

Chapitre 2

Les processus fondamentaux du magmatisme

- Pourquoi et dans quel contexte les roches peuvent-elles fondre ?
- Que se passe-t-il dans une chambre magmatique ?
- Comment se forment les roches magmatiques ?

1. La production des magmas primaires

1.1. Le liquide obtenu dépend de la nature de la source et du taux de fusion

a) Importance de la nature de la roche qui fond

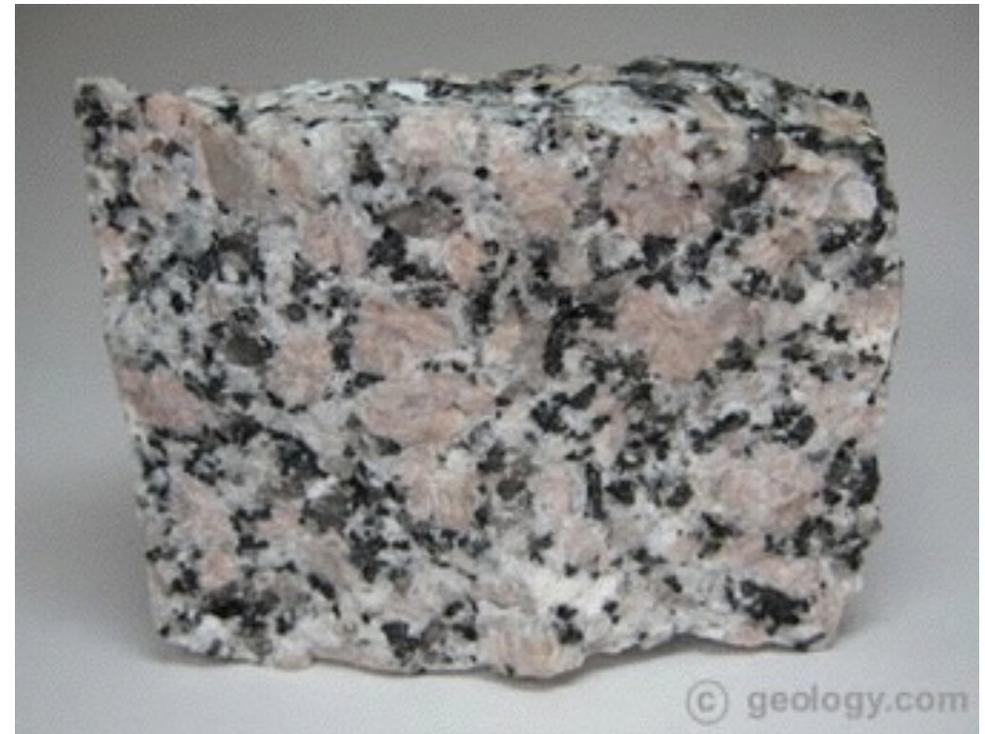
Importance de la roche mère

Une fusion partielle et sélective



Basalte à enclave de péridotite
enclave = roche-mère non
fondue

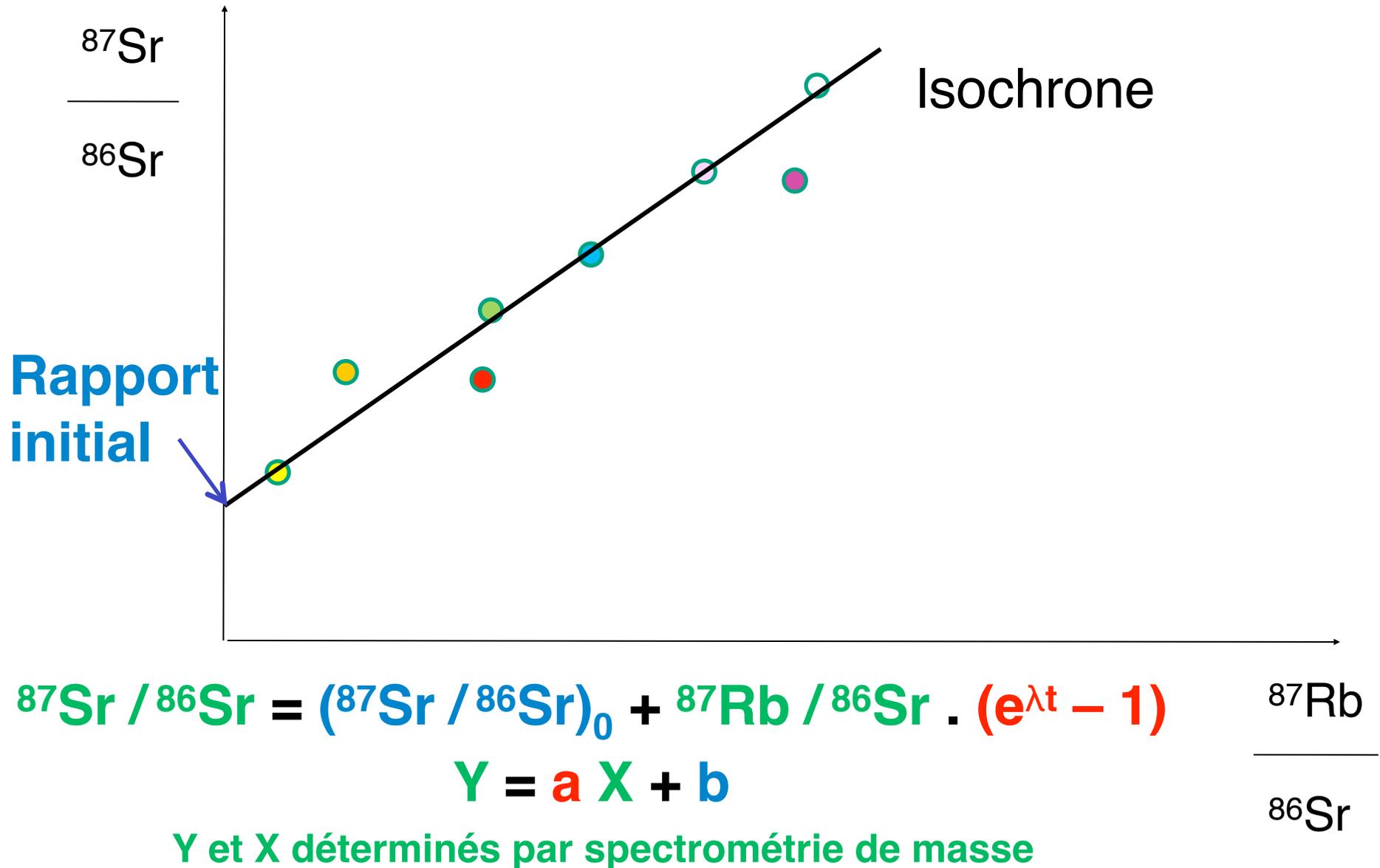
ici : Fusion du manteau



Granite

Fusion de croûte continentale

La signature isotopique : le rapport initial

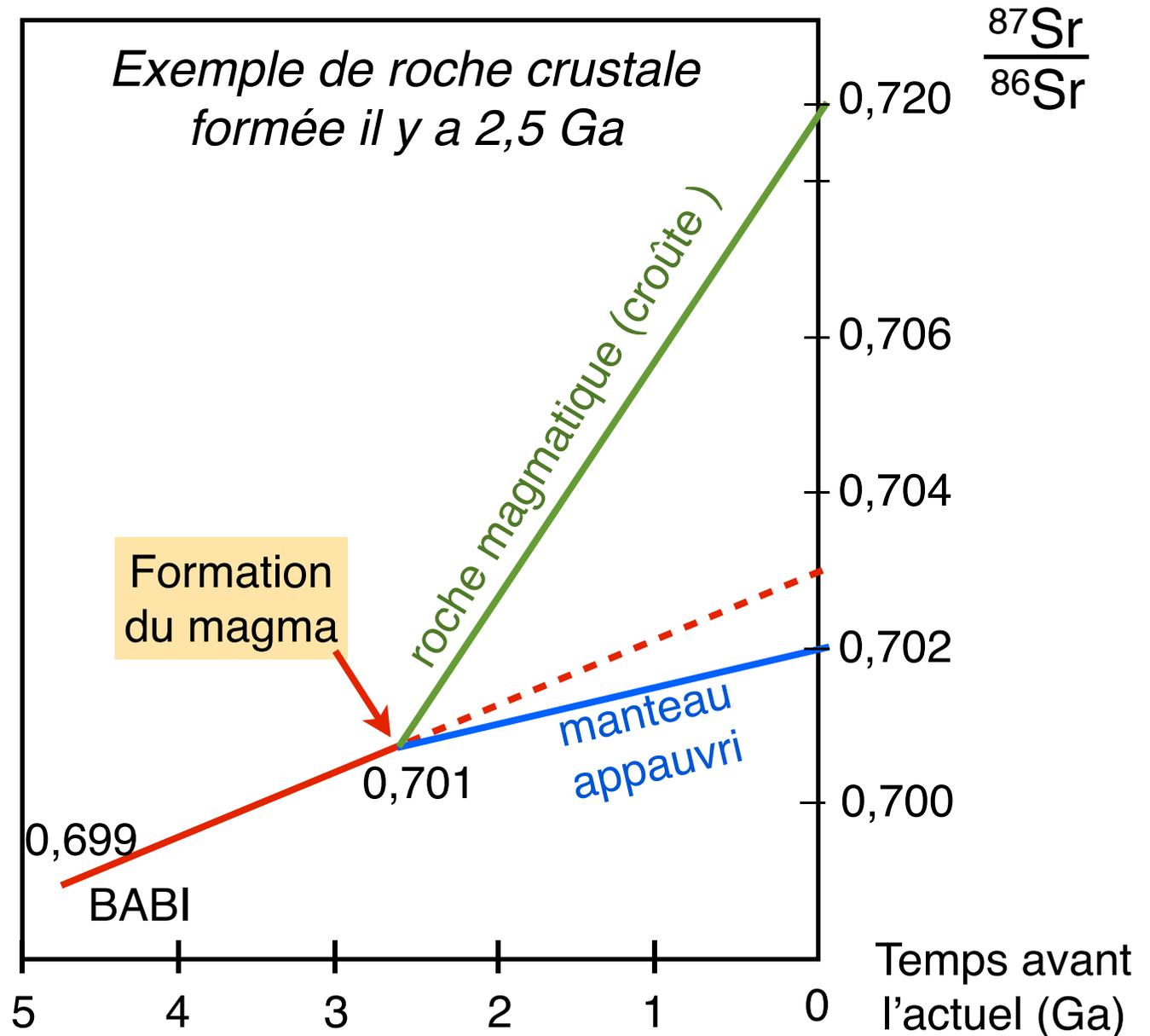


Évolution dans le temps



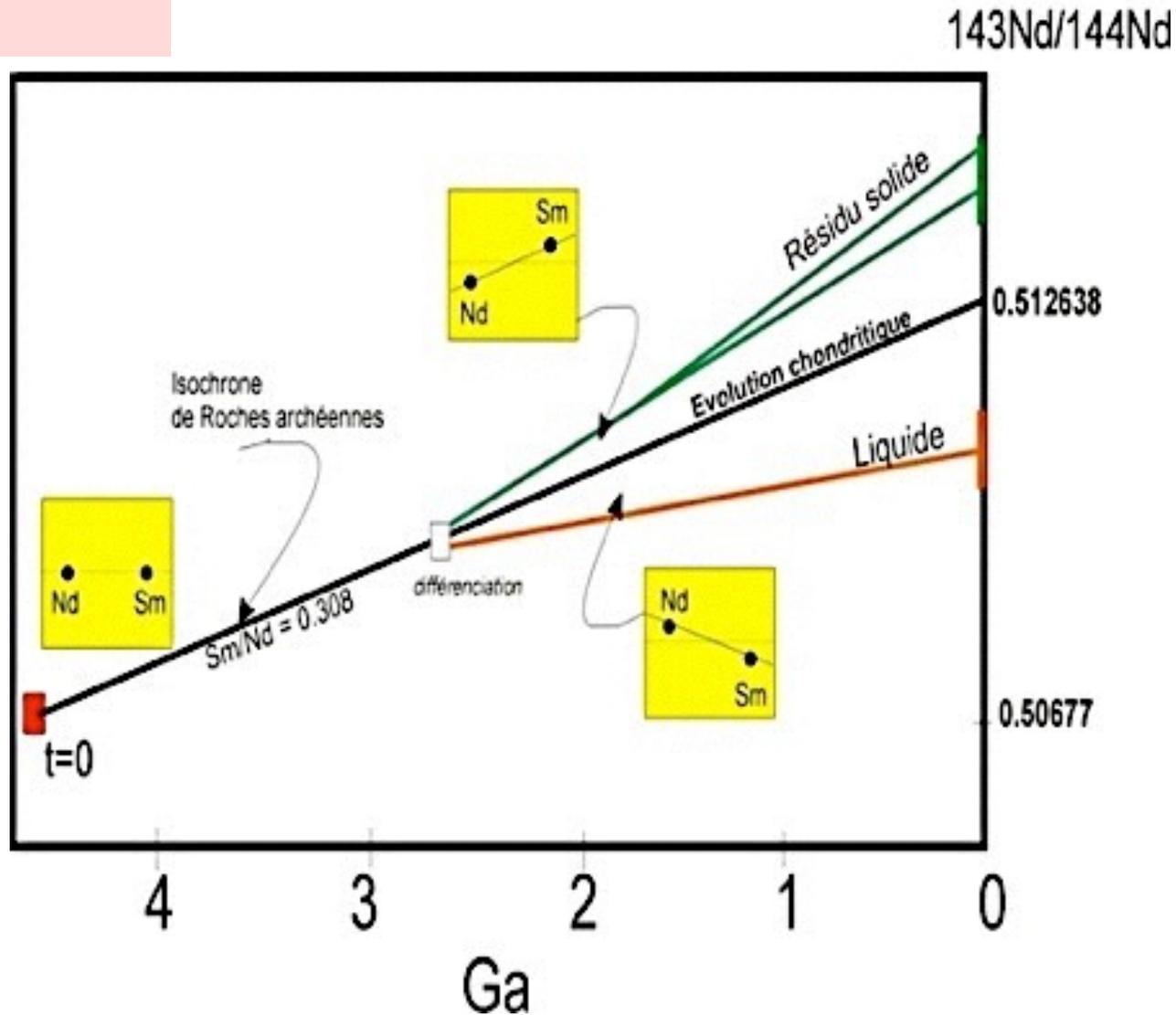
La croûte terrestre se forme à partir de cristallisation d'un liquide issu du manteau. Cela a commencé il y a 4,45 Ga environ et continue encore.

BABI = basalt
achondrite
best initial

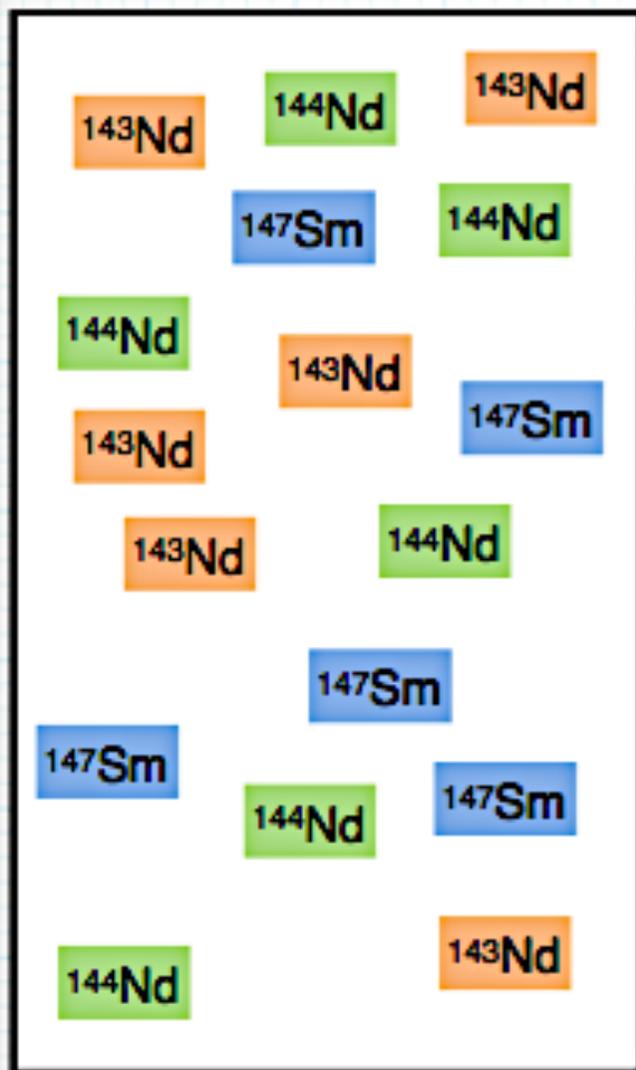


Le couple de terres rares Sm / Nd

Lien avec le TP
exercice 5



Roche mère

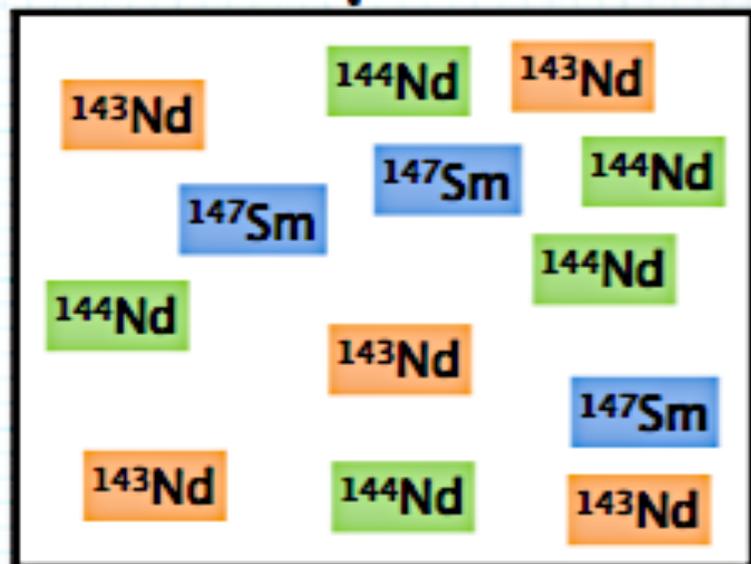


rapport de $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ de 1
qui évoluerait spontanément vers
un maximum de $11/6 = 1,85$

Nd et Sm sont incompatibles
donc passent préféren-
tiellement dans le liquide
mais Nd en plus grande
concentration que Sm

5 Nd pour 3 Sm

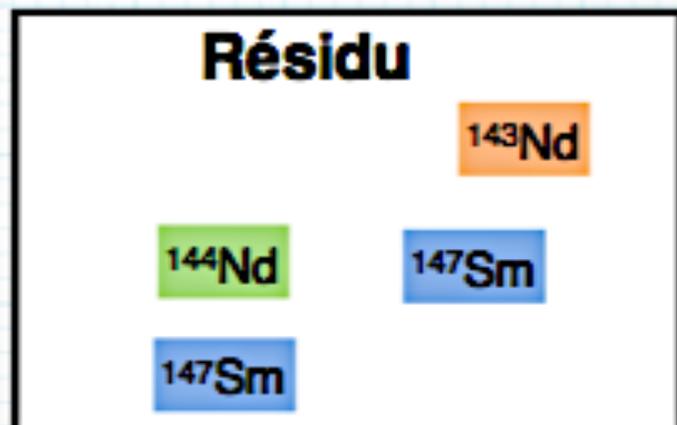
Liquide



Le rapport des Nd est 1 au temps $t = 0$
mais évolue peu car 3 Sm pour 10 Nd.
Au maximum, on aura un rapport
 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ de $8/5 = 1,6$

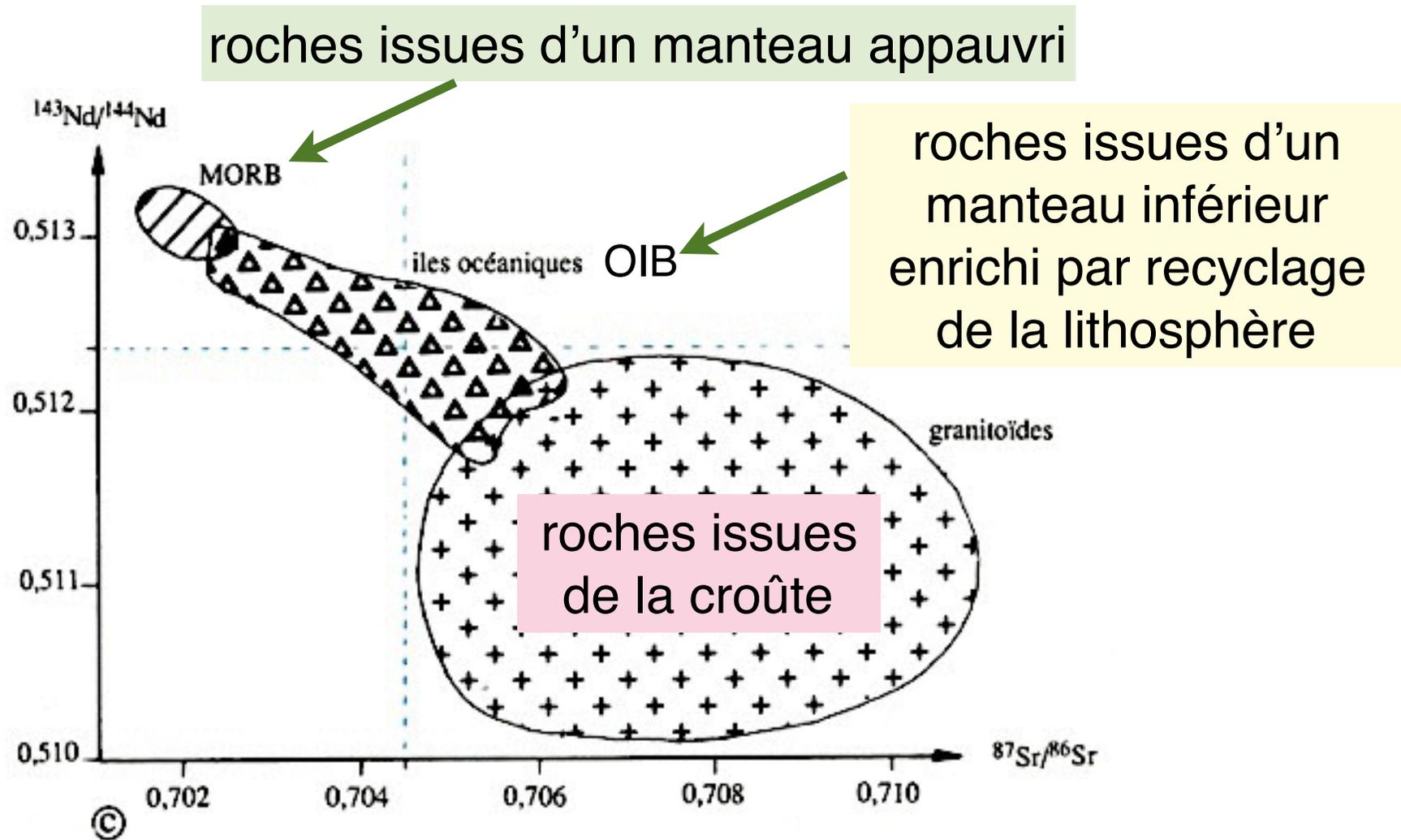
1 Nd pour 2 Sm

Résidu



Le rapport des Nd est de 1 au temps $t = 0$ mais évolue
beaucoup car 2 Sm pour 2 Nd.
Au maximum, on aura un rapport $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ de $3/1 = 3$

Utilisation combinée des 2 couples

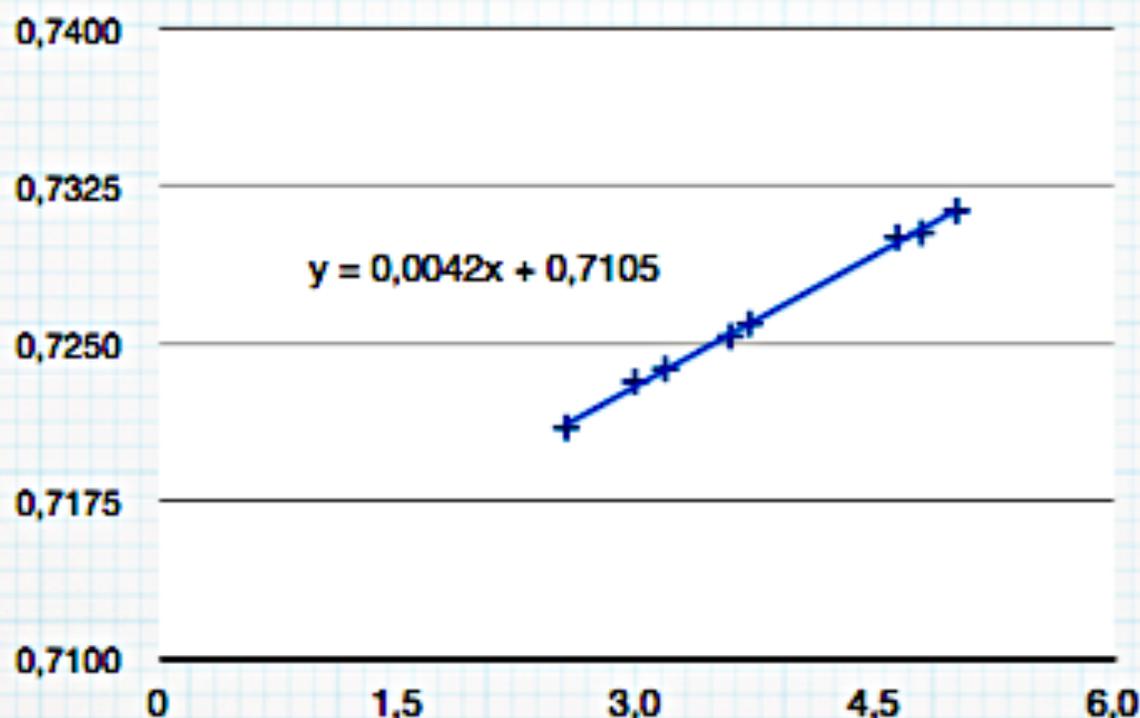


MORB = middle Ocean Ridge Basalt = dorsales

OIB = Oceanic Island Basalt = points chauds

Lien avec le TP : exercice 1

Exercice 1



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

$$t = \ln(\text{pente} + 1) / \lambda$$

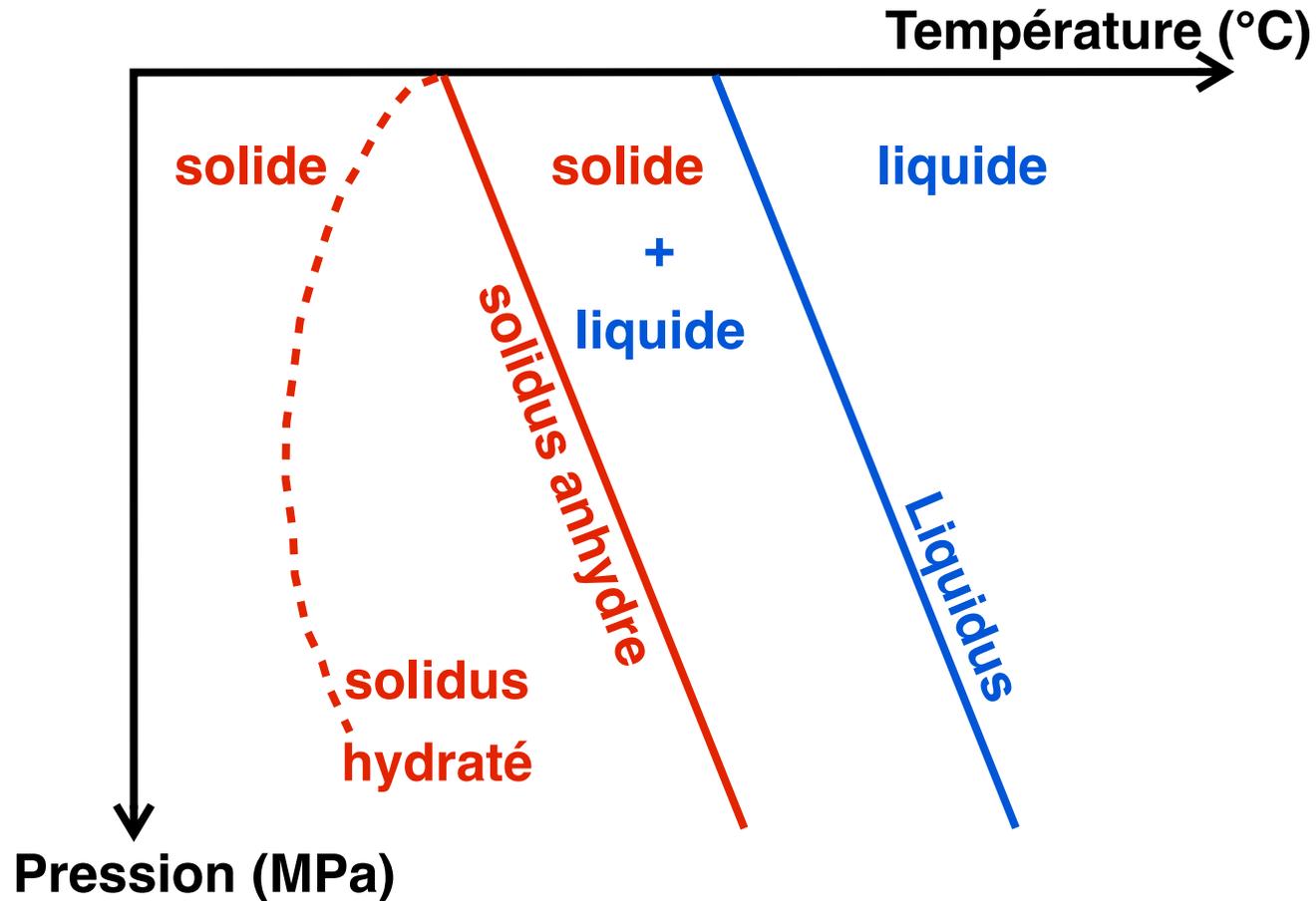
$$\text{âge} = 295 \text{ Ma}$$

$\left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_0 = 0,7105$, qui correspond à un granite d'origine crustale

1.1. Le liquide obtenu dépend de la nature de la source et du taux de fusion

b) Importance du taux de fusion

Conditions P,T de la fusion d'une roche



Fusion **congruente** = réaction de fusion durant laquelle seul du liquide est formé.

Fusion **incongruente** si une nouvelle phase solide se forme au cours de la fusion, en plus de la phase liquide.

Un minéral fond et H₂O se libère de sa maille cristalline. H₂O passe dans le liquide et les autres atomes s'agencent en un nouveau minéral (anhydre).

Exemple

Biotite  liquide avec H₂O, K⁺, Fe²⁺...

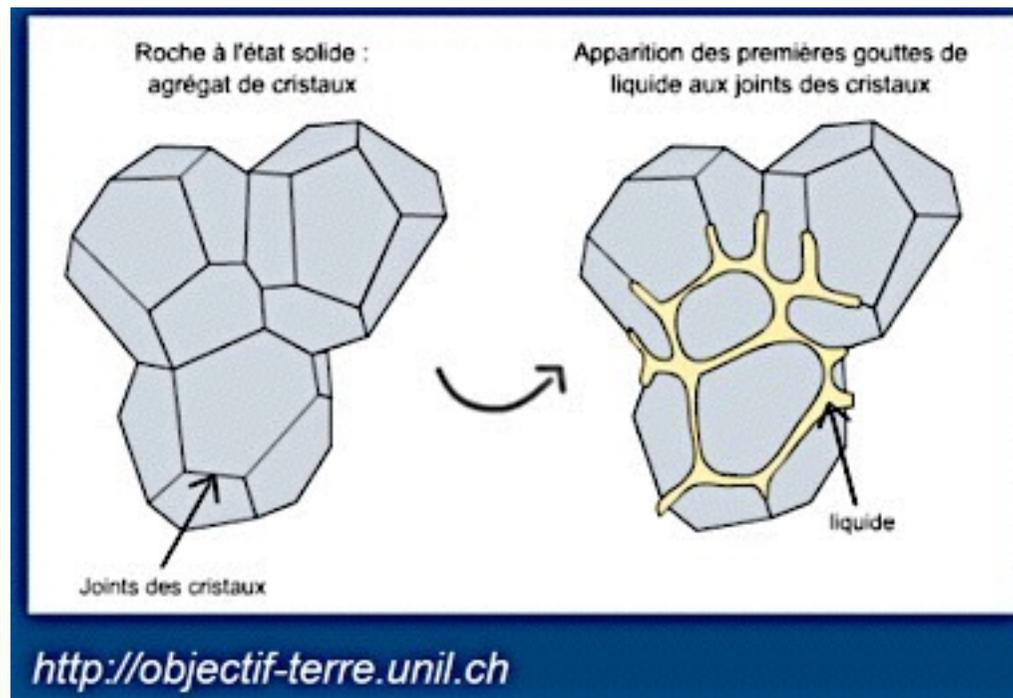
(minéral hydraté)



+ minéral solide **Cordiérite**

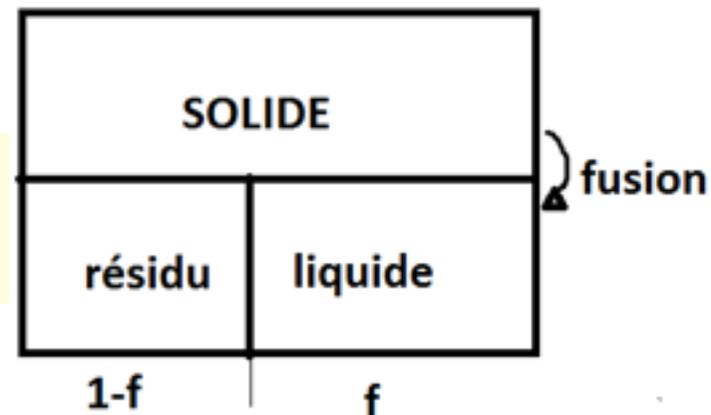


La fusion est partielle



La fusion débute aux joints

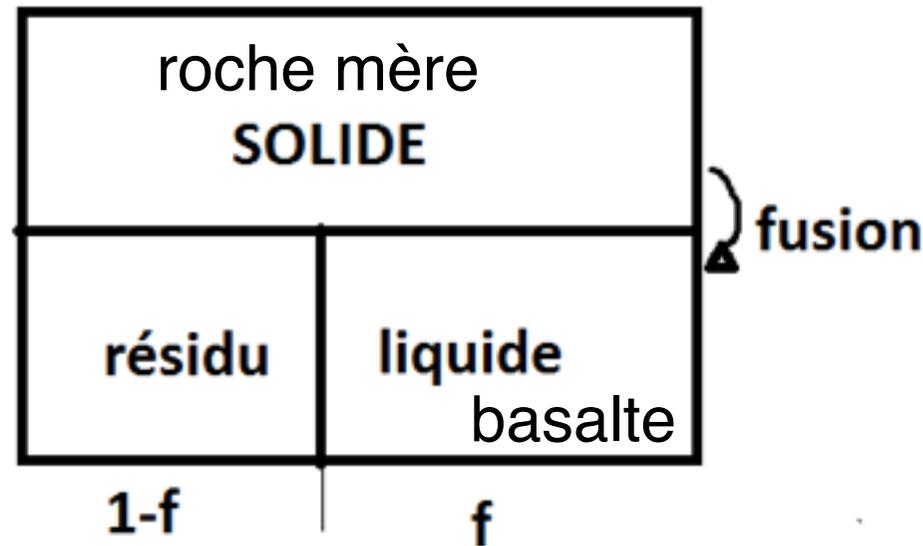
taux de fusion assimilé à la fraction de la phase liquide



Calcul du taux d'extraction des éléments



Pour évaluer le taux de fusion partielle, on peut réaliser un bilan des concentrations entre les roches.



Principe de conservation des masses, appliqué à un élément (ici K)

$$\%K_{\text{roche mère}} = f \times \%K_{\text{basalte}} + (1-f) \times \%K_{\text{résidu}}$$

$$\text{d'où } f = \frac{(\%K_{\text{roche mère}} - \%K_{\text{résidu}})}{(\%K_{\text{basalte}} - \%K_{\text{résidu}})}$$

Application à un exemple

% poids	SiO₂	MgO	Al₂O₃	CaO	Na₂O	K₂O	FeO
résidu	43,2	50,3	0,5	0,1	0,3	0	6
roche-mère	44,5	42,8	1,8	1,6	0,6	0,1	7,2
basalte	49,8	10,2	13,7	9	2,3	0,5	11,3

taux d'extraction calculé

	SiO₂	MgO	Al₂O₃	CaO	Na₂O	K₂O	FeO
taux d'extraction							

Application à un exemple

% poids	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	FeO
résidu	43,2	50,3	0,5	0,1	0,3	0	6
roche-mère	44,5	42,8	1,8	1,6	0,6	0,1	7,2
basalte	49,8	10,2	13,7	9	2,3	0,5	11,3

taux d'extraction calculé

	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	FeO
taux d'extraction	19,7 %	18,7 %	9,5 %	16,9 %	15 %	20 %	22,6 %

Conclusion : tous les éléments chimiques ne fondent pas dans les mêmes proportions. Ils fondent plus ou moins bien : on les classe en 2 groupes.

Des éléments compatibles et incompatibles



Élément compatible (avec les réseaux cristallins) = élément retrouvé préférentiellement dans les solides : il fond en dernier et cristallise en premier

Élément incompatible = élément **magmatophile** = qui se retrouve préférentiellement dans les liquides : il fond en premier et cristallise en dernier

On le détermine grâce au coefficient de partage

$$D = \frac{\text{concentration dans le minéral}}{\text{concentration dans le liquide}}$$

$D \ll 1$: élément **incompatible** tel **K**, **Rb**, Th, U à grand rayon ionique et Ti, Zr, **Nd** à fort potentiel ionique

$D > 1$: élément **compatible** tel le Ni qui a un $D = 5$

Variabilité des taux de fusion

Plus le taux de fusion est faible, plus le magma est riche en éléments incompatibles. Quand la fusion augmente, la phase liquide s'enrichit en compatibles donc le taux d'incompatibles diminue.

Taux de fusion moyens des 3 séries magmatiques

- basalte tholéitique : 20 à 25 %
- basalte calco-alcalin : 10 à 20 %
- basalte alcalin : 4 à 10 % : ce basalte est riche en alcalins (K et Na), éléments incompatibles.

Technique : calcul du taux de fusion

De manière pratique, on évalue le taux de fusion en utilisant :

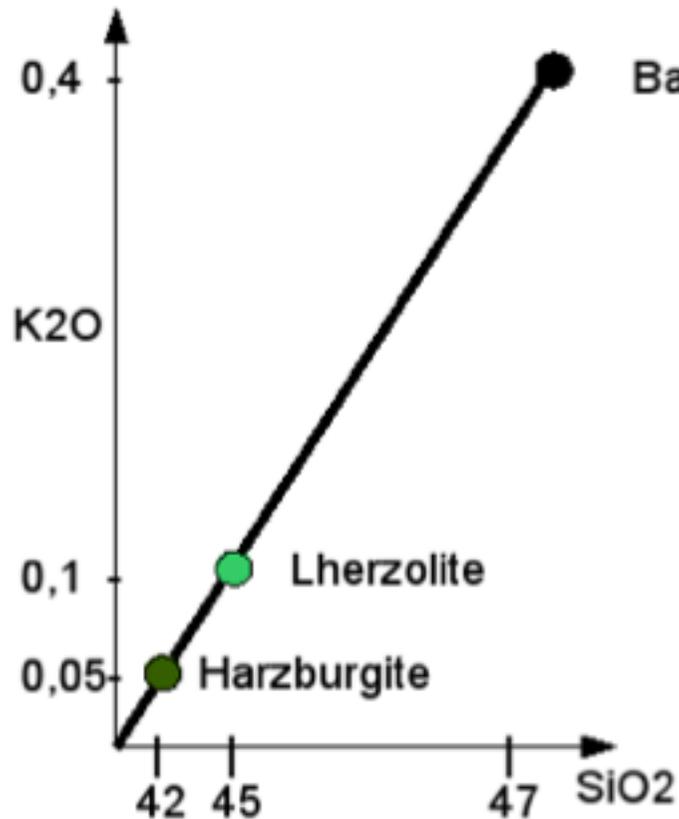
- des éléments peu concentrés et bien répartis dans les différents minéraux (donc pas SiO_2 , mauvais indicateur) ;
- **des éléments incompatibles comme K_2O** (mais aussi FeO , MgO et Na_2O avec moins de fiabilité) ;

On peut aussi estimer que la totalité du K_2O a rejoint la phase liquide, donc même sans connaître la composition de la roche résiduelle, on peut estimer sa teneur en K_2O à zéro.

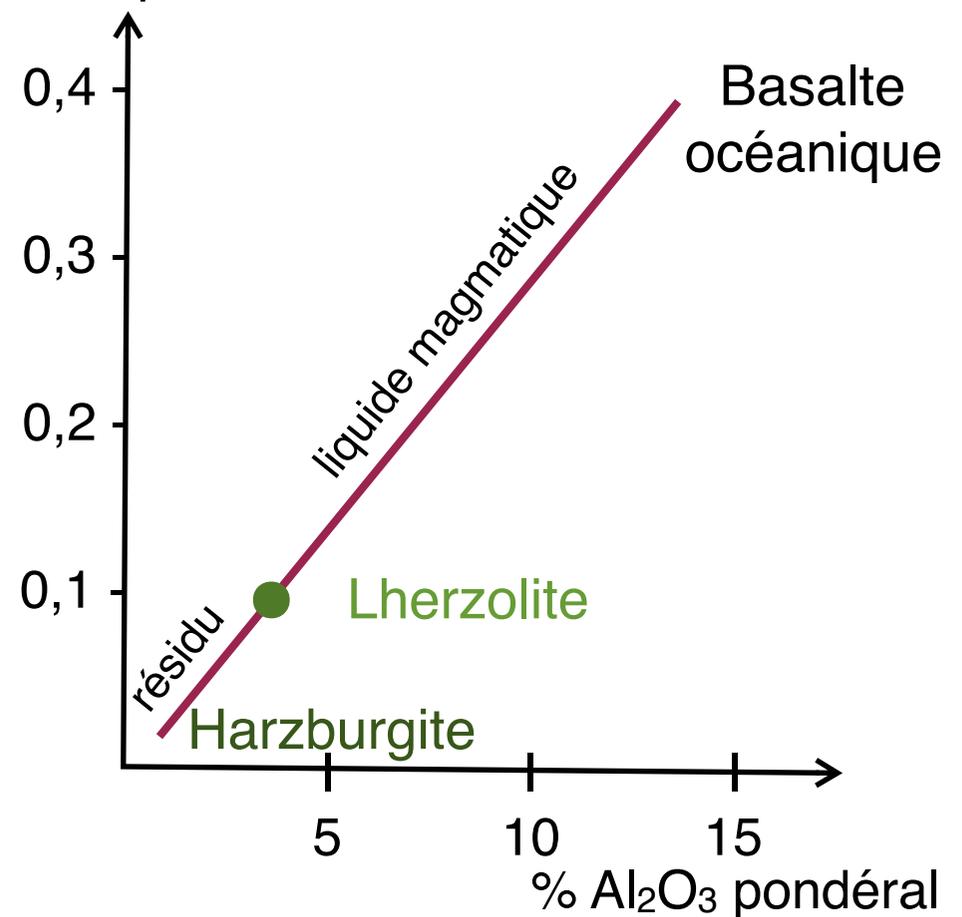
Pour l'exercice : on estime alors la fusion partielle à un taux de 20 %

Technique : autre calcul du taux de fusion

On peut combiner graphiquement l'évolution de plusieurs éléments chimiques et calculer le rapport : $\frac{LH}{LB}$



% K₂O pondéral



$$\frac{LH}{LB} = 21 \%$$

Lien avec le TP : exercice 2

Exercice 2

	Lherzolites	Harzburgites	Basalte MORB	Basalte intra-océanique
SiO ₂	45,1	42,1	48	46,53
TiO ₂	0,2	0,1	2,4	2,28
Al ₂ O ₃	3,6	0,5	14,5	14,31
CaO	2	0,1	10	10,32
Na ₂ O	0,2	0,1	2,2	2,85
K ₂ O	0,1	0	0,4	0,84
FeO	7,5	7	11	12,32
MgO	41,3	50,1	13	9,54

le plus incompatible

manteau
roche-
mère

manteau
résiduel

← roches volcaniques issues
de la fusion du manteau →

taux de fusion calculé avec le potassium

- pour MORB : 25% --> dorsale

- pour OIB : 12% --> point chaud de type La réunion ou Hawaï

c) BILAN

La roche magmatique qui se forme est déterminée par :

- la nature de la source : quel matériel fond ?
- le taux de fusion.

1.2. Étude en laboratoire de la composition des liquides en cours de fusion

travaux de Bowen (à partir de 1915)

a) La variance d'un système (spécial ENS-G2E)

Les phases

système = association de plusieurs phases

Une roche =
un **système**



Ensemble des
cristaux d'orthose
= une phase

Une phase est caractérisée par sa composition chimique et son état
Exemple : orthose $\text{Si}_3 \text{AlO}_8 \text{K}$ sous forme solide

La variance



Règle des phases ou loi de Gibbs

$$v = k + 2 - \phi$$

v : variance (ou degrés de liberté) du système

k : nombre de constituants chimiques indépendants (ex : SiO_2 pour la silice)

ϕ : nombre de phases (ici nb de minéraux)

2 : nombre de paramètres qui définissent l'état du système, ici P et T

Variance (ou degrés de liberté) du système, **nombre de paramètres intensifs et indépendants** qui caractérisent un état d'équilibre.

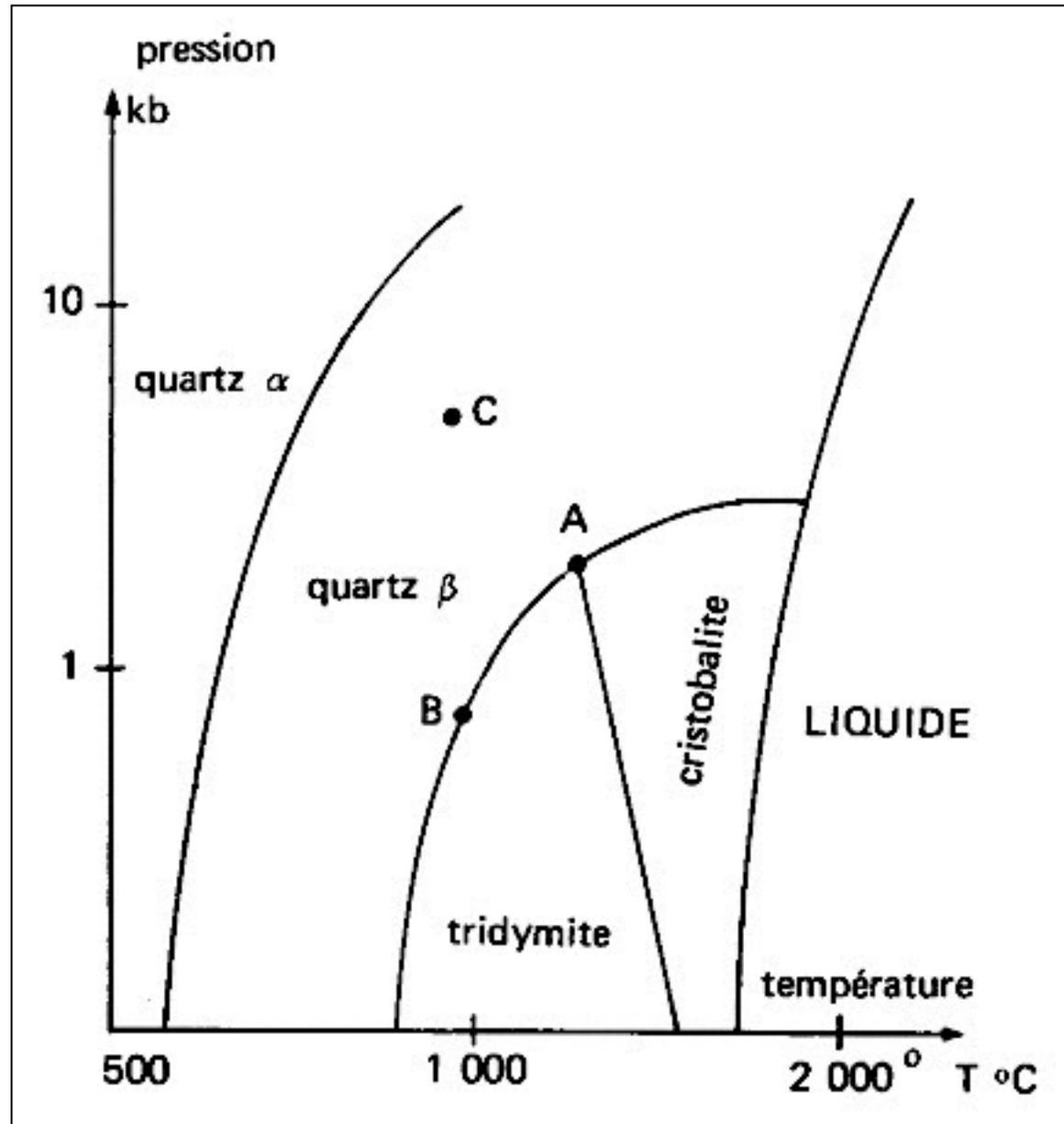
Exercice : diagramme de phases de SiO₂



Différentes phases minérales existent à l'état solide selon les conditions de pression et de température.

$$v = k + 2 - \phi$$

Calculez la variance en A,
B et C

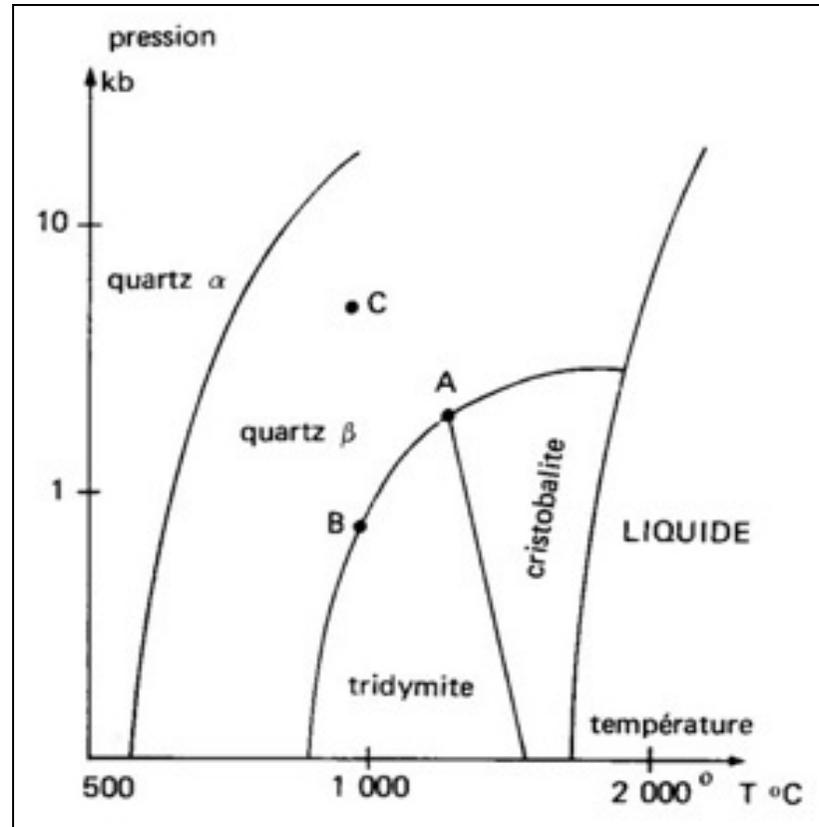


Exercice : diagramme de phases de SiO₂



$$v = k + 2 - \phi$$

- En C : une seule phase
 $V = 2$
- En B : deux phases
 $V = 1$
- En A : trois phases
 $V = 0$

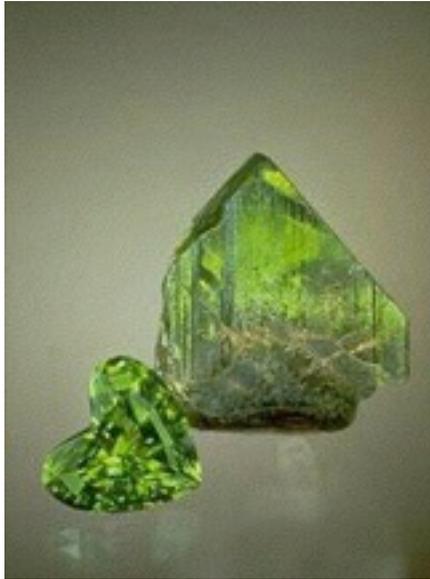


1.2. Étude en laboratoire de la composition des liquides en cours de fusion

b) Les systèmes binaires

cas de minéraux miscibles : fusion sans eutectique

Systeme binaire : cas de solides miscibles



intermédiaires
 $(\text{Fe, Mg})_2(\text{SiO}_4)$



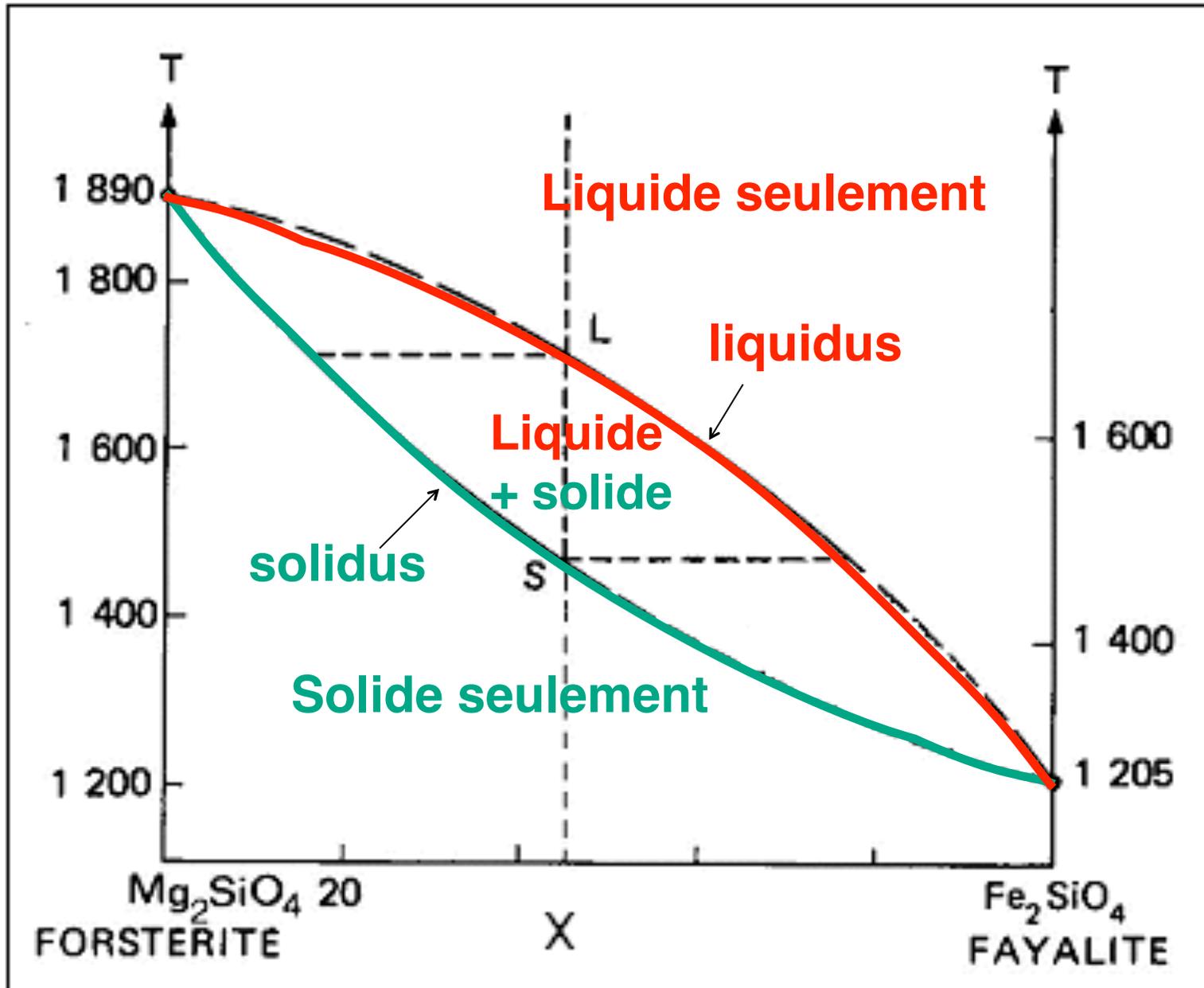
$k = 2$
(2 minéraux en mélange)



Forstérite
pôle magnésien de l'olivine
 $\text{Mg}_2(\text{SiO}_4)$
 $T^\circ \text{ fusion} = 1890 \text{ }^\circ\text{C}$

Fayalite
pôle ferreux de l'olivine
 $\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)$
 $T^\circ \text{ fusion} = 1205 \text{ }^\circ\text{C}$

Diagramme binaire de l'olivine



Quand tout est solide : point de départ

$$v = k + 1 - \phi$$

**P est fixé, donc 1 seule variable d'état,
la température T, pour décrire le système**

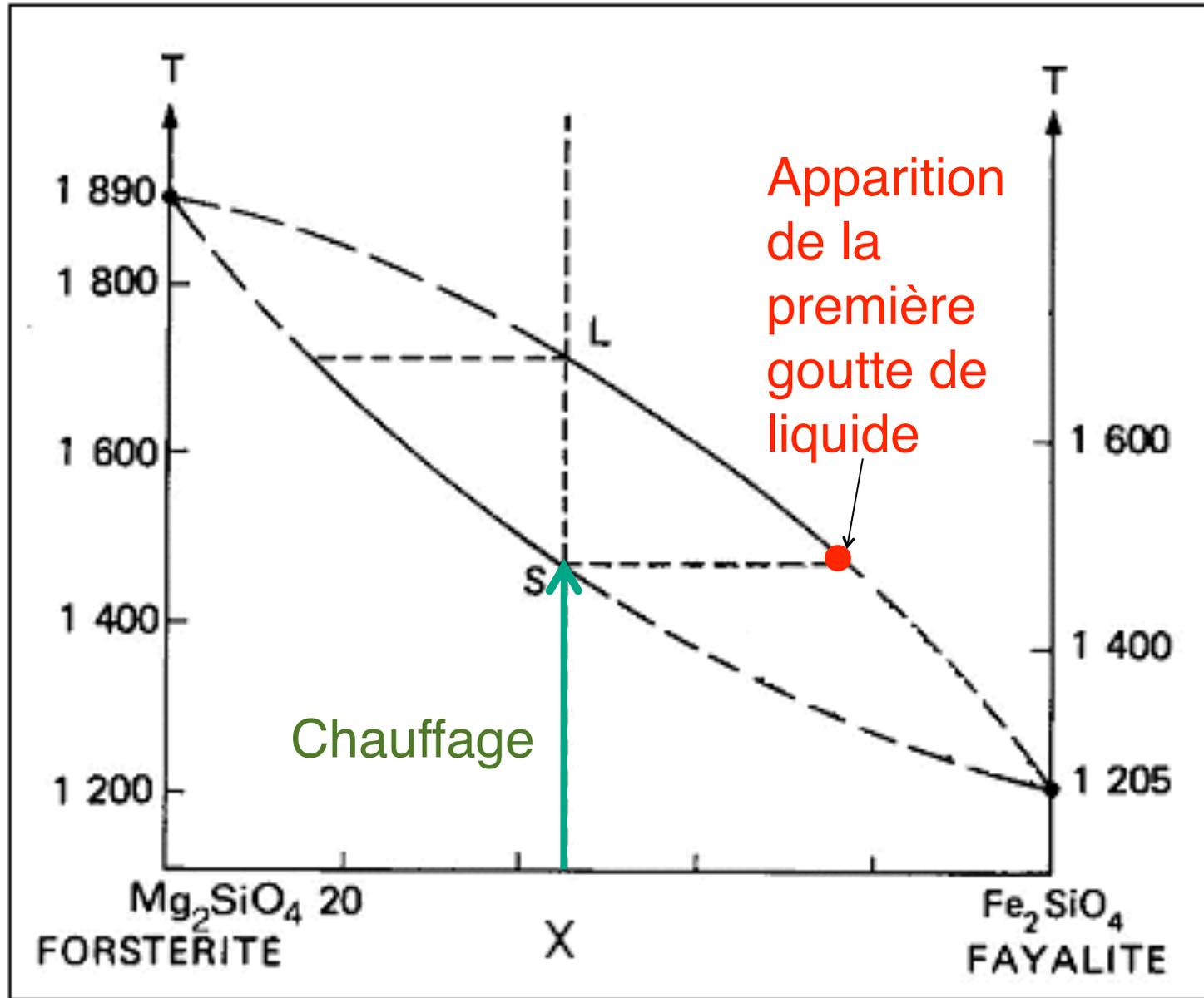
$\phi = 1$ une seule phase car miscibilité complète

$k = 2$ (2 minéraux en mélange)

$$v = 2$$

**→ La température et la composition chimique
du mélange varient indépendamment**

Lecture d'un diagramme binaire (1)



Mélange de composition X

Changement de variance à la première goutte

$$v = k + 1 - \phi$$

**P est fixé, donc 1 seule variable d'état,
la température T, pour décrire le système**

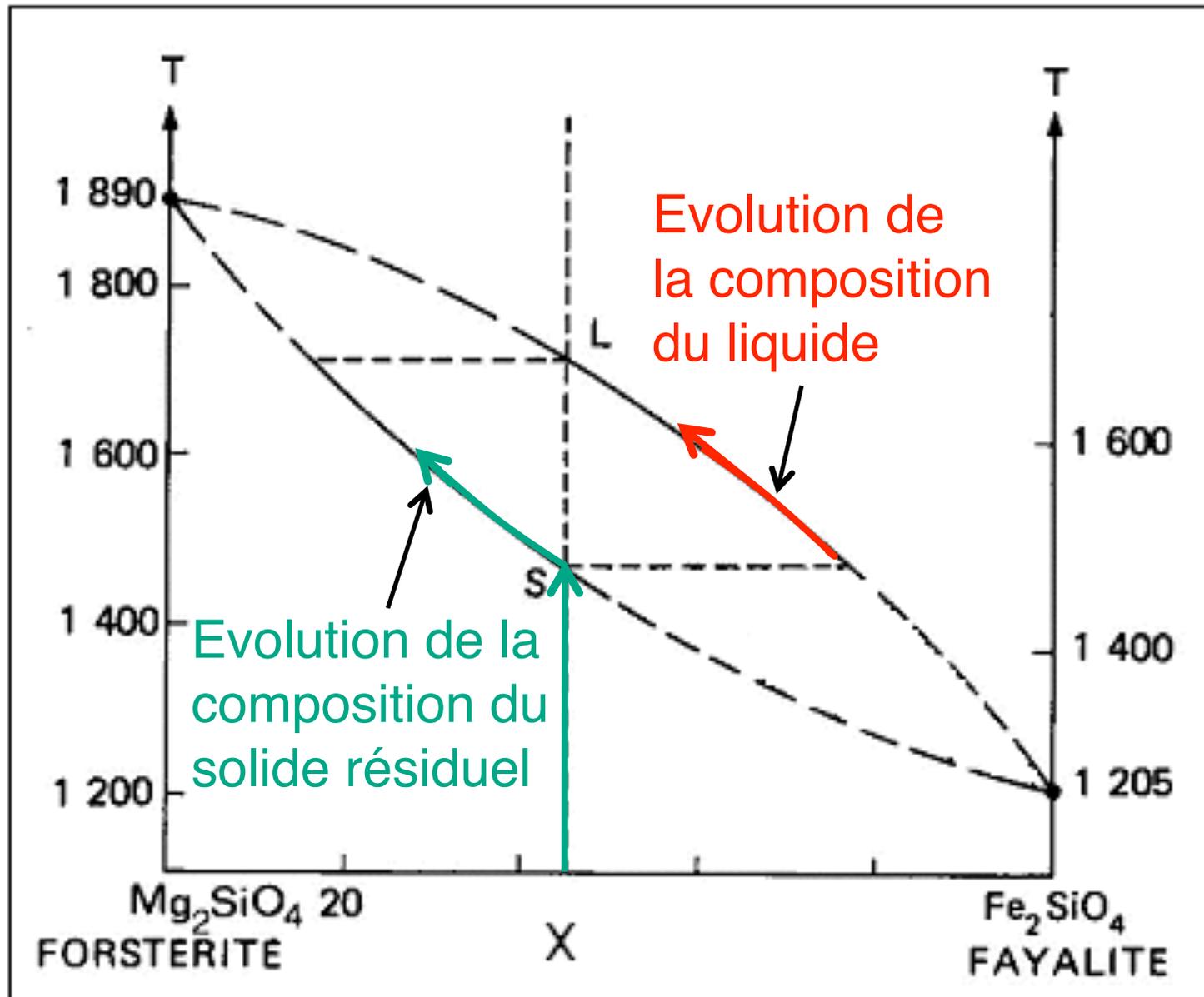
$\phi = 2$ car une phase liquide + une phase solide

$$k = 2$$

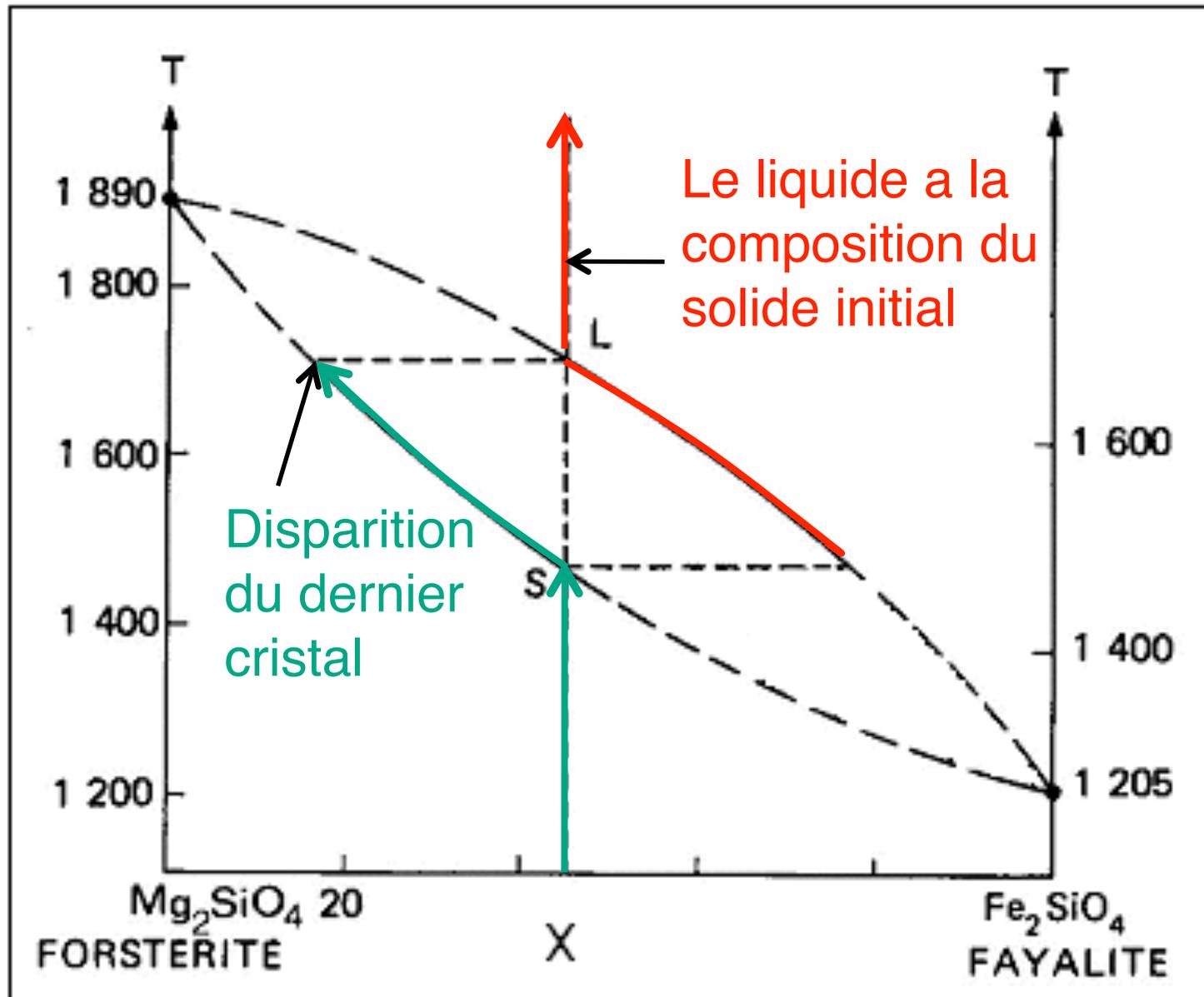
$$v = 1$$

**→ La composition chimique du solide résiduel et du liquide
varient en fonction de la température
(leur composition évoluent en suivant respectivement
le solidus et le liquidus)**

Lecture d'un diagramme binaire (2)



Lecture d'un diagramme binaire (3)



Variance à la disparition du dernier cristal

$$v = k + 1 - \phi$$

**P est fixé, donc 1 seule variable d'état,
la T, pour décrire le système**

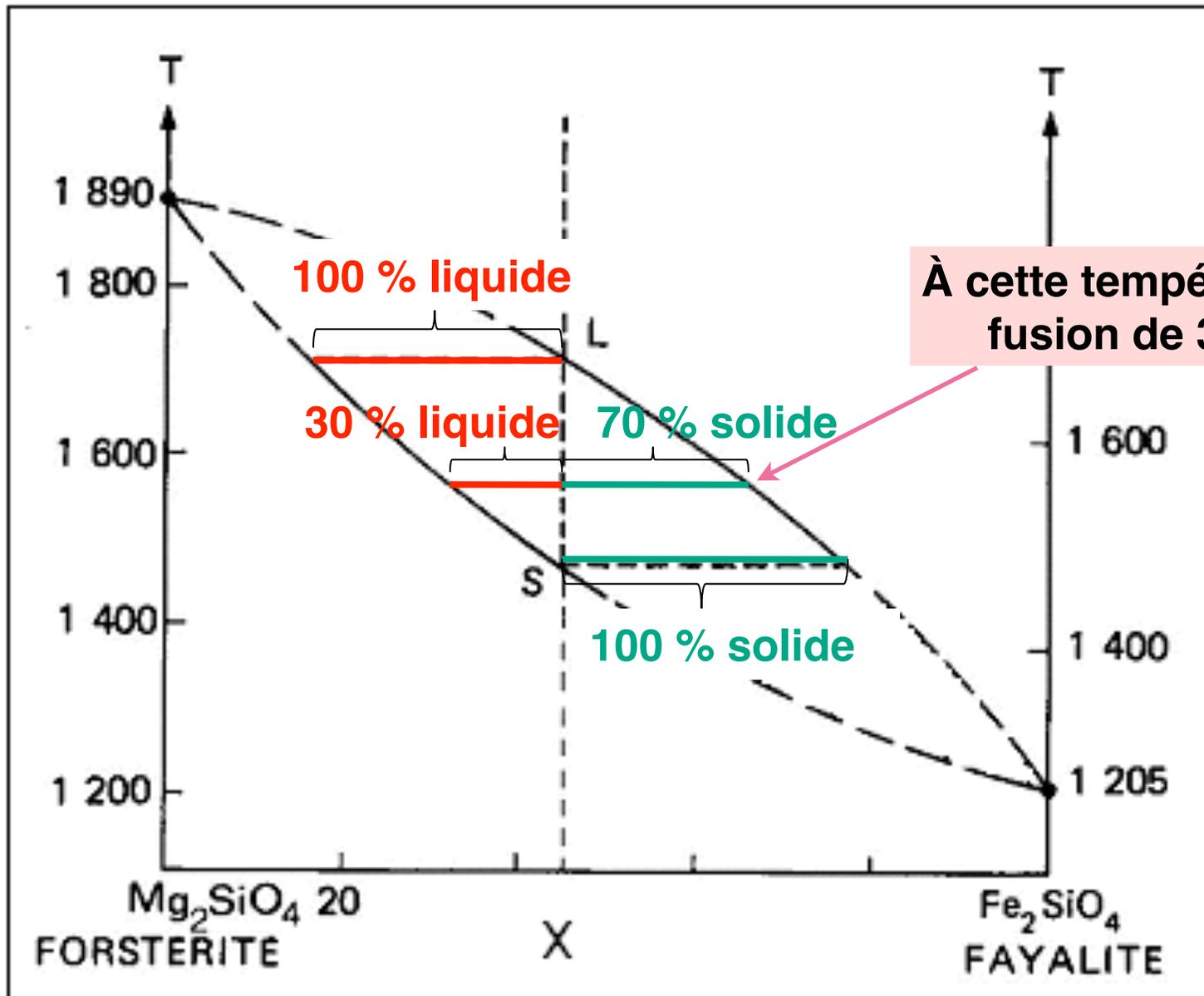
$\phi = 1$ une seule phase liquide

$$k = 2$$

$$v = 2$$

→ **La température et la composition chimique
du liquide varient indépendamment
(le liquide a la composition du solide initial)**

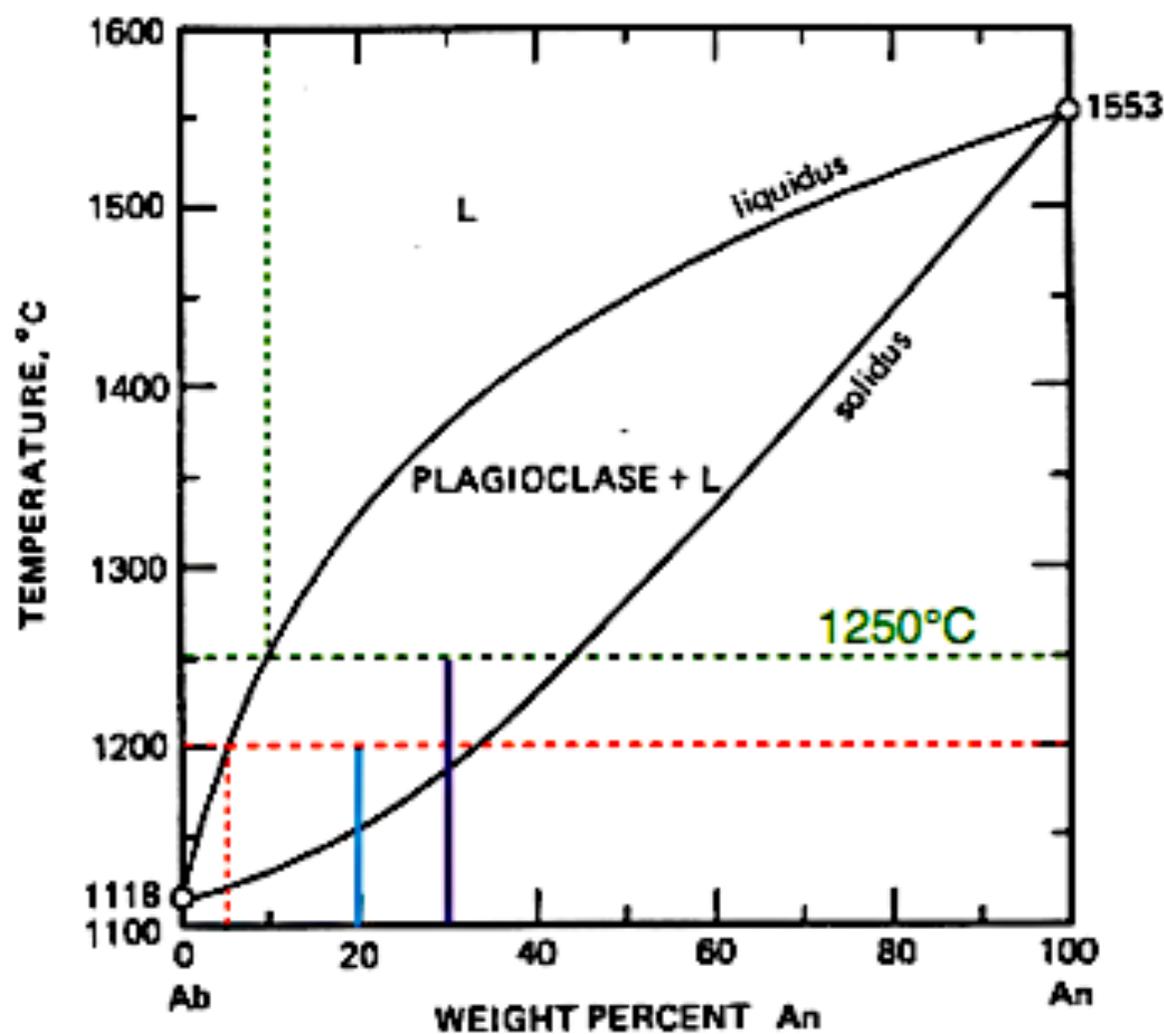
Règle du levier



À cette température, fusion de 30%

Lien avec le TP : exercice 3

Exercice 3



1) À 1200°C, taux de fusion de 45 % ; la composition du liquide se lit sur le liquidus et est de 5% An + 95% Ab
À 1250°C, taux de fusion de 68% ; la composition du liquide est 10% An + 90% Ab.

2) À 1250°C, le mélange atteint un taux de fusion de 40%. La composition du liquide est la même que le mélange précédent à 1250°C.

3) À même température de fusion, le taux de fusion dépend de la composition initiale. À même composition initiale, le taux de fusion dépend de la température.

La composition du liquide dépend donc du taux de fusion, lui-même lié à la température et à la composition du mélange initial.

1.2. Étude en laboratoire de la composition des liquides en cours de fusion

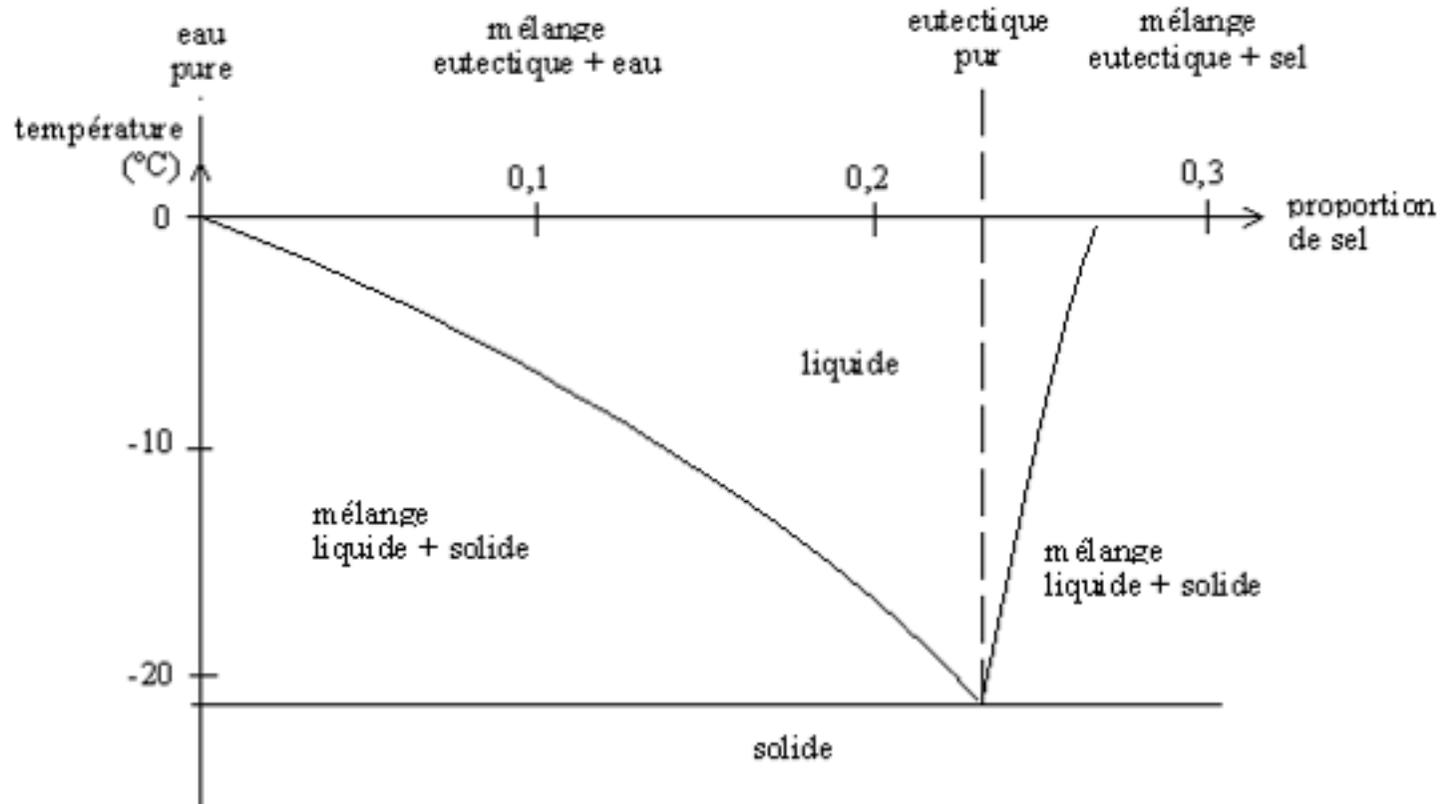
b) Les systèmes binaires

**# cas de minéraux non miscibles à l'état solide :
fusion avec eutectique**

Notion d'eutectique simplifiée

Deux solides :

- la glace fond à 0°C
- NaCl fond à 801°C



Quelle que soit la quantité de sel,

le solide fond à $-21,6^{\circ}\text{C}$ et a une salinité de 0,23 % de sel NaCl.

Avec du CaCl_2 , la glace fond à $-51,1^{\circ}\text{C}$ (Canada).

Mélange binaire de 2 minéraux immiscibles



Diopside

(clinopyroxène)



T° fusion = 1391 °C



Anorthite

(plagioclase)



T° fusion = 1550 °C

Une association de ces 2 minéraux fond à 1274 °C !

Et le liquide obtenu a toujours la même composition, quelle que soient les proportions initiales ! C'est l'eutectique.

Variance du système solide

$$v = k + 1 - \phi$$

**P est fixé, donc 1 seule variable d'état,
la T, pour décrire le système**

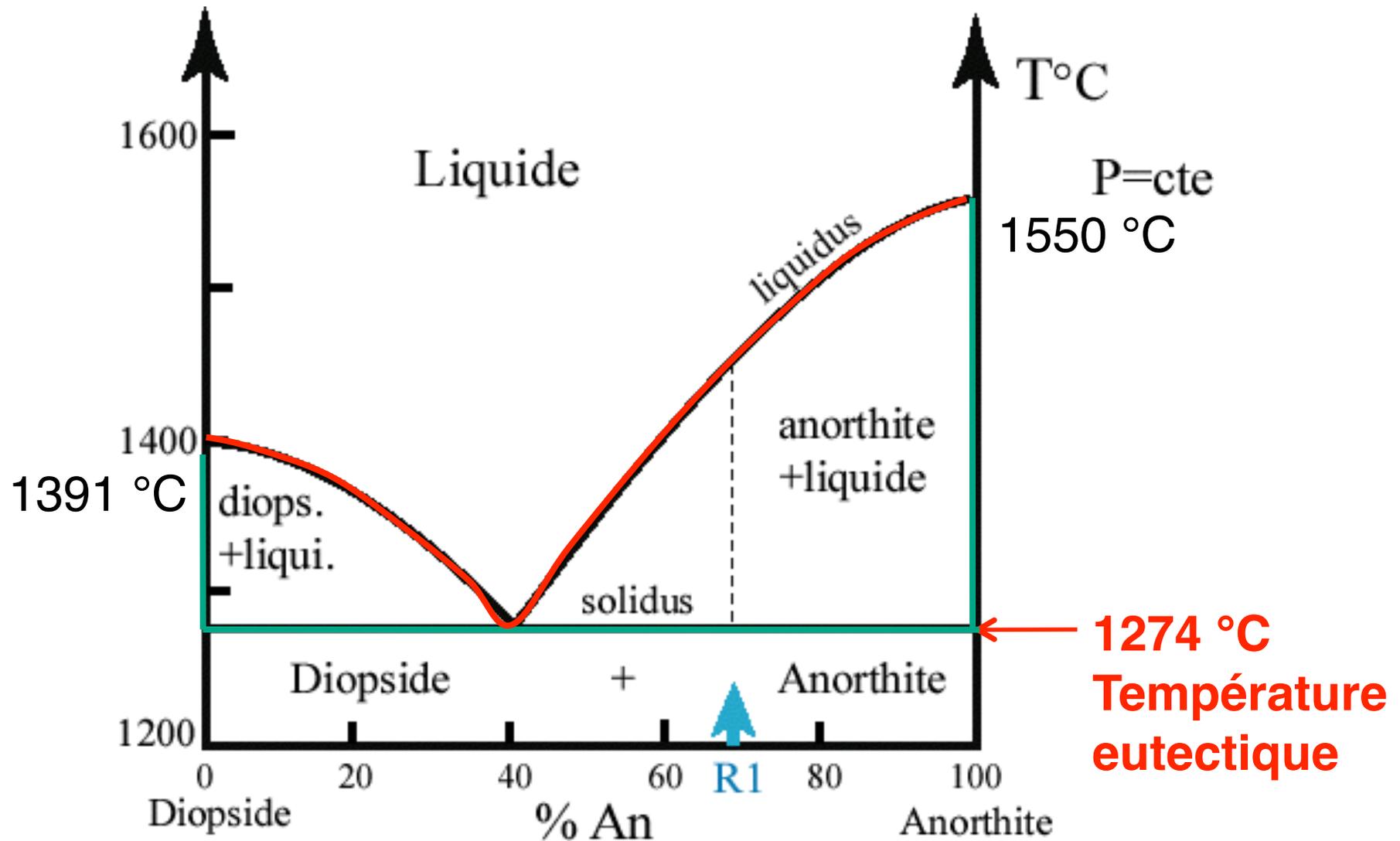
$\phi = 2$ phases car minéraux non miscibles

$k = 2$ (2 minéraux en mélange)

$$v = 1$$

→ Seule la température change jusqu'à la température eutectique (qui dépend des minéraux en mélange)

Lecture d'un diagramme binaire avec eutectique



Animation : <http://christian.nicollet.free.fr/page/enseignement/LicenceSN/ani1/animation1.html>

Variance quand la première goutte de liquide apparaît

$$v = k + 1 - \phi$$

**P est fixé, donc 1 seule variable d'état,
la T, pour décrire le système**

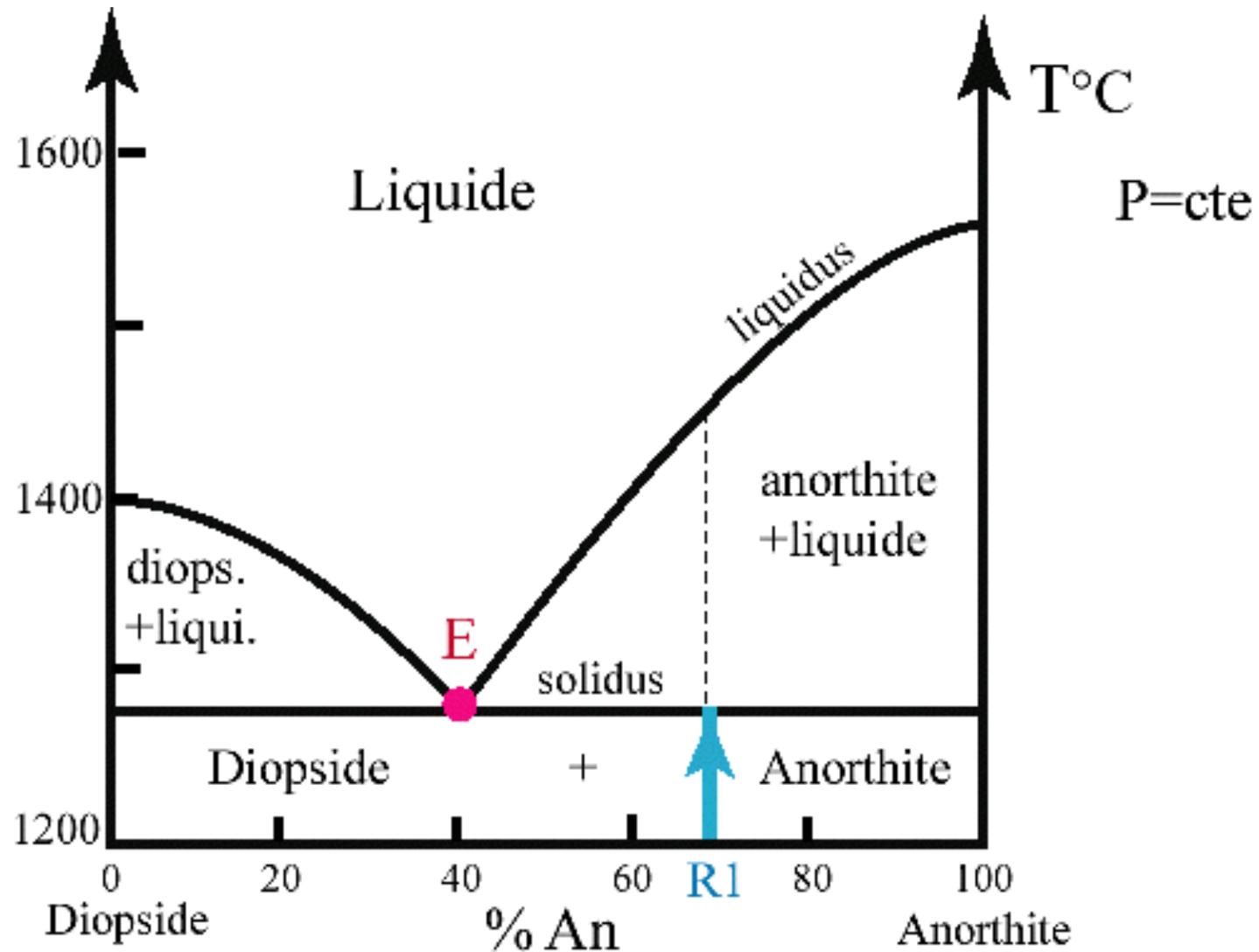
$\phi = 3$ trois phases car 2 minéraux immiscibles + liquide

$k = 2$ (2 minéraux en mélange)

donc $v = 0$!

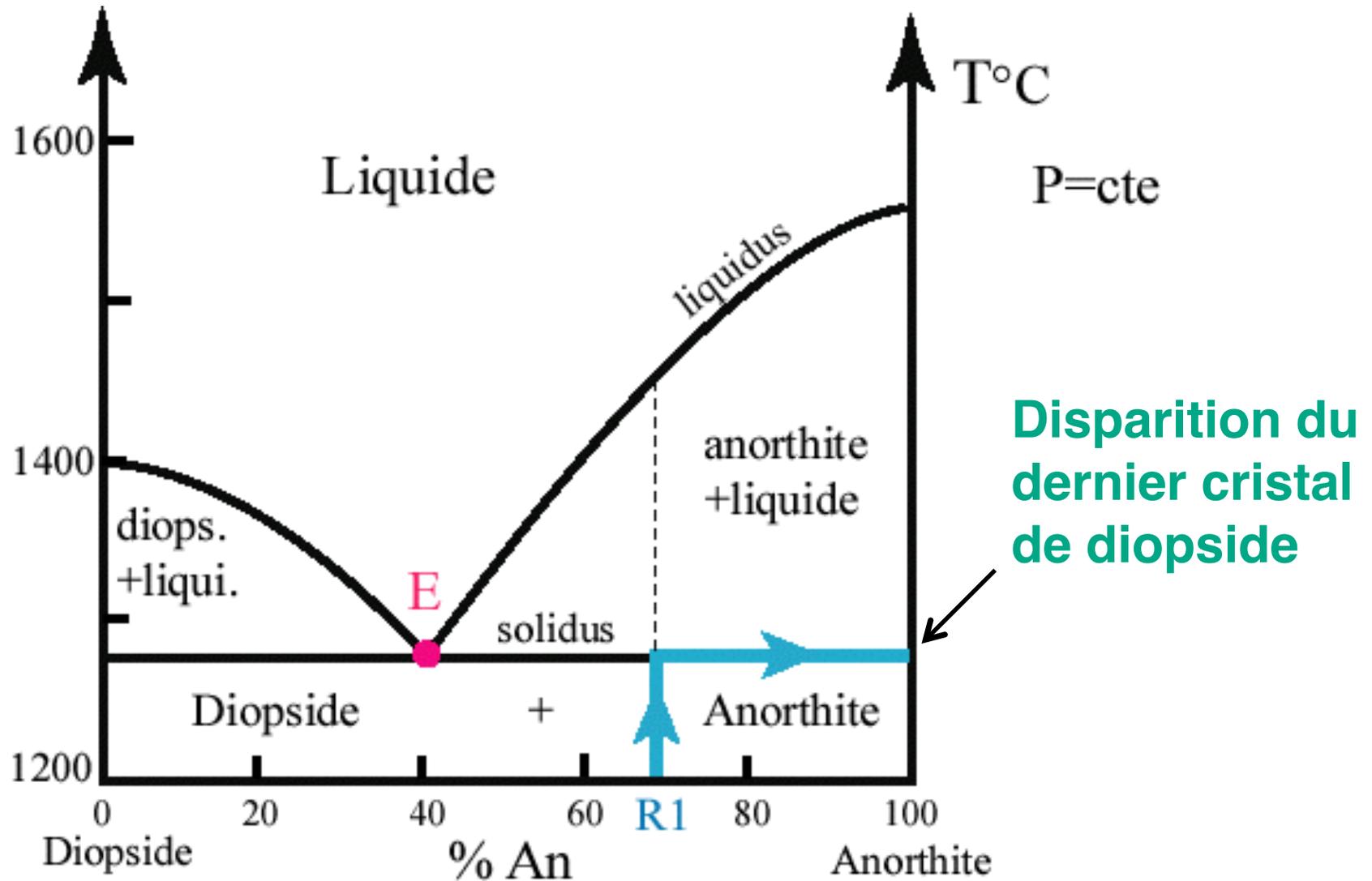
→ La température ne peut plus augmenter tant qu'il y a trois phases, c'est-à-dire tant que l'un des deux minéraux n'a pas disparu !

Lors de l'apparition de la première goutte de liquide



Fusion à température constante...

... tant qu'il reste du diopside solide !



Le liquide a toujours la composition de l'eutectique.

Variance quand le dernier cristal de diopside disparaît

$$v = k + 1 - \phi$$

**P est fixé, donc 1 seule variable d'état,
la T, pour décrire le système**

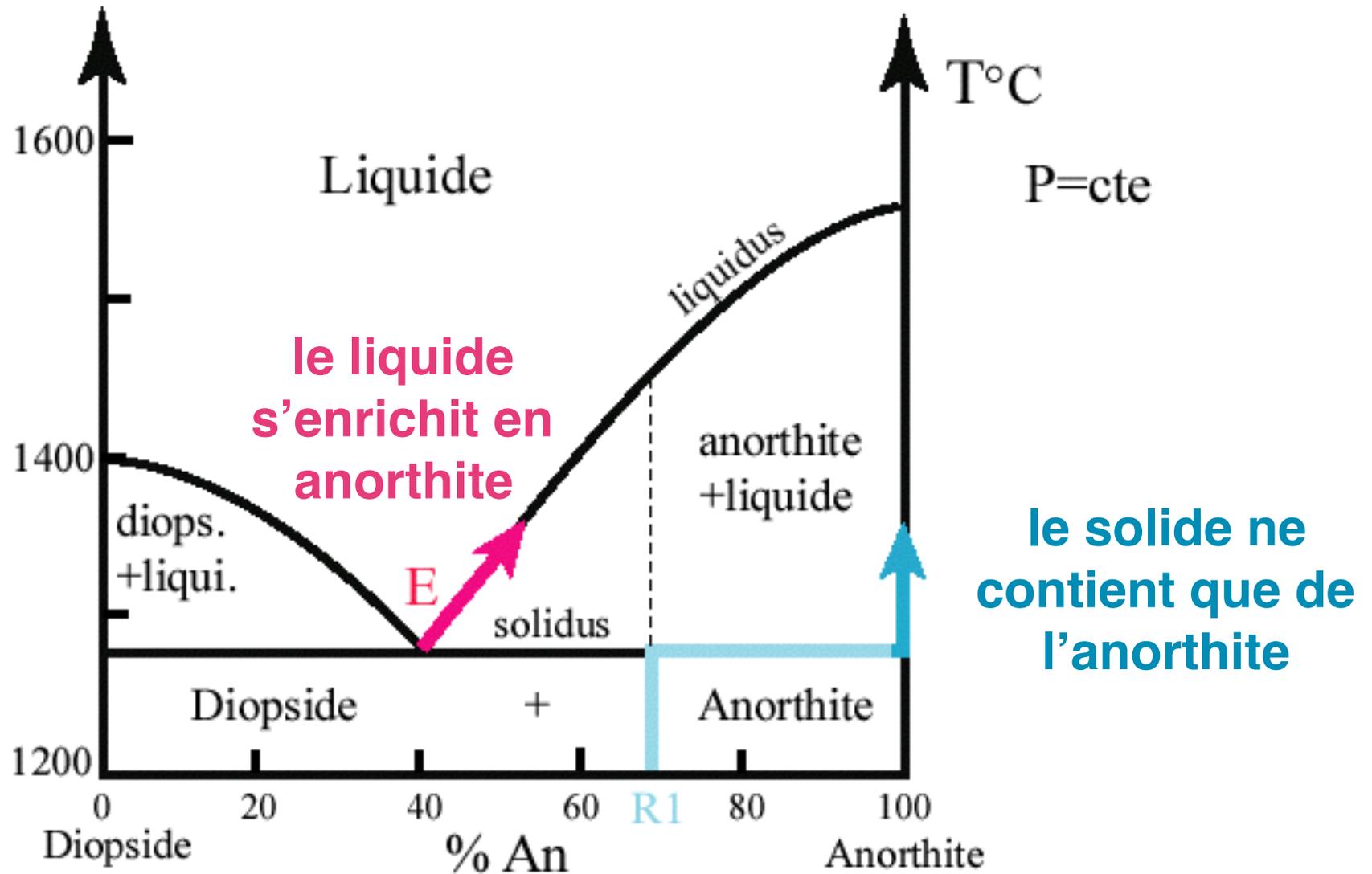
$\phi = 2$ deux phases car 1 minéral + liquide

$k = 2$ (2 minéraux en mélange)

$$v = 1$$

→ La température augmente à nouveau, et la composition du liquide et du solide résiduel suivent respectivement le liquidus et le solidus (le solide résiduel est constitué à 100 % d'anorthite, mais sa quantité diminue)

La fusion continue



Quand le dernier cristal d'anorthite disparaît

$$v = k + 1 - \phi$$

**P est fixé, donc 1 seule variable d'état,
la T, pour décrire le système**

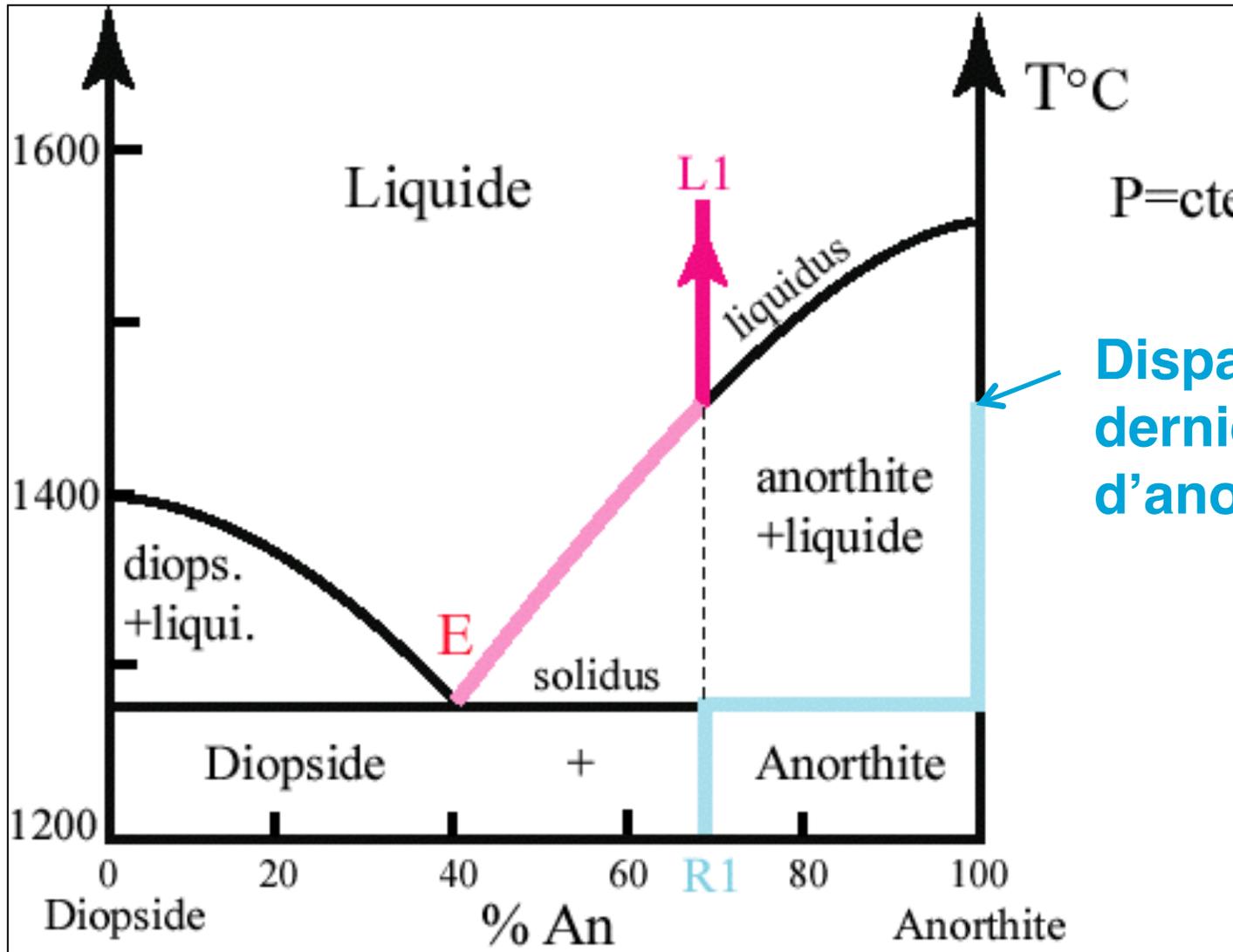
$\phi = 1$ une seule phase : le liquide

$k = 2$ (2 minéraux en mélange)

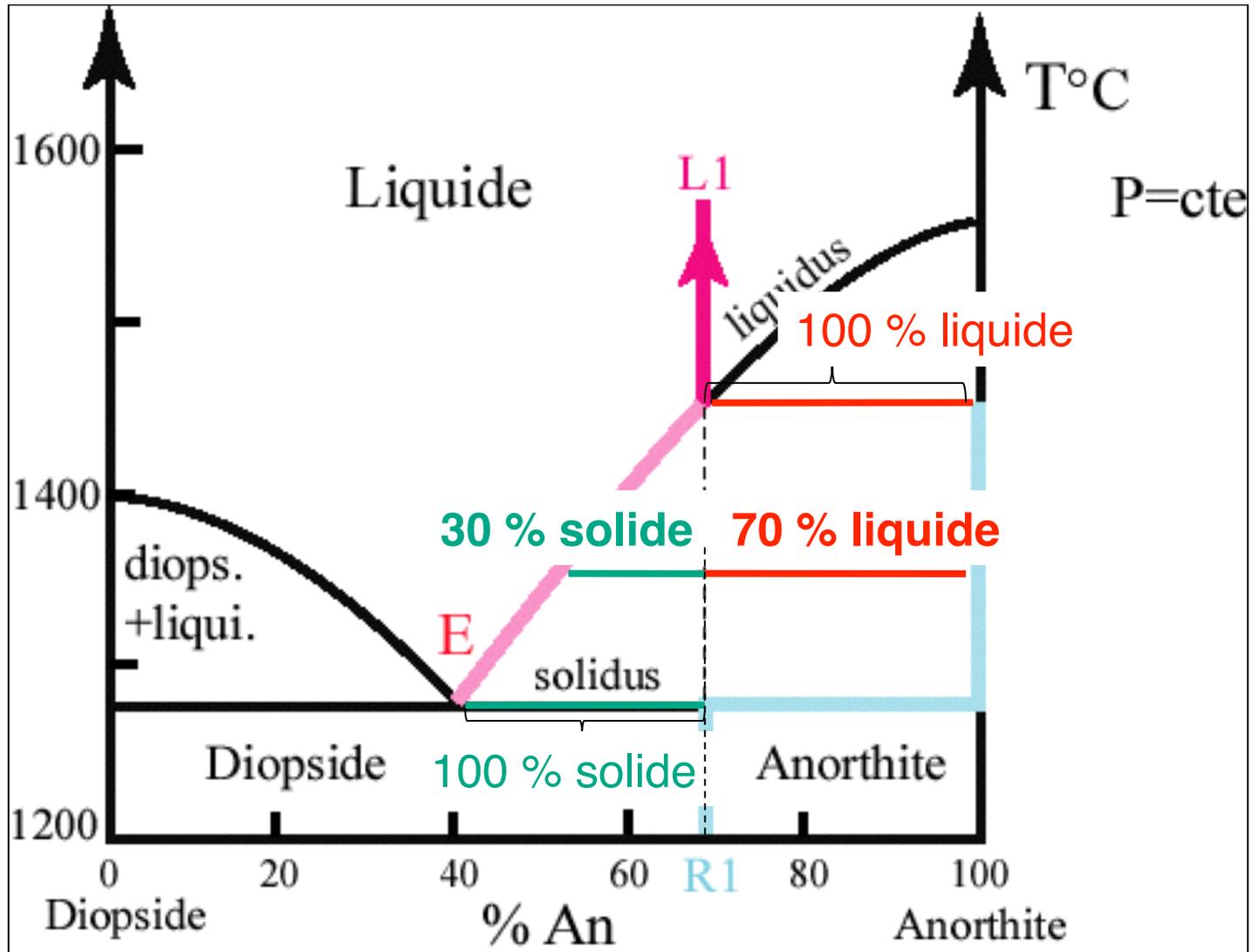
$$v = 2$$

**→ La température augmente à nouveau, indépendamment de
la composition des minéraux en mélange.**

Fin de la fusion



Règle du levier



1.2. Étude en laboratoire de la composition des liquides en cours de fusion

b) Les systèmes binaires

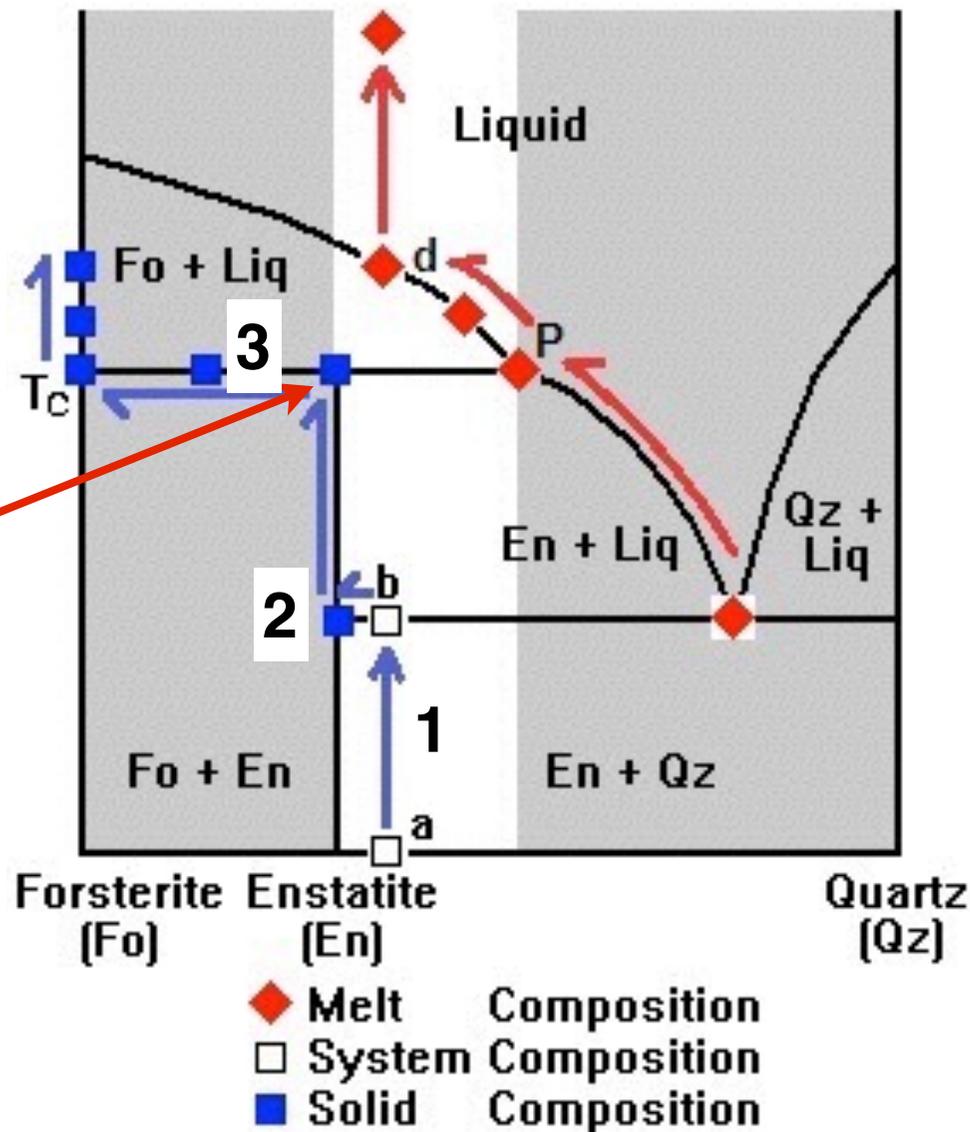
cas de fusion non congruente

Cas de fusion non congruente

Roche de départ = enstatite + un peu de quartz

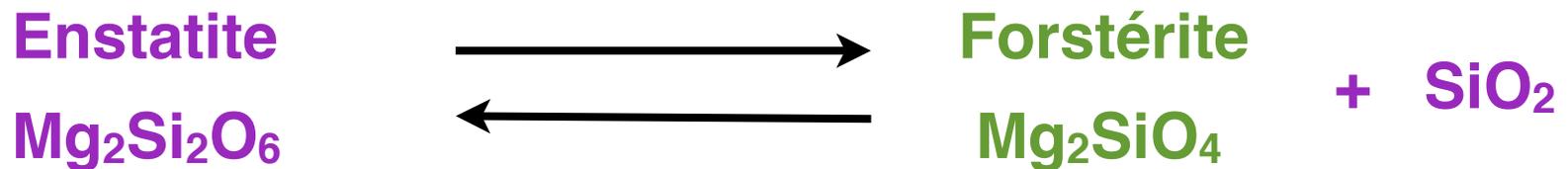
4 la forstérite fond

À la température T_c , l'enstatite est convertie en un nouveau solide, la forstérite.



Cas de fusion non congruente

- 1) Enstatite (pyroxène) et quartz coexistent.
- 2) Le quartz fond et se retrouve dans la phase liquide. La phase solide est donc appauvrie en SiO_2 . Le quartz disparaît totalement.
- 3) La baisse de SiO_2 induit un réarrangement des atomes de l'enstatite en forstérite (olivine). Mais cette conversion ne se fait qu'à une température plus élevée (enstatite «molle» donc pouvant se convertir).
- 4) La forstérite fond ensuite.



Transformation **solide** à la température T_c

1.2. Étude en laboratoire de la composition des liquides en cours de fusion

c) Les systèmes ternaires

Fusion d'un système ternaire



Diopside
(clinopyroxène)
 $\text{CaMg}(\text{Si}_2\text{O}_6)$

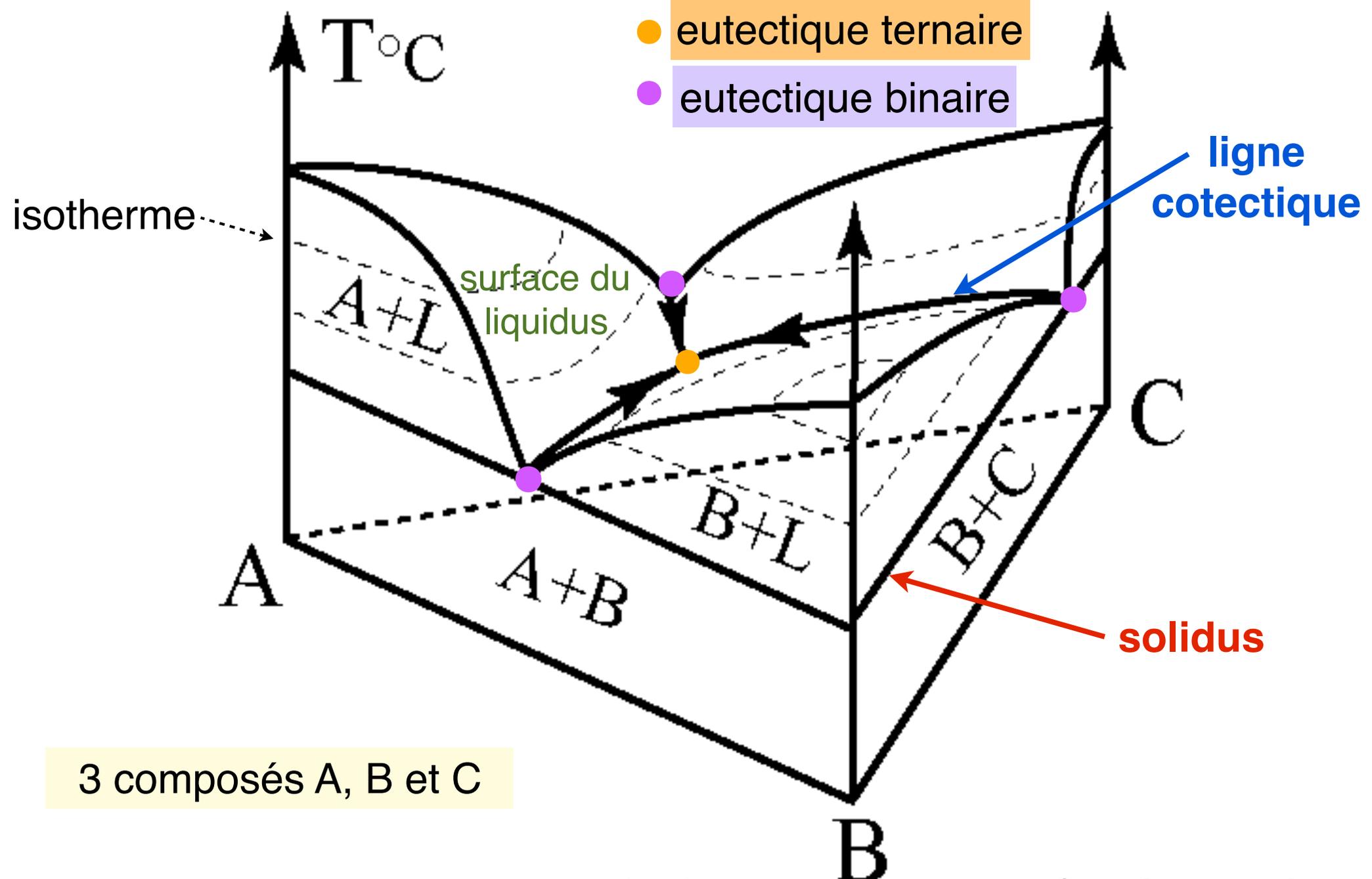


Enstatite
(orthopyroxène)
 $\text{Mg}_2(\text{Si}_2\text{O}_6)$

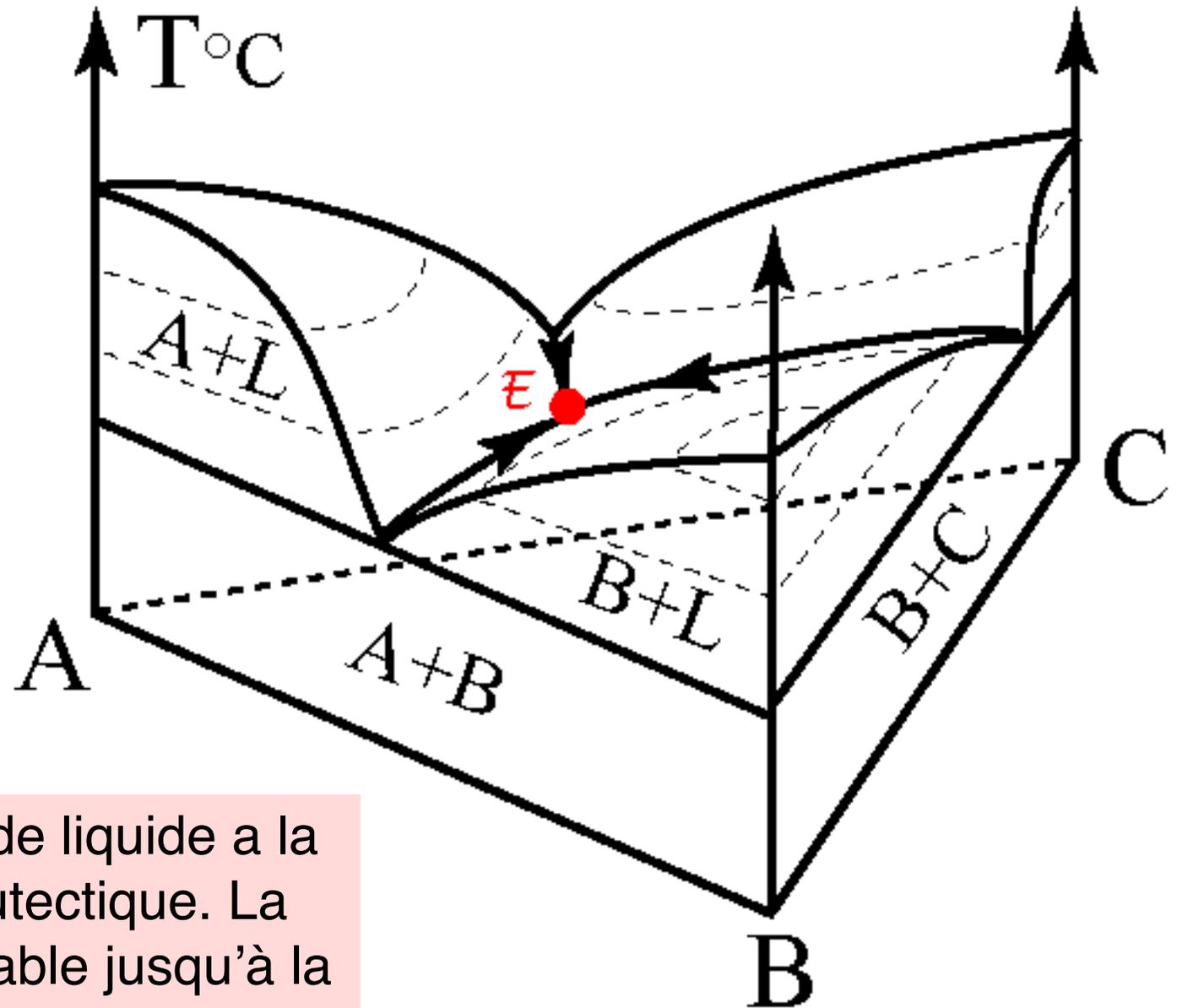
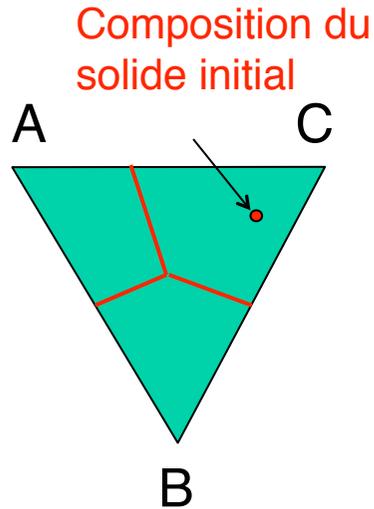


Grenat
(néosilicate)
 $\text{X}_3\text{Y}_2[\text{SiO}_4]_3$

Diagramme ternaire

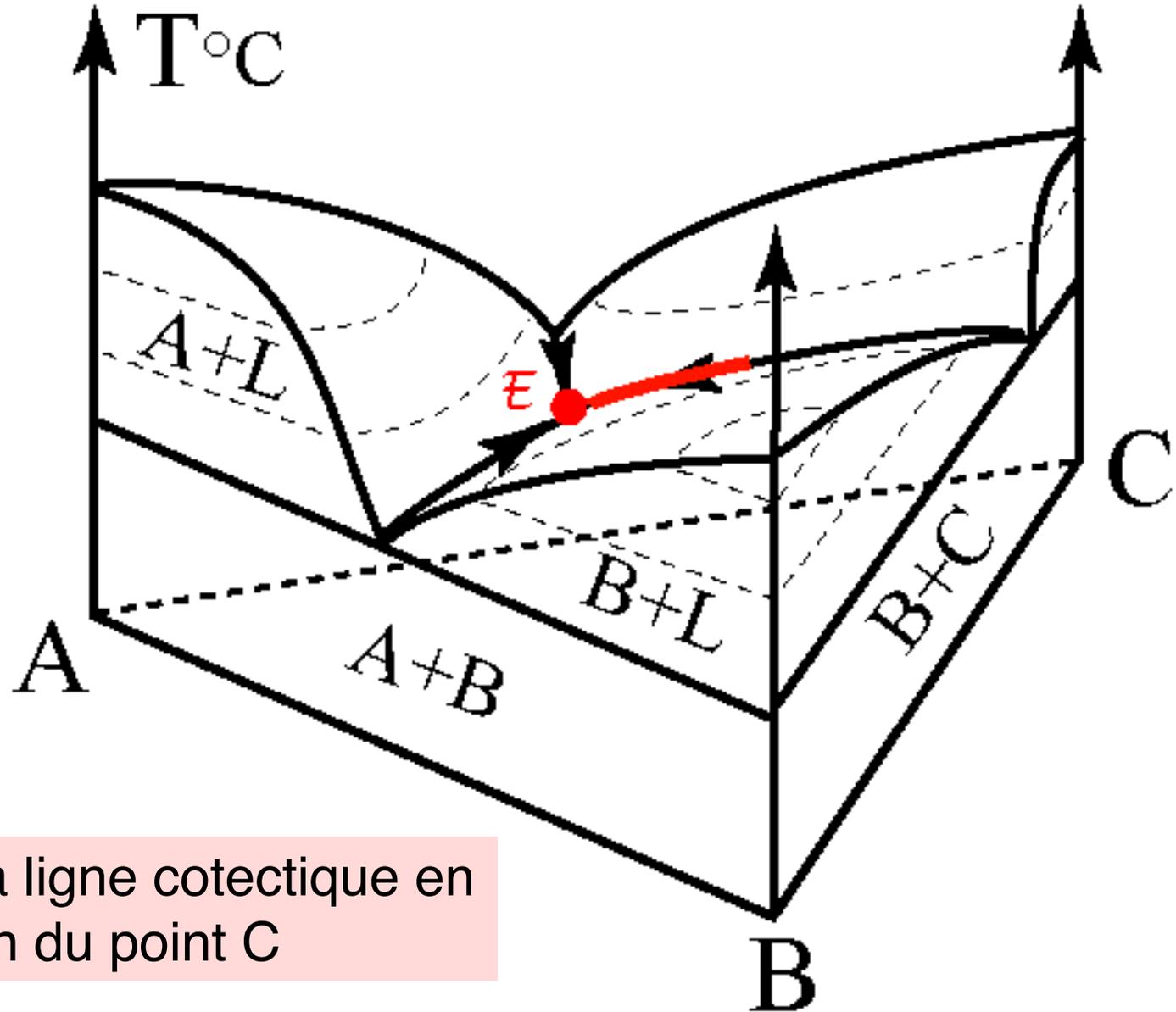
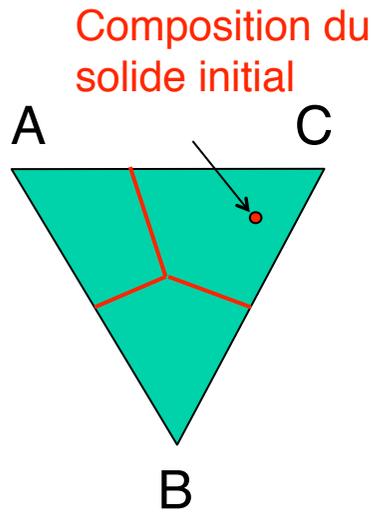


Évolution du liquide lors de la fusion (1)



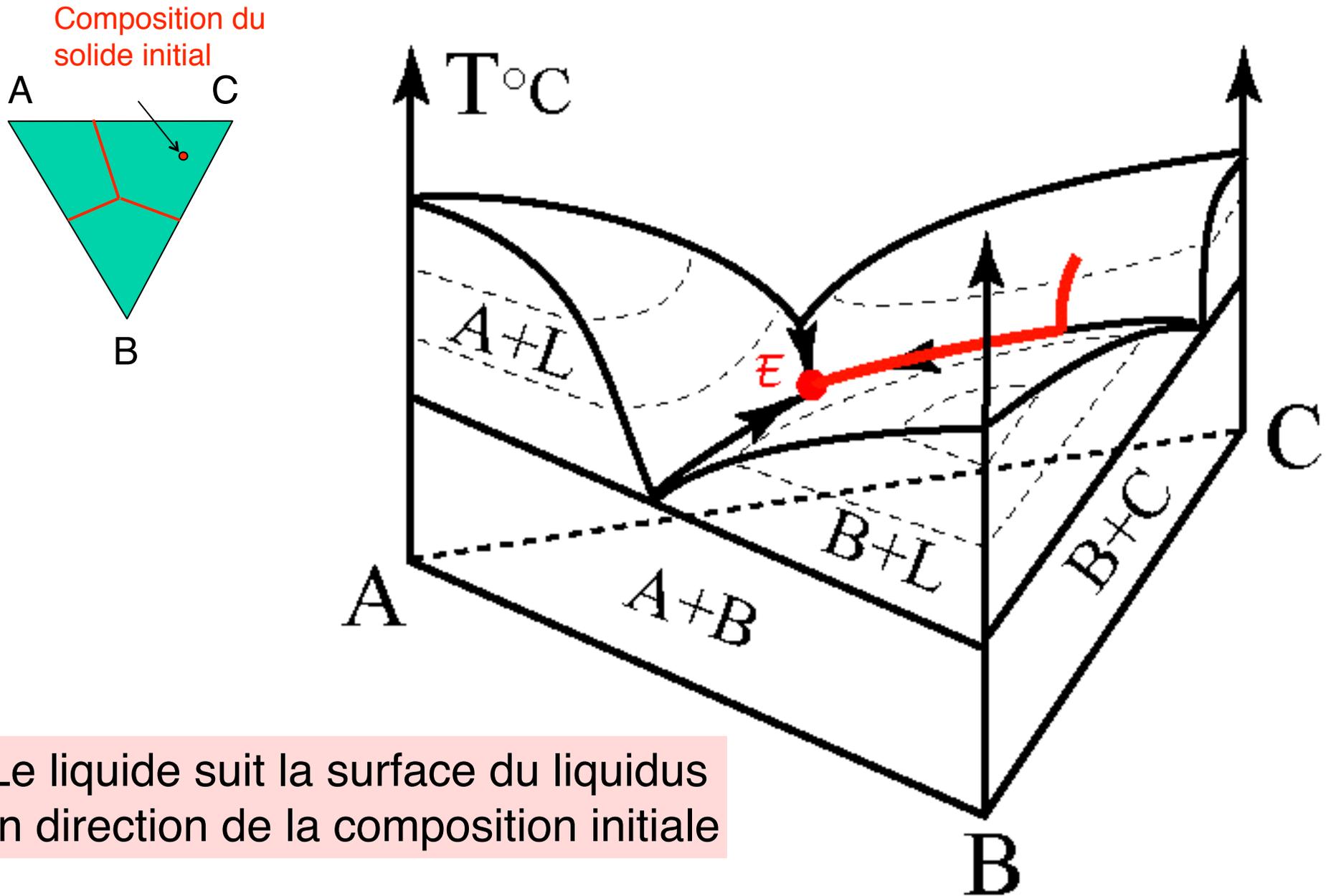
La première goutte de liquide a la composition de l'eutectique. La température reste stable jusqu'à la disparition de A.

Évolution du liquide lors de la fusion (2)



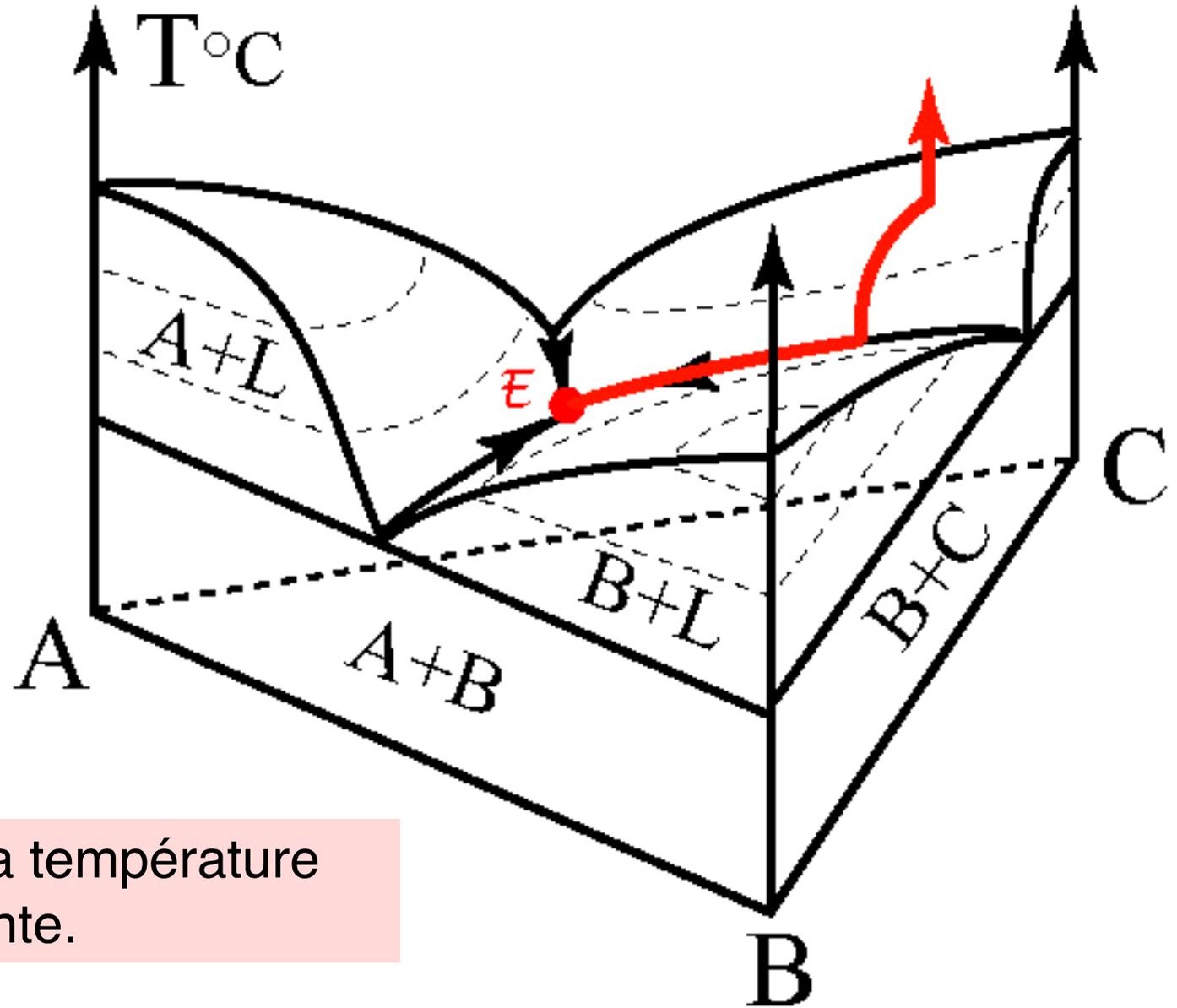
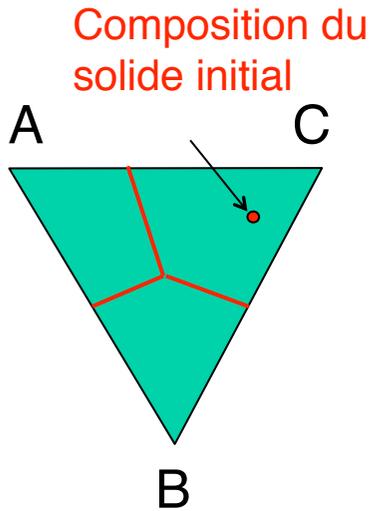
Le liquide suit la ligne cotectique en direction du point C

Évolution du liquide lors de la fusion (3)



Le liquide suit la surface du liquidus en direction de la composition initiale

Évolution du liquide lors de la fusion (4)

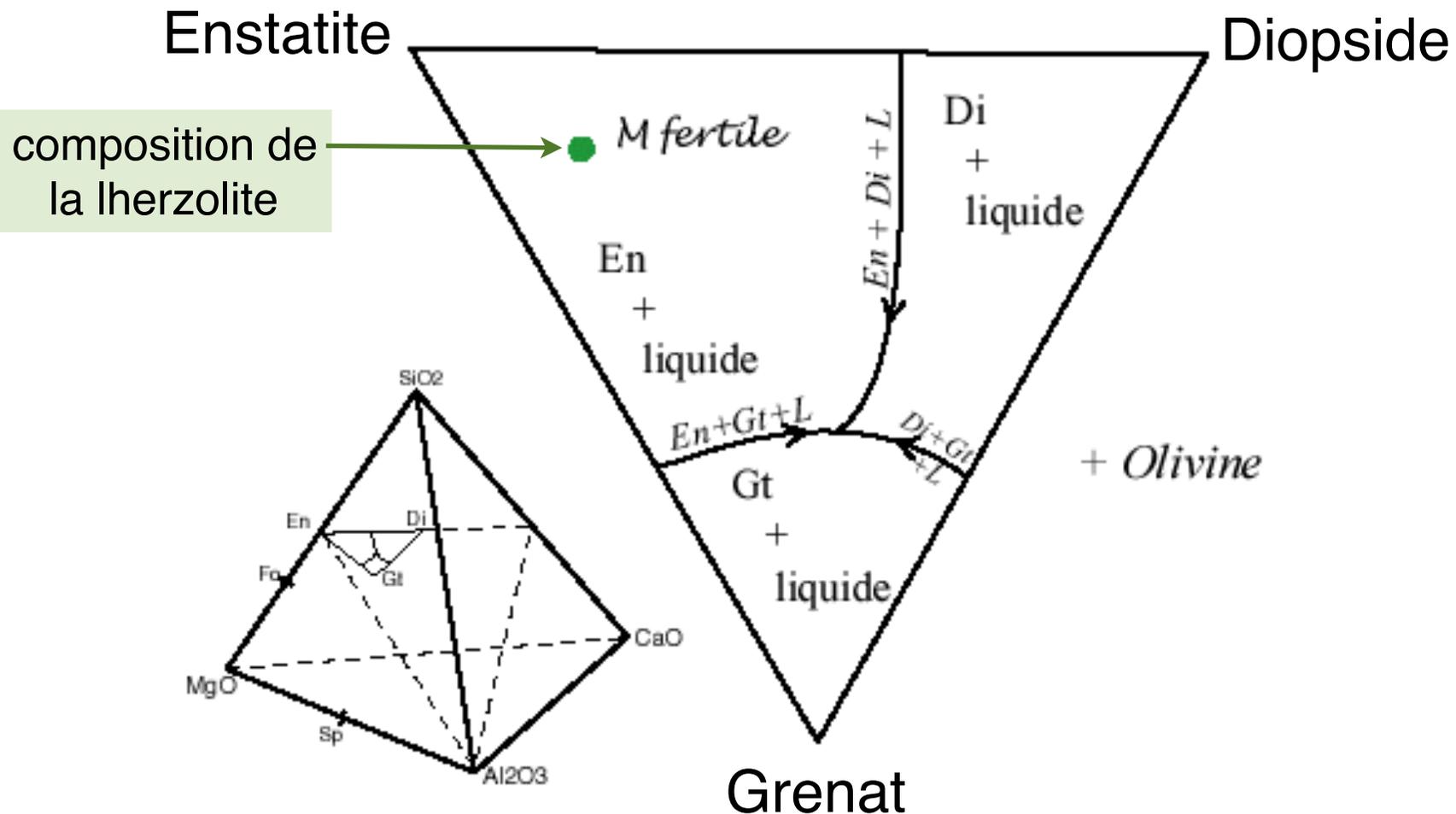


Tout est liquide, la température augmente.

Évolution sur une projection plane

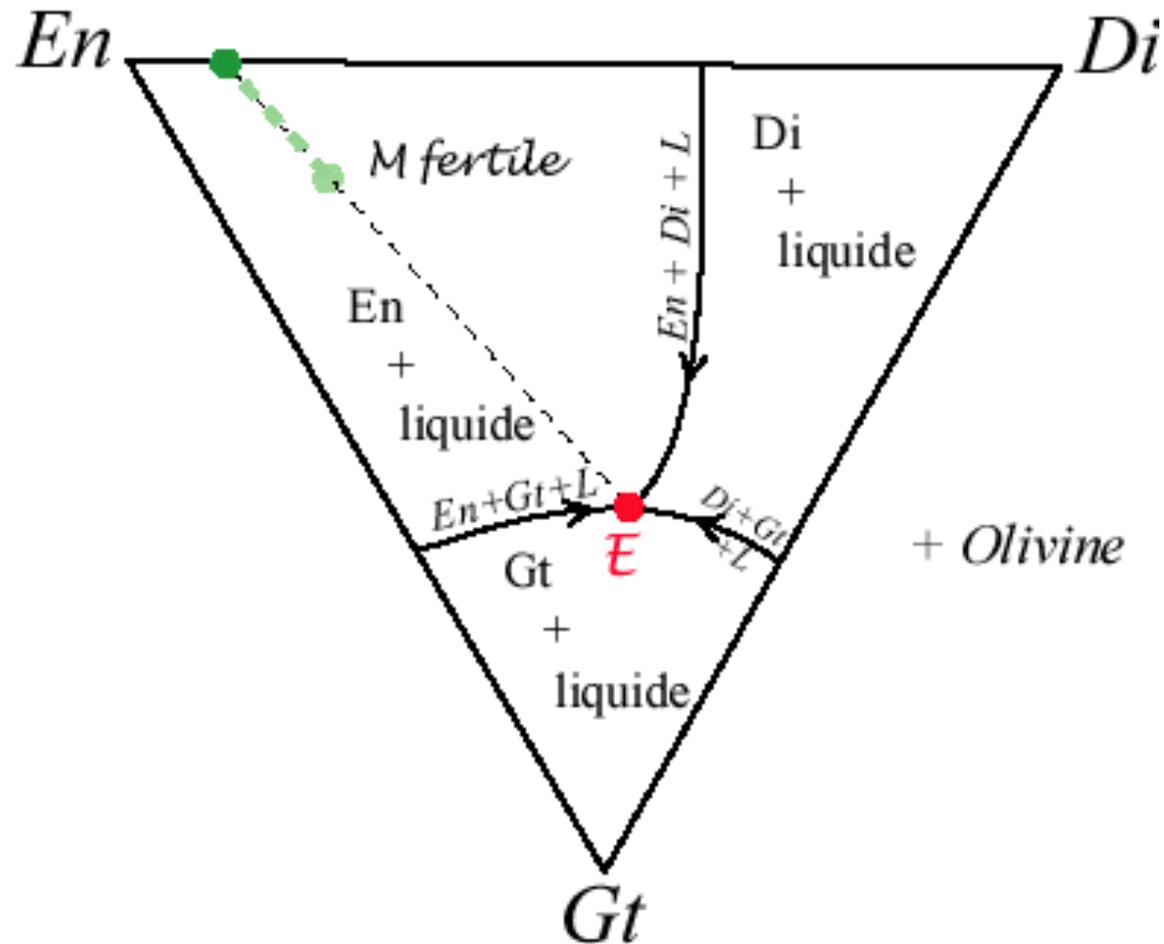
On projette sur un plan les 3 surfaces des liquidus.

Exemple d'une lherzolite : on néglige l'olivine qui fond en dernier et on obtient un diagramme ternaire avec 3 minéraux (cpx, opx, grenat).



Fusion partielle des Lherzolites du Manteau fertile (Mf)

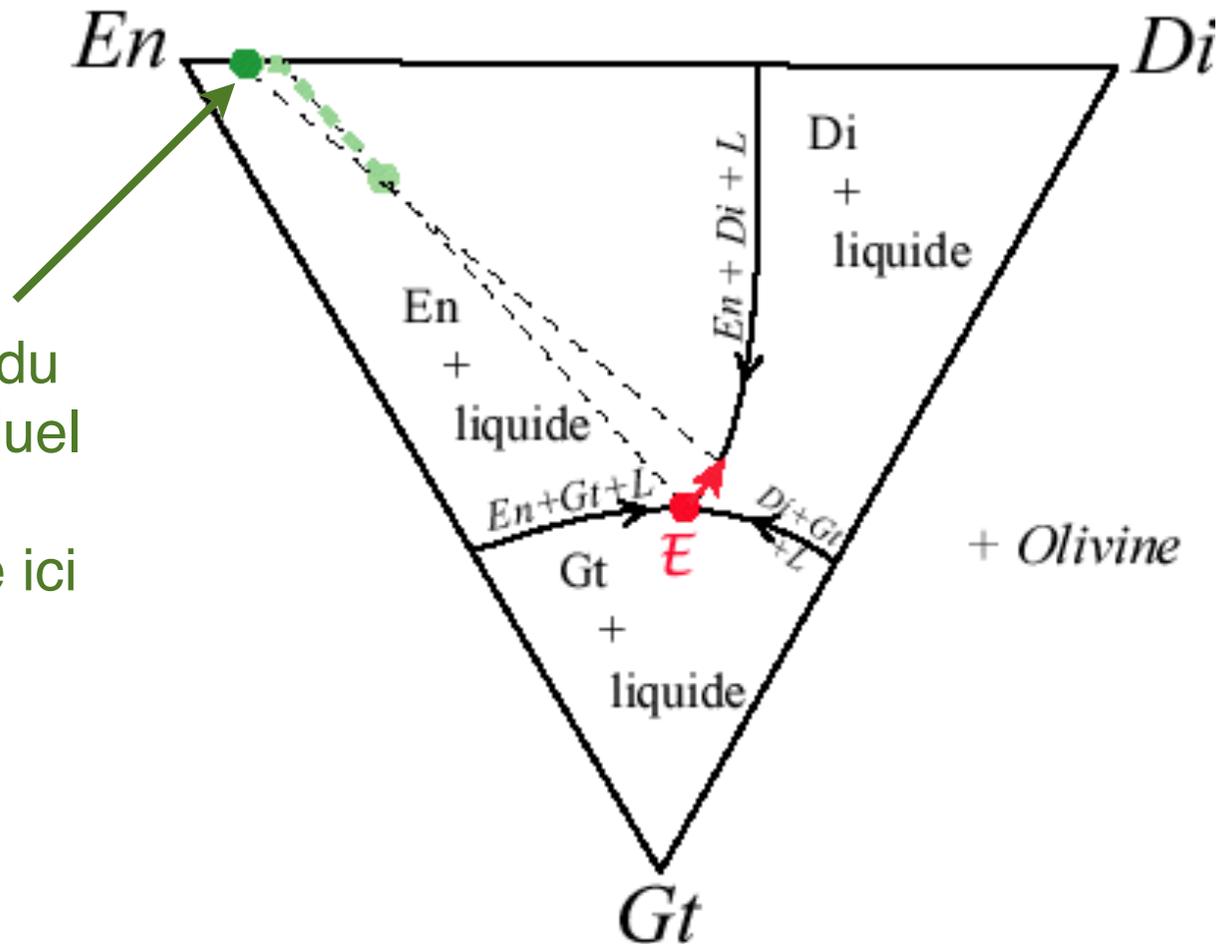
Évolution de la fusion (1)



Le premier liquide a la composition de l'eutectique ternaire

Le solide se déplace vers le pôle enstatite, jusqu'à disparition du grenat, sur la ligne EM.

Évolution de la fusion (2)

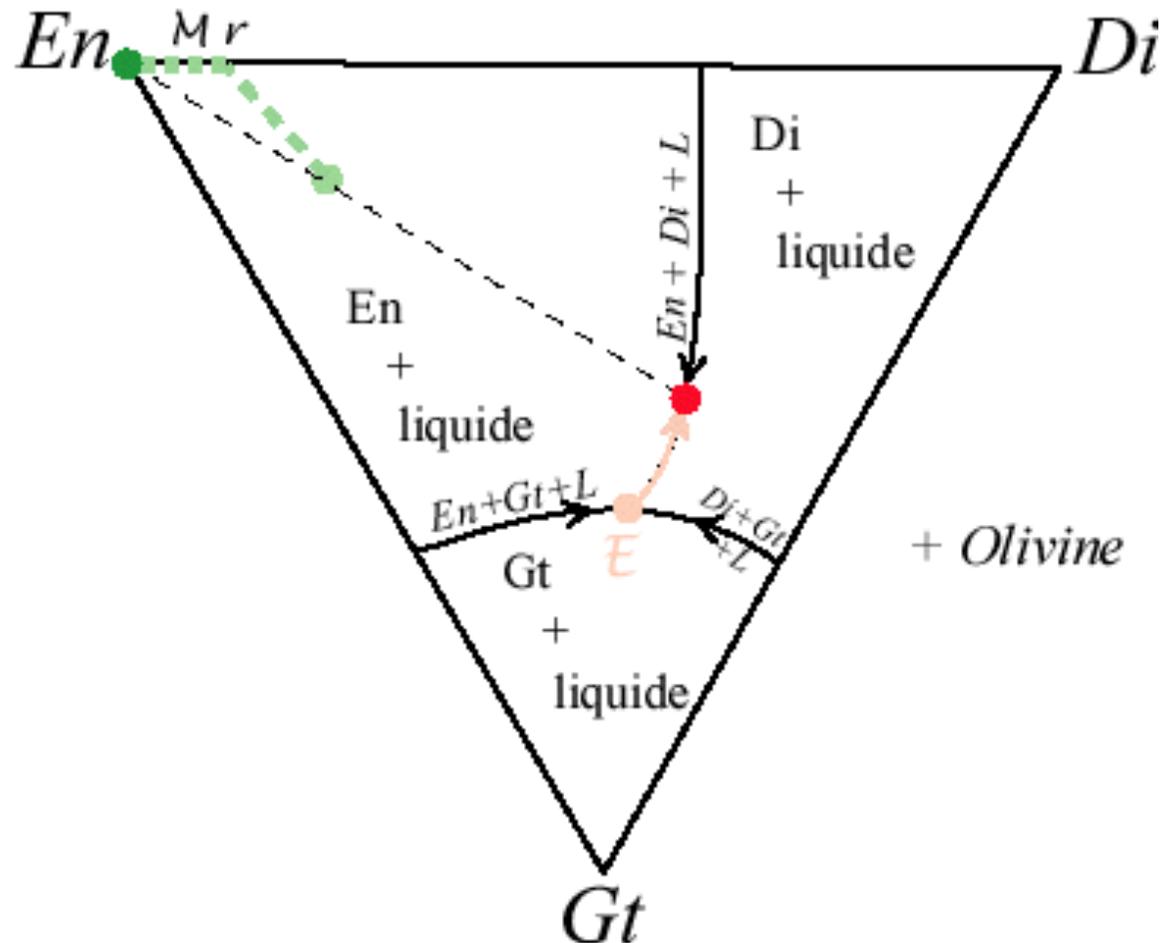


Composition du manteau résiduel si la fusion partielle cesse ici

Le liquide évolue sur la ligne cotectique opposée au grenat (entièrement fondu)

Le solide se déplace vers le pôle enstatite, car le diopside fond progressivement.

Évolution de la fusion (3)

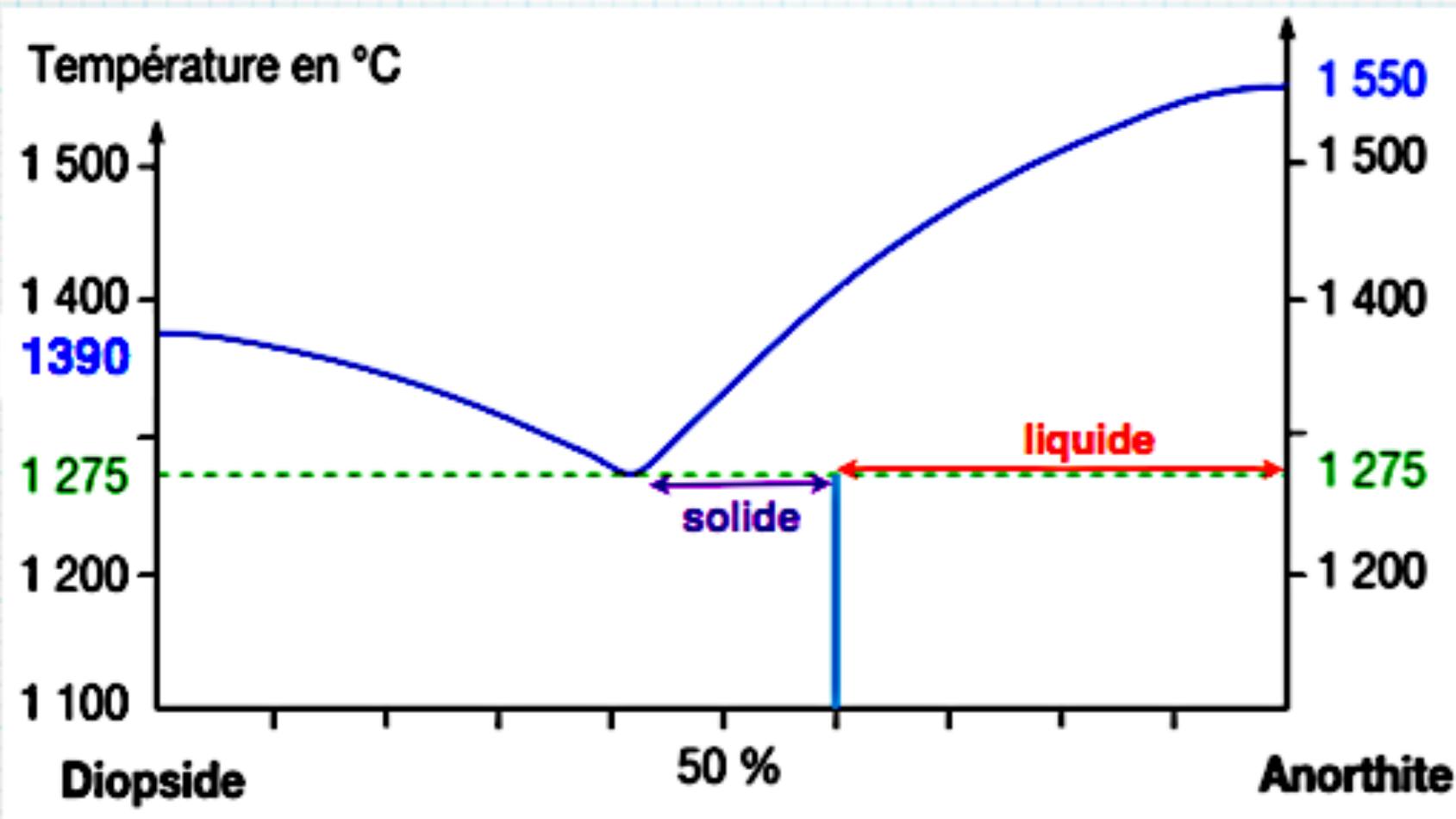


Fusion jusqu'au pôle enstatite, conduisant à un manteau appauvri sans diopside : la harzburgite.

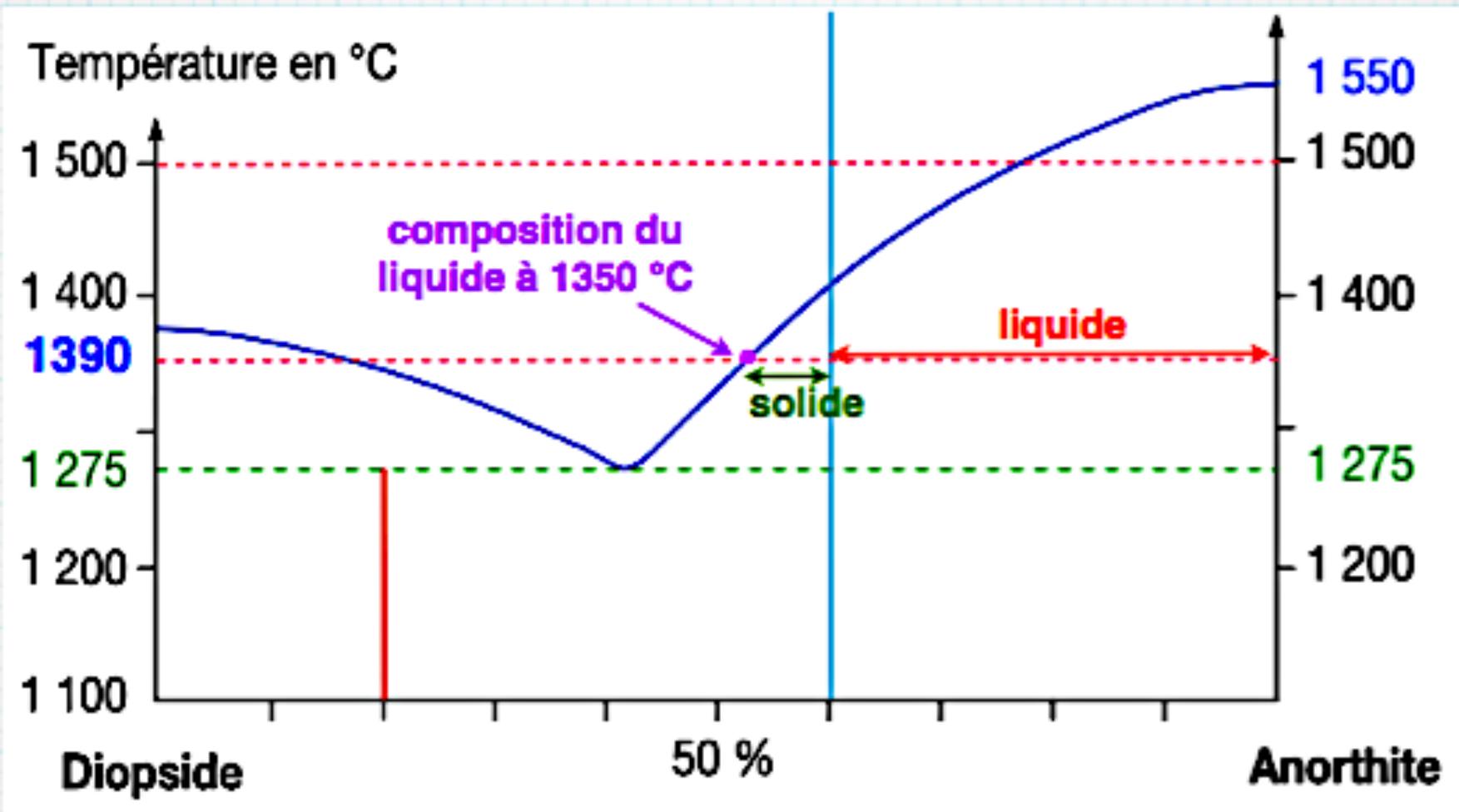
Aucune situation de fusion plus poussée du manteau (sinon, le liquide se déplacerait sur la ligne *EnM*)

Lien avec le TP : exercice 4

Exercice 4



Quantité maximale de liquide atteinte quand tout le diopside a fondu (solide à 100% d'anorthite). D'après la règle des leviers, cela revient à 66 % de fusion

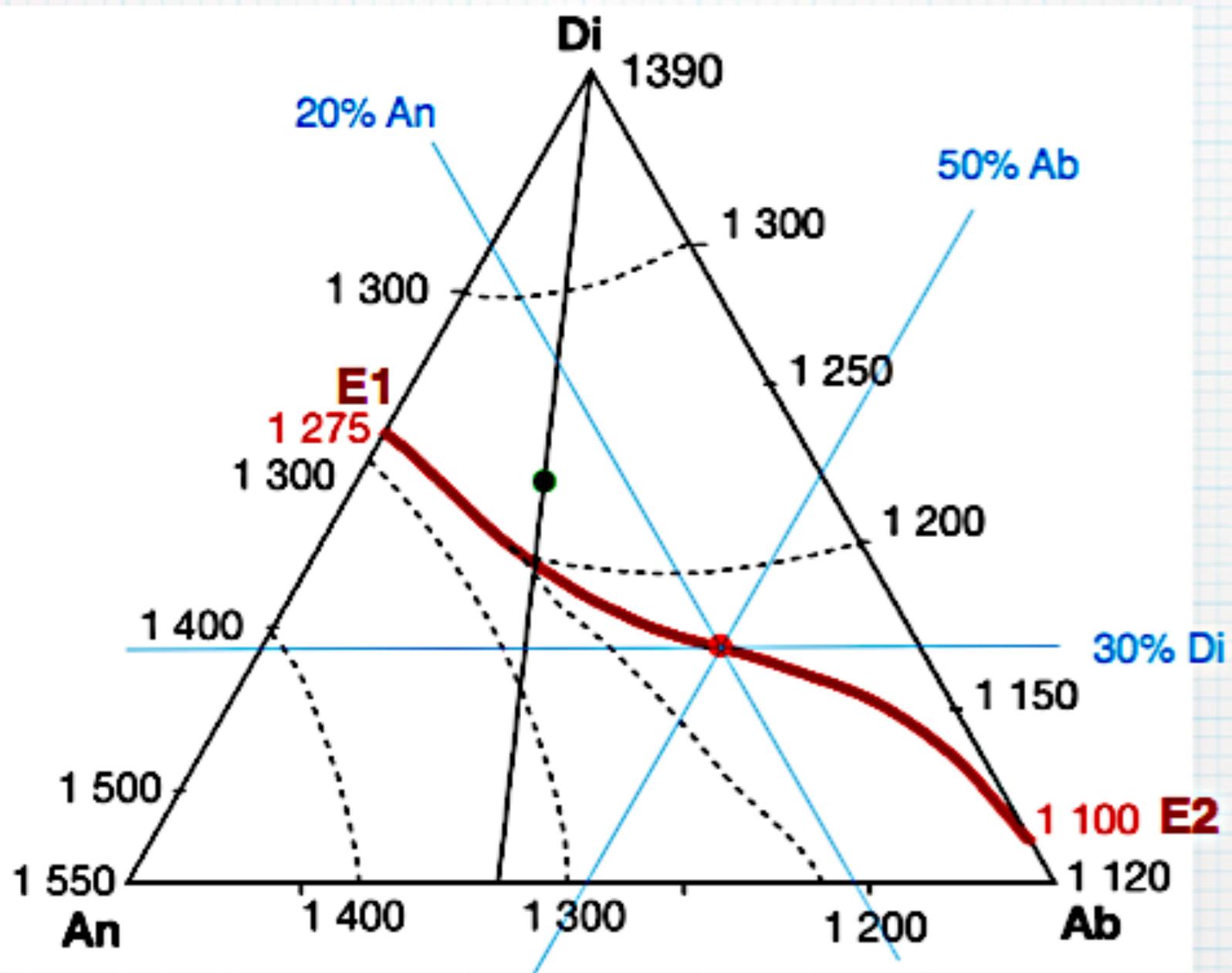


À 1 350°C : cristaux d'anorthite et liquide composé de 48% An + 52% Di
taux de fusion de 83%

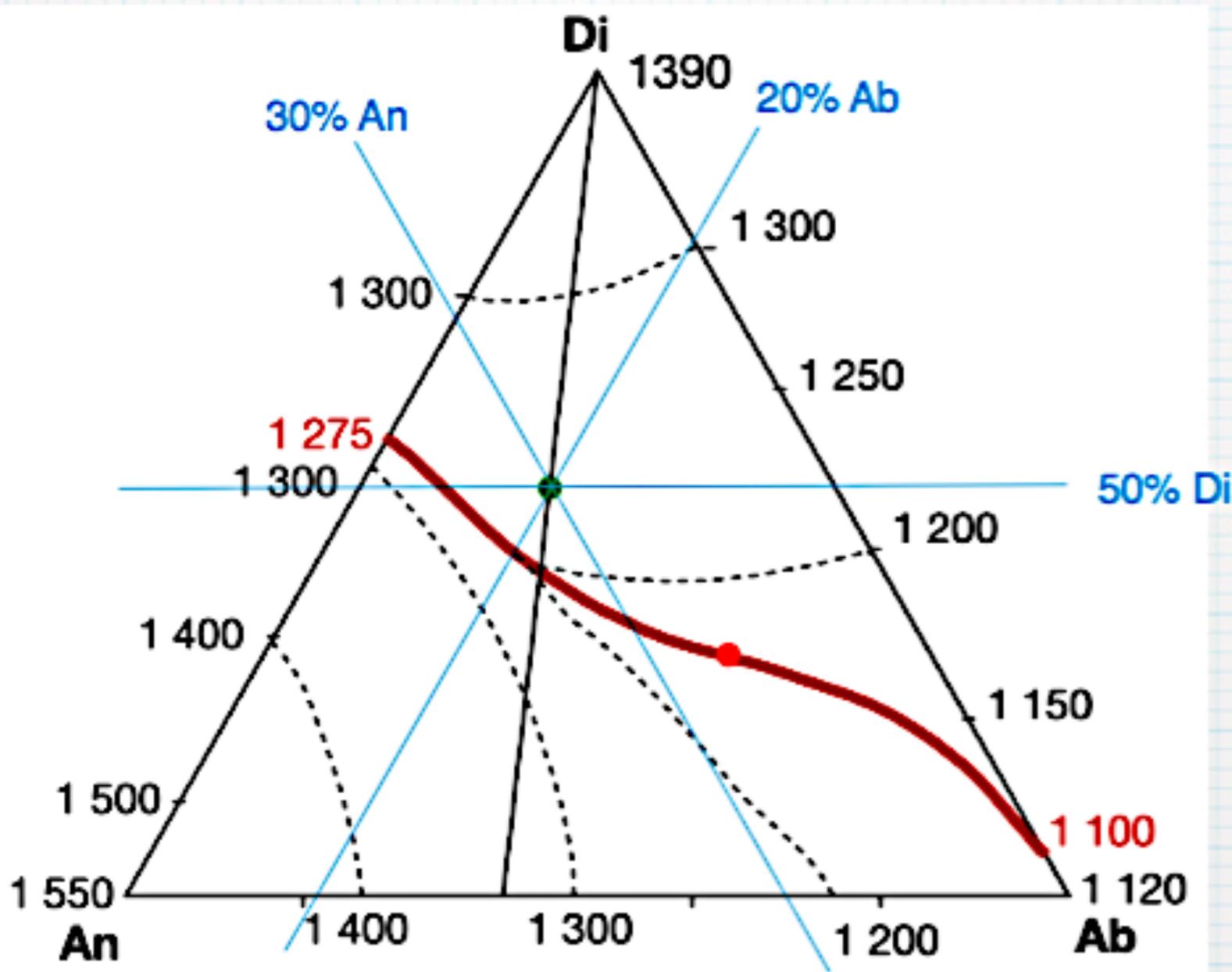
À 1 500°C : tout est fondu donc le liquide a la composition de départ : 60% An + 40% Di

3) Si le mélange est à 80% Di + 20% An, alors le liquide eutectique aura la même composition mais c'est le diopside qui formera les cristaux résiduels.

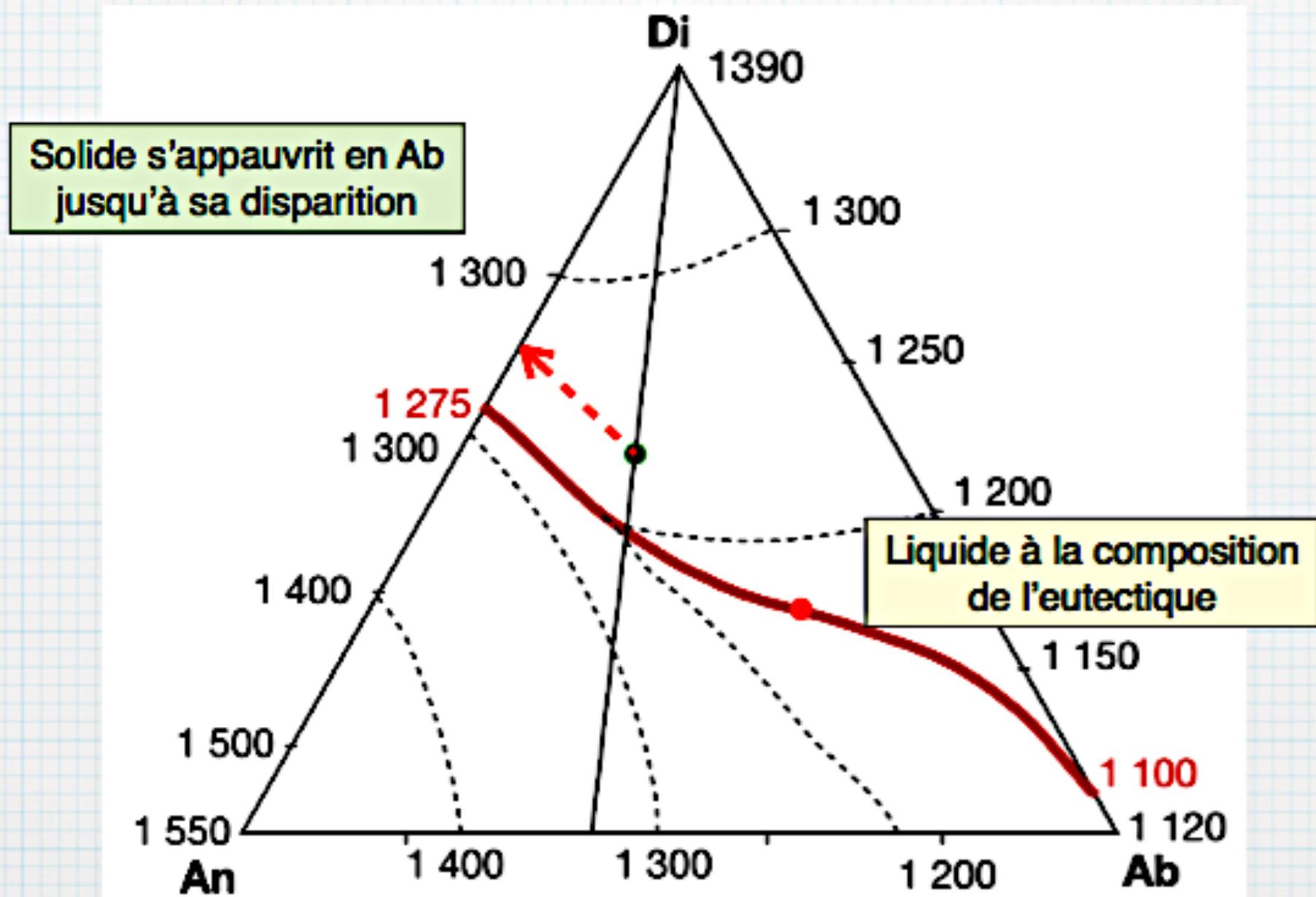
Construction du diagramme ternaire



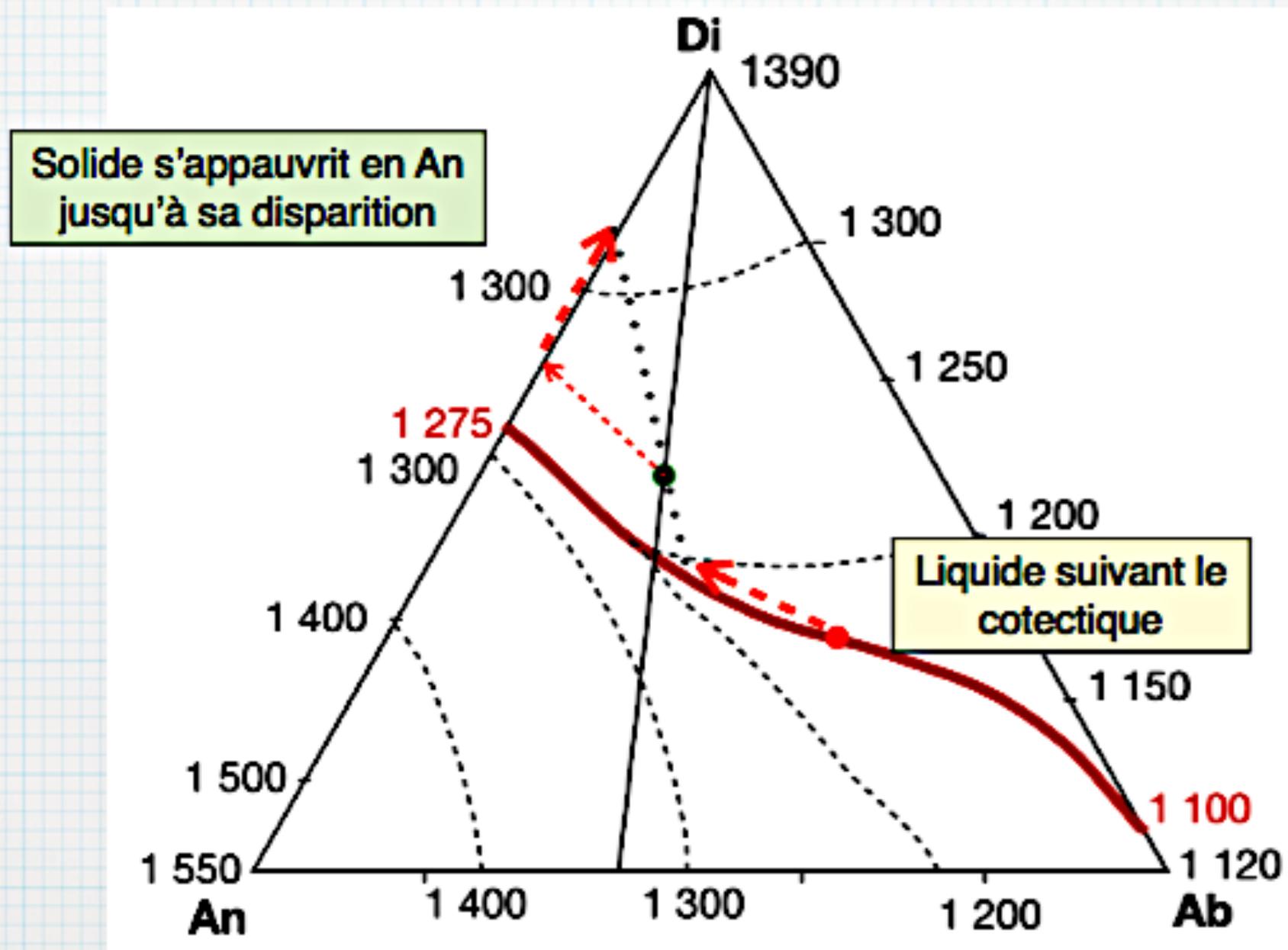
Positionner le point de départ (solide initial)



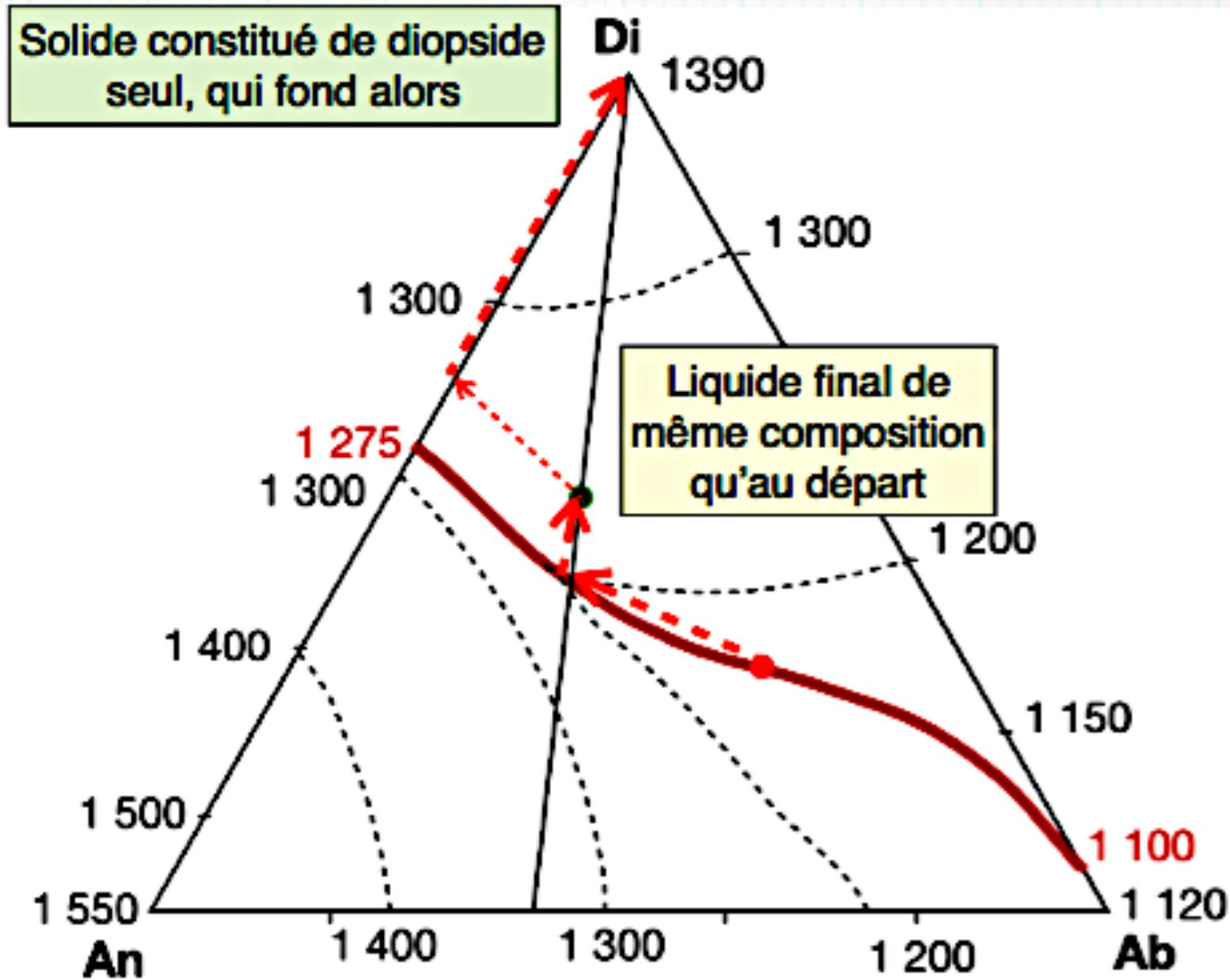
étape 1



étape 2



étape 3



1.2. Étude en laboratoire de la composition des liquides en cours de fusion

d) Bilan

jamais de fusion totale => le liquide a le plus souvent la composition de l'eutectique.

=> les roches issues d'une même source ont même chimie.

Schématiquement

-fusion de roches crustales silicatées => liquide de granite

-fusion de manteau => liquide de basalte

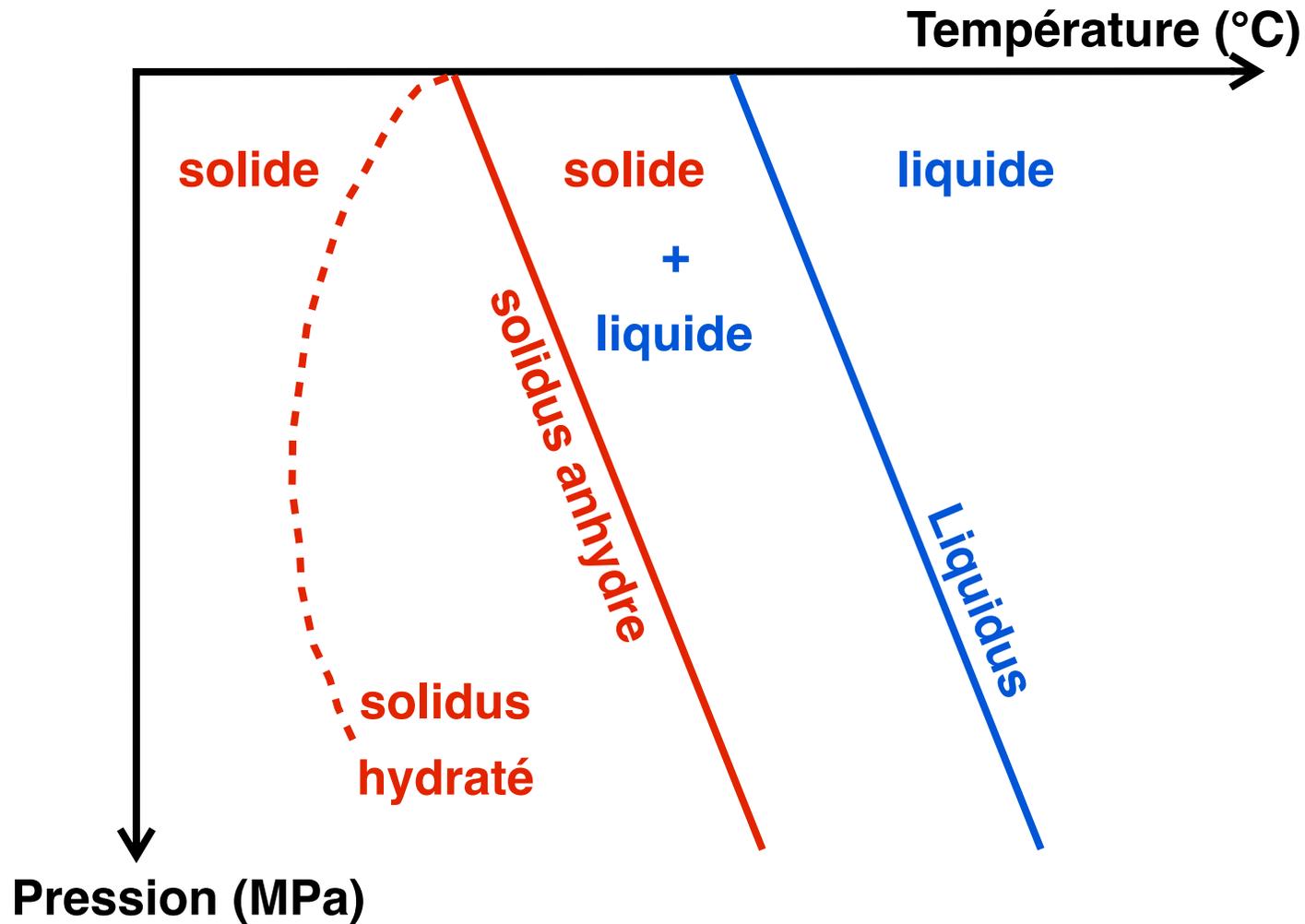
1.3. Les causes de la fusion partielle

a) Variations de P, T et V

Variations de P, T dans la Terre



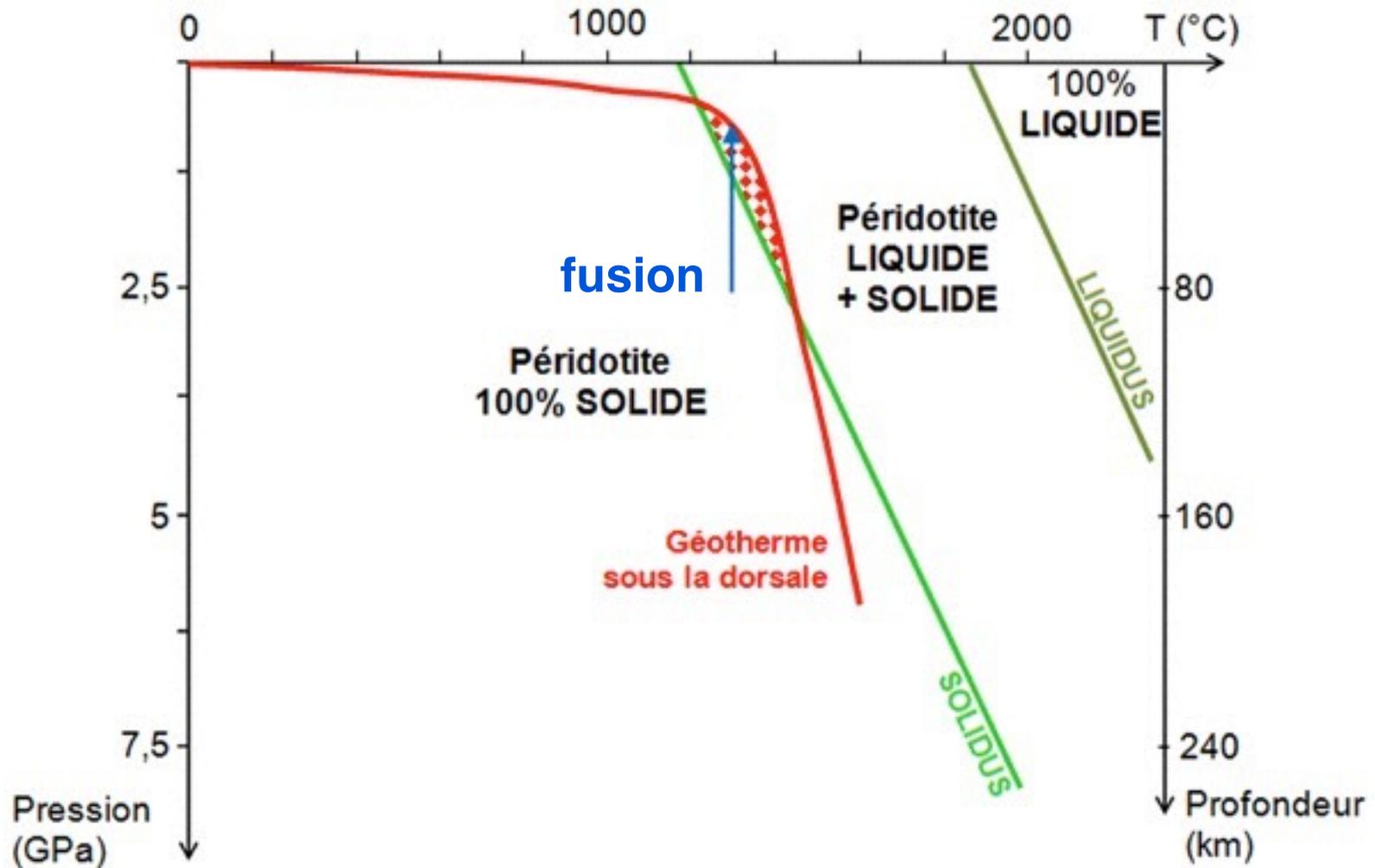
Modèle PREM



1.3. Les causes de la fusion partielle

b) Fusion mantellique et contextes géodynamiques

Remontée adiabatique sous les rifts et dorsales



Évolution d'une plaque océanique

Dorsale

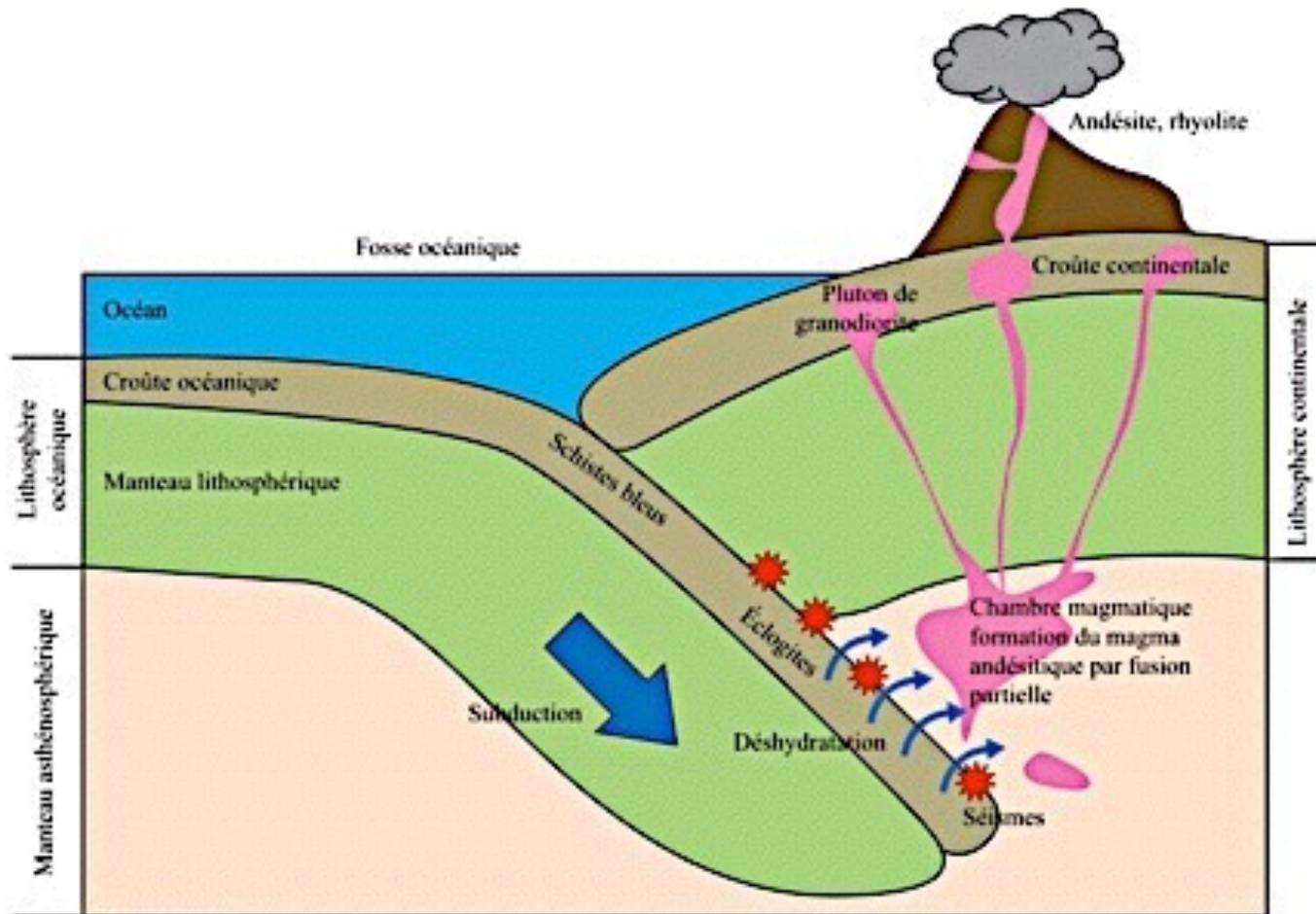
hydratation par hydrothermalisme

Enfoncement

C1		C2		C3		Q		V
Gabbro		Métagabbro		Métagabbro		Métagabbro		Métagabbro
Pyroxène	→	Pyroxène	→	Pyroxène	→	Pyroxène	→	Pyroxène
F.plagio	↑	F.plagio	↑	F.plagio	↓	F.plagio	↓	F.plagio
		Amphibole		Chlorite		Glaucophane		Jadéite Grenat
	gain d'eau		gain d'eau		perte d'eau		perte d'eau	
				Faciès schiste vert		Faciès schiste bleu		Faciès éclogite

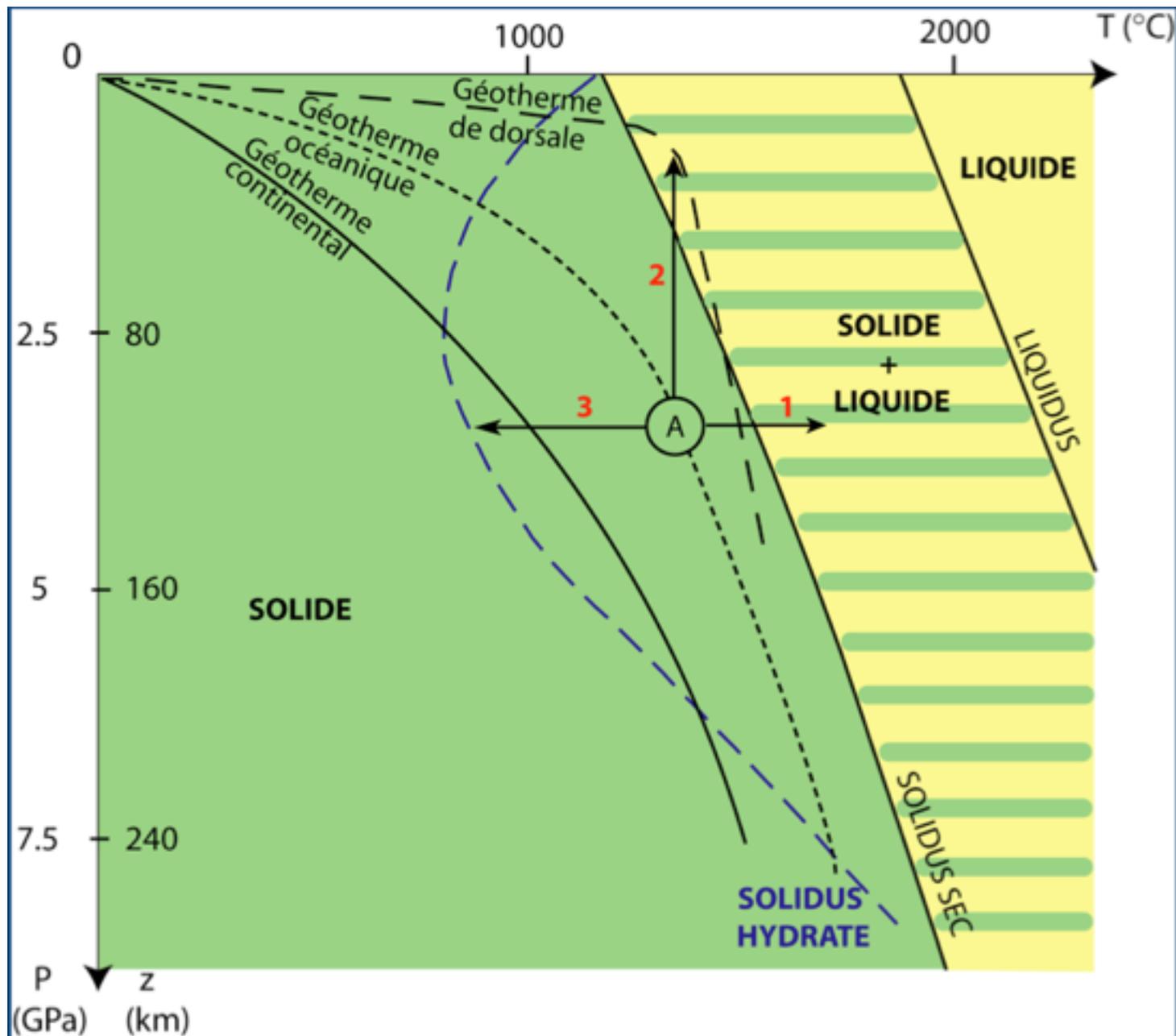
déshydratation

Déplacement du solidus par hydratation



L'eau libérée par la plaque plongeante va faire fondre le manteau sus-jacent.

Bilan des 3 modalités de fusion



1.3. Les causes de la fusion partielle

c) Cas des granites

Cas des granites

1 - granite d'origine
mantellique

2 - granite d'origine **crustale**

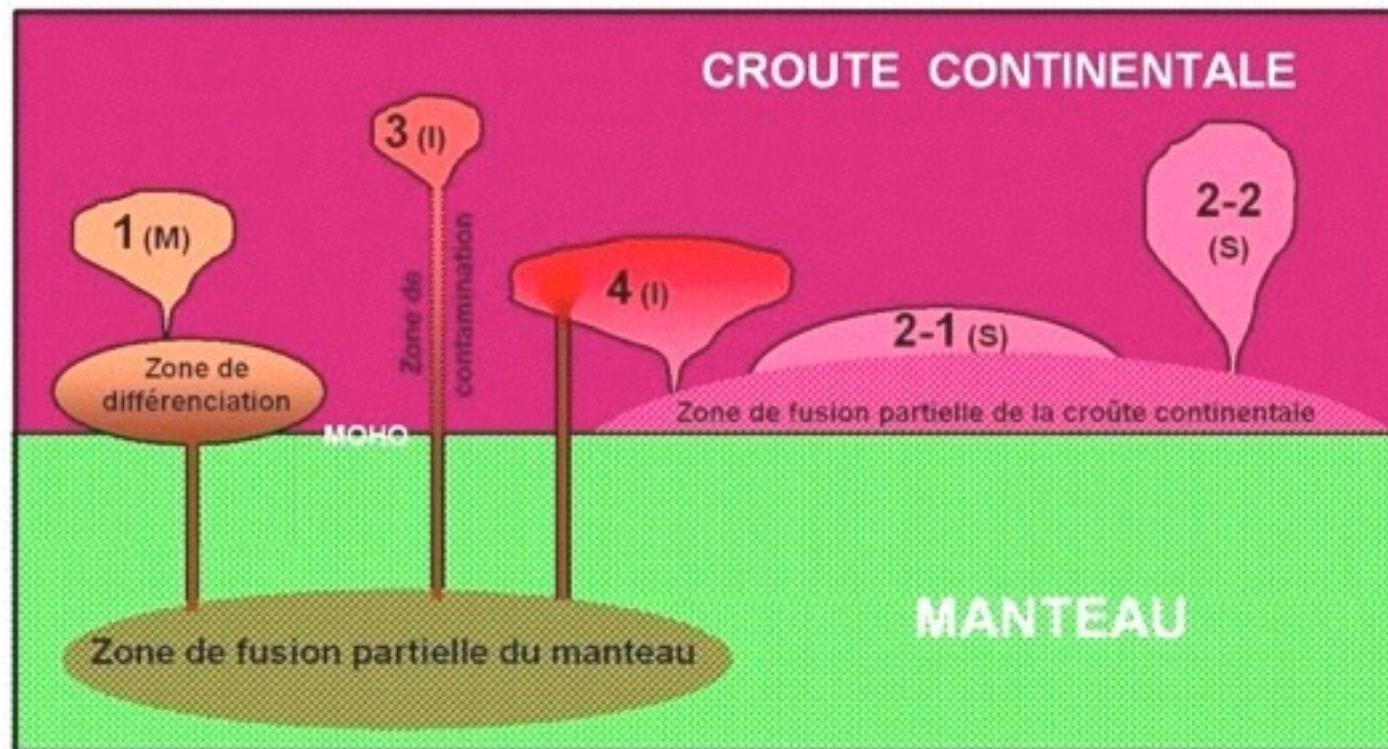
2-1 : concordant

2-2 : intrusif et discordant

Granites d'origine mixte

3 - magma basique contaminé par
une fusion de la croûte traversée

4 - granite issu d'un mélange de
magmas



1.4. BILAN



Fusion partielle de type

taux de fusion

profondeur

dorsale, rift

25 %

20-30 km

zone de subduction

10 %

30-40 km
80-150 km

point chaud

5 %

50-100 km

Bilan de la fusion partielle



- **La composition du premier liquide formé diffère de celle de la roche mère.**
- **Le taux de fusion partielle conditionne la composition du magma.**
- **L'ordre de disparition des minéraux dépend de la composition de la roche mère.**
- **La composition du liquide eutectique dépend de la nature des minéraux en mélange, pas de leurs proportions.**
- **On distingue les éléments magmatophiles = incompatibles des éléments compatibles.**
- **La fusion partielle exerce un tri géochimique.**