

2.2. Cristallizzazione magmatica

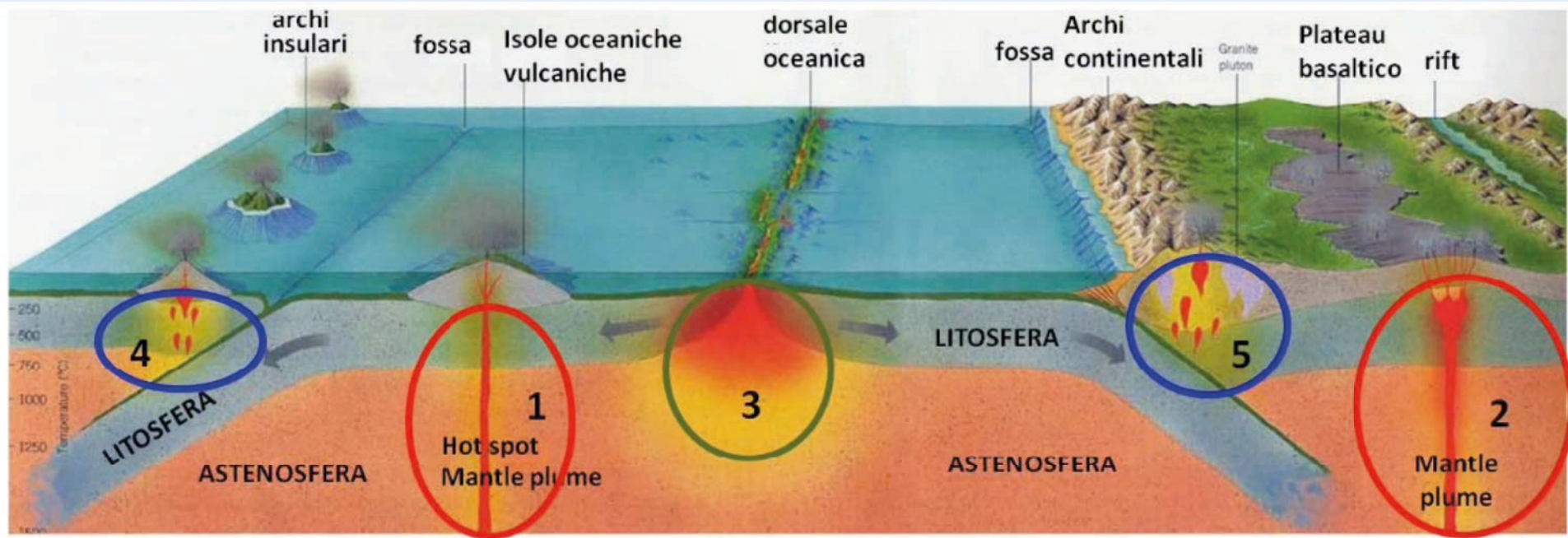
(con alcuni concetti introduttivi sulla generazione dei magmi)

La generazione dei magmi

I magmi sono dei fusi viscosi ad altissime temperature (500–1400°C) composti da liquidi ± minerali ± gas e prodotti dalla fusione di rocce nell'interno terrestre.

Le sorgenti dei magmi si possono fondamentalmente dividere in due tipologie:

- 1) **Mantello superiore**
- 2) **Crosta**



www.livescience.com

La generazione dei magmi

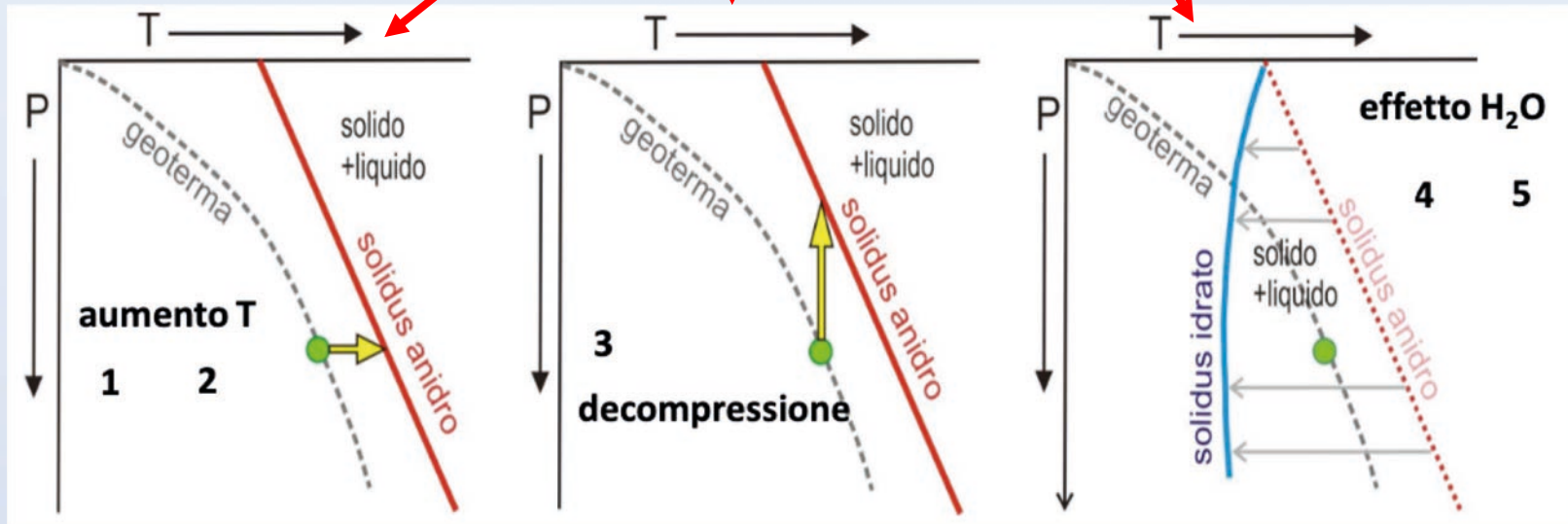
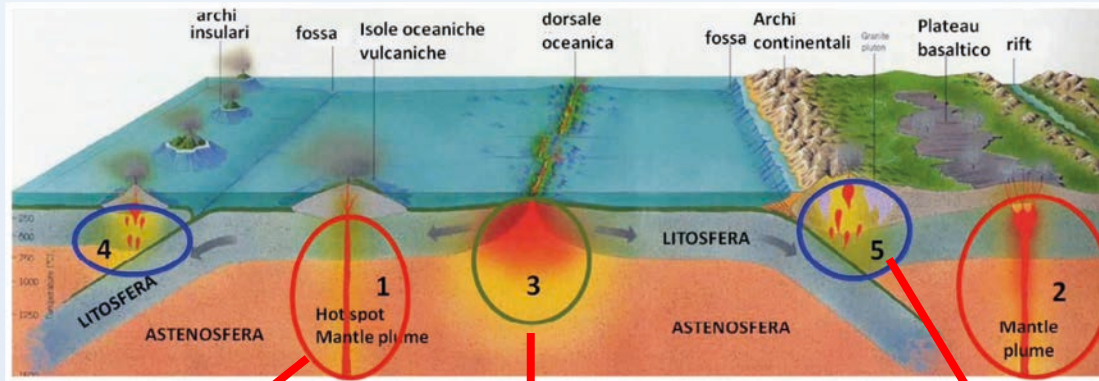
1) Mantello superiore

Costituito principalmente da **peridotiti** (Ol + Opx + Cpx + Plag/Sp/Grt).

La fusione parziale del mantello produce magmi basici (basalti). Il primo magma prodotto si definisce **primario**.

Ol: Olivina
Opx: Ortopirosseno
Cpx: Clinopirosseno
Plag: Plagioclasio
Sp: Spinello
Grt: Granato

NB: Plag, Sp e Grt sono fasi aluminifere che dipendono dalla pressione.
Plag < 10 kbar
10 < Sp < 25 kbar
25 kbar < Grt

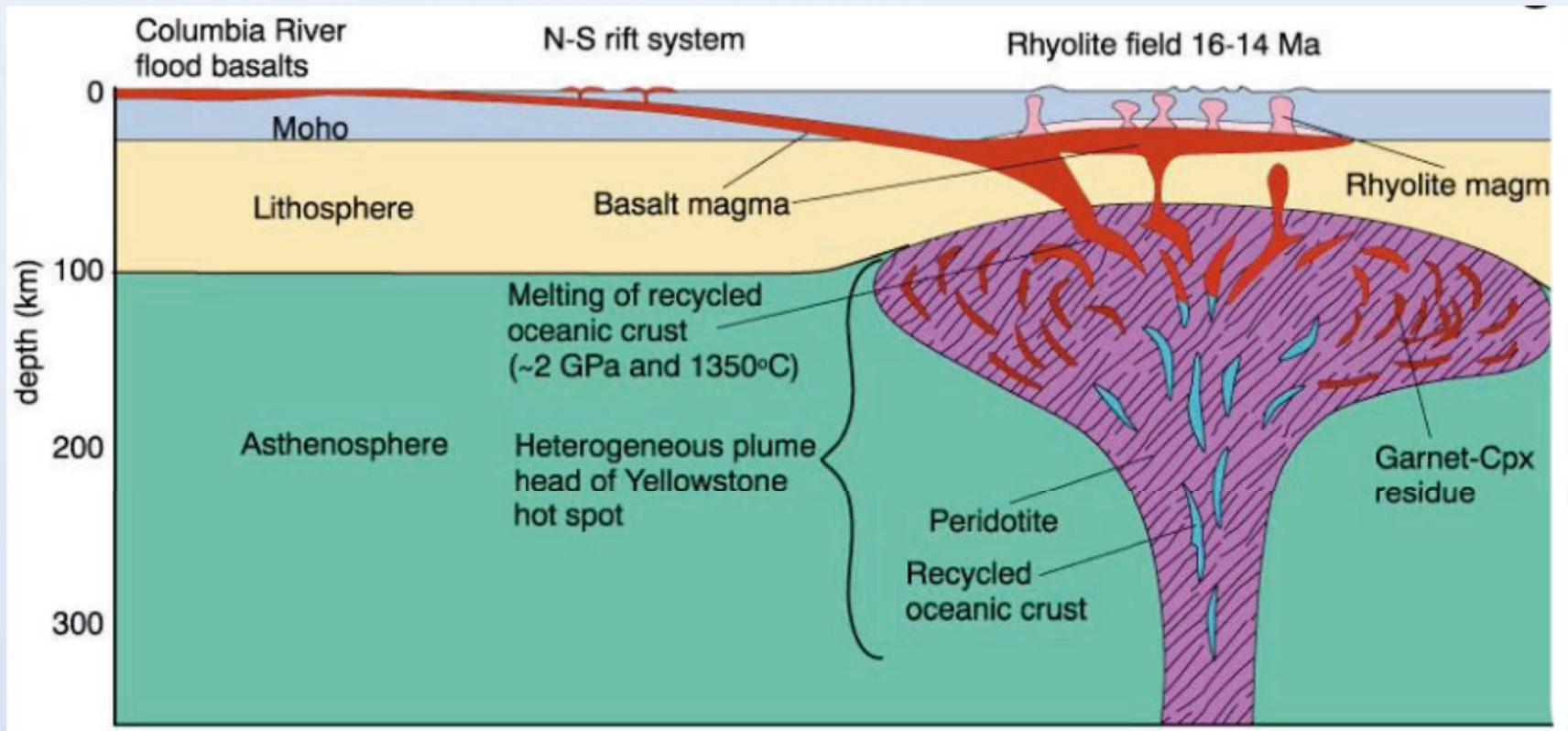


La generazione dei magmi

2) Crosta

Costituita da rocce plutoniche e metamorfiche. La loro fusione parziale (**anatessi**) produce magmi acidi (granitici o equivalenti riolitici) per...

- a) per effetto termico dovuto al ristagno di magmi basaltici (*underplating*) all'interno della placca continentale in situazioni anorogeniche di estensione (causa *mantle plume*; es. *rift*, *flood basalt*)

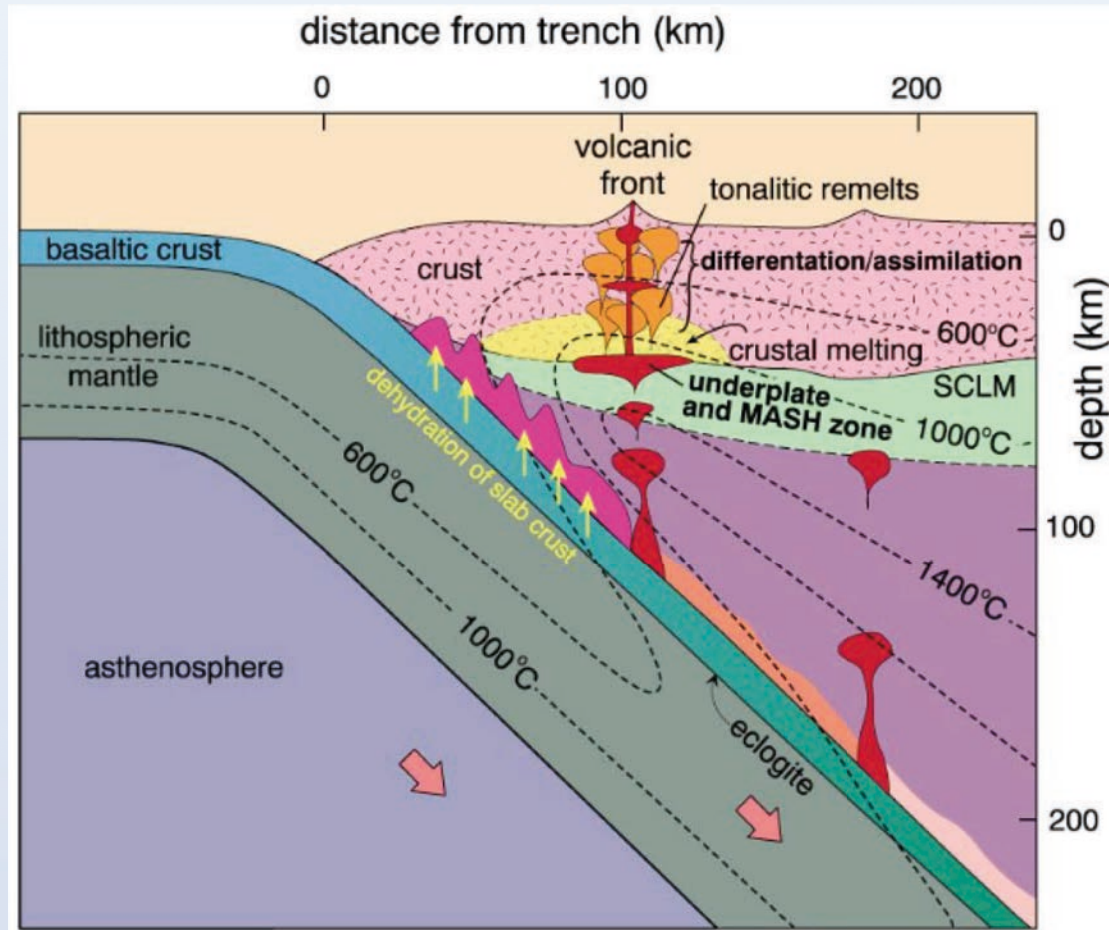


La generazione dei magmi

2) Crosta

Costituita da rocce plutoniche e metamorfiche. La loro fusione parziale (**anatessi**) produce magmi acidi (granitici o equivalenti riolitici) per...

- b) per effetto termico dovuto al ristagno di magmi basaltici (*underplating*) alla base della crosta, in contesti orogenici di placche convergenti (oceanica sotto continentale)

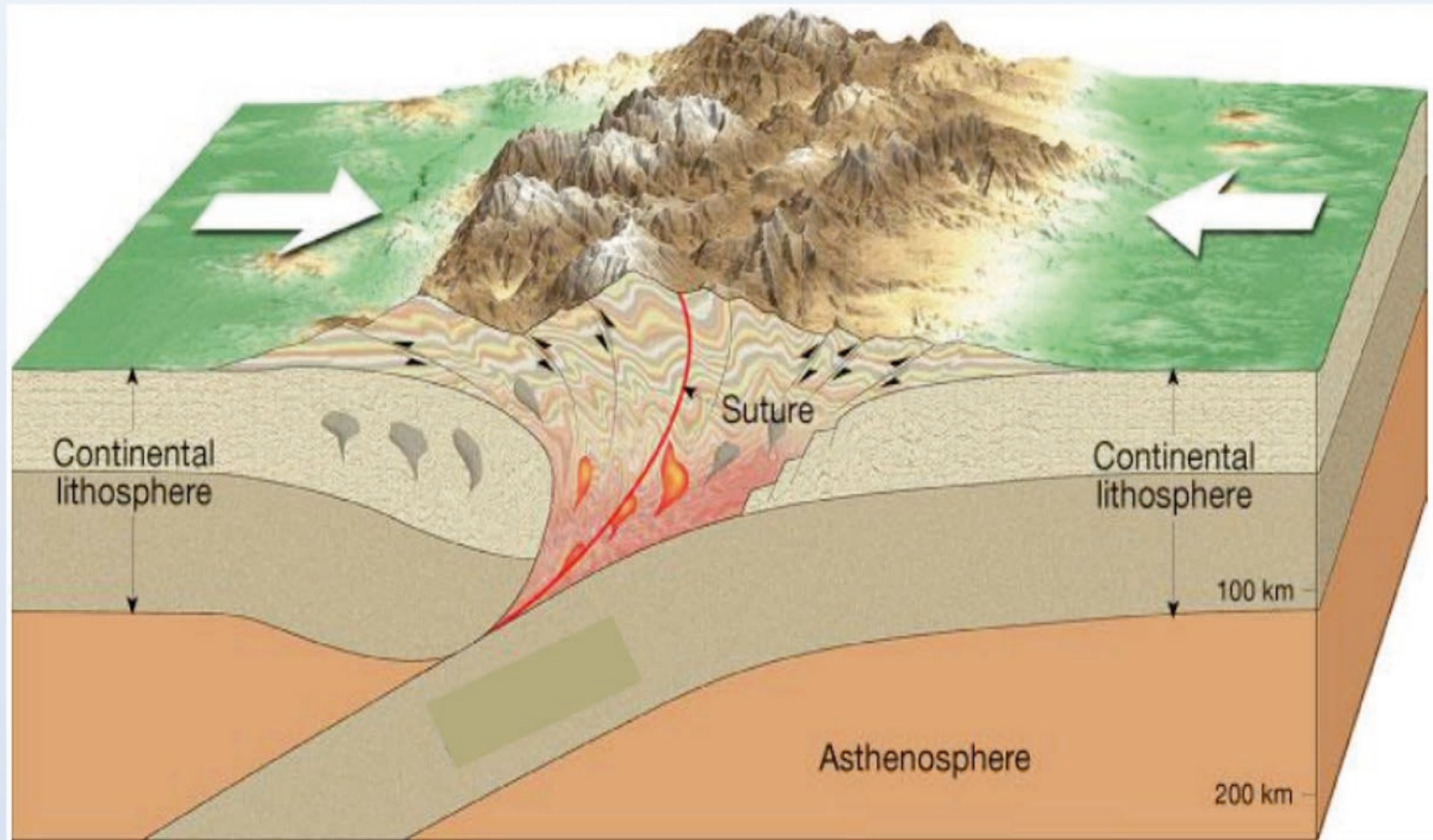


La generazione dei magmi

2) Crosta

Costituita da rocce plutoniche e metamorfiche. La loro fusione parziale (**anatessi**) produce magmi acidi (granitici o equivalenti riolitici) per...

c) per effetto termico dovuto all'ispessimento crostale in contesti orogenici di placche convergenti (continentale-continentale)



La generazione dei magmi

La maggior parte dei magmi viene prodotta per fusione di mantello

I magmi prodotti per fusione crostale sono in ogni caso molto importanti:

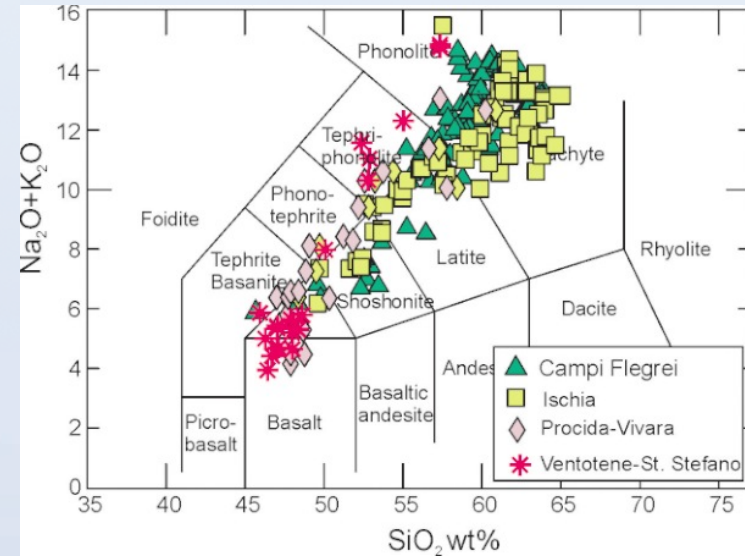
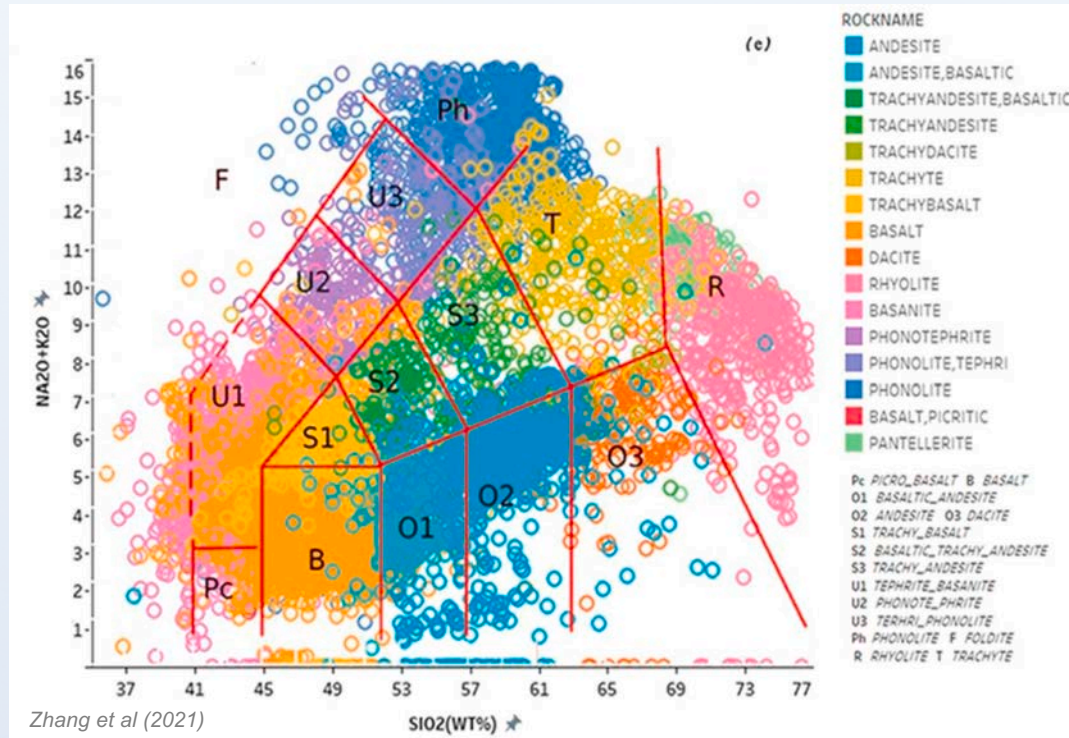
- 1) se raggiungono la superficie, possono produrre eruzioni più esplosive
- 2) contribuiscono all'evoluzione ed architettura della crosta continentale

Alcuni magmi sono il prodotto di mixing tra magmi prodotti nel mantello e quelli prodotti nella crosta sovrastante

Il magma basico, una volta generato dal mantello, difficilmente raggiunge la superficie senza modificazioni, tende a ristagnare (*underplating*) alla base della crosta inferiore (effetto densità), dove inizia a solidificare. In media, solo il 15% riesce a raggiungere la superficie; pertanto è raro trovare magmi basici primari.

Il magma acido generato dalla crosta ha minore densità rispetto ad un basico (quindi potrebbe arrivare in superficie) ma la maggior viscosità contrasta la risalita, quindi tende a restare all'interno della crosta, dove va a formare plutoni granitici (s.l.). Questi infatti rappresentano le rocce intrusive più abbondanti della crosta continentale superiore.

La variabilità composizionale dei magmi



<https://virtualexplorer.com.au/article/2010/233/orogenic-magmatism-italy/tyrrhenian.html>

La variabilità composizionale dei magmi

Come si spiega? Solo dalle diversità delle sorgenti? No

La varietà delle rocce ignee è dovuta perlopiù a processi di differenziazione magmatica (= diversificazione chimica) che avvengono durante la cristallizzazione del magma.

Dal p.d.v. teorico, vi sono due modi principali di cristallizzazione del magma:

Cristallizzazione all'equilibrio

I cristalli rimangono in contatto chimico-fisico con il fuso fino alla sua completa cristallizzazione

NO differenziazione magmatica

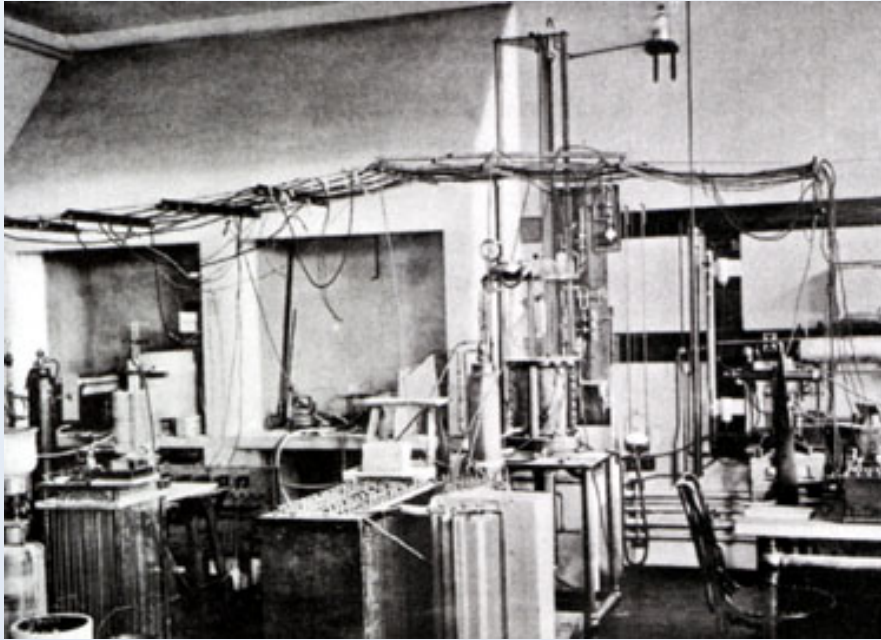
Cristallizzazione frazionata

I cristalli si separano dal fuso (es.: per differente densità possono accumularsi sul fondo della camera magmatica)

SI differenziazione magmatica

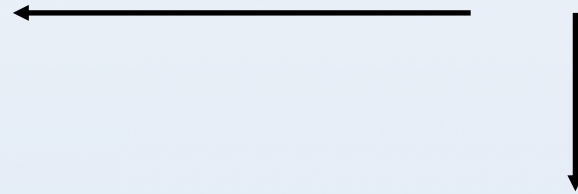
Processi di cristallizzazione e diagrammi di fase

Lo studio dei processi di cristallizzazione magmatica è iniziato in modo sistematico solo a partire dal XX secolo.



1911

Questi riguardavano sia l'osservazione delle rocce magmatiche che la simulazione dei processi di alte temperature in laboratorio, condotta tramite strumenti come le fornaci



Oggi

Processi di cristallizzazione e diagrammi di fase

Oggi questi studi si possono fare anche ad alte pressioni, oltre che ad alte temperature



Autoclave

(Tuttle & Bowen, 1958)



Multi-anvil

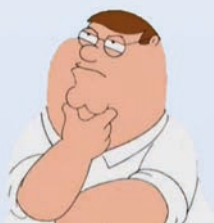
(Hall, 1958)

Processi di cristallizzazione e diagrammi di fase

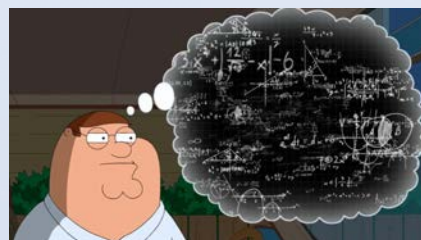
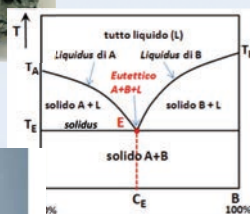
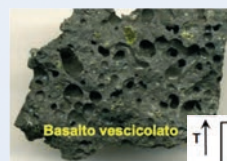
Lo studio dei campioni naturali di rocce e di quelli sintetici in laboratorio hanno portato allo sviluppo di modelli teorici utili a spiegare la variabilità che si osserva nelle rocce magmatiche.

Questi modelli si basano sulle leggi termodinamiche, sono stati calibrati proprio con gli esperimenti fatti in laboratorio e sono stati confermati dalle osservazioni fatte tramite gli studi di petrografia.

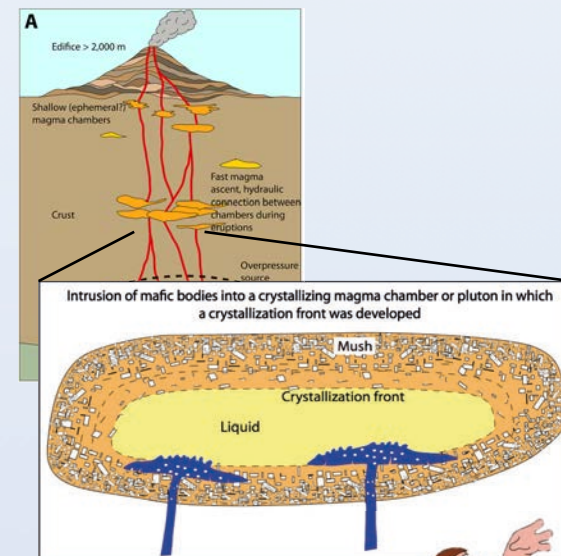
Osservazione



Caratterizzazione e modellizzazione



Interpretazione



Diagrammi di fase

I processi di fusione e cristallizzazione sono regolati dalla **regola delle fasi** (o di Gibbs)

$$V = C + 2 - F$$

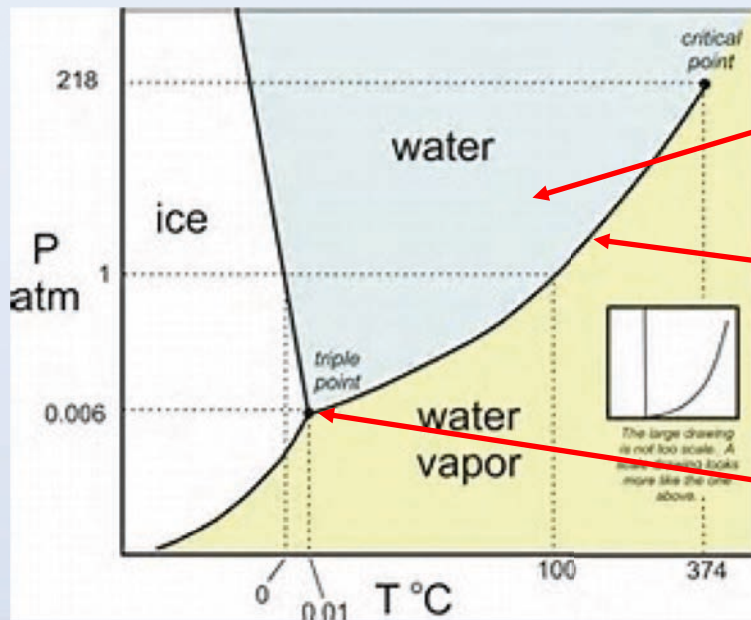
V: varianza o grado di libertà del sistema (n. delle variabili che possono variare indipendentemente senza modificare il n. delle fasi presenti nel sistema)

F: n° fasi presenti nel sistema, distinte per il loro stato fisico

2: n. variabili intensive del sistema, cioè T e P

C: n. di componenti, cioè costituenti chimici necessari a definire tutte le fasi presenti nel sistema

Esempio: Sistema monocomponente H₂O



$$V = C + 2 - F = 1 + 2 - 1 = 2$$

$$V = C + 2 - F = 1 + 2 - 2 = 1$$

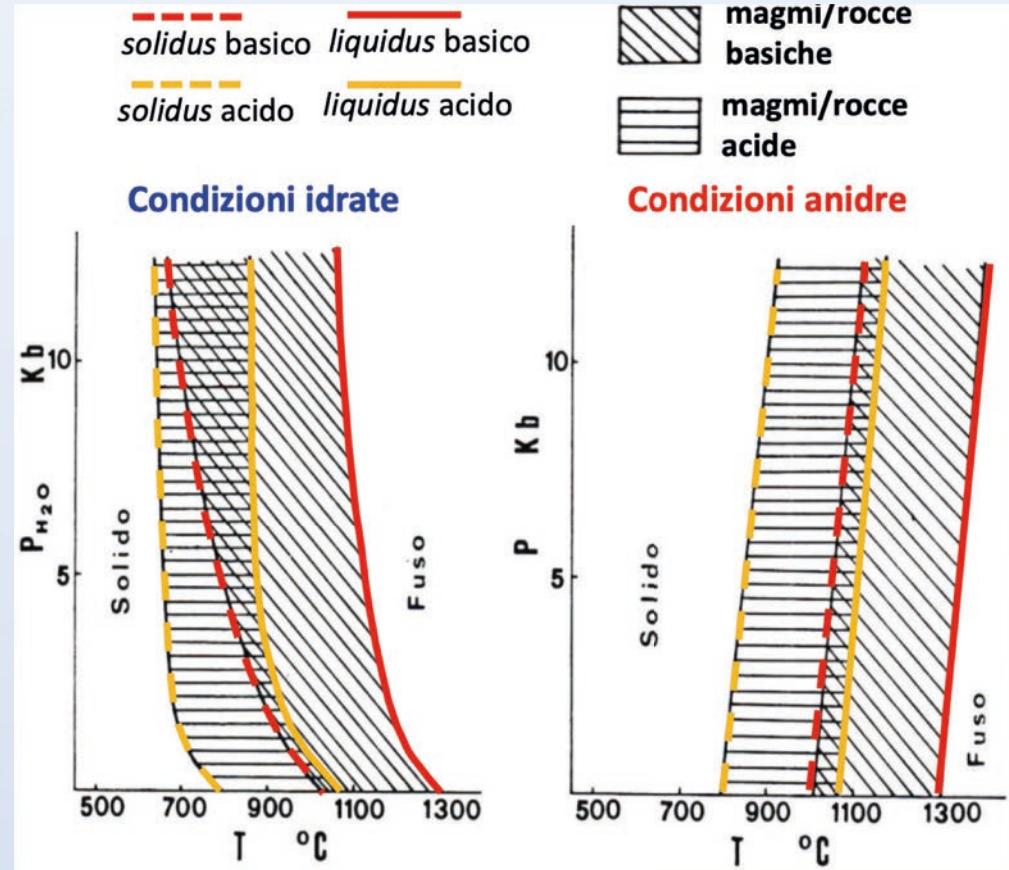
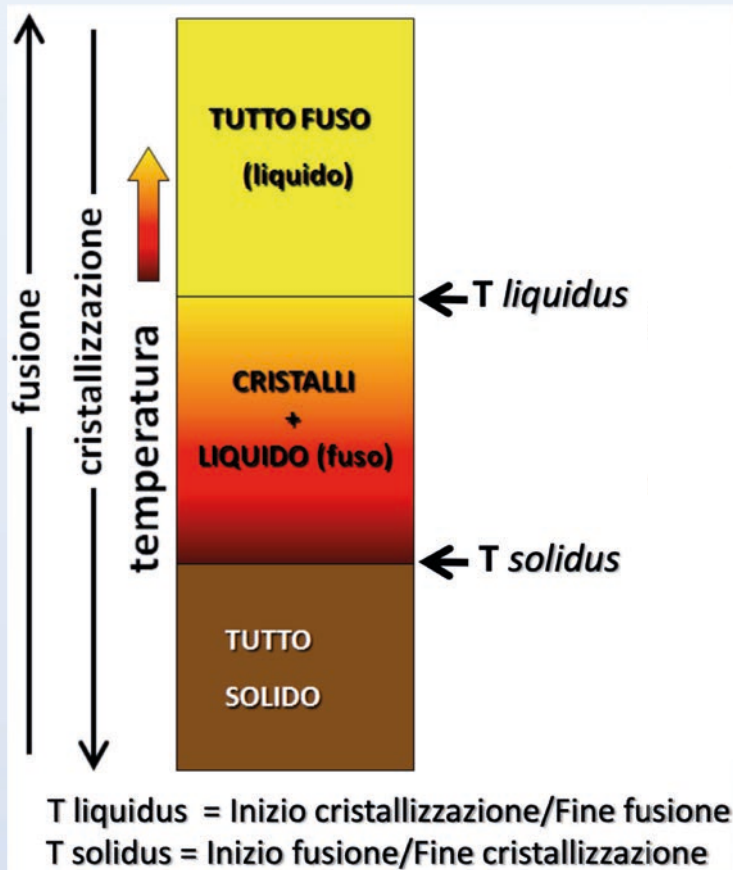
$$V = C + 2 - F = 1 + 2 - 3 = 0$$

Diagrammi di fase

I magmi sono sistemi multicomponenti.

Le variabili intensive in un diagramma possono essere P, T e X (composizione chimica).

Il passaggio da fuso a solido (cristallizzazione) e viceversa (fusione) avviene in un intervallo di T. Quindi le curve di solidus e di liquidus non coincidono e cambiano in funzione della P e della composizione del sistema.



Diagrammi di fase

I diagrammi di fase nello studio dei magmi vengono usati per comprendere le condizioni di inizio e fine cristallizzazione (o fusione) e individuare l'ordine di cristallizzazione delle fasi. Spesso si lavora con sistemi chimicamente semplificati (2-3-4 componenti).

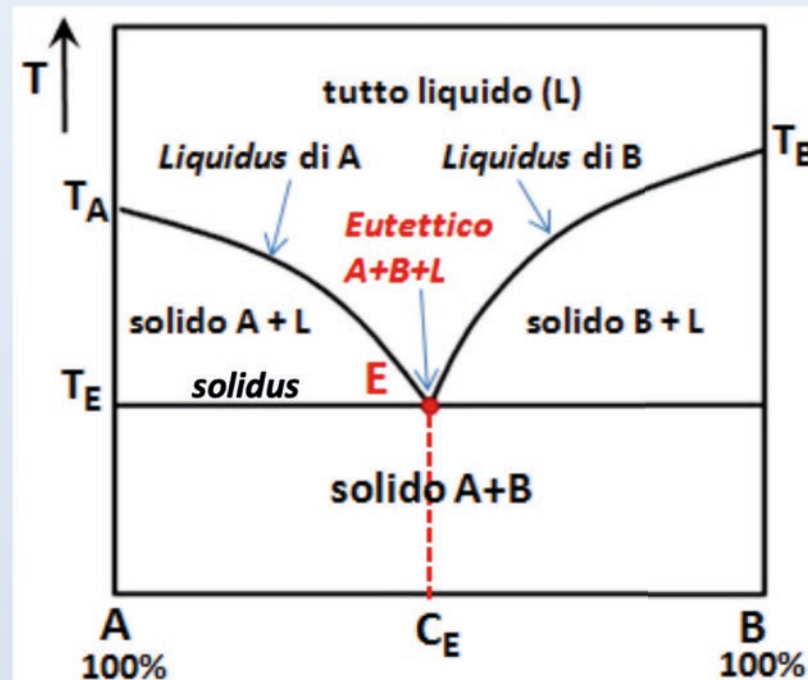
I più semplici sono a P costante (isobarici), T variabile e 2 componenti.

Quindi la regola delle fasi diventa, in generale

$$V = C + 1 - F$$

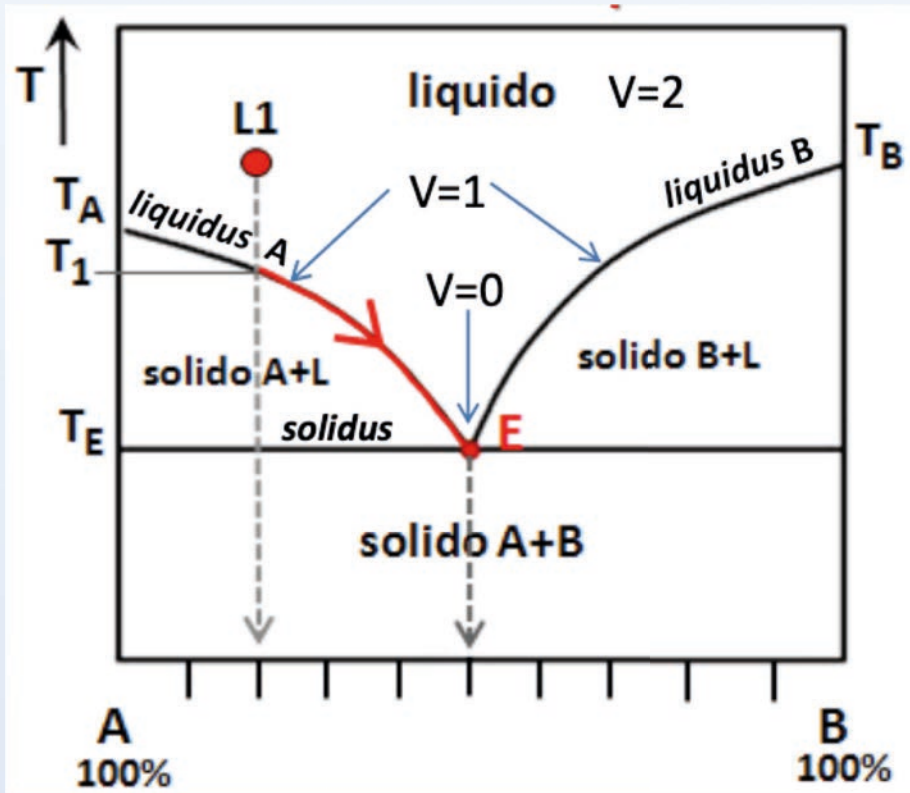
E per i sistemi più semplici, a 2 componenti, è

$$V = 2 + 1 - F$$



Sistema binario con punto eutettico

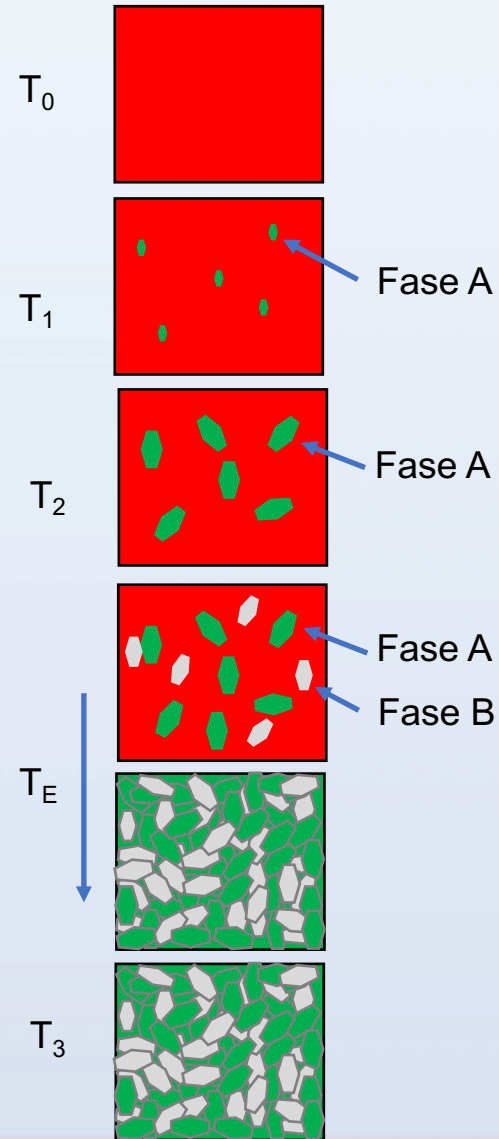
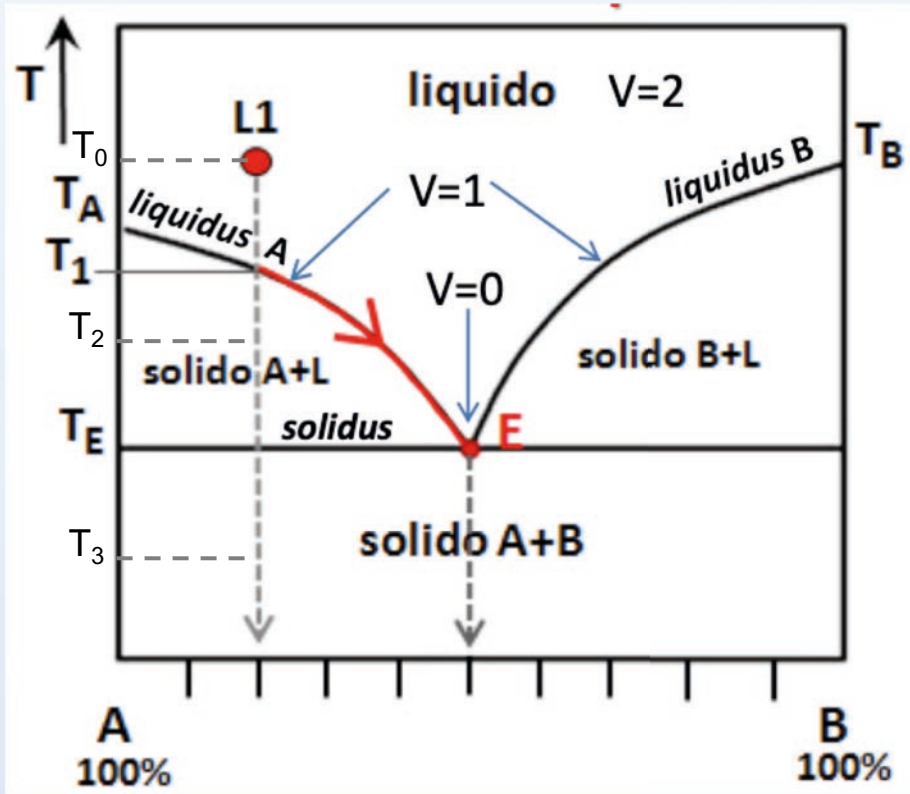
Diagramma a 2 componenti totalmente miscibili allo stato liquido e immiscibili allo stato solido



- 1) Per un punto che cade nel campo del liquido, $V=2$; può variare sia T che X (= composizione in termini di A-B) ed il n. delle fasi non cambia.
- 2) Quando per raffreddamento L1 raggiunge le curve di liquidus, $V=1$; al variare di T deve variare anche la composizione di L affinché 2 fasi restino presenti nel sistema; il liquido è "costretto" a stare sulle curve di liquidus; per raffreddamento si abbassa la T e il liquido cambia di composizione
- 3) Quando il sistema raggiunge il punto eutettico $V=0$; non può variare né la T né la composizione di L affinché 3 fasi (2 solide + L) restino presenti nel sistema; il liquido è "bloccato" in E; la composizione di L e la T restano fisse fino a quando tutto il sistema è solidificato
- 4) Per $T < T_E$, il sistema è tutto solido; il sistema ha ora 2 fasi solide.

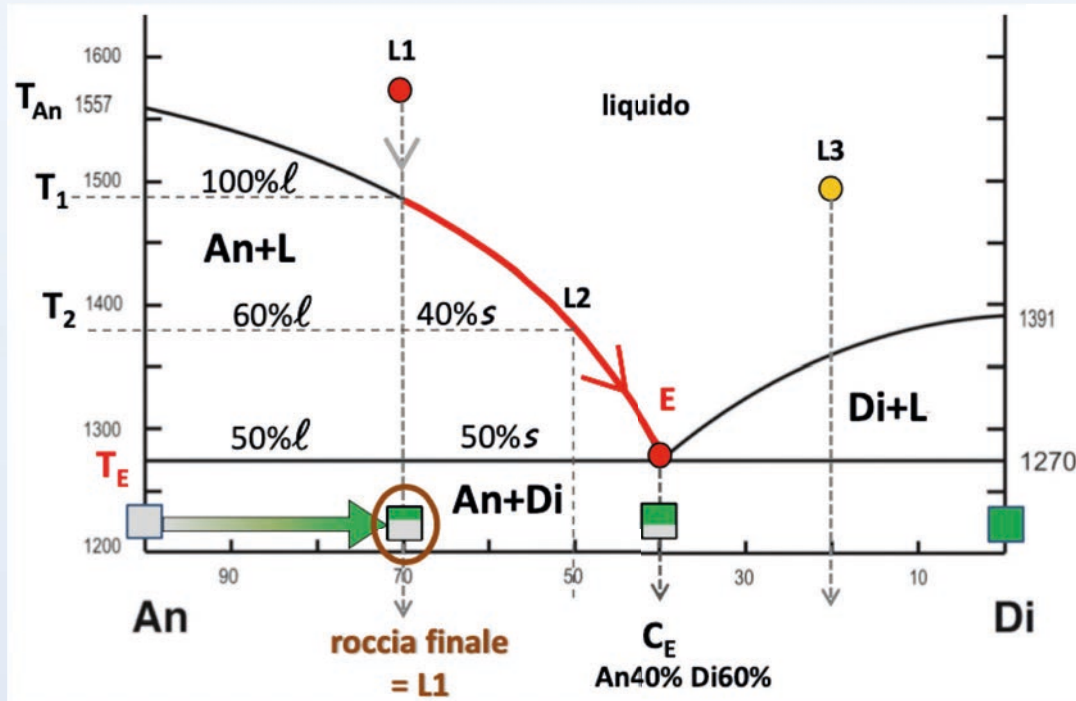
Sistema binario con punto eutettico

Diagramma a 2 componenti totalmente miscibili allo stato liquido e immiscibili allo stato solido



Sistema binario con punto eutettico

Sistema Diopside-Anortite; cristallizzazione all'equilibrio



Anortite $CaAl_2Si_2O_8$ plagioclasio
Diopside $CaMgSi_2O_6$ clinopirosseno

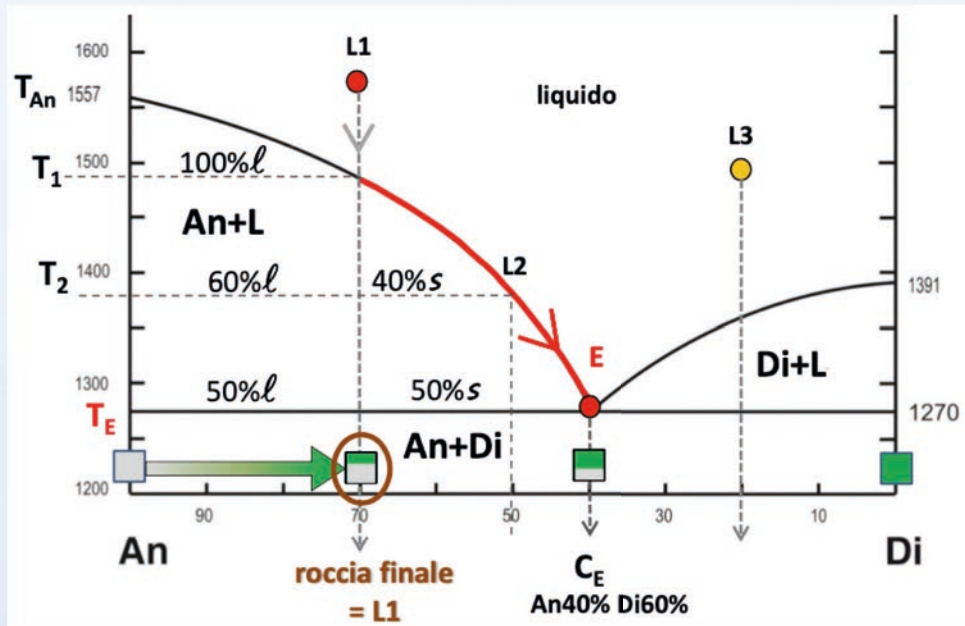
Cristallizzazione all'equilibrio:
i cristalli rimangono in contatto fisico-chimico con il fuso fino alla sua completa cristallizzazione.

- 1) Liquido L_1 di composizione $An_{70}-Di_{30}$. A T_1 inizia la cristallizzazione di An. Il liquido è vincolato a stare sulla curva di liquidus An ($V=1$) cristallizzando An e cambiando di composizione, arricchendosi in Di.
- 2) A T_2 è cristallizzato il 40%An e resta 60% di liquido residuale L_2 (regola della leva) di composizione $An_{50}-Di_{50}$
- 3) Arrivato in E, il liquido residuale è 50% e An cristallizzata è 50%. In E dal liquido residuale L_E cristallizza Di + An nelle proporzioni dell'eutettico ($An_{40}-Di_{60}$); da questo momento la composizione del solido si arricchisce in Di e si sposta quindi verso Di (vedi freccia). La roccia prodotta è un gabbro.
- 4) **Alla fine della cristallizzazione all'equilibrio il solido ha la stessa composizione del liquido di partenza**

NB: lo stesso processo avviene anche per L_3 . Il solido finale avrà composizione = L_3 , otterrò una roccia con gli stessi minerali ma in rapporti diversi, quindi con composizione chimica diversa

Sistema binario con punto eutettico

Sistema Diopside-Anortite; cristallizzazione all'equilibrio



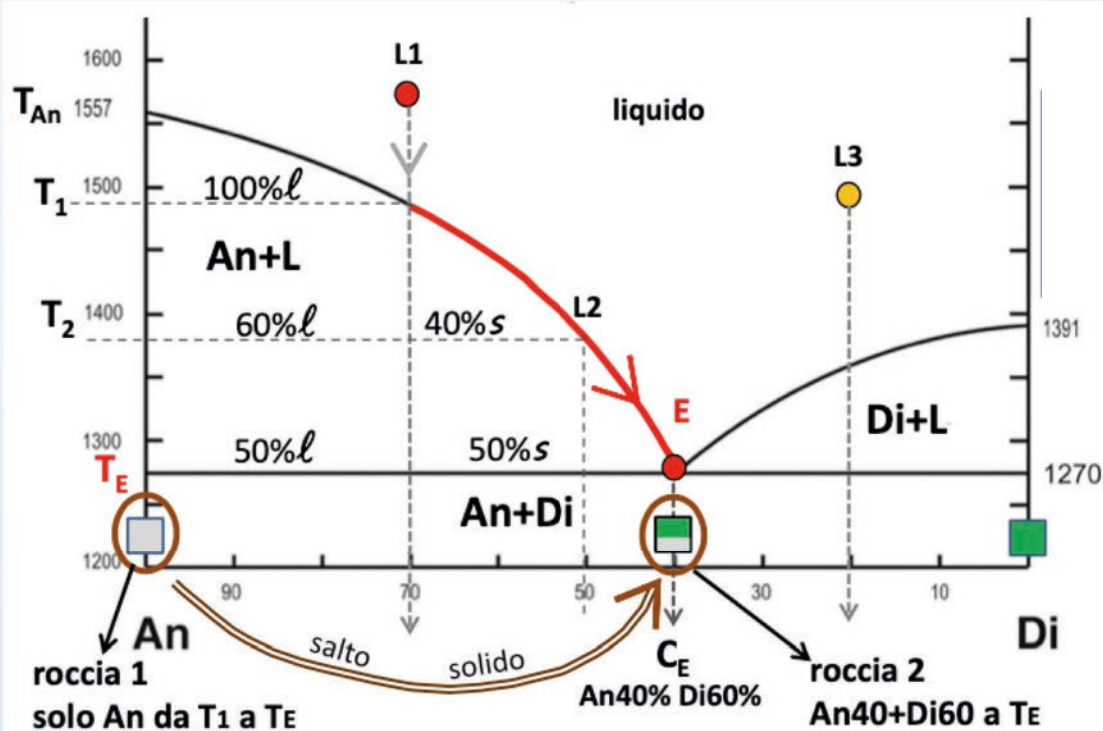
Anortite $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ plagioclasio
 Diopside $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ clinopirosseno

Cristallizzazione all'equilibrio:
 i cristalli rimangono in contatto fisico-chimico con il fuso fino alla sua completa cristallizzazione.

	comp.liquido	% liquido residuo a 100	% solido a 100	comp.solido% a 100		composto solido		nome roccia
				An	Di	An	Di	
L1 partenza	An70-Di30	100	0	0	0			
T1	An70-Di30	100	0	0	0			
T2	50An-50Di	60	40	100	0	40	0	
da T2 a T _E	da 50An-50Di a 40An-60Di	da 60 a 50	da 40 a 50	100	0	10	0	
T _E	40An-60Di	50	50	40	60	20	30	
1 solido finale= liquido iniziale						40+10+20=70	30	leuco-Gabbro

Sistema binario con punto eutettico

Sistema Diopside-Anortite; cristallizzazione frazionata



Anortite $CaAl_2Si_2O_8$ plagioclasio
Diopside $CaMgSi_2O_6$ clinopirosseno

Cristallizzazione frazionata:

i cristalli formati si separano fisicamente dal liquido (es, per differente densità rispetto al liquido)

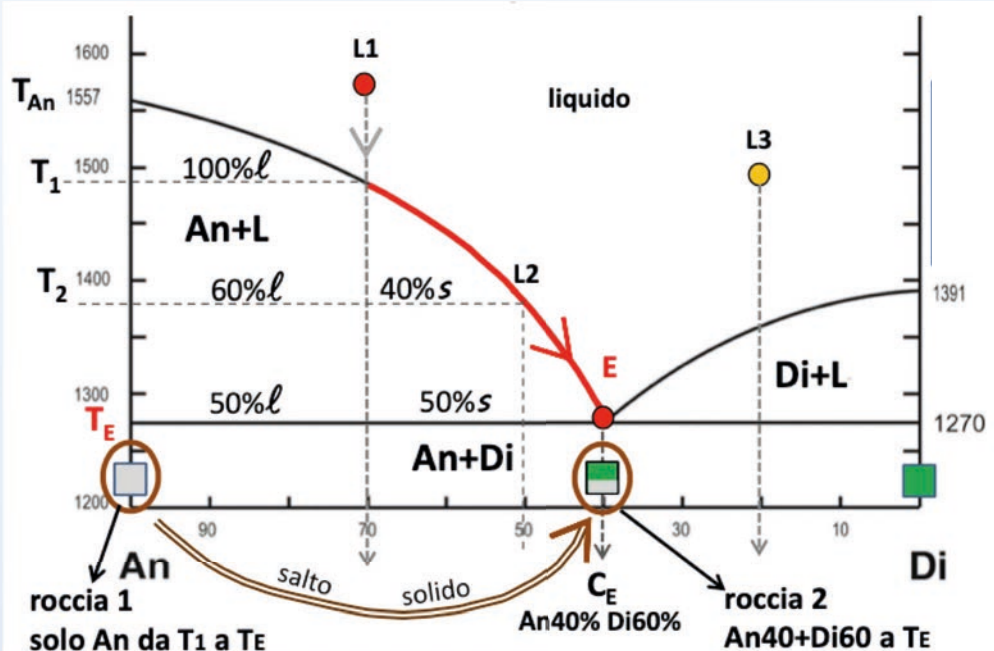
- 1) Partenza: Liquido L_1 di composizione analoga al caso precedente. Il percorso del liquido è uguale al a quello della cristallizzazione all'equilibrio, **ma non il solido.**
- 2) Fino a quando L_1 si sposta lungo il liquidus An, da T_1 a T_E , cristallizza solo An, che viene continuamente allontanata dal liquido. Si formerà una roccia costituita solo da plagioclasio (anortosite)

- 3) Quando L arriva in E, la composizione del solido fa una "salto": cristallizzano An+Di in proporzioni uguali a C_E . Si formerà una roccia costituita da An₄₀+Di₆₀. Cioè un gabbro.
- 4) Alla fine della cristallizzazione frazionata, da un solo liquido si ottengono due rocce diverse; entrambe NON corrispondono alla composizione del liquido di partenza.

NB: lo stesso processo avviene anche per L_3 . I solidi finali saranno due: uno costituito solo da Di (pirossenite) e uno da Di+An in proporzioni eutettiche (un gabbro)

Sistema binario con punto eutettico

Sistema Diopside-Anortite; cristallizzazione frazionata



Anortite $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ plagioclasio
 Diopside $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ clinopirosseno

Cristallizzazione frazionata:
 i cristalli formati si separano fisicamente dal liquido (es, per differente densità rispetto al liquido)

	comp.liquido	% liquido residuo a 100	% solido a 100	comp.solido% a 100		composto solido		nome roccia
				An	Di	An	Di	
L1 partenza	An70-Di30	100	0	0	0	An	Di	
da T1 a TE	da An70-Di30 a 40An-60Di	da 100 a 50	da 0 a 50	100	0	100		Anortosite
TE	40An-60Di			40	60	40	60	Gabbro
solido finale 1						100% An		Anortosite
solido finale 2						An40%	Di60%	Gabbro