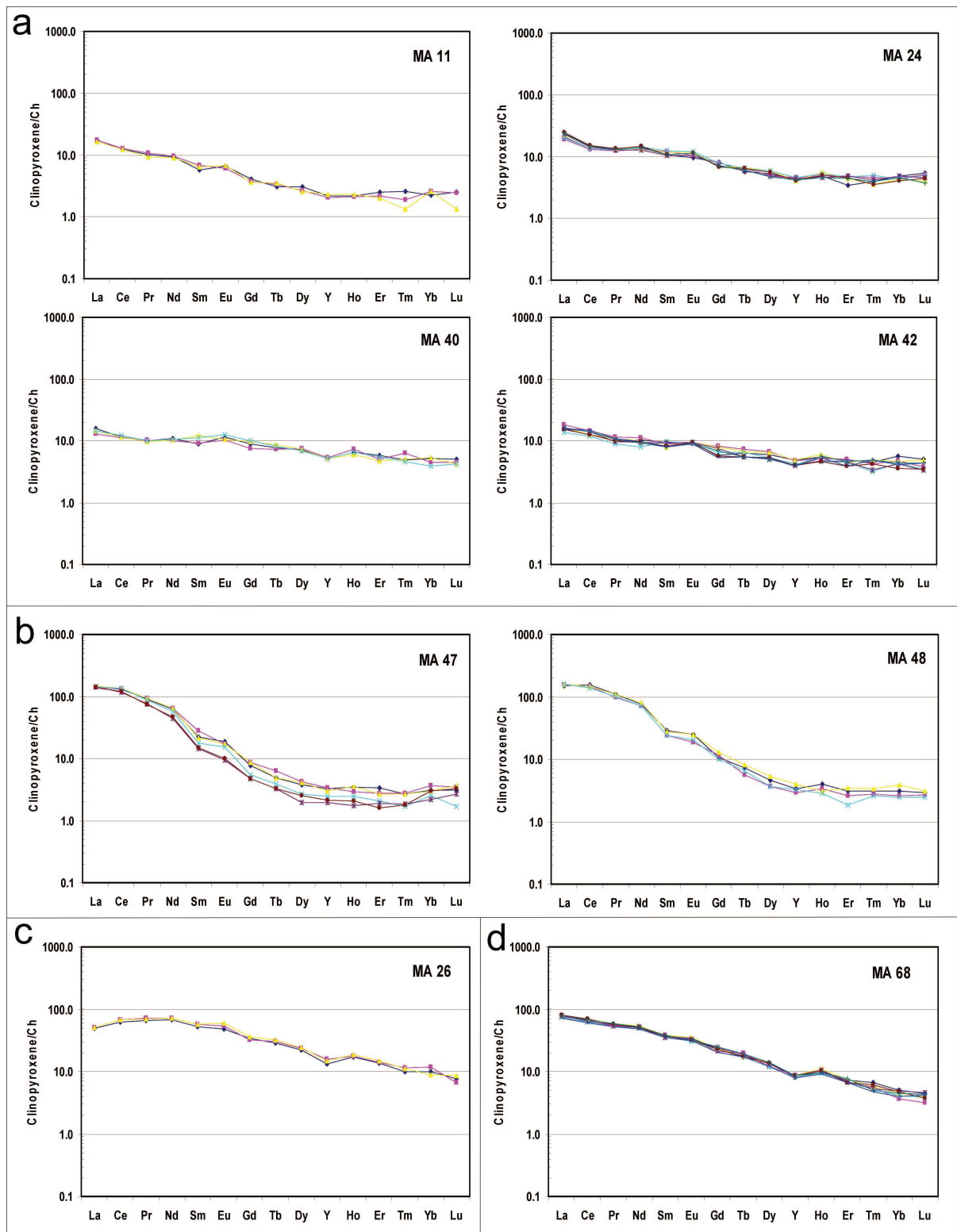


Figura 4.2.4 – Distribuzione delle terre rare normalizzate alle condriti (McDonough & Sun, 1995) delle harzburgiti di Mega.

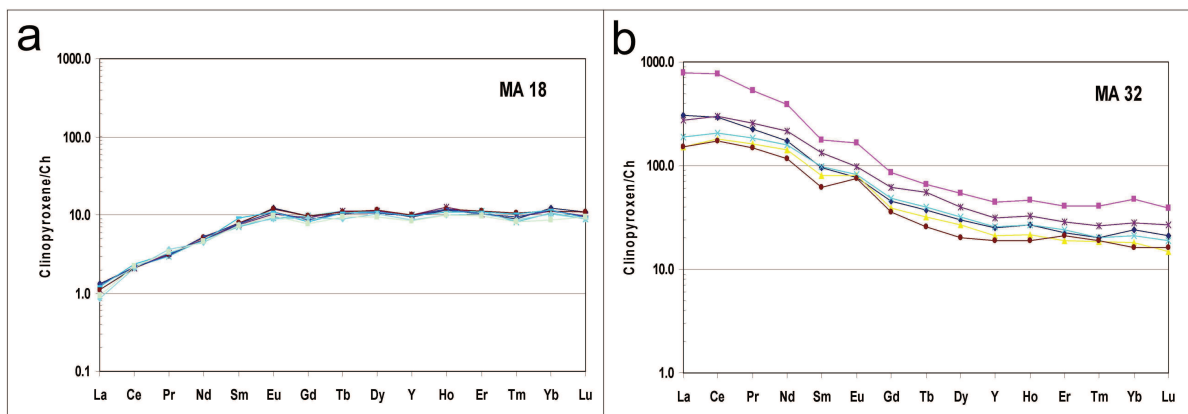


Figura 4.2.5 – Distribuzione delle terre rare normalizzate alle condriti (McDonough & Sun, 1995) dell'olivin-websterite MA18 e della lherzolite MA32 di Mega.

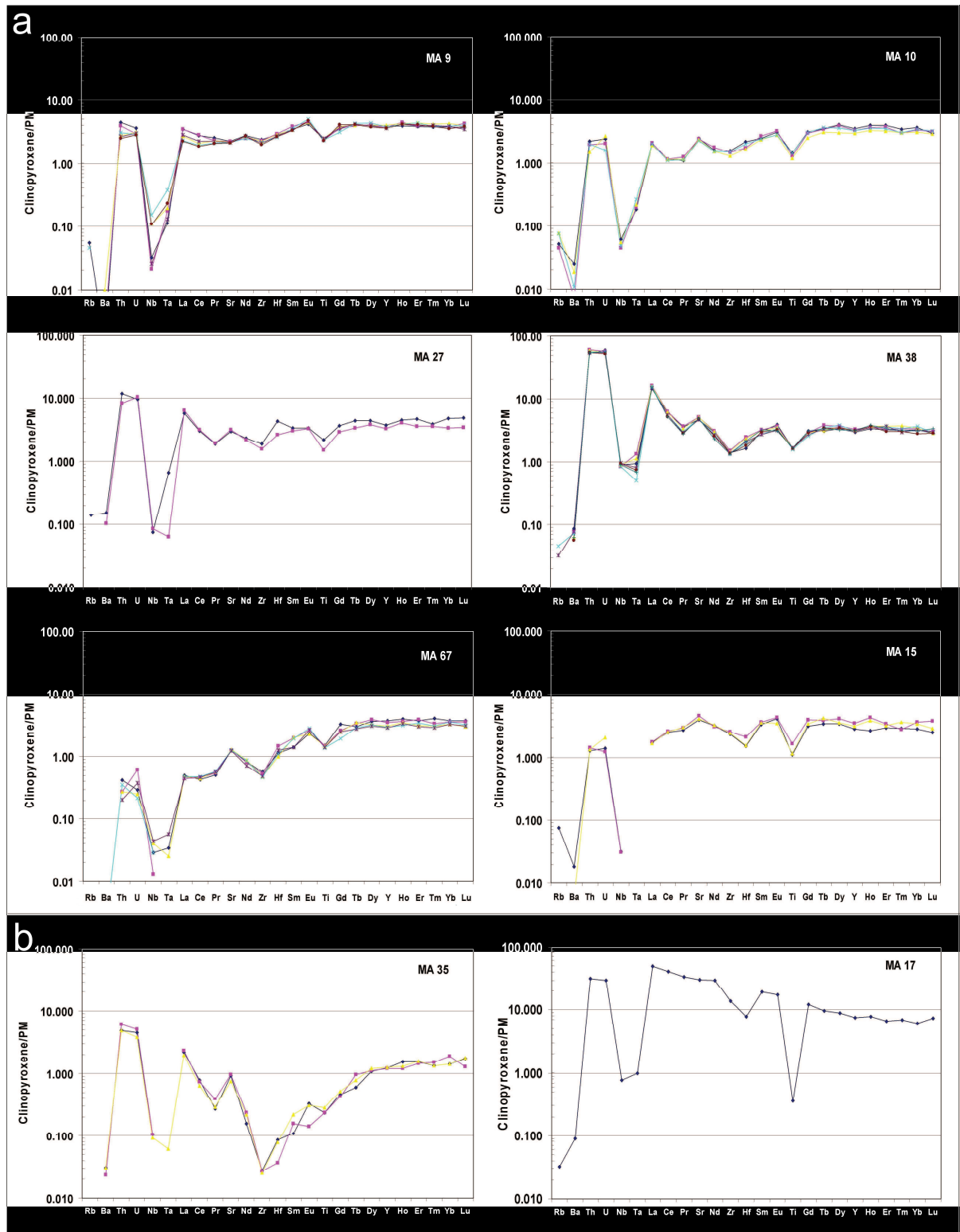


Figura 4.2.6 – Distribuzione degli elementi incompatibili normalizzati al mantello primordiale (Sun & McDonough, 1995) delle lherzoliti di Mega.

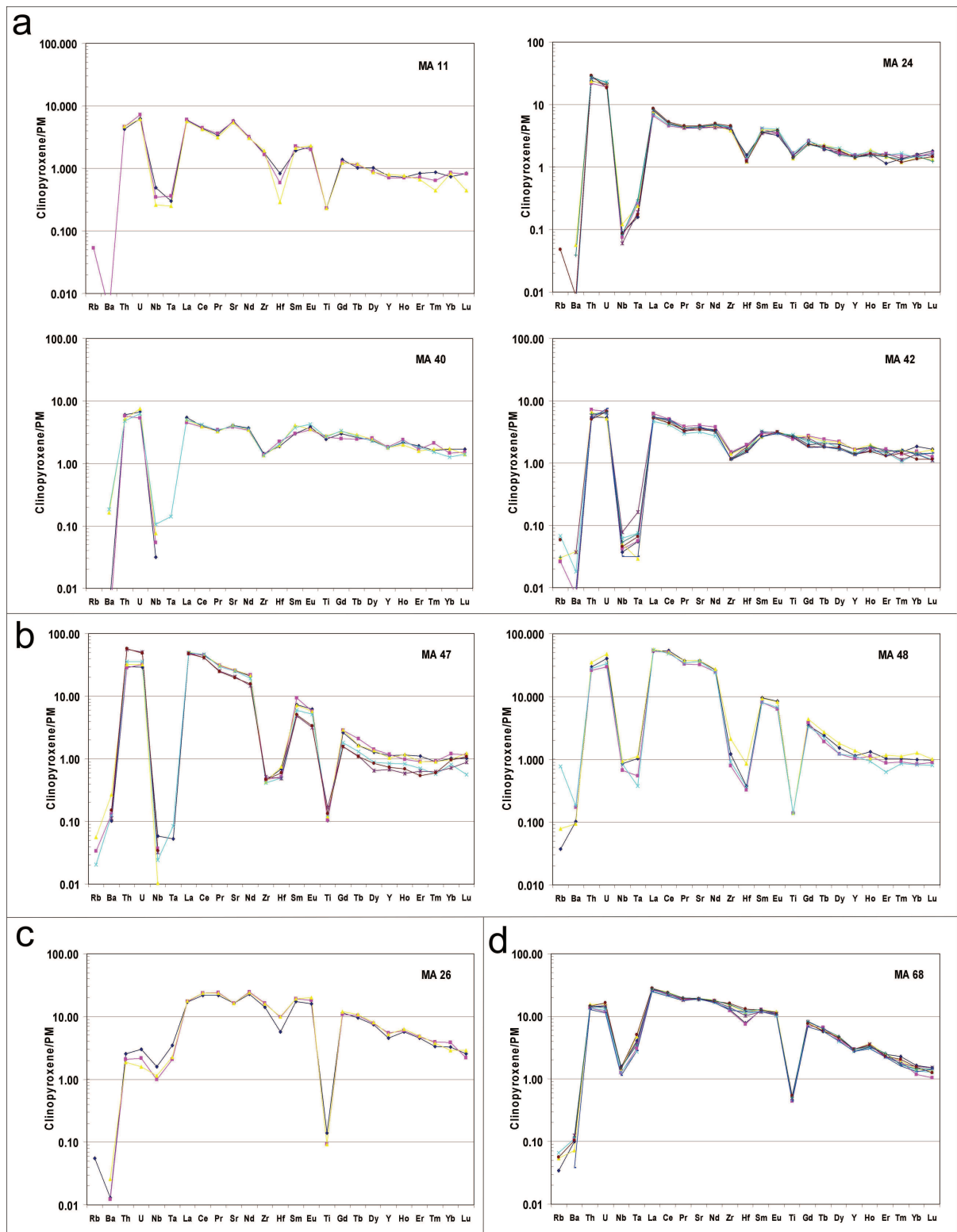


Figura 4.2.7 – Distribuzione degli elementi incompatibili normalizzati al mantello primordiale (Sun & McDonough, 1995) delle harzburgiti di Mega.

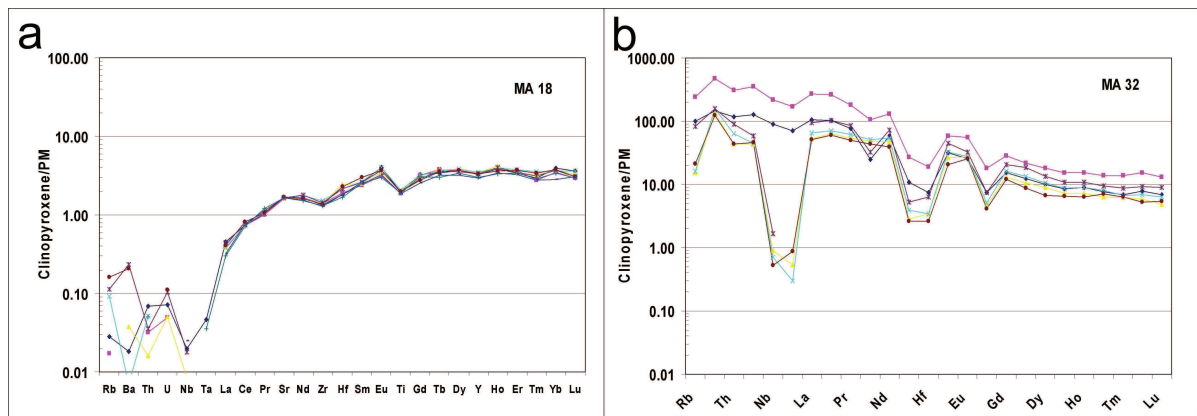


Figura 4.2.8 – Distribuzione degli elementi incompatibili normalizzati al mantello primordiale (Sun & McDonough, 1995) dell'olivine-websterite MA18 e della lherzolite MA32 di Mega.

5 MODELLISTICA ED AGENTI METASOMATICI

Dai dati analitici raccolti, in termini di elementi in tracce di roccia totale e dei clinopirosseni, sono state effettuati vari tentativi di ricostruire la storia evolutiva degli xenoliti provenienti sia dal sito di Azrou che da quello di Mega.

Si è cercato di fornire stime il più possibile precise a proposito delle entità dei processi di fusione parziale e ri-arricchimento metasomatico che hanno influito sugli xenoliti in esame, ma anche, sulle sorgenti di mantello sottostanti le aree di studio.

Come già visto, nei diagrammi di variazioni degli ossidi e elementi in tracce di roccia totale (vedi capitolo 3), per entrambe le popolazioni di xenoliti di mantello si è ipotizzato un unico trend con vari gradi di fusione parziale; per tale motivo si è cercato quindi di stimare, in modo più preciso possibile, per ogni singolo xenolite un grado di impoverimento. A tale scopo si è utilizzato un diagramma (Bianchini et al., 2007), nel quale vengono ricostruiti, sulla base del contenuto in terre rare, gli andamenti di impoverimento per fusione parziale (sia *batch melting* che *fractional melting*, secondo gli algoritmi proposti da Johnson et al., 1990), a partire da una sorgente di mantello fertile (Cpx_0) caratterizzata da un contenuto di REE pesanti (Yb_N) 14 volte il valore delle condriti e Nd_N/Yb_N 1.03 (fig. 5.1). Il risultato mostra in modo evidente come alcuni degli xenoliti di Azrou e di Mega possano essere pensati quali il risultato di processi di fusione parziale di entità variabile (F inferiore a 2% per i campioni AT6 e AT10 per Azrou; F fractional melting di circa 4 % per l'MA27 e maggiore di 7% per l'MA67 e F *batch melting* di circa 4% per l'MA9 e di 10% per l'MA10), questo gruppo è costituito da quei campioni che poco o nulla hanno risentito di uno o più eventi metasomatici, o per i quali l'evento metasomatico non ha introdotto Nd nel sistema e si è limitato ad un variabile e debole arricchimento di La, Ce e forse Pr. Per quanto riguarda il campione MA35 si ipotizza un elevato grado di fusione parziale (F maggiore del 15%) per fractional melting, concordemente con quanto visto nei pattern delle terre rare sia su roccia totale che sui singoli clinopirosseni (vedi capitolo 4) con un successivo parziale ri-arricchimento in terre rare leggere dato dall'interazione con un magma alcalino.

Un secondo gruppo, più numeroso, è costituito da campioni che non possono essere spiegati semplicemente prendendo in considerazione un possibile processo di fusione parziale. Essi, infatti, sono contraddistinti da un significativo incremento del rapporto di Nd_N/Yb_N e nonostante tutti riportino un valore di Yb_N inferiore a quello di partenza,

evidenza di un passato processo di fusione parziale, per essere spiegati necessitano di un ri-arricchimento di origine metasomatica, variabile di caso in caso, a seconda dell'entità e degli elementi coinvolti. In particolare dal grafico si evince che i campioni caratterizzati da un minore contenuto in clinopirosseno, quindi i più refrattari, secondo le evidenze derivanti dalle analisi degli ossidi maggiori e dai successivi bilanci di massa, presentano gradi di fusione parziale superiori anche al 20% e successivi, più intensi, arricchimenti metasomatici (con Nd_N/Yb_N fino a oltre 10), coerentemente con quanto detto in precedenza. Ciò sembrerebbe, quindi, confermare l'ipotesi secondo la quale i campioni più impoveriti, afferenti cioè a domini di mantello costituiti da lherzoliti relativamente povere in clinopirosseno e harzburgiti, subiscono un'infiltrazione più efficace ad opera degli agenti metasomatizzanti, in accordo con le evidenze sperimentali a proposito della connettività dei fluidi nelle matrici di mantello (Toramaru e Fujii, 1986).

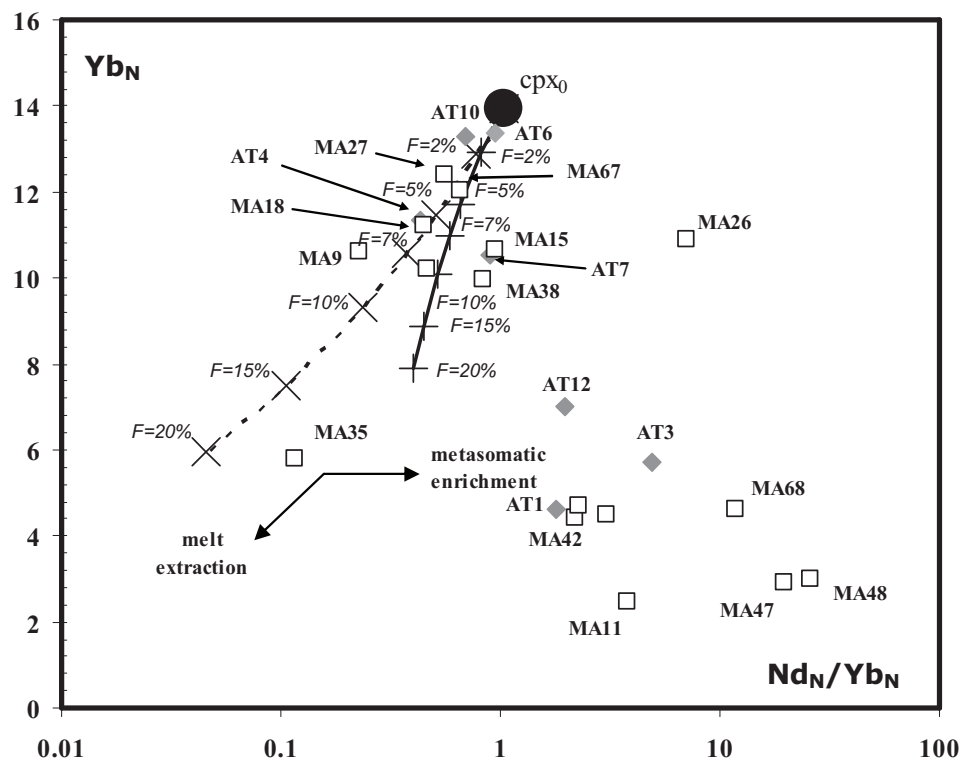


Figura 5.1 – Diagramma Yb_N su Nd_N/Yb_N per i clinopirosseni delle lherzoliti di Azrou (rombi grigi) e Mega (quadrati vuoti). I trends di impoverimento (e i relativi gradi di fusione parziale) per batch (linea continua) e fractional (linea tratteggiata) melting sono calcolati da una sorgente iniziale Cpx_0 come da Bianchini et al. (2007). Fattori di normalizzazione da Sun & McDonough (1989).

I modelli prodotti (o utilizzati) in seguito sono volti allo scopo di comprendere meglio natura ed intensità dei processi metasomatici che hanno interessato entrambe le

sorgenti di mantello sottostanti i distretti vulcanici in esame. Per far ciò e per avere la certezza di non ottenere indicazioni che potessero essere fuorvianti, si è scelto di selezionare in modo accurato i campioni su cui effettuare le simulazioni successive, avendo cioè cura di utilizzare solo le analisi dei clinopirosseni che più degli altri recavano l'impronta dell'agente metasomatico, e cioè quelli più arricchiti nel contenuto di elementi incompatibili presenti in tracce.

In figura 5.2 viene riportato un diagramma discriminante (basato sui rapporti di La_N/Yb_N e Ti/Eu , da Coltorti et al., 1999) che, utilizzato per i clinopirosseni è in grado di indicare in modo qualitativo la natura di un eventuale agente metasomatico, aiutando a distinguere tra agente di composizione silicatica ed uno di tipo carbonatitico.

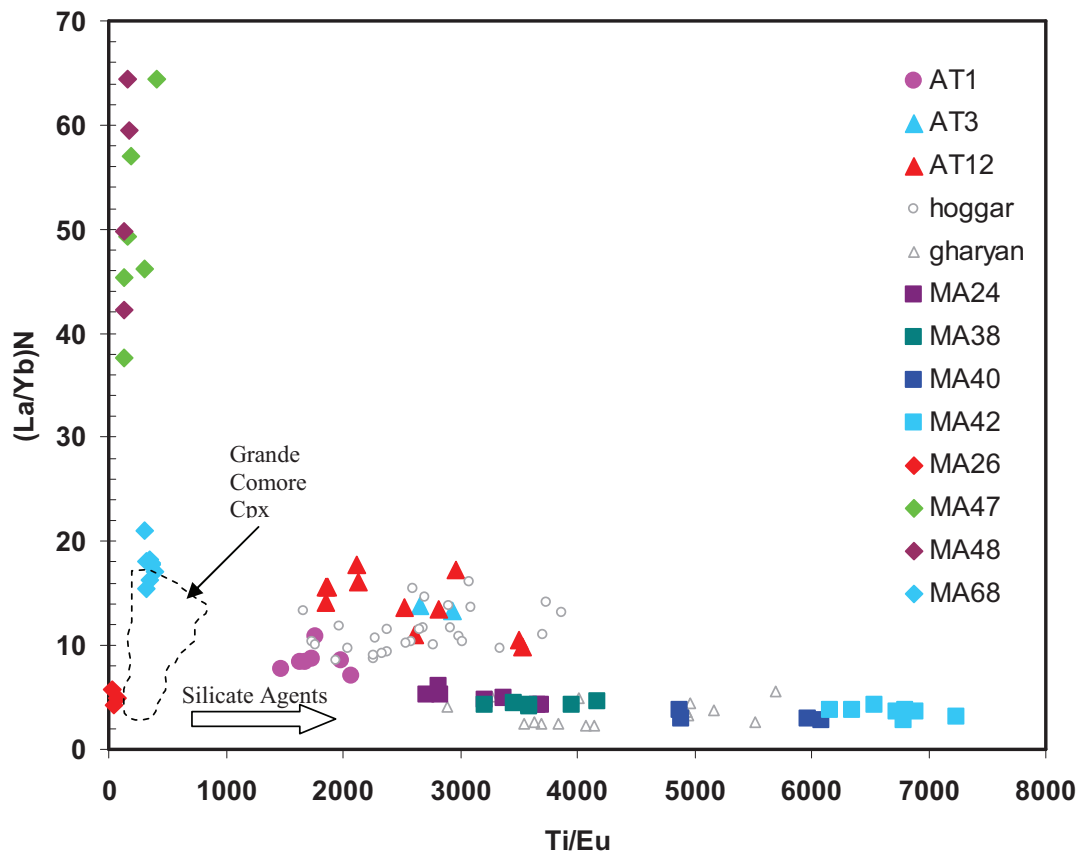


Figura 5.2 – Diagramma discriminante di $(La/Yb)N$ vs Ti/Eu , per clinopirosseni degli xenoliti più metasomatizzati di Azrou (Marocco) e Mega (Rift Valley Etiopia). Per confronto viene riportato il campo compositivo del clinopirosseni di La Grille (Grande Comore, Coltorti et al., 1999), Hoggar (Beccaluva et al., 2007) e Gharyan (Beccaluva et al., 2008).

Su questo diagramma, prodotto per i clinopirosseni degli xenoliti a metasomatismo carbonatitico di La Grille (Grande Comore), il cui campo compositivo viene riportato

per confronto, sono stati proiettati i punti analisi dei clinopirosseni di Azrou e di Mega (avendo cura di selezionare esclusivamente pattern delle terre rare simili e fortemente metasomatizzati). Per confronto sono stati inseriti i clinopirosseni delle peridotiti di Manzaz (Beccaluva et al., 2007) e Gharyan (Beccaluva et al., 2008), rispettivamente nell'Hoggar (Algeria) e nella Libia settentrionale.

Per quanto riguarda i campioni di Azrou, i clinopirosseni analizzati, presentando un rapporto La_N/Yb_N compreso tra 8 e 17 e un Ti/Eu compreso tra 1400 e 3500, vanno a disporsi in una regione del diagramma compresa tra il campo delle Grande Comore, influenzate da un agente metasomatico carbonatitico, come detto precedentemente, e il campo occupato dai clinopirosseni di Gharyan, influenzati da un agente metasomatico alcali-silicatico (Beccaluva et al., 2007), sovrapponendosi per composizioni dei clinopirosseni alle peridotiti di Manzaz (Beccaluva et al., 2007). Ciò sembrerebbe suggerire un agente metasomatico probabilmente caratterizzato da una composizione intermedia, nel quale si aggiungerebbe, in proporzioni variabili, una componente carbonatata a quella silicatica alcalina, analogamente con quanto già osservato da Beccaluva et al. (2007) per gli xenoliti di Manzaz.

I clinopirosseni delle peridotiti di Mega invece si distribuiscono in due gruppi ben distinti; uno caratterizzato da bassi rapporti La_N/Yb_N e alti rapporti Ti/Eu e uno, invece, caratterizzato da alti rapporti La_N/Yb_N (fino a oltre 60 x condritico) e bassi rapporti Ti/Eu (inferiori a 500). Il primo gruppo, costituito dai campioni MA24, MA38, MA40 e MA42, va a disporsi lungo l'asse delle ascisse, sovrapponendosi al campo dei clinopirosseni di Gharyan, e risulta quindi compatibile con un agente metasomatico di impronta esclusivamente alcalino-silicatica. Il secondo gruppo, invece, costituito dai campioni MA26, MA47, MA48 e MA68, si dispone lungo l'asse delle ordinate andando, parzialmente, a coprire il campo dei clinopirosseni di Le Grille (Grande Comore). In questo caso, nonostante i bassi rapporti Ti/Eu associati alle harzburgiti di Mega, è plausibile pensare che l'agente metasomatico, come visto in precedenza per i clinopirosseni di Azrou, abbia una composizione intermedia tra la componente carbonatitica e quella silicatica alcalina.

Successivamente, per entrambe le popolazioni di xenoliti oggetto dello studio, è stato effettuato un tentativo di modellizzazione della possibile composizione, in termini di elementi in tracce, dell'agente metasomatico.

A tale scopo si è cercato, quindi, di selezionare i clinopirosseni che meglio potevano aver registrato l'agente metasomatico e sfruttando i coefficienti di partizione clinopirosseno/fuso alcalino (Zack & Brumm, 1998) e clinopirosseno/carbonatite (Adam & Green, 2001) ritenuti più opportuni (disponibili sul database GERM: <http://earthref.org/GERM>), è stato possibile ricostruire, per entrambe le popolazioni di xenoliti, le composizioni degli agenti metasomatici.

Per quanto riguarda il sito di Azrou si è ricostruito il modello dell'agente metasomatico utilizzando i clinopirosseni dei campioni AT1, AT3 e AT12, che presentavano i più alti arricchimenti in terre rare. Dal diagramma così ricavato (fig. 5.3), dove per confronto sono stati inseriti gli involucri di magmi naturali sia di tipo ultra-alcalino che carbonatitico, si evince come il set di coefficienti di partizione clinopirosseno/basalto alcalino, pur non riuscendo a spiegare la presenza di forti anomalie (Th e Nb), nel complesso risulta essere più vicino alle composizioni dei magmi basici alcalini e ultra-alcalini afferenti alla litosfera africana: basalti alcalini, basaniti e melilititi, già osservati in altre zone africane (Azzouni-Sekkal., 2007; Beccaluva et al., 1998; Bianchini et al., 1998; Janney et al., 2002). Ciononostante, analogamente con quanto già visto da Beccaluva et al. (2007) per gli xenoliti di mantello di Manzaz (Hoggar), la presenza di forti anomalie negative in Zr e Ti associate a quella altrettanto rilevante in Th (positiva, 5000 volte il PM) concorda con quanto emerge dal diagramma discriminante La_N/Yb_N contro Ti/Eu (fig. 5.2). Ciò indicherebbe, per i campioni peridotitici di Azrou, la natura silicatica, per quanto estremamente alcalina, e quella carbonatitica, suggerirebbe la possibilità che il processo metasomatico non sia stato semplicemente causato da un agente di composizione silicatica alcalina ma implicherebbe anche il possibile contributo, di intensità variabile a seconda del campione, di una componente carbonatata, presente in proporzioni tali da far raggiungere all'agente metasomatizzante, per i casi più estremi, una composizione silico-carbonatitica.

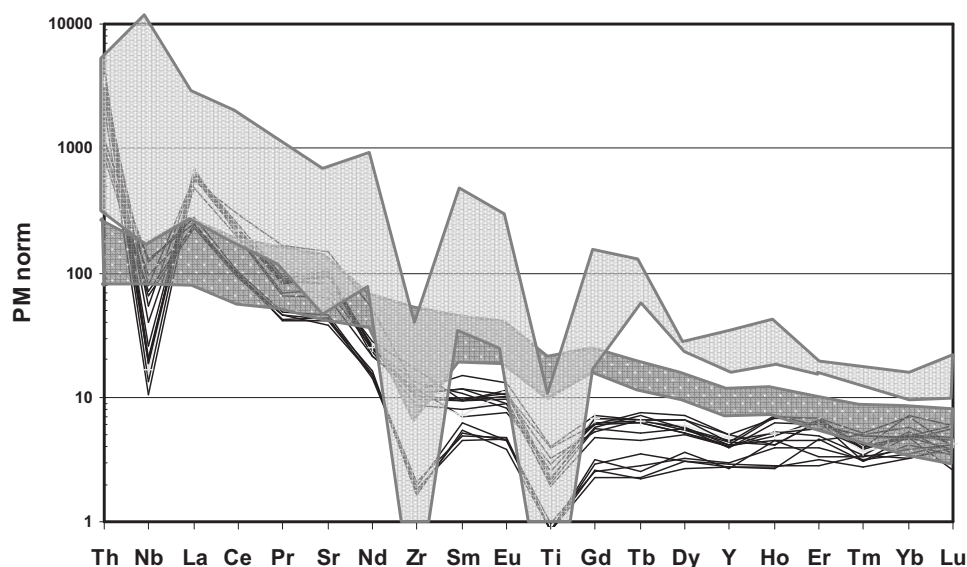


Figura 5.3 – Distribuzione degli elementi in tracce (normalizzati al PM; da Sun & McDonough, 1989) per una simulazione degli agenti metasomatici che potrebbero aver interessato il mantello litosferico di Azrou. L'elaborazione è stata prodotta sulla base delle composizioni dei clinopirosseni più metasomatizzati mediante i coefficienti di partizione di Zack & Brumm (1998) e Adam & Green (2006), entrambi reperibili sul database telematico del GERM). Per confronto sono riportati gli involucri composizionali di fusi basici alcalini (basaniti, nefeliniti, melilititi; Azzouni-Sekkal et al., 2007; Beccaluva et al., 1998; Janney et al., 2002) e carbonatiti (Nelson et al., 1988; Coltorti et al., 1993; Smithies et al., 1998) della Placca Africana.

Per quel che riguarda Mega, la ricostruzione degli agenti metasomatici è stata fatta anche in questo caso selezionando i campioni che risultavano essere maggiormente arricchiti in terre rare ma anche distinguendo, sulla base della correlazione emerse dal grafico in figura 5.2, tra campioni a alto rapporto Ti/Eu, e basso La_N/Yb_N , e quelli invece a basso rapporto Ti/Eu, e alto La_N/Yb_N . In questo modo si sono ricostruiti due possibili agenti metasomatici, rappresentati in figura 5.4 e 5.5; il primo (ricavato utilizzando i campioni MA28, MA40 e MA42) è caratterizzato da anomalie positive in Th e debolmente negative in Zr e Ti, e registra un variabile arricchimento in terre rare leggere (per il La fino a 100 volte il contenuto del Primordial Manlte ipotizzato da Sun e McDonough, 1989). Simili analogie sono state sostanzialmente individuate, come visto anche in precedenza, negli intervalli composizionali di basaniti, nefeliniti, e melilititi afferenti alla placca africana (Azzouni-Sekkal., 2007; Beccaluva et al., 1998; Bianchini et

al., 1998; Janney et al., 2002), plottati per confronto in figura 5.4, dove si individuano arricchimenti in LREE e la presenza di anomalie negative in Zr e Ti.

Il secondo agente metasomatico (ricavato dai campioni MA26, MA27, MA48 e MA6, fig. 5.5) sebbene presenti la medesima anomalia positiva in Th, ha per contro anomalie negative molto più marcate in Zr ma soprattutto una ben più profonda anomalia in Ti, suggerendo (come visto per Azrou) un chimismo dell'agente metasomatico di caratteristiche intermedie tra la alcali-silicatica e carbonatitica.

Nel complesso si può pensare che il mantello soggiacente il sito di Mega sia stato interessato da un metasomatismo alcali-silicatico carbonatato, dove la componente carbonatitica è espressa con intensità variabile da campione a campione.

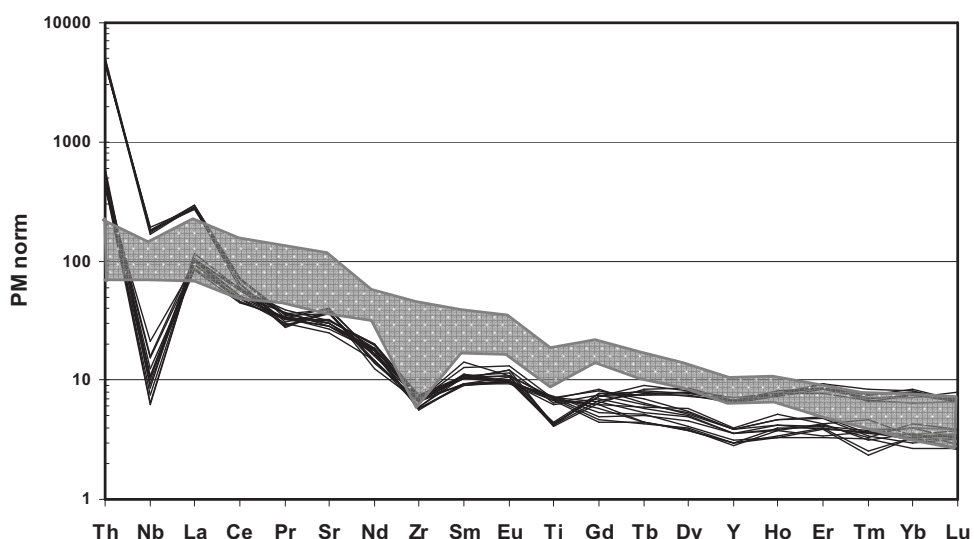


Figura 5.4 – Distribuzione degli elementi in tracce (normalizzati al PM; da Sun & McDonough, 1989) per una simulazione degli agenti metasomatici a componente più alcali-silicatica che potrebbero aver interessato il mantello litosferico di Mega. Per confronto sono riportati gli involucri composizionali di fusi basici alcalini (basaniti, nefeliniti, melilititi; Azzouni-Sekkal et al., 2007; Beccaluva et al., 1998; Janney et al., 2002).

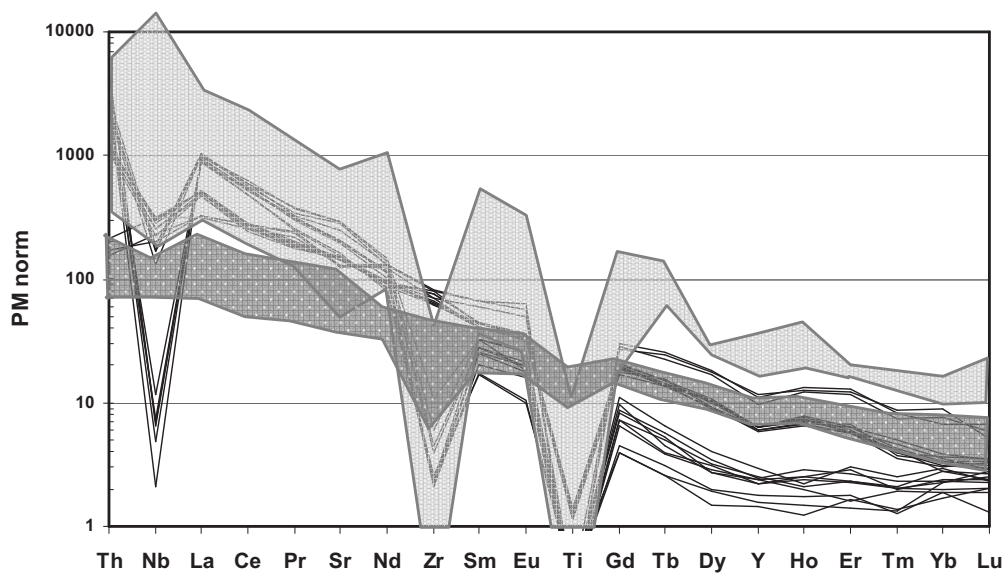


Figura 5.5 – Distribuzione degli elementi in tracce (normalizzati al PM; da Sun & McDonough, 1989) per una simulazione degli agenti metasomatici a componente intermedia tra alcali-silicatica e carbonatata che potrebbero aver interessato il mantello litosferico di Mega. L'elaborazione è stata prodotta sulla base delle composizioni dei clinopirosseni più metasomatizzati mediante i coefficienti di partizione di Zack & Brumm (1998) e Adam & Green (2006), entrambi reperibili sul database telematico del GERM).

6 SISTEMATICA ISOTOPICA

6.1 GENERALITÀ

Nella petrologia moderna a questo tipo di aspetto analitico viene dato un grande risalto, spesso considerando la determinazione dei rapporti isotopici come la soluzione definitiva di ogni problema petrologico, è quasi superfluo dire che ciò non corrisponde sempre alla realtà.

Ciò nonostante, la determinazione dei rapporti per alcune particolari specie isotopiche, soprattutto se parte di un quadro di conoscenza approfondito, può offrire, un contributo decisivo sia nella fase di datazione di un fenomeno in studio, che nella definizione di un modello globale che permetta di spiegarne le cause.

Le misure dei rapporti isotopici di Sr, Nd (e Pb) nel campo della petrologia di mantello, sono in assoluto le più comuni; la determinazione di questi rapporti isotopici è talmente diffusa da aver consentito lo sviluppo di vere e proprie classificazioni sistematiche, individuando il contributo di differenti componenti geochimiche, ognuna delle quali è caratterizzata da distinti rapporti isotopici per $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ e $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$.

Un sistema di decadimento in geochimica è regolato da differenti parametri, per la coppia Rb/Sr (presa ad esempio), essi sono correlati nella seguente formula:

$$\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}} = \left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}} \right)_0 + \frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}} (e^{\lambda t} - 1)$$

In a given chemical system the isotopic abundance of ^{87}Sr is determined by four parameters: the isotopic abundance at a given initial time, the Rb/Sr ratio of the system, the decay constant of ^{87}Rb , and the time elapsed since the initial time. The isotopic composition of a particular sample of strontium, whose history may or may not be known, may be the result of time spent in a number of such systems or environments. In any case the isotopic composition is the time-integrated result of the Rb/Sr ratios in all the past environments. Local differences in the Rb/Sr will, in time, result in local differences in the abundance of ^{87}Sr . Mixing of material during processes will tend to homogenize these local variations. Once homogenization occurs, the isotopic composition is not further affected by these processes. (Gast, 1960)

(White, in <http://www.imwa.info/Geochemie/Chapters.HTML>).

Ciò che Paul Gast scrisse per la coppia isotopica $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ è generalizzabile a tutti i sistemi di decadimento.

Ciò che, invece, determina le applicazioni di un sistema di decadimento costituito, nel caso più semplice, da una coppia isotopica di elementi denominati padre – figlio, consiste nelle caratteristiche geochimiche intrinseche di questi elementi, sostanzialmente riconducibili alla teoria della forza di campo, e più precisamente alle caratteristiche di compatibilità relative tra isotopo padre e isotopo figlio.

Per attenerci all'esempio precedente, le specie elementari Rb e Sr sono contraddistinte da un diverso grado di incompatibilità, in quanto il primo, membro del **Gruppo IA** della tavola periodica degli elementi (elementi alcalini) è più incompatibile (se si prende in considerazione una matrice solida silicatica), e quindi anche più mobile (sulla base del rapporto carica/raggio ionico), rispetto allo Sr, il quale facendo parte del **Gruppo IIA** (elementi alcalino – terrosi), risulta esserlo leggermente meno.

Quella che può forse sembrare solo una lieve differenza nelle caratteristiche geochimiche di questi due elementi, in realtà, costituisce l'essenza della geochimica degli isotopi radiogenici, in quanto permette l'instaurarsi di processi di frazionamento isotopico tra la specie isotopica padre (^{87}Rb , in questo caso) e quella figlia (^{87}Sr), ed è il motivo di fondo per cui il contenuto in Rb della crosta terrestre è nettamente superiore a quello del mantello, ciò a causa della maggiore affinità dell'elemento Rb con i fusi magmatici che non con la matrice solida del mantello.

Questo tipo di processi, infatti, ha rivestito un ruolo fondamentale quando, in seguito alla differenziazione primaria (nella quale è avvenuta una separazione fisica tra nucleo e mantello), la porzione esterna del pianeta terrestre, raffreddando lentamente, ha iniziato un secondo processo di differenziazione, che si è svolto mediante molteplici cicli di fusione – cristallizzazione, producendo magmi caratterizzati da un ampio intervallo di gradi di fusione parziale (da magmi basici a vario grado di alcalinità sino alle komatiiti archeane).

Il risultato è stata la produzione di una crosta (risalente al Archeano, da 3.8 a 2.5 Ga, miliardi di anni) estremamente arricchita negli elementi incompatibili rispetto al mantello sottostante, e quindi, per tornare all'esempio precedente, arricchita in Rb. In seguito a questo fenomeno di differenziazione, durante il quale il rubidio totale (senza sostanziale frazionamento isotopico) si è concentrato prevalentemente nella crosta, l'isotopo di numero atomico “87”, a causa dei processi radiogenici (in ^{87}Sr , per decadimento di tipo β), ha dato luogo nella crosta, ad un progressivamente maggiore rapporto di $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

Medesime considerazioni possono essere effettuate per gli altri sistemi di decadimento finora menzionati, prestando però particolare attenzione nello stabilire le caratteristiche geochimiche delle specie isotopiche in gioco, ossia stabilendo quale tra l'isotopo padre e quello figlio sia maggiormente incompatibile.

Infatti, se come nel caso della coppia $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$, la specie isotopica figlia è quella caratterizzata da una maggiore incompatibilità (^{143}Nd), sarà quest'ultima ad impoverirsi nel mantello e ad arricchirsi nella crosta, progressivamente, ad ogni processo di fusione parziale.

Sinora, sono stati presi in considerazione esclusivamente gli aspetti correlati ai processi di frazionamento isotopico, connessi alla fusione parziale di una sorgente di mantello e del relativo apporto di un fuso magmatico alla crosta; mentre si sono tralasciati gli aspetti legati ad eventuali eventi metasomatici.

Ciononostante, dal punto di vista della geochimica isotopica, i processi metasomatici non possono essere considerati meno importanti, basti pensare come ben tre delle quattro componenti individuate nelle classificazioni sistematiche di Sr, Nd e Pb siano di origine metasomatica, anche se non di esclusiva pertinenza mantellica.

Più precisamente, un *end member* contraddistinto da bassi rapporti isotopici di $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ e alti $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ è stato definito come DM (*Depleted Mantle*, Zindler e Hart, 1986), questo è comune per porzioni di mantello interessate da alti (e molteplici) gradi di fusione parziale e per le lave ad esse collegate (un esempio classico è costituito dai MORB e dal mantello sottostante le dorsali medio oceaniche).

Al contrario, componenti recanti arricchimenti anomali dei rapporti isotopici Sr, Nd e Pb, a seconda del caso, sono stati indicati con gli acronimi EMI, EMII ed HIMU, rispettivamente *Enriched Mantle I*, *Enriched Mantle II* e *High μ* (dove μ è il rapporto U/Pb, Zindler e Hart, 1986); è importante notare come, per la definizione delle ultime tre componenti isotopiche, gli autori abbiano chiamato in causa un contributo di materiale crostale, di tipologia e proporzioni variabili, riciclato nel mantello terrestre mediante la subduzione.

Le componenti isotopiche sinora descritte costituiscono, quindi, le fondamenta della classificazione sistematica che utilizza le catene di decadimento radiogenico di Rb/Sr, Sm/Nd e U-Th/Pb, sia per le porzioni di mantello (e quindi anche per gli xenoliti di mantello) che per le lave associate e rivestono una grande rilevanza ai fini di una più efficace comprensione della storia evolutiva anche dei Distretti Vulcanici oggetto di questa tesi di dottorato.

Al fine di ottenere un quadro definitivo dei processi metasomatici intervenuti nelle porzioni di mantello dalle quali provengono gli xenoliti di Azrou e Mega, si è ricorsi ad una ulteriore determinazione: la misura del rapporto isotopico dell'He attraverso una tecnica denominata “*in vacuo crushing*” (rottura sotto vuoto). Questo tipo di tecnica consiste nello spaccare i minerali separati (principalmente olivine od ortopirosseni) con l'intenzione di misurare il rapporto isotopico dei gas (He, in questo caso) presenti, sotto forma di inclusioni fluide, al loro interno.

Ai fini dell'applicazione pratica della sopracitata tecnica analitica, le caratteristiche chimiche e geochimiche principali dell'He possono essere riassunte come segue:

- l'elio è il primo elemento del gruppo VIII della tavola periodica (detto dei gas nobili);
- il suo numero atomico è $Z = 2$, la sua configurazione elettronica è dunque stabile e la reattività

pressoché nulla (anche a condizioni di pressione e temperatura estremamente spinte);

- la mobilità, anche se variabile a seconda delle fasi mineralogiche in questione (il coefficiente di diffusione per clinopirosseni e anfiboli a 1300 °C è circa 10^{-5} cm²/s, Dunai e Porcelli, 2003 e referenze ivi contenute), è relativamente bassa.

Ciò giustifica il comportamento geochimico dell'He, il quale, quando presente in una paragenesi di mantello, non entra nei reticoli mineralogici, ma tende a distribuirsi nelle inclusioni fluide, inglobate dai cristalli durante la crescita o lungo le fratture degli stessi.

Il rapporto isotopico $^3\text{He}/^4\text{He}$ (che viene espresso normalizzato allo stesso rapporto per l'atmosfera terrestre = Ra) è il risultato di molteplici processi che contribuiscono, e hanno contribuito in passato, in modo simultaneo a variare un ipotetico rapporto iniziale (nella terra primordiale): il frazionamento isotopico, che incide pesantemente visto il ridotto peso atomico dei due isotopi, e il decadimento radioattivo, ^4He è infatti un sottoprodotto della catena di decadimento di U e Th.

Tenendo in considerazione entrambe le precedenti osservazioni, si può dedurre come i domini crostali, e quelli del mantello più superficiale, siano contraddistinti da un rapporto $^3\text{He}/^4\text{He}$ tendenzialmente molto basso, ciò a causa di due processi distinti e concomitanti: una componente radiogenica (U e Th sono concentrati prevalentemente nella crosta continentale) non trascurabile e un probabile fenomeno di degassamento, durante il quale l'isotopo di massa inferiore (^3He) risentirebbe in proporzione maggiore di un processo di frazionamento differenziale che coinvolge i due isotopi.

Ne consegue che il rapporto $^3\text{He}/^4\text{He}$ misurato nel caso dei MORB (per i quali l'apporto di ^4He radiogenico è pressoché nullo) si attesti in modo sistematico su valori di R/Ra di 8 ± 1 , mentre valori inferiori a tale limite siano considerati, solitamente, il prodotto di un'azione simultanea di un processo di degassamento e della contaminazione di componenti caratterizzate da elevato decadimento radioattivo (con valori che possono quindi toccare un R/Ra di 5, Dunai e Porcelli, 2003 e referenze ivi contenute).

Al contrario, le porzioni di mantello più profondo, plausibilmente meno degassate, mostrano rapporti $^3\text{He}/^4\text{He}$ caratteristicamente più alti, è questo ad esempio il caso di alcuni magmi e xenoliti di Etiopia, Afar e Yemen (fino a R/Ra di 15 – 25, Dunai e Porcelli, 2003 e referenze ivi contenute; Pik et al., 2006).

Quanto scritto sinora rende l'idea dei motivi per cui il rapporto isotopico dell'elio venga considerato in grado, se pur indirettamente, di fornire indicazioni preziose a proposito delle componenti geochimiche nelle sorgenti dei magmi o degli xenoliti di mantello; in definitiva le determinazioni isotopiche dell'elio costituiscono uno strumento utile nel discriminare la presenza, o meno, di plume di mantello profondi.

6.2 NODULI DI MANTELLO DI AZROU (Atlante Medio, Marocco)

In tabella 5A sono riportati i dati analitici riguardanti le determinazioni dei rapporti isotopici di Sr, Nd e Pb sui clinopirosseni separati dagli xenoliti di Azrou, effettuate presso i laboratori dello Scottish Universities Environmental Research Centre (SUERC, East Kilbride, UK); nel complesso sono state condotte analisi su un numero complessivo di 7 campioni di cui: 5 lherzoliti, 1 harzburgite e 1 olivin-websterite; sfortunatamente non è stato possibile ottenere il dataset completo di tutte le analisi del Nd e He. Per quanto riguarda le metodologie e le specifiche analitiche utilizzate si rimanda all'Appendice A.

Le composizioni isotopiche di Sr-Nd-Pb mostra i seguenti intervalli composizionali: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ da 0.70243 a 0.70335, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ da 0.51273 a 0.51325, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ da 17.5 a 19.51, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ da 14.61 a 15.6 e $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ da 36.34 a 39.08.

Dalla correlazione tra $\text{Nd}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ da roccia totale (fig. 6.2.1) e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ si nota che il campione AT3 presenta il più elevato rapporto $\text{Nd}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$, e più basso rapporto $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, il quale, come visto in precedenza dal contenuto degli elementi in tracce, risultava essere anche il più interessato dai processi metasomatici.

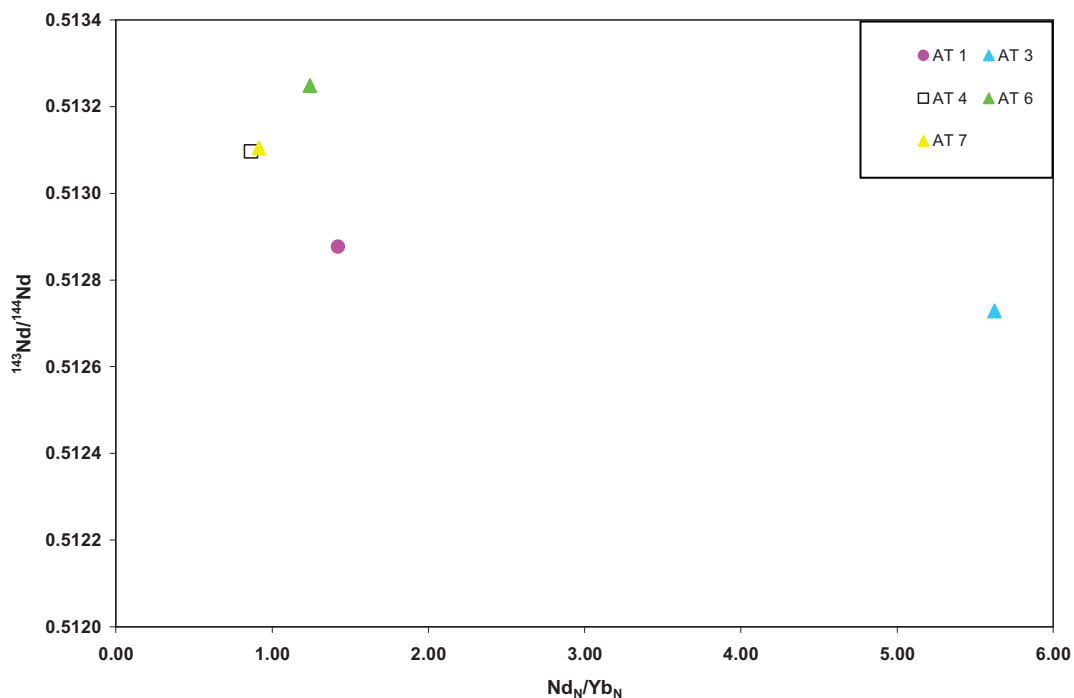


Figura 6.2.1 – Correlazione tra il rapporto $\text{Nd}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ della roccia totale e il $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ dei clinopirosseni degli xenoliti del sito di Azrou.

In altre parole, al rapporto $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ più alto corrisponde, solitamente, il campione che meno ha subito fenomeni di metasomatismo (o che ne è totalmente esente, quanto meno per ciò che riguarda la coppia Sm - Nd) e che invece è stato interessato da importanti (ed antichi) processi di fusione parziale che quindi hanno impoverito in modo differenziale le Terre Rare medio – leggere relativamente alle HREE, come già visto per gli xenoliti del Gharyan da Beccaluva et al., 2008.

Dal diagramma di variazione tra $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ si osserva che i campioni si distribuiscono in uno spettro composizionale che va dal DM (Depleted Mantle) e all'HIMU (High μ); quest'ultimo rappresenta la componente predominante dell'agente metasomatizzante (fig. 6.2.2). I campioni che esprimono di più la componente HIMU sono quelli caratterizzati dai maggiori arricchimenti metasomatici in LREE e elementi incompatibili (AT3 e AT1).

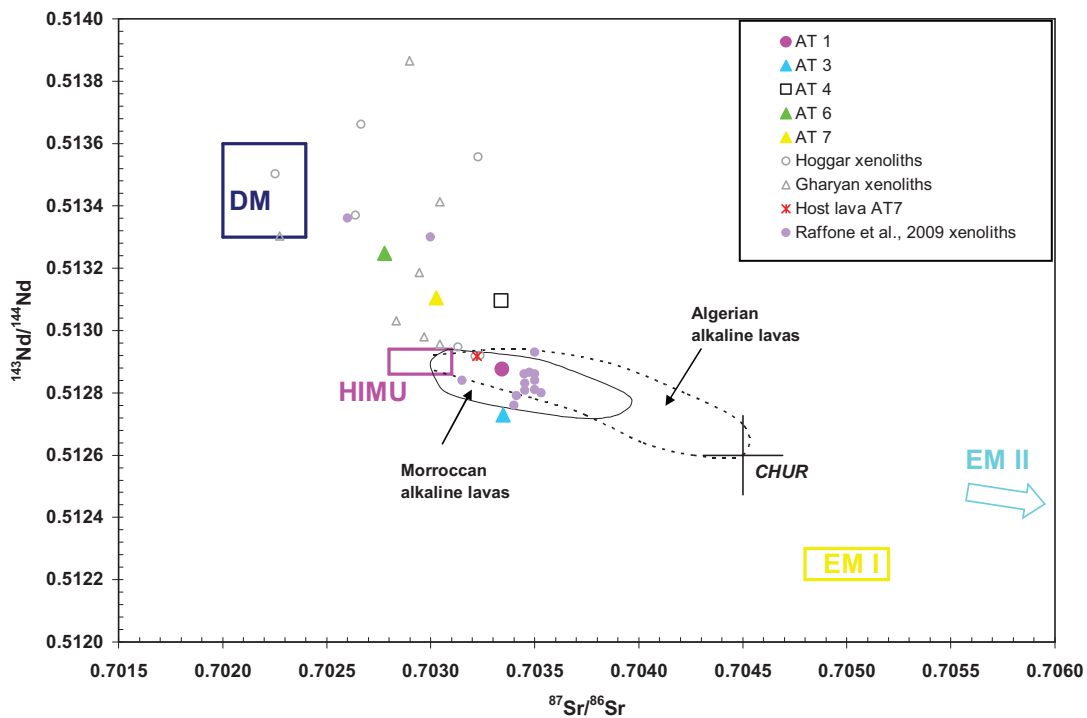


Figura 6.2.2 – Correlazione tra il rapporto $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ dei clinopirosseni degli xenoliti del sito di Azrou. Per confronto sono rappresentati anche i dati degli xenoliti di Hoggar e Gharyan (Beccaluva et al., 2007, 2008) di Azrou-Timahdite (Raffone et al., 2009) e delle lave del Marocco e dell'Algeria (DM, EMI, EMII e HIMU dopo Zinder & Hart, 1986).

Per quanto riguarda i rapporti isotopici del Pb (figure 6.2.3 e 6.2.4) si nota una distribuzione dei campioni eterogenea e discordante con quanto ricavato dalla correlazione Sr-Nd. La possibile causa di questo comportamento anomalo degli isotopi del Pb, può

risiedere nella bassa concentrazione dello stesso nei campioni analizzati, e quindi ad un conseguente errore analitico. Con queste premesse l'unica analisi attendibile è quella del campione AT1; il quale mostra una composizione del mantello litosferico, sottostante l'area di Azrou, intermedia tra il DM e l'EM II.

E' stato determinato anche il valore del rapporto isotopico $^3\text{He}/^4\text{He}$ sul gas intrappolato nei cristalli di olivina di 3 campioni: AT1, AT3 e AT7. I valori trovati mostrano uno stretto intervallo composizionale (da 6.2 a 6.8 R/Ra) e risultano essere, concordemente con quanto già riscontrato in xenoliti di mantello provenienti da distretti vulcanici cenozoici nord africani quali Gharyan e Hoggar, (Beccaluva et. Al, 2007 e Beccaluva et. Al, 2008), inferiori ai valori di $^3\text{He}/^4\text{He}$ del DM (8 ± 1). Questo tipo di valori si rinvengono in altre zone soggette a vulcanismo cenozoico in Europa (Buikin et al., 2005), Africa (Pik et el., 2006) e nella parte centro orientale dell'Oceano Atlantico (Hilton et al., 2000), i quali risultano essere tipicamente associati a basalti con forte componente di tipo HIMU.

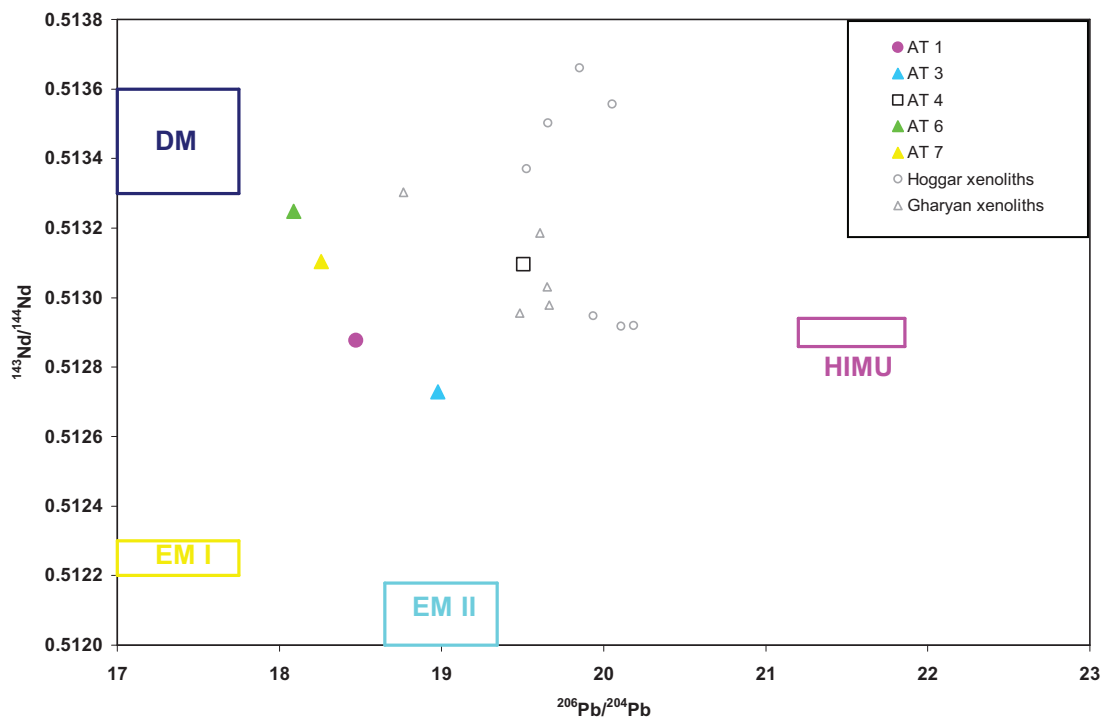


Figura 6.2.3 – Correlazione tra il rapporto $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ dei clinopirosseni degli xenoliti del sito di Azrou. Per confronto sono rappresentati anche i dati degli xenoliti di Hoggar e Gharyan (Beccaluva et al., 2007, 2008). I campi DM, EM I, EM II e HIMU sono tratti da Zinder & Hart, 1986.

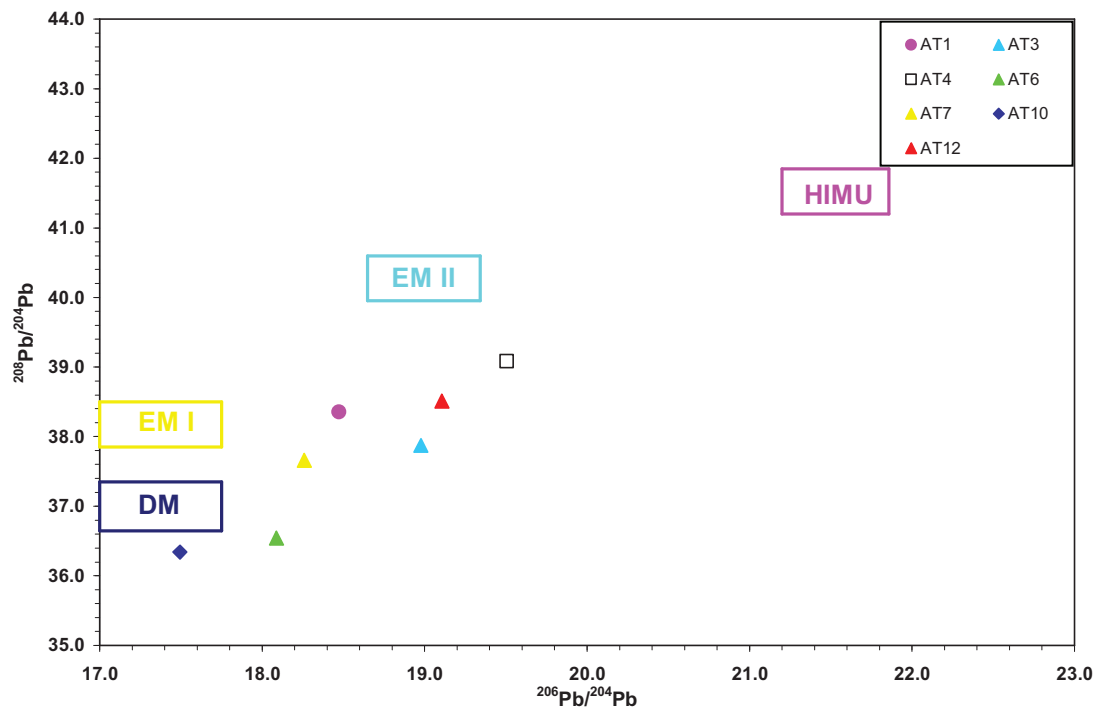


Figura 6.2.4 – Correlazione tra il rapporto $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ dei clinopirosseni degli xenoliti del sito di Azrou. Per confronto sono rappresentati anche i dati degli xenoliti di Hoggar e Gharyan (Beccaluva et al., 2007, 2008). I campi DM, EMI, EMII e HIMU sono tratti da Zinder & Hart, 1986.

6.3 NODULI DI MANTELLO DI MEGA (Main Ethiopian Rift, MER)

Le analisi sono state condotte presso i laboratori dello Scottish Universities Environmental Research Centre (SUERC, East Kilbride, UK), sui clinopirosseni separati di 17 campioni (8 lherzoliti, 9 harzburgiti, tabella 5B) provenienti dal sito di Mega. Per ogni campione sono state effettuate analisi dei rapporti isotopici di $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ e $^3\text{He}/^4\text{He}$; non per tutti i campioni è stato possibile ottenere il set completo di analisi.

La sistematica isotopica di Sr e Nd per i campioni analizzati mostra i seguenti intervalli composizionali: nelle lherzoliti troviamo un rapporto $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ che varia tra da 0.70220 a 0.70311 e un $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ che varia tra 0.51301 e 0.51379; nelle harzburgiti troviamo invece un rapporto $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ che va da 0.70268 a 0.70326 e un rapporto $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ che varia da 0.51274 a 0.51305; unica eccezione l'harzburgite MA29 che presenta un elevato rapporto $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ pari a 0.70454 e, per contro, un basso rapporto $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ pari a 0.51219.

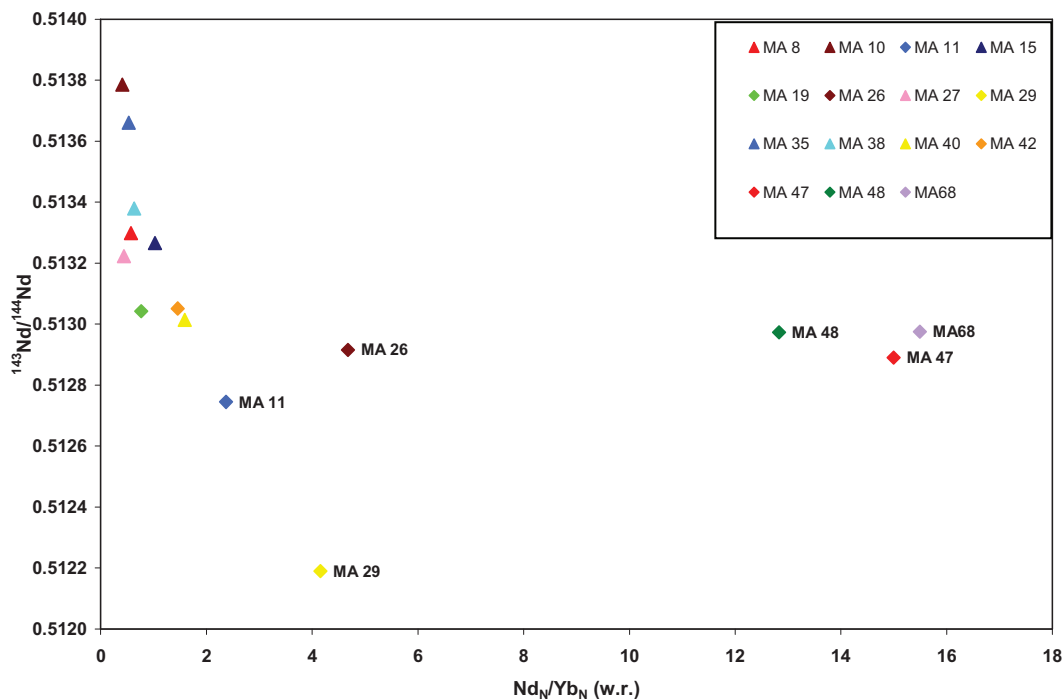


Figura 6.3.1 – Correlazione tra il rapporto Nd_N/Yb_N della roccia totale e il $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ dei clinopirosseni degli xenoliti del sito di Mega.

Come visto in altri lavori (Beccaluva et al., 2008) è possibile notare come, nella maggioranza dei campioni, il rapporto $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ appare inversamente proporzionale al contenuto di Nd elementare della roccia totale (lo stesso avviene per i clinopirosseni analizzati in LAM), infatti il rapporto Nd_N/Yb_N su roccia totale (e dei relativi cpx) è

inversamente correlato al $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (fig. 6.3.1); analogamente a quanto già osservato per i noduli di mantello del sito di Azrou.

Non rispettano questo comportamento i campioni MA47, MA48 e MA68 e, in misura minore, il campione MA26; questi campioni infatti si discostano dal trend risultando particolarmente arricchiti nel rapporto $\text{Nd}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$. E' interessante notare che questi campioni sono quelli che nei diagrammi delle terre rare presentavano i maggiori arricchimenti in LREE e MREE mostrando patterns convessi verso l'alto.

La correlazione tra $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (fig. 6.3.2) mostra una distribuzione dei campioni che va a coprire principalmente lo spettro composizionale tra il DM (depleted mantle) e l'HIMU (high μ), dove quest'ultimo pare essere la componente dominante negli agenti metasomatizzanti.

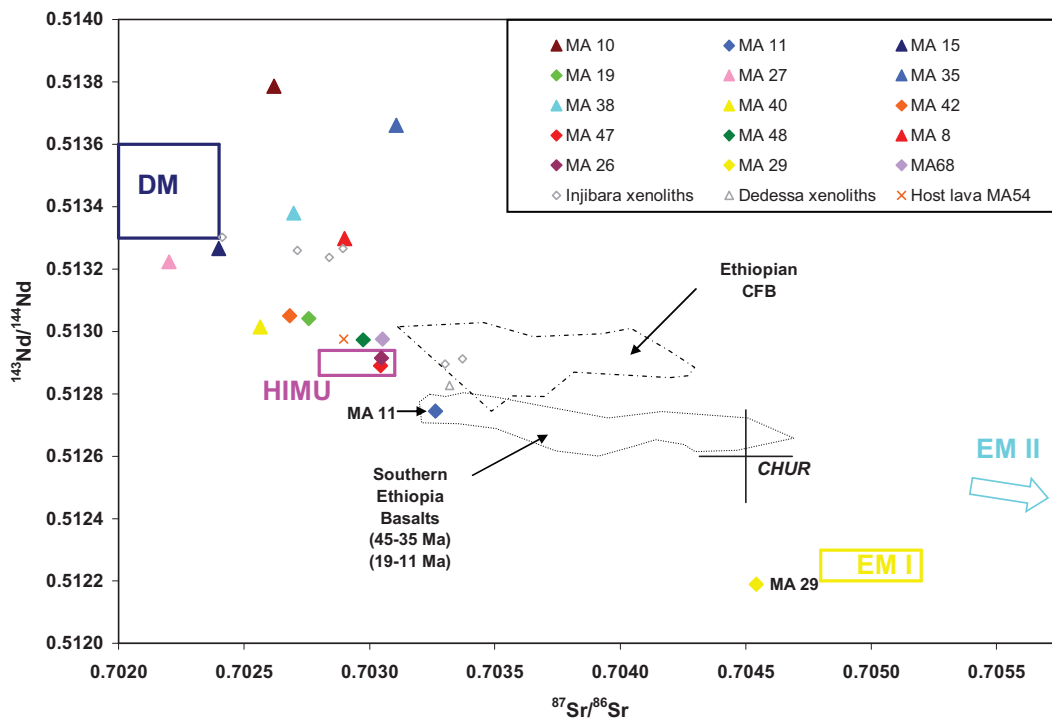


Figura 6.3.2 – Correlazione tra il rapporto $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ dei clinopirosseni degli xenoliti del sito di Mega. Per confronto sono inseriti i dati degli xenoliti di Injibara e Dedessa (Beccaluva et al., in press), i dati dei CFB del plateau Nord etiopico (Pik et al., 1999) e quelli dei basalti dell’Etiopia meridionale (George & Rogers, 2002; Stewart & Rogers, 1996). DM, EM I, EM II e HIMU dopo Zinder & Hart, 1986.

E' interessante osservare come le harzburgiti (e le lherzoliti povere in clinopirosseno) tendono a disporsi preferenzialmente in prossimità della componente di mantello HIMU, confermando quindi la maggiore permeabilità delle matrici più refrattarie agli agenti metasomatici (Toramaru and Fujii, 1986). E' altresì interessante osservare come i

campioni maggiormente interessati da un'impronta HIMU (MA26, MA47, MA48 e MA68) e quindi maggiormente metasomatizzati, coerentemente risultano essere anche gli stessi che mostrano i patterns delle REE con i maggiori arricchimenti. Il valore estremamente alto di $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ nei campioni MA10 e MA35 potrebbe indicare una fusione parziale avvenuta in presenza di granato residuale seguita da un probabile processo di diapirismo di mantello con relativo riequilibrio in facies a spinello, similmente a quanto osservato in altre suite di xenoliti di mantello (Downes et al., 2003; Bianchini et al., 2007). Questo è particolarmente evidente nell'MA 10 dove l'elevato rapporto Sm/Nd (1.4 in roccia totale e 1.6 nei cpx) ben si sposa con il granato, essendo quest'ultimo una delle poche fasi mineralogiche, potenzialmente presenti in una paragenesi di mantello, caratterizzate da un elevato rapporto Sm/Nd). In questo caso una fusione parziale antica (in presenza di granato residuale all'interno della sorgente) avrebbe permesso di frazionare gli elementi delle terre rare in modo differenziale, ed in particolare di produrre un elevato $\text{Sm}_\text{N}/\text{Nd}_\text{N}$.

La sistematica isotopica del Pb (figure 6.3.3 e 6.3.4) mostra nelle lherzoliti i seguenti intervalli composizionali: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ tra 18.5 e 19.34, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ tra 15.53 e 15.63, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ tra 38.09 e 38.96; mentre nelle harzburgiti troviamo: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ tra 18.38 e 18.52, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ tra 15.21 e 15.67, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ tra 37.58 e 38.42.

La apparente incongruenza che emerge dal confronto tra i rapporti isotopici del Pb con quelli del Sr e del Nd può essere spiegata ammettendo un differente comportamento geochimico tra i sistemi Rb-Sr, Sm-Nd e U-Th-Pb, dovuto alla maggiore incompatibilità del Pb nella matrice peridotitica rispetto allo Sr e al Nd, come suggerito da Beccaluva et al., 2008, per gli xenoliti di mantello del Gharyan.

Il set analitico riguardante gli xenoliti di Mega è stato implementato con le determinazioni del rapporto isotopico per l'elio, intrappolato all'interno dei reticoli cristallini, dei separati di olivina di 8 campioni (4 lherzoliti e 4 harzburgiti).

I dati ottenuti, riportati in tabella 5B, hanno evidenziato la presenza di uno stretto intervallo di $^3\text{He}/^4\text{He}$, con un R/R_a che va da 7.1 a 8.0. I rapporti isotopici misurati, concordi con quelli che per la sistematica dell'He definiscono la componente DM ($8 \pm 1 R_a$ campionata nei MORB), sono leggermente maggiori rispetto a quelli registrati in altri xenoliti di mantello subcontinentali africani (Beccaluva et al., 2007 e Beccaluva et al., 2008) e confrontabili con quelli delle olivinwebsteriti (R/R_a 7.5 – 7.8) provenienti dal sito di Injibara, dove i valori sensibilmente più elevati suggeriscono una possibile interazione

di queste litologie con componenti di plume caratterizzati da R/Ra anormalmente alti (Pik et al., 2006).

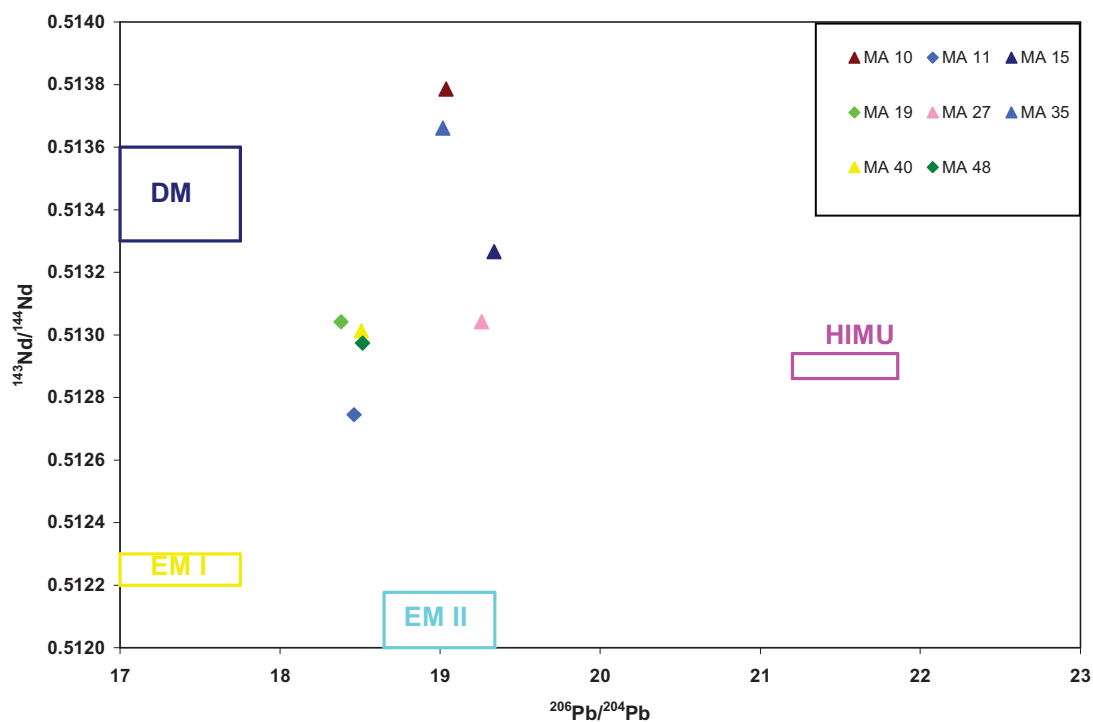


Figura 6.3.3 – Correlazione tra il rapporto $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ dei clinopirosseni degli xenoliti del sito di Mega. I campi DM, EMI, EMII e HIMU sono tratti da Zinder & Hart, 1986.

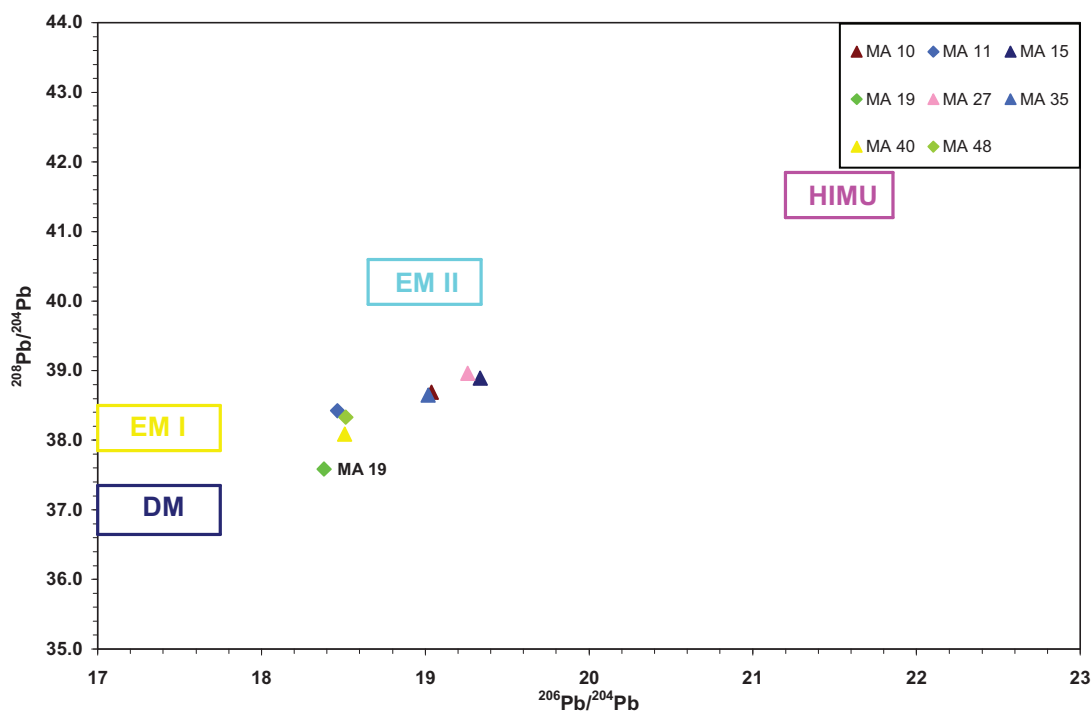


Figura 6.3.4 – Correlazione tra il rapporto $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ dei clinopirosseni degli xenoliti del sito di Mega. I campi DM, EMI, EMII e HIMU sono tratti da Zinder & Hart, 1986.

7 DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

7.1 NODULI DI MANTELLO DI AZROU (Atlante Medio, Marocco)

Gli xenoliti di mantello provenienti da un maar nel distretto vulcanico di Azrou-Timhadite rappresentano porzioni di un mantello litosferico, di composizione prevalentemente lherzolitica (da 7 a 17 % di clinopirosseno), equilibrato nella facies delle peridotiti a spinello.

I relativi domini di mantello sembrano avere subito variabili gradi di impoverimenti per estrazione di magmi basici, plausibilmente durante il neo-paleoproterozoico (Raffone et al., 2009). I successivi processi metasomatici sono evidenziati da tessiture secondarie estremamente diffuse, di tipo pirometamorfico, consistenti in aree di reazione che interessano i clinopirosseni, con la presenza di bordi di reazione e formazione di corone di microcristalli di olivina, e gli spinelli, con bordi neri in destabilizzazione.

Le analisi della roccia totale e dei clinopirosseni evidenziano la presenza di variabili arricchimenti di LREE, U e Sr, probabilmente causati dall'interazione con fusi basici alcalini. Tuttavia, in analogia con quanto riportato in letteratura inerentemente alle caratteristiche indotte da metasomatismo carbonatitico (Rudnick et al., 1993; Coltorti et al., 1999, Delpelch et al., 2004), la presenza di significative anomalie negative in Ti, e secondariamente in Zr, nei pattern normalizzati al mantello primordiale dei clinopirosseni maggiormente interessati da fenomeni metasomatici, fa pensare che gli agenti metasomatici che hanno arricchito il mantello sottostante l'area di Azrou-Timhadite fossero fusi alcali – silicatici variabilmente influenzati da una componente carbonatitica.

Nel complesso, i dati chimici e tessiturali, unitamente al fatto che l'intensità del metasomatismo sia inversamente proporzionale alla concentrazione di clinopirosseno, suggeriscono che il meccanismo con cui si realizzano i processi metasomatici sia rappresentato da un generalizzato flusso poroso (*porous flow*) nella matrice peridotitica litosferica. L'entità di questi effetti sembra, infatti, essere legata a differenti parametri: il rapporto quantitativo tra fluidi metasomatici e la peridote, la tipologia e il grado di arricchimento dei fluidi in questione, così come la mobilità di questi fluidi, a sua volta dipendente dai valori dell'angolo diedro fluido – matrice.

I clinopirosseni degli xenoliti di Azrou sono caratterizzati da una composizione isotopica di Sr-Nd-Pb che indicano una predominante impronta che coincide con l'*end-member* HIMU, mentre i bassi valori del rapporto isotopico dell'He ($Ra < 6.8$), rinvenuti nelle olivine, fa

ritenere per gli agenti metasomatici un'origine relativamente superficiale nel mantello superiore. I dati ottenuti in questa tesi confermano quanto era già ipotizzato da Beccaluva et al., 2007 (Hoggar), 2008 (Gharyan), per la sezione di mantello sotto l'allineamento vulcanico NE-SW e cioè una rifertilizzazione data da agenti metasomatici originatisi nel mantello superiore a seguito di una risalita passiva dell'astenosfera dovuta alla riattivazione degli antichi lineamenti tettonici presenti nel basamento cratonico Pan-africano, a sua volta innescata dai processi collisionali di Africa ed Europa, durante il Cenozoico.

Caratteristiche geochemiche del tutto simili sono registrate da altre associazioni vulcaniche e xenoliti di mantello della placca africana, come ad esempio nell'Hoggar (Algeria – Beccaluva et al., 2007) e nel Gharyan (Libia, Beccaluva et al., 2008), suggerendo la presenza di un'unica componente sub-litosferica al di sotto dell'Africa centro settentrionale. L'origine e il luogo fisico di questa componente geochemica sembra essere confinata al mantello superiore, a profondità inferiori di 670 km, dove essa risulterebbe generata dal riciclaggio ed evoluzione a lungo termine di porzioni di antica litosfera oceanica subdotta caratterizzate da elevati rapporti di U/Pb e Th/Pb (Weaver, 1991; Carlson, 1995; Hofmann, 1997).

7.2 NODULI DI MANTELLO DI MEGA (Main Ethiopian Rift, MER)

La quasi totalità degli xenoliti di mantello del sito di Mega recano evidenze di passati processi metasomatici, che si sono sovrapposti ad una situazione di mantello impoverito per fusione parziale; i diagrammi di variazione degli ossidi in roccia totale hanno messo in evidenza come tutta la collezione segua un unico trend di fusione parziale ben mimando i trends proposti da Niu (1997). A livello petrografico le evidenze del metasomatismo sono scarse e per lo più legate alla presenza di vene di clinopirosseno e piccole zone di reazione; molti campioni invece appaiono soggetti a diversi gradi di deformazione e ricristallizzazione.

Dalle analisi degli elementi in tracce emerge che il metasomatismo è associato ad un variabile arricchimento nelle LREE, e risulta essere più forte nei campioni che hanno subito i maggiori gradi di estrazione di fuso, ciò confermando la maggiore permeabilità della matrice peridotitica più refrattaria agli agenti metasomatici.

La modellizzazione ricavata dalle analisi sui clinopirosseni, attraverso i coefficienti di partizione (K_D), ha permesso di determinare importanti caratteristiche degli agenti metasomatici che hanno arricchito il mantello sottostante l'area oggetto di studio. In questo modo si sono ricavati due possibili agenti metasomatici che hanno interessato il mantello soggiacente l'area di Mega: uno derivante da fusi a componente prevalentemente alcali-silicatica e uno invece derivante da fusi alcali-silicatici carbonatati come, ad esempio, nefeliniti e/o meliliti.

Questi agenti metasomatici erano probabilmente caratterizzati da un'impronta isotopica di tipo HIMU; infatti i campioni che registrano i maggiori arricchimenti in LREE sono anche quelli che mostrano le maggiori affinità con l'end-member dell'HIMU. In altri campioni invece si registra un valore dei rapporti isotopici di Sr e Nd vicini al DM mentre il Pb in entrambi i casi fornisce valori discordanti.

In una visione più generale dell'evoluzione del mantello litosferico nella regione dell'Africa Orientale, da un confronto tra i dati petrologici e geochimici, sia di roccia totale che delle singole fasi minerali, delle popolazioni di xenoliti di mantello provenienti dalle aree del plateau nord-etiope di Injibara (Gojam) e Dedessa (Wollega) con quelle del Main Ethiopian Rift (Mega) si riscontrano simili processi di impoverimento per estrazione di fuso (pre-paleozoici) (Reisberg et al., 2004) ma marcate differenze nelle deformazioni e nei processi di arricchimento metasomatici.

Entrambe le popolazioni, del plateau e della Rift mostrano un comune trend di impoverimento (vedi capitolo 3) da fertili lherzoliti ricche in clinopirosseno a lherzoliti povere in clinopirosseno fino alle più refrattarie harzburgiti. Tuttavia i domini litosferici sotto il plateau mostrano solo limitate evidenze di deformazioni reologiche mentre i domini di mantello sotto la MER mostrano un'intensa storia di deformazioni implicando risalita di materiale di mantello a stadi successivi, con parziale riequilibrio nei livelli litosferici meno profondi, durante lo sviluppo del rift.

Evidenze petrografiche e geochemiche indicano che processi metasomatici hanno interessato il mantello sottostante il plateau, comportando variazioni mineralogiche, degli elementi in tracce e degli isotopi (Beccaluva et al., in stampa).

I dati degli elementi in tracce e degli isotopi indicano per questi xenoliti un'origine dell'agente metasomatico da fusi subalcalini di composizione vicina ai magmi CFB connessi col plume dell'Afar (fig. 7.2.1).

Le sezioni di mantello sotto la MER mostrano invece processi metasomatici completamente diversi, che colpiscono prevalentemente i domini harzburgitici più refrattari; come visto dai dati degli elementi in tracce e degli isotopi la natura degli agenti metasomatici è connessa a fusi basici alcalini con una impronta HIMU, in analogia con le affinità magmatiche del vulcanismo della MER neogenico-quadernario. Queste caratteristiche, insieme alle deformazioni tessiturali indicano che gli xenoliti di Mega rappresentano una risalita passiva del mantello non connessa con il plume dell'Afar e legata invece allo sviluppo della MER. Questo sembra essere in accordo con i dati delle anisotropie sismiche che indicano flussi di mantello orientati parallelamente alla direzione del rift sotto la MER (Kendall et al., 2006).

Da una comparazione regionale a scala ancor più ampia tra le analogie e le differenze degli xenoliti di mantello dell'Etiopia e materiali mantellici provenienti da altre zone afro-arabiche emerge che: il corpo lherzolitico a spinello di Zabargad, esumato durante l'apertura del Mar Rosso mostra un impoverimento in LREE sia negli anfiboli che nei clinopirosseni (Vannucci et al., 1995) che suggeriscono un metasomatismo da fusi subalcalini in analogia con quanto accade per gli xenoliti del plateau etiopico di Injibara (Gojam) e Dedessa (Wollega).

Per contro le lherzoliti a spinello degli xenoliti disposti lungo il Mar Rosso (Ottonello et al., 1978; Henjes-Kunst et al., 1990) e del margine continentale del Golfo di Aden (Baker et al., 1996) mostrano effetti metasomatici da agenti alcali-silicatici analogamente agli xenoliti della MER di Mega (Sidamo). Un simile metasomatismo alcalino-silicatico ad affinità

isotopica HIMU è stato riconosciuto lungo tutta la fascia Sahariana dal Sudan al Marocco (Bayuda, Sudan –Lucassen et al., 2008; Gharyan – Beccaluva et al., 2008; Hoggar, Algeria – Dautria et al., 1997; Beccaluva et al., 2007; Atlante Medio, Marocco – Raffone et al., 2009).

Estendendo il confronto a sud della MER, le peridotiti degli xenoliti del campo vulcanico di Marsabit (Kenya) mostrano deformazioni tessiturali e matesomatismo alcalino analoghi a quanto registrato a Mega; in questo caso il metasomatismo alcalino è attribuito alla formazione del rift del Kenya (Kaeser et al., 2006).

Più a sud, nella Tanzania, lungo l'East African Rift, xenoliti di mantello a composizione peridotitica (da lherzoliti, harzburgiti e wherliti, a volte contenuti granato) mostrano diffuse evidenze modali di metasomatismo: presenza di anfibolo, flogopite, apatite e ilmenite (Pello Hill – Dawson and Smith, 1988; Labait – Dawson, 1999; Lashaine – Dawson, 2002). Dettagliati studi degli elementi in tracce e degli isotopi di questi xenoliti (Aulbach et al., in press) mostrano un'ampio intervallo composizionale che va dall'HIMU all'EM, dove gli agenti silicatici e carbonatitici di tipo HIMU sono legati all'evoluzione del rift nel Cenozoico e variamente si sovraimpongono all'antico mantello litosferico caratterizzato da una segnatura EM.

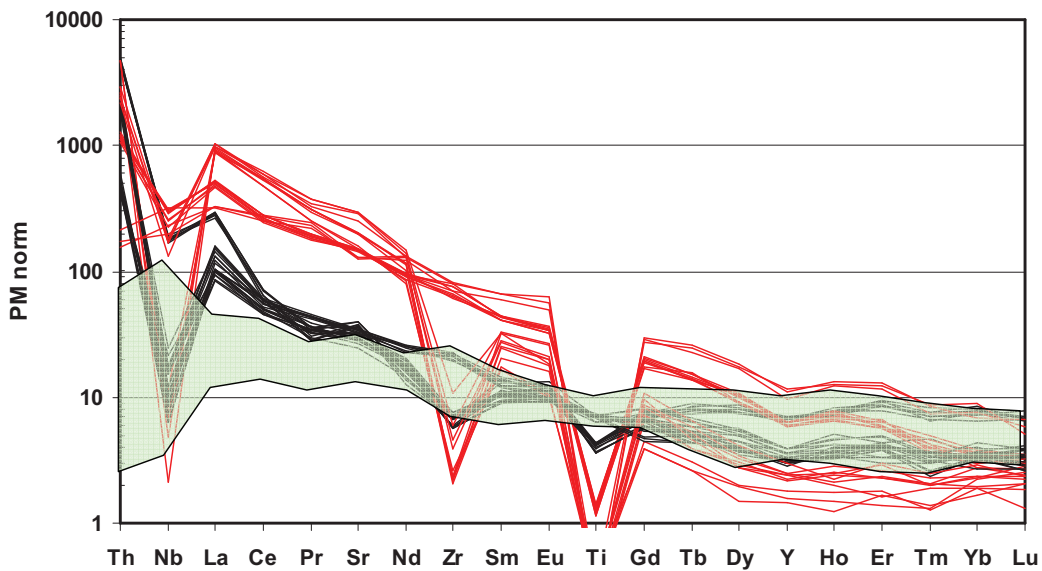


Figura 7.2.1 – Diagramma di confronto tra gli agenti metasomatici che hanno interessato gli xenoliti di mantello del sito di Mega (linee nere e rosse) e il campo degli agenti metasomatici ricostruiti per gli xenoliti di mantello dei siti di Injibara e Dedessa nel plateau etiopico (campo verde).

APPENDICE A

METODOLOGIE ANALITICHE UTILIZZATE

ANALISI DEGLI ELEMENTI MAGGIORI SU ROCCIA TOTALE (XRF)

Le analisi in fluorescenza a raggi X (XRF) per la determinazione degli ossidi degli elementi maggiori e di Pb, Zn, Ni, Co, Cr, V, Rb, Sr, Ba, Nb, Zr e Y su roccia totale sono state condotte presso il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Ferrara utilizzando uno spettrometro ARL Advant XP ed applicando ai risultati la correzione dell'effetto matrice seguendo il metodo proposto da Lachance e Trail (1966). Precisione ed accuratezza generalmente sono migliori del 2% per gli ossidi degli elementi maggiori e del 5% per gli elementi in tracce, mentre il limite di rivelabilità per gli elementi in tracce varia da 1 a 2 ppm. Le analisi ripetute sugli elementi in tracce hanno una precisione inferiore al 5%. La preparazione del campione prevede la polverizzazione del campione tal quale ed una successiva ricompattazione sotto forma di pasticche che vengono montate su di un supporto di acido borico, il quale risulta "inerte" all'analisi. Il campione viene irradiato da un fascio di raggi x primari che vengono assorbiti secondo la legge di Beer. L'assorbimento di energia provoca lo spostamento di elettroni in orbitali interni e la conseguente lacuna tende ad essere riempita attraverso lo spostamento di un elettrone che si trova negli orbitali più esterni. Il "salto elettronico" genera emissione di raggi x secondari caratteristici per ogni elemento componente il campione che vengono conteggiati da uno spettrometro a raggi X. La quantificazione dei volatili è stata effettuata attraverso perdita al fuoco (Loss Of Ignition-LOI) ad una temperatura di 1000° C.

ANALISI DEGLI ELEMENTI IN TRACCE SU ROCCIA TOTALE

Le analisi per la quantificazione delle terre rare (Rare Earth Elements - REE), di Sc, Nb, Ta, Th, Hf e U sono state effettuate attraverso la tecnica di spettrometria di plasma massa (Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry; ICP-MS) utilizzando un *VG-THERMO X-SERIE* della Thermo Elemental. Accuratezza e limite di rilevabilità sono stati calcolati analizzando diversi standard internazionali. Precisione ed accuratezza sono in generale migliori del 10% mentre i limiti di rilevabilità, espressi in ppm, sono: Sc=0,29; Nb, Hf, Ta=0,02; REE<0,14; Th, U=0,01. Tutte le analisi sono state condotte nei laboratori del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Ferrara. Nella fattispecie, il campione

polverizzato viene disciolto a formare una soluzione acida la quale, vaporizzata all'interno di una camera che contiene una lampada ionizzante che raggiunge elevate temperature (ca. 8000 °C) genera un plasma che viene poi analizzato dal quadripolo dello spettrometro, il quale effettua discriminazione qualitativa delle masse atomiche e le invia ai collettori per il conteggio quantitativo di ognuna di esse.

ANALISI DEGLI ELEMENTI MAGGIORI “*IN SITU*” (EPMA)

Attraverso l'analisi di microsonda elettronica (Electron Micro Probe Analysis - EPMA) è possibile ricavare la composizione in ossidi degli elementi maggiori delle singole fasi minerali. Lo strumento utilizzato è una Microsonda Cameca SX 50 equipaggiata con quattro spettrometri verticali a dispersione di lunghezza d'onda (WDS) ai quali sono associati 2 cristalli analizzatori TAP, 2 PET, 3 LIF e 1 PC1 e con rilevatori per SE, BSE e RX. Vi è la possibilità di acquisire istantaneamente lo spettro di emissione per identificare gli elementi presenti nell'analisi puntuale grazie ad uno spettrometro a dispersione di energia EDS. In generale, il sistema EDS è utilizzato per ottenere un'analisi rapida qualitativa del campione e semi quantitativa degli elementi con numero atomico ($Z \geq 11$ (Na), mentre il sistema WDS permette di fare un'analisi quantitativa precisa anche di elementi leggeri o in traccia. Una telecamera collegata ad un monitor permette di osservare il campione in luce trasmessa e riflessa. Lo strumento utilizzato è in dotazione ai laboratori dell'IGG-CNR al Dipartimento di Mineralogia dell'Università di Padova. Il funzionamento è simile a quello dello spettrometro a raggi x anche se la sorgente consiste di un fascio elettronico focalizzato che permette di eccitare minute aree del campione (da 2 a 10 μm di diametro).

ANALISI DEGLI ELEMENTI IN TRACCE “*IN SITU*” (LA-ICP-MS)

Le analisi degli elementi in tracce ed ultratracce sono state eseguite presso i laboratori dell'IGG-CNR dell'Università di Pavia. Le analisi vengono eseguite su sezioni sottili le quali devono soddisfare il requisito di uno spessore minimo di circa 80 μm . Lo strumento è uno spettrometro di massa accoppiato ad una sorgente laser, la quale opera un'ablazione sul campione solido con efficienza media di circa 1 μm al secondo (diametro dell'ablazione pari a 40 μm). Un flusso di elio permette al materiale ablato di uscire dalla camera porta campione e arrivare allo spettrometro il quale ionizza il campione ed effettua la misura. La

configurazione della sorgente laser utilizzata (213 nm) permette di arrivare alla massima energia del fascio pari a 0,4mJ/impulso ad una frequenza di 213nm.

ANALISI ISOTOPICHE DEI RAPPORTI ISOTOPICI DI SR – ND – PB – HE

Le analisi isotopiche sono state condotte al fine di definire le componenti geochemiche del mantello (Depleted Mantle, High Uranium, Enriched Mantle I e II). Le analisi sono state condotte presso lo Scottish Universities Environmental Research Centre di East Kilbride, Glasgow (UK) nei laboratori della sezione geochemica degli isotopi radiogenici.

Le misure dei rapporti isotopici di Sr, Nd e Pb sono state effettuate su clinopirosseni separati manualmente, (circa 100 – 200 mg) per i campioni peridotitici. I campioni sono stati prima sottoposti a lisciviazione mediante HCl 2.5M e successivamente sottoposti ad attacco acido combinato, mediante cicli differenti con HF, HNO₃ concentrato e HCl 6M, secondo il metodo di Hardarson et al. (1997), e successivamente sottoposti al passaggio in colonne di resina a scambio cationico per la separazione dello stronzio e successivamente a scambio anionico per l'isolamento delle terre rare, dalle quali attraverso lo stesso procedimento si è ricavato il neodimio. Il residuo solido di ogni campione (stronzio e neodimio) è stato poi addizionato con 1 µL di acido nitrico e montato su di un filamento di tungsteno al quale è stata applicata una piccola differenza di potenziale al fine di far evaporare l'acido nitrico e fissare il residuo solido sul filamento. I filamenti sono poi stati inseriti nel porta campione di uno spettrometro di massa equipaggiato con ionizzazione termica (Thermal Ionization Mass Spectrometry – TIMS). Procedimento simile è stato fatto per le analisi del Pb, per la cui determinazione è stato utilizzando un metodo analogo a quello descritto da Ellam, 2006.

Il rapporto isotopico ³He/⁴He viene misurato su cristalli separati di olivina (circa 1,5 gr.) che vengono lisciviati per eliminare impurezze superficiali e poi frantumati in un sistema cilindro-pistone collegato ad uno spettrometro di massa MAP 215-50 a separatore magnetico, che misura i gas fuoriusciti dalle inclusioni. Tutto il sistema lavora sotto vuoto. Allo spettrometro l'elio e gli altri gas nobili arrivano separati dagli altri gas che vengono rimossi durante il percorso mediante trappole metalliche (CO₂), a carbone (Ar) e liquide (Ne) tutte raffreddate con azoto liquido o elio.

TABELLE DATI

	L.herz.		Harz.		Ol/Wb		L.herz.		L.herz.		L.herz.		L.herz.		L.herz.	
	AT 1	AT 2	AT 3	AT 4	AT 5	AT 6	AT 7	AT 8	AT 10	AT 11	AT 12	AT 13	AT 10	AT 11	AT 12	AT 13
SiO₂ (wt%)	45.41	43.88	42.01	45.85	43.08	42.97	43.76	43.79	44.14	44.16	43.39	43.56	44.14	44.16	43.39	43.56
TiO₂	0.03	0.14	0.05	0.35	0.16	0.10	0.15	0.12	0.17	0.15	0.08	0.31	0.17	0.15	0.08	0.31
Al₂O₃	2.77	3.54	1.83	5.89	3.05	2.89	3.16	3.10	4.23	3.33	2.20	2.85	4.23	3.33	2.20	2.85
FeO Tot	5.75	7.69	9.02	6.71	9.09	8.76	8.45	8.69	8.12	7.30	7.94	11.19	8.12	7.30	7.94	11.19
MnO	0.12	0.13	0.14	0.13	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.15	0.14	0.13	0.13	0.15
MgO	43.41	41.32	45.61	36.04	41.10	42.37	41.46	41.12	39.42	41.46	44.48	38.24	39.42	41.46	44.48	38.24
CaO	2.14	2.58	0.79	4.08	2.47	2.11	2.19	2.41	3.00	2.87	1.24	2.96	3.00	2.87	1.24	2.96
Na₂O	0.18	0.22	0.15	0.29	0.21	0.19	0.16	0.23	0.27	0.31	0.15	0.19	0.27	0.31	0.15	0.19
K₂O	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
P₂O₅	0.01	0.03	0.03	0.01	0.06	0.01	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03
LOI	0.18	0.46	0.36	0.66	0.63	0.45	0.50	0.39	0.49	0.27	0.37	0.52	0.49	0.27	0.37	0.52
Totale	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Ba (ppm)	14	33	28	68	39	4	28	23	120	24	9	10	120	24	9	10
Co	114	107	124	93	112	115	112	104	108	108	112	116	108	108	112	116
Cr	1869	2329	1471	2579	1747	2056	2634	2435	2380	2060	2238	1783	2380	2060	2238	1783
Ni	1837	1938	2276	1536	1947	2164	1974	2026	1871	1866	2191	1797	1871	1866	2191	1797
V	66	69	26	156	55	53	65	67	74	72	39	74	74	72	39	74
Zn	40	43	39	63	50	43	44	46	43	42	37	70	43	42	37	70
Cu	13	12	9	17	23	7	5	10	9	11	8	23	9	11	8	23
Ga	5	3	5	1	2	3	3	3	2	3	4	1	2	3	4	1
Sc	20	21	12	25	20	18	18	19	23	20	13	19	23	20	13	19
(%)																
OI	62	63	84	38	68	71	65	65	57	64	74	63	57	64	74	63
Opx	27	23	11	40	19	17	24	22	26	21	19	22	26	21	19	22
Cpx	11	14	5	22	13	11	12	13	16	15	7	15	16	15	7	15
tot	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tab. 1A (Analisi XRF di roccia totale dei noduli di Azrou; nd = not detected)

Lherzoliti											
	AT1			AT6			AT7				
	ol-2a4 core	ol-4a2 rim	ol-1a2 core	ol-3a3 core/rim	ol-4a4 core	ol-4a6 micr.	ol-1a5 core	ol-1a6 rim/core	ol-2a5* rim		
SiO₂	41.47	42.03	41.28	41.69	41.29	40.70	41.55	41.65	41.57		
TiO₂	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.11	0.00	0.00	0.03		
Al₂O₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.03	0.00	0.00		
FeO tot	9.59	9.03	10.02	10.32	11.02	8.93	9.47	9.50	9.64		
MnO	0.16	0.08	0.16	0.11	0.21	0.21	0.16	0.19	0.11		
MgO	49.22	49.29	49.29	49.13	48.36	48.66	48.81	48.40	49.36		
CaO	0.05	0.09	0.04	0.04	0.01	0.27	0.04	0.03	0.03		
Na₂O	0.01	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00		
K₂O	0.01	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00		
NiO	0.42	0.33	0.41	0.37	0.30	0.30	0.40	0.31	0.18		
Total	100.29	100.63	102.71	99.07	101.08	101.43	102.80	102.02	102.04		
<i>a.p.f.u.</i>											
Si	1.007	1.016	1.001	1.007	1.005	1.003	1.012	1.017	1.007		
Ti	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001		
Al⁶⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000		
Fe²⁺	0.195	0.183	0.203	0.208	0.224	0.184	0.193	0.194	0.195		
Mn	0.003	0.002	0.003	0.002	0.004	0.004	0.003	0.004	0.002		
Mg	1.781	1.776	1.782	1.768	1.755	1.787	1.771	1.761	1.783		
Ca	0.001	0.002	0.001	0.001	0.000	0.007	0.001	0.001	0.001		
Na	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000		
K	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000		
Ni	0.008	0.006	0.008	0.007	0.006	0.006	0.008	0.006	0.004		
cations	2.995	2.986	3.000	2.996	2.996	2.995	2.990	2.986	2.993		
Fo	90.1	90.7	89.8	89.5	88.7	90.7	90.2	90.1	90.1		

Tab. 2A (Analisi rappresentative delle olivine dei noduli di Mega)

Lherzoliti

	AT7		AT10		AT12					
	ol-2a6* core	ol-3a7 rim	ol-6a3 core	ol-1a3 core	ol-2a4 rim	ol-3a3 core	ol-1a6 core	ol-2a5 rim	ol-3a2 core	ol-3a6 core
SiO ₂	41.63	42.04	41.86	41.64	41.49	41.40	41.86	41.87	42.02	41.88
TiO ₂	0.06	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02
Al ₂ O ₃	0.04	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
FeO tot	9.93	9.57	9.98	10.13	9.97	10.31	9.51	9.42	9.57	9.48
MnO	0.19	0.13	0.17	0.16	0.12	0.18	0.08	0.19	0.19	0.07
MgO	48.54	49.10	49.03	48.84	48.58	48.88	49.09	49.30	49.32	49.14
CaO	0.06	0.04	0.06	0.04	0.06	0.05	0.03	0.03	0.01	0.03
Na ₂ O	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.03
K ₂ O	0.05	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00
NiO	0.34	0.41	0.29	0.33	0.41	0.32	0.32	0.23	0.34	0.31
Total	102.27	100.94	101.65	102.01	102.23	101.17	101.94	101.65	101.47	98.57
<i>a.p.f.u.</i>										
Si	1.012	1.015	1.011	1.010	1.011	1.005	1.013	1.012	1.013	1.014
Ti	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Al ⁶⁺	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.202	0.193	0.202	0.206	0.203	0.209	0.193	0.190	0.193	0.192
Mn	0.004	0.003	0.003	0.003	0.002	0.004	0.002	0.004	0.004	0.001
Mg	1.759	1.767	1.765	1.765	1.765	1.769	1.772	1.776	1.771	1.773
Ca	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001
K	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
Ni	0.007	0.008	0.006	0.006	0.008	0.006	0.006	0.005	0.007	0.006
cations	2.988	2.987	2.990	2.992	2.991	2.996	2.988	2.990	2.988	2.988
Fo	89.7	90.1	89.7	89.6	89.7	89.4	90.2	90.3	90.2	90.2

Tab. 2A (continua)

Harzburgite		Olivin-websterite									
AT3		AT4									
	ol-1a4 micr.	ol-2a4 micr.	ol-5a2 rim	ol-1a1* core	ol-1a2* rim	ol-2a1 core	ol-2a6 core	ol-2a10 core	ol-3a1 core	ol-4a2 core	
SiO₂	41.57	42.13	41.33	41.67	41.54	42.20	41.53	41.71	41.58	41.69	
TiO₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.01	0.04	
Al₂O₃	0.05	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.01	
FeO tot	8.36	7.94	9.56	10.59	10.59	10.48	10.28	10.56	10.84	10.40	
MnO	0.11	0.17	0.16	0.17	0.13	0.13	0.06	0.23	0.13	0.12	
MgO	49.42	49.96	49.39	49.79	49.85	49.74	49.33	49.62	50.09	49.82	
CaO	0.14	0.16	0.08	0.05	0.00	0.03	0.00	0.06	0.01	0.02	
Na₂O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	
K₂O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	
NiO	0.39	0.32	0.30	0.34	0.33	0.41	0.48	0.39	0.49	0.45	
Total	100.79	100.73	101.31	102.62	102.44	103.00	101.75	102.69	103.17	102.62	
<i>a.p.f.u.</i>											
Si	1.012	1.016	1.004	0.999	0.998	1.007	1.003	1.000	0.994	0.999	
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	
Al⁶⁺	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	
Fe²⁺	0.170	0.160	0.194	0.212	0.213	0.209	0.208	0.212	0.217	0.209	
Mn	0.002	0.003	0.003	0.004	0.003	0.003	0.001	0.005	0.003	0.002	
Mg	1.793	1.795	1.788	1.779	1.784	1.768	1.776	1.773	1.784	1.780	
Ca	0.004	0.004	0.002	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Ni	0.008	0.006	0.006	0.006	0.006	0.008	0.009	0.008	0.009	0.009	
cations	2.989	2.985	2.997	3.002	3.004	2.995	2.999	3.001	3.008	3.002	
Fo	91.3	91.8	90.2	89.3	89.4	89.4	89.5	89.3	89.2	89.5	

Tab. 2A (continua)

Olivin-websterite			
AT4			
	ol-6a3 core	ol-7a3* rim/core	ol-7a6* core
SiO ₂	41.63	41.40	41.44
TiO ₂	0.02	0.02	0.00
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00
FeO tot	10.66	10.06	10.14
MnO	0.11	0.13	0.18
MgO	49.89	50.68	50.42
CaO	0.01	0.00	0.03
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00
K ₂ O	0.02	0.00	0.02
NiO	0.43	0.41	0.43
Total	102.82	102.71	102.67
<i>a.p.f.u.</i>			
Si	0.997	0.991	0.993
Ti	0.000	0.000	0.000
Al ⁶⁺	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.214	0.201	0.203
Mn	0.002	0.003	0.004
Mg	1.782	1.808	1.800
Ca	0.000	0.000	0.001
Na	0.000	0.000	0.000
K	0.001	0.000	0.001
Ni	0.008	0.008	0.008
cations	3.004	3.011	3.009
Fo	89.3	90.0	89.9

Tab. 2A (continua)

Lherzolititi

	AT1		AT6		AT7		AT7		AT7				
	core/rim	opx-5a2* core	opx-5a3* rim	rim/core	opx-1a3 rim/core	opx-2a2 core	opx-3a4 core	opx-4a2 core	opx-1a1* core	opx-1a2* rim	opx-3a6 micr.	opx-3a6 core	opx-6a2 core
SiO ₂	57.14	56.57	56.77	56.39	55.94	56.53	56.35	56.09	56.51	56.56	56.68	56.26	
TiO ₂	0.03	0.01	0.06	0.10	0.10	0.11	0.08	0.11	0.12	0.07	0.08	0.14	
Al ₂ O ₃	3.16	3.75	3.11	3.65	4.36	3.60	3.42	3.53	3.46	3.33	3.35	4.11	
FeO tot	6.28	6.06	5.90	6.69	6.87	6.33	6.95	6.52	6.55	6.36	6.90	6.45	
MnO	0.12	0.14	0.20	0.21	0.16	0.18	0.20	0.14	0.21	0.20	0.21	0.07	
MgO	33.16	33.07	33.78	33.32	33.05	32.97	33.18	33.23	32.93	33.40	33.10	32.72	
CaO	0.56	0.97	0.46	0.48	0.41	0.50	0.55	0.44	0.51	0.51	0.52	0.64	
Na ₂ O	0.00	0.01	0.00	0.07	0.06	0.09	0.00	0.06	0.04	0.04	0.05	0.12	
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	
Cr ₂ O ₃	0.23	0.39	0.33	0.39	0.20	0.23	0.33	0.27	0.24	0.27	0.26	0.53	
NiO	0.06	0.03	0.13	0.18	0.14	0.04	0.02	0.16	0.07	0.10	0.02	0.00	
Total	100.76	101.01	100.73	101.47	101.33	100.61	101.08	100.56	100.63	100.83	101.19	101.03	
<i>a.p.f.u.</i>													
Si	1.963	1.937	1.946	1.925	1.912	1.943	1.931	1.93	1.945	1.94	1.94	1.927	
Ti	0.001	0	0.002	0.003	0.003	0.003	0.002	0.003	0.003	0.002	0.002	0.004	
Al	0.128	0.151	0.126	0.147	0.176	0.146	0.138	0.143	0.14	0.135	0.135	0.166	
Fe ³⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Fe ²⁺	0.196	0.182	0.177	0.193	0.197	0.191	0.203	0.191	0.199	0.188	0.203	0.193	
Mn	0.003	0.004	0.006	0.006	0.005	0.005	0.006	0.004	0.006	0.006	0.006	0.002	
Mg	1.698	1.687	1.726	1.695	1.683	1.689	1.695	1.704	1.689	1.707	1.688	1.67	
Ca	0.021	0.036	0.017	0.018	0.015	0.018	0.02	0.016	0.019	0.019	0.019	0.023	
Na	0	0.001	0	0.005	0.004	0.006	0	0.004	0.003	0.003	0.003	0.008	
K	0	0	0	0	0.001	0.001	0	0	0	0	0.001	0	
Cr	0.006	0.011	0.009	0.011	0.005	0.006	0.009	0.007	0.007	0.007	0.007	0.014	
cations	4.016	4.009	4.009	4.003	4.001	4.008	4.004	4.002	4.011	4.007	4.004	4.007	
mg#	0.90	0.90	0.91	0.90	0.90	0.90	0.89	0.90	0.89	0.90	0.89	0.90	

Tab. 2A (Analisi rappresentative degli ortopirosseni dei noduli di Azrou)

	<i>Lherzolitii</i>				<i>Harzburgite</i>				<i>Olivin-websterite</i>					
	AT10		AT12		AT3		AT4		opx-2a9		opx-3a6*		opx-3a7*	
	core	opx-2a2	rim	opx-1a2	core	opx-2a3	rim	opx-4a2	core	rim	core	rim	core	rim
SiO ₂	56.54	56.78	56.71	57.29	56.91	56.40	56.13	56.24	56.58	56.70	56.99	56.41		
TiO ₂	0.07	0.07	0.04	0.06	0.06	0.05	0.06	0.15	0.07	0.17	0.22	0.16		
Al ₂ O ₃	3.32	3.10	2.90	2.99	3.64	3.15	3.71	3.74	3.50	3.32	3.67	4.10		
FeO tot	6.37	6.75	6.52	6.09	6.26	6.67	6.74	6.32	6.85	6.95	6.73	6.85		
MnO	0.23	0.22	0.12	0.11	0.18	0.10	0.13	0.12	0.25	0.17	0.15	0.16		
MgO	33.53	33.25	33.53	33.75	33.42	33.24	32.94	33.25	34.26	34.23	34.28	34.32		
CaO	0.47	0.43	0.41	0.41	0.42	0.39	0.39	0.47	0.41	0.50	0.42	0.42		
Na ₂ O	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.07	0.06	0.04	0.00		
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00		
Cr ₂ O ₃	0.26	0.08	0.29	0.37	0.31	0.35	0.33	0.45	0.20	0.17	0.21	0.29		
NiO	0.19	0.12	0.04	0.03	0.10	0.01	0.14	0.11	0.21	0.19	0.11	0.09		
Total	100.97	100.83	100.58	101.11	101.29	100.37	100.58	100.86	102.41	102.48	102.81	102.82		
<i>a.p.f.u.</i>														
Si	1.938	1.95	1.95	1.957	1.943	1.944	1.934	1.93	1.91	1.914	1.915	1.895		
Ti	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002	0.001	0.002	0.004	0.002	0.004	0.006	0.004		
Al	0.134	0.126	0.118	0.12	0.147	0.128	0.151	0.151	0.139	0.132	0.145	0.162		
Fe ³⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.008	0.002	0.008		
Fe ²⁺	0.187	0.201	0.194	0.186	0.19	0.199	0.202	0.189	0.184	0.188	0.187	0.185		
Mn	0.007	0.006	0.003	0.003	0.005	0.003	0.004	0.003	0.007	0.005	0.004	0.005		
Mg	1.712	1.702	1.718	1.718	1.701	1.707	1.692	1.7	1.723	1.722	1.717	1.718		
Ca	0.017	0.016	0.015	0.015	0.015	0.014	0.014	0.017	0.015	0.018	0.015	0.015		
Na	0	0.002	0	0	0	0.001	0	0	0.005	0.004	0.003	0		
K	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0.001	0	0	0		
Cr	0.007	0.002	0.008	0.01	0.008	0.01	0.009	0.012	0.005	0.005	0.006	0.008		
cations	4.004	4.007	4.007	4.011	4.011	4.007	4.008	4.007	4.001	4	4	4		
mg#	0.90	0.89	0.90	0.90	0.90	0.90	0.89	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90		

Tab. 2A (continua)

Olivin-websterite

AT4

	opx-4a1 core	opx-5a1 core sx	opx-5a2 rim sx	opx-5a3 core dx	opx-5a4 rim dx	opx-6a1* core	opx-6a2* rim	opx-7a1 rim	opx-7a2 core
SiO₂	56.01	56.16	55.96	55.51	56.66	55.66	56.71	56.48	55.28
TiO₂	0.23	0.20	0.16	0.18	0.13	0.24	0.14	0.13	0.22
Al₂O₃	4.34	4.73	4.61	4.51	3.76	4.76	3.76	3.59	4.41
FeO tot	6.79	6.85	6.87	6.76	6.91	6.92	6.48	6.72	6.71
MnO	0.23	0.20	0.07	0.13	0.13	0.27	0.22	0.26	0.22
MgO	33.75	33.06	33.60	33.60	33.92	33.24	33.90	34.40	33.95
CaO	0.44	0.45	0.48	0.47	0.41	0.66	0.40	0.42	0.43
Na₂O	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.06	0.06	0.13	0.06
K₂O	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00
Cr₂O₃	0.29	0.25	0.26	0.36	0.24	0.22	0.14	0.24	0.22
NiO	0.16	0.11	0.14	0.07	0.13	0.08	0.03	0.07	0.04
Total	102.26	102.01	102.23	101.59	102.31	102.12	101.83	102.46	101.55
<i>a.p.f.u.</i>									
Si	1.896	1.908	1.892	1.888	1.916	1.887	1.922	1.901	1.877
Ti	0.006	0.005	0.004	0.005	0.003	0.006	0.004	0.003	0.006
Al	0.173	0.189	0.184	0.181	0.15	0.19	0.15	0.142	0.177
Fe³⁺	0.004	0	0.005	0.006	0.001	0.006	0	0.013	0.014
Fe²⁺	0.188	0.2	0.189	0.186	0.194	0.191	0.184	0.176	0.177
Mn	0.007	0.006	0.002	0.004	0.004	0.008	0.006	0.007	0.006
Mg	1.702	1.674	1.693	1.703	1.709	1.679	1.712	1.726	1.718
Ca	0.016	0.016	0.017	0.017	0.015	0.024	0.015	0.015	0.016
Na	0	0	0.005	0	0	0.004	0.004	0.008	0.004
K	0	0	0	0	0.001	0	0	0	0
Cr	0.008	0.007	0.007	0.01	0.006	0.006	0.004	0.006	0.006
cations	4	4.005	3.998	4	3.999	4.001	4.001	3.997	4.001
mg#	0.90	0.89	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.91	0.91

Tab. 2A (continua)

Lherzolititi

	AT1					AT6				
	cpx-1a2 core	cpx-1a4 core	cpx-2a3 micr.	cpx-2a5 rim	cpx-3a2 core	cpx-3a3* core	cpx-3a4* rim	cpx-1a4 core	cpx-4a5 core	
SiO ₂	53.98	53.92	53.08	53.76	54.00	53.73	54.36	51.11	52.87	
TiO ₂	0.10	0.09	0.14	0.10	0.13	0.05	0.06	0.62	0.29	
Al ₂ O ₃	3.56	3.74	4.58	3.64	3.66	3.80	3.45	7.07	3.32	
FeO tot	2.57	2.62	2.74	2.62	2.74	2.60	2.62	3.00	2.86	
MnO	0.14	0.07	0.07	0.08	0.05	0.11	0.09	0.04	0.11	
MgO	16.55	16.24	16.42	16.75	16.44	16.44	16.47	14.38	17.16	
CaO	22.64	22.79	22.16	22.63	23.00	22.89	22.78	21.48	22.01	
Na ₂ O	0.78	0.61	0.61	0.75	0.65	0.72	0.72	1.36	0.65	
K ₂ O	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	
Cr ₂ O ₃	0.57	0.46	0.97	0.63	0.49	0.51	0.57	0.82	1.22	
NiO	0.05	0.07	0.04	0.00	0.11	0.08	0.10	0.00	0.12	
Total	100.97	100.62	100.84	100.97	101.28	100.94	101.23	99.87	100.62	
<i>a.p.f.u.</i>										
Si	1.938	1.946	1.911	1.928	1.937	1.93	1.949	1.855	1.907	
Ti	0.003	0.002	0.004	0.003	0.004	0.001	0.002	0.017	0.008	
Al	0.151	0.159	0.194	0.154	0.155	0.161	0.146	0.303	0.141	
Fe ³⁺	0.002	0	0	0.005	0	0.003	0	0.006	0.01	
Fe ²⁺	0.075	0.085	0.085	0.074	0.083	0.075	0.082	0.085	0.076	
Mn	0.004	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.001	0.003	
Mg	0.885	0.873	0.881	0.895	0.879	0.88	0.88	0.778	0.923	
Ca	0.871	0.881	0.855	0.869	0.884	0.881	0.875	0.836	0.851	
Na	0.054	0.043	0.043	0.052	0.045	0.05	0.05	0.096	0.045	
K	0.001	0.001	0	0	0	0	0	0	0	
Cr	0.016	0.013	0.028	0.018	0.014	0.014	0.016	0.024	0.035	
cations	4	4.005	4.003	4	4.003	3.998	4.003	4.001	3.999	
mg#	0.92	0.91	0.91	0.92	0.91	0.92	0.91	0.90	0.92	

Tab. 2A (Analisi rappresentative dei clinopiroseni dei noduli di Azrou)

Lherzoliti

AT7

	cpx-1a7 core	cpx-1a8 micr.	cpx-1a9* rim	cpx-1a10 core	cpx-3a4 core	cpx-4a2 micr.	cpx-4a3 core	cpx-5a2* core sx	cpx-5a3* core dx
SiO₂	52.93	52.07	52.51	54.51	52.80	51.60	53.10	52.43	51.71
TiO₂	0.32	0.55	0.50	0.22	0.33	0.31	0.40	0.44	0.57
Al₂O₃	4.89	5.90	5.83	4.01	4.78	6.29	4.78	5.47	6.84
FeO tot	2.73	3.29	3.24	2.65	2.91	3.42	2.72	2.95	3.30
MnO	0.16	0.08	0.12	0.02	0.10	0.10	0.05	0.08	0.11
MgO	15.67	16.32	17.44	16.18	15.64	17.27	15.59	17.05	15.79
CaO	22.00	20.09	18.98	22.25	21.66	18.81	21.72	20.04	19.59
Na₂O	1.14	0.99	0.83	1.01	1.02	0.72	1.12	0.86	1.06
K₂O	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Cr₂O₃	0.65	0.42	0.55	0.21	0.71	1.18	0.70	0.90	0.57
NiO	0.00	0.02	0.13	0.09	0.00	0.00	0.05	0.06	0.03
Total	100.52	99.73	100.15	101.16	99.94	99.69	100.23	100.28	99.57
<i>a.p.f.u.</i>									
Si	1.907	1.887	1.893	1.952	1.916	1.869	1.921	1.889	1.879
Ti	0.009	0.015	0.014	0.006	0.009	0.008	0.011	0.012	0.016
Al	0.208	0.252	0.248	0.169	0.204	0.269	0.204	0.232	0.293
Fe³⁺	0.006	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe²⁺	0.077	0.1	0.102	0.084	0.089	0.105	0.084	0.089	0.106
Mn	0.005	0.002	0.004	0.001	0.003	0.003	0.002	0.002	0.003
Mg	0.841	0.882	0.937	0.863	0.846	0.932	0.84	0.916	0.855
Ca	0.849	0.78	0.733	0.854	0.842	0.73	0.842	0.774	0.763
Na	0.08	0.07	0.058	0.07	0.072	0.051	0.079	0.06	0.075
K	0	0	0.001	0	0	0	0	0	0
Cr	0.019	0.012	0.016	0.006	0.02	0.034	0.02	0.026	0.016
cations	4.001	4	4.006	4.005	4.001	4.001	4.003	4	4.006
mg#	0.92	0.90	0.90	0.91	0.90	0.90	0.91	0.91	0.89

Tab. 2A (continua)

Lherzoliti

	AT10		AT12		Total	
	cpx-1a2 rim	cpx-2a3 core	cpx-2a2 core	cpx-3a3 core		cpx-3a5 core
SiO ₂	51.97	52.47	53.52	53.42	54.05	53.63
TiO ₂	0.72	0.69	0.22	0.30	0.21	0.20
Al ₂ O ₃	6.69	7.12	4.24	4.63	3.77	4.01
FeO tot	2.94	2.65	2.69	2.78	2.60	2.75
MnO	0.11	0.11	0.01	0.04	0.05	0.14
MgO	14.75	14.44	15.49	15.49	15.87	16.08
CaO	21.30	21.05	22.13	21.84	22.33	22.27
Na ₂ O	1.45	1.67	1.14	1.17	1.05	1.10
K ₂ O	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.03
Cr ₂ O ₃	0.53	0.58	1.02	1.04	0.88	0.79
NiO	0.09	0.01	0.02	0.12	0.10	0.05
Total	100.54	100.81	100.50	100.83	100.91	101.06
<i>a.p.f.u.</i>						
Si	1.873	1.883	1.932	1.924	1.945	1.923
Ti	0.02	0.019	0.006	0.008	0.006	0.005
Al	0.284	0.301	0.18	0.197	0.16	0.17
Fe ³⁺	0.004	0	0	0	0	0.007
Fe ²⁺	0.084	0.081	0.083	0.086	0.081	0.075
Mn	0.003	0.003	0	0.001	0.002	0.004
Mg	0.792	0.772	0.834	0.832	0.851	0.859
Ca	0.823	0.809	0.856	0.843	0.861	0.856
Na	0.101	0.116	0.08	0.082	0.073	0.076
K	0	0	0.001	0	0	0.001
Cr	0.015	0.016	0.029	0.03	0.025	0.022
cations	3.999	4	4.001	4.003	4.004	3.998
mg#	0.90	0.91	0.91	0.91	0.91	0.92

Tab. 2A (continua)

Lherzolliti

	AT1		AT6		AT7				AT8		AT9	
	sp-1a6 core	sp-2a2 micr.	sp-3a2 core	sp-3a5 core	sp-1a3* core	sp-1a4* rim	sp-2a2 micr.	sp-2a4 rim	sp-2a7 core	sp-2a8 micr.	sp-3a2* core	sp-3a3* rim
SiO ₂	0.18	0.24	0.08	0.10	0.18	0.25	0.17	0.23	0.17	0.32	0.14	0.26
TiO ₂	0.03	0.04	0.06	0.04	0.10	0.23	0.20	0.21	0.06	0.21	0.08	0.21
Al ₂ O ₃	51.14	50.24	56.67	55.98	55.24	50.91	52.62	51.74	55.79	53.42	56.23	50.34
FeO tot	13.18	11.21	12.42	12.66	11.20	11.72	11.29	11.65	12.31	11.19	12.57	11.62
MnO	0.07	0.11	0.11	0.12	0.12	0.05	0.09	0.20	0.17	0.08	0.13	0.09
MgO	19.39	19.48	19.89	19.26	19.84	18.98	19.99	20.20	19.59	19.52	19.39	19.55
CaO	0.03	0.12	0.01	0.00	0.06	0.06	0.04	0.01	0.08	0.04	0.02	0.00
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.01	0.09	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K ₂ O	0.01	0.02	0.00	0.03	0.01	0.00	0.04	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01
Cr ₂ O ₃	13.99	15.69	9.10	9.94	10.55	15.11	13.40	14.51	9.41	13.63	9.94	15.51
NiO	0.31	0.41	0.44	0.48	0.29	0.43	0.23	0.16	0.40	0.34	0.37	0.34
Total	98.33	97.55	98.77	98.63	97.68	97.78	98.06	98.93	97.98	98.74	98.88	97.95
<i>a.p.f.u.</i>												
Si	0.005	0.006	0.002	0.003	0.005	0.007	0.005	0.006	0.004	0.008	0.004	0.007
Ti	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.005	0.004	0.004	0.001	0.004	0.002	0.004
Al	1.617	1.602	1.749	1.739	1.725	1.622	1.654	1.619	1.738	1.671	1.742	1.6
Fe ³⁺	0.08	0.05	0.06	0.05	0.05	0.04	0.05	0.06	0.05	0.02	0.04	0.05
Fe ²⁺	0.22	0.21	0.22	0.23	0.2	0.23	0.2	0.2	0.22	0.23	0.23	0.22
Mn	0.002	0.003	0.002	0.003	0.003	0.001	0.002	0.004	0.004	0.002	0.003	0.002
Mg	0.775	0.785	0.776	0.757	0.783	0.764	0.794	0.799	0.772	0.772	0.759	0.786
Ca	0.001	0.003	0	0	0.002	0.002	0.001	0	0.002	0.001	0.001	0
Na	0	0	0	0.001	0.005	0.003	0	0	0	0	0	0
K	0	0.001	0	0.001	0	0	0.001	0	0.001	0	0	0
Cr	0.297	0.336	0.188	0.207	0.221	0.323	0.282	0.304	0.197	0.286	0.206	0.331
Ni	0.007	0.009	0.009	0.01	0.006	0.009	0.005	0.003	0.008	0.007	0.008	0.007
cations	3.005	3.006	3.007	3.002	3.002	3.006	2.998	2.999	2.997	3.001	2.995	3.007
mg#	0.78	0.79	0.78	0.77	0.80	0.77	0.80	0.80	0.78	0.77	0.77	0.78
cr#	0.16	0.17	0.10	0.11	0.11	0.17	0.15	0.16	0.10	0.15	0.11	0.17

Tab. 2A (Analisi rappresentative degli spinelli dei noduli di Azrou)

	Lherzolliti				Harzburgite				Olivin-websterite					
	AT10		AT12		AT3		AT4		AT3		AT4			
	sp-3a2 core	sp-1a3* rim	sp-1a4* core	sp-3a3 rim	sp-1a3 rim	sp-2a2 rim	sp-2a3* rim	sp-2a4* core	sp-3a2* rim	sp-3a3* core	sp-4a3 core	sp-6a4* rim	sp-6a5* core	
SiO ₂	0.14	0.18	0.21	0.11	0.16	0.18	0.023	0.0368	0.0426	0.0299	0.0841	0.0474	0.0288	
TiO ₂	0.02	0.09	0.05	0.18	0.02	0.06	0.0606	0.0637	0.1406	0.0873	0.0549	0.0699	0.0504	
Al ₂ O ₃	58.47	41.00	42.08	38.68	52.07	53.48	60.7374	60.5348	61.0062	61.1563	60.5069	61.0504	61.336	
FeO tot	12.04	15.36	16.01	13.78	13.01	12.14	11.6909	11.9807	11.6215	11.8726	11.3075	10.6659	11.7818	
MnO	0.13	0.15	0.24	0.18	0.12	0.15	0.1284	0.0455	0.1701	0.057	0.0252	0.1531	0.0658	
MgO	20.09	17.52	17.29	17.96	18.90	19.16	20.8867	20.9064	20.5716	20.8595	20.2251	22.087	20.8555	
CaO	0.00	0.06	0.01	0.03	0.01	0.00	0	0	0.017	0	0	0	0.0079	
Na ₂ O	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0	0	0	0	0	0	0	
K ₂ O	0.04	0.02	0.02	0.00	0.01	0.02	0.0063	0	0.0089	0.0051	0	0.0381	0	
Cr ₂ O ₃	7.60	24.60	23.82	27.04	14.28	13.27	6.2506	6.3755	6.5132	6.2331	6.4455	5.6236	5.7764	
NiO	0.45	0.34	0.33	0.30	0.32	0.31	0.453	0.3225	0.3414	0.439	0.3815	0.4348	0.5712	
Total	98.98	99.31	100.06	98.26	98.89	98.79	100.24	100.27	100.43	100.74	99.03	100.17	100.47	
<i>a.p.f.u.</i>														
Si	0.004	0.005	0.006	0.003	0.004	0.005	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	
Ti	0	0.002	0.001	0.004	0	0.001	0.001	0.001	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	
Al	1.788	1.349	1.374	1.291	1.64	1.675	1.82	1.815	1.828	1.824	1.837	1.816	1.832	
Fe ³⁺	0.05	0.1	0.09	0.09	0.05	0.04	0.05	0.05	0.03	0.05	0.03	0.07	0.05	
Fe ²⁺	0.21	0.26	0.28	0.24	0.24	0.23	0.2	0.2	0.21	0.21	0.22	0.16	0.2	
Mn	0.003	0.004	0.006	0.004	0.003	0.003	0.003	0.001	0.004	0.001	0.001	0.003	0.001	
Mg	0.777	0.729	0.713	0.758	0.753	0.759	0.791	0.792	0.779	0.787	0.776	0.831	0.788	
Ca	0	0.002	0	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Na	0	0.001	0	0	0	0.001	0	0	0	0	0	0	0	
K	0.001	0.001	0.001	0	0	0.001	0	0	0	0	0	0.001	0	
Cr	0.156	0.543	0.521	0.605	0.302	0.279	0.126	0.128	0.131	0.125	0.131	0.112	0.116	
Ni	0.009	0.008	0.007	0.007	0.007	0.007	0.009	0.007	0.007	0.009	0.008	0.009	0.012	
cations	2.998	3.004	2.999	3.003	2.999	3.001	3.001	2.995	2.993	3.009	3.006	3.004	3.001	
mg#	0.79	0.74	0.72	0.76	0.76	0.77	0.80	0.80	0.79	0.79	0.78	0.84	0.80	
cr#	0.08	0.29	0.27	0.32	0.16	0.14	0.06	0.07	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	

Tab. 2A (continua)

	Lherz.	Lherz.	Harz.	Ol-Wb.	Lherz.	Lherz.	Lherz.	Lherz.	Lherz.	Lherz.	Lherz.	Lherz.	Lherz.
	AT1	AT2	AT3	AT4	AT5	AT6	AT7	AT8	AT10	AT11	AT12	AT13	
Rb	0.82	0.71	0.71	0.94	1.07	0.47	0.23	0.29	0.36	0.85	0.76	0.40	
Sr	20.9	39.6	40.7	190.5	93.1	20.9	12.3	13.6	21.7	33.0	29.0	21.5	
Y	1.10	3.08	1.04	3.04	3.64	1.78	2.00	2.00	3.27	2.58	0.83	2.55	
Zr	0.98	6.59	1.87	3.41	10.79	4.14	4.82	4.92	8.04	5.55	3.06	10.07	
Nb	1.92	0.68	1.30	0.57	4.95	0.59	0.16	0.48	0.55	0.37	0.75	1.31	
La	1.00	3.11	2.36	1.13	3.29	2.07	0.63	0.52	0.58	1.73	1.07	0.87	
Ce	1.81	4.72	4.60	1.73	8.26	1.31	0.87	1.10	1.24	2.20	1.90	1.99	
Pr	0.16	0.42	0.46	0.19	1.10	0.16	0.11	0.16	0.17	0.23	0.14	0.32	
Nd	0.55	1.39	1.68	0.80	4.83	0.69	0.56	0.77	0.88	0.99	0.47	1.62	
Sm	0.09	0.32	0.26	0.25	1.01	0.20	0.19	0.22	0.30	0.27	0.10	0.49	
Eu	0.03	0.11	0.07	0.09	0.28	0.07	0.07	0.07	0.12	0.09	0.04	0.15	
Gd	0.11	0.41	0.26	0.34	0.88	0.23	0.24	0.25	0.39	0.33	0.13	0.49	
Tb	0.02	0.08	0.04	0.08	0.14	0.05	0.05	0.05	0.08	0.07	0.02	0.09	
Dy	0.15	0.50	0.19	0.50	0.73	0.30	0.33	0.33	0.54	0.42	0.14	0.49	
Ho	0.04	0.11	0.04	0.11	0.14	0.07	0.07	0.07	0.12	0.09	0.03	0.10	
Er	0.12	0.33	0.11	0.33	0.39	0.19	0.21	0.21	0.35	0.28	0.09	0.25	
Tm	0.02	0.05	0.02	0.05	0.06	0.03	0.03	0.03	0.06	0.04	0.01	0.04	
Yb	0.14	0.34	0.11	0.34	0.37	0.20	0.22	0.23	0.37	0.28	0.09	0.22	
Lu	0.02	0.05	0.02	0.05	0.06	0.03	0.04	0.04	0.06	0.04	0.01	0.03	
Hf	0.06	0.18	0.04	0.13	0.23	0.11	0.14	0.12	0.22	0.16	0.07	0.30	
Ta	0.77	0.24	0.16	0.06	0.29	0.05	0.04	0.07	0.05	0.04	0.07	0.12	
Th	0.14	0.35	0.55	0.14	0.16	0.12	0.06	0.01	0.04	0.31	0.21	0.06	
U	0.07	0.17	0.78	0.08	0.09	0.07	0.09	0.01	0.06	0.19	0.11	0.15	
La _N /Yb _N	5.14	6.48	15.56	2.41	6.35	7.28	2.02	1.64	1.14	4.44	8.14	2.78	
Ce _N /Yb _N	3.60	3.80	11.73	1.43	6.18	1.79	1.08	1.35	0.94	2.19	5.60	2.47	
Sm _N /Dy _N	1.07	1.05	2.36	0.83	2.29	1.08	0.96	1.09	0.92	1.07	1.10	1.67	
Nd _N /Yb _N	1.42	1.47	5.62	0.87	4.74	1.24	0.92	1.24	0.87	1.29	1.82	2.64	

Tab. 3A (Analisi ICP-MS di roccia totale dei noduli di Azrou; N= normalizzato alle condriti C1, McDonough & Sun, 1995)

Lherzoliti											
AT1						AT6					
	cpx-1a1* rim	cpx-1a1* core	cpx-3a1 rim	cpx-3a2 rim	cpx-3a1 rim	cpx-3a2 rim	cpx-3a1 rim	cpx-3a2 rim	cpx-1a1A core	cpx-1a1B core	cpx-1a2 core
Rb	0.07	0.10	<0.026	0.07	0.04	<0.057			0.21	0.51	0.10
Ba	0.5	1.6	<0.037	0.8	1.5	1.8			5.6	6.1	1.5
Th	1.16	1.22	0.88	1.01	1.15	1.03			3.51	3.14	3.65
U	0.45	0.70	0.50	0.52	0.56	0.49			1.14	1.28	1.00
Nb	0.41	0.44	0.23	0.25	0.46	0.34			0.07	0.12	0.06
Ta	0.04	0.06	0.06	0.03	0.11	0.08			0.02	<0.0069	<0.0069
K											
La	9.58	10.16	8.46	8.97	9.31	8.40			13.24	10.72	17.32
Ce	14.92	15.56	14.98	14.76	14.25	13.80			16.74	12.61	29.49
Pr	1.59	1.34	1.13	1.25	1.17	1.25			1.64	1.32	2.55
Sr	127.7	123.6	111.3	115.8	116.6	103.7			139.7	137.2	201.8
Nd	3.62	3.95	3.80	4.15	3.59	3.77			5.32	5.64	7.34
P											
Zr	3.9	3.9	4.1	3.6	4.3	4.7			27.4	28.1	30.5
Hf	0.15	0.13	0.08	0.04	0.10	0.08			0.95	1.35	0.93
Sm	0.74	0.67	0.58	0.70	0.82	0.63			2.18	1.97	1.82
Eu	0.29	0.24	0.25	0.20	0.24	0.26			0.50	0.74	0.83
Ti	420	420	420	420	480	420			3057	2878	2278
Gd	0.27	0.75	0.62	0.54	0.60	0.69			1.61	3.04	2.16
Tb	0.11	0.12	0.10	0.10	0.13	0.16			0.49	0.57	0.42
Dy	0.92	1.17	0.87	1.00	1.06	1.00			3.28	3.05	2.93
Y	6.0	5.8	5.8	5.8	6.3	6.2			16.2	18.5	15.6
Ho	0.21	0.34	0.21	0.21	0.30	0.22			0.74	0.56	0.79
Er	0.86	0.61	0.59	0.86	0.73	0.53			2.16	1.51	1.93
Tm	0.10	0.11	0.09	0.10	0.10	0.11			0.32	0.30	0.23
Yb	0.84	0.80	0.69	0.87	0.74	0.68			2.09	2.57	2.21
Lu	0.15	0.13	0.13	0.11	0.14	0.13			0.24	0.29	0.26
La _N /Yb _N	7.75	8.63	8.38	7.02	8.59	8.40			4.30	2.83	5.32
Ce _N /Yb _N	4.67	5.11	5.74	4.47	5.09	5.34			2.10	1.29	3.50
Nd _N /Yb _N	1.52	1.74	1.95	1.68	1.72	1.96			0.90	0.77	1.17
Ti/Eu	1472	1741	1672	2067	1990	1633			6091	3873	2761

Tab. 4A (Analisi LAM-ICP-MS dei clinopiroseni dei noduli di Azrou; N= normalizzato alle condriti C1, McDonough & Sun, 1995)

Lherzoliti

	AT7		AT10		AT12		cpx-3a1 core	cpx-3a1 core	cpx-3a1 core	cpx-3a1 core
	cpx-1a1 core	cpx-1a2 core	cpx-1a1 core	cpx-1a2 core	cpx-1a1 core	cpx-1a2 core				
Rb	0.02	0.03	0.61	0.16	<0.0184	0.15	<0.0207	0.07	0.07	0.11
Ba	0.4	1.6	79.4	46.7	0.2	1.6	<0.049	0.6	1.3	0.5
Th	0.25	0.31	0.04	0.07	3.20	3.58	3.50	2.77	3.77	3.38
U	0.26	0.27	0.05	0.06	1.05	1.05	1.27	1.44	1.18	1.41
Nb	<0.0072	0.02	0.08	0.05	0.14	0.19	0.06	0.07	0.09	0.07
Ta	<0.0069	<0.0069	0.01	<0.0066	0.01	<0.0058	<0.0058	<0.0058	<0.0058	<0.0058
K										
La	1.77	1.76	1.63	1.37	17.85	22.31	23.72	25.18	23.14	24.10
Ce	3.32	3.41	4.42	4.30	28.78	33.20	32.81	30.03	34.20	35.49
Pr	0.67	0.68	0.89	0.79	1.80	2.36	2.14	1.92	2.43	2.22
Sr	50.8	47.4	71.7	74.3	173.9	221.3	222.4	200.2	284.6	252.6
Nd	4.53	4.23	4.97	4.46	5.44	6.28	6.36	6.16	6.16	6.51
P										
Zr	41.2	37.4	32.1	34.5	26.1	29.3	22.0	22.7	23.1	21.4
Hf	1.34	1.23	0.69	1.35	0.95	0.85	0.63	0.56	0.68	0.71
Sm	1.63	1.69	2.04	1.69	0.90	1.38	0.93	1.20	1.26	1.23
Eu	0.65	0.71	0.95	0.89	0.41	0.45	0.59	0.55	0.58	0.61
Ti	2578	2758	3657	3657	1439	1259	1259	1619	1079	1139
Gd	2.40	2.40	2.27	2.42	1.46	1.61	1.60	1.25	1.60	1.37
Tb	0.44	0.39	0.52	0.48	0.28	0.29	0.29	0.30	0.30	0.33
Dy	2.79	2.64	3.64	3.46	1.67	1.66	1.93	2.12	2.16	1.83
Y	15.0	13.9	17.9	18.8	8.7	8.7	10.1	10.7	9.4	9.6
Ho	0.62	0.62	0.64	0.74	0.34	0.40	0.39	0.32	0.55	0.39
Er	1.68	1.45	2.53	2.25	0.84	0.92	1.09	1.19	1.09	1.03
Tm	0.19	0.22	0.28	0.31	0.17	0.11	0.12	0.14	0.16	0.13
Yb	1.73	1.66	2.61	2.14	1.22	1.12	0.91	0.99	1.01	1.05
Lu	0.24	0.20	0.29	0.32	0.13	0.11	0.14	0.18	0.12	0.15
La _N /Yb _N	0.69	0.72	0.42	0.43	9.94	13.56	17.73	17.28	15.56	15.61
Ce _N /Yb _N	0.50	0.54	0.44	0.53	6.20	7.80	9.48	7.97	8.89	8.89
Nd _N /Yb _N	0.92	0.90	0.67	0.73	1.57	1.98	2.46	2.19	2.15	2.19
Ti/Eu	3984	3901	3853	4100	3535	2816	2119	2959	1870	1855

Tab. 4A (continua)

Harzburgite		Olivin-websterite									
AT3		AT4									
	cpx-5a1A core	cpx-5a1B core	cpx-5a2 core	cpx-7a5 core	cpx-7a4 core	cpx-1a3 core	cpx-1a4 core	cpx-2a5 core	cpx-2a8 core		
Rb	0.58	0.08	0.57	<0.0216	<0.0160	<0.0207	0.03	0.02	<0.0205		
Ba	28.1	4.1	22.1	0.1	0.2	0.0	<0.021	0.0	0.2		
Th	2.20	2.95	2.51	0.09	0.17	0.02	0.06	0.02	0.04		
U	2.04	2.75	2.28	0.05	0.06	0.01	0.03	0.01	0.02		
Nb	0.04	0.01	0.01	0.02	<0.00	0.02	0.02	<0.0070	0.02		
Ta	<0.0062	<0.0062	<0.0062	0.01	<0.00	<0.0027	0.00	0.00	0.00		
K											
La	20.46	23.51	21.46	0.28	0.26	0.16	0.29	0.19	0.20		
Ce	44.34	52.48	49.30	1.20	1.13	1.02	1.00	0.81	0.97		
Pr	4.58	4.50	3.90	0.34	0.28	0.26	0.23	0.25	0.28		
Sr	406.3	435.5	385.1	27.3	25.5	27.4	25.6	20.0	22.1		
Nd	12.82	12.09	11.94	2.56	2.06	2.40	2.13	1.83	2.25		
P											
Zr	25.5	22.7	20.6	13.8	11.7	12.1	11.1	12.1	11.5		
Hf	0.54	0.70	0.70	0.35	0.62	0.51	0.45	0.53	0.46		
Sm	1.96	1.27	1.80	1.38	0.89	1.37	1.10	1.18	1.27		
Eu	0.69	0.52	0.56	0.74	0.57	0.65	0.62	0.51	0.58		
Ti	2038	1079	1499	5797	3796	6248	5669	5681	5981		
Gd	1.70	1.08	1.13	2.14	1.70	2.10	1.89	1.79	1.78		
Tb	0.30	0.29	0.26	0.49	0.35	0.42	0.43	0.42	0.40		
Dy	1.78	1.13	1.49	2.92	2.37	3.16	3.00	2.61	2.89		
Y	9.2	6.8	8.0	15.8	12.1	17.0	15.9	14.8	16.0		
Ho	0.32	0.32	0.30	0.67	0.45	0.64	0.67	0.54	0.64		
Er	1.18	0.85	0.62	1.79	1.43	1.83	1.83	1.67	1.68		
Tm	0.10	0.15	0.16	0.25	0.22	0.27	0.27	0.26	0.27		
Yb	1.04	0.68	1.05	1.46	1.69	2.00	1.96	1.76	2.08		
Lu	0.19	0.08	0.12	0.24	0.17	0.26	0.25	0.25	0.27		
La _N /Yb _N	13.36	23.66	13.84	0.13	0.10	0.05	0.10	0.07	0.06		
Ce _N /Yb _N	11.20	20.42	12.30	0.22	0.17	0.13	0.13	0.12	0.12		
Nd _N /Yb _N	4.34	6.31	3.99	0.62	0.43	0.42	0.38	0.37	0.38		
Ti/Eu	2941	2079	2657	7792	6660	9554	9158	11096	10348		

Tab. 4A (continua)

Rock type	Sample	Analysed fraction	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	Analysed fraction	$^3\text{He}/^4\text{He}$ (R/Ra)	dR/Ra
Lherz	AT 1	cpx	0.70334	0.51288	18.47	15.60	38.36	olivine	6.8	0.2
Lherz	AT 6	cpx	0.70278	0.51325	18.09	14.61	36.54	-	-	-
Lherz	AT 7	cpx	0.70303	0.51310	18.26	15.27	37.66	olivine	6.2	0.2
Lherz	AT 10	cpx	0.70243	-	17.50	14.86	36.34	-	-	-
Lherz	AT 12	cpx	0.70326	-	19.11	15.32	38.51	-	-	-
Harz.	AT 3	cpx	0.70335	0.51273	18.98	15.16	37.88	olivine	6.5	0.2
O/Wb.	AT 4	cpx	0.70334	0.51310	19.51	15.41	39.08	-	-	-
Alkaline basalt	AT1	bulk rock	-	0.51290	-	-	-	-	-	-
Alkaline basalt	AT7	bulk rock	0.70322	0.51292	-	-	-	-	-	-

Tab. 5A (Analisi isotopiche dei noduli di Azrou)

Poor lherz. (cpx >5 - 10%)

	MA 4	MA 5	MA 7	MA 8	MA 9	MA 12	MA 17	MA 28	MA 32	MA 35	MA 38	MA 39
SiO ₂ (wt%)	44.63	44.61	45.00	44.97	43.71	43.05	43.29	43.60	44.22	44.73	43.93	43.96
TiO ₂	0.05	0.12	0.13	0.10	0.08	0.06	0.12	0.10	0.06	0.02	0.08	0.03
Al ₂ O ₃	2.07	2.36	2.63	2.62	2.32	1.75	1.77	2.32	1.75	1.83	2.26	1.54
FeO Tot	6.43	6.48	7.13	7.59	7.02	8.92	8.41	7.41	6.82	6.32	7.80	6.50
MnO	0.13	0.12	0.13	0.14	0.13	0.14	0.16	0.13	0.13	0.12	0.13	0.12
MgO	45.09	44.03	42.50	42.31	44.98	44.09	44.11	44.23	45.49	44.76	43.51	46.17
CaO	1.28	1.91	2.03	2.02	1.43	1.36	1.47	1.88	0.87	1.87	1.84	1.35
Na ₂ O	0.29	0.22	0.23	0.20	0.20	0.17	0.33	0.22	0.43	0.13	0.20	0.15
K ₂ O	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.07	nd	0.01	nd	nd	nd
P ₂ O ₅	0.03	0.02	0.03	0.04	0.02	0.13	0.07	0.01	0.04	0.01	0.07	0.04
LOI	0	0.14	0.18	0.02	0.12	0.33	0.21	0.10	0.18	0.21	0.19	0.13
Totale	100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Ba (ppm)	39	1	20	nd	2	nd	57	0	37	nd	nd	nd
Co	118	109	110	112	117	122	114	117	117	106	112	113
Cr	1473	1445	2111	1852	1595	1778	1257	1682	1267	2118	2230	2117
Ni	1923	1944	1905	1827	2085	2186	2002	2033	2090	1982	2107	2142
V	45	56	69	60	48	41	26	55	34	54	52	40
Zn	40	38	53	43	40	42	59	40	44	36	36	37
Cu	8	6	25	4	6	1	nd	8	nd	3	9	8
Ga	5.76908	5	1	4	5	4	5	5	5	6	4	6
Sc	18	17	21	19	18	15	14	19	12	18	17	16
(%)												
OI	72	69	64	64	82	78	79	74	76	77	75	77
Opx	22	22	26	27	13	17	14	17	18	16	17	17
Cpx	7	9	10	9	6	5	7	9	6	7	7	6
tot	100	100	100	100	101	100	100	100	100	101	100	100

Tab. 1B (Analisi XRF di roccia totale dei noduli di Mega; nd = not detected)

Poor Iherz. (cpx >5 - 10%)

	MA 40	MA 41	MA 55	MA 57	MA 60	MA 61	MA 66	MA 69	MA 70
SiO ₂ (wt%)	44.14	44.83	42.58	44.52	44.45	44.03	44.58	44.36	43.87
TiO ₂	0.09	0.02	0.07	0.02	0.11	0.07	0.06	0.08	0.07
Al ₂ O ₃	1.53	1.50	2.07	2.33	2.65	1.99	2.03	2.41	1.82
FeO Tot	7.14	6.92	7.77	6.27	7.08	7.03	6.19	7.05	7.20
MnO	0.12	0.13	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
MgO	45.35	43.75	45.75	44.96	43.36	44.83	44.98	43.92	45.59
CaO	1.29	1.66	1.28	1.29	1.74	1.56	1.72	1.66	1.07
Na ₂ O	0.19	0.50	0.17	0.14	0.23	0.17	0.21	0.19	0.18
K ₂ O	nd	0.04	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
P ₂ O ₅	0.01	0.43	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.01
LOI	0.13	0.23	0.17	0.33	0.24	0.18	0.07	0.17	0.07
Totale	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Ba (ppm)	nd	7	nd	32	4	4	7	nd	2
Co	114	114	124	114	111	113	114	104	116
Cr	2412	2621	1298	2073	2173	2047	1693	2157	1843
Ni	2072	1823	2224	2046	2012	2101	1968	2002	2115
V	46	33	43	45	60	48	50	55	47
Zn	48	46	36	35	40	37	35	36	44
Cu	0	nd	9	5	9	5	13	11	2
Ga	5	4	5	6	4	5	5	4	5
Sc	14	15	16	17	18	15	19	16	17
(%)									
OI	82	71	81	70	68	74	71	69	76
Opx	13	21	13	24	24	19	21	23	19
Cpx	5	8	6	6	9	7	8	8	5
tot	101	100	100	100	100	100	100	100	100

Tab. 1B (continua)

Lherz. (Cpx >10%)

	MA 2	MA 10	MA 13	MA 15	MA 20	MA 21	MA 23	MA 27	MA 34	MA 49	MA 51	MA 52
SiO₂ (wt%)	44.40	45.03	44.62	45.64	44.09	43.81	43.81	43.95	44.00	44.56	44.36	44.96
TiO₂	0.10	0.09	0.09	0.12	0.12	0.11	0.11	0.13	0.09	0.13	0.13	0.10
Al₂O₃	2.90	2.84	2.89	2.78	3.41	2.69	2.90	3.06	3.02	2.83	3.29	2.81
FeO Tot	7.16	6.43	6.54	5.29	8.40	7.42	7.27	7.68	7.55	7.37	8.41	6.74
MnO	0.13	0.12	0.12	0.11	0.13	0.13	0.13	0.14	0.14	0.13	0.14	0.12
MgO	42.60	42.01	42.82	41.76	41.18	42.15	42.90	41.61	42.71	41.68	39.67	42.24
CaO	2.25	2.90	2.29	3.71	2.03	2.62	2.49	3.02	1.86	2.82	3.32	2.46
Na₂O	0.32	0.27	0.32	0.38	0.29	0.28	0.27	0.29	0.39	0.30	0.31	0.23
K₂O	nd	nd	nd	nd	0.01	0.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd
P₂O₅	0.03	0.03	0.03	0.04	0.01	0.02	0.03	0.02	0.04	0.02	0.05	0.02
LOI	0.10	0.27	0.28	0.17	0.33	0.75	0.10	0.11	0.21	0.16	0.31	0.33
Totale	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Ba (ppm)	6	2	14	nd	1	23	2	nd	28	10	0	nd
Co	107	103	103	97	110	109	112	111	115	111	106	104
Cr	1883	2314	2323	2239	1960	1943	2177	1598	2033	1684	2576	2420
Ni	1807	1859	1840	1742	2042	1907	1934	1879	1940	1883	1836	1840
V	59	68	63	77	66	65	66	76	60	70	75	71
Zn	45	38	40	34	54	39	45	44	63	34	42	38
Cu	5	13	5	17	9	4	7	10	4	4	16	9
Ga	4	4	4	4	3	3	5	3	4	4	3	4
Sc	20	23	20	24	17	19	20	22	18	21	22	21
(%)												
OI	67	72	66	70	64	69	70	76	69	65	62	63
Opx	22	16	23	16	25	19	18	11	21	22	23	25
Cpx	11	12	11	14	11	12	12	12	10	13	16	11
tot	100	101	100	101	100	100	100	101	100	100	100	100

Tab. 1B (continua)

Lherz. (Cpx >10%)

	MA 53	MA 54	MA 56	MA 58	MA 63	MA 67	MA 71
SiO ₂ (wt%)	44.44	44.36	44.41	43.77	46.31	45.82	44.99
TiO ₂	0.08	0.12	0.08	0.06	0.14	0.09	0.11
Al ₂ O ₃	2.68	2.66	2.85	1.69	3.30	3.13	2.48
FeO Tot	6.67	6.94	6.93	6.52	6.49	6.67	6.35
MnO	0.13	0.12	0.13	0.12	0.13	0.13	0.13
MgO	43.21	42.55	42.96	44.35	40.06	41.01	43.26
CaO	2.34	2.63	1.99	3.20	3.10	2.72	2.31
Na ₂ O	0.22	0.33	0.30	0.20	0.29	0.24	0.22
K ₂ O	nd	nd	0.02	nd	nd	nd	nd
P ₂ O ₅	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01
LOI	0.22	0.28	0.32	0.07	0.16	0.19	0.13
Totale	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Ba (ppm)	3	nd	5	nd	2	nd	nd
Co	110	111	113	114	94	95	107
Cr	1714	1622	1458	1823	2232	2542	1300
Ni	1847	2008	2040	1972	1655	1642	1839
V	66	68	53	67	81	78	66
Zn	39	39	41	31	34	40	31
Cu	4	35	28	24	10	5	11
Ga	5	4	4	6	3	4	4
Sc	20	21	19	25	24	24	19
(%)							
OI	68	68	67	76	53	62	66
Opx	22	19	23	10	32	27	24
Cpx	11	13	10	13	15	11	10.6
<i>tot</i>	100	100	100	100	100	99	100

Tab. 1B (continua)

Harz.

	MA 1	MA 3	MA 6	MA 11	MA 14	MA 16	MA 19	MA 22	MA 24	MA 25	MA 26	MA 29
SiO₂ (wt%)	42.85	44.24	45.38	44.04	43.65	44.43	43.74	43.20	44.64	43.43	43.13	43.86
TiO₂	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.06	0.06	0.06	0.02	0.03
Al₂O₃	1.20	1.13	1.34	1.19	1.20	1.30	1.47	1.65	1.41	1.42	1.03	1.06
FeO Tot	10.16	6.36	6.36	6.49	6.63	5.71	6.59	7.95	7.46	6.93	8.71	6.79
MnO	0.17	0.12	0.14	0.12	0.13	0.11	0.11	0.13	0.12	0.13	0.16	0.11
MgO	44.04	46.74	45.50	47.07	46.52	47.27	46.93	45.91	45.10	47.12	45.82	47.21
CaO	0.86	0.84	0.94	0.80	1.07	0.70	0.89	0.66	0.67	0.71	0.72	0.58
Na₂O	0.27	0.19	0.27	0.11	0.30	0.27	0.12	0.19	0.15	0.12	0.19	0.12
K₂O	0.03	nd	0.02	nd	0.02	0.01	nd	0.02	nd	nd	0.02	nd
P₂O₅	0.16	0.06	0.03	0.02	0.28	0.09	0.04	0.04	0.04	0.03	0.07	0.05
LOI	0.22	0.29	0.00	0.14	0.19	0.09	0.08	0.20	0.35	0.04	0.14	0.18
Totale	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Ba (ppm)	nd	4	nd	nd	23	16	nd	16	nd	nd	nd	nd
Co	113	117	108	115	117	115	115	122	108	121	115	113
Cr	2377	3098	1727	2204	1534	2332	1653	1709	1898	689	1825	2700
Ni	2164	2152	1957	2208	2054	2043	2216	2373	2203	2126	2252	2291
V	30	37	34	33	25	34	31	32	35	32	26	29
Zn	71	38	40	37	41	37	35	44	39	33	65	37
Cu	nd	nd	1	nd	3	1	5	6	0	1	nd	2
Ga	4	6	6	7	5	7	6	6	5	6	5	6
Sc	13	13	14	14	12	15	15	14	14	13	14	13
(%)												
OI	82	78	71	84	80	78	79	81	76	81	87	80
Opx	15	19	24	13	15	19	17	16	22	16	10	18
Cpx	4	4	5	3	4	4	4	3	2	3	3	2
tot	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tab. 1B (continua)

Harz.

	MA 30	MA 31	MA 33	MA 36	MA 37	MA 42	MA 43	MA 44	MA 45	MA 46	MA 47	MA 48
SiO₂ (wt%)	43.44	44.10	44.37	43.17	44.97	43.65	43.23	43.57	43.92	44.27	43.49	44.17
TiO₂	0.05	0.02	0.01	0.04	0.02	0.07	0.02	0.03	0.08	0.07	0.02	0.01
Al₂O₃	1.65	1.52	0.91	0.91	1.17	1.36	1.12	1.03	1.34	1.56	1.33	1.07
FeO Tot	7.52	6.91	6.33	6.83	6.27	8.19	6.23	6.50	7.14	6.21	6.34	6.65
MnO	0.13	0.12	0.12	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.12	0.11	0.11	0.12
MgO	45.90	45.98	47.60	47.60	46.31	45.60	48.33	47.51	46.30	46.33	47.50	46.98
CaO	0.95	1.07	0.56	1.04	0.90	0.65	0.60	0.87	0.85	1.05	0.75	0.73
Na₂O	0.19	0.12	0.08	0.16	0.10	0.15	0.23	0.26	0.16	0.15	0.25	0.14
K₂O	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.01	nd	nd	nd	nd
P₂O₅	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.04	0.01	0.01	0.03	0.06
LOI	0.16	0.14	0.00	0.10	0.12	0.21	0.09	0.06	0.11	0.24	0.16	0.08
Totale	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Ba (ppm)	21	3	nd	13	3	0	41	nd	nd	1	53	7
Co	118	115	112	121	110	117	119	114	118	111	114	115
Cr	1380	2040	3160	1348	2241	2275	1581	1668	1960	1899	2163	3056
Ni	2217	2119	2053	2165	2090	2246	2249	2155	2162	2117	2201	2214
V	36	40	29	23	40	35	30	31	38	42	34	34
Zn	37	36	35	53	34	48	40	40	47	35	41	39
Cu	1	2	1	2	nd	nd	nd	4	3	5	4	1
Ga	6	6	7	7	6	5	8	7	6	6	7	6
Sc	14	16	15	12	17	12	14	14	15	16	14	15
(%)												
OI	79	76	79	85	74	81	85	83	78	76	84	84
Opx	16	19	19	11	23	16	12	12	18	20	13	13
Cpx	5	4	2	4	3	2	3	4	4	5	3	3
tot	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tab. 1B (continua)

Harz.

OI-Wb

	MA 50	MA 59	MA 62	MA 64	MA 65	MA 68	MA 18
SiO ₂ (wt%)	43.65	44.24	43.67	43.64	42.93	42.66	49.38
TiO ₂	0.02	0.08	0.02	0.04	0.03	0.04	0.22
Al ₂ O ₃	1.21	1.81	1.07	1.44	0.83	1.03	7.97
FeO Tot	7.42	7.53	6.89	7.45	6.32	7.66	5.03
MnO	0.12	0.13	0.12	0.12	0.11	0.14	0.12
MgO	46.22	44.72	46.66	46.33	49.23	46.90	30.79
CaO	1.00	1.05	1.03	0.71	0.38	1.21	5.63
Na ₂ O	0.11	0.18	0.26	0.13	0.10	0.18	0.51
K ₂ O	nd	nd	0.02	nd	nd	nd	nd
P ₂ O ₅	0.01	0.09	0.05	0.03	0.01	0.05	0.04
LOI	0.24	0.19	0.21	0.11	0.08	0.12	0.32
Totale	100	100	100	100	100	100	100
Ba (ppm)	nd	1	13	46	nd	24	9
Co	113	110	114	121	119	117	66
Cr	2525	1948	1980	1569	983	2517	3314
Ni	2334	2127	2236	2284	2310	2236	853
V	36	40	21	33	20	27	156
Zn	35	37	38	35	33	53	68
Cu	nd	4	0	0	2	1	8
Ga	6	3	6	6	8	6	0
Sc	16	16	13	13	12	14	31
(%)							
OI	80	73	82	79	88	90	18
Opx	16	23	14	18	11	5	54
Cpx	4	5	5	3	1	5	25
tot	100	100	100	100	100	100	101

Tab. 1B (continua)

Lherzoliti poor-cpx (cpx >5-10%)														
	MA9				MA17				MA32					
	ol-1a3	ol-1a4	ol-2a6	ol-3a4	ol-5a3	ol-6a3	ol-1a7	ol-2a4	ol-3a3	ol-1a1	ol-1a2			
	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core	core			
SiO₂	41.46	41.82	41.44	41.59	41.71	41.84	41.72	41.45	41.16	42.12	41.89			
TiO₂	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02			
Al₂O₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00			
FeO_{Tot}	11.34	10.93	11.20	10.95	11.56	10.95	10.99	10.24	10.68	9.63	9.57			
MnO	0.16	0.12	0.18	0.27	0.19	0.13	0.16	0.14	0.26	0.08	0.24			
MgO	49.15	48.78	49.12	49.15	49.26	49.19	48.61	48.74	48.42	49.82	50.38			
CaO	0.04	0.03	0.03	0.03	0.00	0.02	0.05	0.06	0.05	0.04	0.03			
Na₂O	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.05	0.00			
K₂O	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02	0.01	0.00	0.02	0.00			
Cr₂O₃	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08			
NiO	0.44	0.32	0.24	0.40	0.33	0.39	0.34	0.40	0.39	0.41	0.54			
Totale	102.63	102.03	102.24	102.40	103.10	102.58	101.88	101.11	100.96	102.18	102.74			
<i>a.p.f.u.</i>														
Si	1.000	1.010	1.001	1.003	1.001	1.004	1.008	1.007	1.004	1.009	1.000			
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000			
Al⁶⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			
Fe²⁺	0.229	0.221	0.226	0.221	0.232	0.220	0.222	0.208	0.218	0.193	0.191			
Mn	0.003	0.003	0.004	0.005	0.004	0.003	0.003	0.003	0.005	0.002	0.005			
Mg	1.767	1.756	1.768	1.766	1.762	1.760	1.751	1.765	1.761	1.779	1.794			
Ca	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001			
Na	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000			
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000			
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.007	0.008	0.008	0.008	0.010			
cations	3.000	2.990	3.000	2.997	2.999	2.997	2.993	2.995	2.997	2.994	3.001			
Fo	88.5	88.8	88.7	88.9	88.4	88.9	88.7	89.5	89.0	90.2	90.4			

Tab. 2B (Analisi rappresentative delle olivine dei noduli di Mega)

Lherzoliti poor-cpx (cpx >5-10%)

	MA32				MA35							
	ol-2a1 core	ol-3a3 rim	ol-4a2 rim	ol-5a1* core	ol-5a2* core	ol-7a3 core	ol-1a3 rim	ol-1a4 rim	ol-1a6* rim	ol-1a7* core	ol-2a4 core	ol-3a1 rim
SiO ₂	42.14	41.99	41.64	41.76	42.08	41.69	41.91	41.77	41.70	41.69	41.52	41.58
TiO ₂	0.00	0.06	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00
FeO _{Tot}	9.78	9.42	9.90	10.04	10.28	9.65	8.75	8.96	9.03	8.97	9.44	9.03
MnO	0.13	0.15	0.11	0.22	0.20	0.13	0.12	0.19	0.16	0.18	0.20	0.03
MgO	49.98	50.47	50.39	50.34	49.83	49.79	50.34	50.49	50.09	50.04	50.13	50.51
CaO	0.04	0.02	0.03	0.07	0.02	0.00	0.05	0.05	0.09	0.09	0.03	0.08
Na ₂ O	0.01	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.05	0.00
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.04	0.10	0.06	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02
NiO	0.46	0.50	0.26	0.40	0.45	0.41	0.41	0.42	0.41	0.32	0.45	0.36
Totale	102.55	102.65	102.41	102.97	102.95	101.74	101.58	101.95	101.52	101.32	101.85	101.62
<i>a.p.f.u.</i>												
Si	1.007	1.002	0.997	0.997	1.005	1.004	1.006	1.001	1.004	1.005	0.999	1.000
Ti	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al ⁶⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.195	0.188	0.198	0.200	0.205	0.194	0.176	0.180	0.182	0.181	0.190	0.182
Mn	0.003	0.003	0.002	0.004	0.004	0.003	0.003	0.004	0.003	0.004	0.004	0.001
Mg	1.780	1.794	1.799	1.792	1.773	1.787	1.802	1.804	1.797	1.798	1.798	1.810
Ca	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.002
Na	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.002	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ni	0.009	0.010	0.005	0.008	0.009	0.008	0.008	0.008	0.008	0.006	0.009	0.007
cations	2.995	3.000	3.004	3.005	2.997	2.997	2.995	3.000	2.998	2.997	3.004	3.002
Fo	90.1	90.5	90.1	89.9	89.6	90.2	91.1	90.9	90.8	90.9	90.4	90.9

Tab. 2B (continua)

Lherzoliti poor-cpx (cpx >5-10%)

	MA38			MA40		
	ol-1a3 core	ol-2a8 rim	ol-3a4 core	ol-4a7 rim	ol-1a2 core	ol-2a5 core
SiO ₂	41.67	42.02	41.86	41.74	41.98	41.78
TiO ₂	0.01	0.01	0.01	0.00	0.04	0.02
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	0.02	0.04	0.01	0.00
FeO _{Tot}	9.42	9.81	9.60	9.66	9.37	9.46
MnO	0.13	0.22	0.14	0.12	0.16	0.15
MgO	50.02	50.15	50.42	50.52	49.48	49.87
CaO	0.09	0.07	0.05	0.08	0.06	0.03
Na ₂ O	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.06
K ₂ O	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.03
Cr ₂ O ₃	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.04
NiO	0.28	0.40	0.37	0.39	0.46	0.36
Totale	101.62	102.79	102.47	102.57	101.57	101.79
<i>a.p.f.u.</i>						
Si	1.003	1.003	1.000	0.998	1.013	1.006
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Al ⁶⁺	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.190	0.196	0.192	0.193	0.189	0.191
Mn	0.003	0.004	0.003	0.002	0.003	0.003
Mg	1.795	1.784	1.796	1.799	1.779	1.790
Ca	0.002	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001
Na	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.003
K	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
Ni	0.005	0.008	0.007	0.000	0.000	0.001
cations	2.998	2.999	3.001	2.996	2.986	2.995
Fo	90.4	90.1	90.3	90.3	90.4	90.4

Tab. 2B (continua)

Lherzoliti (cpx >10%)												
	MA10		MA15		MA27		MA67		ol-6a3		ol-6a2	
	ol-3a1 core	ol-4a1 core	ol-4a1 core	ol-1a1 core	ol-1a2 core	ol-1a6 core	ol-1a7 core	ol-6a2 core	ol-6a3 core	ol-6a2 core	ol-6a3 core	ol-6a2 core
SiO₂	41.56	41.61	41.78	42.44	41.92	41.97	41.48	41.80	41.50	41.80	41.50	41.80
TiO₂	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01
Al₂O₃	0.00	0.04	0.12	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01
FeO_{Tot}	9.54	9.76	9.26	9.18	11.06	10.08	9.89	10.48	9.87	10.48	9.87	10.48
MnO	0.18	0.16	0.26	0.17	0.26	0.13	0.20	0.18	0.11	0.18	0.11	0.18
MgO	48.76	49.62	49.02	49.99	48.27	50.86	50.70	50.64	50.49	50.64	50.49	50.64
CaO	0.05	0.06	0.07	0.03	0.07	0.04	0.03	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05
Na₂O	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K₂O	0.04	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Cr₂O₃	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NiO	0.46	0.30	0.37	0.32	0.26	0.43	0.34	0.40	0.23	0.40	0.23	0.40
Totale	100.61	101.56	100.90	102.15	101.89	103.54	102.70	103.58	102.27	103.58	102.27	103.58
<i>a.p.f.u.</i>												
Si	1.012	1.004	1.012	1.014	1.013	0.995	0.992	0.993	0.995	0.993	0.995	0.993
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al⁶⁺	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000
Fe²⁺	0.194	0.197	0.188	0.183	0.223	0.200	0.198	0.208	0.198	0.208	0.198	0.208
Mn	0.004	0.003	0.005	0.003	0.005	0.003	0.004	0.004	0.002	0.004	0.002	0.004
Mg	1.769	1.784	1.770	1.780	1.739	1.798	1.807	1.793	1.804	1.793	1.804	1.793
Ca	0.001	0.002	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Na	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ni	0.009	0.006	0.007	0.006	0.000	0.008	0.006	0.008	0.004	0.008	0.004	0.008
cations	2.990	2.997	2.988	2.988	2.983	3.006	3.010	3.008	3.006	3.008	3.006	3.008
Fo	90.1	90.1	90.4	90.7	88.6	90.0	90.1	89.6	90.1	89.6	90.1	89.6

Tab. 2B (continua)

Harzburgite

	MA11		MA24									
	ol-2a1 rim	ol-3a1 rim	ol-1a5 core	ol-2a3 core	ol-2a5 rim/core	ol-3a3 rim	ol-3a4 core	ol-4a3 core	ol-4a7 core	ol-5a5 core		
SiO ₂	41.96	41.90	41.95	41.35	41.95	41.49	42.04	41.88	41.78	42.00		
TiO ₂	0.07	0.02	0.00	0.05	0.05	0.04	0.03	0.04	0.03	0.00		
Al ₂ O ₃	0.02	0.01	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.03		
FeO _{Tot}	8.50	8.53	9.51	9.06	9.28	8.83	8.94	8.90	9.28	9.38		
MnO	0.15	0.14	0.15	0.14	0.23	0.21	0.13	0.02	0.12	0.09		
MgO	50.32	50.65	51.06	50.74	50.57	50.54	50.76	50.44	50.66	50.51		
CaO	0.05	0.02	0.09	0.09	0.08	0.05	0.02	0.08	0.05	0.04		
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00		
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.02		
Cr ₂ O ₃	0.03	0.03	0.00	0.04	0.01	0.09	0.03	0.06	0.06	0.06		
NiO	0.42	0.45	0.46	0.41	0.41	0.32	0.36	0.35	0.41	0.32		
Totale	101.52	101.76	103.22	101.91	102.58	101.59	102.35	101.80	102.39	102.46		
<i>a.p.f.u.</i>												
Si	1.007	1.004	0.996	0.993	1.001	0.999	1.003	1.004	0.999	1.003		
Ti	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000		
Al ⁶⁺	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001		
Fe ²⁺	0.171	0.171	0.189	0.182	0.185	0.178	0.178	0.178	0.186	0.187		
Mn	0.003	0.003	0.003	0.003	0.005	0.004	0.003	0.000	0.002	0.002		
Mg	1.801	1.809	1.807	1.817	1.798	1.813	1.805	1.803	1.806	1.798		
Ca	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001		
Na	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000		
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001		
Ni	0.008	0.009	0.009	0.008	0.008	0.006	0.007	0.007	0.008	0.006		
cations	2.993	2.997	3.006	3.008	3.000	3.003	2.998	2.996	3.002	2.998		
Fo	91.3	91.4	90.5	90.9	90.7	91.1	91.0	91.0	90.7	90.6		

Tab. 2B (continua)

Harzburgite												
MA26			MA42				MA47					
	ol-2a3	ol-3a4	ol-4a3	ol-1a1	ol-2a1	ol-3a3	ol-5a3	ol-5a6	ol-1a5	ol-2a3	ol-3a3	
	core	core	rim	core	rim	rim	core	core	core	core	core	
SiO₂	41.11	41.63	41.65	42.21	41.60	42.10	41.80	41.67	41.94	42.30	41.67	
TiO₂	0.06	0.02	0.02	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Al₂O₃	0.00	0.02	0.00	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	
FeO_{Tot}	10.40	9.08	10.03	9.93	9.74	9.97	9.90	10.39	8.96	8.78	8.72	
MnO	0.19	0.24	0.20	0.11	0.14	0.19	0.10	0.07	0.14	0.13	0.07	
MgO	48.63	49.90	49.16	49.43	50.08	50.21	49.44	50.40	51.22	51.32	51.50	
CaO	0.08	0.06	0.06	0.09	0.02	0.01	0.03	0.07	0.07	0.02	0.07	
Na₂O	0.00	0.01	0.03	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
K₂O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.02	
Cr₂O₃	0.00	0.01	0.08	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.04	
NiO	0.37	0.45	0.30	0.47	0.43	0.31	0.26	0.32	0.33	0.29	0.41	
Totale	100.85	101.41	101.52	102.38	102.02	102.85	101.53	102.92	102.70	102.87	102.52	
<i>a.p.f.u.</i>												
Si	1.003	1.004	1.007	1.011	1.000	1.003	1.008	0.996	0.998	1.003	0.993	
Ti	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Al⁶⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	
Fe²⁺	0.212	0.183	0.203	0.199	0.196	0.199	0.200	0.208	0.178	0.174	0.174	
Mn	0.004	0.005	0.004	0.002	0.003	0.004	0.002	0.002	0.003	0.003	0.001	
Mg	1.768	1.794	1.771	1.765	1.794	1.784	1.777	1.796	1.816	1.813	1.830	
Ca	0.002	0.001	0.002	0.002	0.001	0.000	0.001	0.002	0.002	0.001	0.002	
Na	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	
Ni	0.007	0.009	0.006	0.009	0.008	0.006	0.005	0.000	0.006	0.006	0.008	
cations	2.998	2.997	2.994	2.990	3.002	2.998	2.993	3.004	3.004	2.999	3.009	
Fo	89.3	90.7	89.7	89.9	90.2	90.0	89.9	89.6	91.1	91.2	91.3	

Tab. 2B (continua)

Harzburgite

	MA47		MA48		MA68		ol-6a4		
	ol-4a2 core	ol-4a4 rim	ol-1a2 rim	ol-2a2 rim	ol-3a3 core	ol-1a7 core	ol-3a2 core	ol-5a3 core	
SiO ₂	41.71	41.81	42.00	41.83	42.20	41.41	41.38	41.69	41.58
TiO ₂	0.01	0.06	0.02	0.02	0.00	0.00	0.05	0.06	0.00
Al ₂ O ₃	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02
FeO _{Tot}	8.69	8.83	8.61	8.15	8.73	9.69	9.81	9.49	9.81
MnO	0.17	0.04	0.21	0.07	0.03	0.14	0.24	0.17	0.18
MgO	51.21	51.28	50.68	50.31	50.81	50.98	50.52	50.24	50.13
CaO	0.03	0.04	0.07	0.04	0.07	0.03	0.04	0.08	0.06
Na ₂ O	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.03	0.01
Cr ₂ O ₃	0.04	0.00	0.04	0.01	0.04	0.01	0.00	0.01	0.00
NiO	0.40	0.33	0.34	0.37	0.56	0.30	0.36	0.46	0.41
Totale	102.32	102.38	101.96	100.81	102.49	102.55	102.47	102.23	102.21
<i>a.p.f.u.</i>									
Si	0.996	0.996	1.005	1.009	1.005	0.990	0.992	0.999	0.998
Ti	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000
Al ⁶⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
Fe ²⁺	0.173	0.176	0.172	0.164	0.174	0.194	0.197	0.190	0.197
Mn	0.003	0.001	0.004	0.001	0.001	0.003	0.005	0.003	0.004
Mg	1.822	1.822	1.807	1.809	1.804	1.817	1.805	1.795	1.794
Ca	0.001	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002
Na	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Ni	0.008	0.006	0.006	0.007	0.011	0.006	0.007	0.009	0.008
cations	3.007	3.004	2.996	2.992	2.997	3.011	3.010	3.002	3.003
Fo	91.3	91.2	91.3	91.7	91.2	90.4	90.2	90.4	90.1

Tab. 2B (continua)

Olivin-websterite

MA18

	ol-1a5*	ol-1a6*	ol-1a7	ol-2a3	ol-3a3	ol-4a6
	rim	core	core	core	core	core
SiO ₂	41.88	42.04	41.25	41.60	41.80	41.55
TiO ₂	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00
FeO _{Tot}	10.24	10.68	10.48	10.49	10.51	10.24
MnO	0.13	0.18	0.20	0.16	0.20	0.12
MgO	50.22	49.94	50.17	50.36	50.17	50.10
CaO	0.04	0.03	0.08	0.02	0.04	0.04
Na ₂ O	0.01	0.03	0.01	0.03	0.00	0.00
K ₂ O	0.00	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01
Cr ₂ O ₃	0.01	0.05	0.00	0.01	0.00	0.00
NiO	0.43	0.36	0.31	0.43	0.42	0.49
Totale	102.96	103.34	102.53	103.15	103.15	102.55
<i>a.p.f.u.</i>						
Si	0.999	1.002	0.991	0.993	0.997	0.996
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al ⁶⁺	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.204	0.213	0.210	0.209	0.210	0.205
Mn	0.003	0.004	0.004	0.003	0.004	0.002
Mg	1.786	1.773	1.796	1.792	1.784	1.791
Ca	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001
Na	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000
K	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
Ni	0.008	0.007	0.006	0.008	0.008	0.009
cations	3.002	3.001	3.011	3.009	3.005	3.006
Fo	89.7	89.3	89.5	89.5	89.5	89.7

Tab. 2B (continua)

Lherzolititi poor-cpx (cpx >5-10%)												
MA9												
	opx-1a5	opx-2a1	opx-2a5	opx-3a1	opx-4a1	opx-4a2	opx-4a5	opx-5a1	opx-5a4*	opx-5a5	rim	core
SiO₂	56.92	56.69	56.95	56.52	56.03	56.32	56.28	56.44	57.00	56.39		
TiO₂	0.06	0.10	0.09	0.15	0.17	0.15	0.07	0.11	0.10	0.08		
Al₂O₃	3.27	3.03	3.02	4.07	4.11	3.93	3.96	3.49	3.27	3.67		
FeO tot	6.93	7.24	7.15	7.33	6.70	7.07	7.10	6.80	7.06	7.11		
MnO	0.15	0.20	0.14	0.13	0.20	0.15	0.20	0.18	0.15	0.20		
MgO	34.28	33.88	34.22	33.90	34.16	33.99	33.55	33.81	34.03	33.18		
CaO	0.35	0.34	0.38	0.56	0.34	0.35	0.37	0.38	0.41	0.41		
Na₂O	0.02	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.09	0.02	0.03	0.03		
K₂O	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03		
Cr₂O₃	0.31	0.24	0.16	0.34	0.35	0.31	0.31	0.33	0.25	0.30		
NiO	0.16	0.04	0.21	0.13	0.03	0.21	0.03	0.13	0.00	0.11		
Total	102.45	101.80	102.38	103.12	102.06	102.49	101.97	101.72	102.31	101.48		
<i>a.p.f.u.</i>												
Si	1.921	1.927	1.925	1.899	1.894	1.903	1.909	1.92	1.926	1.926		
Ti	0.002	0.002	0.002	0.004	0.004	0.004	0.002	0.003	0.003	0.002		
Al	0.13	0.121	0.12	0.161	0.164	0.156	0.158	0.14	0.13	0.148		
Fe³⁺	0.004	0.004	0.006	0.006	0.007	0.006	0.004	0.002	0.002	0		
Fe²⁺	0.192	0.202	0.196	0.2	0.182	0.194	0.197	0.191	0.198	0.205		
Mn	0.004	0.006	0.004	0.004	0.006	0.004	0.006	0.005	0.004	0.006		
Mg	1.725	1.716	1.724	1.697	1.721	1.711	1.696	1.714	1.713	1.689		
Ca	0.013	0.013	0.014	0.02	0.012	0.013	0.013	0.014	0.015	0.015		
Na	0.001	0.001	0.004	0	0	0	0.006	0.001	0.002	0.002		
K	0	0.002	0	0	0	0	0	0.001	0	0.001		
Cr	0.008	0.007	0.004	0.009	0.009	0.008	0.008	0.009	0.007	0.008		
cations	4.000	4.001	3.999	4.000	3.999	3.999	3.999	4.000	4.000	4.002		
Mg#	0.90	0.89	0.90	0.89	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.89		

Tab. 2B (Analisi rappresentative degli ortopirosseni dei noduli di Mega)

Lherzoliti poor-cpx (cpx >5-10%)																				
MA32												MA35								
	core	rim	opx-3a1	core	rim	opx-3a6*	opx-4a1	core	rim	opx-5a3	core	rim	opx-6a1*	core	rim	opx-7a1	core	rim	opx-2a3	
SiO₂	58.59	57.81	57.81	58.30	58.04	58.04	57.96	58.35	58.64	58.35	58.64	58.59	57.50	57.84	57.06					
TiO₂	0.03	0.03	0.03	0.04	0.01	0.01	0.02	0.03	0.06	0.03	0.06	0.02	0.01	0.01	0.00					
Al₂O₃	1.47	2.10	2.10	1.68	1.93	1.93	1.40	1.53	1.51	1.53	1.51	1.52	2.38	1.71	3.32					
FeO tot	6.07	6.20	6.20	6.16	6.19	6.19	5.87	6.05	5.93	6.05	5.93	5.67	6.05	6.23	5.75					
MnO	0.17	0.13	0.13	0.17	0.15	0.15	0.17	0.15	0.28	0.15	0.28	0.19	0.15	0.25	0.13					
MgO	34.72	34.85	34.85	35.19	34.83	34.83	34.73	35.15	35.30	35.15	35.30	34.72	35.03	35.44	34.58					
CaO	0.48	0.47	0.47	0.60	0.41	0.41	0.55	0.40	0.51	0.40	0.51	0.52	0.45	0.48	0.53					
Na₂O	0.09	0.12	0.12	0.17	0.06	0.06	0.08	0.13	0.18	0.13	0.18	0.09	0.08	0.17	0.04					
K₂O	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00					
Cr₂O₃	0.36	0.37	0.37	0.28	0.37	0.37	0.31	0.32	0.39	0.32	0.39	0.28	0.36	0.38	0.40					
NiO	0.07	0.07	0.07	0.04	0.10	0.10	0.10	0.00	0.11	0.00	0.11	0.08	0.04	0.09	0.09					
Total	102.04	102.16	102.16	102.61	102.10	102.10	101.20	102.14	102.94	102.14	102.94	101.67	102.06	102.59	101.90					
<i>a.p.f.u.</i>																				
Si	1.981	1.95	1.95	1.956	1.961	1.961	1.974	1.966	1.963	1.966	1.963	1.986	1.939	1.94	1.928					
Ti	0.001	0.001	0.001	0.001	0	0	0	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0	0	0					
Al	0.059	0.084	0.084	0.066	0.077	0.077	0.056	0.061	0.059	0.061	0.059	0.061	0.095	0.068	0.132					
Fe³⁺	0	0.003	0.003	0.006	0	0	0	0.001	0.003	0.001	0.003	0	0.006	0.013	0.001					
Fe²⁺	0.178	0.172	0.172	0.167	0.176	0.176	0.169	0.169	0.163	0.169	0.163	0.17	0.165	0.161	0.161					
Mn	0.005	0.004	0.004	0.005	0.004	0.004	0.005	0.004	0.008	0.004	0.008	0.005	0.004	0.007	0.004					
Mg	1.75	1.752	1.752	1.759	1.754	1.754	1.763	1.765	1.761	1.765	1.761	1.754	1.76	1.772	1.741					
Ca	0.017	0.017	0.017	0.022	0.015	0.015	n.d.	0.014	0.018	0.014	0.018	0.019	0.016	0.017	0.019					
Na	0.006	0.008	0.008	0.011	0.004	0.004	0.005	0.008	0.012	0.008	0.012	0.006	0.005	0.011	0.002					
K	0.001	0	0	0	0	0	0	0.001	0.001	0.001	0.001	0	0	0	0					
Cr	0.01	0.01	0.01	0.007	0.01	0.01	0.008	0.008	0.01	0.008	0.01	0.007	0.01	0.01	0.011					
cations	4.008	4.001	4.001	4.000	4.001	4.001	3.980	3.998	4.000	3.998	4.000	4.009	4.000	3.999	3.999					
Mg#	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.92	0.91	0.92	0.91	0.91	0.92	0.92					

Tab. 2B (continua)

Lherzolititi poor-cpx (cpx >5-10%)												
MA38						MA40						
	core	opx-1a1	opx-2a3*	opx-2a4*	rim	opx-3a3	core	opx-4a3*	rim	opx-4a4*	rim	
	core	opx-1a1	opx-2a3	opx-2a4	rim	core	opx-3a3	core	opx-4a3	rim	opx-2a1	opx-2a3
		core	core	rim	rim	core	core	core	rim	rim	core	rim
SiO ₂	55.81	56.06	55.40	55.40	56.26	56.26	55.41	55.41	56.09	56.09	57.31	57.26
TiO ₂	0.11	0.10	0.05	0.05	0.11	0.11	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12
Al ₂ O ₃	4.41	4.72	4.52	4.52	4.77	4.77	4.78	4.83	4.83	4.83	2.82	2.78
FeO tot	6.19	6.28	5.70	5.70	6.26	6.26	6.27	5.76	5.76	5.76	6.16	5.69
MnO	0.09	0.18	0.14	0.14	0.06	0.06	0.18	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16
MgO	33.83	33.38	32.83	32.83	33.96	33.96	33.66	33.07	33.07	33.85	34.12	34.16
CaO	0.76	0.79	0.80	0.80	0.75	0.75	0.76	0.78	0.78	0.53	0.62	0.54
Na ₂ O	0.10	0.18	0.36	0.36	0.15	0.15	0.10	0.07	0.07	0.15	0.06	0.14
K ₂ O	0.00	0.02	0.16	0.16	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01
Cr ₂ O ₃	0.43	0.41	0.33	0.33	0.41	0.41	0.29	0.44	0.44	0.40	0.45	0.53
NiO	0.19	0.15	0.06	0.06	0.13	0.13	0.05	0.09	0.09	0.09	0.16	0.07
Total	101.92	102.27	100.35	100.35	102.84	102.84	101.63	101.43	101.43	101.50	102.01	101.46
<i>a.p.f.u.</i>												
Si	1.89	1.894	1.9	1.9	1.887	1.887	1.879	1.91	1.91	1.956	1.942	1.946
Ti	0.003	0.002	0.001	0.001	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.003	0.003
Al	0.176	0.188	0.183	0.183	0.189	0.189	0.191	0.194	0.194	0.112	0.113	0.111
Fe ³⁺	0.008	0.005	0.009	0.009	0.008	0.008	0.011	0	0	0	0	0
Fe ²⁺	0.167	0.172	0.154	0.154	0.168	0.168	0.167	0.171	0.171	0.177	0.177	0.166
Mn	0.003	0.005	0.004	0.004	0.002	0.002	0.005	0.004	0.004	0.003	0.004	0.005
Mg	1.708	1.681	1.679	1.679	1.697	1.697	1.701	1.678	1.678	1.716	1.723	1.73
Ca	0.027	0.029	0.03	0.03	0.027	0.027	0.028	0.028	0.028	0.019	0.023	0.02
Na	0.007	0.012	0.024	0.024	0.01	0.01	0.007	0.005	0.005	0.01	0.004	0.009
K	0	0.001	0.007	0.007	0	0	0	0.001	0.001	0.001	0.001	0
Cr	0.012	0.011	0.009	0.009	0.011	0.011	0.008	0.012	0.012	0.011	0.012	0.014
cations	4.001	4.000	4.000	4.000	4.002	4.002	4.000	4.006	4.006	4.007	4.002	4.004
Mg#	0.91	0.91	0.92	0.92	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91

Tab. 2B (continua)

Lherzoliti (cpx >10%)

	MA10				MA15																	
	core	rim	opx-1a2*	opx-3a4	rim	core	opx-5a2	opx-5a4	core	opx-1a2	micr	opx-2a2	micr	opx-2a4	micr	opx-2a6	micr	opx-2a1	micr	opx-3a2	core	
SiO ₂	56.59	56.35	56.65	56.16	56.79	57.42	56.91	56.76	56.91	56.91	56.91	56.91	56.91	56.76	56.91	56.91	56.91	56.90	56.90	56.76	56.76	
TiO ₂	0.07	0.08	0.07	0.02	0.05	0.09	0.10	0.08	0.07	0.10	0.07	0.10	0.07	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05	
Al ₂ O ₃	4.06	4.36	3.87	3.81	3.73	3.27	3.87	3.82	3.81	3.87	3.81	3.87	3.81	3.94	3.81	3.81	3.81	3.96	3.96	3.94	3.94	
FeO tot	5.80	5.84	5.87	5.75	5.72	5.69	5.33	5.68	5.61	5.33	5.61	5.33	5.61	5.86	5.61	5.61	5.61	5.64	5.64	5.86	5.86	
MnO	0.18	0.13	0.17	0.14	0.25	0.09	0.14	0.16	0.17	0.14	0.17	0.14	0.17	0.21	0.17	0.17	0.17	0.11	0.11	0.21	0.21	
MgO	33.73	33.39	33.85	33.35	33.82	34.44	33.72	34.11	34.09	33.72	34.11	33.72	34.09	33.36	34.11	34.09	34.09	34.07	34.07	33.36	33.36	
CaO	0.66	0.92	0.63	0.63	0.63	0.53	0.64	0.60	0.68	0.64	0.60	0.64	0.68	0.49	0.60	0.68	0.65	0.65	0.65	0.49	0.49	
Na ₂ O	0.11	0.10	0.04	0.10	0.07	0.05	0.03	0.05	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.01	0.05	0.05	0.08	0.08	0.01	0.01	0.01	
K ₂ O	0.02	0.03	0.01	0.02	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	
Cr ₂ O ₃	0.25	0.37	0.28	0.27	0.31	0.37	0.35	0.25	0.35	0.35	0.25	0.35	0.35	0.48	0.35	0.35	0.46	0.46	0.48	0.48	0.48	
NiO	0.08	0.14	0.11	0.01	0.17	0.11	0.00	0.02	0.07	0.00	0.02	0.00	0.02	0.13	0.02	0.07	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	
Total	101.55	101.71	101.55	100.28	101.54	102.06	101.10	101.55	101.81	101.10	101.55	101.10	101.81	101.28	101.55	101.81	102.09	102.09	101.28	101.28	101.28	
<i>a.p.f.u.</i>																						
Si	1.921	1.913	1.925	1.93	1.93	1.939	1.939	1.924	1.926	1.939	1.924	1.939	1.926	1.938	1.924	1.926	1.922	1.922	1.938	1.938	1.938	
Ti	0.002	0.002	0.002	0	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	
Al	0.163	0.175	0.155	0.154	0.149	0.13	0.155	0.153	0.152	0.155	0.153	0.155	0.152	0.159	0.153	0.152	0.158	0.158	0.159	0.159	0.159	
Fe ³⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Fe ²⁺	0.167	0.168	0.17	0.169	0.167	0.165	0.163	0.163	0.162	0.163	0.163	0.163	0.162	0.179	0.163	0.162	0.162	0.162	0.179	0.179	0.179	
Mn	0.005	0.004	0.005	0.004	0.007	0.003	0.004	0.005	0.005	0.004	0.005	0.004	0.005	0.006	0.005	0.005	0.003	0.003	0.006	0.006	0.006	
Mg	1.706	1.69	1.714	1.708	1.713	1.733	1.712	1.723	1.719	1.712	1.723	1.712	1.719	1.697	1.723	1.719	1.714	1.714	1.697	1.697	1.697	
Ca	0.024	0.033	0.023	0.023	0.023	0.019	0.023	0.022	0.025	0.023	0.022	0.023	0.025	0.018	0.022	0.025	0.024	0.024	0.018	0.018	0.018	
Na	0.007	0.006	0.003	0.007	0.005	0.003	0.002	0.004	0.003	0.002	0.004	0.002	0.003	0.001	0.003	0.003	0.005	0.005	0.001	0.001	0.001	
K	0.001	0.001	0	0.001	0	0	0.001	0.001	0	0.001	0.001	0.001	0	0	0.001	0	0.001	0.001	0	0	0	
Cr	0.007	0.01	0.008	0.007	0.008	0.01	0.009	0.007	0.009	0.009	0.007	0.009	0.009	0.013	0.009	0.009	0.012	0.012	0.013	0.013	0.013	
cations	4.003	4.002	4.005	4.003	4.003	4.004	4.010	4.004	4.003	4.010	4.004	4.010	4.003	4.012	4.003	4.003	4.003	4.003	4.012	4.012	4.012	
Mg#	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.90	0.91	0.91	0.91	0.91	0.90	0.90	0.90	

Tab. 2B (continua)

Lherzoliti (cpx >10%)									
MA27					MA67				
	opx-1a4 rim	opx-1a1 core	opx-1a3* core	opx-1a4* rim	opx-2a1* rim	opx-2a2 core	opx-6a7 core		
SiO₂	56.54	57.00	56.50	56.66	56.23	55.99	56.76		
TiO₂	0.11	0.05	0.05	0.10	0.01	0.07	0.03		
Al₂O₃	3.75	4.02	3.85	3.64	3.89	3.85	3.75		
FeO tot	6.95	6.66	6.54	6.13	6.45	6.54	6.24		
MnO	0.18	0.12	0.13	0.29	0.10	0.19	0.13		
MgO	33.32	34.97	34.71	34.95	34.07	34.20	34.44		
CaO	0.54	0.54	0.58	0.59	0.61	0.62	0.54		
Na₂O	0.09	0.10	0.16	0.03	0.12	0.11	0.11		
K₂O	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01		
Cr₂O₃	0.14	0.34	0.38	0.26	0.26	0.33	0.35		
NiO	0.11	0.18	0.02	0.18	0.00	0.05	0.17		
Total	101.73	103.99	102.93	102.82	101.75	101.95	102.52		
<i>a.p.f.u.</i>									
Si	1.924	1.89	1.889	1.899	1.903	1.893	1.909		
Ti	0.003	0.001	0.001	0.002	0	0.002	0.001		
Al	0.15	0.157	0.152	0.144	0.155	0.154	0.149		
Fe³⁺	0	0.014	0.017	0.012	0.01	0.014	0.007		
Fe²⁺	0.199	0.17	0.166	0.159	0.173	0.171	0.168		
Mn	0.005	0.003	0.004	0.008	0.003	0.006	0.004		
Mg	1.69	1.728	1.73	1.745	1.718	1.723	1.726		
Ca	0.02	0.019	0.021	0.021	0.022	0.022	0.019		
Na	0.006	0.006	0.01	0.002	0.008	0.007	0.007		
K	0	0	0.001	0	0	0	0.001		
Cr	0.004	0.009	0.01	0.007	0.007	0.009	0.009		
cations	4.001	3.997	4.001	3.999	3.999	4.001	4.000		
Mg#	0.89	0.91	0.91	0.92	0.91	0.91	0.91		

Tab. 2B (continua)

Harzburgite												
MA24												
MA11												
	opx-1a2	opx-1a4	opx-2a2*	opx-2a4*	opx-3a4	opx-1a3*	opx-1a4*	opx-2a2*	opx-2a4*	opx-2a9	opx-3a1*	opx-3a2*
	rim	rim	rim	rim	core	core	rim	core	rim	core	core	rim
SiO₂	57.65	57.93	57.45	57.74	57.80	56.37	56.58	56.86	56.87	56.83	57.25	57.00
TiO₂	0.04	0.00	0.02	0.00	0.06	0.09	0.13	0.05	0.08	0.04	0.07	0.08
Al₂O₃	2.38	2.39	2.42	2.38	2.19	3.37	3.25	3.29	3.33	3.21	3.02	3.19
FeO tot	5.14	5.33	5.39	5.40	5.43	5.87	6.02	6.04	5.82	5.57	5.95	5.90
MnO	0.12	0.13	0.21	0.03	0.18	0.16	0.15	0.15	0.13	0.12	0.15	0.09
MgO	34.64	34.36	34.94	34.42	34.69	34.42	34.57	34.52	33.95	34.81	35.09	34.54
CaO	0.68	0.61	0.54	0.61	0.56	0.70	0.66	0.52	0.74	0.68	0.60	0.73
Na₂O	0.02	0.06	0.00	0.07	0.01	0.13	0.09	0.06	0.07	0.14	0.14	0.11
K₂O	0.02	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.01
Cr₂O₃	0.50	0.49	0.53	0.33	0.43	0.61	0.51	0.57	0.50	0.55	0.50	0.53
NiO	0.00	0.13	0.05	0.11	0.15	0.06	0.06	0.16	0.21	0.15	0.00	0.09
Total	101.19	101.46	101.56	101.09	101.49	101.79	102.02	102.24	101.71	102.11	102.77	102.26
<i>a.p.f.u.</i>												
Si	1.959	1.969	1.946	1.967	1.963	1.907	1.91	1.918	1.932	1.915	1.915	1.92
Ti	0.001	0	0	0	0.002	0.002	0.003	0.001	0.002	0.001	0.002	0.002
Al	0.096	0.096	0.096	0.095	0.088	0.135	0.129	0.131	0.133	0.127	0.119	0.127
Fe³⁺	0	0	0	0	0	0.01	0.009	0.005	0	0.009	0.011	0.006
Fe²⁺	0.153	0.162	0.153	0.162	0.161	0.156	0.161	0.165	0.168	0.148	0.156	0.161
Mn	0.003	0.004	0.006	0.001	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.002
Mg	1.754	1.74	1.764	1.747	1.756	1.735	1.739	1.736	1.719	1.748	1.75	1.734
Ca	0.025	0.022	0.02	0.022	0.02	0.025	0.024	0.019	0.027	0.025	0.021	0.026
Na	0.001	0.004	0	0.005	0.001	0.008	0.006	0.004	0.005	0.009	0.009	0.007
K	0.001	0	0.001	0.001	0	0	0	0.001	0	0	0	0
Cr	0.014	0.013	0.014	0.009	0.011	0.016	0.014	0.015	0.013	0.015	0.013	0.014
cations	4.007	4.010	4.000	4.009	4.007	3.999	3.999	3.999	4.003	4.001	4.000	3.999
Mg#	0.92	0.91	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.91	0.91	0.92	0.92	0.92

Tab. 2B (continua)

Harzburgite												
	MA24			MA26			MA42					
	rim	core	rim	core	rim	core	rim?	core?	core	rim	core	rim
	opx-4a1*	opx-4a2*	opx-5a1*	opx-5a2*	opx-3a1	opx-4a1	opx-1a4*	opx-1a5*	opx-2a2*	opx-2a3*		
SiO₂	57.11	56.92	56.74	56.53	57.74	58.63	57.28	57.11	57.45	57.37		
TiO₂	0.10	0.13	0.06	0.09	0.02	0.00	0.08	0.12	0.10	0.13		
Al₂O₃	3.11	3.34	3.33	3.39	2.02	1.55	2.84	2.73	2.79	2.87		
FeO tot	5.69	5.69	5.66	5.81	5.74	6.16	6.22	5.78	6.18	6.15		
MnO	0.14	0.17	0.24	0.08	0.11	0.20	0.14	0.05	0.05	0.08		
MgO	34.01	34.38	34.31	34.23	34.46	34.44	34.47	34.52	34.14	34.17		
CaO	0.72	0.67	0.75	0.70	0.64	0.72	0.49	0.55	0.52	0.60		
Na₂O	0.15	0.08	0.13	0.12	0.13	0.11	0.13	0.09	0.09	0.11		
K₂O	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00		
Cr₂O₃	0.52	0.65	0.53	0.51	0.46	0.34	0.53	0.48	0.55	0.49		
NiO	0.10	0.10	0.13	0.14	0.06	0.13	0.04	0.00	0.19	0.20		
Total	101.64	102.13	101.91	101.60	101.40	102.28	102.23	101.45	102.07	102.17		
<i>a.p.f.u.</i>												
Si	1.938	1.922	1.919	1.918	1.962	1.981	1.932	1.938	1.946	1.941		
Ti	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001	0	0.002	0.003	0.003	0.003		
Al	0.124	0.133	0.133	0.135	0.081	0.062	0.113	0.109	0.112	0.114		
Fe³⁺	0	0.001	0.006	0.005	0	0	0.003	0.001	0	0		
Fe²⁺	0.164	0.16	0.155	0.16	0.165	0.181	0.172	0.163	0.179	0.176		
Mn	0.004	0.005	0.007	0.002	0.003	0.006	0.004	0.002	0.002	0.002		
Mg	1.72	1.73	1.729	1.73	1.745	1.734	1.733	1.745	1.723	1.723		
Ca	0.026	0.024	0.027	0.026	0.023	0.026	0.018	0.02	0.019	0.022		
Na	0.01	0.005	0.009	0.008	0.009	0.007	0.008	0.006	0.006	0.007		
K	0	0	0.001	0	0.001	0	0	0	0	0		
Cr	0.014	0.017	0.014	0.014	0.012	0.009	0.014	0.013	0.015	0.013		
cations	4.003	4.000	4.002	4.000	4.002	4.006	3.999	4.000	4.005	4.001		
Mg#	0.91	0.92	0.92	0.92	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91		

Tab. 2B (continua)

Harzburgite																				
MA42				MA47				MA48												
	core	rim	opx-3a1*	core	opx-5a1	rim	opx-5a2	core	opx-2a1	core	opx-3a4	rim	opx-7a1*	core	opx-7a2*	core	opx-2a3	rim	opx-3a4	
SiO₂	57.48	57.35	56.86	57.81	57.88	58.03	57.57	57.79	58.22	58.03	57.57	57.79	58.22	58.03	57.57	57.79	58.22	58.03	57.49	
TiO₂	0.11	0.05	0.15	0.01	0.05	0.04	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00	
Al₂O₃	2.92	2.87	3.16	1.67	1.78	1.70	1.88	1.83	1.88	1.70	1.88	1.83	1.98	1.70	1.88	1.83	1.98	1.70	2.10	
FeO tot	6.10	6.42	6.37	5.76	5.52	5.40	5.72	5.38	5.72	5.40	5.72	5.38	5.05	5.40	5.38	5.38	5.05	5.40	5.29	
MnO	0.13	0.09	0.15	0.11	0.12	0.11	0.16	0.09	0.11	0.11	0.16	0.09	0.13	0.11	0.09	0.09	0.13	0.11	0.14	
MgO	34.30	34.52	34.55	35.90	36.05	35.62	36.01	35.77	36.01	35.62	36.01	35.77	35.15	35.62	36.01	35.77	35.15	35.62	35.17	
CaO	0.46	0.60	0.52	0.66	0.55	0.56	0.59	0.70	0.59	0.56	0.59	0.70	0.47	0.56	0.59	0.70	0.47	0.56	0.59	
Na₂O	0.18	0.06	0.10	0.06	0.12	0.10	0.13	0.08	0.13	0.10	0.13	0.08	0.04	0.10	0.08	0.08	0.04	0.10	0.03	
K₂O	0.01	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Cr₂O₃	0.44	0.45	0.49	0.53	0.51	0.35	0.45	0.52	0.45	0.35	0.45	0.52	0.46	0.35	0.45	0.52	0.46	0.35	0.58	
NiO	0.08	0.17	0.11	0.14	0.15	0.12	0.19	0.02	0.14	0.12	0.19	0.02	0.09	0.12	0.19	0.02	0.09	0.12	0.09	
Total	102.20	102.58	102.49	102.68	102.73	102.03	102.71	102.19	102.68	102.73	102.03	102.71	101.59	102.03	102.71	102.19	101.59	102.03	101.47	
<i>a.p.f.u.</i>																				
Si	1.94	1.931	1.914	1.935	1.934	1.953	1.925	1.94	1.935	1.934	1.953	1.925	1.97	1.953	1.925	1.94	1.97	1.953	1.948	
Ti	0.003	0.001	0.004	0	0.001	0.001	0	0	0	0.001	0.001	0	0	0.001	0	0	0	0.001	0	
Al	0.116	0.114	0.126	0.066	0.07	0.068	0.074	0.072	0.066	0.07	0.068	0.074	0.079	0.068	0.074	0.072	0.079	0.068	0.084	
Fe³⁺	0	0.003	0.008	0.014	0.013	0.005	0.018	0.009	0.014	0.013	0.005	0.018	0	0.005	0.009	0.009	0	0.005	0.002	
Fe²⁺	0.173	0.177	0.171	0.148	0.141	0.147	0.142	0.142	0.148	0.141	0.147	0.142	0.15	0.147	0.142	0.142	0.15	0.147	0.148	
Mn	0.004	0.003	0.004	0.003	0.003	0.003	0.004	0.002	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.003	0.004	0.002	0.004	0.003	0.004	
Mg	1.725	1.732	1.734	1.791	1.796	1.787	1.794	1.79	1.791	1.796	1.787	1.794	1.772	1.787	1.794	1.79	1.772	1.787	1.776	
Ca	0.017	0.022	0.019	0.024	0.02	0.02	0.021	0.025	0.024	0.02	0.02	0.021	0.017	0.02	0.021	0.025	0.017	0.02	0.021	
Na	0.011	0.004	0.006	0.004	0.008	0.007	0.008	0.005	0.004	0.008	0.007	0.008	0.003	0.007	0.008	0.005	0.003	0.007	0.002	
K	0	0	0.001	0.001	0	0	0.001	0	0.001	0	0	0.001	0	0	0	0	0	0	0	
Cr	0.012	0.012	0.013	0.014	0.013	0.009	0.012	0.014	0.014	0.013	0.009	0.012	0.012	0.009	0.012	0.014	0.012	0.009	0.016	
cations	4.001	3.999	4.000	4.000	3.999	4.000	3.999	3.999	4.000	3.999	4.000	3.999	4.007	4.000	3.999	3.999	4.007	4.000	4.001	
Mg#	0.91	0.91	0.91	0.92	0.93	0.92	0.93	0.93	0.92	0.93	0.92	0.93	0.92	0.92	0.93	0.93	0.92	0.92	0.92	

Tab. 2B (continua)

	Harzburgite				Olivin-websterite			
	MA68				MA18			
	opx-1a6 rim	opx-3a2 core	opx-4a1* core	opx-4a2* rim	opx-1a3* core	opx-1a4* rim		
SiO ₂	57.80	57.96	57.56	57.66	56.39	57.11		
TiO ₂	0.07	0.06	0.05	0.03	0.11	0.06		
Al ₂ O ₃	1.38	1.39	1.36	1.60	4.17	4.23		
FeO tot	5.82	6.01	6.01	5.99	6.25	6.66		
MnO	0.16	0.14	0.16	0.15	0.13	0.21		
MgO	34.88	35.16	35.26	35.07	33.58	33.79		
CaO	0.71	0.54	0.69	0.73	0.51	0.60		
Na ₂ O	0.09	0.04	0.08	0.08	0.08	0.04		
K ₂ O	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00		
Cr ₂ O ₃	0.49	0.36	0.44	0.41	0.14	0.26		
NiO	0.09	0.18	0.04	0.12	0.15	0.00		
Total	101.50	101.85	101.67	101.85	101.53	102.97		
<i>a.p.f.u.</i>								
Si	1.963	1.963	1.948	1.951	1.918	1.917		
Ti	0.002	0.001	0.001	0.001	0.003	0.002		
Al	0.055	0.055	0.054	0.064	0.167	0.167		
Fe ³⁺	0.002	0.002	0.01	0.007	0	0		
Fe ²⁺	0.163	0.168	0.16	0.163	0.179	0.189		
Mn	0.004	0.004	0.005	0.004	0.004	0.006		
Mg	1.765	1.774	1.779	1.768	1.702	1.69		
Ca	0.026	0.02	0.025	0.027	0.018	0.022		
Na	0.006	0.002	0.005	0.005	0.005	0.002		
K	0	0.001	0.001	0	0.001	0		
Cr	0.013	0.01	0.012	0.011	0.004	0.007		
cations	3.999	4.000	4.000	4.001	4.001	4.002		
Mg#	0.92	0.91	0.92	0.92	0.90	0.90		

Tab. 2B (continua)

Lherzoliti poor-cpx (cpx >5-10%)														
MA9														
	cpx-1a1*	cpx-1a2*	cpx-2a4	cpx-3a3	cpx-5a2*	cpx-5a6*	cpx-6a1*	cpx-6a2*	MA17					
	core	rim	rim	rim	core	rim	core	rim	cpx-1a3	cpx-1a5	cpx-3a1	micr	core	
SiO₂	53.74	52.83	53.08	52.68	53.11	52.95	53.01	52.34	51.21	55.75	54.80	51.21	55.75	54.80
TiO₂	0.46	0.57	0.46	0.56	0.59	0.57	0.59	0.57	0.72	0.10	0.07	0.72	0.10	0.07
Al₂O₃	4.86	5.86	5.46	5.97	5.82	5.88	5.77	5.39	7.19	3.67	3.68	7.19	3.67	3.68
FeO_{Tot}	2.48	2.58	2.47	2.45	2.32	2.32	2.52	2.40	2.92	3.02	2.79	2.92	3.02	2.79
MnO	0.03	0.03	0.12	0.06	0.06	0.09	0.11	0.15	0.18	0.05	0.10	0.18	0.05	0.10
MgO	15.80	15.46	15.70	15.41	15.26	15.49	15.26	15.64	16.08	16.14	16.03	16.08	16.14	16.03
CaO	22.23	22.22	22.06	21.92	21.75	21.90	21.34	22.02	19.41	20.16	20.43	19.41	20.16	20.43
Na₂O	1.22	1.52	1.38	1.53	1.56	1.39	1.61	1.46	1.22	1.76	1.86	1.22	1.76	1.86
K₂O	0.03	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.02
Cr₂O₃	0.68	0.85	0.56	0.77	0.68	0.79	0.74	0.56	2.52	1.12	1.13	2.52	1.12	1.13
NiO	0.08	0.15	0.00	0.03	0.00	0.00	0.04	0.05	0.12	0.01	0.02	0.12	0.01	0.02
Total	101.61	102.07	101.32	101.39	101.17	101.37	100.98	100.58	101.58	101.80	100.95	101.58	101.80	100.95
<i>a.p.f.u.</i>														
Si	1.915	1.873	1.892	1.877	1.896	1.888	1.897	1.879	1.83	1.979	1.958	1.83	1.979	1.958
Ti	0.012	0.015	0.012	0.015	0.016	0.015	0.016	0.015	0.019	0.003	0.002	0.019	0.003	0.002
Al	0.204	0.245	0.23	0.251	0.245	0.247	0.243	0.228	0.303	0.154	0.155	0.303	0.154	0.155
Fe³⁺	0.002	0.015	0.011	0.013	0.005	0.005	0.005	0.017	0.003	0	0.006	0.003	0	0.006
Fe²⁺	0.072	0.062	0.063	0.06	0.064	0.064	0.07	0.055	0.084	0.096	0.078	0.084	0.096	0.078
Mn	0.001	0.001	0.004	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.005	0.001	0.003	0.005	0.001	0.003
Mg	0.84	0.817	0.834	0.818	0.812	0.823	0.814	0.837	0.856	0.854	0.854	0.856	0.854	0.854
Ca	0.849	0.844	0.843	0.836	0.832	0.836	0.818	0.847	0.743	0.767	0.782	0.743	0.767	0.782
Na	0.084	0.105	0.095	0.106	0.108	0.096	0.112	0.102	0.085	0.121	0.129	0.085	0.121	0.129
K	0.001	0	0.001	0.001	0	0	0	0	0	0.001	0.001	0	0.001	0.001
Cr	0.019	0.024	0.016	0.022	0.019	0.022	0.021	0.016	0.071	0.031	0.032	0.071	0.031	0.032
cations	3.999	4.001	4.001	4.001	3.999	3.999	3.999	4.000	3.999	4.007	4.000	3.999	4.007	4.000
mg#	0.92	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.92	0.94	0.91	0.90	0.92	0.91	0.90	0.92

Tab. 2B (Analisi rappresentative dei clinopirosseni dei noduli di Mega)

Lherzolititi poor-cpx (cpx >5-10%)

	MA32				MA35				MA38			
	cpx-1a3 core	cpx-3a5 core	cpx-4a3 core	cpx-5a5 rim	cpx-7a2 rim	cpx-1a2* core	cpx-1a5* rim	cpx-2a1 core	cpx-3a2* core	cpx-3a4 core	cpx-1a2 core	cpx-2a6* rim
SiO ₂	50.90	53.58	53.37	50.12	51.42	53.67	54.05	53.72	53.97	54.08	52.57	53.40
TiO ₂	0.62	0.57	0.38	0.65	0.55	0.07	0.13	0.09	0.04	0.05	0.36	0.39
Al ₂ O ₃	7.18	2.85	3.10	7.85	4.12	4.05	3.94	3.68	3.65	3.82	6.27	6.23
FeO _{Tot}	2.13	2.46	1.91	2.25	1.95	2.33	2.45	2.41	2.21	2.41	2.77	2.73
MnO	0.20	0.00	0.11	0.06	0.07	0.09	0.14	0.07	0.06	0.04	0.10	0.19
MgO	14.78	17.30	17.06	14.78	16.65	16.94	17.16	16.96	16.88	16.93	15.68	15.92
CaO	19.27	22.96	23.30	20.43	22.67	22.39	22.24	22.34	22.65	22.11	20.09	20.01
Na ₂ O	1.66	0.38	0.66	1.47	0.78	0.91	0.86	0.72	0.80	0.78	1.59	1.60
K ₂ O	0.02	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01
Cr ₂ O ₃	4.47	0.85	1.68	3.68	2.87	0.84	0.64	0.66	0.72	0.71	0.92	0.79
NiO	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.07	0.05	0.12	0.02	0.00	0.07	0.17
Total	101.25	100.98	101.59	101.30	101.09	101.36	101.66	100.79	101.01	100.95	100.43	101.42
<i>a.p.f.u.</i>												
Si	1.83	1.927	1.906	1.798	1.848	1.914	1.921	1.93	1.932	1.937	1.889	1.901
Ti	0.017	0.015	0.01	0.018	0.015	0.002	0.003	0.002	0.001	0.001	0.01	0.01
Al	0.304	0.121	0.131	0.332	0.174	0.17	0.165	0.156	0.154	0.161	0.266	0.261
Fe ³⁺	0	0	0.009	0.009	0.018	0.009	0.007	0.003	0.004	0	0.006	0.001
Fe ²⁺	0.067	0.075	0.048	0.059	0.04	0.06	0.066	0.07	0.062	0.073	0.078	0.08
Mn	0.006	0	0.003	0.002	0.002	0.003	0.004	0.002	0.002	0.001	0.003	0.006
Mg	0.792	0.927	0.908	0.79	0.892	0.9	0.909	0.908	0.9	0.904	0.839	0.844
Ca	0.742	0.885	0.891	0.785	0.873	0.855	0.847	0.86	0.869	0.849	0.773	0.763
Na	0.115	0.026	0.046	0.102	0.054	0.063	0.059	0.05	0.056	0.054	0.111	0.11
K	0.001	0.001	0	0	0.001	0	0	0	0.001	0.001	0	0
Cr	0.127	0.024	0.048	0.104	0.082	0.024	0.018	0.019	0.02	0.02	0.026	0.022
cations	4.001	4.001	4.000	3.999	3.999	4.000	3.999	4.000	4.001	4.001	4.001	3.998
mg#	0.92	0.93	0.95	0.93	0.96	0.94	0.93	0.93	0.94	0.93	0.91	0.91

Tab. 2B (continua)

	Lherzoliti poor-cpx (cpx >5-10%)						Lherzoliti (cpx >10%)					
	MA38			MA40			MA10					
	cpx-2a7*	cpx-3a1	cpx-4a5*	cpx-4a6*	cpx-1a1	cpx-2a4	cpx-2a1*	cpx-2a2*	cpx-3a3	cpx-4a2	cpx-5a3	
core	core	rim	core	core	rim	core	rim	core	rim	rim		
SiO ₂	53.01	52.88	52.63	52.68	53.50	53.87	53.29	53.51	53.21	53.36	53.30	
TiO ₂	0.39	0.36	0.37	0.46	0.50	0.75	0.33	0.28	0.32	0.36	0.29	
Al ₂ O ₃	6.31	6.23	6.60	6.45	5.94	5.87	5.52	5.38	5.27	5.67	5.47	
FeO _{Tot}	3.01	2.87	2.91	2.78	2.28	2.36	2.60	2.36	2.26	2.32	2.41	
MnO	0.07	0.14	0.03	0.09	0.03	0.06	0.02	0.11	0.03	0.07	0.13	
MgO	16.03	15.91	16.18	15.93	15.03	14.96	15.59	15.81	16.09	15.65	15.83	
CaO	19.88	20.06	19.81	19.95	19.32	19.72	21.19	21.26	21.17	21.08	21.20	
Na ₂ O	1.58	1.76	1.65	1.74	2.27	2.31	1.37	1.43	1.25	1.28	1.45	
K ₂ O	0.02	0.03	0.00	0.00	0.03	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.04	
Cr ₂ O ₃	0.87	0.77	0.95	0.90	1.41	1.72	0.88	0.70	0.79	0.78	0.72	
NiO	0.07	0.03	0.05	0.00	0.06	0.04	0.09	0.09	0.13	0.00	0.00	
Total	101.25	101.04	101.19	100.99	100.35	101.68	100.91	100.92	100.52	100.58	100.84	
<i>a.p.f.u.</i>												
Si	1.888	1.884	1.872	1.877	1.92	1.912	1.911	1.915	1.912	1.917	1.906	
Ti	0.011	0.01	0.01	0.012	0.013	0.02	0.009	0.007	0.009	0.01	0.008	
Al	0.265	0.262	0.277	0.271	0.251	0.246	0.233	0.227	0.223	0.24	0.231	
Fe ³⁺	0.006	0.013	0.011	0.011	0	0	0	0.002	0	0	0.006	
Fe ²⁺	0.084	0.073	0.075	0.072	0.068	0.07	0.078	0.069	0.068	0.076	0.066	
Mn	0.002	0.004	0.001	0.003	0.001	0.002	0.001	0.003	0.001	0.002	0.004	
Mg	0.851	0.845	0.858	0.846	0.804	0.791	0.833	0.843	0.862	0.838	0.844	
Ca	0.759	0.766	0.755	0.762	0.743	0.75	0.814	0.815	0.815	0.812	0.812	
Na	0.109	0.121	0.113	0.12	0.158	0.159	0.096	0.099	0.087	0.089	0.101	
K	0.001	0.001	0	0	0.001	0.001	0	0	0.001	0	0.002	
Cr	0.024	0.022	0.027	0.025	0.04	0.048	0.025	0.02	0.022	0.022	0.02	
cations	4.000	4.001	3.999	3.999	3.999	3.999	4.000	4.000	4.000	4.006	4.000	
mg#	0.91	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.91	0.92	0.93	0.92	0.93	

Tab. 2B (continua)

Lherzoliti (cpx >10%)

	MA15		MA27		MA67		cpx-6a4				
	cpx-1a3 rim	cpx-2a1* core	cpx-2a3* rim	cpx-2a7* rim	cpx-2a10* core	cpx-4a3 rim	cpx-1a2* core	cpx-1a5* rim	cpx-3a1* rim	cpx-3a2* core	cpx-6a4 core
SiO ₂	53.54	53.20	53.26	53.28	53.78	53.51	53.66	53.18	53.48	53.13	53.46
TiO ₂	0.21	0.38	0.28	0.30	0.32	0.31	0.36	0.30	0.32	0.40	0.35
Al ₂ O ₃	5.06	5.65	5.74	5.45	5.70	5.27	5.84	5.65	5.70	6.00	5.87
FeO _{Tot}	2.25	2.46	2.28	2.26	2.27	2.36	2.28	2.41	2.49	2.54	2.57
MnO	0.13	0.13	0.02	0.00	0.15	0.03	0.12	0.14	0.07	0.19	0.13
MgO	16.29	15.57	15.86	15.79	15.96	15.94	16.00	15.98	16.13	16.33	16.21
CaO	21.13	21.02	21.13	21.21	21.02	21.61	21.29	21.33	21.09	20.65	20.72
Na ₂ O	1.36	1.52	1.66	1.39	1.65	1.40	1.75	1.51	1.67	1.54	1.61
K ₂ O	0.00	0.00	0.02	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	1.06	1.07	1.14	0.91	0.98	0.86	0.75	0.74	0.60	0.62	0.63
NiO	0.14	0.08	0.09	0.10	0.04	0.00	0.09	0.00	0.07	0.06	0.05
Total	101.17	101.08	101.47	100.70	101.90	101.30	102.15	101.24	101.61	101.46	101.61
<i>a.p.f.u.</i>											
Si	1.912	1.903	1.893	1.911	1.902	1.906	1.891	1.893	1.895	1.885	1.894
Ti	0.006	0.01	0.008	0.008	0.008	0.008	0.009	0.008	0.008	0.011	0.009
Al	0.213	0.238	0.24	0.23	0.238	0.221	0.243	0.237	0.238	0.251	0.245
Fe ³⁺	0.004	0.003	0.011	0.001	0.007	0.006	0.014	0.011	0.013	0.011	0.01
Fe ²⁺	0.063	0.071	0.057	0.067	0.06	0.065	0.054	0.061	0.06	0.064	0.066
Mn	0.004	0.004	0.001	0	0.004	0.001	0.004	0.004	0.002	0.006	0.004
Mg	0.867	0.83	0.84	0.844	0.841	0.847	0.841	0.848	0.852	0.863	0.856
Ca	0.808	0.806	0.804	0.815	0.797	0.825	0.804	0.814	0.8	0.785	0.787
Na	0.094	0.105	0.114	0.096	0.113	0.097	0.12	0.104	0.114	0.106	0.11
K	0	0	0.001	0.001	0.001	0	0	0	0	0	0
Cr	0.03	0.03	0.032	0.026	0.027	0.024	0.021	0.021	0.017	0.017	0.018
cations	4.001	4.000	4.001	3.999	3.998	4.000	4.001	4.001	3.999	3.999	3.999
mg#	0.93	0.92	0.94	0.93	0.93	0.93	0.94	0.93	0.93	0.93	0.93

Tab. 2B (continua)

Harzburgite													
MA11							MA24						
	cpx-1a3	cpx-2a3	cpx-3a2		cpx-1a1*	cpx-1a2*	cpx-2a1	cpx-2a6	cpx-3a5*	cpx-3a6*	cpx-5a3*	cpx-5a4*	
	core	rim	core		rim	core	core	micro	rim	core	core	rim	
SiO₂	54.66	54.54	54.45		53.19	53.07	53.62	53.35	53.14	53.15	53.47	53.68	
TiO₂	0.09	0.03	0.04		0.35	0.42	0.34	0.35	0.46	0.42	0.35	0.38	
Al₂O₃	3.04	2.87	2.86		5.71	5.87	5.83	5.71	5.80	5.87	5.68	5.65	
FeO_{Tot}	2.12	2.11	2.35		2.43	2.66	2.88	2.64	2.56	2.40	2.54	2.61	
MnO	0.01	0.10	0.01		0.12	0.06	0.14	0.14	0.13	0.02	0.07	0.00	
MgO	17.21	17.15	17.28		15.89	15.85	15.95	15.60	15.58	15.66	15.95	16.06	
CaO	22.10	22.45	22.30		19.57	19.78	19.49	19.25	19.71	19.30	19.31	19.06	
Na₂O	0.85	0.76	0.81		2.00	2.09	2.07	2.09	2.19	2.04	2.16	2.01	
K₂O	0.00	0.00	0.00		0.00	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.04	0.03	
Cr₂O₃	1.06	0.85	0.89		1.73	1.47	1.53	1.76	1.72	1.73	1.64	1.51	
NiO	0.01	0.03	0.09		0.00	0.00	0.09	0.13	0.07	0.08	0.06	0.01	
Total	101.14	100.89	101.07		101.00	101.30	101.96	101.02	101.36	100.69	101.29	101.00	
<i>a.p.f.u.</i>													
Si	1.954	1.956	1.949		1.896	1.885	1.895	1.905	1.889	1.902	1.899	1.912	
Ti	0.002	0.001	0.001		0.009	0.011	0.009	0.009	0.012	0.011	0.009	0.01	
Al	0.128	0.121	0.121		0.24	0.246	0.243	0.24	0.243	0.248	0.238	0.237	
Fe³⁺	0	0	0.002		0.01	0.017	0.012	0.006	0.014	0.004	0.013	0.004	
Fe²⁺	0.066	0.065	0.068		0.063	0.062	0.073	0.072	0.062	0.067	0.063	0.074	
Mn	0	0.003	0		0.004	0.002	0.004	0.004	0.004	0.001	0.002	0	
Mg	0.917	0.916	0.922		0.844	0.839	0.84	0.831	0.826	0.835	0.844	0.852	
Ca	0.846	0.862	0.856		0.748	0.753	0.738	0.737	0.751	0.74	0.735	0.728	
Na	0.059	0.053	0.056		0.138	0.144	0.142	0.145	0.151	0.141	0.149	0.139	
K	0	0	0		0	0.001	0.001	0	0	0.001	0.002	0.001	
Cr	0.03	0.024	0.025		0.049	0.041	0.043	0.05	0.048	0.049	0.046	0.043	
cations	4.002	4.001	4.000		4.001	4.001	4.000	3.999	4.000	3.999	4.000	4.000	
mg#	0.93	0.93	0.93		0.93	0.93	0.92	0.92	0.93	0.93	0.93	0.92	

Tab. 2B (continua)

Harzburgite																						
MA26						MA42																
	<i>micr</i>	<i>cpX-2a2</i>	<i>cpX-3a2</i>	<i>cpX-4a2</i>	<i>rim</i>	<i>core</i>	<i>cpX-1a3</i>	<i>core</i>	<i>cpX-2a6</i>	<i>core</i>	<i>cpX-3a6*</i>	<i>cpX-3a7*</i>	<i>rim</i>	<i>cpX-4a1*</i>	<i>rim</i>	<i>core</i>	<i>cpX-4a2*</i>	<i>core</i>	<i>cpX-5a5</i>	<i>core</i>	<i>cpX-5a7*</i>	<i>core</i>
SiO₂	54.83	55.08	55.16	55.16	53.43	53.68	53.74	53.77	53.61	53.46	53.61	53.77	53.61	53.46	53.94	53.33						
TiO₂	0.04	0.04	0.03	0.03	0.61	0.57	0.63	0.56	0.54	0.59	0.54	0.56	0.54	0.61	0.60							
Al₂O₃	3.95	4.04	3.10	3.10	6.12	5.78	5.92	5.76	5.70	6.26	5.70	5.76	5.70	6.12	6.14							
FeO_{Tot}	2.94	2.65	3.05	3.05	2.38	2.62	2.43	2.42	2.41	2.35	2.41	2.42	2.41	2.46	2.43							
MnO	0.14	0.13	0.15	0.15	0.10	0.07	0.05	0.08	0.07	0.01	0.07	0.08	0.07	0.10	0.05							
MgO	16.03	15.88	16.99	16.99	14.80	15.30	14.80	15.34	15.17	14.45	15.17	15.34	15.17	14.92	14.35							
CaO	19.55	19.15	19.64	19.64	19.50	19.51	19.39	19.59	19.97	19.60	19.97	19.59	19.97	19.73	19.08							
Na₂O	2.01	2.36	1.74	1.74	2.54	2.30	2.42	2.20	2.15	2.53	2.15	2.20	2.15	2.47	2.66							
K₂O	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00							
Cr₂O₃	1.61	2.37	0.90	0.90	1.57	1.43	1.48	1.40	1.68	1.85	1.68	1.40	1.68	1.54	1.23							
NiO	0.09	0.00	0.15	0.15	0.08	0.01	0.05	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.06	0.03							
Total	101.22	101.73	100.92	100.92	101.12	101.29	100.91	101.12	101.29	101.14	101.29	101.12	101.29	101.95	99.92							
<i>a.p.f.u.</i>																						
Si	1.956	1.952	1.97	1.97	1.904	1.909	1.92	1.915	1.91	1.906	1.91	1.915	1.91	1.907	1.92							
Ti	0.001	0.001	0.001	0.001	0.016	0.015	0.017	0.015	0.014	0.016	0.014	0.015	0.014	0.016	0.016							
Al	0.166	0.169	0.13	0.13	0.257	0.242	0.249	0.242	0.239	0.263	0.239	0.242	0.239	0.255	0.261							
Fe³⁺	0.003	0.005	0.006	0.006	0.009	0.007	0.001	0.003	0.003	0.005	0.003	0.003	0.003	0.006	0.004							
Fe²⁺	0.084	0.073	0.085	0.085	0.062	0.071	0.072	0.069	0.068	0.066	0.068	0.069	0.068	0.067	0.069							
Mn	0.004	0.004	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002							
Mg	0.852	0.839	0.904	0.904	0.786	0.811	0.788	0.814	0.805	0.768	0.805	0.814	0.805	0.786	0.77							
Ca	0.747	0.727	0.752	0.752	0.744	0.743	0.742	0.748	0.762	0.749	0.762	0.748	0.762	0.747	0.736							
Na	0.139	0.162	0.12	0.12	0.175	0.159	0	0.152	0.148	0.175	0.152	0.148	0.175	0.169	0.186							
K	0.001	0.001	0.001	0.001	0	0.001	0	0	0	0.002	0	0	0	0	0							
Cr	0.045	0.066	0.026	0.026	0.044	0.04	0.042	0.04	0.047	0.052	0.047	0.04	0.047	0.043	0.035							
cations	3.998	3.999	3.999	3.999	4.000	4.000	3.833	4.000	3.998	4.002	3.998	4.000	3.998	3.999	3.999							
mg#	0.91	0.92	0.91	0.91	0.93	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92							

Tab. 2B (continua)

		Harzburgite										
		MA42					MA47					
		cpx-5a8*	cpx-6a1*	cpx-6a2*		cpx-2a2*	cpx-2a4*	cpx-3a1*	cpx-3a2*	cpx-4a1*	cpx-4a3*	cpx-8a3
		rim	core	rim		core	rim/core	core	rim	core	rim	core
SiO ₂		53.71	52.90	53.49	55.27	55.49	55.04	55.04	54.86	55.05	54.64	55.04
TiO ₂		0.61	0.71	0.62	0.01	0.02	0.08	0.08	0.02	0.02	0.07	0.08
Al ₂ O ₃		6.18	6.04	5.98	3.35	3.39	3.48	3.48	3.50	3.34	3.28	3.60
FeO _{Tot}		2.56	2.54	2.25	2.36	2.30	2.39	2.39	2.36	2.49	2.45	2.38
MnO		0.13	0.00	0.04	0.03	0.11	0.11	0.11	0.16	0.08	0.04	0.10
MgO		15.20	14.90	14.77	16.98	17.10	16.98	16.63	16.63	17.20	16.92	16.81
CaO		19.59	19.56	19.80	20.26	20.01	20.33	20.48	20.48	20.65	20.17	20.37
Na ₂ O		2.33	2.38	2.44	1.77	1.63	1.89	1.83	1.83	1.60	1.62	1.79
K ₂ O		0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
Cr ₂ O ₃		1.52	1.44	1.60	1.12	0.98	1.29	1.45	1.45	1.01	1.23	1.50
NiO		0.02	0.04	0.14	0.10	0.10	0.10	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00
Total		101.87	100.51	101.16	101.27	101.14	101.71	101.43	101.45	101.46	100.46	101.67
<i>a.p.f.u.</i>												
Si		1.9	1.896	1.907	1.964	1.975	1.947	1.95	1.952	1.958	1.958	1.949
Ti		0.016	0.019	0.017	0	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
Al		0.258	0.255	0.251	0.14	0.142	0.145	0.147	0.147	0.14	0.139	0.15
Fe ³⁺		0.007	0.01	0.006	0.006	0	0.012	0.01	0.01	0.009	0.005	0.007
Fe ²⁺		0.069	0.066	0.061	0.065	0.071	0.058	0.061	0.061	0.064	0.068	0.063
Mn		0.004	0	0.001	0.001	0.003	0.003	0.005	0.005	0.002	0.001	0.003
Mg		0.801	0.796	0.785	0.899	0.907	0.895	0.881	0.881	0.909	0.904	0.887
Ca		0.742	0.751	0.756	0.771	0.763	0.771	0.78	0.78	0.784	0.775	0.773
Na		0.16	0.166	0.169	0.122	0.113	0.13	0.126	0.11	0.11	0.113	0.123
K		0.001	0.001	0.001	0	0	0	0	0	0	0.001	0
Cr		0.042	0.041	0.045	0.032	0.028	0.036	0.041	0.041	0.028	0.035	0.042
cations		4.000	4.001	3.999	4.000	4.003	3.999	4.002	3.999	3.999	4.001	3.999
mg#		0.92	0.92	0.93	0.93	0.93	0.94	0.94	0.93	0.93	0.93	0.93

Tab. 2B (continua)

Harzburgite												
MA48						MA68						
	cpx-1a1	cpx-1a3	cpx-2a4	cpx-3a2		cpx-1a3*	cpx-1a4*	cpx-2a1*	cpx-2a4*	cpx-3a3	cpx-5a1	
	rim	core	rim	rim		core	rim	core	rim	rim	core	
SiO₂	55.05	54.82	54.43	55.10		54.80	54.55	54.51	51.81	54.49	54.07	
TiO₂	0.07	0.06	0.05	0.00		0.10	0.12	0.12	0.60	0.15	0.12	
Al₂O₃	3.55	3.77	3.39	3.18		2.49	2.70	2.88	5.48	2.89	2.64	
FeO_{Tot}	2.47	2.31	2.39	2.29		2.43	2.70	2.75	2.08	2.76	2.70	
MnO	0.03	0.11	0.04	0.11		0.09	0.09	0.12	0.01	0.14	0.16	
MgO	16.62	16.72	16.87	17.47		17.22	17.37	16.90	16.40	17.03	17.33	
CaO	20.65	20.49	20.77	21.07		20.47	20.65	20.67	21.27	20.74	20.22	
Na₂O	1.49	1.72	1.56	1.46		1.50	1.30	1.30	1.07	1.41	1.33	
K₂O	0.01	0.01	0.00	0.00		0.00	0.01	0.01	0.03	0.00	0.00	
Cr₂O₃	1.51	1.57	1.06	0.75		2.05	1.40	1.58	2.26	1.40	1.50	
NiO	0.05	0.00	0.12	0.19		0.06	0.09	0.11	0.08	0.09	0.06	
Total	101.49	101.59	100.69	101.62		101.21	100.99	100.95	101.07	101.10	100.15	
<i>a.p.f.u.</i>												
Si	1.96	1.944	1.948	1.952		1.956	1.952	1.955	1.857	1.948	1.95	
Ti	0.002	0.002	0.001	0		0.003	0.003	0.003	0.016	0.004	0.003	
Al	0.149	0.158	0.143	0.133		0.105	0.114	0.122	0.231	0.122	0.112	
Fe³⁺	0	0.007	0.009	0.01		0.006	0.007	0.002	0.008	0.008	0.008	
Fe²⁺	0.077	0.062	0.063	0.057		0.067	0.074	0.081	0.054	0.075	0.073	
Mn	0.001	0.003	0.001	0.003		0.003	0.003	0.004	0	0.004	0.005	
Mg	0.882	0.884	0.9	0.923		0.916	0.926	0.904	0.876	0.907	0.931	
Ca	0.788	0.779	0.797	0.8		0.783	0.792	0.794	0.817	0.795	0.781	
Na	0.103	0.118	0.108	0.1		0.104	0.09	0.09	0.074	0.098	0.093	
K	0	0.001	0	0		0	0.001	0.001	0.001	0	0	
Cr	0.042	0.044	0.03	0.021		0.058	0.04	0.045	0.064	0.04	0.043	
cations	4.004	4.002	4.000	3.999		4.001	4.002	4.001	3.998	4.001	3.999	
mg#	0.92	0.93	0.93	0.94		0.93	0.93	0.92	0.94	0.92	0.93	

Tab. 2B (continua)

Harzburgite		Olivin-websterite												
MA68		MA18												
	<i>rim</i>	<i>rim</i>	<i>core</i>	<i>rim</i>	<i>core</i>	<i>rim</i>	<i>core</i>	<i>rim</i>	<i>core</i>	<i>rim</i>	<i>core</i>	<i>rim</i>	<i>core</i>	<i>rim</i>
	cpx-5a2	cpx-6a1*	cpx-6a2*	cpx-6a3	cpx-1a1*	cpx-1a2*	cpx-2a1*	cpx-2a2*	cpx-2a4	cpx-3a1*	cpx-3a2*	cpx-4a4*	cpx-4a5*	
SiO₂	53.95	53.96	54.37	54.74	53.12	53.22	53.57	52.85	51.98	53.41	53.42	53.62	53.11	
TiO₂	0.11	0.16	0.07	0.17	0.49	0.43	0.37	0.43	0.58	0.45	0.35	0.47	0.38	
Al₂O₃	2.64	3.00	2.83	2.10	6.42	6.20	6.26	6.60	6.34	6.74	6.14	6.35	6.09	
FeO_{Tot}	2.76	2.78	2.81	2.61	2.46	2.55	2.56	2.72	2.47	2.41	2.34	2.48	2.53	
MnO	0.03	0.13	0.00	0.16	0.11	0.04	0.10	0.12	0.05	0.09	0.12	0.14	0.11	
MgO	17.43	17.10	17.18	17.37	16.07	15.73	15.64	16.09	15.50	15.26	15.38	15.84	16.18	
CaO	20.55	20.26	20.68	20.94	21.15	21.37	20.60	21.08	20.92	20.99	21.15	21.17	21.12	
Na₂O	1.33	1.43	1.37	1.14	1.62	1.67	1.55	1.59	1.67	1.63	1.46	1.58	1.58	
K₂O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	
Cr₂O₃	1.31	1.46	1.45	1.52	0.47	0.51	0.30	0.24	0.42	0.40	0.33	0.48	0.49	
NiO	0.06	0.13	0.12	0.11	0.03	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00	0.18	0.12	0.18	
Total	100.17	100.41	100.89	100.87	101.94	101.76	101.00	101.73	99.93	101.38	100.86	102.25	101.79	
<i>a.p.f.u.</i>														
Si	1.943	1.942	1.947	1.966	1.875	1.884	1.912	1.868	1.872	1.899	1.914	1.891	1.88	
Ti	0.003	0.004	0.002	0.005	0.013	0.011	0.01	0.012	0.016	0.012	0.009	0.012	0.01	
Al	0.112	0.127	0.12	0.089	0.267	0.259	0.263	0.275	0.269	0.283	0.259	0.264	0.254	
Fe³⁺	0.013	0.01	0.009	0.002	0.014	0.013	0	0.017	0.015	0	0	0.006	0.015	
Fe²⁺	0.07	0.074	0.075	0.077	0.059	0.063	0.078	0.064	0.059	0.073	0.073	0.067	0.06	
Mn	0.001	0.004	0	0.005	0.003	0.001	0.003	0.004	0.002	0.003	0.004	0.004	0.003	
Mg	0.935	0.917	0.917	0.93	0.845	0.83	0.832	0.848	0.832	0.808	0.821	0.833	0.853	
Ca	0.793	0.781	0.793	0.806	0.8	0.81	0.788	0.798	0.807	0.8	0.812	0.8	0.801	
Na	0.093	0.1	0.095	0.079	0.111	0.115	0.107	0.109	0.117	0.112	0.101	0.108	0.109	
K	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0	0	0	0	0.001	
Cr	0.037	0.042	0.041	0.043	0.013	0.014	0.008	0.007	0.012	0.011	0.009	0.013	0.014	
cations	4.000	4.001	3.999	4.002	4.000	4.000	4.002	4.002	4.001	4.001	4.002	3.998	4.000	
mg#	0.93	0.93	0.92	0.92	0.93	0.93	0.91	0.93	0.93	0.92	0.92	0.93	0.93	

Tab. 2B (continua)

Lherzolititi poor-cpx (cpx >5-10%)

	MA9			MA35			MA38			MA40		
	sp-2a2 core	sp-2a3 core	sp-3a2 core	sp-2a2 rim/core	sp-2a1 core	sp-2a2 rim	sp-2a5 rim	sp-3a2 core	sp-4a1 core	sp-4a2 rim	sp-4a8 core	sp-2a2 core
SiO ₂	0.1229	0.1629	0.1517	0.1184	0.2102	0.1593	0.2186	0.1219	0.1493	0.1985	0.1616	0.1381
TiO ₂	0.0414	0.0768	0.1035	0.0435	0.158	0.104	0.0792	0.1158	0.1203	0.1337	0.1319	0.2567
Al ₂ O ₃	58.0704	57.7074	57.9948	50.797	56.3989	56.2309	55.1306	56.2093	56.8206	56.0176	56.1284	41.8122
FeO tot	11.1581	11.5396	11.172	10.6798	10.7846	10.7837	10.3499	10.93	10.59	10.4916	10.6514	12.4469
MnO	0.1604	0.0941	0.0651	0.107	0.1233	0.1311	0.083	0.1216	0.1371	0.0928	0.2114	0.1491
MgO	19.8039	20.2501	20.2059	19.1234	20.5792	20.516	20.153	20.8703	21.2342	20.966	20.726	17.4441
CaO	0.0381	0	0	0	0	0.0104	0.0496	0	0	0	0.0052	0.0259
Na ₂ O	0	0	0	0	0.0138	0.0162	0.2868	0	0.0042	0	0	0
K ₂ O	0	0.0013	0.0203	0.0115	0	0	0.117	0.0189	0.005	0.0013	0	0
Cr ₂ O ₃	10.5694	10.7547	10.2957	18.0312	12.3146	11.5902	11.3578	11.4466	11.4677	11.2074	12.0588	27.1187
NiO	0.2751	0.4019	0.2796	0.2543	0.3747	0.3699	0.4336	0.2826	0.3363	0.2732	0.3655	0.2567
Total	100.24	100.99	100.29	99.17	100.96	99.91	98.26	100.12	100.86	99.38	100.44	99.65
<i>a.p.f.u.</i>												
Si	0.003	0.004	0.004	0.003	0.005	0.004	0.006	0.003	0.004	0.005	0.004	0.004
Ti	0.001	0.001	0.002	0.001	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.005
Al	1.767	1.744	1.761	1.604	1.71	1.718	1.709	1.712	1.715	1.715	1.708	1.371
Fe ³⁺	0.01	0.03	0.02	0.01	0.02	0.03	0.06	0.04	0.04	0.04	0.03	0.01
Fe ²⁺	0.23	0.22	0.22	0.23	0.21	0.2	0.17	0.19	0.19	0.19	0.2	0.28
Mn	0.004	0.002	0.001	0.002	0.003	0.003	0.002	0.003	0.003	0.002	0.005	0.004
Mg	0.762	0.774	0.775	0.763	0.789	0.793	0.79	0.804	0.81	0.811	0.797	0.723
Ca	0.001	0	0	0	0	0	0.001	0	0	0	0	0.001
Na	0	0	0	0	0.001	0.001	0.015	0	0	0	0	0
K	0	0	0.001	0	0	0	0.004	0.001	0	0	0	0
Cr	0.216	0.218	0.21	0.382	0.25	0.238	0.236	0.234	0.232	0.23	0.246	0.596
Ni	0.006	0.008	0.006	0.005	0.008	0.008	0.009	0.006	0.007	0.006	0.008	0.006
cations	3	3.001	3	3	2.999	2.997	3.004	2.995	3.003	3.002	3.001	3
Mg#	0.77	0.78	0.78	0.77	0.79	0.80	0.82	0.81	0.81	0.81	0.80	0.72
Cr#	0.48	0.50	0.49	0.19	0.54	0.54	0.58	0.55	0.55	0.55	0.55	0.30

Tab. 2B (Analisi rappresentative degli spinelli dei noduli di Mega)

Lherzolititi (cpx >10%)

	MA10		MA15		MA27		MA67		sp-6a5*		sp-6a6*		
	sp-3a2 core	sp-5a1* rim/core	sp-2a8* micr	sp-2a9* micr	sp-4a2 rim	sp-1a1 core	sp-1a8 core	sp-4a2* rim	sp-4a3* core	sp-5a1 core	sp-5a6 core	sp-6a6* core	
SiO ₂	0.1612	0.1091	0.1159	0.161	0.1159	0.1012	0.0805	0.0782	0.0505	0.0724	0.1069	0.1198	0.0426
TiO ₂	0.1312	0.065	0.0848	0.079	0.0882	0.0374	0.08	0.0548	0.068	0.071	0.0829	0.0964	0.086
Al ₂ O ₃	56.6064	55.9211	52.7479	52.2596	49.1877	60.5265	58.1658	57.6844	58.0106	57.7041	57.7997	58.0313	58.0006
FeO tot	10.1577	9.9869	10.437	10.4608	10.6209	10.4235	9.9708	10.5439	9.7459	9.9158	9.9548	9.9331	9.9478
MnO	0.1313	0.0526	0.1905	0.0497	0.1348	0.1748	0.1002	0.0681	0.1284	0.1469	0.0516	0.1422	0.114
MgO	19.4741	20.0182	19.1756	20.1592	19.3314	20.2355	21.1436	21.3553	21.0625	21.0534	21.1729	21.3048	21.6055
CaO	0	0.0295	0.1078	0.0932	0	0	0	0.0026	0	0	0.046	0.0263	0
Na ₂ O	0	0	0	0.0268	0.0107	0.0026	0	0.0263	0	0.0525	0.0179	0.0226	0.0797
K ₂ O	0.0018	0.0125	0.0003	0.0059	0	0.0216	0	0.0038	0.0038	0.0127	0.0317	0	0.0025
Cr ₂ O ₃	13.0587	12.4218	15.7486	15.5443	19.6191	7.7811	10.5009	10.5953	11.7085	11.3889	11.0749	10.4182	10.8797
NiO	0.4278	0.2746	0.2365	0.2645	0.3745	0.3968	0.2944	0.368	0.3532	0.2797	0.373	0.3685	0.2849
Total	100.15	98.89	98.84	99.10	99.48	99.70	100.34	100.78	101.13	100.70	100.71	100.46	101.04
<i>a.p.f.u.</i>													
Si	0.004	0.003	0.003	0.004	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001	0.002	0.003	0.003	0.001
Ti	0.003	0.001	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002
Al	1.736	1.729	1.657	1.631	1.556	1.829	1.755	1.735	1.743	1.74	1.741	1.748	1.737
Fe ³⁺	-0.02	0.01	0	0.03	0.02	0.01	0.02	0.05	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04
Fe ²⁺	0.24	0.21	0.23	0.2	0.22	0.22	0.19	0.18	0.19	0.19	0.18	0.18	0.17
Mn	0.003	0.001	0.004	0.001	0.003	0.004	0.002	0.001	0.003	0.003	0.001	0.003	0.002
Mg	0.755	0.782	0.762	0.795	0.773	0.773	0.807	0.812	0.8	0.803	0.806	0.811	0.818
Ca	0	0.001	0.003	0.003	0	0	0	0	0	0	0.001	0.001	0
Na	0	0	0	0.001	0.001	0	0	0.001	0	0.003	0.001	0.001	0.004
K	0	0	0	0	0	0.001	0	0	0	0	0.001	0	0
Cr	0.269	0.258	0.332	0.325	0.416	0.158	0.213	0.214	0.236	0.23	0.224	0.21	0.219
Ni	0.009	0.006	0.005	0.006	0.008	0.008	0.006	0.008	0.007	0.006	0.008	0.008	0.006
cations	2.999	3.001	2.998	2.998	3.002	3.007	2.997	3.004	3.001	3.008	2.998	2.997	2.999
Mg#	0.76	0.79	0.77	0.80	0.78	0.78	0.81	0.82	0.81	0.81	0.82	0.82	0.83
Cr#	0.13	0.13	0.17	0.17	0.21	0.08	0.53	0.54	0.55	0.55	0.55	0.54	0.56

Tab. 2B (continua)

Harzburgite

	MA11		MA24				MA26				MA42			
	sp-1a1 rim/core	sp-3a3 core	sp-2a7* core	sp-2a8* rim	sp-4a4* core	sp-4a5* core	sp-4a6* rim	sp-5a6* rim	sp-5a7* core	sp-1a3 core	sp-2a4 rim	sp-3a3 micr	sp-1a2 core	sp-2a4* rim
SiO ₂	0.0825	0.1548	0.0992	0.0917	0.0731	0.1004	0.0514	0.0895	0.084	0.0752	0.113	0.0967	0.1758	0.1914
TiO ₂	0.0859	0.0884	0.2225	0.1977	0.1653	0.2272	0.1726	0.251	0.2368	0.0261	0.1138	0.0689	0.2947	0.298
Al ₂ O ₃	36.0541	34.9596	41.4892	41.6448	41.1669	41.7841	41.4404	41.0052	40.995	20.1843	20.1855	22.6806	42.6949	43.2027
FeO tot	12.9609	12.4647	12.8296	12.5525	12.579	12.3704	12.431	12.1617	12.0486	17.1855	16.7984	14.4827	12.7534	12.6442
MnO	0.2205	0.1692	0.104	0.1429	0.0804	0.0672	0.1326	0.1298	0.2017	0.1774	0.1975	0.2188	0.2254	0.1318
MgO	16.6464	16.9013	18.3105	18.4615	18.505	18.5545	18.4409	19.2561	18.8232	12.7562	13.2209	14.9453	17.9476	17.6176
CaO	0.0513	0	0.0038	0	0	0.0076	0.0051	0.0164	0.0215	0.0074	0.0148	0	0.0089	0.038
Na ₂ O	0	0	0.004	0	0	0	0	0	0.0593	0	0	0	0	0
K ₂ O	0	0	0	0.011	0	0	0.0196	0	0.0012	0.0044	0	0	0	0
Cr ₂ O ₃	32.8931	34.7189	26.9795	26.1363	26.993	26.8612	26.1297	26.8143	27.0981	49.1774	50.5884	47.3864	26.3077	25.9989
NiO	0.1004	0.1414	0.1105	0.298	0.2884	0.2837	0.1924	0.351	0.2837	0.0715	0.1299	0.1981	0.25	0.2599
Total	99.10	99.60	100.15	99.54	99.84	100.26	99.02	100.08	99.85	99.67	101.36	100.08	100.66	100.38
<i>a.p.f.u.</i>														
Si	0.002	0.004	0.003	0.003	0.002	0.003	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.005	0.005
Ti	0.002	0.002	0.005	0.004	0.003	0.005	0.004	0.005	0.005	0.001	0.003	0.002	0.006	0.006
Al	1.219	1.18	1.35	1.359	1.342	1.355	1.359	1.329	1.334	0.741	0.728	0.81	1.381	1.401
Fe ³⁺	0.03	0.02	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.07	0.06	0.04	0.04	0.05	0.03	0.01
Fe ²⁺	0.28	0.28	0.25	0.23	0.23	0.24	0.23	0.21	0.21	0.4	0.39	0.32	0.27	0.28
Mn	0.005	0.004	0.002	0.003	0.002	0.002	0.003	0.003	0.005	0.005	0.005	0.006	0.005	0.003
Mg	0.711	0.721	0.753	0.762	0.763	0.761	0.764	0.789	0.774	0.592	0.603	0.674	0.734	0.722
Ca	0.002	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0	0	0	0.001
Na	0	0	0	0	0	0	0	0	0.003	0	0	0	0	0
K	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0	0	0	0	0	0
Cr	0.746	0.786	0.589	0.572	0.59	0.584	0.575	0.583	0.591	1.21	1.224	1.134	0.571	0.565
Ni	0.002	0.003	0.002	0.007	0.006	0.006	0.004	0.008	0.006	0.002	0.003	0.005	0.006	0.006
cations	2.999	3	3.004	3	2.998	3.006	3.001	2.999	2.991	2.993	2.999	3.004	3.008	2.999
Mg#	0.72	0.72	0.75	0.77	0.77	0.76	0.77	0.79	0.79	0.60	0.61	0.68	0.73	0.72
Cr#	0.38	0.40	0.70	0.71	0.72	0.71	0.71	0.74	0.74	0.75	0.63	0.58	0.68	0.67

Tab. 2B (continua)

Harzburgite

	MA42			MA47			MA48			MA68			
	sp-2a5* core	sp-3a4* core	sp-3a5* rim	sp-5a4 core	sp-1a1* core	sp-1a2* rim	sp-6a2 core	sp-1a4 rim/core	sp-2a1 rim	sp-3a1 rim	sp-1a1* rim	sp-1a2* core	sp-2a2 micr
SiO ₂	0.1073	0.1467	0.1512	0.1335	0.0721	0.0584	0.1212	0.1306	0.095	0.1222	0.0523	0.0758	0.0956
TiO ₂	0.2798	0.1757	0.2702	0.3235	0.0543	0.0272	0.0437	0.0299	0.07	0.019	0.2967	0.2743	0.2491
Al ₂ O ₃	43.4108	43.0168	43.1308	42.6546	34.2464	33.7352	25.0944	30.5376	26.9351	30.1591	21.2993	20.9113	21.3255
FeO tot	12.849	12.7103	12.5966	12.6239	14.123	13.2639	14.4047	13.8582	13.1855	13.5573	17.0084	17.3224	17.5854
MnO	0.1356	0.1488	0.0986	0.0967	0.2428	0.2373	0.2608	0.1846	0.1474	0.2259	0.3134	0.2811	0.3294
MgO	18.1529	17.8712	17.9202	18.101	16.9235	17.5153	15.7811	16.0749	16.1786	15.8209	13.906	13.8419	14.5311
CaO	0	0	0	0.0076	0.0074	0	0.0475	0	0.0088	0.0051	0.006	0	0.0193
Na ₂ O	0.0379	0.0126	0	0	0.0525	0.0497	0.0602	0	0.0137	0	0.1035	0	0.0367
K ₂ O	0	0	0	0.011	0.0108	0.0348	0.0118	0.0082	0	0	0	0	0.007
Cr ₂ O ₃	26.0148	25.9108	25.4727	25.6604	34.9559	36.1205	45.8838	39.5855	43.541	39.4214	46.9495	46.8619	45.7267
NiO	0.2262	0.2407	0.26	0.2985	0.2039	0.2001	0.1467	0.2452	0.163	0.2589	0.2302	0.2254	0.1929
Total	101.21	100.23	99.90	99.91	100.89	101.24	101.86	100.65	100.34	99.59	100.17	99.79	100.10
<i>a.p.f.u.</i>													
Si	0.003	0.004	0.004	0.004	0.002	0.002	0.004	0.004	0.003	0.004	0.002	0.002	0.003
Ti	0.006	0.004	0.006	0.007	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0	0.007	0.006	0.006
Al	1.393	1.395	1.401	1.386	1.146	1.124	0.869	1.045	0.936	1.044	0.768	0.758	0.766
Fe ³⁺	0.03	0.03	0.02	0.03	0.07	0.07	0.06	0.04	0.04	0.03	0.09	0.08	0.12
Fe ²⁺	0.26	0.26	0.27	0.26	0.27	0.25	0.29	0.3	0.28	0.3	0.35	0.36	0.33
Mn	0.003	0.003	0.002	0.002	0.006	0.006	0.006	0.005	0.004	0.006	0.008	0.007	0.008
Mg	0.736	0.733	0.736	0.744	0.716	0.738	0.691	0.695	0.711	0.692	0.634	0.635	0.66
Ca	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0	0	0	0	0.001
Na	0.002	0.001	0	0	0.003	0.003	0.003	0	0.001	0	0.006	0	0.002
K	0	0	0	0	0	0.001	0	0	0	0	0	0	0
Cr	0.56	0.563	0.555	0.559	0.785	0.807	1.066	0.908	1.015	0.915	1.135	1.14	1.101
Ni	0.005	0.005	0.006	0.007	0.005	0.005	0.003	0.006	0.004	0.006	0.006	0.006	0.005
cations	2.998	2.998	3	2.999	3.004	3.007	2.994	3.004	2.996	2.997	3.006	2.994	3.002
Mg#	0.74	0.74	0.73	0.74	0.73	0.75	0.70	0.70	0.72	0.70	0.64	0.64	0.67
Cr#	0.68	0.68	0.67	0.68	0.74	0.76	0.79	0.46	0.52	0.47	0.76	0.76	0.77

Tab. 2B (continua)

Olivin-websterite			
MA18			
	sp-4a1*	sp-4a2*	sp-4a3*
	core	rim	rim
SiO ₂	0.0456	0.0585	0.0946
TiO ₂	0.0421	0.0452	0.0677
Al ₂ O ₃	62.9077	62.6561	62.5992
FeO tot	9.9521	9.3143	9.6554
MnO	0.1078	0.0187	0.1294
MgO	22.046	21.6877	21.2507
CaO	0.008	0	0
Na ₂ O	0.0173	0.0086	0
K ₂ O	0.0103	0	0.0257
Cr ₂ O ₃	5.7833	5.6927	5.8231
NiO	0.3951	0.2965	0.4049
Total	101.32	99.78	100.05
<i>a.p.f.u.</i>			
Si	0.001	0.001	0.002
Ti	0.001	0.001	0.001
Al	1.847	1.865	1.864
Fe ³⁺	0.04	0.02	0.01
Fe ²⁺	0.17	0.18	0.19
Mn	0.002	0	0.003
Mg	0.818	0.816	0.8
Ca	0	0	0
Na	0.001	0	0
K	0	0	0.001
Cr	0.114	0.114	0.116
Ni	0.008	0.006	0.008
cations	3.002	3.003	2.995
Mg#	0.83	0.82	0.81
Cr#	0.40	0.39	0.38

Tab. 2B (continua)

Lherzolititi poor-cpx (cpx >5-10%)

	MA8	MA9	MA17	MA32	MA35	MA38	MA40	MA46	MA57	MA61	MA70
Rb	0.08	0.08	1.78	0.92	0.23	0.08	0.12	0.109	0.51	0.08	0.13
Sr	4.65	4.18	63.7	38.9	3.36	11.3	5.32	4.832	18.8	8.99	6.58
Y	2.24	1.54	3.56	2.11	1.02	2.52	1.23	1.438	0.43	2.90	1.27
Zr	4.52	2.17	19.63	2.05	0.91	1.81	1.54	2.177	0.32	2.49	2.10
Nb	1.09	0.47	8.45	0.10	0.35	0.35	0.07	0.359	0.29	0.21	0.23
La	0.16	0.09	2.84	1.41	0.21	0.89	0.17	0.449	2.02	0.37	0.30
Ce	0.41	0.20	6.23	4.22	0.33	1.04	0.40	0.640	2.46	1.10	0.58
Pr	0.06	0.03	0.75	0.55	0.03	0.11	0.05	0.060	0.15	0.11	0.07
Nd	0.41	0.25	3.30	2.48	0.12	0.49	0.27	0.285	0.33	0.58	0.27
Sm	0.16	0.10	0.69	0.48	0.02	0.16	0.09	0.090	0.03	0.17	0.07
Eu	0.06	0.03	0.19	0.14	0.01	0.06	0.03	0.029	0.01	0.04	0.02
Gd	0.23	0.15	0.65	0.39	0.03	0.23	0.10	0.134	0.08	0.25	0.09
Tb	0.04	0.03	0.11	0.06	0.01	0.05	0.02	0.023	0.01	0.03	0.02
Dy	0.33	0.23	0.55	0.29	0.07	0.34	0.11	0.186	0.04	0.36	0.12
Ho	0.07	0.05	0.11	0.06	0.02	0.08	0.02	0.038	0.01	0.06	0.03
Er	0.24	0.16	0.30	0.15	0.06	0.24	0.06	0.129	0.04	0.25	0.09
Tm	0.03	0.02	0.04	0.02	0.01	0.04	0.01	0.015	0.01	0.02	0.01
Yb	0.26	0.18	0.29	0.15	0.08	0.28	0.06	0.157	0.05	0.30	0.10
Lu	0.03	0.02	0.05	0.02	0.01	0.04	0.01	0.017	0.01	0.02	0.02
Hf	0.28	0.08	0.36	0.05	0.02	-	0.05	-	-	0.07	-
Ta	1.69	0.64	0.53	0.06	0.05	0.34	0.04	0.337	0.10	0.21	0.19
Th	0.05	-	0.26	0.18	0.04	0.92	0.02	0.289	0.19	0.11	0.01
U	-	-	0.09	0.05	0.02	0.15	0.01	0.050	0.19	-	0.02
La _N /Yb _N	0.43	0.36	6.98	6.62	1.79	2.29	1.92	2.05	30.02	0.88	2.05
Ce _N /Yb _N	0.44	0.32	5.92	7.67	1.12	1.03	1.78	1.13	14.64	1.02	1.55
Sm _N /Dy _N	0.79	0.69	2.08	2.69	0.58	0.78	1.36	0.81	1.37	0.79	1.02
Nd _N /Yb _N	0.57	0.51	4.11	5.90	0.53	0.64	1.59	0.66	2.63	0.70	0.94

Tab. 3B (Analisi ICP-MS di roccia totale dei noduli di Mega; N= normalizzato alle condriti C1, McDonough & Sun, 1995)

Lherzolititi (cpx >10%)

	MA10	MA15	MA27	MA51	MA53	MA56	MA58	MA63	MA67	MA71
Rb	0.23	0.30	0.18	0.32	0.09	1.14	0.16	0.14	0.00	-
Sr	8.15	21.0	7.66	9.36	6.20	14.6	6.41	5.52	3.53	2.22
Y	2.54	3.02	3.90	1.29	2.95	2.56	1.09	2.09	3.17	2.46
Zr	3.17	6.65	4.26	3.52	0.90	2.19	2.13	2.96	0.76	1.72
Nb	0.94	0.49	0.13	0.56	0.21	0.97	0.33	0.28	0.10	0.05
La	0.33	0.57	0.23	0.43	0.13	0.52	0.07	0.08	0.03	-
Ce	0.33	0.93	0.37	0.98	0.48	1.30	0.19	0.23	0.11	0.10
Pr	0.04	0.14	0.07	0.12	0.07	0.16	0.04	0.05	-	0.01
Nd	0.28	0.76	0.45	0.50	0.40	0.67	0.19	0.33	0.15	0.29
Sm	0.14	0.26	0.23	0.12	0.16	0.18	0.07	0.15	0.09	0.14
Eu	0.05	0.08	0.08	0.04	0.06	0.07	0.03	0.06	0.02	0.03
Gd	0.19	0.30	0.29	0.13	0.25	0.26	0.09	0.20	0.20	0.21
Tb	0.05	0.07	0.08	0.02	0.06	0.05	0.02	0.05	0.03	0.02
Dy	0.34	0.46	0.54	0.15	0.39	0.35	0.16	0.33	0.38	0.32
Ho	0.08	0.10	0.12	0.03	0.09	0.08	0.04	0.08	0.07	0.05
Er	0.24	0.28	0.35	0.09	0.28	0.24	0.12	0.23	0.28	0.21
Tm	0.04	0.04	0.06	0.02	0.04	0.03	0.02	0.04	0.02	0.01
Yb	0.24	0.27	0.37	0.11	0.33	0.27	0.12	0.24	0.35	0.25
Lu	0.04	0.04	0.06	0.02	0.05	0.04	0.02	0.04	0.03	0.01
Hf	0.12	0.14	0.15	0.05	-	-	0.07	0.14	0.03	0.07
Ta	0.96	0.16	0.08	0.30	0.22	0.63	0.38	0.18	0.14	0.08
Th	0.03	0.03	0.05	0.02	-	0.08	0.01	0.01	-	-
U	0.01	-	0.01	0.03	0.02	-	0.01	0.01	0.00	-
La _N /Yb _N	0.96	1.51	0.44	2.85	0.28	1.38	0.42	0.24	0.05	-
Ce _N /Yb _N	0.38	0.95	0.27	2.52	0.41	1.33	0.45	0.27	0.09	0.11
Sm _N /Dy _N	0.65	0.93	0.69	1.38	0.70	0.85	0.72	0.75	0.40	0.70
Nd _N /Yb _N	0.41	1.02	0.44	1.67	0.45	0.89	0.58	0.50	0.16	0.43

Tab. 3B (continua)

<i>Harzburgiti</i>											
	MA11	MA19	MA24	MA26	MA29	MA36	MA37	MA42	MA43	MA47 - Lh	
Rb	0.26	0.25	0.26	0.84	0.24	0.47	0.16	0.10	0.70	0.50	
Sr	4.99	4.39	5.58	15.4	5.75	23.9	4.21	2.35	32.2	34.9	
Y	0.71	0.48	0.82	1.44	0.77	1.07	0.68	0.88	0.67	0.62	
Zr	3.30	0.95	2.48	7.38	1.99	14.7	0.97	0.84	0.82	0.65	
Nb	1.08	0.20	0.44	3.46	0.52	3.13	0.35	0.06	0.60	0.67	
La	1.09	0.10	1.04	1.06	0.19	0.79	0.40	0.10	1.81	2.10	
Ce	0.32	0.21	0.44	1.22	0.48	2.10	0.62	0.24	4.11	4.54	
Pr	0.04	0.03	0.05	0.18	0.06	0.28	0.06	0.03	0.46	0.47	
Nd	0.18	0.13	0.24	0.94	0.27	1.26	0.27	0.14	1.58	1.49	
Sm	0.04	0.04	0.05	0.24	0.05	0.29	0.05	0.04	0.20	0.16	
Eu	0.01	0.01	0.02	0.07	0.01	0.09	0.01	0.01	0.06	0.05	
Gd	0.04	0.05	0.05	0.21	0.05	0.28	0.05	0.04	0.23	0.20	
Tb	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01	0.01	0.02	0.02	
Dy	0.03	0.07	0.05	0.19	0.04	0.19	0.04	0.05	0.08	0.05	
Ho	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	
Er	0.02	0.05	0.03	0.08	0.02	0.08	0.02	0.03	0.04	0.03	
Tim	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	
Yb	0.03	0.06	0.04	0.07	0.02	0.06	0.03	0.03	0.04	0.04	
Lu	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
Hf	0.05	0.03	0.03	0.12	0.04	0.33	0.02	0.02	0.02	0.01	
Ta	0.28	0.03	0.09	0.22	0.05	0.86	0.05	0.04	0.52	1.34	
Th	0.02	0.02	0.05	0.01	0.02	0.08	0.08	0.01	0.29	0.24	
U	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03	0.03	0.01	0.09	0.12	
La _N /Yb _N	29.1	1.2	17.8	10.3	5.6	9.8	10.3	2.1	29.0	41.5	
Ce _N /Yb _N	3.3	1.0	2.9	4.6	5.6	10.1	6.2	2.0	25.5	34.8	
Sm _N /Dy _N	2.2	0.9	1.8	2.1	2.2	2.6	2.3	1.4	4.4	5.3	
Nd _N /Yb _N	2.4	0.8	2.1	4.7	4.2	7.9	3.5	1.5	12.9	15.0	

Tab. 3B (continua)

	<i>Harzburgiti</i>			<i>Olivin-websterite</i>	
	MA48	MA65	MA68	MA18	
Rb	0.26	0.42	0.38	0.12	
Sr	25.2	4.91	29.3	10.5	
Y	0.84	0.35	1.55	4.18	
Zr	1.67	2.24	13.2	5.17	
Nb	1.03	0.82	3.52	0.11	
La	1.07	0.28	2.18	0.08	
Ce	2.46	0.58	4.71	0.32	
Pr	0.27	0.07	0.57	0.07	
Nd	1.02	0.25	2.43	0.48	
Sm	0.14	0.05	0.52	0.26	
Eu	0.03	0.01	0.13	0.10	
Gd	0.13	0.05	0.46	0.38	
Tb	0.01	0.01	0.04	0.10	
Dy	0.05	0.03	0.29	0.65	
Ho	0.01	0.01	0.02	0.15	
Er	0.03	0.02	0.09	0.44	
Tm	0.00	0.00	-	0.07	
Yb	0.03	0.02	0.06	0.47	
Lu	0.01	0.00	-	0.07	
Hf	0.03	0.04	0.26	0.19	
Ta	0.07	0.32	0.41	0.10	
Th	0.12	0.04	0.50	0.01	
U	0.05	0.02	0.05	0.00	
La _N /Yb _N	26.5	8.0	27.5	0.12	
Ce _N /Yb _N	23.5	6.5	22.9	0.19	
Sm _N /Dy _N	5.2	2.2	3.0	0.67	
Nd _N /Yb _N	12.8	3.6	15.5	0.37	

Tab. 3B (continua)

Lherzoliti poor-cpx (cpx >5-10%)

	MA9				MA17				MA32			
	cpx-1a2 rim	cpx-1a1 core	cpx-2a4 core	cpx-5a2 core	cpx-6a2 rim	cpx-6a1 core	cpx-2 crystal	cpx-1a3A core	cpx-1a3B core	cpx-3a5A core		
Rb	0.04	<0.0202	<0.023	0.03	<0.0156	<0.028	0.02	64.02	154.39	9.71		
Ba	0.01	0.02	0.07	<0.023	<0.0225	<0.021	0.63	1022.49	3298.58	958.47		
Th	0.38	0.34	0.23	0.26	0.22	0.21	2.72	9.92	26.06	3.73		
U	0.08	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.62	2.66	7.36	0.91		
Nb	0.02	0.01	0.08	0.11	0.02	0.08	0.55	63.32	154.84	0.63		
Ta	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.04	2.88	6.97	0.02		
K												
La	2.40	2.36	1.88	1.59	1.95	1.56	33.80	72.40	187.50	35.72		
Ce	4.93	4.97	3.64	3.45	4.03	3.33	72.25	180.85	467.50	111.34		
Pr	0.71	0.63	0.64	0.59	0.62	0.58	9.31	21.02	49.45	14.96		
Sr	47.7	47.8	46.6	45.3	45.8	44.4	647.5	523.8	2255.4	1036.7		
Nd	3.71	3.37	3.59	3.34	3.69	3.63	40.01	78.83	177.53	64.41		
P												
Zr	26.8	25.9	25.2	24.1	23.9	22.4	154.4	122.4	299.9	32.2		
Hf	0.87	0.91	0.88	0.79	0.84	0.82	2.42	2.29	5.81	1.06		
Sm	1.55	1.70	1.51	1.56	1.51	1.47	8.58	14.19	26.21	11.91		
Eu	0.69	0.76	0.75	0.84	0.76	0.79	2.89	4.32	9.29	4.57		
Ti	3148	3044	3246	3043	3218	2999	467	9712	23486	5977		
Gd	2.11	2.13	2.29	1.87	2.18	2.41	7.29	9.12	17.16	7.78		
Tb	0.43	0.42	0.43	0.46	0.45	0.44	1.04	1.35	2.37	1.15		
Dy	2.92	2.98	2.96	3.19	2.87	2.76	6.60	7.33	13.33	6.61		
Y	17.4	17.2	18.1	17.1	16.4	16.3	34.0	39.1	69.4	33.1		
Ho	0.65	0.72	0.70	0.69	0.68	0.69	1.30	1.46	2.53	1.19		
Er	1.83	1.89	2.08	2.08	1.86	1.94	3.21	3.63	6.56	3.03		
Tm	0.28	0.29	0.31	0.28	0.29	0.28	0.51	0.50	1.01	0.46		
Yb	1.87	1.90	2.11	1.92	1.89	1.76	3.03	3.91	7.60	2.88		
Lu	0.27	0.32	0.29	0.30	0.26	0.29	0.54	0.51	0.96	0.36		
La _N /Yb _N	0.87	0.84	0.60	0.56	0.70	0.60	7.58	12.58	16.76	8.43		
Ce _N /Yb _N	0.69	0.69	0.45	0.47	0.56	0.50	6.26	12.15	16.16	10.15		
Nd _N /Yb _N	0.70	0.63	0.60	0.61	0.69	0.73	4.65	7.10	8.23	7.88		
Ti/Eu	4549	4021	4334	3623	4257	3811	162	2248	2528	1308		

Tab.4B (Analisi LAM-ICP-MS dei clinopirosseni dei noduli di Mega; N= normalizzato alle condriti C1, McDonough & Sun, 1995)

Lherzolithi poor-cpx (cpx >5-10%)

	MA32		cpx-5a5		cpx-7a2		MA35		MA38		cpx-4a5	
	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim	core	rim
Rb	10.29		52.02		13.41		<0.054		<0.0173		<0.0240	
Ba	1111.44		1104.93		858.54		0.21		0.60		0.45	
Th	5.46		7.60		3.69		0.41		4.58		5.07	
U	0.95		1.24		0.96		0.09		1.26		1.17	
Nb	0.50		1.20		0.38		0.08		0.64		0.64	
Ta	0.01		<0.0169		0.04		<0.0096		0.04		0.05	
K												
La	45.04		64.56		35.63		1.51		9.87		10.72	
Ce	125.18		182.38		105.90		1.38		10.65		10.81	
Pr	17.01		23.76		13.70		0.07		0.98		0.93	
Sr	1089.2		683.7		914.8		19.5		97.7		107.5	
Nd	73.10		97.72		52.80		0.22		4.01		4.10	
P												
Zr	43.5		59.4		29.4		0.3		15.5		16.3	
Hf	1.07		1.95		0.80		0.03		0.50		0.74	
Sm	14.41		19.71		9.20		0.05		1.34		1.39	
Eu	4.66		5.49		4.28		0.05		0.66		0.59	
Ti	6680		9641		5313		300		2112		2130	
Gd	9.60		12.41		7.14		0.27		1.86		1.74	
Tb	1.43		2.00		0.94		0.06		0.34		0.34	
Dy	7.80		9.88		4.99		0.79		2.48		2.59	
Y	40.2		49.5		29.8		5.6		13.6		14.5	
Ho	1.48		1.80		1.03		0.25		0.56		0.59	
Er	3.87		4.60		3.40		0.74		1.57		1.75	
Tm	0.50		0.65		0.47		0.10		0.23		0.28	
Yb	3.42		4.54		2.59		0.70		1.58		1.71	
Lu	0.46		0.67		0.40		0.13		0.21		0.21	
La _N /Yb _N	8.95		9.66		9.35		1.08		4.23		4.27	
Ce _N /Yb _N	9.61		10.55		10.74		0.37		1.77		1.67	
Nd _N /Yb _N	7.53		7.58		7.18		0.08		0.89		0.85	
Ti/Eu	1433		1756		1241		5551		3210		3592	

Tab.4B (continua)

Lherzoliti poor-cpx (cpx > 5-10%)																							
MA38				MA40				MA10															
	core	cpx-4a6A	cpx-4a6B	core	cpx-4a6C	core	cpx-1a1A	core	cpx-1a1B	core	cpx-2a1A	core	cpx-2a1B	core	cpx-2a1*	rim	cpx-2a1*	core	cpx-3a1	core	cpx-4a1	core	
Rb	0.02	<0.024	<0.024	<0.025	<0.035	<0.048	0.13	0.13	0.08	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Ba	0.55	0.40	0.40	0.44	0.03	0.01	1.15	1.15	1.28	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
Th	4.69	4.65	4.71	4.71	0.51	0.50	0.43	0.43	0.41	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
U	1.17	1.12	1.19	1.19	0.14	0.11	0.16	0.16	0.13	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Nb	0.69	0.68	0.64	0.64	0.02	0.04	0.05	0.05	0.08	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Ta	0.03	0.03	0.03	0.03	<0.00	<0.0052	<0.0070	<0.0070	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
K																							
La	10.23	n.d.	n.d.	10.31	3.70	3.08	3.44	3.44	3.47	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.31	1.31	1.31	1.31	1.36
Ce	9.80	9.10	9.12	9.12	7.03	6.86	7.01	7.01	7.43	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03	2.04	2.04	2.04	2.04	1.95
Pr	0.80	0.78	0.77	0.77	0.93	0.95	0.90	0.90	0.93	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
Sr	98.2	99.6	102.1	102.1	86.0	80.6	86.5	86.5	85.0	51.4	51.4	51.4	51.4	51.4	51.4	51.4	51.4	51.4	49.0	49.0	49.0	49.0	47.0
Nd	3.65	3.48	3.17	3.17	5.03	4.60	4.70	4.70	4.90	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05
P																							
Zr	15.2	15.3	14.8	14.8	15.9	15.4	15.0	15.0	15.0	17.4	17.4	17.4	17.4	17.4	17.4	17.4	17.4	17.4	14.6	14.6	14.6	14.6	16.6
Hf	0.64	0.56	0.67	0.67	0.58	0.70	0.60	0.60	0.63	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.51	0.51	0.51	0.51	0.61
Sm	1.21	1.33	1.44	1.44	1.33	1.34	1.82	1.82	1.66	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.04	1.04	1.04	1.04	1.06
Eu	0.53	0.55	0.52	0.52	0.65	0.58	0.59	0.59	0.71	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
Ti	2111	2129	2180	2180	3177	3477	3597	3597	3477	1858	1858	1858	1858	1858	1858	1858	1858	1858	1559	1559	1559	1559	1858
Gd	1.63	1.74	1.83	1.83	1.77	1.49	1.92	1.92	1.97	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.49	1.49	1.49	1.49	1.80
Tb	0.35	0.37	0.36	0.36	0.28	0.27	0.31	0.31	0.29	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.33	0.33	0.33	0.33	0.39
Dy	2.58	2.51	2.39	2.39	1.73	1.86	1.80	1.80	1.68	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	2.23	2.23	2.23	2.23	2.63
Y	14.1	14.4	14.3	14.3	8.2	8.4	8.2	8.2	8.2	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	13.4	13.4	13.4	13.4	15.0
Ho	0.58	0.60	0.63	0.63	0.36	0.39	0.32	0.32	0.36	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.54	0.54	0.54	0.54	0.58
Er	1.75	1.45	1.61	1.61	0.92	0.81	0.76	0.76	0.89	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.52	1.52	1.52	1.52	1.67
Tm	0.22	0.22	0.23	0.23	0.12	0.16	0.12	0.12	0.11	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
Yb	1.60	1.38	1.53	1.53	0.84	0.72	0.85	0.85	0.63	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.50	1.50	1.50	1.50	1.66
Lu	0.22	0.21	0.25	0.25	0.12	0.11	0.10	0.10	0.10	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.21	0.21	0.21	0.21	0.24
La _N /Yb _N	4.34	-	4.59	4.59	3.01	2.91	2.74	2.74	3.77	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.59	0.59	0.59	0.59	0.56
Ce _N /Yb _N	1.61	1.74	1.57	1.57	2.21	2.50	2.16	2.16	3.12	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.36	0.36	0.36	0.36	0.31
Nd _N /Yb _N	0.80	0.89	0.73	0.73	2.12	2.25	1.94	1.94	2.76	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.48	0.48	0.48	0.48	0.43
Ti/Eu	3953	3892	4177	4177	4896	5974	6086	6086	4877	3591	3591	3591	3591	3591	3591	3591	3591	3591	3334	3334	3334	3334	3975

Tab.4B (continua)

Lherzolititi (cpx > 10%)

	MA15		MA27		MA67		cpx-6a4 core	
	cpx-1a2 core	cpx-2a1 core	cpx-1a1A core	cpx-1a1B core	cpx-1a2 core	cpx-3a1 rim		cpx-3a2 core
Rb	0.05	<0.036	<0.0298	<0.043	<0.034	<0.0183	<0.0128	<0.0113
Ba	0.13	<0.039	0.04	0.71	<0.039	<0.052	0.02	<0.0223
Th	0.11	0.12	0.11	0.70	0.04	0.02	0.03	0.02
U	0.03	0.03	0.04	0.22	0.01	0.01	0.00	0.01
Nb	0.02	0.02	<0.0088	0.06	0.02	0.01	0.02	0.03
Ta	<0.0075	<0.0052	<0.00	0.00	0.00	<0.00	<0.00	0.00
K								
La	1.16	1.18	1.15	4.36	0.34	0.31	0.33	0.31
Ce	4.33	4.56	4.42	5.66	0.76	0.81	0.84	0.83
Pr	0.74	0.81	0.82	0.53	0.14	0.15	0.16	0.16
Sr	81.6	93.7	84.6	67.2	26.6	26.7	26.8	26.2
Nd	4.23	4.11	4.35	2.95	1.11	1.10	1.17	0.97
P								
Zr	25.7	27.9	27.0	17.7	6.4	5.9	5.2	5.5
Hf	0.46	0.64	0.47	0.82	0.35	0.45	0.34	0.39
Sm	1.46	1.57	1.56	1.34	0.63	0.88	0.86	0.63
Eu	0.68	0.71	0.58	0.55	0.39	0.44	0.48	0.45
Ti	1439	2098	1499	1978	1929	1911	1793	1830
Gd	1.86	2.32	2.02	1.75	1.93	1.54	1.15	1.47
Tb	0.36	0.41	0.45	0.36	0.32	0.36	0.31	0.30
Dy	2.46	2.99	2.57	2.79	2.67	2.87	2.38	2.27
Y	12.6	15.7	14.1	15.0	16.9	15.9	13.4	13.1
Ho	0.43	0.70	0.62	0.66	0.65	0.59	0.51	0.54
Er	1.38	1.62	1.52	1.71	1.78	1.86	1.65	1.45
Tm	0.21	0.20	0.26	0.26	0.30	0.25	0.23	0.22
Yb	1.36	1.76	1.67	1.65	1.83	1.75	1.77	1.60
Lu	0.18	0.28	0.21	0.26	0.27	0.26	0.24	0.23
La _N /Yb _N	0.58	0.46	0.47	1.80	0.13	0.12	0.13	0.13
Ce _N /Yb _N	0.84	0.68	0.70	0.90	0.11	0.12	0.13	0.14
Nd _N /Yb _N	1.10	0.82	0.92	0.63	0.21	0.22	0.23	0.21
Ti/Eu	2125	2968	2584	3610	4909	4332	4957	4113

Tab.4B (continua)

Harzburgite

	MA11		MA24									
	cpx-2a1A core	cpx-2a1B core	cpx-3a1 core	cpx-1a1 rim	cpx-1a2 core	cpx-2a1 core	cpx-3a5 rim	cpx-3a6 core	cpx-5a3 core	cpx-5a4 rim		
Rb	<0.045	0.03	<0.044	<0.0246	<0.0160	<0.026	<0.022	<0.023	0.03	<0.0175		
Ba	<0.076	0.04	<0.061	0.06	<0.0233	0.40	0.04	0.05	0.06	0.27		
Th	0.36	0.39	0.40	2.03	1.87	2.00	2.21	2.32	2.48	2.35		
U	0.13	0.15	0.13	0.43	0.40	0.45	0.49	0.43	0.39	0.47		
Nb	0.35	0.25	0.19	0.06	0.05	0.09	0.06	0.04	0.06	0.06		
Ta	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		
K												
La	4.08	4.12	3.89	4.85	4.48	5.34	4.83	5.54	5.89	5.66		
Ce	7.63	7.88	7.54	8.38	8.02	8.90	8.34	8.75	9.24	9.03		
Pr	0.94	1.00	0.86	1.19	1.16	1.24	1.19	1.19	1.26	1.20		
Sr	122.8	119.3	115.0	87.8	87.9	92.5	89.8	93.1	95.4	94.2		
Nd	4.25	4.33	4.19	6.45	5.92	6.17	6.49	5.84	6.65	6.35		
P												
Zr	19.8	18.6	21.3	44.3	47.4	43.1	49.2	46.7	50.4	48.2		
Hf	0.26	0.18	0.09	0.48	0.40	0.38	0.39	0.38	0.39	0.44		
Sm	0.85	1.01	0.94	1.57	1.77	1.74	1.85	1.55	1.59	1.60		
Eu	0.38	0.34	0.39	0.53	0.59	0.66	0.67	0.59	0.65	0.64		
Ti	300	300	300	1968	2150	1776	2146	1980	1829	1820		
Gd	0.82	0.74	0.73	1.60	1.55	1.41	1.55	1.43	1.37	1.38		
Tb	0.11	0.12	0.13	0.21	0.23	0.24	0.23	0.21	0.23	0.22		
Dy	0.76	0.65	0.64	1.29	1.22	1.45	1.46	1.20	1.36	1.15		
Y	3.4	3.2	3.6	6.8	7.1	6.4	7.1	6.9	6.4	6.6		
Ho	0.12	0.12	0.13	0.26	0.27	0.31	0.29	0.25	0.27	0.25		
Er	0.40	0.35	0.32	0.55	0.78	0.70	0.75	0.77	0.72	0.70		
Tm	0.06	0.05	0.03	0.10	0.11	0.09	0.12	0.10	0.09	0.10		
Yb	0.36	0.42	0.41	0.78	0.72	0.70	0.69	0.77	0.66	0.73		
Lu	0.06	0.06	0.03	0.13	0.12	0.10	0.12	0.11	0.11	0.09		
La _N /Yb _N	7.70	6.74	6.45	4.22	4.23	5.20	4.74	4.87	6.05	5.27		
Ce _N /Yb _N	5.57	4.99	4.83	2.82	2.93	3.35	3.17	2.98	3.67	3.25		
Nd _N /Yb _N	4.16	3.68	3.60	2.91	2.90	3.11	3.30	2.67	3.54	3.06		
Ti/Eu	799	887	779	3693	3662	2712	3208	3373	2823	2835		

Tab.4B (continua)

Harzburgite

	MA26			MA42			cpx-6a2 rim				
	cpx-3a1 core	cpx-4a1A core	cpx-4a1B core	cpx-3a6 core	cpx-4a1 rim	cpx-4a2 core		cpx-5a5 core	cpx-5a8 rim	cpx-5a7 core	cpx-6a1 core
Rb	0.04	<0.048	<0.034	<0.0140	0.02	0.02	0.04	<0.0174	0.04	0.02	<0.0190
Ba	0.09	0.09	0.18	0.05	0.05	0.26	0.13	0.26	<0.058	<0.048	0.07
Th	0.22	0.18	0.16	0.47	0.61	0.56	0.50	0.49	0.43	0.52	0.45
U	0.06	0.05	0.03	0.11	0.14	0.11	0.13	0.14	0.14	0.14	0.16
Nb	1.13	0.71	0.82	0.03	0.03	0.04	0.04	0.06	0.03	0.04	0.02
Ta	0.14	0.09	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
K											
La	11.63	11.96	12.07	3.75	4.26	3.88	3.22	3.79	3.60	3.81	3.76
Ce	38.56	42.16	41.69	7.75	8.95	7.70	7.26	8.52	7.81	8.64	9.09
Pr	6.06	6.67	6.48	0.93	1.06	1.01	0.83	0.89	0.92	0.99	1.00
Sr	346.5	346.1	342.5	76.8	85.4	76.1	67.1	77.7	72.9	80.5	80.3
Nd	30.76	33.34	33.00	4.67	5.13	4.57	3.67	4.27	4.46	4.24	4.45
P											
Zr	157.2	181.9	179.7	16.1	16.9	15.9	13.3	13.1	12.8	13.0	12.6
Hf	1.76	3.03	3.08	0.60	0.61	0.55	0.48	0.56	0.48	0.52	0.46
Sm	7.70	8.53	8.55	1.42	1.33	1.18	1.45	1.37	1.20	1.17	1.19
Eu	2.68	3.05	3.37	0.52	0.51	0.53	0.51	0.53	0.53	0.51	0.50
Ti	180	120	120	3538	3126	3581	3692	3389	3443	3537	3379
Gd	6.84	6.49	7.11	1.16	1.64	1.59	1.28	1.50	1.12	1.37	1.06
Tb	1.03	1.11	1.17	0.23	0.26	0.24	0.24	0.20	0.20	0.20	0.20
Dy	5.51	5.72	5.95	1.47	1.63	1.60	1.32	1.23	1.31	1.23	1.26
Y	20.8	24.8	23.7	7.6	7.5	7.6	6.7	6.3	6.3	6.3	6.1
Ho	0.93	0.97	1.03	0.30	0.29	0.32	0.25	0.26	0.25	0.31	0.29
Er	2.19	2.28	2.39	0.78	0.80	0.72	0.71	0.74	0.62	0.74	0.62
Tm	0.25	0.29	0.28	0.11	0.10	0.12	0.08	0.08	0.11	0.12	0.12
Yb	1.61	1.90	1.43	0.92	0.76	0.73	0.70	0.69	0.57	0.70	0.67
Lu	0.19	0.16	0.21	0.12	0.09	0.12	0.08	0.08	0.09	0.11	0.11
La _N /Yb _N	4.91	4.28	5.73	2.78	3.80	3.59	3.11	3.72	4.31	3.68	3.83
Ce _N /Yb _N	6.29	5.83	7.66	2.22	3.09	2.76	2.71	3.23	3.61	3.22	3.58
Nd _N /Yb _N	6.73	6.18	8.13	1.79	2.37	2.19	1.84	2.17	2.77	2.12	2.35
Ti/Eu	67	39	36	6791	6166	6732	7239	6346	6533	6896	6798

Tab.4B (continua)

Harzburgite

	MA47				MA48					
	cpx-2a2 core	cpx-2a4 core	cpx-3a1 core	cpx-3a2 rim	cpx-4a1 core	cpx-4a3 rim	cpx-1a1 core	cpx-2a1* core	cpx-2a1* rim	cpx-3a1 core
Rb	<0.0158	0.02	0.04	0.01	<0.0144	<0.0183	0.02	<0.024	0.05	0.49
Ba	0.71	0.91	1.86	0.88	0.79	1.04	0.72	1.20	0.66	1.27
Th	2.52	2.42	2.72	3.02	4.81	4.85	2.50	2.25	2.97	2.39
U	0.62	0.68	0.68	0.75	1.08	1.02	0.85	0.62	1.01	0.71
Nb	0.04	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.62	0.47	0.66	0.60
Ta	0.00	<0.00260	<0.0039	0.00	<0.00266	<0.0024	0.04	0.02	0.05	0.02
K										
La	33.43	32.56	34.99	33.89	33.75	32.49	36.14	36.45	38.50	38.11
Ce	79.93	82.10	82.02	83.04	72.76	73.16	94.99	89.41	89.40	86.31
Pr	8.48	8.62	8.65	8.16	7.00	6.89	10.25	9.05	10.36	9.49
Sr	545.3	540.4	554.3	532.2	437.4	413.4	789.1	675.1	789.3	768.4
Nd	28.61	29.60	29.11	25.96	20.08	21.42	35.18	33.17	37.12	32.81
P										
Zr	5.2	5.3	4.9	4.7	5.8	5.2	13.5	8.8	23.8	10.2
Hf	0.21	0.16	0.23	0.15	0.15	0.19	0.12	0.10	0.27	0.11
Sm	3.28	4.18	3.22	2.65	2.16	2.24	4.23	3.57	4.19	3.61
Eu	1.06	0.97	0.97	0.87	0.53	0.57	1.42	1.06	1.39	1.14
Ti	136	135	157	165	219	172	180	180	180	180
Gd	1.56	1.72	1.72	1.08	0.93	0.93	2.09	2.28	2.60	1.99
Tb	0.18	0.23	0.18	0.14	0.12	0.12	0.26	0.21	0.29	0.24
Dy	0.94	1.05	1.01	0.65	0.48	0.63	1.13	0.90	1.33	0.90
Y	5.1	5.3	4.8	3.8	3.1	3.3	5.2	4.7	6.3	5.1
Ho	0.19	0.16	0.20	0.14	0.10	0.11	0.22	0.19	0.17	0.15
Er	0.54	0.44	0.43	0.34	0.31	0.26	0.49	0.42	0.56	0.30
Tm	0.07	0.07	0.07	0.04	0.05	0.04	0.08	0.07	0.08	0.06
Yb	0.50	0.59	0.48	0.40	0.36	0.48	0.49	0.42	0.62	0.40
Lu	0.08	0.09	0.09	0.04	0.07	0.08	0.07	0.07	0.08	0.06
La _N /Yb _N	45.42	37.55	49.31	56.99	64.40	46.17	49.80	59.52	42.25	64.40
Ce _N /Yb _N	41.99	36.61	44.69	53.98	53.68	40.20	50.61	56.45	37.93	56.39
Nd _N /Yb _N	20.16	17.70	21.28	22.64	19.87	15.79	25.14	28.09	21.13	28.75
Ti/Eu	129	139	162	191	412	305	127	170	129	158

Tab.4B (continua)

Harzburgite

MA68

	cpX-1a3 core	cpX-1a4 rim	cpX-3a3 core	cpX-5a1 core	cpX-5a2 core	cpX-6a1* rim	cpX-6a1* core	cpX-6a3 rim
Rb	0.02	<0.023	0.03	0.04	<0.027	0.04	<0.029	<0.025
Ba	0.70	0.75	0.50	0.77	0.87	0.73	0.82	0.27
Th	1.20	1.16	1.30	1.15	1.19	1.24	1.24	1.09
U	0.31	0.25	0.33	0.27	0.31	0.35	0.29	0.24
Nb	1.12	0.90	1.02	0.91	1.06	1.07	1.08	0.81
Ta	0.17	0.13	0.20	0.11	0.16	0.21	0.15	0.11
K								
La	18.43	18.09	19.32	17.47	18.81	19.06	18.80	17.11
Ce	39.76	40.19	42.83	38.68	40.14	42.35	42.09	36.86
Pr	5.26	5.18	5.49	4.98	5.05	5.34	5.46	4.90
Sr	393.5	394.6	406.0	389.6	395.8	401.0	408.9	398.7
Nd	23.26	24.10	24.48	22.87	23.67	23.61	23.91	22.01
P								
Zr	144.1	136.7	168.5	149.7	156.9	178.4	171.1	139.5
Hf	2.40	2.34	3.59	3.41	3.15	4.00	3.78	3.65
Sm	5.58	5.68	5.73	5.30	5.22	5.58	5.73	5.24
Eu	1.92	1.88	1.97	1.72	1.81	1.82	1.84	1.75
Ti	605	569	684	622	635	707	666	571
Gd	4.62	4.19	4.69	4.52	4.86	4.57	4.99	4.02
Tb	0.62	0.71	0.65	0.64	0.69	0.63	0.69	0.62
Dy	3.41	3.02	3.43	2.93	3.26	3.34	3.48	3.00
Y	12.8	13.4	13.5	12.8	13.5	13.5	13.4	12.5
Ho	0.53	0.57	0.61	0.51	0.58	0.56	0.54	0.50
Er	1.18	1.07	1.19	1.07	1.11	1.09	1.24	1.07
Tm	0.17	0.14	0.14	0.13	0.13	0.15	0.12	0.12
Yb	0.81	0.59	0.72	0.66	0.78	0.76	0.72	0.64
Lu	0.11	0.08	0.10	0.09	0.11	0.09	0.11	0.11
La _N /Yb _N	15.44	20.97	18.25	17.93	16.34	17.04	17.74	18.13
Ce _N /Yb _N	12.88	18.01	15.65	15.35	13.48	14.64	15.35	15.10
Nd _N /Yb _N	10.10	14.49	11.99	12.17	10.66	10.94	11.70	12.10
Ti/Eu	315	303	347	361	351	388	362	327

Tab.4B (continua)

Olivin-websterite

MA18

	cpX-1a1 core	cpX-2a1 rim	cpX-2a4 core	cpX-2a2 core	cpX-3a1 core	cpX-3a2 rim	cpX-4a5 rim	cpX4a4 core
Rb	0.02	0.01	<0.0202	0.06	0.07	0.10	<0.0241	<0.0182
Ba	0.13	<0.033	0.26	0.05	1.63	1.45	<0.095	0.05
Th	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	<0.0024	0.00	<0.0038
U	0.00	0.00	0.00	<0.00	0.00	0.00	<0.00	<0.0021
Nb	0.01	<0.0062	0.01	0.01	0.01	<0.0075	<0.0085	0.02
Ta	0.00	<0.00	<0.00	<0.00	<0.0023	<0.00	0.00	<0.0027
K								
La	0.31	0.26	0.26	0.26	0.31	0.28	0.21	0.22
Ce	1.31	1.31	1.30	1.29	1.33	1.43	1.27	1.37
Pr	0.29	0.28	0.30	0.29	0.29	0.30	0.33	0.31
Sr	35.7	33.8	34.6	34.7	34.5	35.7	34.4	34.7
Nd	2.22	2.21	2.20	2.38	2.41	2.18	2.06	2.08
P								
Zr	14.8	15.6	15.6	16.9	16.1	15.2	14.8	14.3
Hf	0.57	0.58	0.75	0.67	0.66	0.71	0.52	0.56
Sm	1.15	1.06	1.10	1.17	1.16	1.34	1.12	1.08
Eu	0.68	0.52	0.58	0.68	0.62	0.62	0.51	0.55
Ti	2535	2406	2651	2663	2545	2585	2472	2423
Gd	1.95	1.91	1.84	1.92	1.70	1.64	1.83	1.53
Tb	0.37	0.41	0.41	0.39	0.39	0.39	0.32	0.34
Dy	2.73	2.68	2.77	2.81	2.62	2.72	2.52	2.34
Y	15.0	15.1	15.7	15.7	15.2	15.2	13.6	13.3
Ho	0.63	0.59	0.69	0.65	0.65	0.60	0.55	0.55
Er	1.63	1.78	1.65	1.80	1.65	1.76	1.64	1.57
Tm	0.22	0.20	0.24	0.26	0.23	0.25	0.21	0.20
Yb	1.95	1.71	1.81	1.80	1.84	1.87	1.68	1.39
Lu	0.27	0.22	0.24	0.27	0.23	0.23	0.22	0.23
La _N /Yb _N	0.11	0.10	0.10	0.10	0.11	0.10	0.08	0.11
Ce _N /Yb _N	0.18	0.20	0.19	0.19	0.19	0.20	0.20	0.26
Nd _N /Yb _N	0.40	0.46	0.43	0.47	0.46	0.41	0.43	0.53
Ti/Eu	3728	4601	4586	3945	4118	4203	4877	4381

Tab.4B (continua)

Rock type	Sample	Analysed fraction	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	Analysed fraction	$^3\text{He}/^4\text{He}$ (R/Ra)	dR/Ra
Lhz. Poor-cpx	MA 8	cpx	0.70290	0.51330	-	-	-	-	-	-
Lhz. Poor-cpx	MA 9	-	-	-	-	-	-	olivine	7.8	0.5
Lhz. Poor-cpx	MA 35	cpx	0.70311	0.51366	19.02	15.59	38.65	olivine	8.0	0.8
Lhz. Poor-cpx	MA 38	cpx	0.70270	0.51338	-	-	-	olivine	7.1	0.1
Lhz. Poor-cpx	MA 40	cpx	0.70256	0.51301	18.51	15.53	38.09	-	-	-
Lherz	MA 10	cpx	0.70262	0.51379	19.04	15.63	38.69	-	-	-
Lherz	MA 15	cpx	0.70240	0.51327	19.34	15.58	38.89	olivine	7.7	0.3
Lherz	MA 27	cpx	0.70220	0.51322	19.26	15.62	38.96	-	-	-
Lherz	MA 67	cpx	0.70301	-	-	-	-	-	-	-
Harz.	MA 11	cpx	0.70326	0.51274	18.46	15.67	38.42	olivine	7.4	0.3
Harz.	MA 19	cpx	0.70276	0.51304	18.38	15.21	37.58	-	-	-
Harz.	MA 24	cpx	-	0.51278	-	-	-	olivine	7.4	0.2
Harz.	MA 26	cpx	0.70305	0.51291	-	-	-	olivine	7.2	0.0
Harz.	MA 29	cpx	0.70454	0.51219	-	-	-	-	-	-
Harz.	MA 42	cpx	0.70268	0.51305	-	-	-	-	-	-
Harz.	MA 47	cpx	0.70304	0.51289	-	-	-	-	-	-
Harz.	MA 48	cpx	0.70297	0.51297	18.52	15.58	38.33	-	-	-
Harz.	MA68	cpx	0.70305	0.51298	-	-	-	olivine	7.3	0.1
Alkaline basalt	MA54	bulk rock	0.70290	0.51298	-	-	-	-	-	-
Alkaline basalt	MA57	bulk rock	0.70310	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 5B (Analisi isotopiche dei noduli di Mega)

BIBLIOGRAFIA

Abebe, T., Mazzarini, F., Innocenti, F., Manetti, P. (1998b). The Yerer-Tullu Wellel volcanotectonic lineament: a transtensional structure in central Ethiopia and the associated magmatic activity. *Journal African Earth Sciences*, vol. **26**, pp. 135-150.

Acocella, V., Korme, T. (2002). Holocene extension direction in the axial zone of the main Ethiopian Rift. *Terra Nova*, vol. **14**, pp. 191-197.

Acocella, V., Cifelli, F., Funiciello, R. (2001). The control of overburden thickness on resurgent domes: insights from analogue models. *J. Volcanol Geotherm Res.*, vol. **111**, pp. 137–153

Acton, G., Tessema, A., Jackson, M., Bilham, R. (2000). The tectonic and geomagnetic significance of paleomagnetic observations from volcanic rocks from central Afar. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. **180**, pp. 225-241.

Adam, J. & Green, T. (2001). Experimentally determined partition coefficients for minor and trace elements in peridotite minerals and carbonatitic melt, and their relevance to natural carbonatites. *Eur. J. Mineral.*, vol. **13**, pp. 815-827.

Ade-Hall, F.M., Reynolds, P.H., Dagley, P., Musset, A.G., Hubbard, T.B., Klitsch, E. (1974). Geophysical studies of North African Cenozoic volcanic areas 1 – Haruj Assuad, Libya. *Canad. J. Earth Sci.*, vol. **11**, pp. 998-1006.

Agard, J. (1956). Les Ankaratrites et le volcanisme récent de la région de Zabzat Haut Atlas de Midelt. *Notes Serv.Géol. Maroc*, vol. **15**, pp. 109-117.

Aït Malek, H., Gasquet, D., Bertrand, J.M. & Leterrier, J. (1998). Géochronologie U-Pb sur zircon de granitoïdes éburnéens et panafricains dans les boutonnières d'Igherm, du Kerdous et du Bas Drâa (anti-Atlas occidental, Maroc). *Compte Rendu de l'Academie des Sciences de Paris, Sciences de la Terre et des planètes / Earth and Planetary Sciences*, vol. **327**, pp. 819-826.

Aït-Hamou, F., Dautria, J.M., Cantagrel, J.M., Dostal, J., Briquieu, L. (2000). Nouvelles données géochronologiques et isotopiques sur le volcanisme cénozoïque de l'Ahaggar

(Sahara algérien): des arguments en faveur d'un panache. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, vol. **330**, pp. 829-836.

Arai, S. (1994). Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: review and interpretation. *Chem Geol*, vol. **111**, pp. 191-204

Arboleya, M.L., Teixell, A., Charroud, M., Julivert, M. (2004). A structural transect through the High and Middle Atlas of Morocco. *J. of African Earth Science*, vol. **39**, pp. 319-327.

Azzouni-Sekkal, A., Bonin, B., Benhallou, A., Yahiaoui, R. & Liégeois, J.-L. (2007). Tertiary alkaline volcanism of the Atakor Massif (Hoggar, Algeria). In: Beccaluva L., Bianchini G., Wilson M. Eds. "Cenozoic volcanism in the Mediterranean Area" *GSA (Geological Society of America) Special Paper*, vol. **418**, pp. 321-340.

Bailey, D.K (1974). Continental rifting and magmatism. In: *Sorensen, H Ed., The alkaline rocks*, 148-159. Wiley & Sons Ltd, New York. Vincent, P.M. (1970). The evolution of the Tibesti volcanic Province, Eastern Sahara. In: *Clifford & Gass* (1970) q.v., pp. 301-319.

Baker, J., Snee, L., Menzies, M. (1996). A brief Oligocene period of flood volcanism in Yemen: implication for the duration and rate of continental flood volcanism at the Afro-Arabian triple junction. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. **138**, pp. 39-55.

Barberi, F., Ferrara, G., Santacroce, R., Treuil, M. & Varet, J. (1975). A transitional basalt-pantellerite sequence of fractional crystallization, the Boina centre (Afar Rift, Ethiopia). *Journal of Petrology*, vol. **16**, pp. 22-56.

Beccaluva, L., Siena, F., Coltorti, M., Di Grande, A., Lo Giudice, A., Macciotta, G., Tassinari, R., Vaccaro, C. (1998). Nephelinitic to tholeiitic magma generation in a transtensional tectonic setting: an integrated model for the Iblean volcanism, Sicily. *Journal of Petrology*, vol. **39**, pp. 1547-1576.

Beccaluva, L., Bianchini, G., Coltorti, M., Perkins, W.T., Siena, F., Vaccaro, C., Wilson, M. (2001). Multistage evolution of the European lithospheric mantle: new evidence from Sardinia peridotite xenoliths. *Contrib. Mineral. Petrol.*, vol. **142**, **2**, pp. 284-297.

Beccaluva, L., Bianchini, G., Bonadiman, C., Siena, F., Vaccaro, C. (2004). Coexisting anorogenic and subduction-related metasomatism in mantle xenoliths from the Beltic Cordillera (southern Spain). *Lithos*, vol. **75**, pp. 67-87.

Beccaluva, L., Azzouni-Sekkal, A., Benhallou, A., Bianchini, G., Ellam, R.M., Marzola, M., Siena, F., Stuart, F.M. (2007). Intracratonic asthenosphere upwelling and lithosphere rejuvenation beneath the Hoggar swell (Algeria): Evidence from HIMU metasomatised lherzolite mantle xenoliths. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. **260**, pp. 482-494.

Beccaluva, L., Bianchini, G., Wilson, M. (2007b). Cenozoic Volcanism in the Mediterranean Area. *Geological Society of America, Special Papers*, vol. **260**, pp. 358.

Beccaluva, L., Bianchini, G., Ellam, R., Marzola, M., Oun, K. M., Siena, F., Stuart, F.M. (2008). The role of HIMU metasomatic components in the African lithospheric mantle: petrological evidence from the Gharyan peridotite xenoliths, NW Libya, in M. Coltorti, M. Grégoire (Eds.) “Mantle metasomatism in intra-plate and suprasubduction settings”, *Geological Society, Special Publication*, vol. **293**, pp. 253-277.

Beccaluva L., Bianchini G., Natali C., Santato A., Siena F. (2009). Continental Flood Basalts and mantle xenoliths from Ethiopia: inferences on mantle processes from plume to rift settings. Workshop “Alpine Ophiolites and Modern Analogues”, Parma, 30/09/09-2/10/09.

Berckhemer, H., Baier, B., Bartelsen, H., Behle, A., Burckhardt, H., Gebrande, H., Markris, J., Menzel, H., Miller, H., Vees, R. (1975). Deep seismic soundings in the Afar region and on the highland of Ethiopia, in *Pilger A., Rosler A. Eds., Afar Depression of Ethiopia*, Schweizerbart, Stuttgart, pp. 89-107.

Berhe, S. & Kazmin, V. (1978). Nazret sheet NC37–15: Addis Ababa. *Ethiopian Institute of Geological Surveys*, scale 1:250 000.

Bianchini, G., Clocchiatti, R., Coltorti, M., Joron, J.L., Vaccaro, C. (1998). Petrogenesis of mafic lavas from the northernmost sector of the Iblean District (Sicily). *Eur. J. Mineral.*, vol. **10**, pp. 301-315.

- Bianchini, G., Beccaluva, L., Bonadiman, C., Nowell G., Pearson G., Siena F., Wilson M.** (2007). Evidence of diverse depletion and metasomatic events in harzburgite-lherzolite mantle xenoliths from the Iberian plate (Olot, NE Spain): implications for lithosphere accretionary processes. *Lithos*, vol. **94**, pp. 25-45.
- Bigazzi, B., Bonadonna, F.P., Di Paola, G.M., Giuliani, A.** (1993). K-Ar and fission track ages of the last volcano tectonic phase in the Ethiopian Rift Valley (Tullu Moye area). in *Geology and mineral resources of Somalia and surroundings regions*, Istituto Agronomico Oltremare, Firenze, Relazioni Monografie, vol. **113**, pp. 311-322.
- Bijward, H. & Spakman, W.** (1999). Tomographic evidence for a narrow whole mantle plume below Iceland, Earth Planet. Sci., *Letters.*, vol. **166**, pp. 121-126.
- Bilham, R., Bendick, R., Larson, K., Braun, J., Tesfaye, S., Mohr, P., Asfaw, L.** (1999). Secular and tidal strain across the Ethiopian rift. *Geophysical Research Letters*, vol. **27**, pp. 2789-2984.
- Boccaletti, M., Getaneh, A., Mazzuoli, R., Tortorici, L.** (1992). The Main Ethiopian Rift: an example of oblique rifting. *Annales Tectonicae*, vol. **6**, pp. 20-25.
- Boccaletti, M., Mammo, T., Bonini, M., Abebe, B.** (1994). Seismotectonics of East African Rift System: evidences of active oblique rifting. *Annales Tectonicae*, vol. **8**, pp. 87-99.
- Boccaletti, M., Bonini, M., Mazzuoli, R., Abebe, B., Piccardi, L., Tortoric, L.** (1998). Quaternary oblique extensional tectonics in the Ethiopian Rift (Horn of Africa). *Tectonophysics*, vol. **287**, pp. 97-116.
- Boccaletti, M., Bonini, M., Mazzuoli, R., Trua, T.** (1999). Pliocene-Quaternary volcanism and faulting in the northern Main Ethiopian Rift (with two geological maps at scale 1:50000). *Acta Vulcanologica*, vol. **11**, pp. 83-97.
- Bonini, M., Souriot, T., Boccaletti, M., Brun, J.P.** (1997). Successive orthogonal and oblique extension episodes in a rift zone: Laboratory experiments with application to the Ethiopian Rift. *Tectonics*, vol. **16**, pp. 347-362.

Bott, W., Smith, B., Oakes, G., Sikander, A., Ibrahim, A. (1991). The tectonic framework and regional hydrocarbon prospectivity of the Gulf of Aden. *Journal of Petroleum Geology*, vol. **15**, pp. 211-243.

Brey, G.P. & Köhler, T.P. (1990). Geothermobarometry in four phases Iherzolites II. New thermobarometers and practical assessment of existing thermobarometers. *Journal of Petrology*, vol. **31**, pp. 1353-1378.

Buikin, A., Trieloff, M., Hopp, J., Althaus, T. & Korochantseva, E. (2005). Noble gas isotopes suggest deep mantle plume source of late Cenozoic mafic alkaline volcanism in Europe. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. **230**, pp. 143-162.

Busrewil, M.T., Wadsworth, W.J. (1980a). Preliminary chemical data on the volcanic rocks of al Haruj area: Central Libya. In: *The geology of Libya*. (Volume III). Elsevier, pp. 1077 – 1080.

Busrewil, M.T., Wadsworth, W.J. (1980b). The basanitic volcanoes of the Gharyan area, NW Libya. In: *The geology of Libya*. (Volume III). Elsevier, pp. 1095 – 1105.

Busrewil, M.T., Oun, K. (1991). Geochemistry of the Tertiary alkaline rocks of Jabal al Hasawinah, West – Central Libya. In: *The geology of Libya*. (Volume VII). Elsevier, pp. 2587 – 2598.

Carlson, R.W. (1995). Isotopic inferences on the chemical structure of the mantle. *J. Geodynamics*, vol. **20**, pp. 365-386.

Charlot, R., Tisserand, D., Vidal, P. & Vidal, F. (1967). Rapport technique et quelques résultats. Serv. Carte Géol. Maroc, pp. 126-137.

Choubert, G. (1963). Histoire géologique du Précambrien de l'Anti-Atlas. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*, vol. **162**, pp.352.

Cochran, J. (1983). A model for development of the Red Sea. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, vol. **67**, pp. 41-69.

Coltorti, M., Bonadiman, C., Hinton, R.W., Siena, F., Upton, B.G.J. (1999). Carbonatite metasomatism of the oceanic Upper Mantle: evidence from clinopyroxenes

and glasses in ultramafic xenoliths of Grande Comore, Indian Ocean. *Journal of Petrology*, vol. **40**, pp. 133-165.

Coltorti, M., Beccaluva, L., Bonadiman, C., Salvini, L., Siena, F. (2000). Glasses in mantle xenoliths as indicators of metasomatic agents. *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. **183**, pp. 303-320.

Coltorti, M., Beccaluva, L., Bonadiman, C., Faccini, B., Ntaflos, T., Siena, F. (2004). Amphibole genesis via metasomatic reaction with clinopyroxene in mantle xenoliths from Victoria Land, Antarctica. *Lithos*, vol. **75**, pp. 115-139.

Coltorti, M., Downes, H., Piccardo, G.B. (2007). Melting, metasomatism and metamorphic evolution in the lithospheric mantle. *Lithos Special Issue*, vol. **94**, pp. 247 In: ISSN 0024-4937; *Geochemistry and Geophysics*, 13/55, I.F. 2.24, 2005.

Coltorti, M. & Gregoire, M. (2008). "Metasomatism in oceanic and continental lithospheric mantle". *Journal Geological Society of London Sp.Is.* vol. **293**, pp. 361. In: ISSN 0016-7649 *Geosciences Multidisciplinary* 20/129; I.F. 2.097, 2005.

Coltorti, M., Downes, H., Grégoire, M., O'Reilly, S.Y. (2009). Petrological evolution of the European Lithospheric Mantle: from Archean to present day. *J.Petrol.*, vol. **50**, **7**, pp. 223.

Coltorti, M., Gregoire, M., Scambelluri, M. (2009). "Subduction vs Intraplate lithospheric mantle: Agents and Processes". *Lithos Special Issue*, vol. **107**, n.1-2, 133 pg. ISSN 0024-4937.

Conticelli, S., Sintoni, M. F., Abebe, T., Mazzarini, F., Manetti, P. (1999). Petrology and geochemistry of ultramafic xenoliths and host lavas from the Ethiopian Volcanic Province: An insight into the upper mantle under eastern Africa. *Acta Vulcanol.*, vol. **11**, pp. 143–159.

Dautria, J.M., Dupuy, C. Takherist D., Dostal, J. (1992). Carbonate metasomatism in the lithospheric mantle: peridotitic xenoliths from a melilititic district of the Sahara basin. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, vol. **111**, pp. 37-52.

Davaille, A., Stutzmann, E., Silveira, G., Besse, J., Courtillot, V. (2005). Convective patterns under the Indo-Atlantic « box », *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. **239**, pp. 233-252.

Davidson, A. & Rex, D.C. (1980). Age of volcanism and rifting in Southwestern Ethiopia, *Nature*, vol. **283**, pp. 657–658.

Dawson, J.B. and Smith, J.V. (1988). Metasomatised and veined uppermantle xenoliths from Pello Hill, Tanzania: evidence for anomalously-light mantle beneath the Tanzanian sector of the East African Rift Valley. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. **100**, pp. 510-527.

Dawson, J.B. (1999). Melting and metasomatism in spinel peridotite xenoliths from Labait, Tanzania. In: Guernsey, J.J., Guernsey, J.L., Pascof, M.D., Richardson, S.H. (eds.). *Proceedings of the 7th International Kimberlite Conference, Cape Town, 1998*, Vol. I. Red Roof Design, Cape Town, pp. 164-173.

Dawson, J.B. (2002). Metasomatism and partial melting in upper-mantle peridotite xenoliths from the Lashaine volcano, northern Tanzania. *Journal of Petrology*, vol. **43**, pp. 1749-1777.

Delpech, G., Grégoire, M., O'Reilly, S.Y., Cottin, J.Y., Moine, B., Michon, G., Giret, A. (2004). Feldspar from carbonate-rich silicate metasomatism in the shallow oceanic mantle under Kerguelen Islands (South Indian Ocean). *Lithos*, vol. **75**, pp. 209-237.

Dick, H.J.B. & Bullet, T. (1984). Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. **86**, pp. 54-76.

Dobosi, G., Jenner, G.A. (1999). Petrologic implications of trace element variation in clinopyroxene megacrysts from the Nógrád volcanic province, North Hungary: a study by laser ablation microprobe-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Lithos*, vol. **46**, pp. 731-749.

Downes, H., Reichow, M.K., Mason, P.R.D., Beard, A.D., Thirlwall, M.F. (2003). Mantle domains in the lithosphere beneath the French Massif Central: trace element and isotopic evidence from mantle clinopyroxenes. *Chemical Geology*, vol. **200**, pp. 71-87.

Du Dresnay, R. (1988). Recent data on the geology of the Middle Atlas (Morocco). In: *Jacobshagen, H. Ed., The Atlas system of Morocco*, 293-320. Springer- Verlag, Berlin.

Dunai, T.J., Porcelli, D. (2002). The storage and transport of noble gases in the subcontinental mantle. In: Porcelli, D., Ballentine, C., Wieler, R. (Eds), “*Reviews in Mineralogy: Noble gases in Cosmochemistry and Geochemistry*”. Min. Soc. Amer., vol. **47**, pp. 371-409.

Duncan, R.A., Hargraves, R.B., Brey, G.P. (1978). Age, palaeomagnetism and chemistry of melilitite basalts in the southern Cape, South Africa. *Geological Magazine*, vol. **115**, pp. 317-327.

Ebinger, C., Bechtel, T., Forsyth, D., Bowin, C. (1989). Effective elastic plate thickness beneath the East African and Afar plateaus and dynamic compensation of the uplifts. *Journal of Geophysical Research*, vol. **94**, pp. 2883-2901.

Ebinger, C.J., Yemane, T., WoldeGabriel, G., Ayele, J.L., Walter, R.C. (1993). Late Eocene-Recent volcanism and faulting in the southern main Ethiopian rift, *Journal Geological Society London*, vol. **150**, pp. 99-108.

Ebinger, C. & Sleep, N. (1998). Cenozoic magmatism throughout East Africa resulting from impact of a single plume. *Nature*, vol. **395**, pp. 788.

Ebinger, C. & Casey, M. (2001). Continental break-up in magmatic provinces: an Ethiopian example. *Geology*, vol. **29**, pp. 527-530.

El Azzouzi, M., Griffiths, J.B., Bellon, H., Maury, R.C., Piqué, A., Foucarde, S., Cotten, J. & Hernandez, J. (1999). Évolution des sources du volcanisme marcai au cours du Néogène. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris, Sciences de la Terre et des planètes / Earth and Planetary Sciences*, vol. **329**, pp. 95-102.

Ellam, R.M. (2006). New constraints on the petrogenesis of the Nuanetsi picrite basalts from Pb and Hf isotope data. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. **245**, pp. 153–161.

Ennih, N. & Liégeois, J.P. (2001). The Moroccan Anti-Atlas: the West African craton passive margin with limited Pan-African activity. Implications for the northern limit of the craton. *Precambrian Research*, vol. **112**, pp. 289-302.

Ernst, R.E. & Buchan, K. L. (2001). Mantle plumes: their identification through time. *GSA Special Paper*, vol. **352**, pp. 593.

Fedan, B. (1989). Evolution géodynamique d'un bassin intraplaque sur décrochements: Le Moyen Atlas (Maroc) Durant le Méso-Cénozoïque. *Trav. Inst. Scient., Rabat, Morocco. Serie Geolog. Et Geogr. Phys.*, vol. **18**, pp. 144.

Fekkak, A., Boualoul, M., Badra, L., Amenzou, M., Sequaque, A. & El Imrani, I.E. (1999). Origine et contexte géotectonique des dépôts détritiques du Groupe néoprotozoïque inférieur de Kelâat Mgouna (Anti-Atlas oriental, Maroc). *Journal of African Earth Sciences*, vol. **30**, pp. 295-311.

Foley, S.F., Jackson, S.E., Fryer, B.J., Greenough, J.D., Jenner, G.A. (1996). Trace element partition coefficients for clinopyroxene and phlogopite in an alkaline lamprophyre from Newfoundland by LAM-ICP-MS. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. **60**, pp. 629-638.

Foulger, G. R., Natland, J. H., Anderson, D. L. (2005). Genesis of the Iceland Melt Anomaly by Plate Tectonic Processes, in Foulger, G.R., Natland, J.H., Presnall, D.C, and Anderson, D.L., eds., *Plates, Plumes & Paradigms*, Boulder, CO, *Geological Society of America Special Paper*, vol. **388**, pp. 595-626.

Foulger, G.R., Jurdy, D.M. (2007). Plates, Plumes and Planetary Process. *Geological Society of America, Special Papers*, vol. 430, pp. 997.

GEMOC (2005).

<http://www.es.mq.edu.au/gemoc/Annualreport/annrep2005/pdfversion05.html>

George, R., Ogers, N., & Kelly, S. (1998). Earliest magmatism in Ethiopia: evidence for two mantle plumes in one flood basalt province. *Geology*, vol. **26**, pp. 923-926.

Gibson, I.L. (1969) The structure and volcanic geology of an axial part of the Ethiopian Rift. *Tectonophysics*, vol. **8**, pp. 561-565.

Gibson, I.L. & Tazieff H. (1970). The structure of the Afar and the northern part of the Ethiopian Rift. *Philosophical Transactions Royal Society London*, vol. **267**, pp. 331-338.

Haggerty, S.E. (1991). Oxide mineralogy of the upper mantle. In *Lindsey, D.H. Ed.*, Oxide Minerals: Petrologic and Magnetic Significance. *Reviews of Mineralogy*, vol. **25**, pp. 355-416.

Hardson, B.S., Fitton, J.G., Ellam, R.M, Pringle, M.S. (1997). Rift relocation – a geochemical and geochronological investigation of a palaeo-rift in northwest Iceland. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. **153**, pp. 181-196.

Harmand, C. & Cantagrel, J.M. (1984). Le volcanisme alcalin Tertiaire et Quaternaire du Moyen Atlas (Maroc): chronologie K/Ar et cadre géodynamique. *Journal of African Earth Sciences*, vol. **2**, 1, pp. 51-55.

Harmand, C. & Moukadiri, A. (1986). Synchronisme entre tectonique compressive et volcanisme alcalin: exemple de la province Quaternaire du Moyen Atlas (Maroc). *Bulletin de la Société des Géologie de France*, vol. **4**, pp. 595-603.

Henjes-Kunst, F., Altherr, R., Baumann, A. (1990). Evolution and composition of the lithospheric mantle underneath the western Arabian peninsula: constraints from Sr–Nd isotope systematics of mantle xenoliths. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. **105**, pp. 460-472.

Hofmann, C., Courtillot, V., Feraud, F., Rochette, P., Yirgu, G., Ketefo, E., Pik, R. (1997). Timing of the Ethiopian flood basalt event: implications for plume birth and global change. *Nature*, vol. **389**, pp. 838-840.

Hilton, D.R., McPherson, C.G. & Elliot, T.R. (2000). Helium isotope ratios in mafic phenocryst and geothermal fluid from La Palma, the Canary Islands (Spain): implications for HIMU mantle source. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. **64**, pp. 2119-2132.

Holmes, A. (1940). Basaltic lavas of S. Kivu, Belgian Congo. *Geol. Mag.*, vol.77, pp. 89-101.

Janney, P.E., Le Roex, A.P., Carlson, R.W., Viljoen, K.S. (2002). A Chemical and Multi-Isotope Study of the Western Cape Olivine Melilitite Province, South Africa: Implications for the Sources of Kimberlites and the Origin of the HIMU Signature in Africa. *J. Petrol.*, vol. 43, pp. 2339-2370.

Jeffries, T.E., Perkins, W.T., Pearce, N.J.G. (1995). Measurement of trace element in basalts and their phenocrysts by laser probe microanalysis inductively coupled plasma mass spectrometry (LPMA-ICP-MS). *Chemical Geology*, vol. 121, pp. 131-144.

Jeremine, E. (1949). Etude pétrographique des roches éruptives et métamoéphiqes du massif de Bou-Agrao. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*, vol. 74, 2, pp. 120-147.

Johnson, K.T., Dick, H.J.B., Shimizu, N. (1990). Melting in the oceanic upper mantle: an ion microprobe study of diopsides in abyssal peridotites. *J. Geoph. Res.*, vol. 95, pp. 2661-2678.

Kabbai, A. & Kombe, M. (1977). Le domaine atlasique: présentation. *Note et Mém. Serv. Géol. Maroc*, vol. 231, pp. 29-36.

Kaeser, B., Kalt, A., Pettke, T. (2006). Evolution of the lithospheric mantle beneath the Marsabit volcanic field (northern Kenya): constraints from textural, $P-T$ and geochemical studies on xenoliths. *Journal of Petrology*, vol. 47, pp. 2149-2184.

Kazimin, V. (1980). Transform faults in the East African Rift System. In: Geodynamic Evolution of the Afro-Arabian Rift System. *Accademia Nazionale dei Lincei, Atti dei Convegna Lincei*, vol. 47, pp. 65-73.

Kendall, J.-M., Pilidou, S., Keir, D., Bastow, I.D., Stuart, G.W., Ayele, A. (2006). Mantle upwellings, melt migration and the rifting of Africa: Insights from seismic anisotropy. In: Yirgu, G., Ebinger, C.J., Maguire, P.K.H. (eds) The Afar Volcanic Province within the East African Rift System. *Geological Society, London, Special Publication*, vol. 259, pp. 55-72

Knox, R., Nyblade, A., Langston, C. (1999). Upper mantle S velocities beneath Afar and western Saudi Arabia from Rayleigh wave dispersion, *Geophysical Research Letters*, vol. **25**, pp. 4233-4236.

Kohler, T.P. & Brey, G.P. (1990). Calcium exchange between olivine and clinopyroxene calibrated as a geobarometer for natural peridotites from 2 to 60 kbar with applications. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. **54**, pp. 2375-2388

Kröner, A. (1973). Comments on "Is the African plate stationary?". *Nature*, vol. **243**, pp. 29-30.

Lavile, E. & Piqué, A. (1991). La distension crustale atlantique au Maroc au début du Mésozoïque: le rejeu des structures hercyniennes. *Bulletin de la Société des Géologie de France*, vol. **162**, **6**, pp. 1161-1171.

Le Pichon, X., Francheteau, J. (1978). A plate-tectonic analysis of the Red Sea-Gulf of Aden area. *Tectonophysics*, vol. **46**, pp. 369-406.

Leblanc, M. (1981). Ophiolites précambriennes et gîtes arséniés de cobalt (Bou-Azzer, Maroc). *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc.*, vol. **280**, pp. 306.

Liégeois, J.P., Benhallou, A., Azzouni-Sekkal, A., Yahiaoui, R., Bonin, B. (2005). The Hoggar swell and volcanism: Reactivation of the Precambrian Tuareg shield during Alpine convergence and West African Cenozoic volcanism. In Foulger, G.R., Natland, J.H., Presnall, D.C. & Anderson, D.L. (eds), Plates, Plumes and Paradigms. *Geological Society of America Special Paper*, vol. **388**, pp. 379-400.

Lucassen, F., Franz, G., Romer, R., Pudlo, D. & Dulski, P. (2008). Nd, Pb, and Sr isotope composition of Late Mesozoic to Quaternary intra-plate magmatism in NE Africa (Sudan, Egypt): high-m signatures from the mantle lithosphere. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. **156**, pp. 765-784.

Manighetti, I., Tapponier, P., Courtillot, V., Gruszow, S., Gollot, P-Y. (1998), Propagation of rifting along the Arabia-Somalia plate boundary. *Journal of Geophysical Research*, vol. **102**, pp. 2681-2710.

Mattauer, M., Tapponnier, P. & Proust, F. (1977). Sur les mécanismes de formation des chaînes du Maroc. *Bullettin de la Société des Géologie de France*, vol. **19**, **3**, pp. 521-526.

McDonough W.F. & Sun S.S. (1995). Composition of the Earth. *Chemical Geology*, vol. **120**, pp. 223-253.

McKenzie, D.P., Davier, D., Molnar, P. (1970). Plate tectonics of the Red Sea and East Africa. *Nature*, vol. **226**, pp. 243-248.

Menzies, M., Gallagher, K., Yelland, A., Hurfrod, A. (1997). Volcanic and non-volcanic rifted margins of the Red Sea and Gulf of Aden. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. **61**, pp. 2511-2527.

Meyer, W., Pilger, A., Rosler, A., Stets, J. (1975). Tectonic evolution of the northern part of the Main Ethiopian Rift in Southern Ethiopia. in *Pilger A., Rosler A. Eds., Afar depression, Ethiopia*, Schweizerbart, Stuttgart, pp. 352-362.

Michard, A. (1976). Éléments de géologie marocaine. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*, vol. **252**, pp. 420.

Mohr, P. (1983). Volcanotectonic aspects of the Ethiopian Rift evolution. *Bull. Centre Recherches Elf Aquitaine Expl. Prod.*, vol. **7**, pp. 175-189.

Mohr, P.A. (1962). The Ethiopian Rift System. *Bull. Geophys. Observ. Addis Ababa*, vol. **5**, pp. 33-62.

Mohr, P.A. (1967). The Ethiopian Rift System. *Bull. Geophys. Observ Addis Ababa*, vol. **11**, pp. 1-65.

Mohr, P.A. (1968). Transcurrent faulting in the Ethiopian Rift System. *Nature*, vol. **218**, pp. 938-941.

Mohr, P.A. (1983a). Ethiopian flood basalt province. *Nature*, vol. **303**, pp. 577-584.

Mohr, P.A. (1983b). Perspectives on the Ethiopian volcanic province. *Bulletin of Volcanology*, vol. **46**, pp. 23-44.

Mohr, P.A. (1987). Patterns of faulting in the Ethiopian Rift Valley. *Tectonophysics*, vol. **143**, pp. 169-179.

Mohr, P.A. & Wood, C.A. (1976). Volcano Spacings and Lithospheric Attenuation in the Eastern Rift of Africa. *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. **33**, pp. 126-144.

Moore, J.M. & Davidson, A. (1978) Rift structure in southern Ethiopia. *Tectonophys*, vol. **46**, pp. 159-173.

Moore, A.F. & Verwoerd, W.J. (1985). The olivine melilite “kimberlite” carbonatite suite of Namqualand and Bushmanland, South Africa. *Transactions of the Geological Society of South Africa*, vol. **88**, pp. 271-294.

Morel, J.L., Zouine, E.M., Andrieux, J. & Muret, A.F. (2000). Déformations néogène set quaternaires de la bordure nord haut atlasique (Maroc): rôle du socle et conséquences structurales. *Journal of African Earth Sciences*, vol. **30**, pp. 119-131.

Morel, J.L., Gonord, H. & Cailleux, Y. (1983). Le glaciais de Taguelmane: un témoin du soulèvement néogène de la Meseta Septentrinale (Maroc). *C. r. hebd. Séanc. Acad. Sci. Paris*, vol. **296**, pp. 477-480.

Morgan, W.J. (1972). Deep mantle convection plumes and plate motion. *Am. Assoc. Petrol., Geol. Bull.*, vol. **56**, pp. 203-213.

Morten, L., De Francesco, A.M., Bonavia, F., Haileselassie, G., Bargossi, G.M., Bondi, M. (1992). A new mantle xenolith locality from southern Ethiopia. *Mineral. Mag.*, vol. **56**, pp. 422–425.

Morten, L., Rossi, P.L., Bondi, M., Brunfelt, A.O. (1978). High – pressure magacrysts in basaltic lavas from Dianet Oasis, Eastern Hoggar, Algerian Sahara. In Salem, M.J. & Busrewil, M.T. eds., *The geology of Lybia vol. III. Second symposium on the geology of Lybia*, pp. 1065-1075.

Morimoto, N. (1988). Nomenclature of clinopyroxenes. *Mineralogy and Petrology*, vol. **230**, pp. 55-76.

Moukadiri, A. (1983). Les enclaves ultrabasiques associées aux basaltes alcalins dans le district volcanique d'Azrou-Timahdit (Moyen Atlas, Maroc). *Thèse 3^e cycle*, Clermont-Ferrand II.

Nelson, D.R., Chivas, A.R., Chappell, B.W., McCulloch, M.T. (1988). Geochemical and isotopic systematics in carbonatites and implications for the evolution of oceanic island sources. *Geochimica et cosmochimica Acta.*, vol. **52**, pp. 1-17.

Niu, Y. (1997). Mantle melting and melt extraction processes beneath ocean ridges: evidence from abyssal peridotites. *Journal of Petrology*, vol. **38**, p. 1047-1074

Ottonello, G., Piccardo, G.B., Joron, J.L., Treuil, M. (1978) Evolution of the upper mantle under the Assab Region (Ethiopia): Suggestions from petrology and geochemistry of tectonic ultramafic xenoliths and host basaltic lavas. *Geologische Rundschau*, vol. **67**, pp. 547-575

Pik, R., Marty, B., Hilton, D.R. (2006). How many plumes in Africa? The geochemical point of view. *Chemical Geology*, vol. **226**, pp. 100-114.

Pollack, H.N. & Chapman, D.S. (1977). On the regional variation of heat flow, geotherms and the thickness of the lithosphere. *Tectonophysics*, vol. **38**, pp. 279-296.

Raffone, N. (2003). Gli xenoliti ultramafici dell'atlante medio (Marocco Nord-Occidentale): petrologia e geochimica del mantello litosferico in un contesto di rifting continentale. *Tesi dottorato*, Università degli studi di Pavia.

Raffone, N., Chazot, G., Pin, C., Vannucci, R., Zanetti, A. (2009). Metasomatism in the Lithospheric Mantle beneath Middle Atlas (Morocco) and the Origin of Fe- and Mg-rich Wherlites. *Journal of Petrology*, vol. **30**, pp. 197-249.

Ramdani, M. & Tadili, B. (1980). Sismicité détaillée du Moyen-Atlas. Sondages sismiques profonds dans le Maroc Central. *Thèse 3^e cycle*, Grenoble.

Ramdani, F. (1998). Geodynamic implication of intermediate-depth earthquakes and volcanism in the intraplate Atlas mountains (Morocco). *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. **108**, pp. 245-260.

Reid, D.I., Cooper, A.F., Rex, D.C., Hanner, R.E. (1990). Timing of post-Karoo alkaline magmatism in southern Namibia. *Geological Magazine*, vol. **127**, pp. 427-433.

Reisberg, L.C., Lorland, J.-P., Bedini, R.M. (2004). Reliability of Os model ages in pervasively metasomatised continental mantle lithosphere: a case study of Sidamo spinel peridotite xenoliths (East African Rift, Ethiopia). *Chem. Geol.*, vol. **208**, pp. 119–140.

Ritsema, J. & Van Heijst, H. (2000). New seismic model of the upper mantle beneath Africa. *Geology*, vol. **28**, pp. 63-66.

Rogers, N., McDonald, R., Fitton, J.G., George, R., Smith M., Barreiro, B. (2000). Two mantle plumes beneath the East African rift system: Sr, Nd and Pb isotope evidence from Kenya Rift basalts, *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. **176**, pp. 387–400.

Rudnick, R.L., McDonough, W.F., Chappel, B.W. (1993). Carbonatite metasomatism in the northern Tanzanian mantle: petrographic and geochemical characteristics. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. **114**, pp. 463-475.

Santini, M. (2006). Petrogenesi delle rioliti del rift etiopico. *Tesi dottorato*, Università degli Studi di Camerino.

Sebai, A., Stutzmann, E., Montagner, J.P., Sicilia D. (2006). Anisotropic structure of the African upper mantle from Rayleigh and Love wave tomography. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. **155**, pp. 48-62.

Shen, Y., Solomon, S.C., Bjarnason, I.T., Wolfe, C.J. (1998). Seismic evidence for the lower mantle origin of the Icelandic plume, *Nature*, vol. **395**, pp. 62-65.

Siena, F., Beccaluva, L., Coltorti, M., Marchesi, M., Morra, V. (1991). Ridge to hot-spot evolution of the Atlantic lithospheric mantle: evidence from Lanzarote peridotite xenoliths (Canary Island). *J. Petrol. Spec. Vol.* “orogenic lherzolites and mantle processes”, pp. 271-290.

Smithies, R.H., Marsh, J.S. (1998). The Marinkas Quellen carbonatite complex, Southern Namibia; carbonatite magmatism with an uncontaminated depleted mantle signature in a continental setting. *Chem. Geol.*, vol. **148**, pp. 201-212.

Stuart F.M. (2007). Intracratonic asthenosphere upwelling and lithosphere rejuvenation beneath the Hoggar swell (Algeria): Evidence from HIMU metasomatised lherzolite mantle xenoliths. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. **260**, pp. 482-494.

Sun S.S. & McDonough W.F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implication for mantle composition and processes. In *Magmatism in ocean basins* (Saunders A.D., Norry M.J. Eds.). *Geological Society of London Special Publication*, vol. **42**, pp. 313-345.

Termier, H. (1936). Etudes géologiques sur le Maroc Central et Moyen-Atlas septentrional. Tome 1: Les terrains primaires et le permotrias; tome 2: Les terrains post-triasiques; tome 3: Paléontologie et Carte géol; tome 4: Atlas des figures et des tableaux hors-texte. *Notes et Mém. Serv. Mines et Carte Géol. Maroc*, vol. **33**, pp. 1566.

Termier, H., Termier, G., & Jouravsky, G. (1948). Une roche volcanique à gros grain de la famille des ijolites: la Talzastite. *Notes Serv. Géol. Maroc*, vol. **1**, **71**, pp. 81-120.

Toramura, A., Fujii, N. (1986). Connectivity of melt phase in a partially molten Peridotite. *J. Geophys. Res.*, vol. **91**, pp. 9239-9252.

Vannucci, R., Piccardo, G. B., Rivalenti, G., Zanetti, A., Rampone, E., Ottolini, L., Oberti, R., Mazzucelli, M. & Bottazzi, P. (1995). Origin of LREE-depleted amphiboles in the subcontinental mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. **59**, pp. 1763–1771.

Verwoerd, W.J., Viljoen, J.H.A., Viljoen, K.S. (1990). Olivine melilitites and associated intrusives of the southern Cape Province. In Guidebook Geocongress, 1990. *Geological Society of Africa PR3*, pp. 1-60.

Vincent, P.M. (1970). The evolution of the Tibesti volcanic province, eastern Sahara. In Clifford, T.N. and Gass, I.G., eds., *African magmatism and tectonics, Edinburgh, Scotland, Oliver and Boyd*, pp. 301-319.

Weaver, B.L. (1991). The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints. *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. **104**, pp. 381-397.

WoldeGabriel, G. & Aronson, J.L. (1987). Chow Bahir: a 'failed' rift, in Southern Ethiopia. *Geology*, vol. **15**, pp. 430–433.

WoldeGabriel, G., Aronson, J., Walter, R. (1990). Geology, geochronology and rift basin development in the central sector of the Main Ethiopian Rift. *Geological Society of America Bulletin*, vol. **102**, pp. 439-458.

Zack, T. & Brumm, R. (1998). Ilmenite/liquid partition coefficients of 26 trace elements determined through ilmenite/clinopyroxene partitioning in garnet pyroxenites. *7th International Kimberlite Conference*. Cape Town, pp. 986-988.

Zindler, A., Hart, S.R. (1986). Chemical Geodynamics. *Earth and Planetary Sciences, Annual Review*, vol. **14**, pp. 493-571.



Registrazione modulo Dichiarazione di conformità

MODULO INVIATO CORRETTAMENTE

Consegnare la copia stampata e debitamente firmata all'Ufficio Dottorato e Alta Formazione in via Scienze 41b Ferrara

Io sottoscritto Dott. (Cognome e Nome)

SANTATO Alessandro

nato a

Rovigo

Provincia

Rovigo

il giorno

13/11/1978

Your E-Mail Address

alessandro.santato@unife.it

avendo frequentato il corso di Dottorato di Ricerca in:

Scienze della Terra

Ciclo di Dottorato

XXII

Titolo della tesi in Italiano

Comparazione del mantello litosferico africano: studio degli xenoliti di mantello dei distretti vulcanici del Marocco e del Main Ethiopian Rift

Titolo della tesi in Inglese

African lithospheric mantle comparison: study of mantle xenoliths from the Marocco and Main Ethiopian Rift volcanic districts

Titolo della tesi in altra Lingua Straniera

Tutore - Prof:

Beccaluva Luigi

Settore Scientifico Disciplinare (SSD)

Geo/07

Parole chiave (max 10)

xenoliti di mantello, mantle xenoliths, Azrou, Mega

Consapevole - Dichiaro

CONSAPEVOLE -- 1) del fatto che in caso di dichiarazioni mendaci, oltre alle sanzioni previste dal codice penale e dalle Leggi speciali per l'ipotesi di falsità in atti ed uso di atti falsi, decade fin dall'inizio e senza necessità di alcuna formalità dai benefici conseguenti al provvedimento emanato sulla base di tali dichiarazioni; -- 2) dell'obbligo per l'Università di provvedere al deposito di legge delle tesi di dottorato al fine di assicurarne la conservazione e la consultabilità da parte di terzi; -- 3) della procedura adottata dall'Università di Ferrara ove si richiede che la tesi sia consegnata dal dottorando in 4 copie di cui una in formato cartaceo e tre in formato .pdf, non modificabile su idonei supporti (CD-ROM, DVD) secondo le istruzioni pubblicate sul sito : <http://www.unife.it/dottorati/dottorati.htm> alla voce ESAME FINALE - disposizioni e modulistica; -- 4) del fatto che l'Università sulla base dei dati forniti, archiverà e renderà consultabile in rete il testo completo della tesi di dottorato di cui alla presente dichiarazione attraverso l'Archivio istituzionale ad accesso aperto "EPRINTS.unife.it" oltre che attraverso i Cataloghi delle Biblioteche Nazionali Centrali di Roma e Firenze. -- DICHIARO SOTTO LA MIA RESPONSABILITA' -- 1) che la copia della tesi depositata presso l'Università di Ferrara in formato cartaceo, è del tutto identica a quelle presentate in formato elettronico (CD-ROM, DVD), a quelle da inviare ai Commissari di esame finale e alla copia che produrrà in seduta d'esame finale. Di conseguenza va esclusa qualsiasi responsabilità dell'Ateneo stesso per quanto riguarda eventuali errori, imprecisioni o omissioni nei contenuti della tesi; -- 2) di prendere atto che la tesi in formato cartaceo è l'unica alla quale farà riferimento l'Università per rilasciare, a mia richiesta, la dichiarazione di conformità di eventuali copie; -- 3) che il contenuto e l'organizzazione della tesi è opera originale da me realizzata e non compromette in alcun modo i diritti di terzi, ivi compresi quelli relativi alla sicurezza dei dati personali; che pertanto l'Università è in ogni caso esente da responsabilità di qualsivoglia natura, civile, amministrativa o penale e sarà da me tenuta indenne da qualsiasi richiesta o rivendicazione da parte di terzi; -- 4) che la tesi di dottorato non è il risultato di attività rientranti nella normativa sulla proprietà industriale, non è stata prodotta nell'ambito di progetti finanziati da soggetti pubblici o privati con vincoli alla divulgazione dei risultati, non è oggetto di eventuali registrazioni di tipo brevettale o di tutela. -- PER ACCETTAZIONE DI QUANTO SOPRA RIPORTATO

Firma Dottorando

08/02/2010

Ferrara, li _____

Firma del Dottorando 

Firma Tutore

Visto: Il Tutore

Si approva

Firma del Tutore 