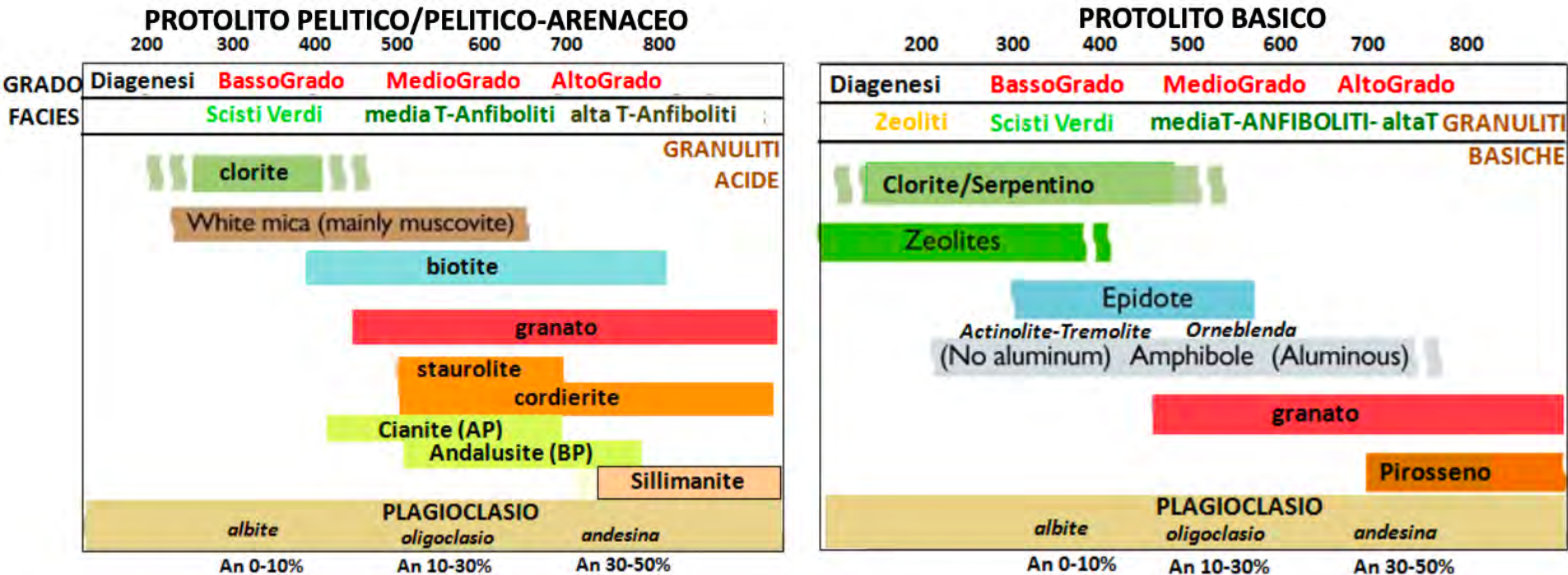


Facies metamorfiche

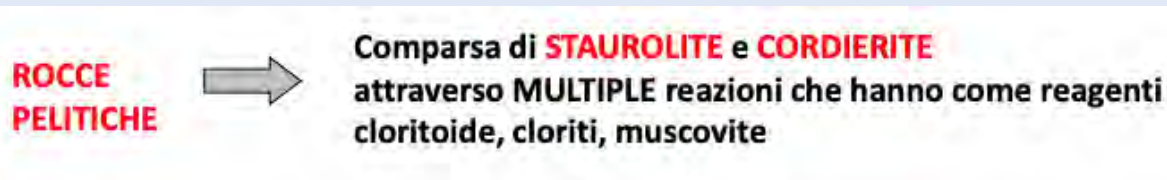
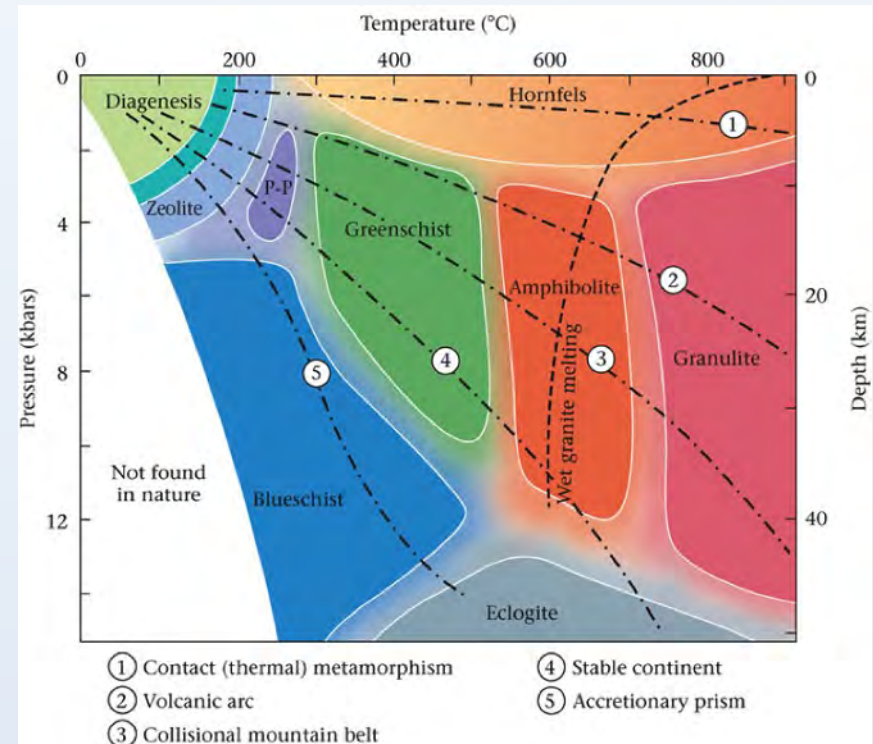
Schema semplificato per il metamorfismo regionale



Schema semplificato della composizione mineralogica in funzione del GRADO e FACIES metamorfica nel metamorfismo REGIONALE orogenico (non riportati minerali della facies scisti blu e eclogiti)

Facies delle anfiboliti di medio grado

Facies anfibolitica di medio grado: $T = 500/550^{\circ}\text{C}$ fino a $600/650^{\circ}\text{C}$



Facies delle anfiboliti di medio grado

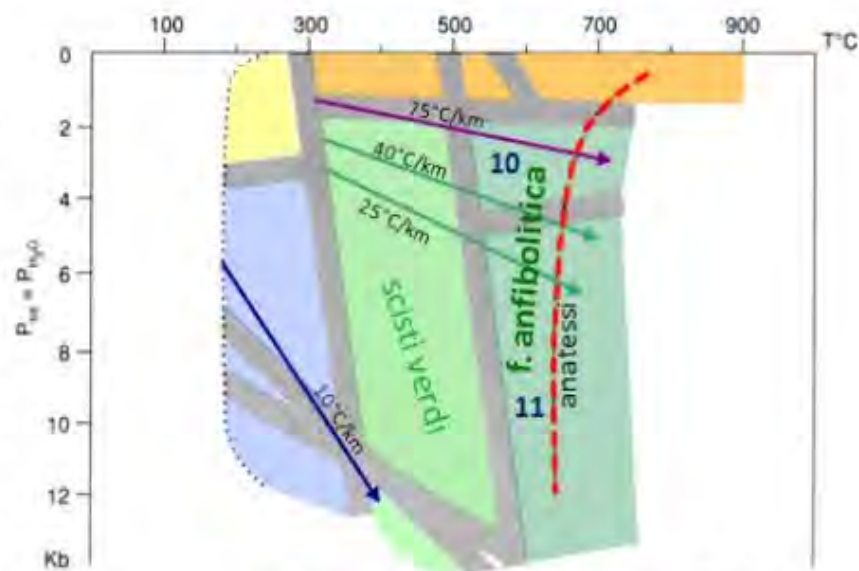
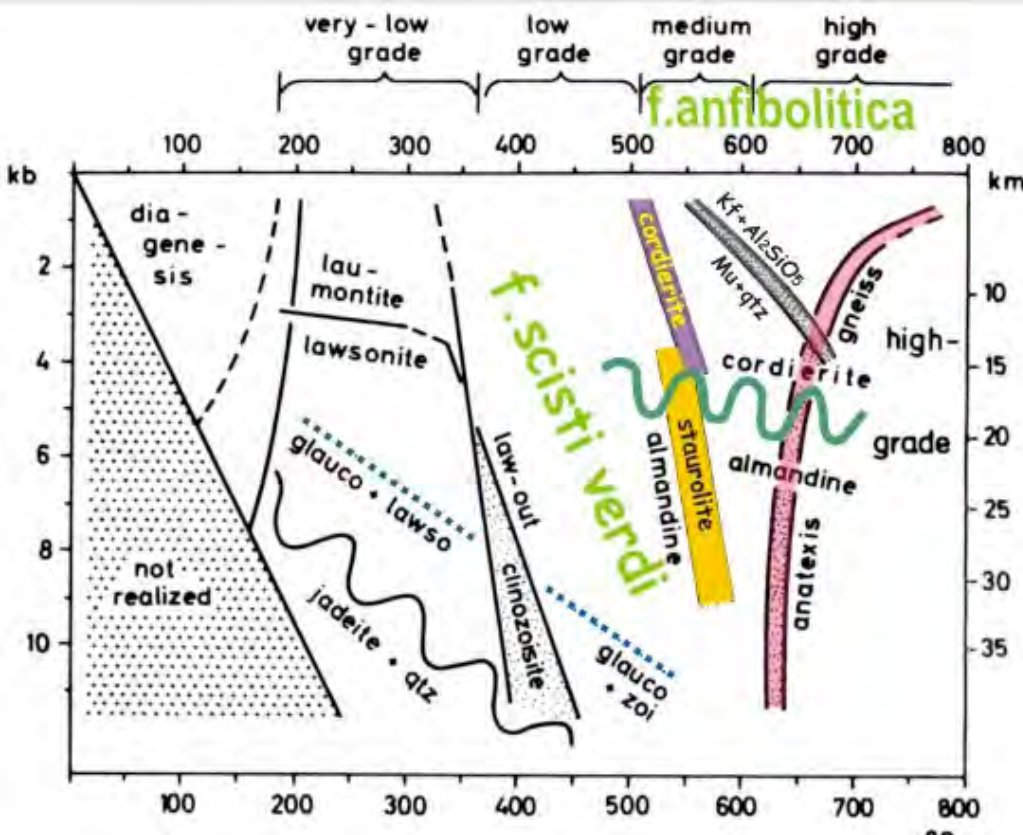
In termini di ISOGRADE :
il passaggio **FACIES SCISTI VERDI** → **FACIES ANFIBOLITICA**

corrisponde nelle rocce pelitiche

CORDIERITE – IN / CLORITI – OUT
STAUROLITE – IN / Fe-CLORITI – OUT
STAUROLITE – IN / CLORITOIDE – OUT

corrisponde nelle rocce basiche

PLAGIOCLASIO – IN / ALBITE+ZOISITE – OUT
ORNEBLENDA – IN / ACTINOLITE+ ZOISITE +
CLORITE– OUT

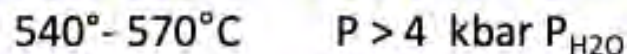
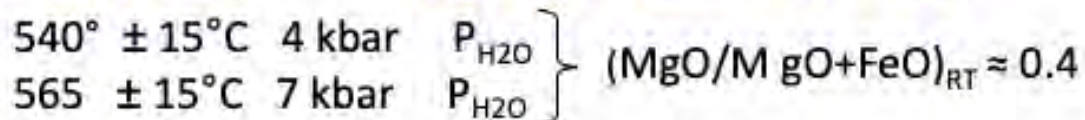
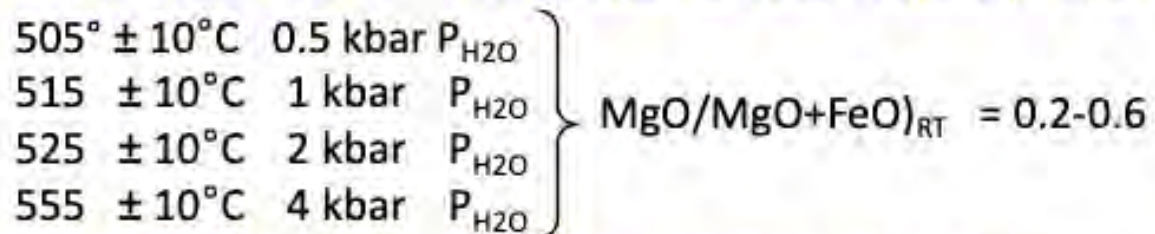


campo 10 = f.anfibolitica a cordierite
campo 11 = f.anfibolitica almandino

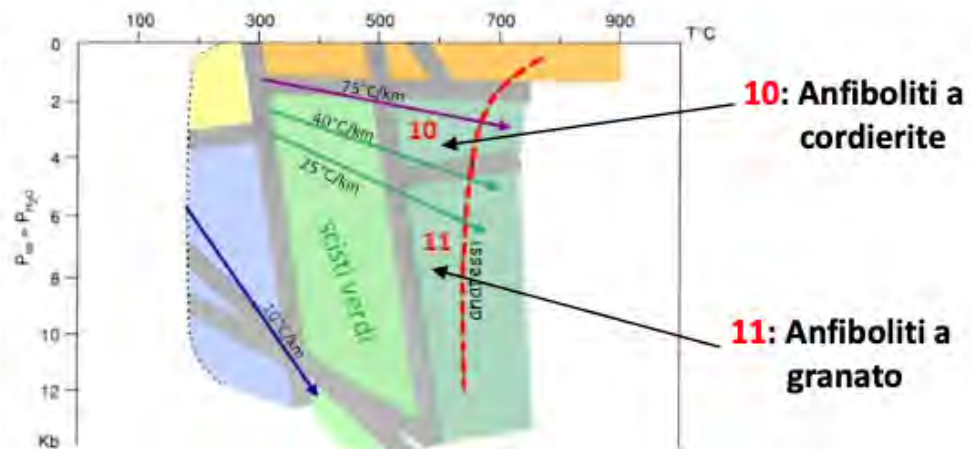
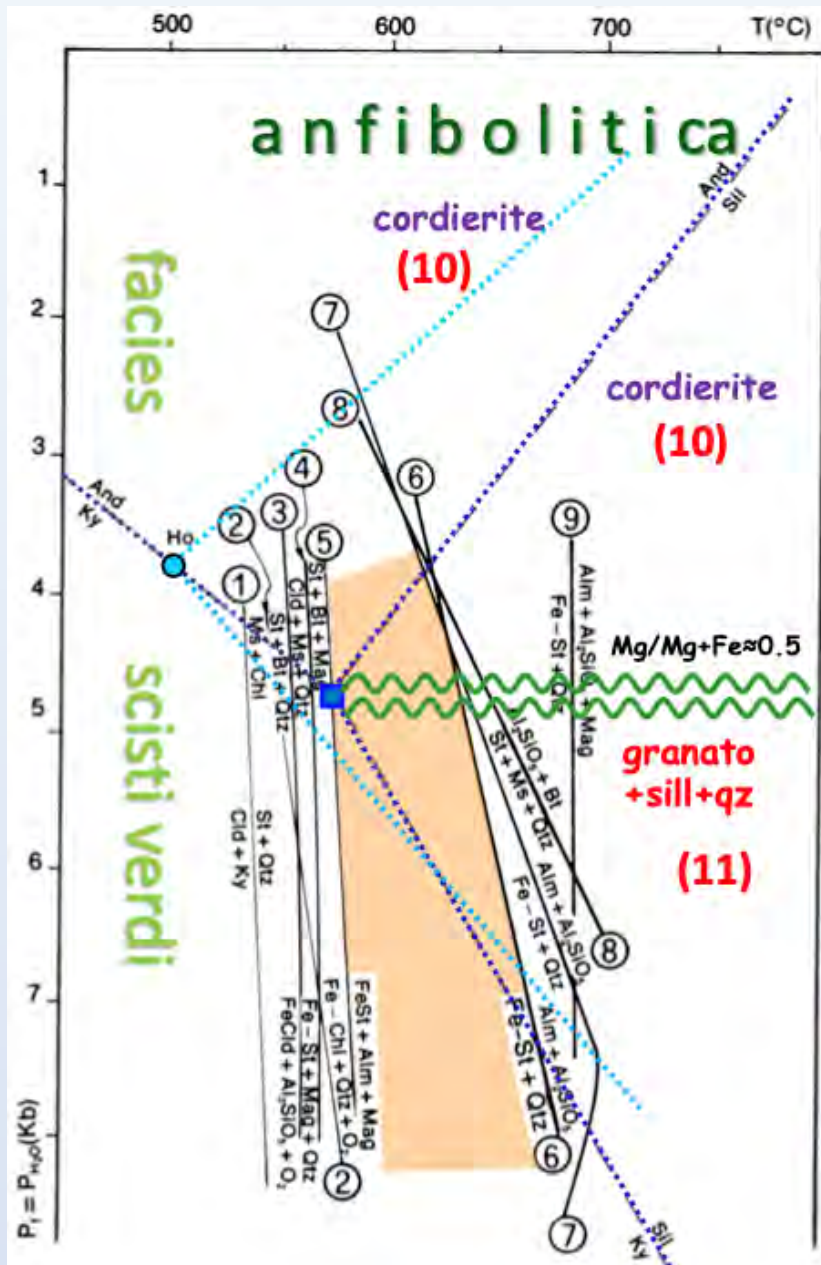
(da Winkler, 1979)

Facies delle anfiboliti di medio grado

Alcune delle reazioni metamorfiche che PRODUCONO staurolite o cordierite



Facies delle anfiboliti di medio grado



inizio f.anfibolitica

reazioni 1 – 5 :
produzione di staurolite
(staurolite-IN)

reazioni 6 – 9 :
scomparsa di staurolite
(staurolite-OUT)

campo MINIMO di
esistenza della
STAUROLITE



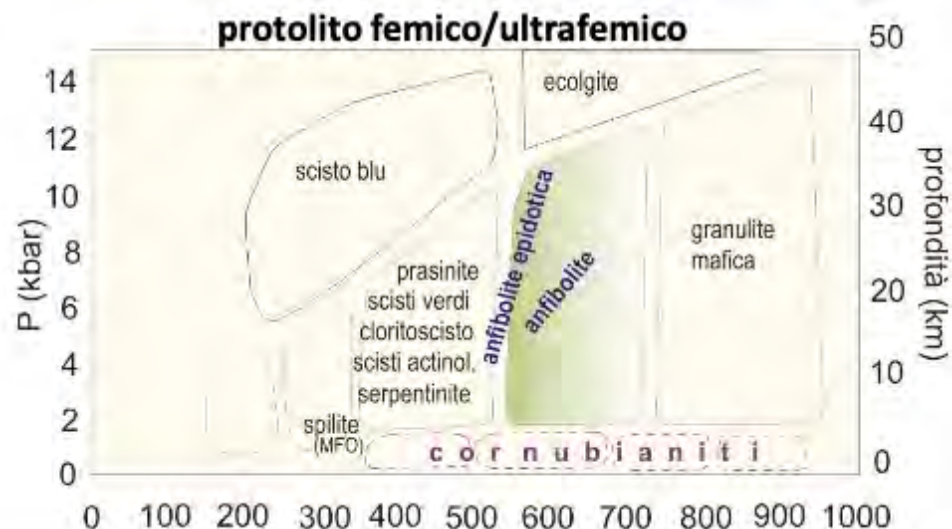
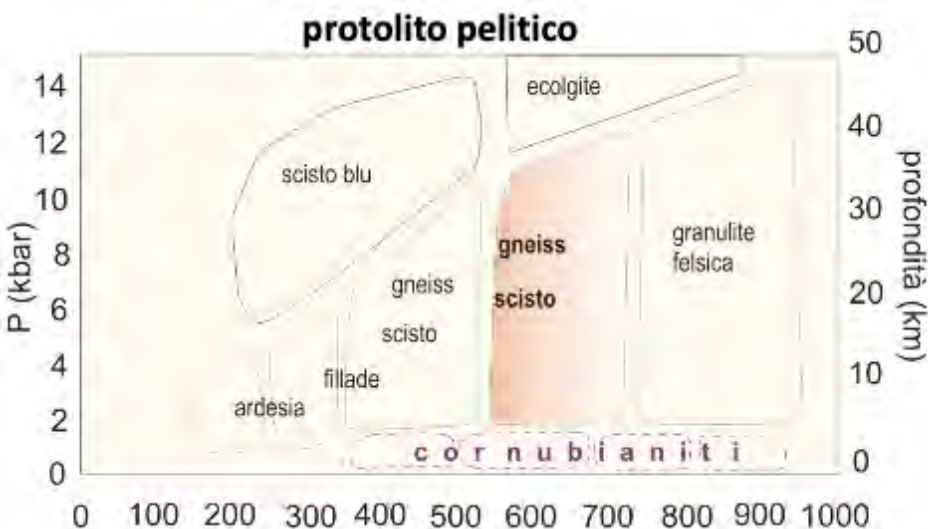
Reazione di scomparsa
della cordierite
(per $Mg/Mg+Fe \approx 0.5$) :
cordierite = granato +
sillimanite + quarzo + H_2O

● punto triplo Al_2SiO_5
secondo Holdaway (1971)

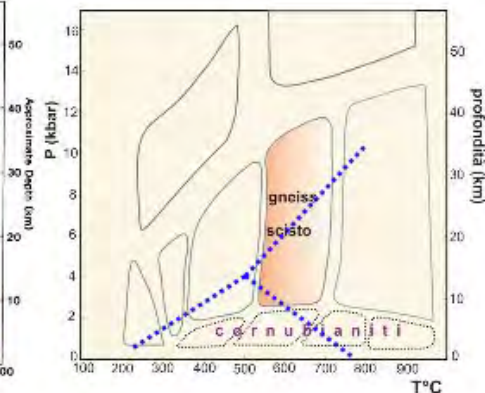
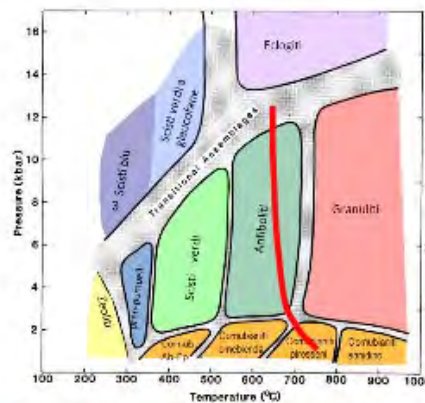
■ punto triplo Al_2SiO_5
secondo Greenwood
(1976)

Facies delle anfiboliti di medio grado

PROTOLITO	PARAGENESI	METAMORFITI
	quarzo + muscovite + biotite ± plagioclasti ± cordierite ± andalusite (BASSA PRESSIONE)	
PELITI	quarzo + muscovite + biotite ± plagioclasti ± staurolite ± almandino ± cianite (ALTA PRESSIONE)	MICASCISTI
GROVACCHE	quarzo + plagioclasti + biotite ± muscovite ± epidoti ± almandino ± microclino (± Al_2SiO_5) ± orneblenda	PARAGNEISS
ARCOSE MAGMATITI ACIDE	quarzo + plagioclasti + microclino + muscovite + biotite ± almandino	PARAGNEISS ORTOGNEISS
MARNE	calcite + epidoti + orneblenda ± diopside ± plagioclasti ± quarzo ± wollastonite ± grossularia ± forsterite	FELS Ca-silicatici
CALCARI	calcite ± quarzo ± plagioclasti ± diopside ± grossularia ± wollastonite ± orneblenda	MARMI MARMI a silicati
rocce BASICHE	orneblenda + albite + epidoti ± cloriti ± biotite ± almandino ± quarzo (basso-medio grado) orneblenda + plagioclasti ± epidoti ± almandino ± quarzo ± biotite ± titanite ± Fe-Ti ossidi ± cummingtonite	ANFIBOLITI albitico-epidotiche ANFIBOLITI
Rocce ULTRABASICHE	Mg-anfiboli (rombici/monoclini) ± orneblenda ± almandino ± diopside ± forsterite	ANFIBOLITI e FELS ANFIBOLICI



Facies delle anfiboliti di medio grado

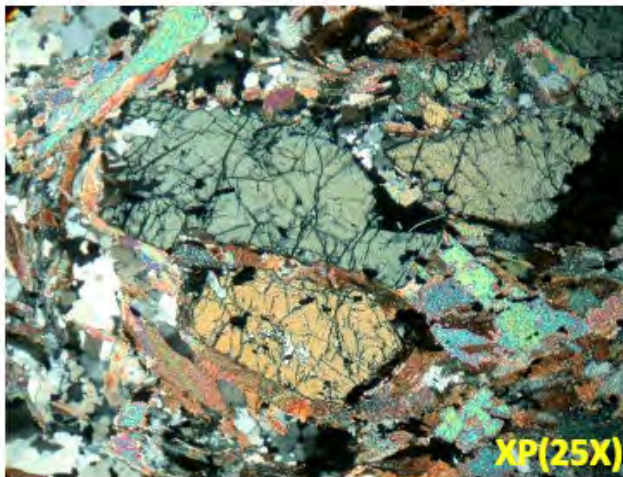
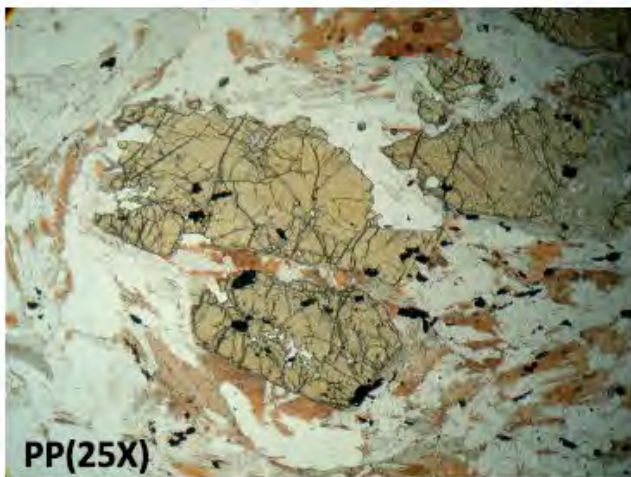


Scisto a
staurolite +
granato



Particolare del
geminato a croce
di staurolite

Da protoliti pelitici

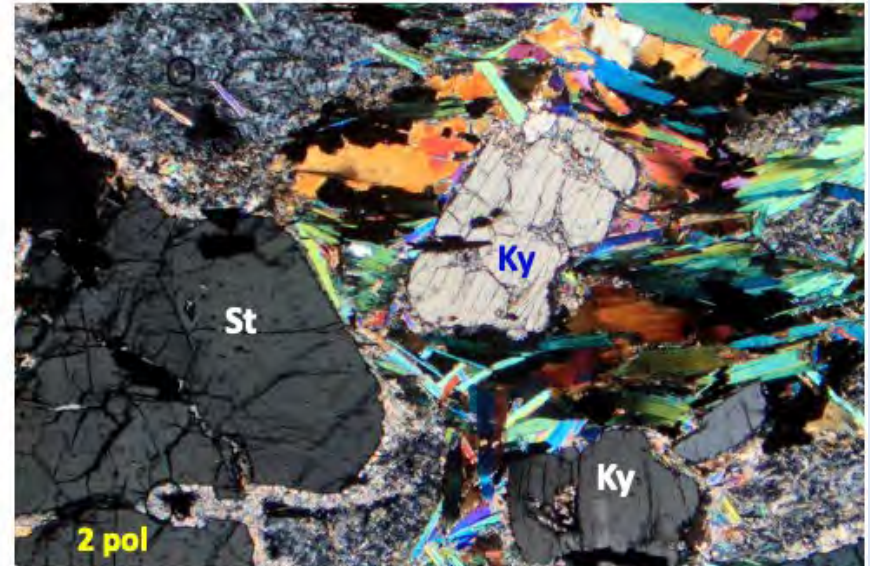
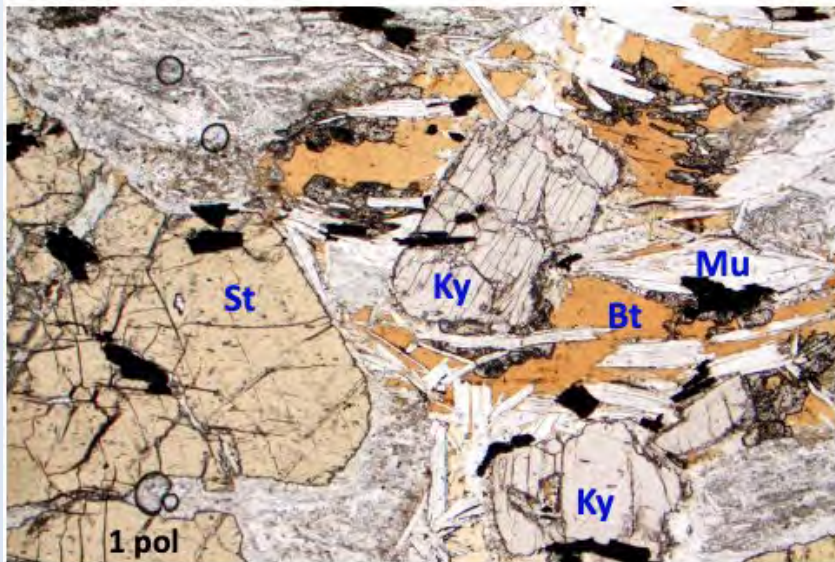


Staurolite in scisto
a Mu+Bt+granato
(quest'ultimo non
in foto)

Facies delle anfiboliti di medio grado



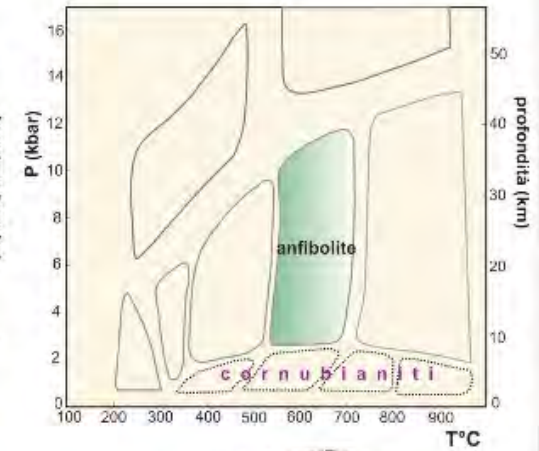
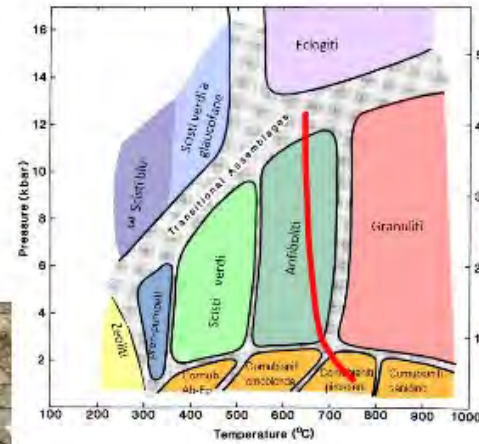
Da protoliti pelitici



Scisto a staurolite (st) + cianite (Ky) + biotite (Bt) + muscovite (Mu) (granato non in foto)– ampiezza foto 4 mm

Facies delle anfiboliti di medio grado

Da protoliti basici



Anfibolite con e senza granato (16 cm lunghezza)



Facies delle anfiboliti di alto grado

Facies anfibolitica di alto grado: $T \sim 650^{\circ} \text{C}$ fino a 700°C

CORDIERITE stabile nell'intero campo di T del medio grado e persiste anche nell'alto grado

STAUROLITE, a basse P_{H_2O} ed in presenza di Mu + Qz, scompare prima del limite inferiore dell'alto grado


$$\text{per (MgO/MgO+FeO)}_{\text{staurolite}} = 0.4 - 0.2 \quad P_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \text{ kb} \quad T = 575^\circ \pm 15^\circ \text{C}$$

$P_{H_2O} = 5.5 \text{ kb}$ $T = 675^\circ \pm 15^\circ \text{C}$

STAUROLITE a P_{H_2O} medio-alte può persistere anche nell'alto grado



Nessuna reazione che coinvolge la staurolite e la cordierite può essere usata per stabilire il passaggio MEDIO - ALTO GRADO



Da numerose osservazioni petrografiche, il criterio che definisce l'entrata nell'alto grado è la **SCOMPARSA di MUSCOVITE** in presenza di quarzo e plagioclasio

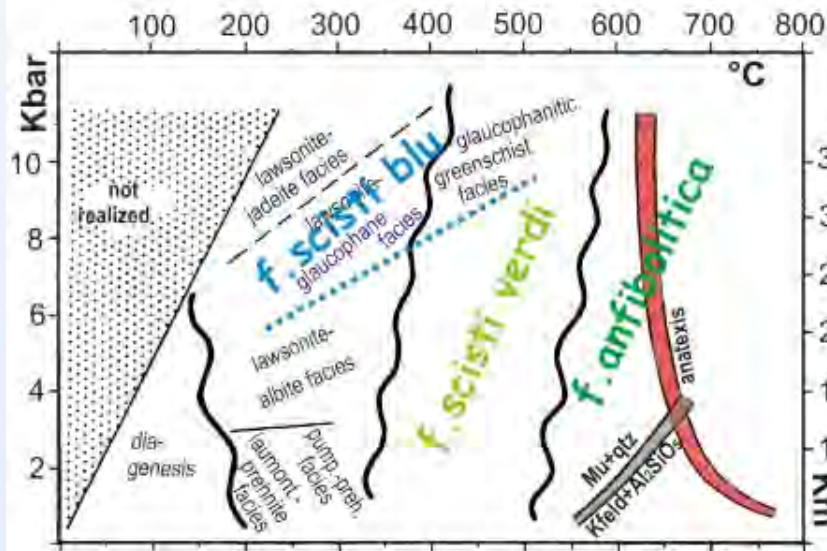
La scomparsa di Mu è accompagnata dalla formazione di tipiche (diagnostiche) paragenesi di alto grado, cioè

K-feldspato + Al_2SiO_5

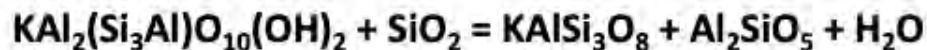
K-feldspato + cordierite

K-feldspato + Almandino-rich granato

Facies delle anfiboliti di alto grado

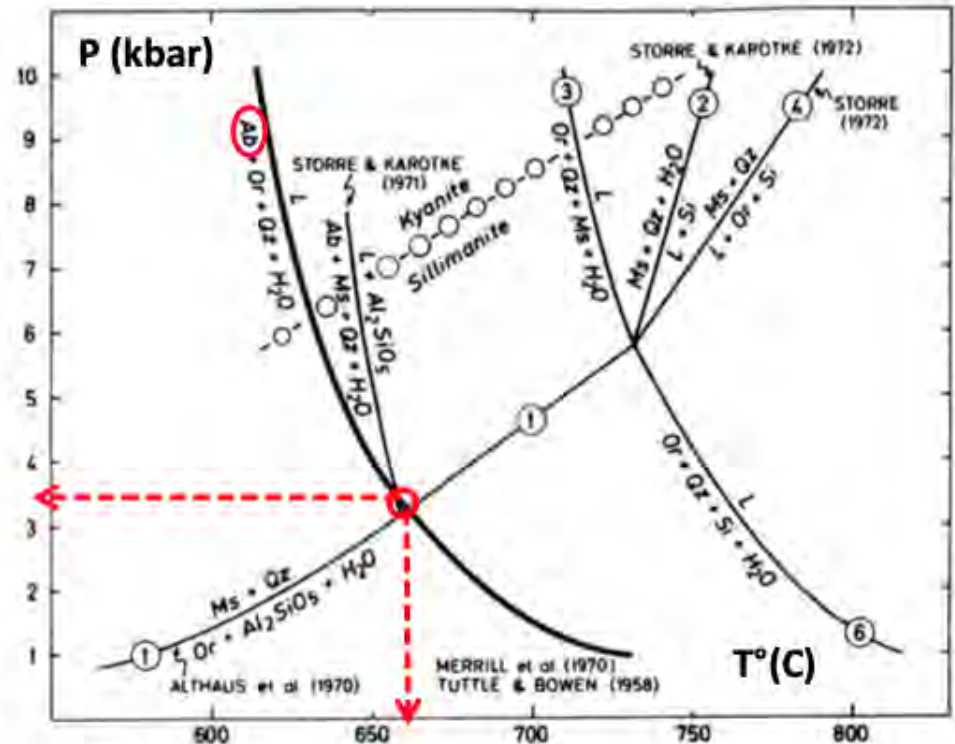


A) per $P_{H_2O} < 3.5$ kbar la scomparsa di Mu, in presenza di qz, avviene secondo la reazione 1). Tale reazione definisce pertanto l'entrata nell'alto grado se P_{H_2O} ($= P_{load}$) non supera 3.5 kbar



B) per $P_{H_2O} > 3.5$ kb, se il plagioclasio è presente nella paragenesi, la Mu scompare perché fonde, assieme a qz + plag + K-feld, andando a costituire il fuso anatettico granitico (660° a 3.5 kb; 615° a 10 kb). Pertanto l'ANATESSI degli gneiss definisce l'entrata nell'alto grado metamorfico se $P_{H_2O} > 3.5$ kb

C) per $P_{H_2O} > 3.5$ kb, se il plagioclasio è assente nella paragenesi, la Mu può persistere fino a alte T [reaz. 1-2 o 4] – casi abbastanza rari (es; quarziti a Mu senza plag)



(Winkler, 1979)

Anatessi - migmatiti

ALTO GRADO MET. – ANATESSI - MIGMATITI



Gneiss migmatitico

MIGMATITI

da "migma" = *mescolanza*

rocce macroscopicamente eterogenee prodotte da **ANATESSI**, costituite da domini chiari

LEUCOSOMA = mobilizzato (fuso) chiaro granitico

e da domini scuri

MELANOSOMA = residuo scuro (RESTITE) della fusione

PALEOSOMA = roccia parentale non modificata dall'anatessi, con aspetto di normale roccia metamorfica

NEOSOMA = roccia di neoformazione
= leucosoma+melanosoma

qz + Ab-rich plag + K-feld + Mu ± biot

An-rich plag + qz+Biot+Al₂SiO₅ (sill)
± cord ± gt

FUSO ANATETTICO → **LEUCOSOMA**

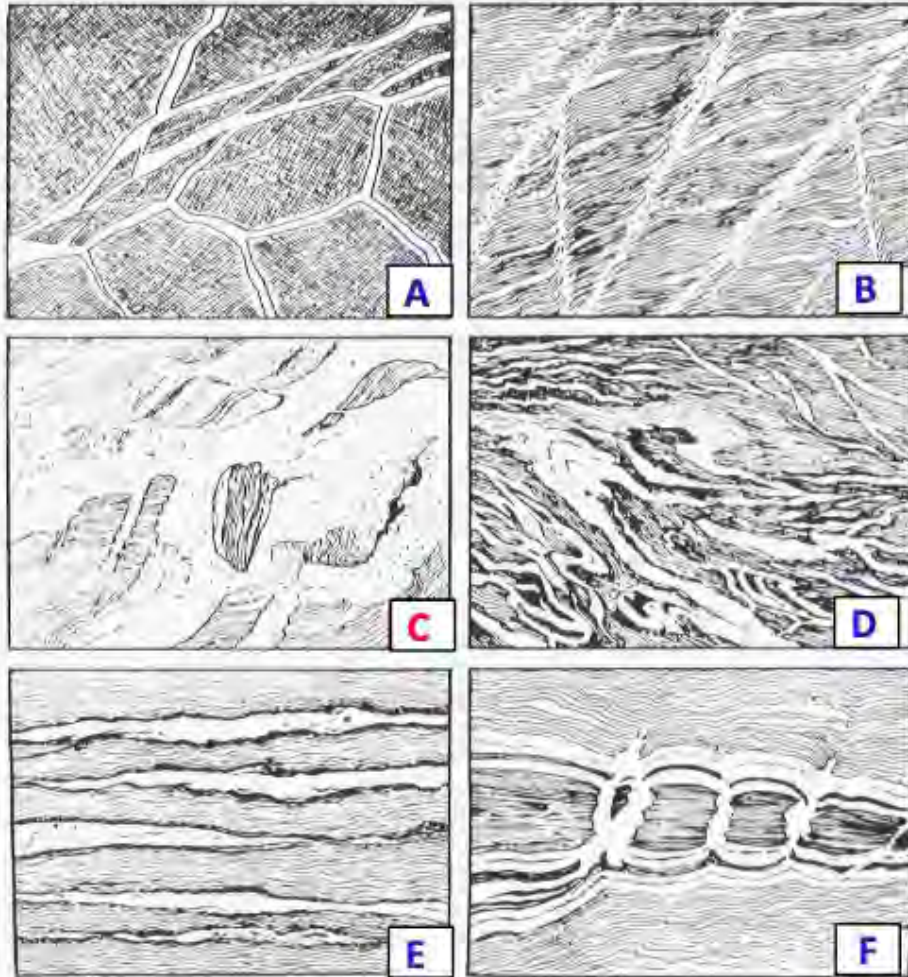
RESIDUO SOLIDO → **MELANOSOMA**

} **NEOSOMA**

GNEISS DI PARTENZA → **PALEOSOMA**

Anatessi - migmatiti

Migmatiti – tipi di strutture



A: Struttura agmatitica (aspetto brecciato) con porzioni scure a blocchi cementate da scarso leucosoma

B: dictionitica: il leucosoma forma una fitta rete

C: a zolle (Schollen): leucosoma prevalente su melanosoma frammentato a zolle smussate

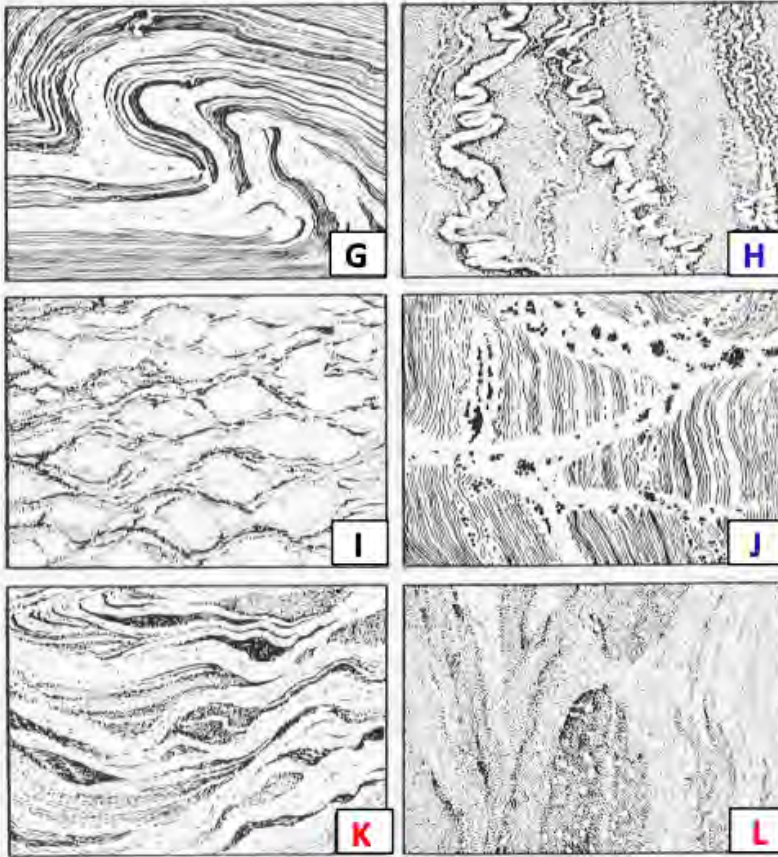
D: flebitica (a vene):

E: stromatica (a bande, a strati);

F: surreitica (boudinata)

Anatessi - migmatiti

MIGMATITI : TIPI DI STRUTTURE



G: a pieghe

H: ptigmatica: fitta pieghettatura di vene leucosomatiche

I: oftalmitica (occhiadina);

J: stictolitica (macchiettata);

K: a schlieren: sciame di porzioni allungate scure che sfumano nelle parti leucosomatiche

L: nebulitica: strutture molto sfumate, migmatiti quasi omogeneizzate prive di netta distinzione tra neosoma e paleosoma

Le varie strutture migmatitiche indicano sia diversi meccanismi di mescolanza tra paleosomi, leucosomi e melanosomi sia una diversa intensità di migmatizzazione.

INTENSITA' DI MIGMATIZZAZIONE

METATESSITI
anatessi iniziale

ANATESSITI

DIATESSITI
anatessi avanzata

flebiti, stromatiti,
stictoliti, dictioniti,
agmatiti, boudinate,
ptigmatiche

protolite met. a
strutture preservate;
leucosoma in porzioni
discrete

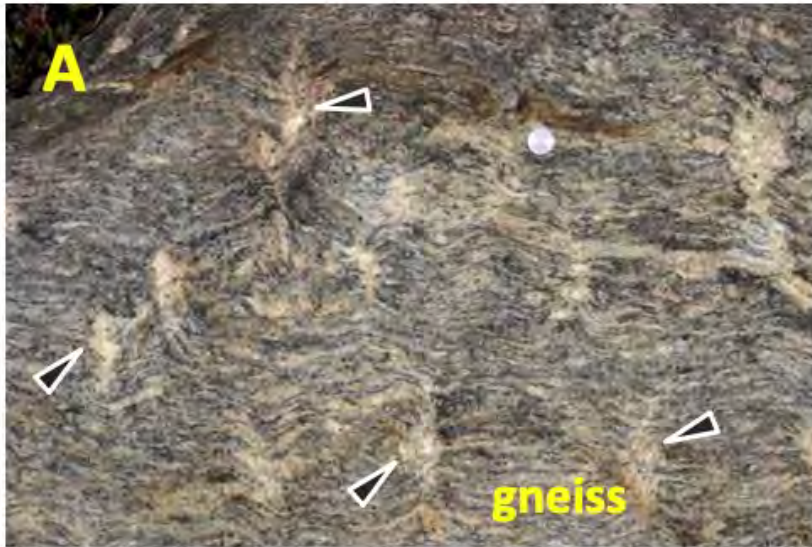
termine
generale:
terreno met.
con evidenze
di anatessi

protolite metamorfico
non più/difficilmente
riconoscibile;
leucosoma abbondante

nebuliti,
a zolle,
a schlieren

Anatessi - migmatiti

Migmatiti – tipi di strutture



Melting of orthogneiss in Zanskar, NW, Himalaya

(Weinberg RF & Pavlína Hasalová P : Water-fluxed melting of the continental crust: A review. *Lithos*, 2015)

(A) Records incipient water-fluxed melting with in situ melt patches (black arrows).

(B) water-fluxed melting : leucosomes created an interconnected network with diffuse boundaries to host rock

(C) Biotite-dehydration melting of the same orthogneiss. Leucosome has large peritectic Grt (garnet)



Anatessi - migmatiti

Migmatiti – tipi di strutture



(A) Migmatite derived from pelite and psammite protoliths, Nemiscau subprovince, Quebec. Scale is 15 cm long. (Sawyer et al., 2011, Elements)



(B) Peritectic garnet (pink) and cordierite (pale green, Crd) in leucosome in stromatic metatexites migmatite from Fosdick migmatite-granite complex, West Antarctica. (Brown et al., 2011, Elements)



(C) leucosome in stromatic metatexite migmatite (western part of the Fosdick migmatite-granite complex, Marie Byrd Land, West Antarctica)



(D) leucosome from the Tolstik Peninsula, Karelia, Russia; diameter of lens cap is 55 mm. (Brown, GSA Bulletin 2013, Geol.Soc.America)

MAFIC COMPLEX

Tonalite/Granodiorite

Dioritic Rocks

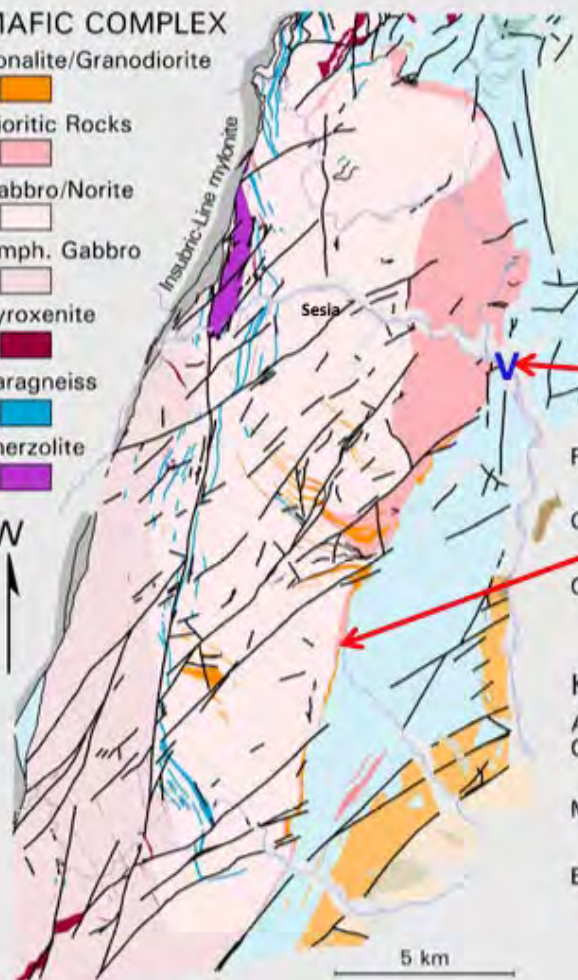
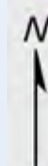
Gabbro/Norite

Amph. Gabbro

Pyroxenite

Paragneiss

Lherzolite



Ivrea-Verbano Zone

(south-western Alps, Italy): Mafic Complex intruded in Kinzigite Formation

migmatiti

paragneiss restitici (melanosoma) in
facies anfibolitica di alto grado
($gt+bt+sill$ fibrolite $\pm$ cordierite)

Rhyolite

Granitic Rocks

Orthogneiss

KINZIGITE FM.

Amphibolite &
QF Gneiss

Mafic Gneiss

Biotite Schist

gneiss restitico
(melanosoma)

fuso granitico
(leucosoma)

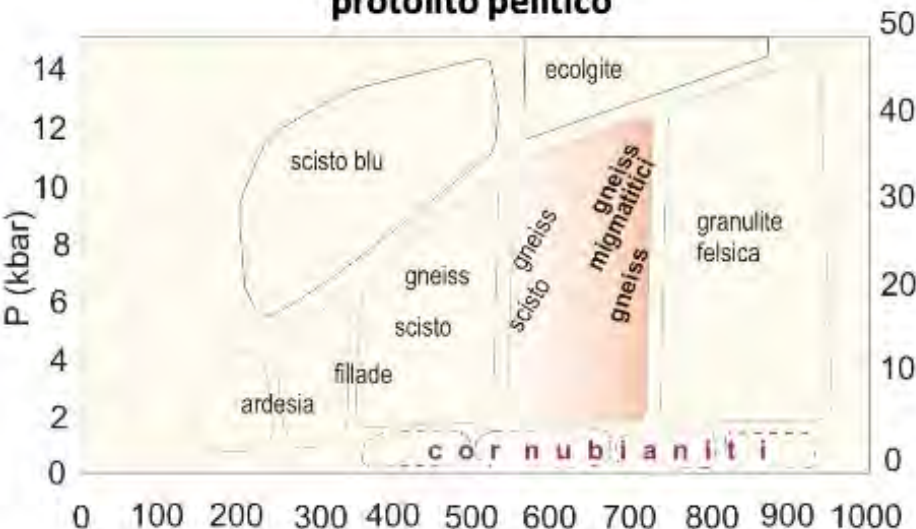
Migmatite (Crevola, Varallo Sesia; **V** in mappa). Contatto tra la parte superiore del Complesso Basico Ivrea-Verbano e l'incassante metamorfico (Formazione Kinzigitica)



Facies anfibolitica di alto grado

PROTOLITO	PARAGENESI	METAMORFITI
PELITI - ARENARIE MAGMATITI ACIDE	quarzo + plagioclasti + ortoclasio + biotite ± granati ± cordierite ± sillimanite	GNEISS GNEISS in associazione migmatitica con leucosomi
CALCARI MARNE	calcite ± orneblenda ± diopside ± Ca-granato ± plagioclasti ± forsterite	MARMI e FELS Ca-silicatici
rocce BASICHE	orneblenda + plagioclasti ± cummingtonite ± almandino ± diopside	ANFIBOLITI FELS ANFIBOLICI
Rocce UTRABASICHE	Mg-anfiboli (cummingtonite, gedrite) ± orneblenda ± granati ± olivina ± spinelli	ANFIBOLITI FELS ANFIBOLICI META-ULTRAMAFITI anfiboliche

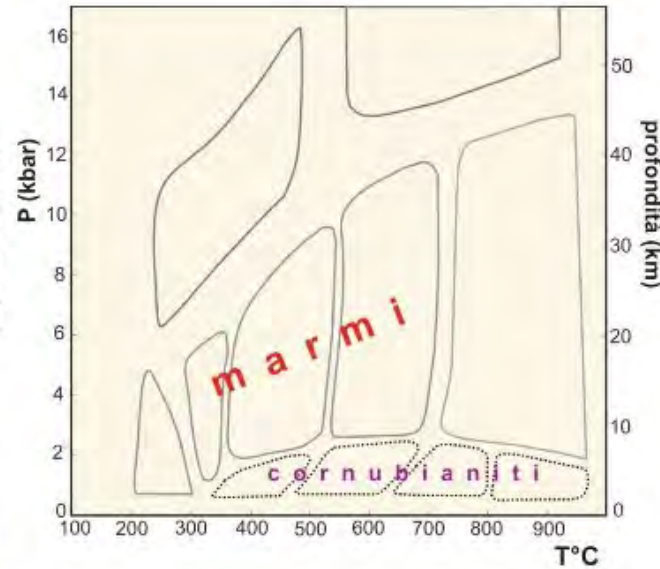
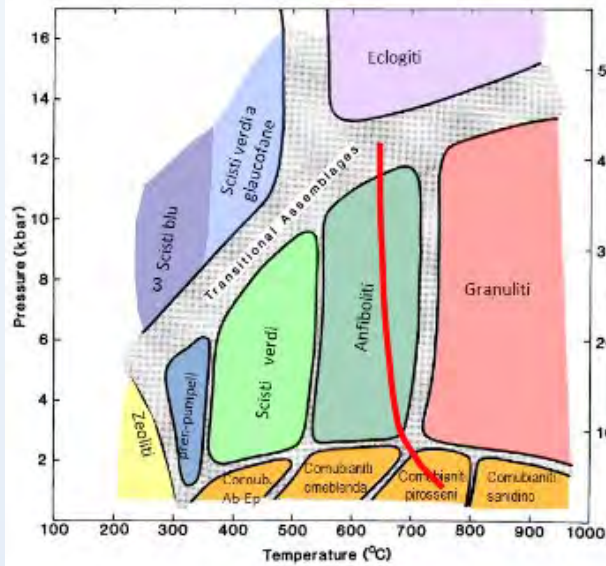
protolito pelitico



protolito femico/ultrafemico



Facies anfibolitica di alto grado



Protolito : roccia carbonatica pura (calcare)

Grado metamorfico BASSO-MEDIO-ALTO → MARMO



Cava di marmo nelle Alpi Apuane

Facies anfibolitica di alto grado



MARMO: da protoliti carbonatici puri; possono essere variamente venati e la natura delle impurezze determina il colore delle venature; calcite (CaCO_3 , >95%) $\pm$ dolomite [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] $\pm$ accessori quali fillosilicati (cloriti, miche), grafite, quarzo etc.. All'aumentare del grado metamorfico aumenta la grana e cambiano i minerali silicatici accessori.

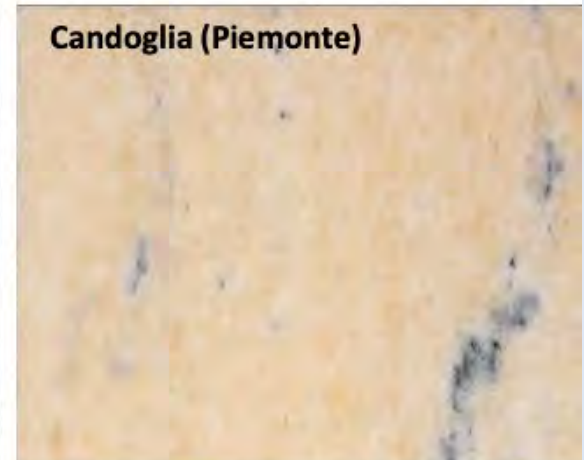
Statuario Venato-Carrara



Bardiglio-Carrara



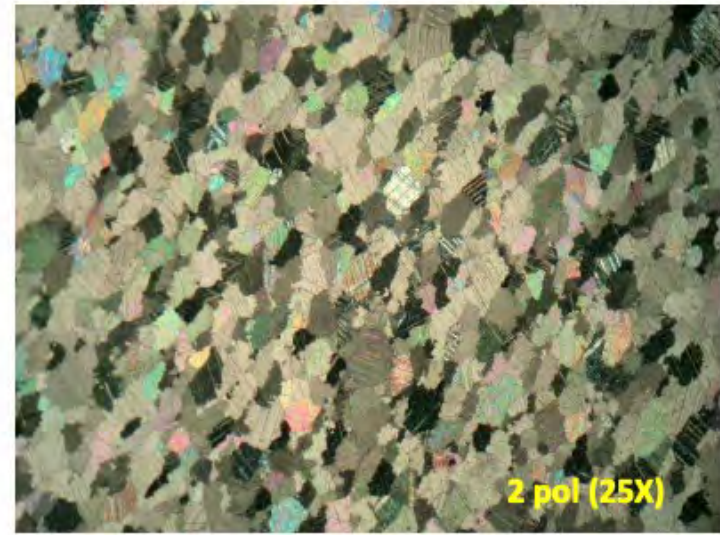
Candoglia (Piemonte)



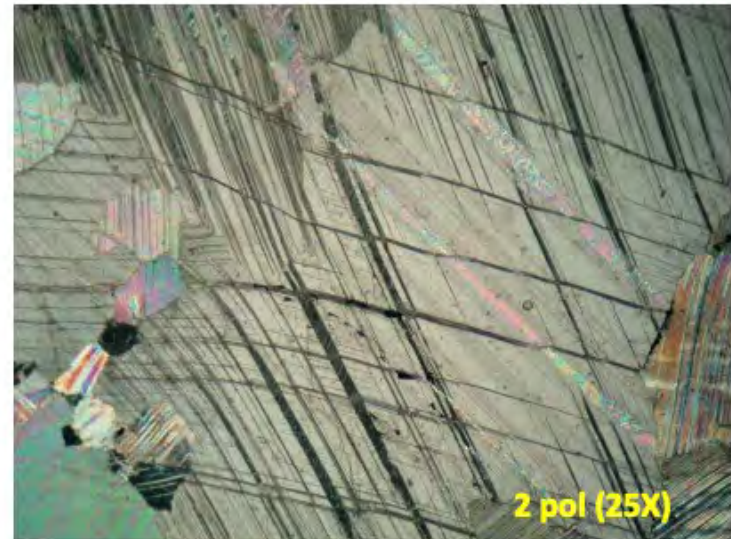
Basso grado – facies scisti verdi
Marmi delle Alpi Apuane

facies anfibolitica di alto grado
Marmo della Val d'Ossola

Facies anfibolitica di alto grado

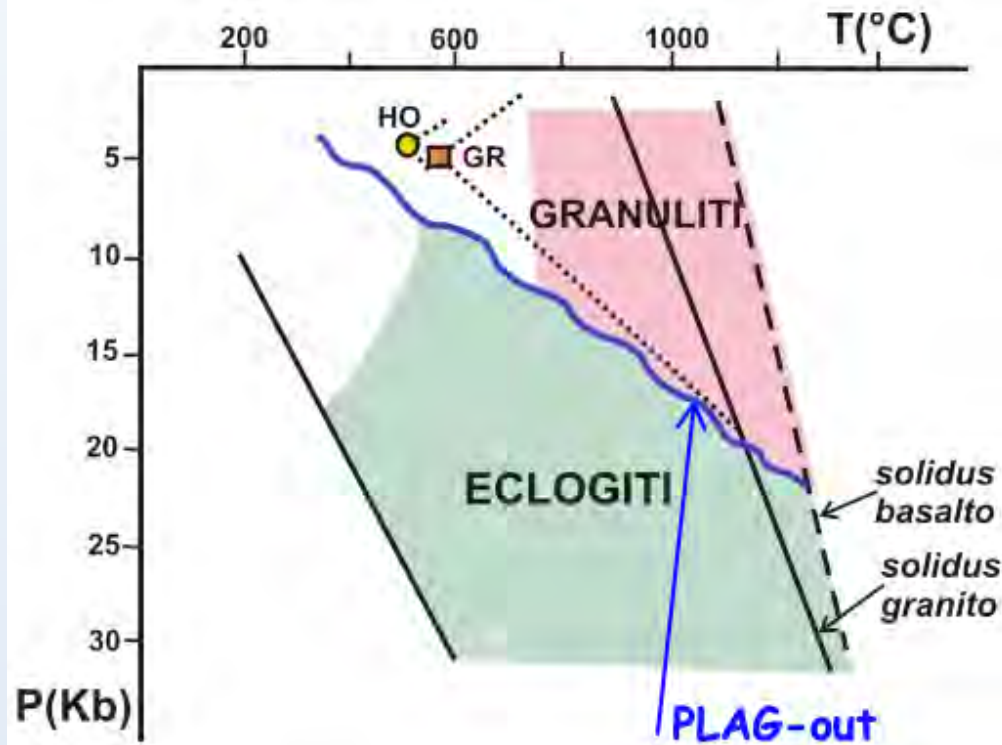


Marmo a grana minuta orientato (basso grado met) – nota gli altissimi colori di interferenza della calcite



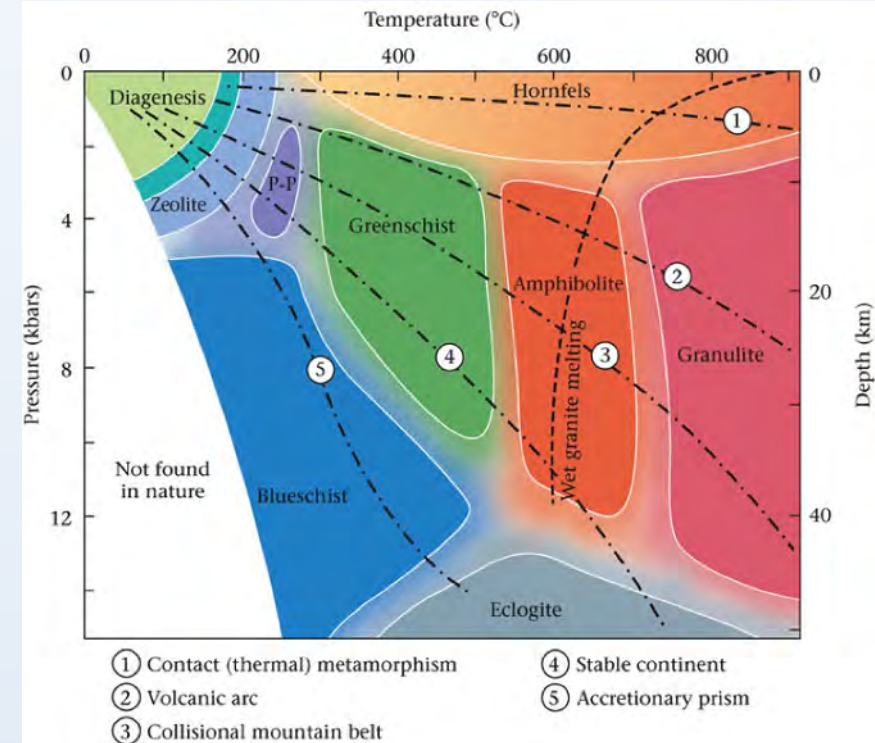
Marmo a grana grossa (medio-alto grado metamorfico) – nota la geminazioni polisintetiche della calcite

Facies granulitica



Rappresentazione semplificata
dei campi P-T delle granuliti ed eclogiti

HO, GR = punto triplo Al_2SiO_5
secondo Holdaway (1971) e Greenwood (1976)



Facies granulitica



Granulite felsica

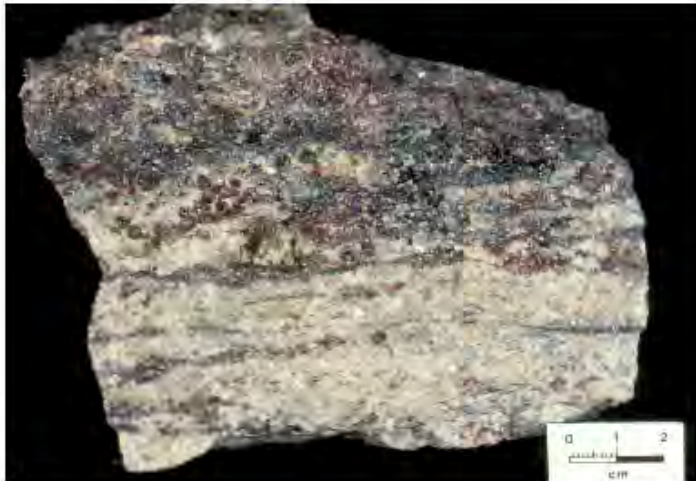


Granulite mafica

Facies granulitica

F. GRANULITICA: insieme di tutte le associazioni mineralogiche che si formano da qualunque protolito (pelitico, quarzoso-feldspatico, mafico, carbonatico), in condizioni di :

- 1) estrema scarsità/assenza di H₂O-fluidi; 2) alta T, che consente la cristallizzazione di pirosseni (opx!) per un ampio spettro di protoliti; 3) ampio campo P del metamorfismo



sx: Granulite acida
(qz+feld+sill+gt±cord±bt)

dx: Granulite basica
(opx+cpx+plag±ho)

Alcune reazioni che portano alla scomparsa dei minerali idrati:

In **rocce basiche** : produzione di granuliti mafiche, partendo da anfiboliti

orneblenda + quarzo = iperstene + clinopirox. + plag + H₂O

orneblenda + biot + qz = iperstene + K-feld + plag + H₂O

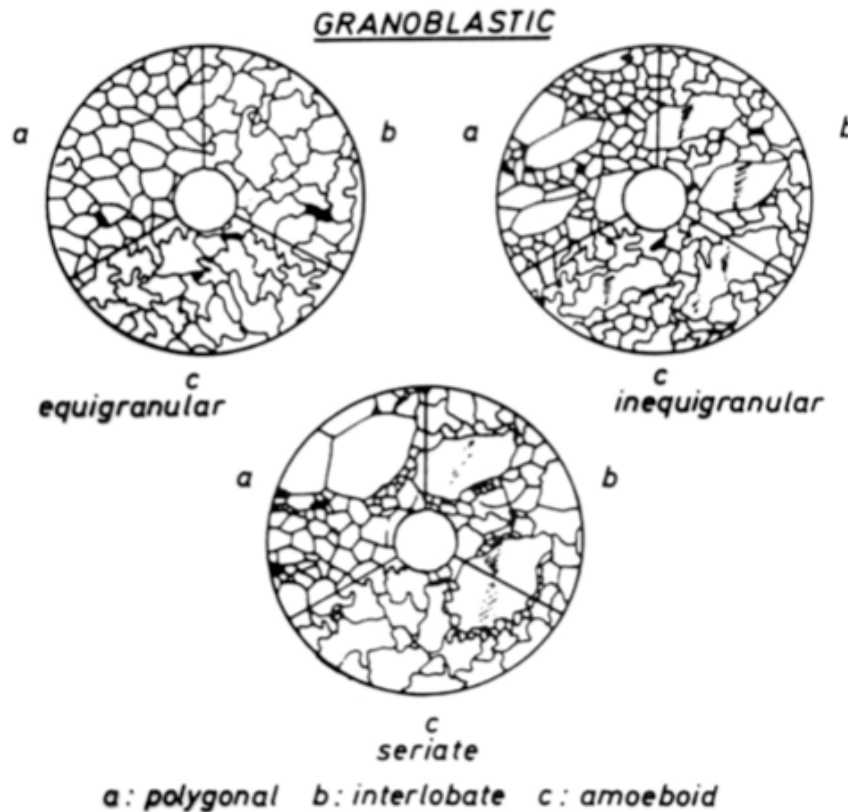
orneblenda + almandino + qz = iperstene + plag + H₂O

In **rocce pelitiche** : produzione di granuliti felsiche, partendo da gneiss di alto grado

biotite + sillimanite + qz = almandino + K-feld + H₂O

biotite + qz = iperstene + almandino + K-feld + H₂O

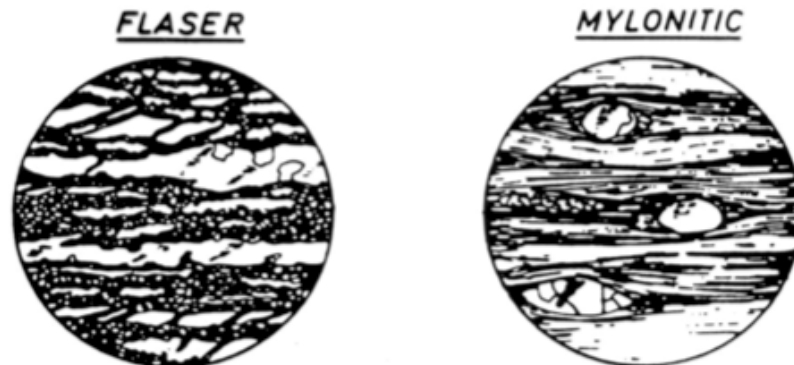
Facies granulitica



Le rocce granulitiche non hanno un “diagnostico” carattere strutturale, in quanto possono presentare:

- ☐ Foliazione da assente (rocce massive) ad accentuata
- ☐ strutture granoblastiche (equi-etero granulari, poligonali)
- ☐ strutture milonitiche, blastomilonitiche lenticolari (tipo flaser) caratterizzate da “nastri” di quarzo $\pm$ feldspati

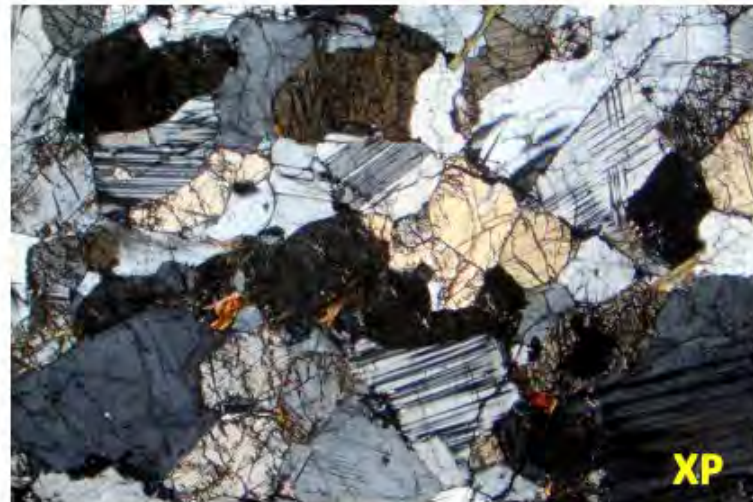
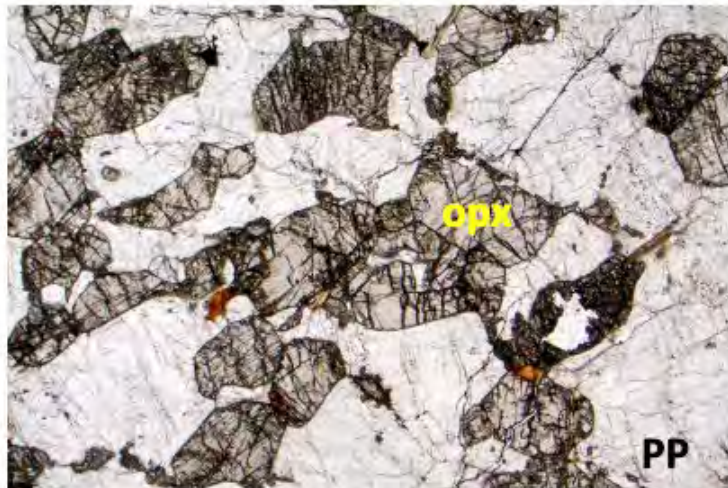
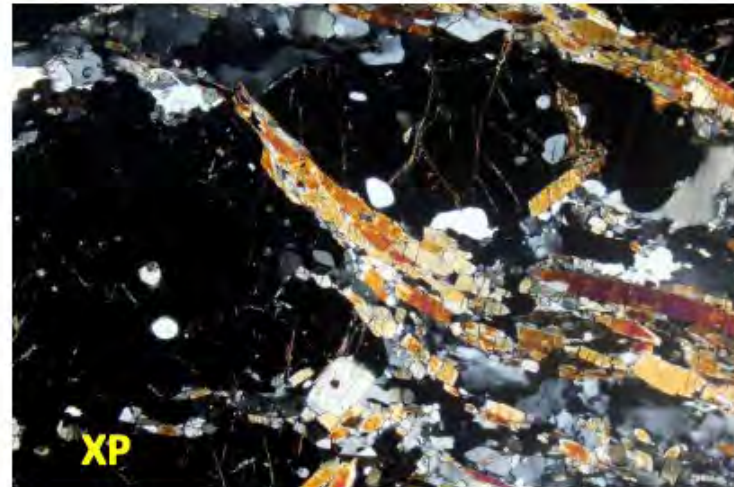
(da Winkler, 1979 “Petrogenesis of metamorphic rocks”)



Facies granulitica

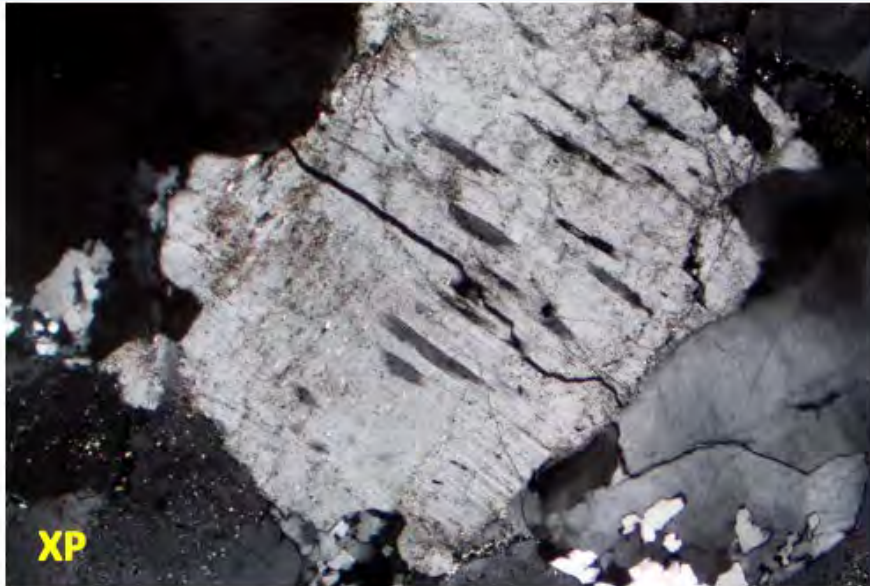
- 1) assenza di muscovite
- 2) assenza/scarsità di minerali idrati
- 3) plagioclasio, talvolta antipertitico
- 4) Al_2SiO_5 tipicamente sillimanite prismatica (più rara cianite)

- 5) feldspato alcalino pertitico, talvolta mesopertitico
- 6) quarzo con essoluzioni aghiformi di rutilo (TiO_2)
- 7) Granato (in genere Fe-rich, ma fino a 50%py e 20%gr)
- 8) ortopirosseno, iperstene ricco in Al
- 9) orneblenda e/o biotite ricche in Ti



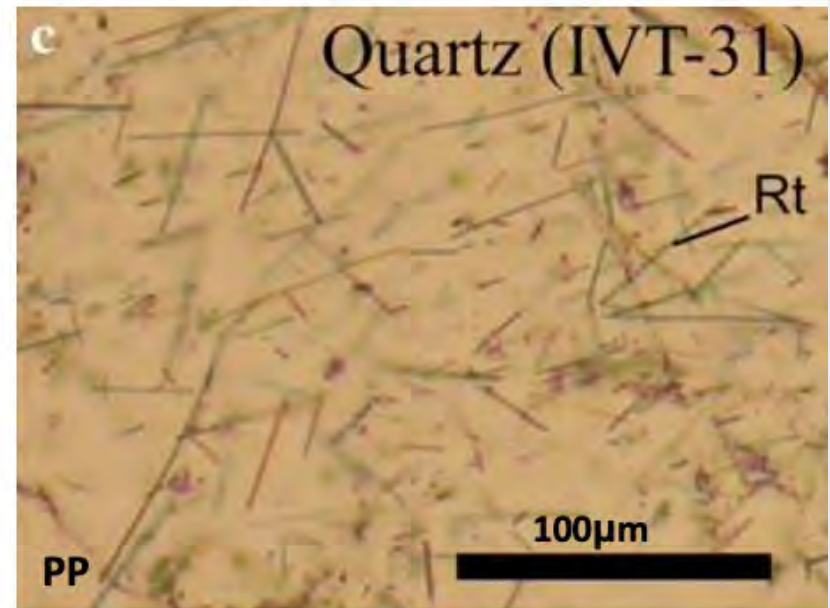
campo
visivo 7 mm
(in tutte)

Facies granulitica

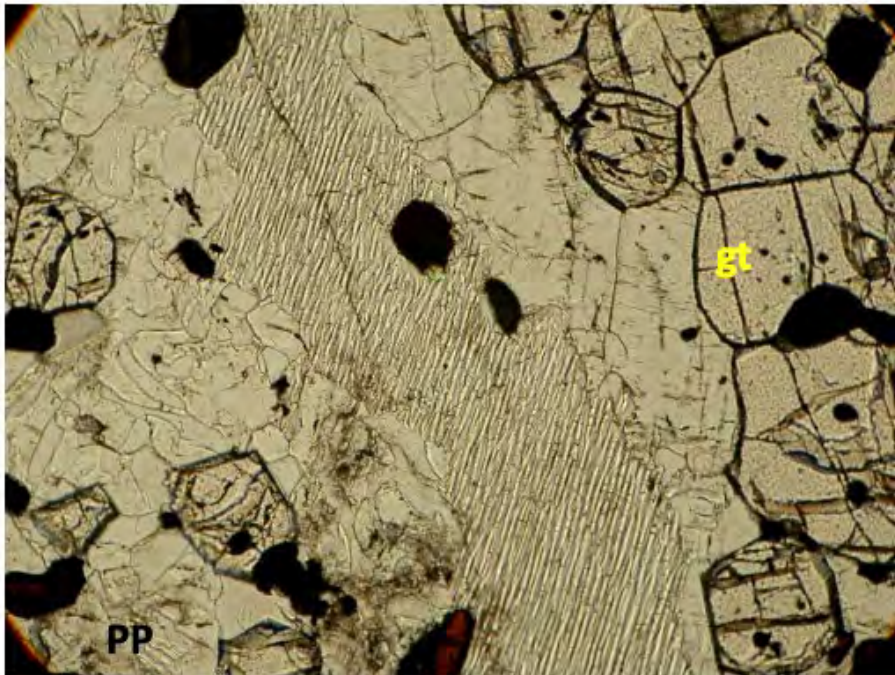


plagioclasio antipertitico (smistamenti = lamelle scure)
(campo visivo 2mm)

Aghi di rutilo (Rt-TiO_2) in quarzo



Granati, quarzo e mesopertite (al centro)
(campo visivo 2mm)



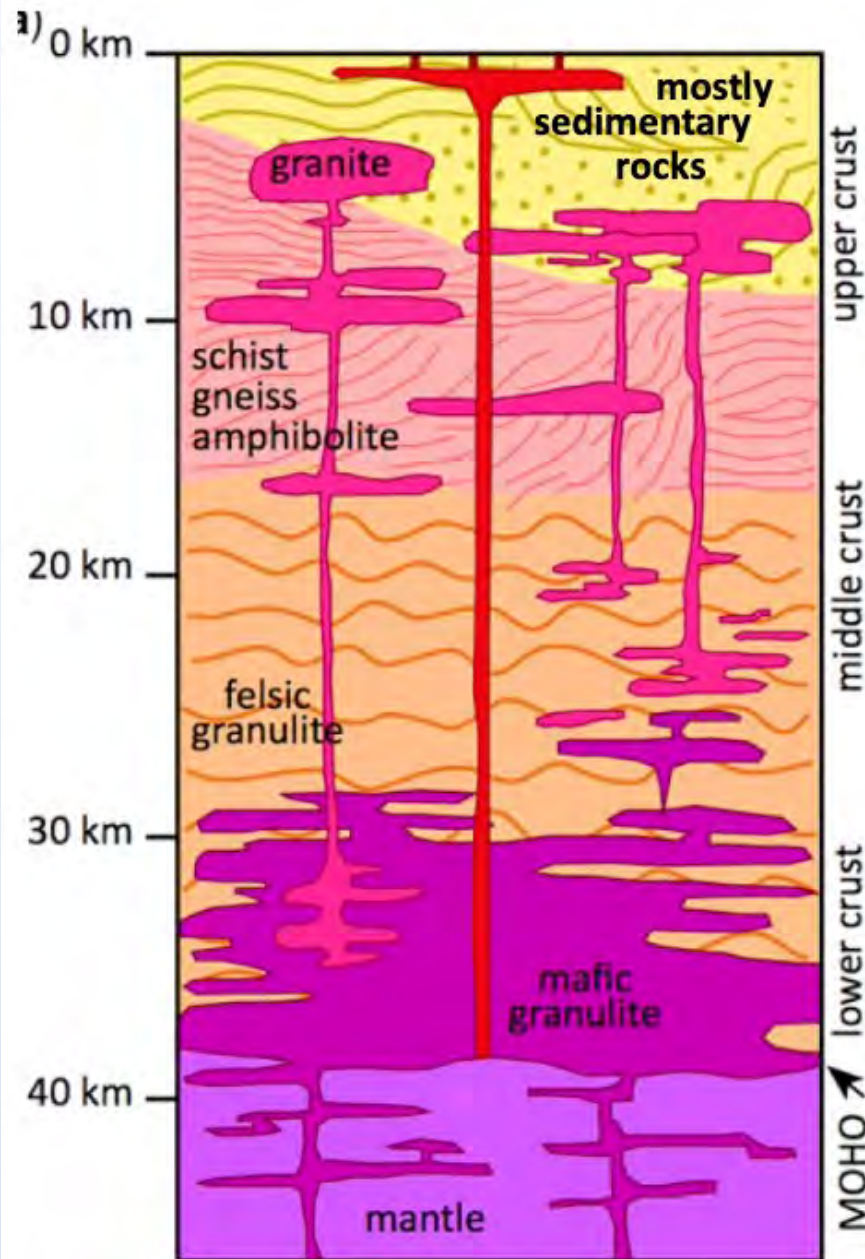
Facies granulitica

Raggiungimento della condizione fondamentale della facies granulitica:

alta $T^{\circ}C$ e $P_{H_2O} \ll P_{tot}$

- 1) metamorfismo di masse plutoniche (protoliti) già in partenza anidre o povere di minerali idrati, che durante il metamorfismo non vengono permeate da H_2O -fluidi. La loro ricristallizzazione ad alta T non potrà che produrre rocce granulitiche (**spiegazione "locale"**)
- 2) metamorfismo in presenza di fluidi ricchi in CO_2 invece che H_2O (testimoniato da inclusioni fluide ricche in CO_2 nei minerali). L'arricchimento in CO_2 non è dovuta ad un apporto esterno ma piuttosto ad un "asporto" di H_2O (**spiegazione "locale"**)
- 3) **POLIMETAMORFISMO**: rocce di alto grado in facies anfibolitica sottoposte ad un ulteriore incremento di T con conseguente disidratazione e allontanamento dei fluidi, diventeranno rocce granulitiche. Secondo questo modello le granuliti rappresentano rocce polimetamorfiche che nei tempi geologici hanno subito successive fasi di disidratazione mediante eventi metamorfici di grado progressivamente alto fino alla completa disidratazione. Se i processi di disidratazione sono irregolarmente distribuiti nella crosta, si **troveranno regionalmente associati terreni granulitici e terreni in facies anfibolitica di alto grado (es. granuliti-gneiss a Bt+gt+sill)**
- 4) **ANATESSI e DEGRANITIZZAZIONE**: i processi di deidratazione a scala regionale possono avvenire per effetto di spinta anatessi di terreni metamorfici di alto grado: H_2O si partiziona nel fuso granitico che viene allontanato ed il residuo solido restitico viene così disidratato e degranitizzato. Se la restite permane ad alta T , si trasforma in granulite. Secondo questo modello sono spiegabili **a scala regionale le associazioni di terreni granulitici e migmatitici**

Facies granulitica



Simplified cross section of the continental crust

From: Roberts, N. M. W., Van
Kranendonk, M., Parman, S., Shirey,
S. & Clift, P. D. (eds) 2015.
Continent Formation Through Time.
Geological Society, London, Special
Publications, 389, 1–16.

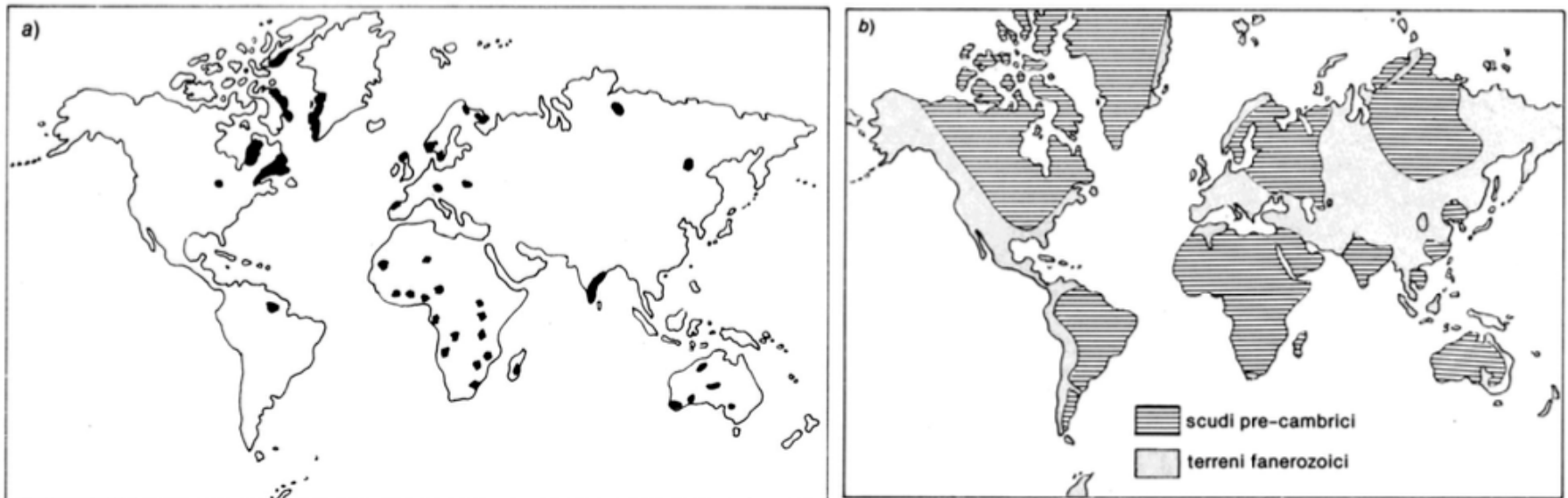
Facies granulitica

collocazione geologica di rocce granulitiche: crosta relativamente profonda e antica sede di eventi geologici e termici prolungati nel tempo.

Le conoscenze indicano che:

- 1) Granuliti : rocce dominanti nella crosta continentale profonda
- 2) Granuliti : nei basamenti cristallini polimetamorfici antichi
- 3) Granuliti : associate a terreni migmatitici
- 4) Contesti tettonici:
 - a) ispessimento crostale (catene collisionali)
 - b) underplating di magmi basaltici (contesti estensionali)

Età: non si conoscono granuliti in aree metamorfiche di età alpina, compaiono nei terreni Ercinici e sono molto diffuse nei terreni precambri. In Italia: in Piemonte (zona Ivrea-Verbano) ed in Calabria centro-settennionale.



a) Distribuzione dei complessi rocciosi in facies granulitica e b) degli scudi precambri

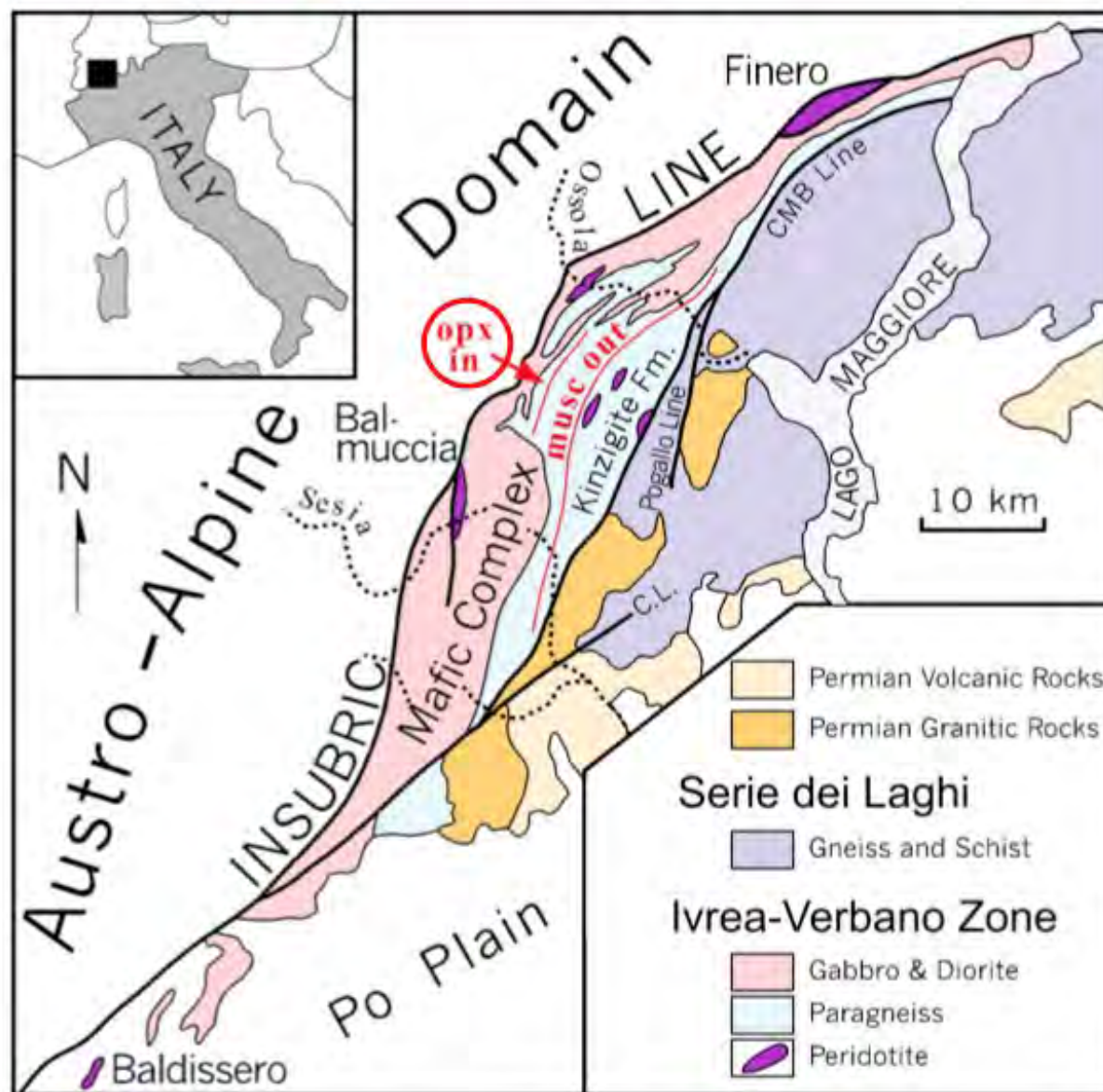
Nota che i terreni granulitici cadono tutti all'interno degli scudi precambri (D'Amico et al, 1989)

isograda Musc out = facies anfibolitica di alto grado

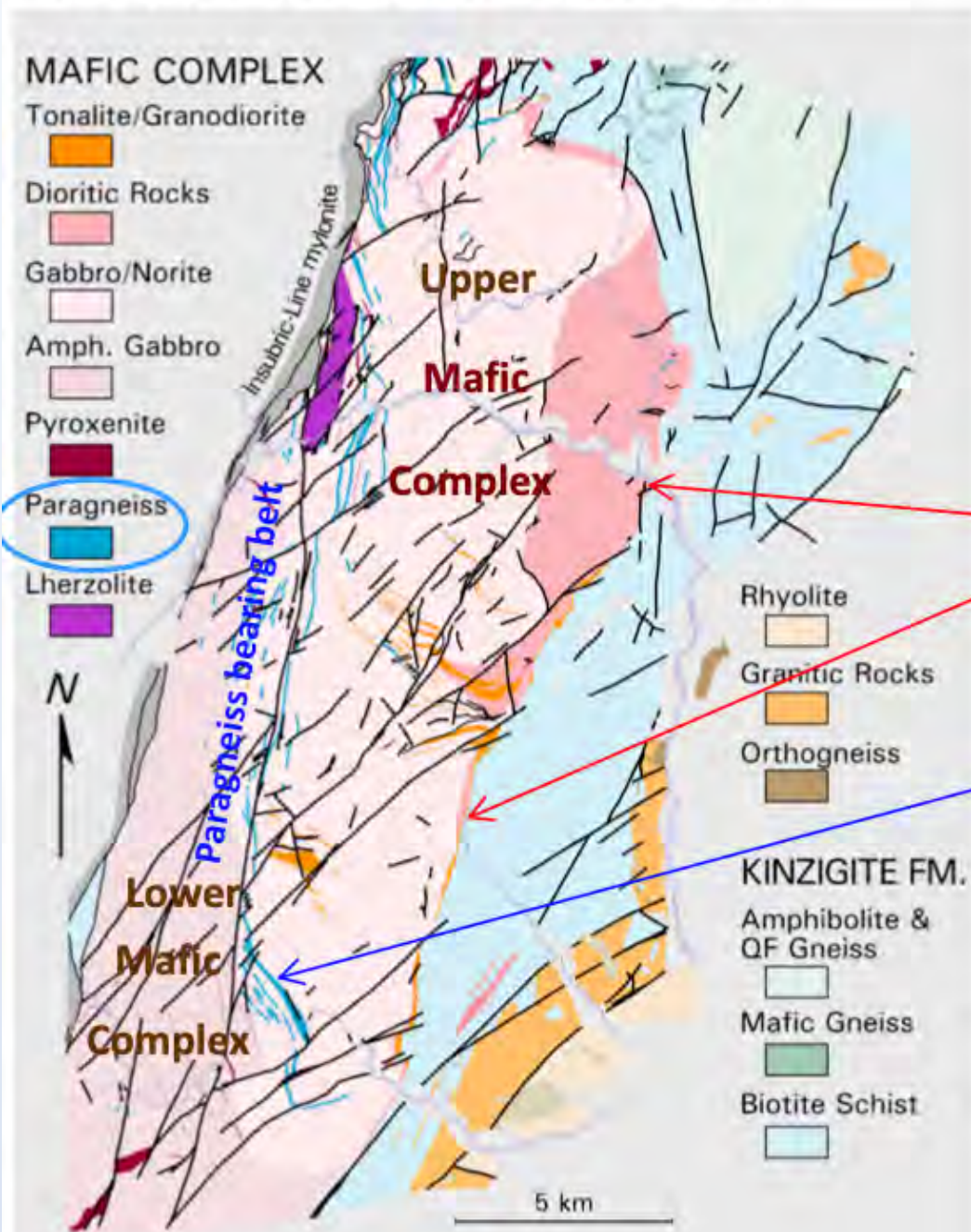
Isograda

**opx
in**

= facies granulitica



Ivrea-Verbano Zone (sudalpino Occidentale)



Tetto del Mafic Complex : migmatiti con paragneiss in facies anfibolitica di alto grado :
 $gt+bt+sill$ fibrolite $\pm$ cord + plag (antip) + K-feld + qz

Setti di metapeliti//metagrovacche in facies granulitica all'interno del Mafic Complex. Fascia di setti definita "paragneiss bearing-belt"

Paragenesi:

- $gt+sill$ prismatica $\pm$ antipertite o mesopertite + qz
- $gt+opx \pm cpx \pm antipertite$ o mesopertite + qz



**setti
granulitici**

gabbro

**setti
granulitici**

gabbro

gabbro

**Setti granulitici inclusi nel corpo
gabbrico (Ivrea-Verbano Mafic
Complex)**



**setto granulitico con mobilizzati
chiari charnockitici**

charnockite = roccia granitoide a opx

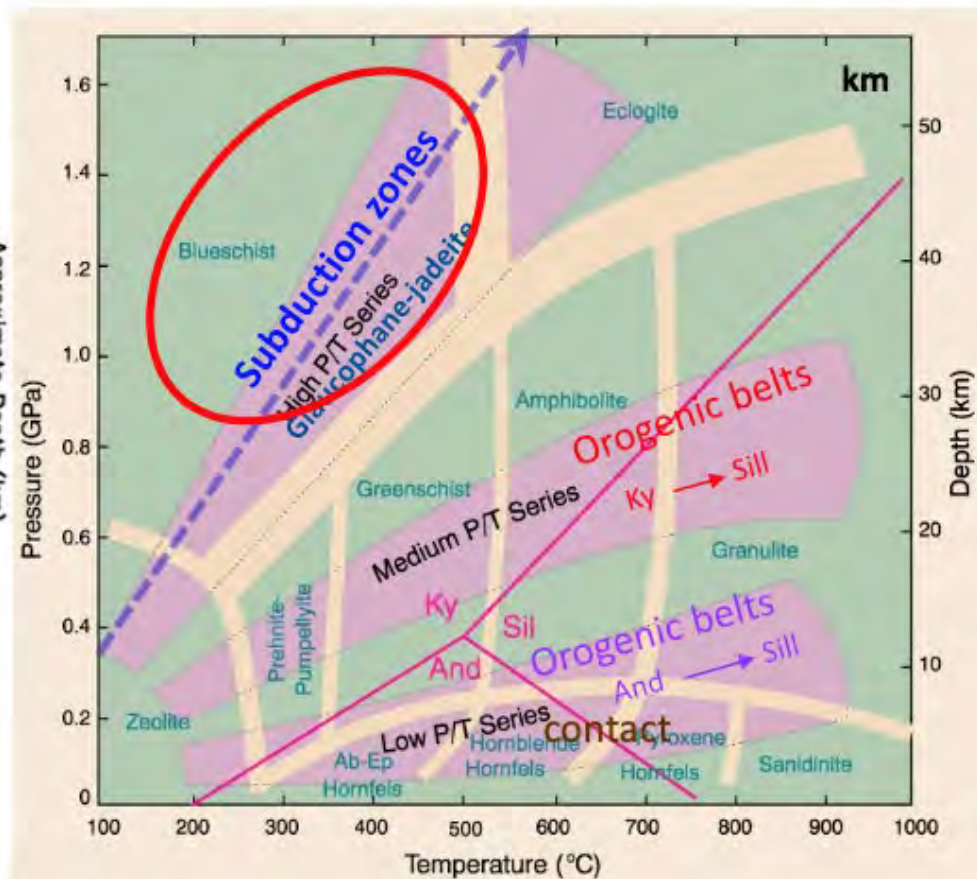
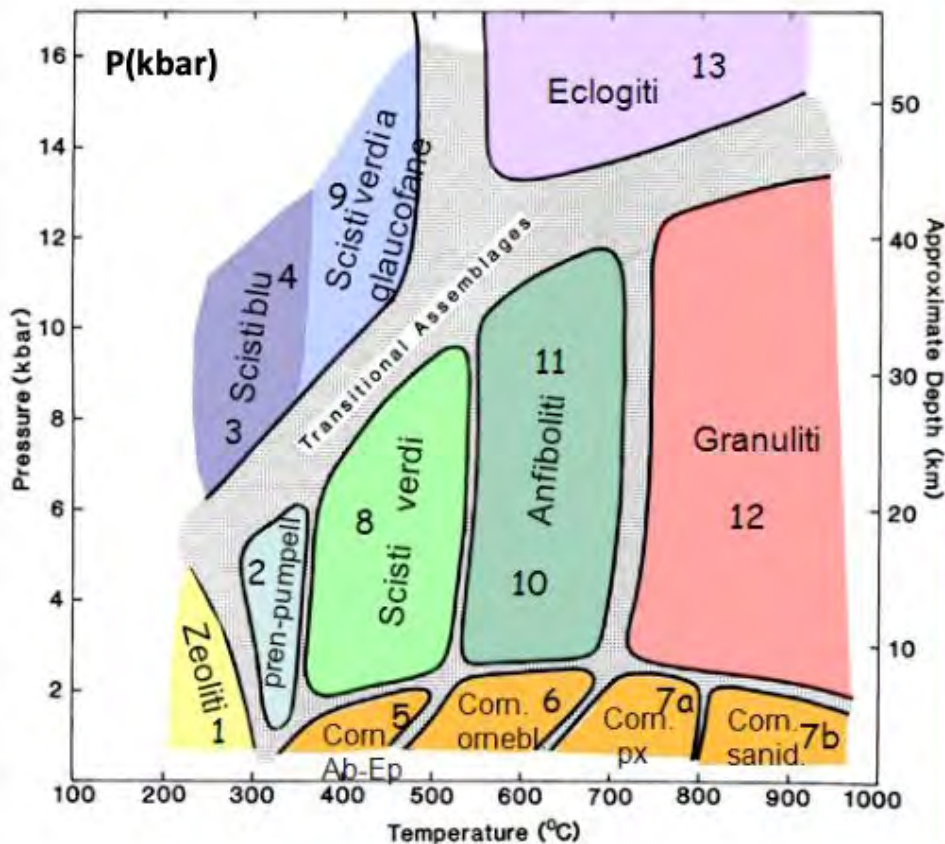


**Banda granulitica
molto ricca in Gt**

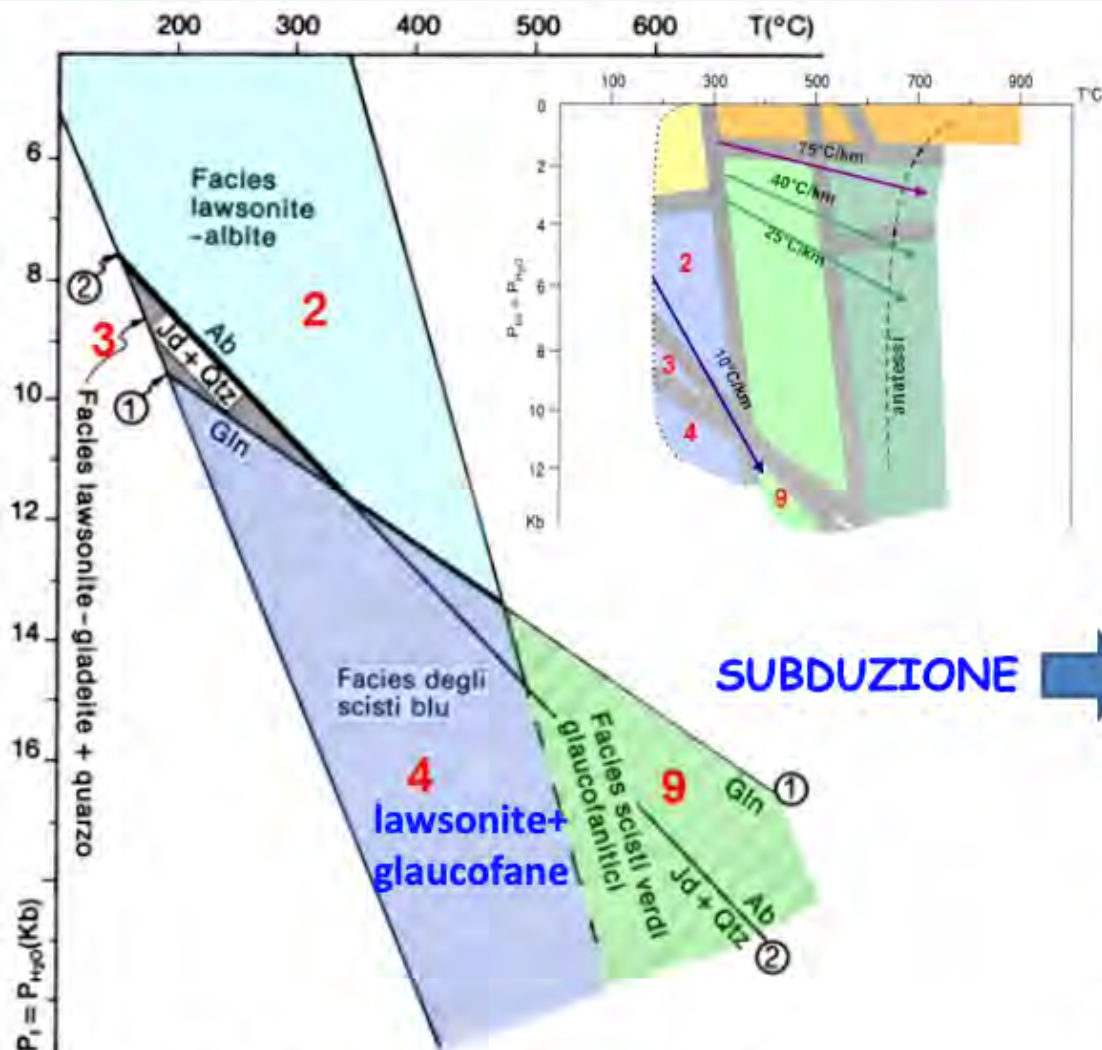
b



Metamorfismo di seppellimento e subduzione



Metamorfismo di seppellimento e subduzione



le facies per P crescente

campo 2) F. a lawsonite+albite

lawsonite $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O}$

albite $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$

Campo 3) F. a lawsonite+giadiete+quarzo

giadeite $\text{Na}(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})\text{Si}_2\text{O}_6$

Campo 4) F. a lawsonite+**GLAUCOFANE**

detta **FACIES SCISTI BLU**

glaucofane $\text{Na}_2\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

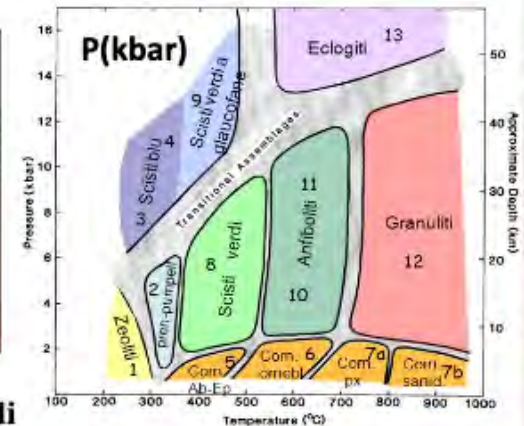
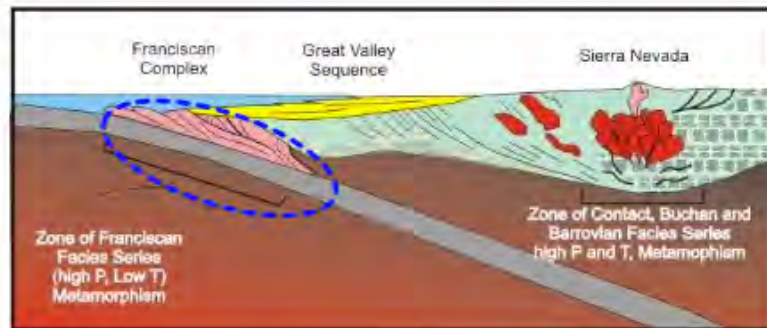
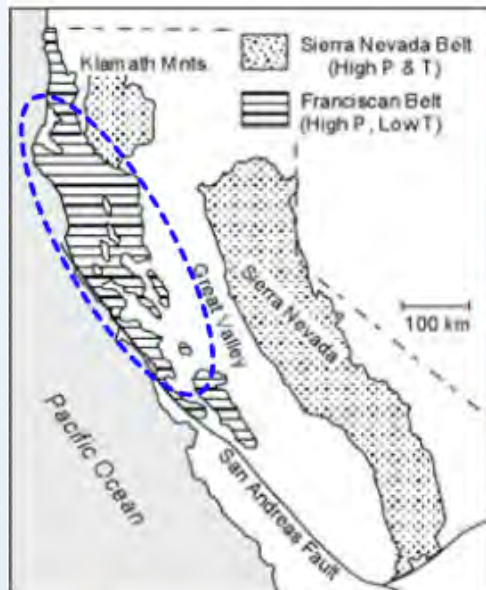
FORMAZIONE DI GLAUCOFANE SOLO
IN PROTOLITI **BASICI**

Linea 1 = comparsa del glaucofane

Linea 2 = scomparsa dell'albite

La F. SCISTI VERDI GLAUCOFANITICI (9) è
la facies di alta P della f. SCISTI VERDI

Metamorfismo di seppellimento e subduzione

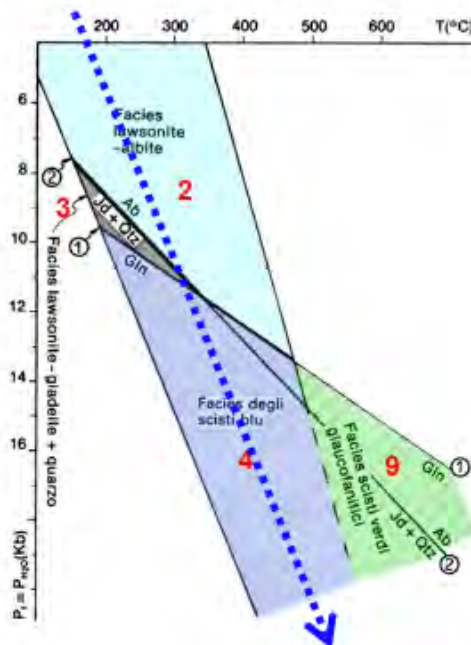


Progressivi cambiamenti mineralogici in metabasiti di alta P, riferiti a terreni "Franciscan-type"

Facies	Zeolite	Prehnite-Pumpellyite	Blueschist	Eclogite
Quartz				
Albite				
Laumontite				
Other zeolites				
Prehnite				
Pumpellyite				
Lawsonite				
Epidote				
Clinopyroxene				
Glaucophane				
Actinolite				
Garnet				
Chlorite				
Stilpnomelane				
Phengite				
Titanite				
Rutile				
Calcite				
Aragonite				

Tab. da Bucher and Grapes (2011)

Fig. 9.13 Progressive mineral changes in high-P metabasites, Franciscan terrane, California (Data from Ernst 1965, 1971; Ernst et al. 1970; Jayko et al. 1986; Brothers and Grapes 1989)



Facies scisti blu

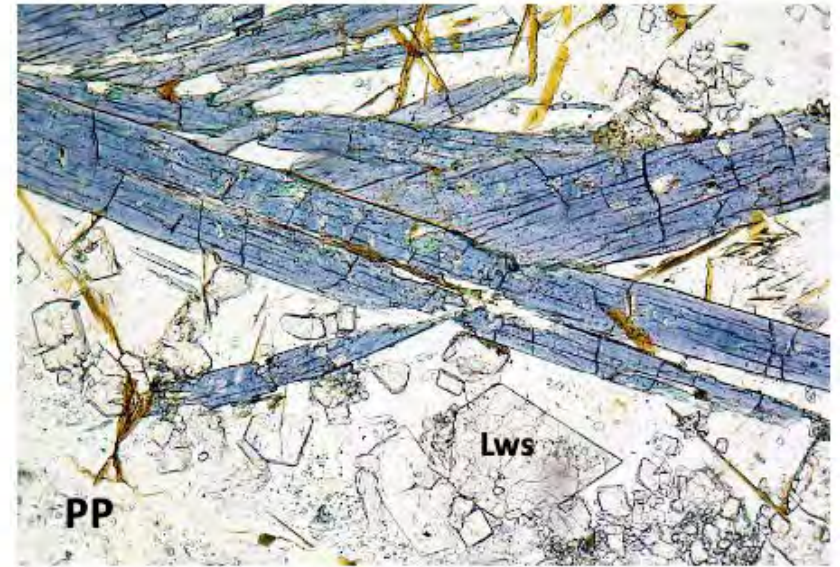


Metabasiti in facies Scisti blu

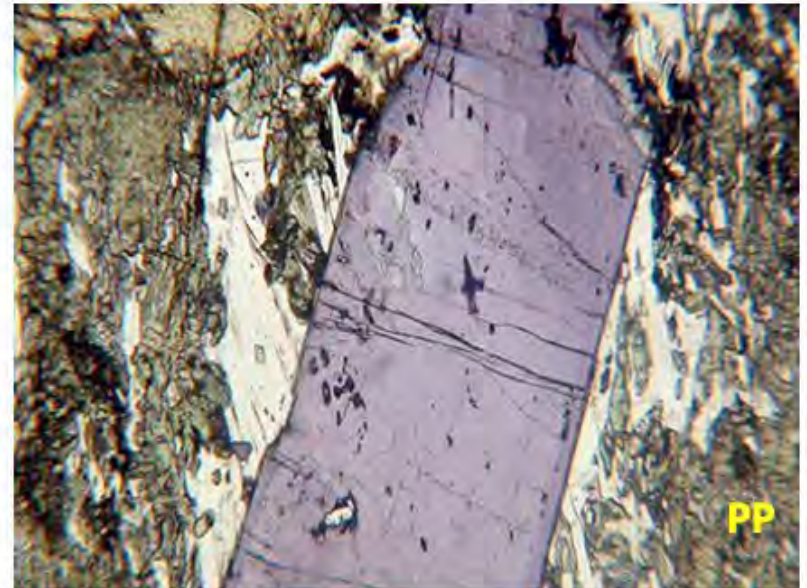
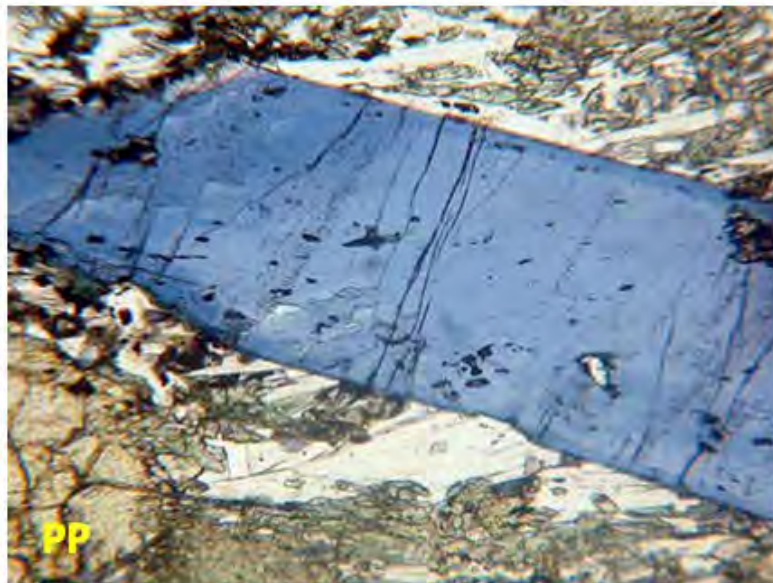


cristalli di
glaucofane (Gln)

Facies scisti blu

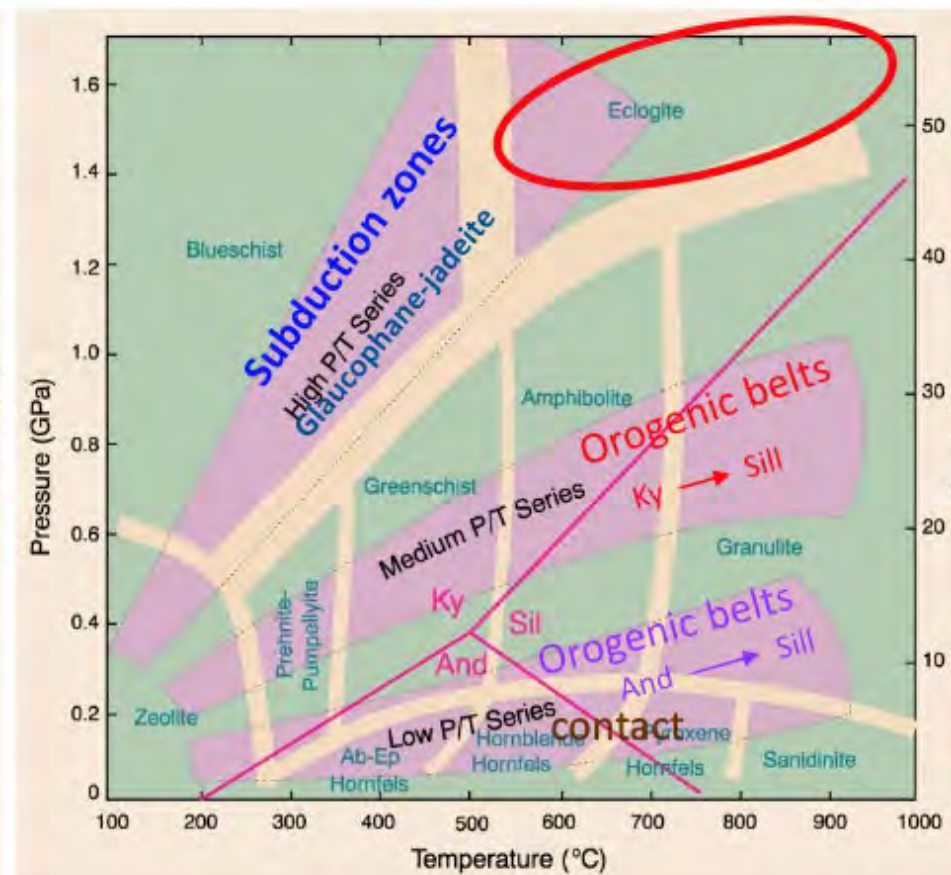
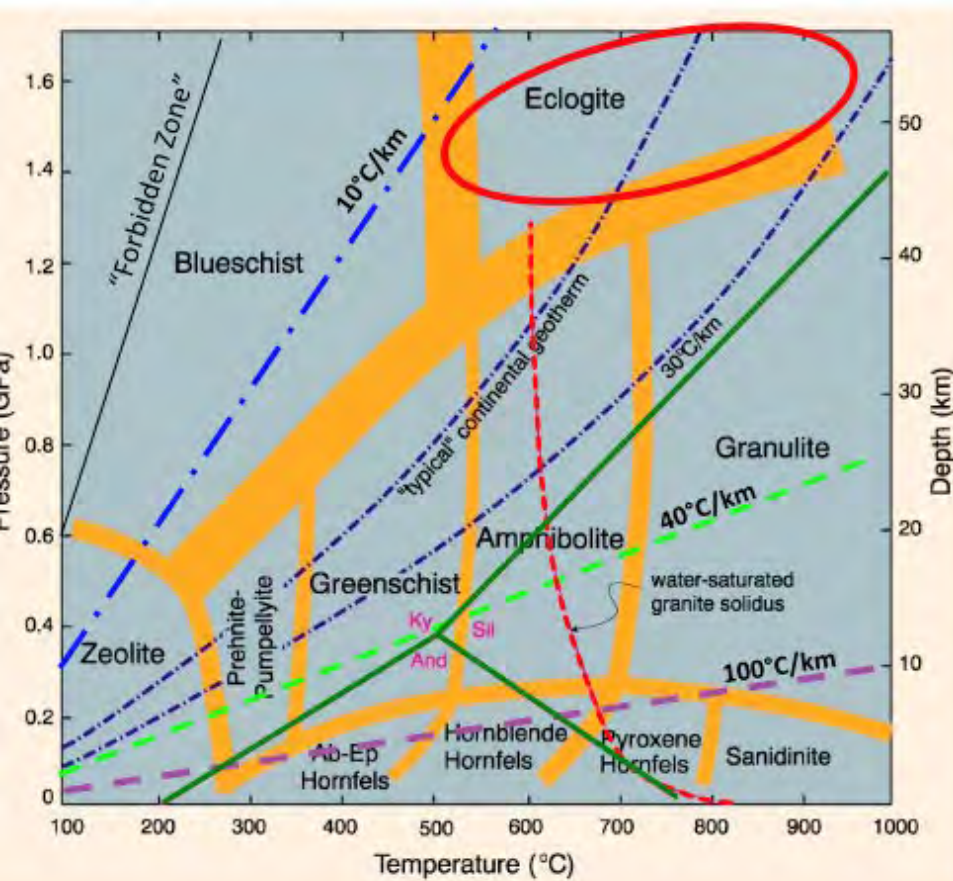


Glaucofane in sezione basale (sx), e parallela all'allungamento associato a lawsonite (Lws) in minuti cristalli incolori rettangolari (dx) . Campo visivo 2mm

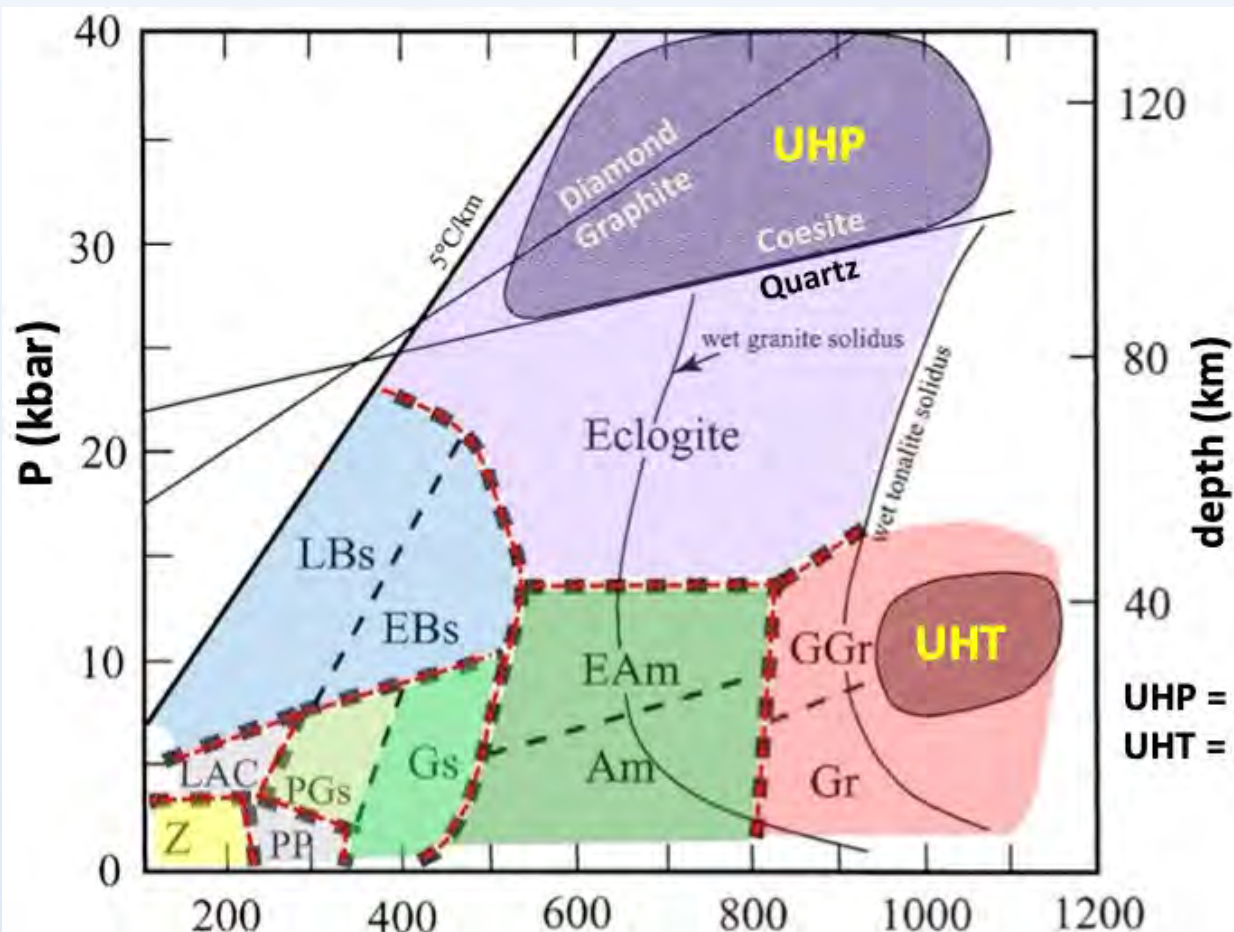


Pleocroismo del glaucofane . Campo visivo 2mm

Facies eclogitica



Facies eclogitica



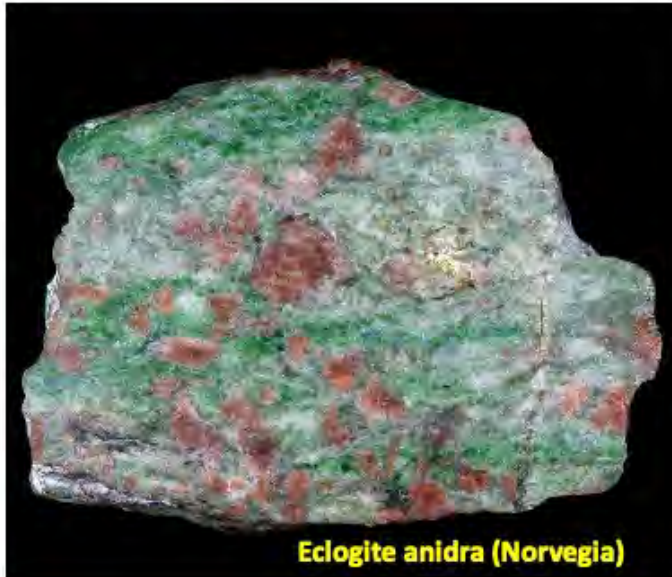
UHP = ultra high pressure;
UHT = ultra high temperature

P-T conditions of metamorphism showing the conditions for UHP and UHT metamorphism and the approximate conditions for the metamorphic facies. Am = amphibolite, EAm = epidote amphibolite, EBs = epidote blueschist, LBs = lawsonite blueschist, Gr = granulite, GGr = garnet granulite, Gs = greenschist, PGs = pumpellyite greenschist, PP = prehnite-pumpellyite, LAC – lawsonite-albite-chlorite, Z = zeolite

(da Frost & Frost, 2014)

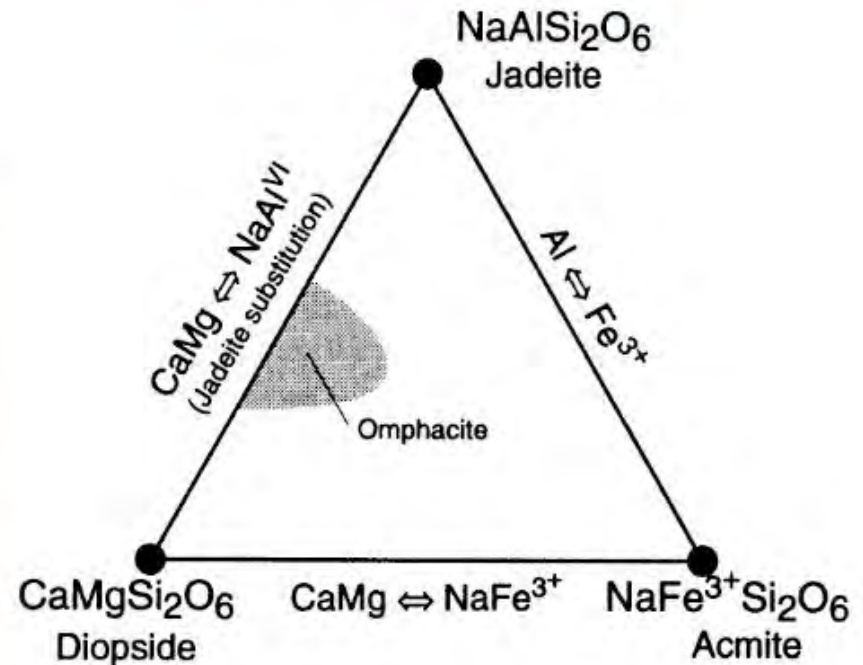
Facies eclogitica

Facies ECLOGITICA



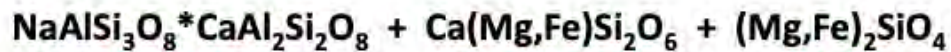
ECLOGITI:

- ALTA PRESSIONE ($P > 11-12$ kbar)
- P_{H_2O} da 0 a $\ll P_{tot}$
- ampio range $T^\circ C$ (500 - >900)
- da **PROLITO BASICO** (basalti/gabbri)
- associazione mineralogica diagnostica
ONFACITE + GRANATO
ASSENZA DI PLAGIOCLASIO



Facies eclogitica

Eclogiti : alta P - assenza di plagioclasio

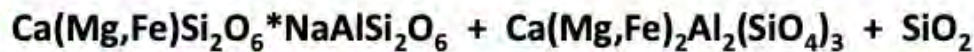
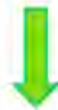


plagioclasio

cpx (augite)

olivina

gabbro/basalto



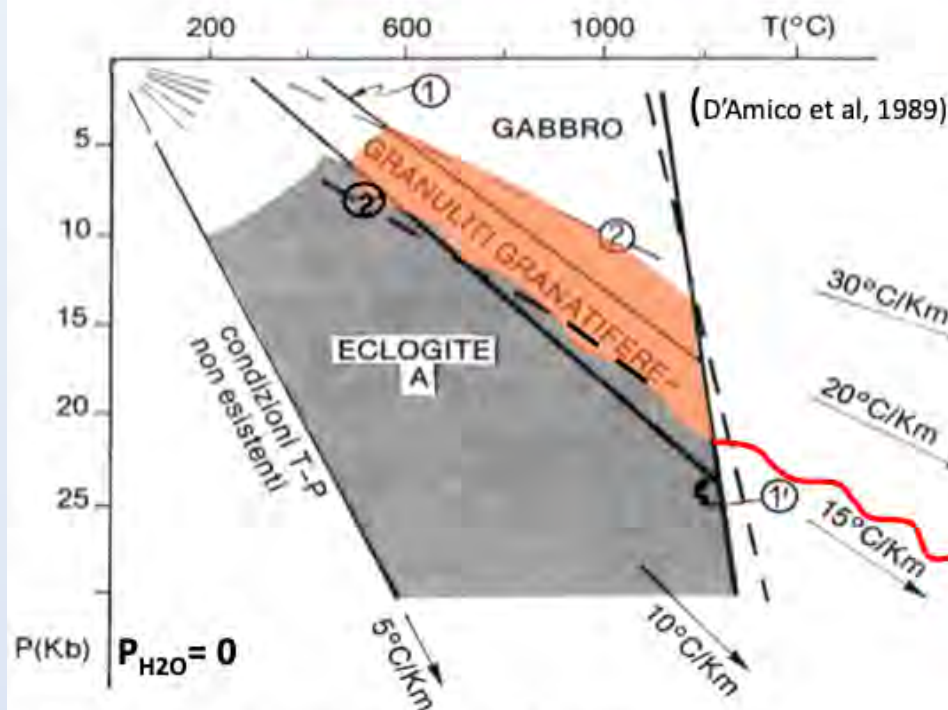
diopside * giadeite

granato

quarzo

omfacite

ECLOGITE ANIDRA – TIPO A



Dati sperimentali sull'instabilità del plagioclasio per incremento di P

Il passaggio da gabbri a eclogiti (per > P) avviene gradualmente :

GABBRI → GRANULITI BASICHE a GRANATO → ECLOGITI

1 + 2 : curve di trasformazione da gabbro a granulite a granato

1' + 2' : curve di trasformazione da granulite a granato a eclogite

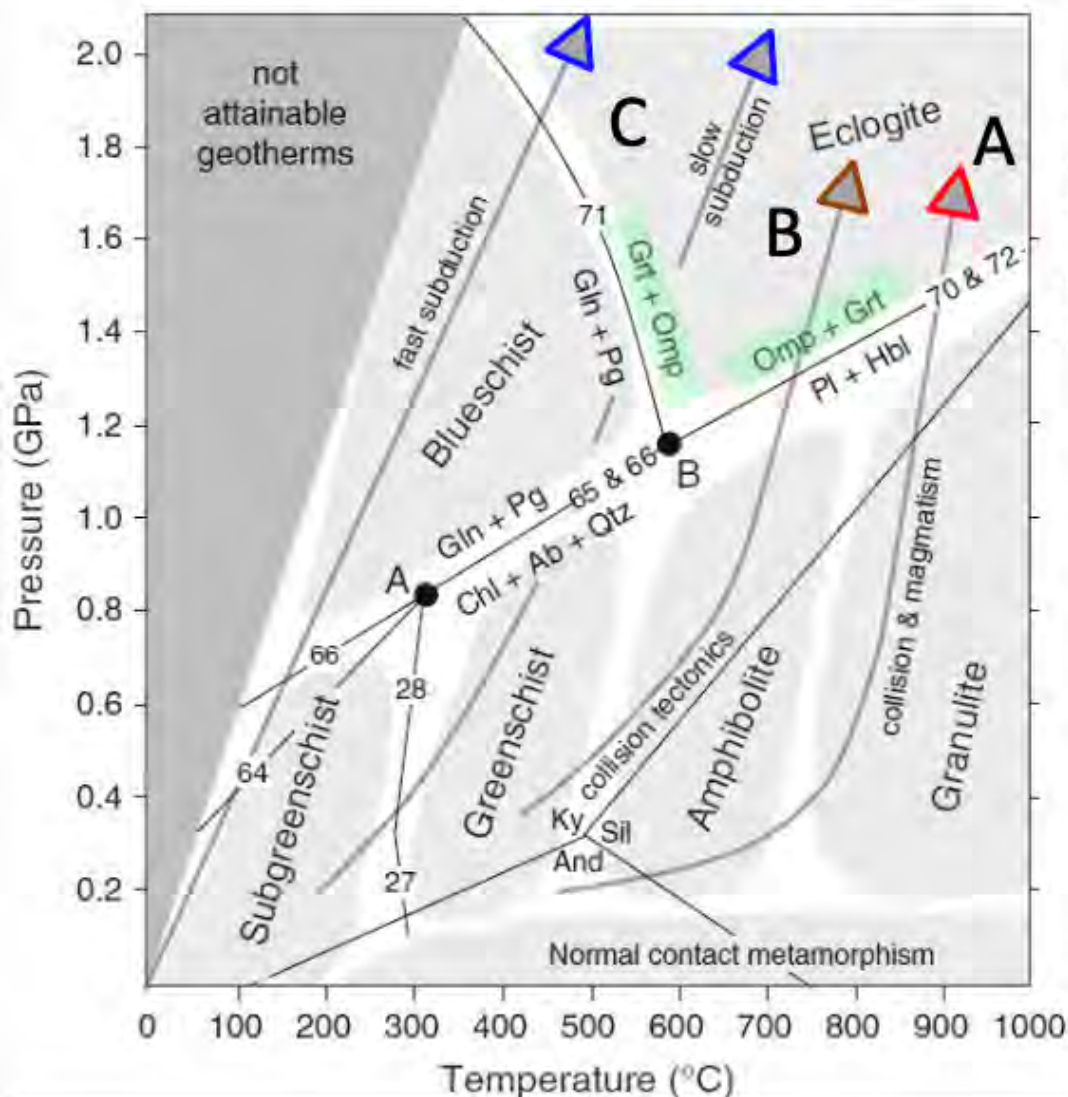
La curva ondulata definisce la scomparsa del plagioclasio, presente nelle granuliti, ma ASSENTE nelle eclogiti

Caratteri mineralogici delle eclogiti :

- 1) minerali anidri di elevato peso specifico e basso V molare (omfacite+granato) : rocce di elevato densità (3.5 g/cm³)**
- 2) ASSENZA di plagioclasio**

Facies eclogitica

Eclogiti : formazione per ampio range di T e P >11-12 kbar



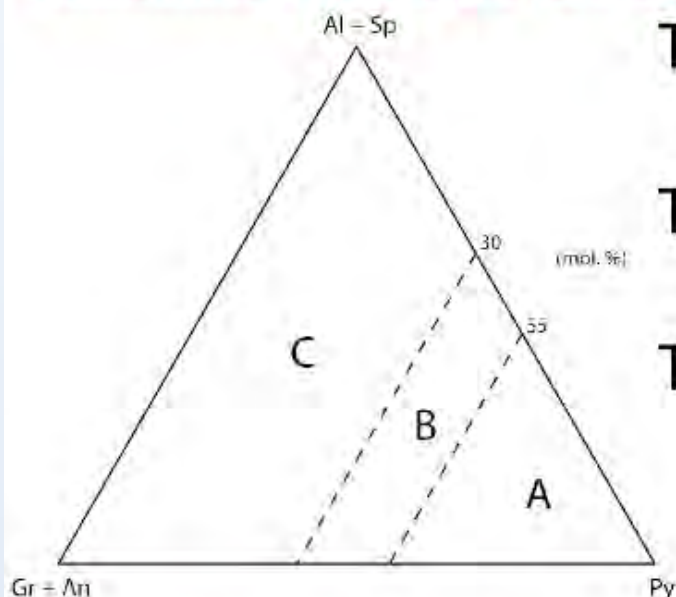
Le eclogiti si possono formare in differenti contesti geologici per un ampio range di T : da 500° – >900°C e P >11-12 kbar per 3 possibili traiettorie di metamorfismo progrado dalle facies adiacenti :

- ▶ in ambiente di **subduzione**, da rocce in facies scisti blu
- ▶ in ambiente di **collisione continentale**, da rocce in facies anfibolitica
- ▶ in ambiente di **estensione crostale** associato a magmatismo, partendo da granuliti mafiche, o per cristallizzazione di *magmi basici* all'interno del mantello

A, B, C si riferisce alla classificazione delle eclogiti da Coleman et al (1967)

Facies eclogitica

Classificazione delle eclogiti (Coleman et al. 1967) basata sul contesto geologico



Type A

Xenoliths in kimberlites, basalts, or layers in ultramafic rocks

Type B

Bands or lenses within migmatitic or gneissic terranes

Type C

Bands or lenses associated with blueschists (a.k.a. Alpine-type)

Differenze composizionali del granato nei diversi tipi di eclogite (Coleman et al. ,1967). Almandino (Al), Spessartina (Sp), Grossularia (Gr), Andradite (An), and Piropo (Py)

Classificazione delle eclogiti , secondo Carswell (1990), basata sulla T° di formazione

High

>900°C

Upper Mantle

Medium

550-900°C

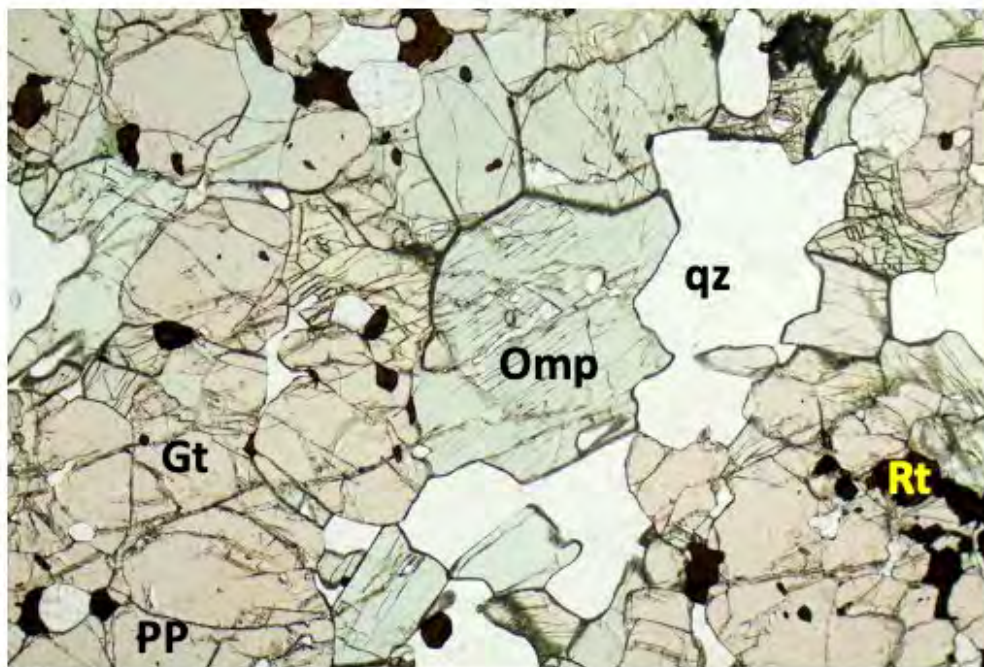
Tectonically thickened continental crust

Low

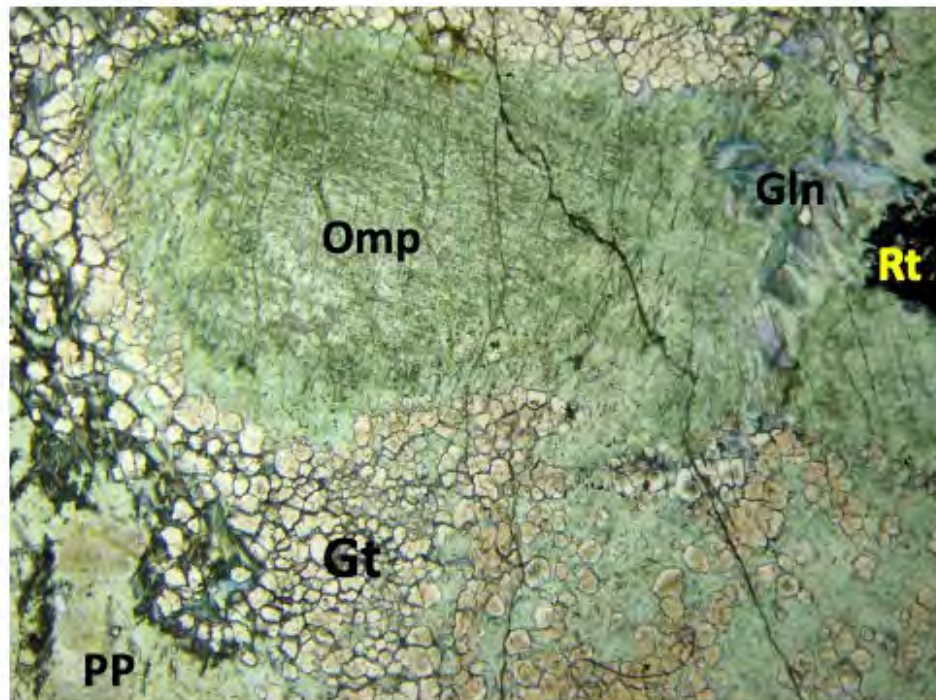
<550 °C

Subducted oceanic crust and arc-trench sediments

As an alternative, Carswell (1990) suggested that eclogites are best discriminated by temperature, which in a broad sense still maintains discrimination of geological environment.



Eclogite anidra
 Omp = omphacite
 Gt=granato; qz= quarzo Rt= rutilo
 (lato lungo 7mm)



Eclogite (Voltri) con
 glaucofane (Gln, cristalli
 azzurri)
 (lato lungo 7mm)

Facies eclogitica

- ▶ Eclogiti (e in generale rocce di alta P) : paragenesi mineralogica “complessa”
- ▶ Risultato dei meccanismi di risalita in superficie – cioè delle traiettorie P-T di “esumazione”
- ▶ Conseguenti modificazioni della paragenesi primaria per decompressione
- ▶ Reazioni di de-eclogitizzazione → Importanza analisi microstrutturale

PROCESSI DI FORMAZIONE DELLE FASI IDRATE :

- 1) Eclogiti prodotte NON in completa assenza di H_2O , ma con $P_{H_2O} \neq 0$; contemporaneamente alla formazione di omfacite e granato cristallizzano anche minerali idrati, compatibili con le condizioni termiche



paragenesi idrata **PRIMARIA**
minerali idrati in equilibrio tessiturale con i minerali anidri

- 2) Eclogiti che DOPO l'evento metamorfico in F. eclogitica a $P_{H_2O} = 0$ hanno subito delle trasformazioni con introduzione di H_2O e conseguente cristallizzazione di fasi idrate



paragenesi idrata **SECONDARIA**
i minerali idrati tenderanno a sostituire quelli anidri

distinzione
su base
microstrutturale

Es: omfacite + granato + qz + H_2O → glaucofane + grossularia s.s. + paragonite (Na-mica)

⇒ segni di disequilibrio tessiturale e comparsa di microstrutture di reazione

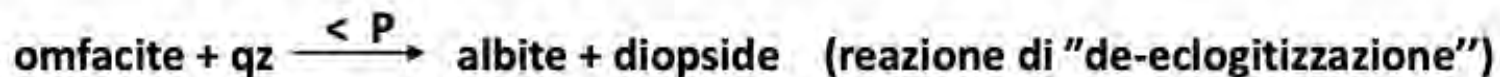
Facies eclogitica

3) TRASFORMAZIONE delle ECLOGITI : successivo evento metamorfico

ANIDRO a < Pressione



Omfacite instabile – comparsa di microstrutture coronitiche/simplectitiche/chelifitiche formate da minutissimi aggregati vermiformi di Albite + diopside



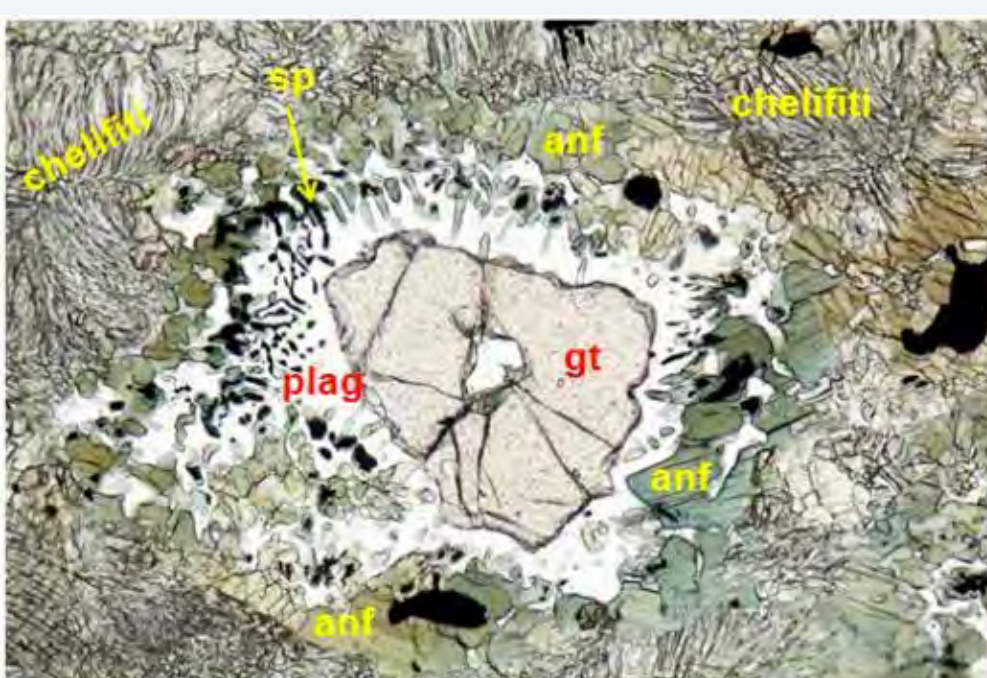
In realtà i processi **2) + 3) sono spesso combinati :**

evento metamorfico a < P + introduzione di H₂O-fluidi



retrocessione

- destabilizzazione di omfacite (sostituita da simplectiti)
- comparsa di Albite
- comparsa di minerali idrati (anfiboli, miche, clorite)

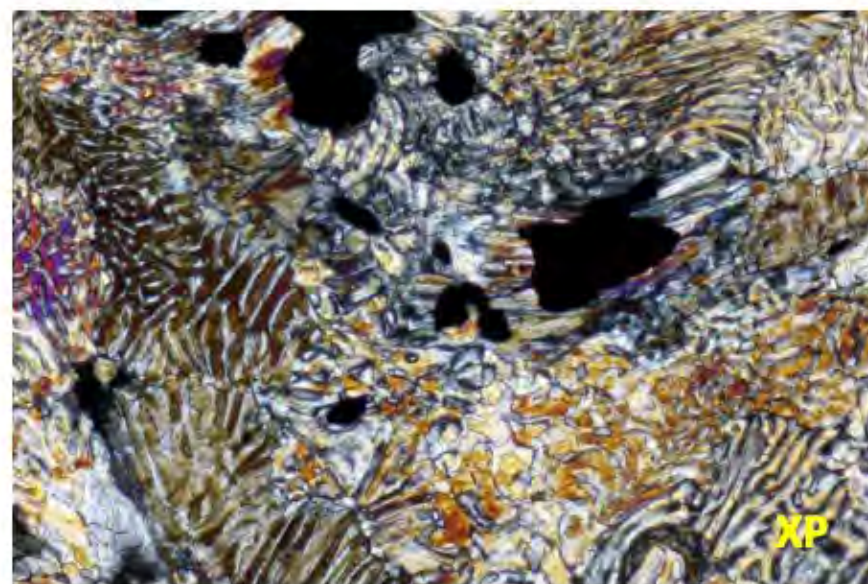
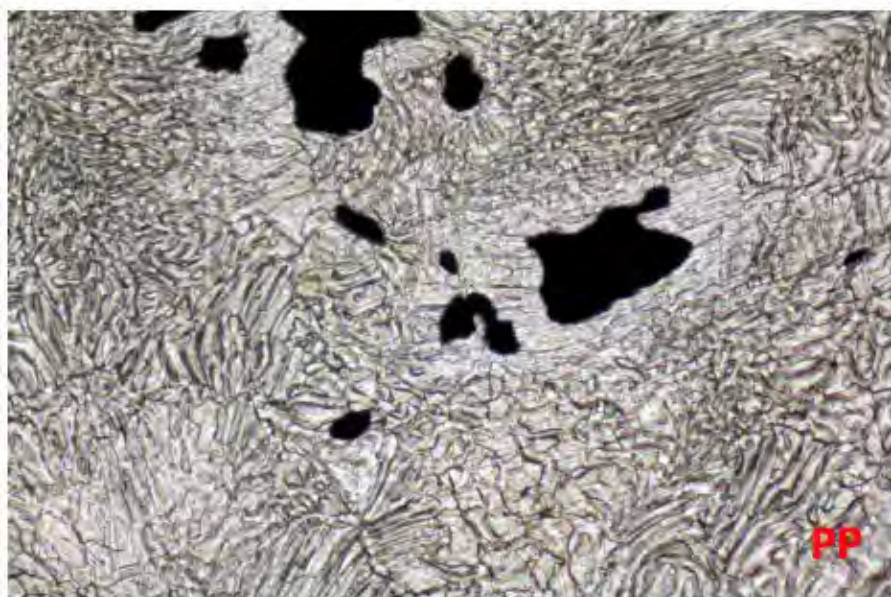


pirosseno + granato + H₂O = anfibolo + plagioclasio

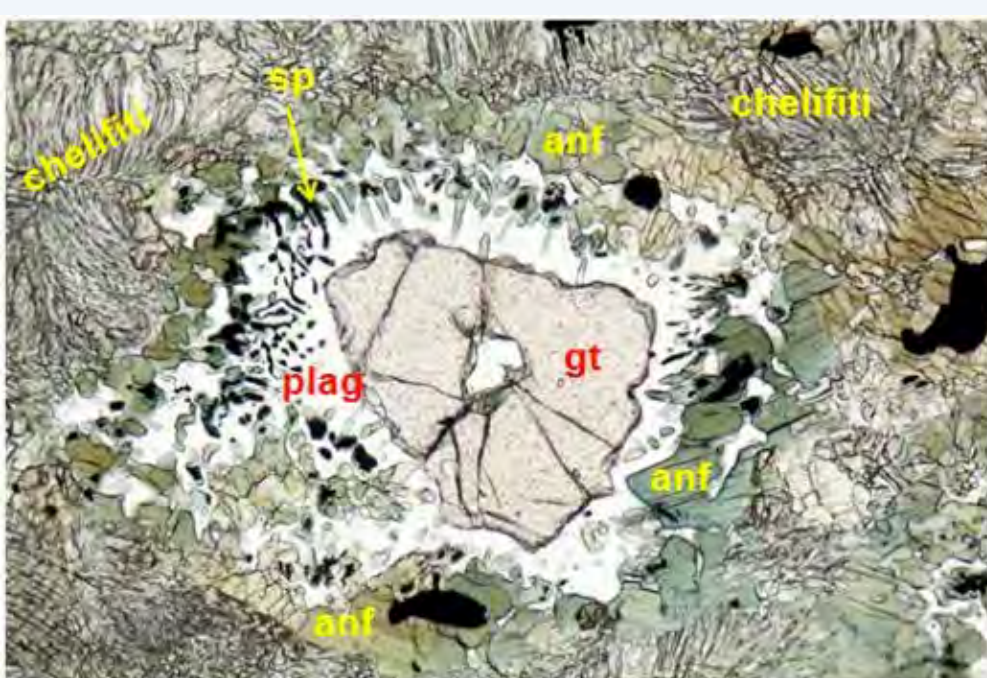
Facies eclogitica

Facies anfibolitica

microstrutture coronitiche attorno a granato(plag+spinello) + anfibolo + chelifiti, molto frequenti nelle eclogiti: registrano una diminuzione di P associata ad introduzione di H₂O nel sistema; testimonianza del percorso di risalita di queste rocce da grandi profondità sino alla superficie terrestre.



Particolare delle chelifiti di diopside + albite in sostituzione del pirosseno omfacitico
 omfacite + qz → albite + diopside

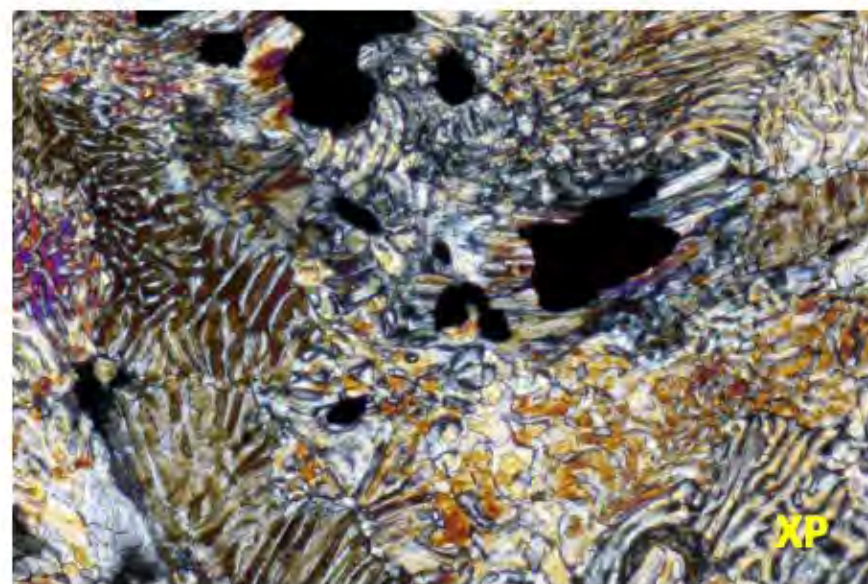
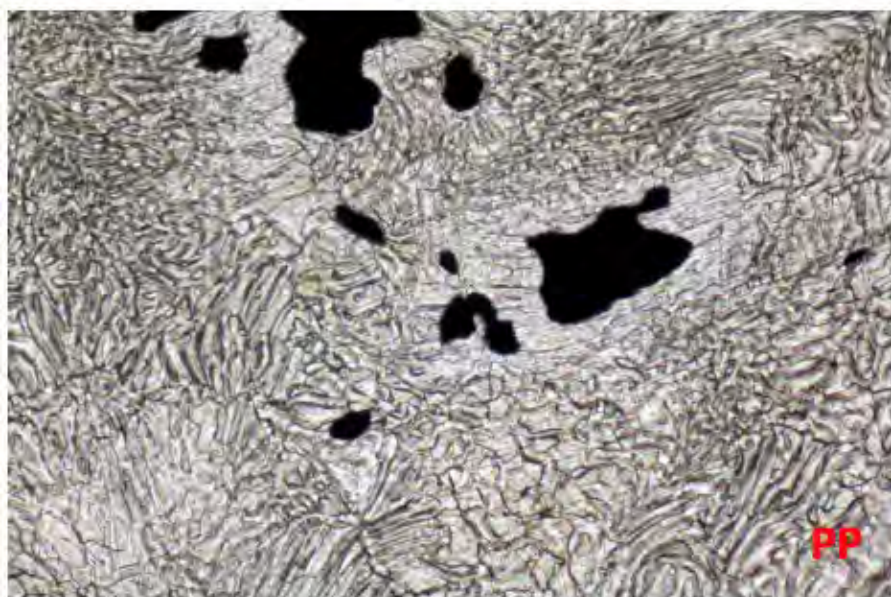


pirosseno + granato + H₂O = anfibolo + plagioclasio

Facies eclogitica

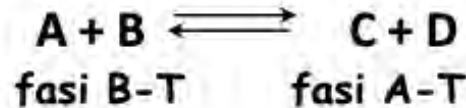
Facies anfibolitica

microstrutture coronitiche attorno a granato(plag+spinello) + anfibolo + chelifiti, molto frequenti nelle eclogiti: registrano una diminuzione di P associata ad introduzione di H₂O nel sistema; testimonianza del percorso di risalita di queste rocce da grandi profondità sino alla superficie terrestre.



Particolare delle chelifiti di diopside + albite in sostituzione del pirosseno omfacitico
 omfacite + qz → albite + diopside

Reversibilità delle reazioni metamorfiche



IN REALTA' :



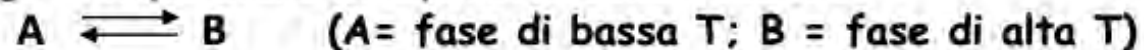
Le reazioni metamorfiche **NON**
sono reversibili



Le associazioni mineralogiche
corrispondono al picco termico

Perchè'?

- 1)** La cinetica di una reazione è descrivibile mediante velocità finite solo se tale reazione avviene in un contesto termico molto diverso dall'equilibrio per T_E = temperatura di equilibrio della reazione



Per $T \gg T_E$ la reazione procederà in nel senso $A \longrightarrow B$

Per $T \ll T_E$ la reazione avverrà in senso opposto $A \longleftarrow B$

Siccome la cinetica di una reazione è funzione della T ($>T >$ velocità della reazione), la reazione $A \longrightarrow B$ sarà molto più veloce della reazione $A \longleftarrow B$ che potrebbe avere una velocità quasi nulla.

Reversibilità delle reazioni metamorfiche

- 2) se, come in genere avviene nel metamorfismo per T crescenti, tale reazione è una reazione di de-vaporizzazione, es. $A \longrightarrow B + H_2O$ con sviluppo di fase fluida spesso allontanata dal sistema,

allora la reazione inversa

$A \longleftarrow B + \cancel{H_2O}$ non può avvenire per mancanza o diminuzione di uno dei reagenti (fase fluida)

- 3) La porosità nella maggior parte degli ambienti metamorfici consente una circolazione dei fluidi a grande scala mediante celle termoconvettive. Tale circolazione termoconvettiva tenderebbe a cessare dopo il picco termico metamorfico e con essa anche l'effetto catalizzatore dei fluidi sulle trasformazioni metamorfiche

1) + 2) + 3)



CONGELAMENTO ("PRESERVAZIONE ") dei prodotti metamorfici prodotti durante il picco termico

≈ IRREVERSIBILITA' delle reazioni metamorfiche

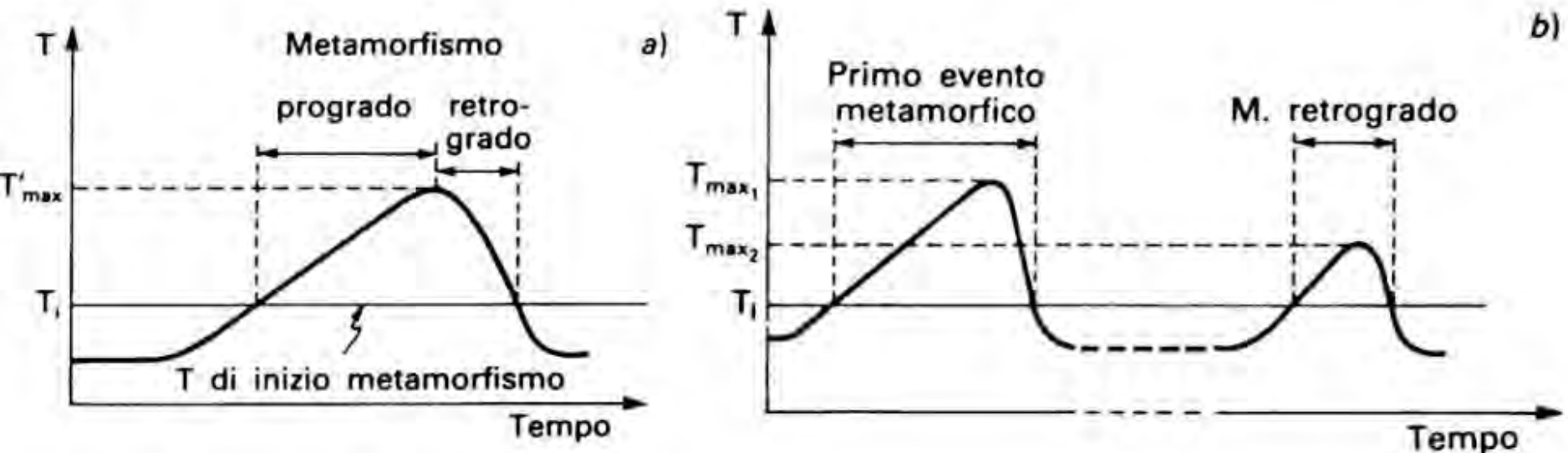
Reversibilità delle reazioni metamorfiche

Le curve tempo-temperatura degli eventi metamorfici sono asimmetriche : la fase di raffreddamento è molto più rapida della fase di riscaldamento (la fase di riscaldamento avviene in condizioni di isolamento termico controllato dalla profondità, mentre la fase di raffreddamento è legata al processo di erosione)

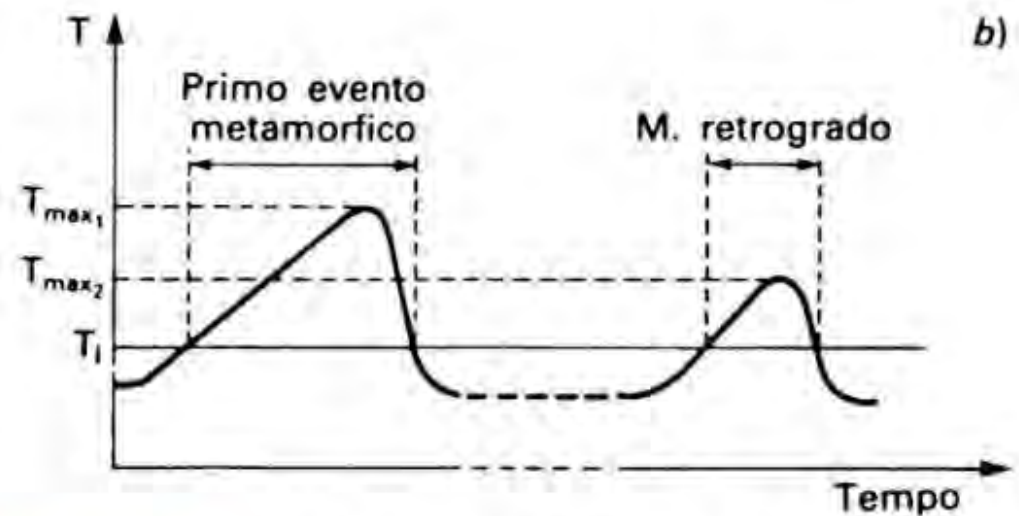
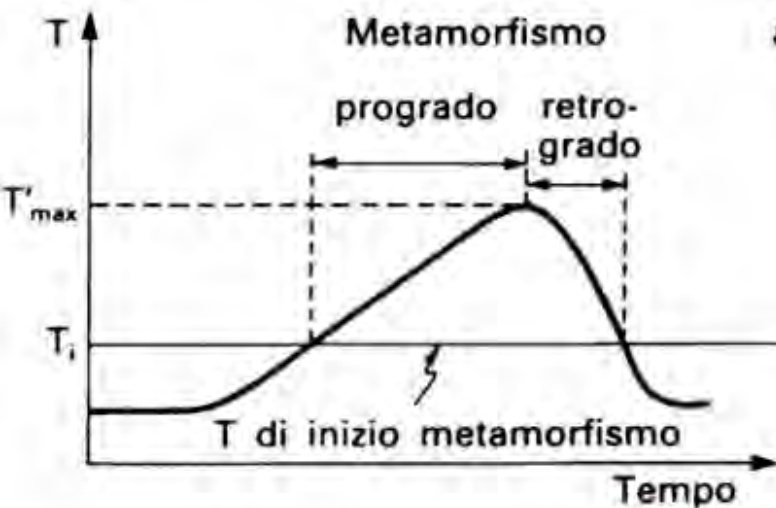


Questo fatto ulteriormente provoca la **IRREVERSIBILITA'** delle reazioni metamorfiche:

Le reazioni inverse di **RETROCESSIONE** sono quindi ulteriormente sfavorite dal tempo



Reversibilità delle reazioni metamorfiche



Caso A) variazione nel tempo di **1 evento metamorfico** : la diminuzione di T, quindi la retrocessione (svolgimento delle reazioni in senso inverso) ha effetti modesti, locali e limitati, di scarsa importanza geologica

Caso B) sequenza di **2 eventi metamorfici**, il 2° con $T^{\circ}C_{max2} < T^{\circ}C_{max1}$:
in questo caso la retrocessione metamorfica ha un significato diverso:
è legata ad un successivo ed indipendente evento metamorfico caratterizzato da una nuova attivazione termica (inferiore all'evento1), accompagnato da nuove deformazioni e nuova circolazione di fluidi.

La **RETROCESSIONE** diventa geologicamente importante quando una roccia metamorfica subisce un **NUOVO** evento metamorfico di più bassa T



sovrapposizione di caratteri strutturali e mineralogici del 2° evento su quelli del 1° evento metamorfico (= relitti strutturali e mineralogici del 1° evento)

Reversibilità delle reazioni metamorfiche

METAMORFISMO RETROGRADO o RETROMETAMORFISMO (o DIAFTORESI)

METAMORFISMO  PROGRADO: con avanzamento verso un grado metamorfico più alto
 RETROGRADO: retrocessioni verso un grado metamorfico più basso
(=RETROMETAMORFISMO)

POLIMETAMORFISMO = più eventi metamorfici, separati nel tempo, sullo stesso terreno



Sovrapposizioni di ≠ caratteri strutturali e mineralogici

METAMORFISMO
POLIFASE

1 evento metamorfico di lunga durata, svolto a più riprese, con
successione di periodi in cui cambiano le condizioni di cristallizzazione



Sovrapposizioni di ≠ caratteri strutturali e mineralogici

Su base puramente petrografica è molto difficile distinguere un polimetamorfismo da un metamorfismo polifase

Necessari studi interdisciplinari di petrografia, geocronologia, geologia e tettonica a scala regionale