

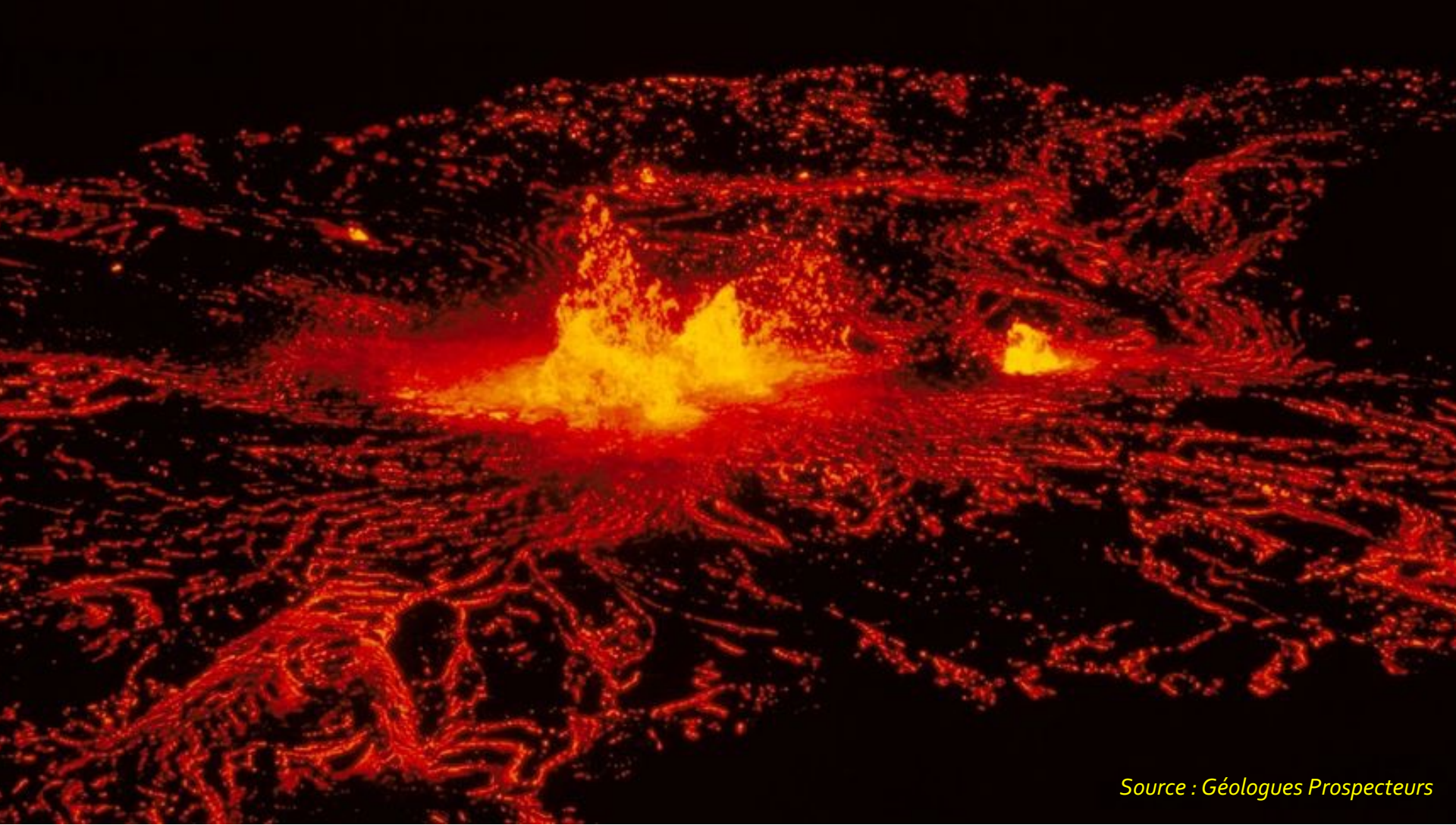
*Source : Géologues Prospecteurs*

## **ST-F Le Magmatisme**

### **ST-F-2 Les processus fondamentaux du magmatisme**

#### **ST-F-2-1 Production des magmas primaires**

BCPST2 - Amiens - CV- ST-F-2-1



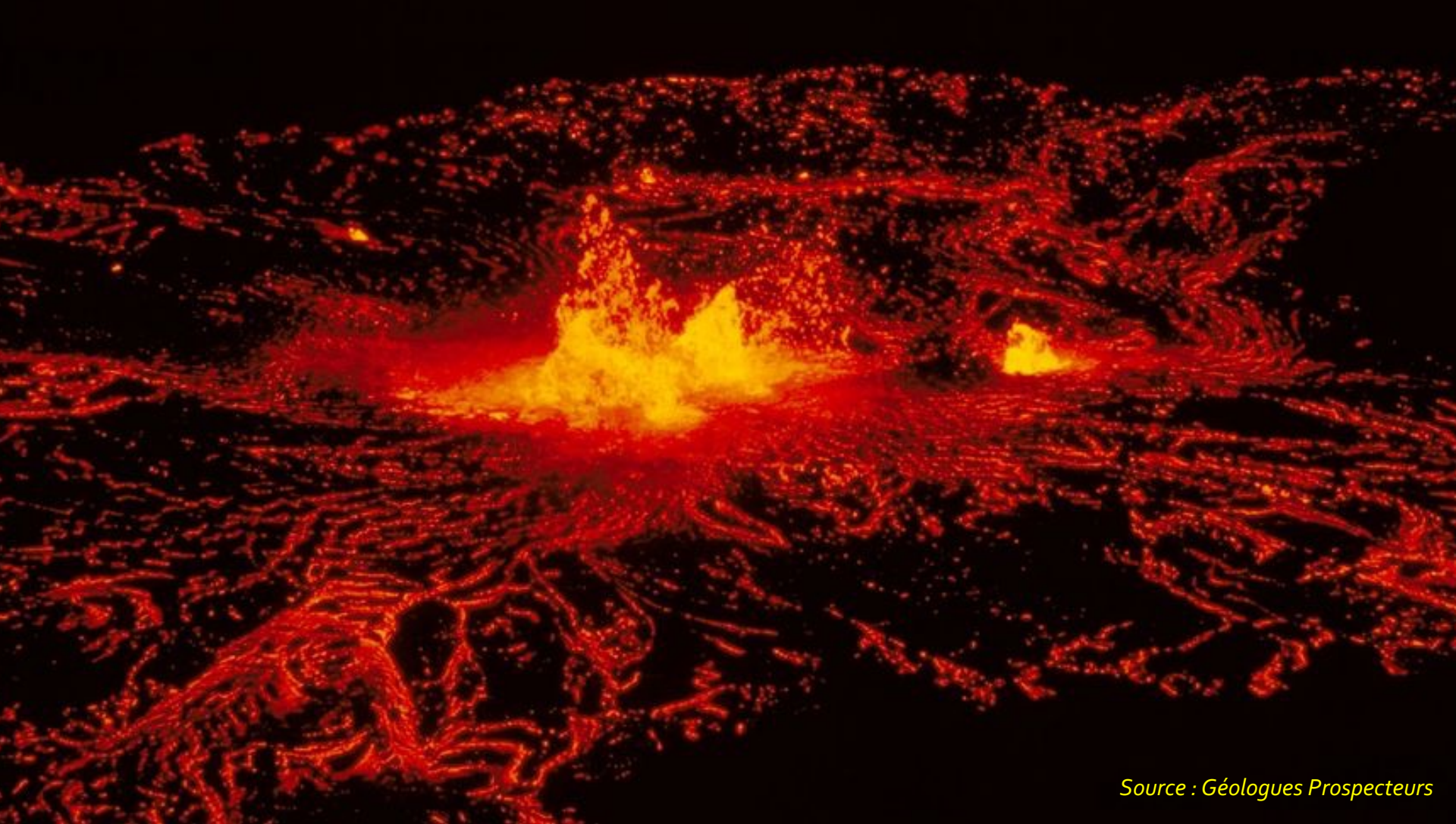
*Source : Géologues Prospecteurs*

**I. Les magmas sont des mélanges de fluides et de solides formés par fusion partielle des roches crustales ou mantelliques.**

**A. Les magmas sont des mélanges de fluides et de solides**







*Source : Géologues Prospecteurs*

## A. Les principaux mécanismes de fusion des roches

### 1. Les conditions nécessaires à l'obtention d'un magma



Pour obtenir un magma, il faut faire fondre une roche. Dans quelles conditions cela est-il possible ?

Dans les conditions thermodynamiques « classiques » où sont les conditions les plus propices à la production de magma ?

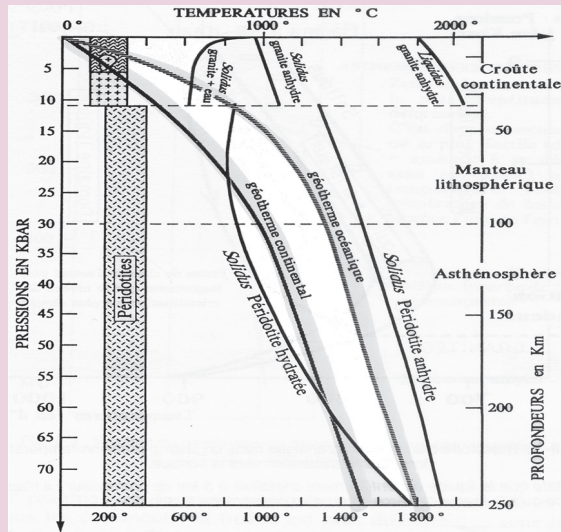


Figure 1 : Relations entre les différents géothermes et les courbes du liquidus et solidus des principaux matériaux des enveloppes terrestres

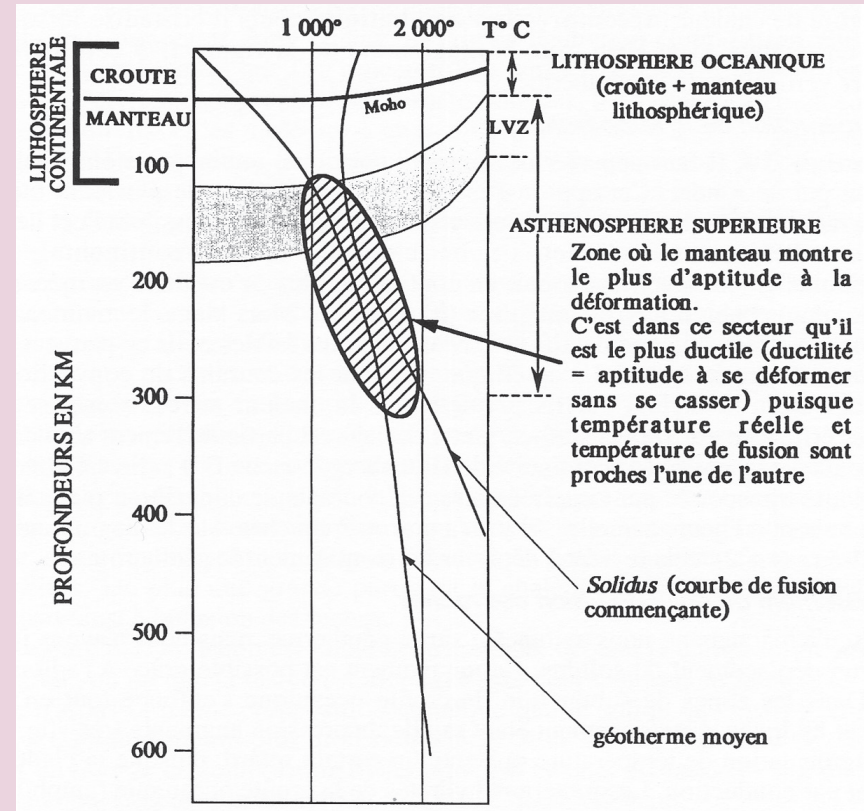
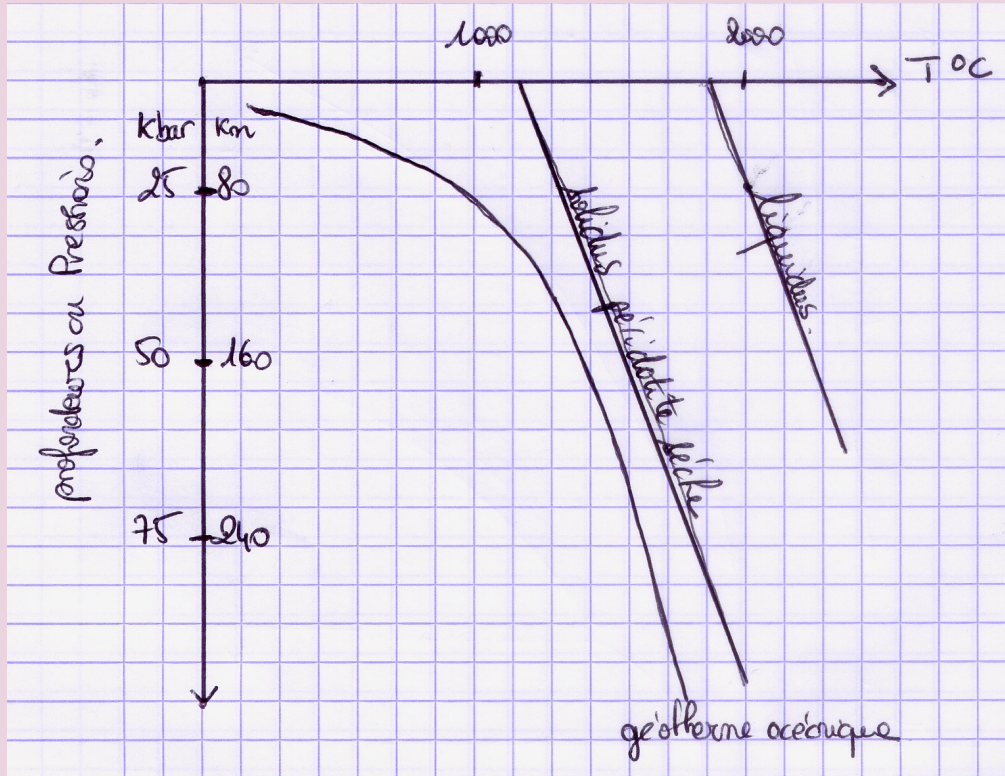


Figure 2 : Position du géotherme du manteau supérieur par rapport à la courbe du solidus péridotitique.

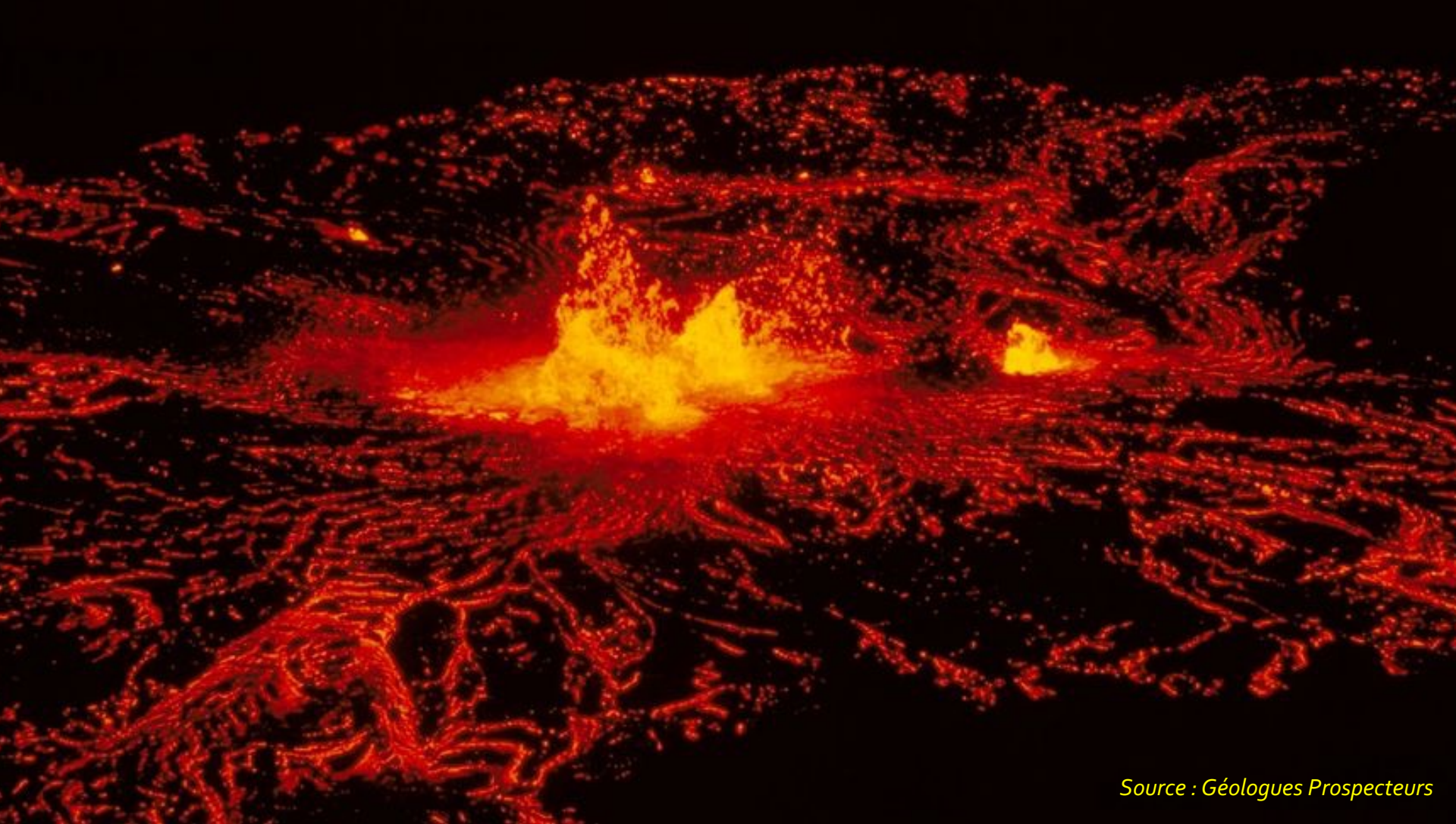
Comment peut-on obtenir cet écart ?



On appelle **liquidus**, la courbe qui sépare le domaine où la phase liquide existe seule du domaine où elle coexiste avec des cristaux

On appelle **solidus**, la courbe qui sépare le domaine où la phase solide existe seule du domaine où elle coexiste avec une phase liquide.

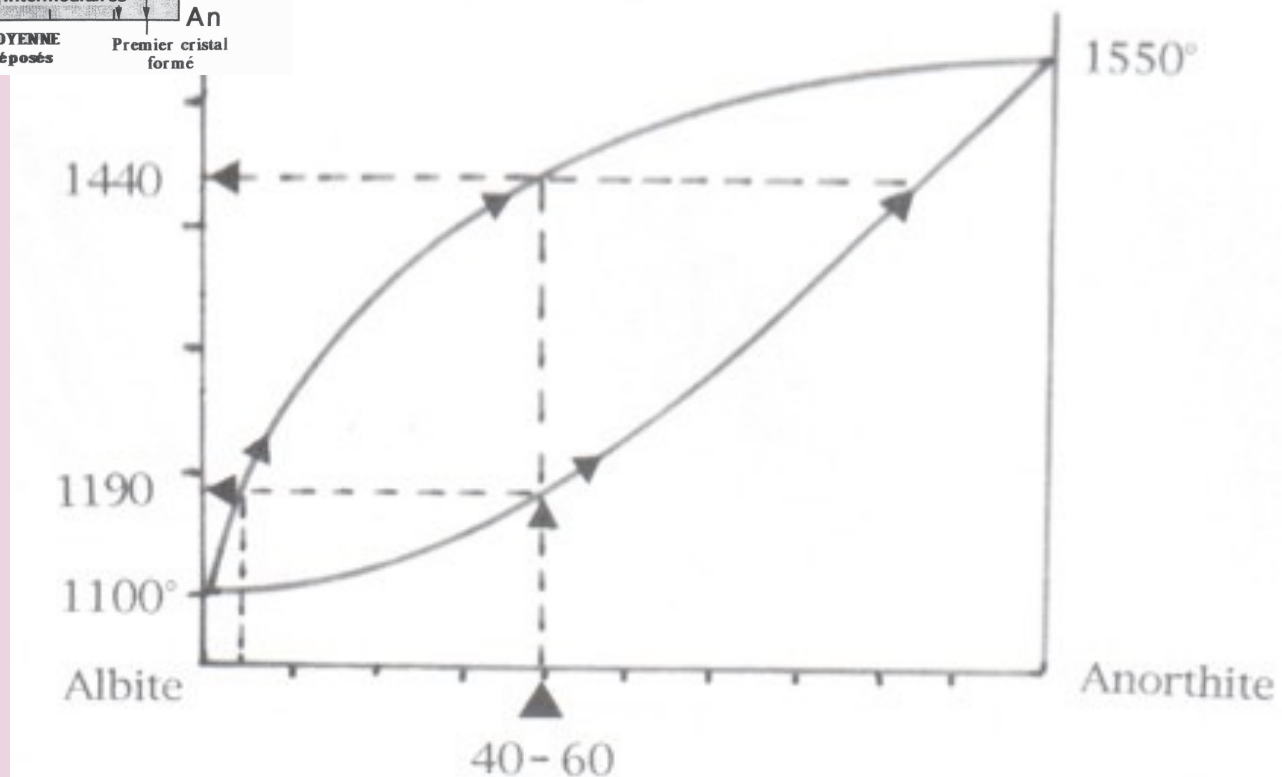
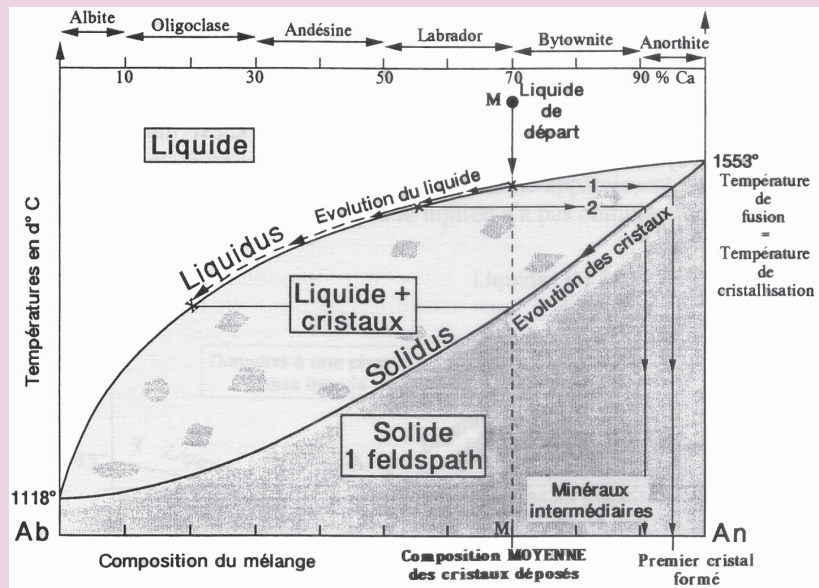




*Source : Géologues Prospecteurs*

## A. Les principaux mécanismes de fusion des roches

2. Identification des conditions de fusion partielle de phases solides et d'apparition d'un liquide au moyen des diagrammes de phase



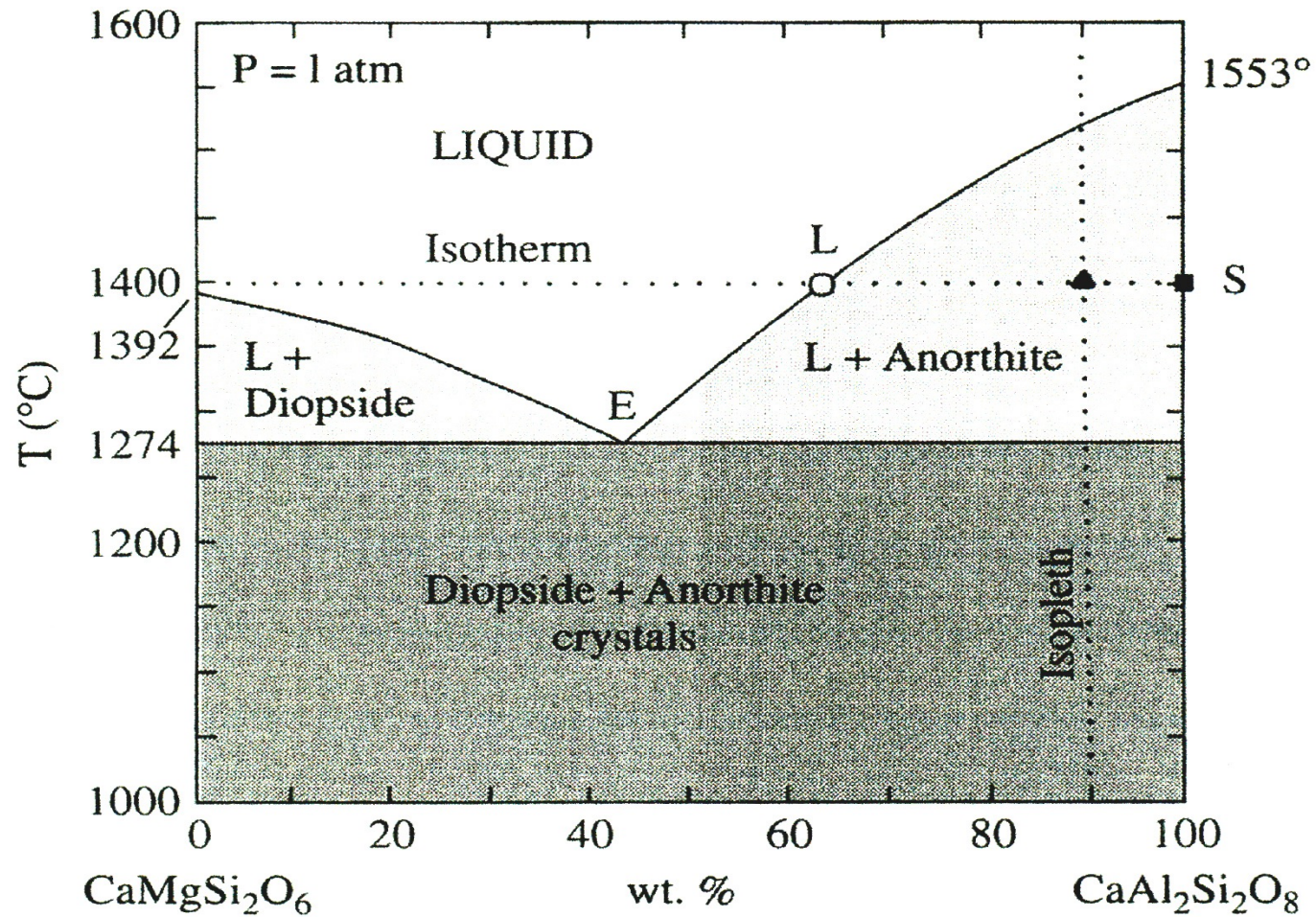


- **Détermination du taux de fusion à T°C donnée :**

On utilise la règle des leviers, au niveau du solidus, le taux de fusion est de 0%, au niveau du liquidus le taux de fusion est de 100%.

Pour une composition X quelconque entre A et B, le taux de fusion sera donné par :

$$\frac{AX}{AB} \times 100.$$



*On appelle température eutectique la température minimum que peut avoir la phase liquide issue d'un mélange de minéraux. La position du point eutectique sur le diagramme est caractéristique des espèces étudiées*



- **Détermination du taux de fusion à l'eutectique**

Le taux de fusion maximal pour que la composition du liquide reste à l'eutectique peut être déterminé par la règle des leviers.

*Si le solide du départ à une composition correspondant à l'eutectique alors le pourcentage de fusion sera de 100.*

*Si le solide de départ est constitué uniquement d'anorthite alors le pourcentage de fusion sera de 0.*

Pour une composition quelconque X comprise entre E et A le taux de fusion sera

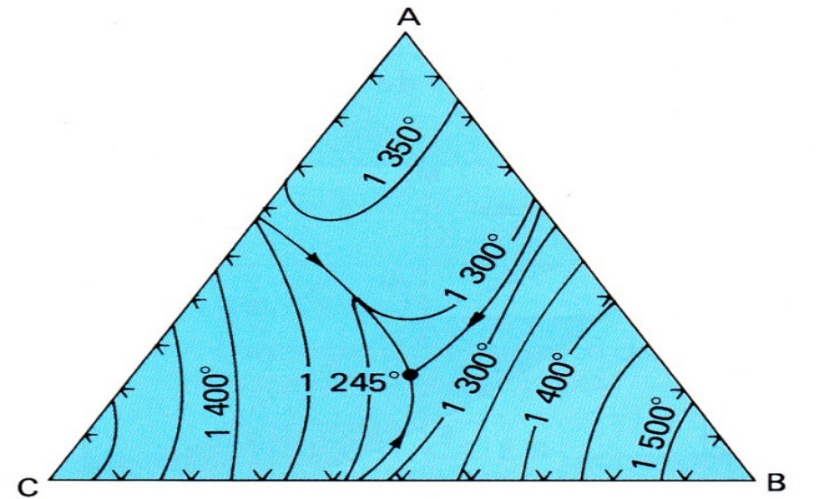
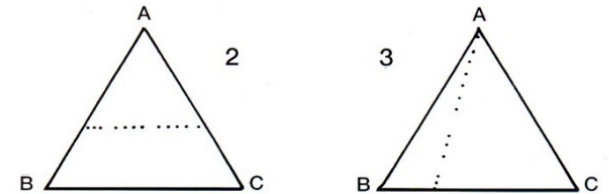
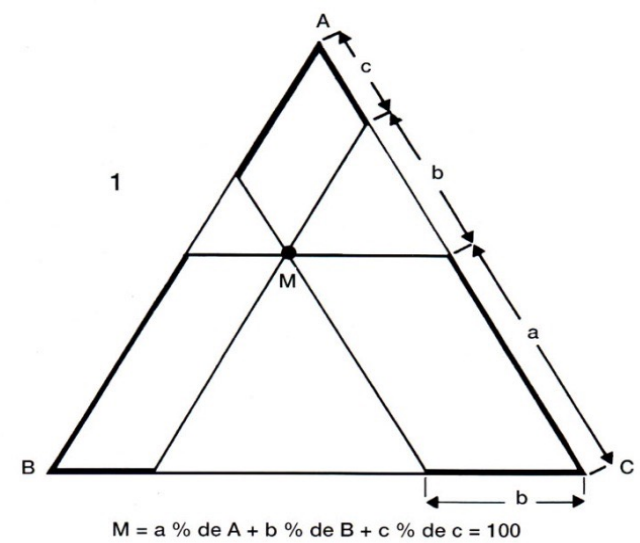
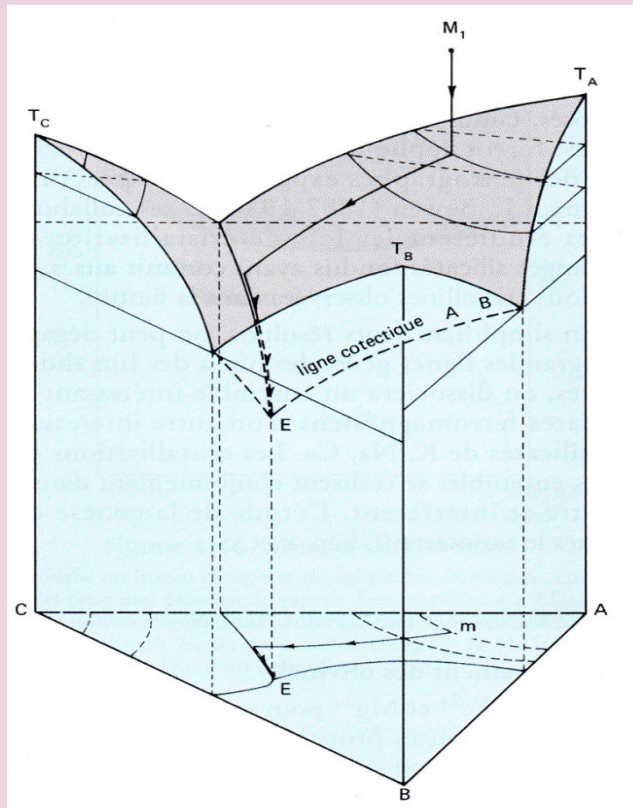
$$\frac{XA}{EA} \times 100.$$

si  $X = E$  on obtient bien 100%

Si  $X = A$  on obtient bien 0%

Représentation triangulaire  
de la composition d'un mélange de 3 composants.

1. Chaque pourcentage de composant est situé sur un segment parallèle au côté opposé au pôle 100 % du composant (en A, il y a 100 % de A). Les intersections de ce segment avec deux côtés du triangle correspondent au pourcentage.
2. Tous les points situés sur un segment parallèle à un côté sont caractérisés par un pourcentage constant (ici de A).
3. Tous les points situés sur un segment passant par un sommet sont caractérisés par la même proportion des 2 autres composants à l'opposé du sommet considéré (ici B / B+C).



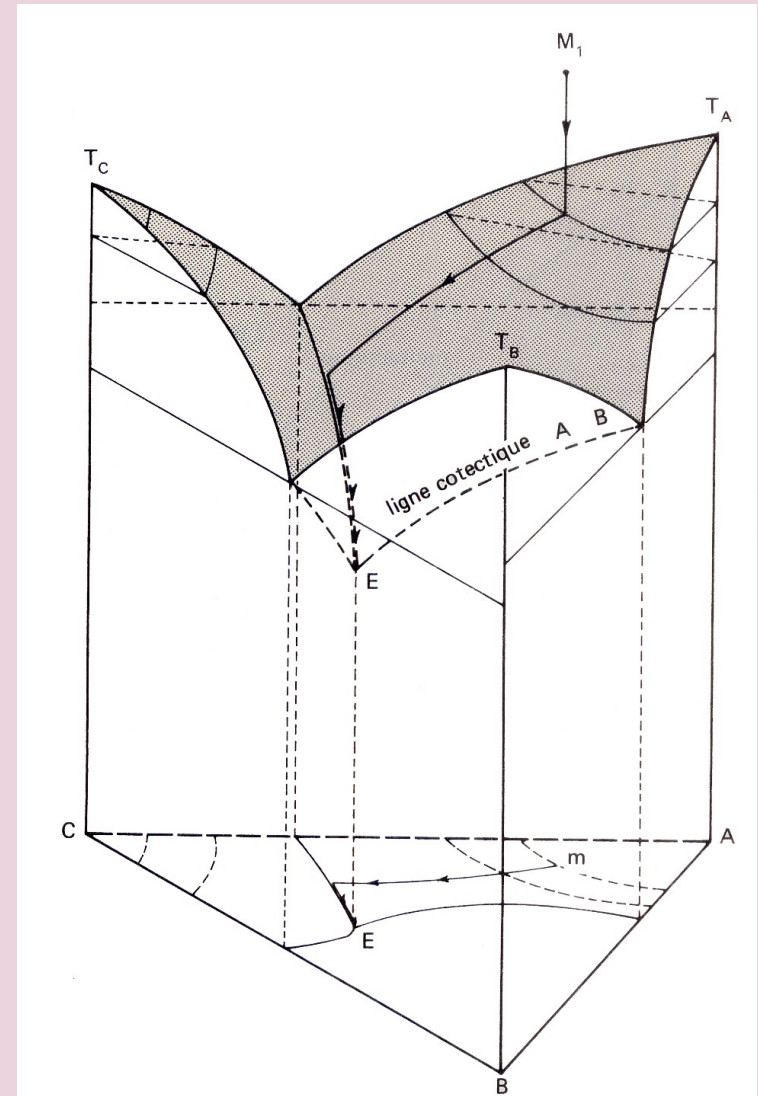


## Mélange de trois espèces minérales (mélange ternaire)

Soit le mélange A, B et C réalisé expérimentalement. Pris deux à deux, ces minéraux présentent des mélanges binaires congruents avec eutectiques. On peut construire un volume dont les trois faces correspondent aux trois mélanges composants.

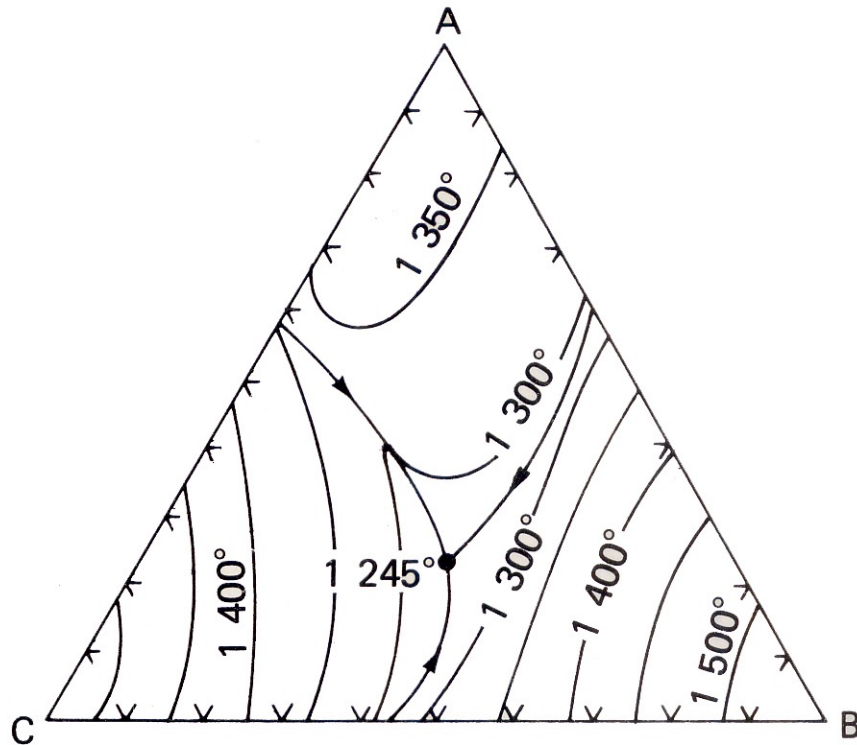
Les surfaces courbes partant des sommets sont sécantes deux à deux selon une ligne **cotectique** qui se réunissent en **un point E** dit puits eutectique.

Cette **surface composite** représente le **liquidus** du mélange ternaire.

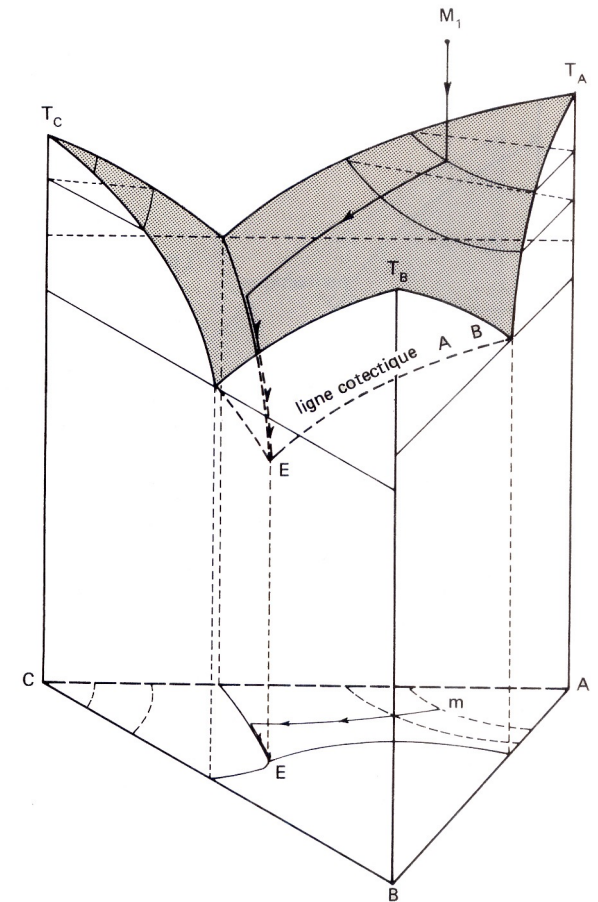


Comportement d'un mélange ternaire congruent.

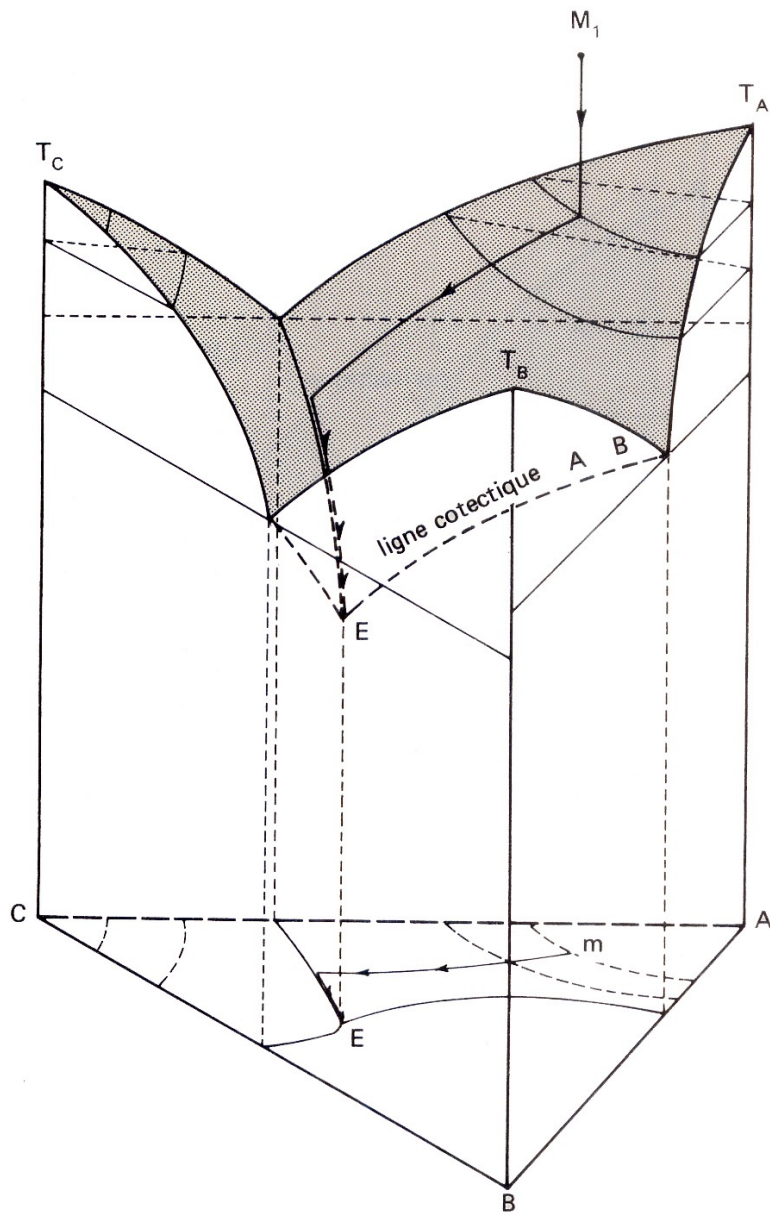
On utilise généralement sa projection sur un plan horizontal en projetant les lignes isothermes obtenues par l'intersection de la surface du liquidus avec des plans horizontaux isothermes équidistants.



Représentation habituelle de la surface du liquidus dans un mélange ternaire du type précédent.



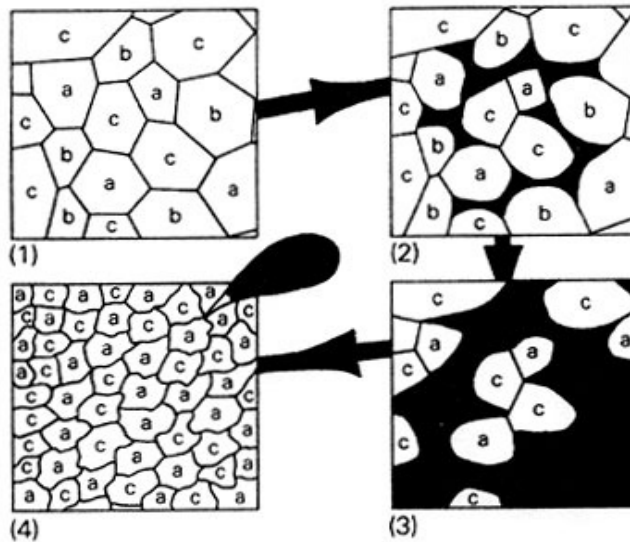
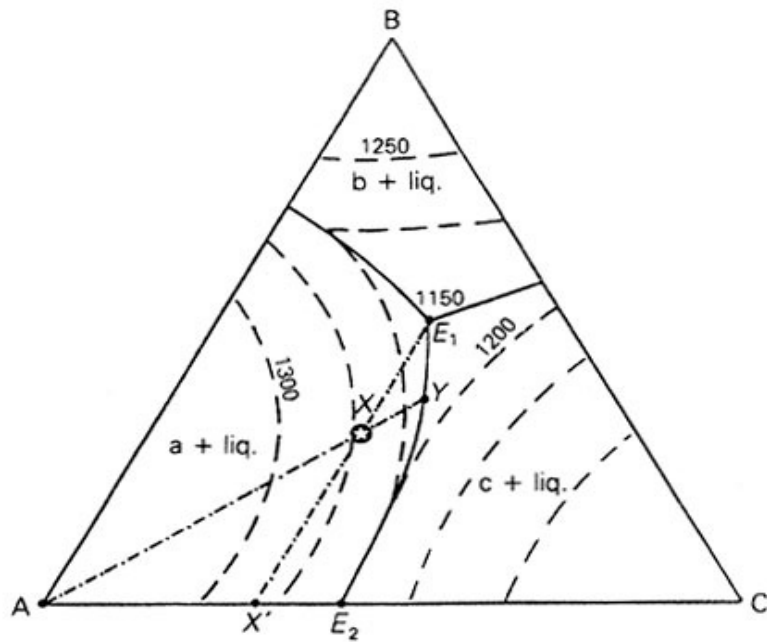
Comportement d'un mélange ternaire congruent.



Comportement d'un mélange ternaire congruent.

Comment retrouver l'évolution de la composition solide sur un diagramme ternaire lors d'un processus de fusion?





## Travaux expérimentaux : Cas d'un mélange ternaire Sphène-Anorthite-Wollastonite.

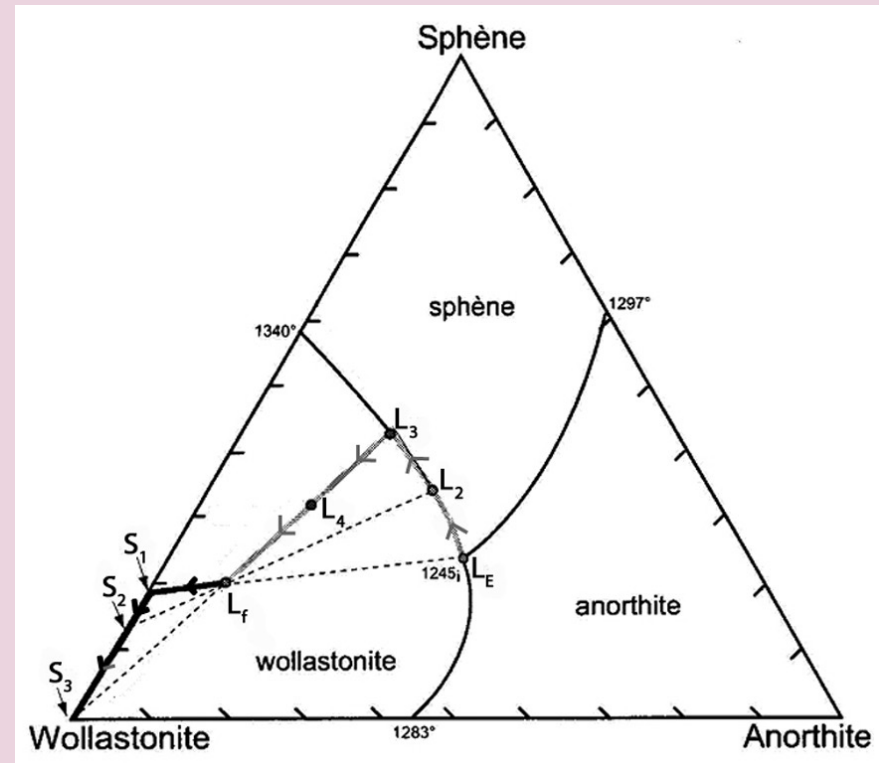
Lorsque l'on chauffe un mélange ternaire initial (composition en  $S_0$  (solide initial =  $L_f$  liquide final en fusion totale), la température va augmenter jusqu'à atteindre la température du puits eutectique.

A cette température apparaît la première goutte de liquide LE.

**La première goutte de liquide formée a toujours la composition de l'eutectique.**

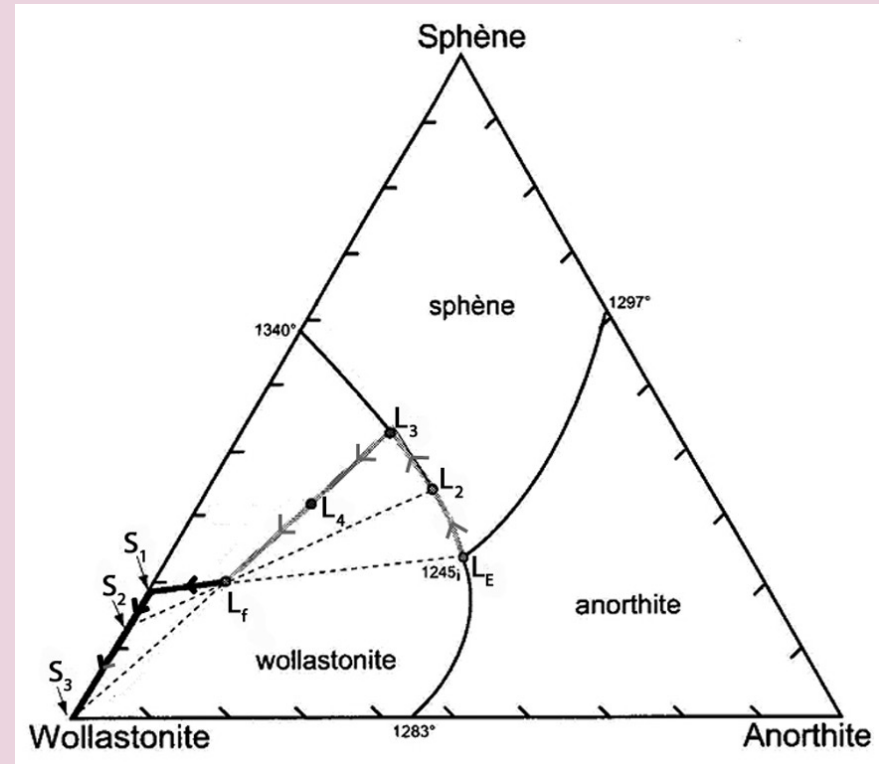
La température reste constante **jusqu' à disparition totale de l'espèce minoritaire** vis à vis de la composition.

**C'est le palier eutectique.**



## Travaux expérimentaux : Cas d'un mélange ternaire Sphène-Anorthite-Wollastonite.

Pour trouver cette composition, il suffit de tracer une ligne reliant le puits eutectique LE et la composition du solide de départ S0. L'intersection avec l'axe Sphène-Wollastonite nous donne la composition de ce solide S1. Durant le palier eutectique, la composition du solide se déplace sur cette droite du solide de départ S0 vers le solide S1. Durant tout le palier eutectique, la composition du liquide reste à la composition eutectique.





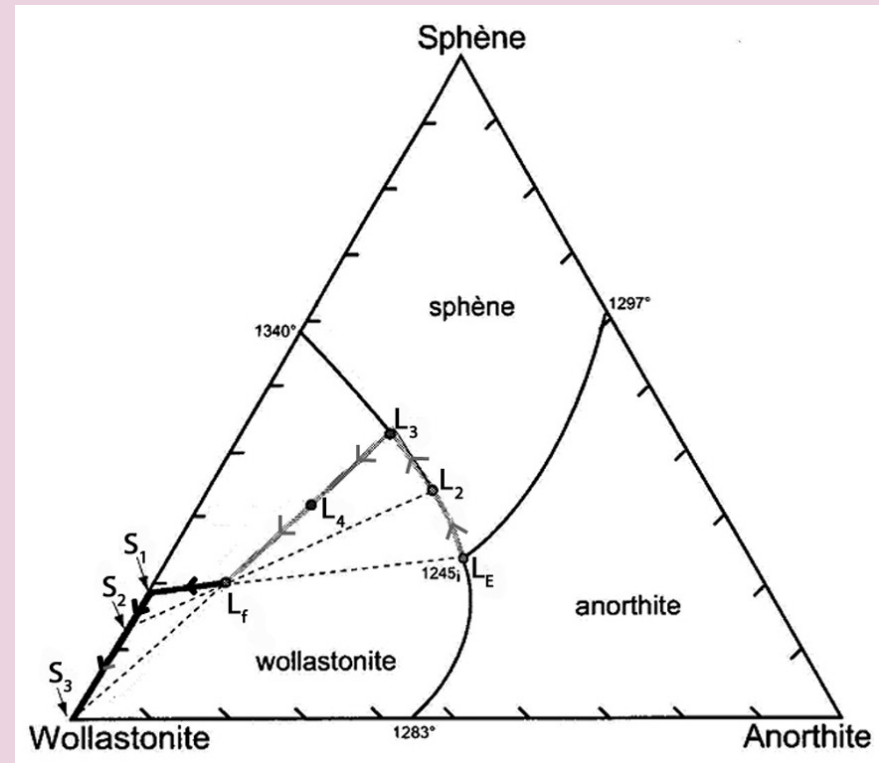
## Travaux expérimentaux : Cas d'un mélange ternaire Sphène-Anorthite-Wollastonite.

Lorsque l'espèce minoritaire à totalement fondu, la température augmente, de plus en plus de liquide va se former.

La composition du liquide va suivre la ligne cotectique Sphène-Wollastonite passant par la composition L2.

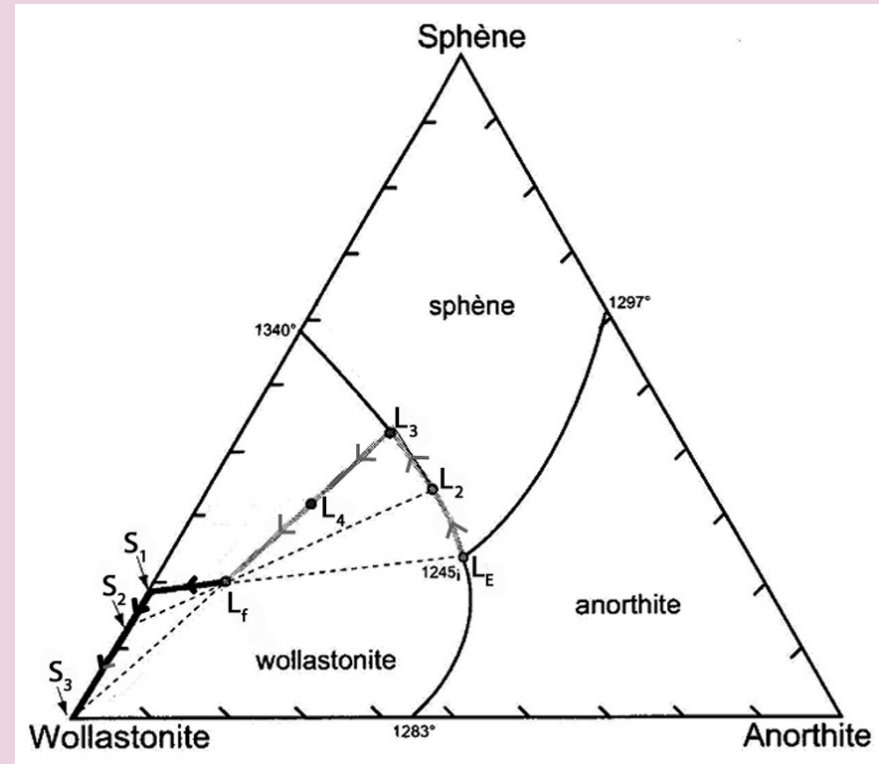
Dans le solide, l'espèce minoritaire va disparaître. Dans l'exemple présent, le Sphène. Pour retrouver l'évolution de la composition du solide, il suffit de faire pivoter la ligne autour de la composition initiale.

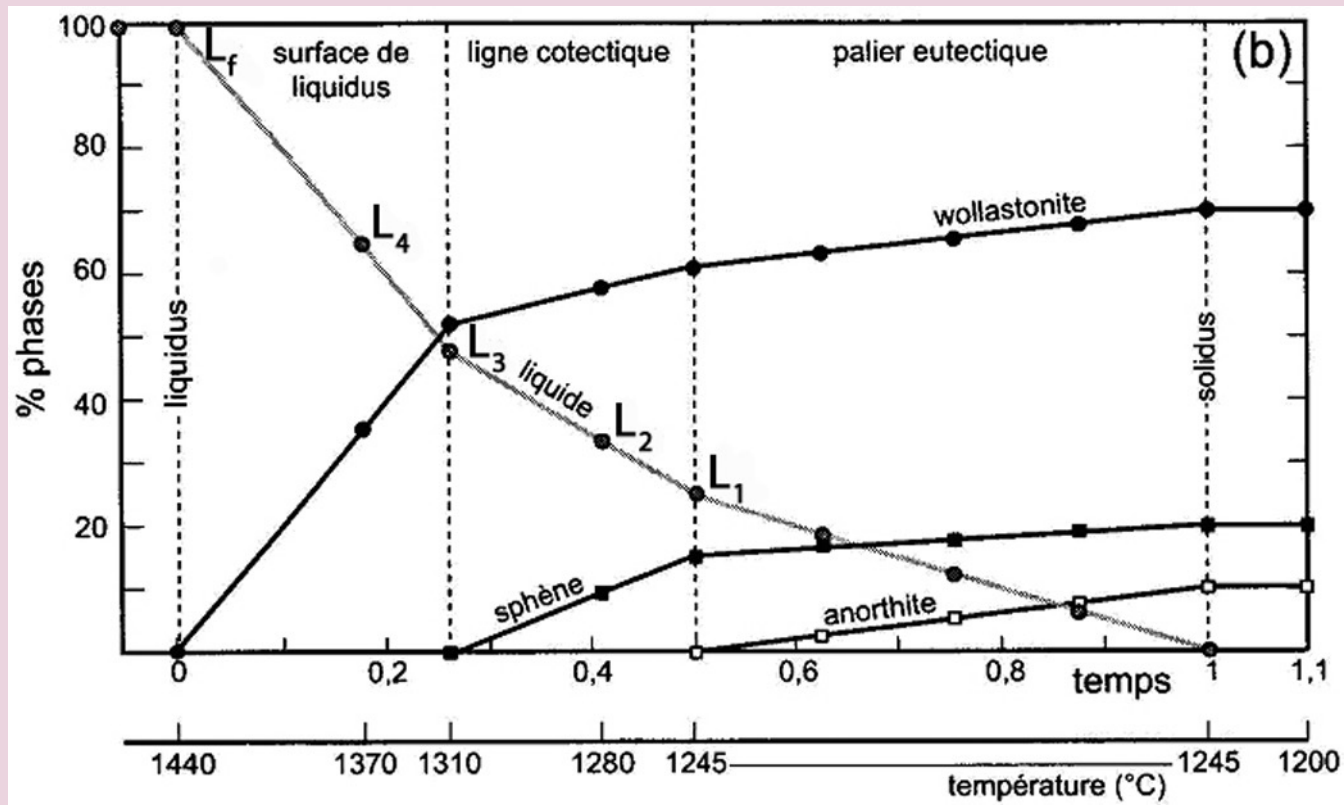
Cette composition va passer par la composition S2.



## Travaux expérimentaux : Cas d'un mélange ternaire Sphène-Anorthite-Wollastonite.

Lorsque le Sphène a totalement disparu, il reste un solide composé uniquement de Wollastonite S3 et un liquide de composition L3. La wollastonite va fondre, la composition du liquide suivre la surface du liquidus passant par la composition L4 au fur et à mesure que le solide finit par disparaître. A la fin le liquide rejoint la composition du solide de départ Lf.





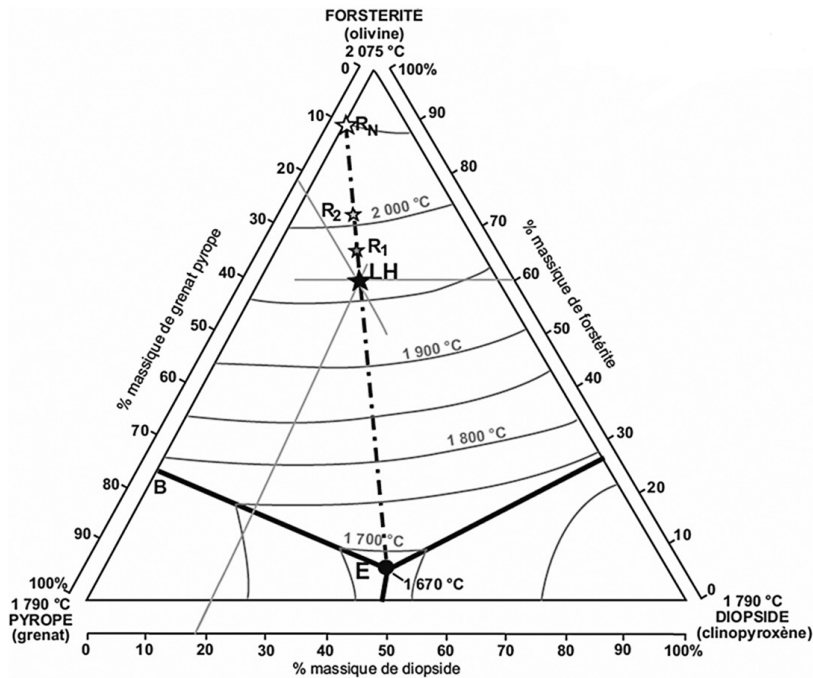


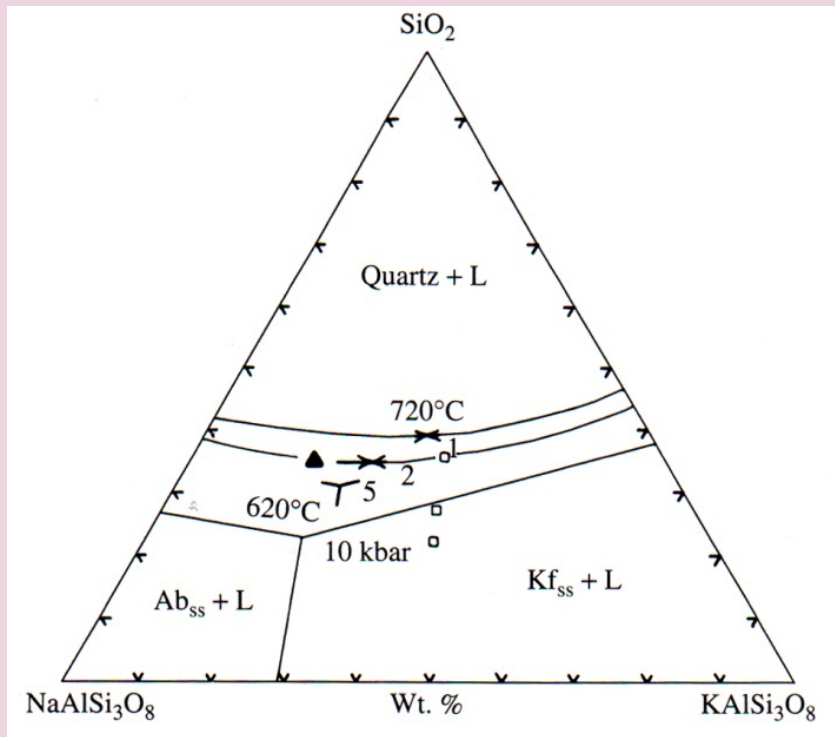
Composition de LH ? ➔

Quelle est la température de fusion du mélange ternaire étudié ? que pouvez-vous dire à ce sujet ? ➔

Composition du premier liquide formé ? ➔

Composition de la roche dite résiduelle ? ➔



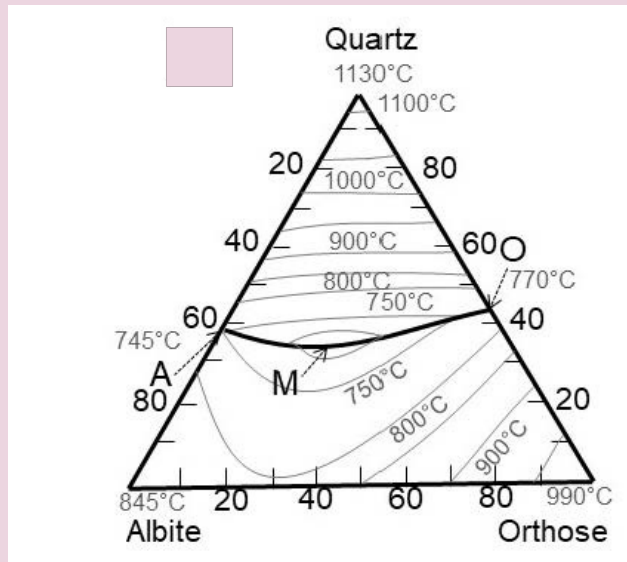


Composition de M ? →

Quelle est la température de fusion du mélange ternaire étudié ? →

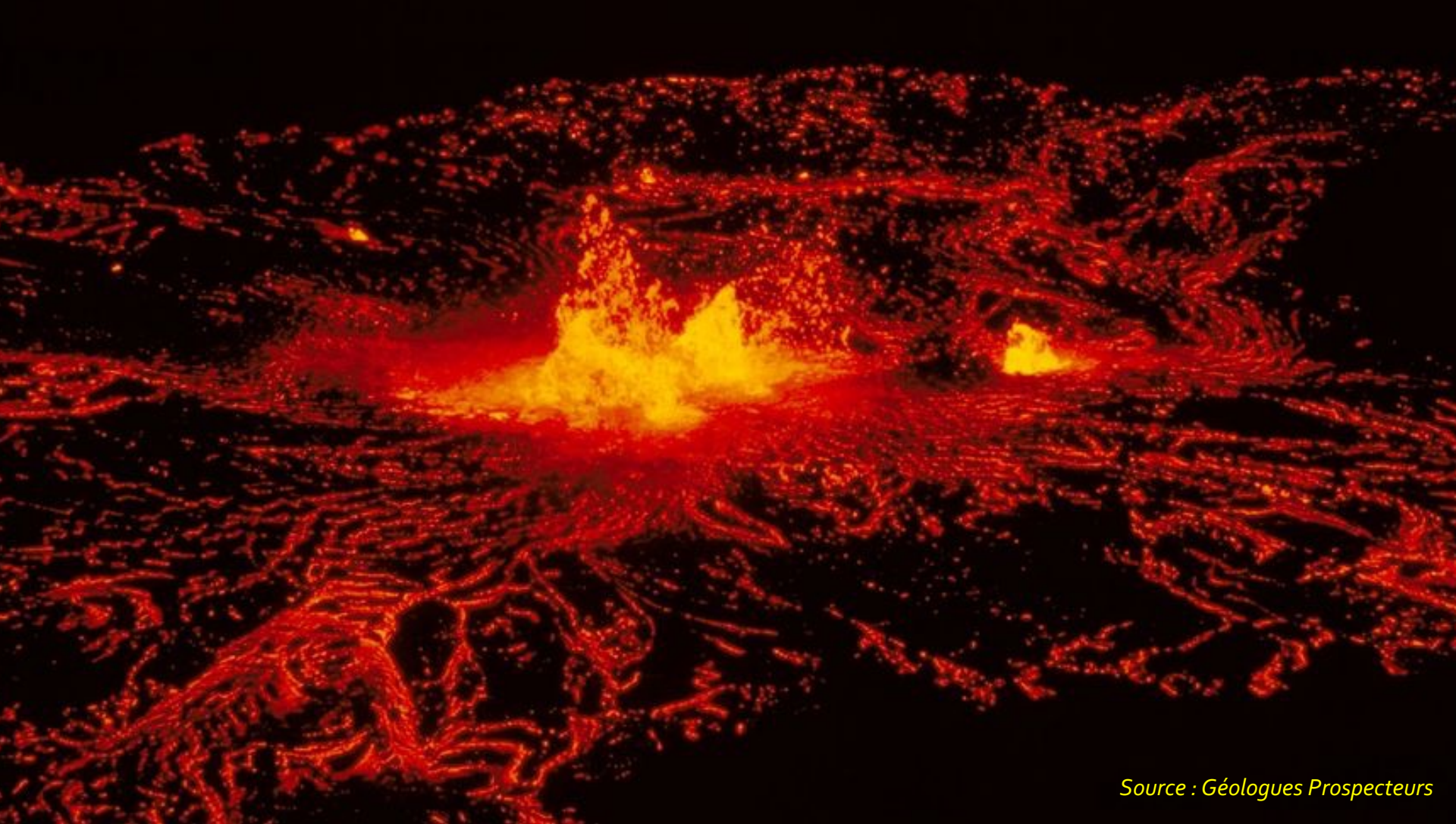
Composition du premier liquide formé ? →

Quelle espèce minérale va fondre en premier ? →



Composition de la roche dite résiduelle ? →

Que représentent les points M, A et O dans le diagramme ternaire de la figure 10b ? →

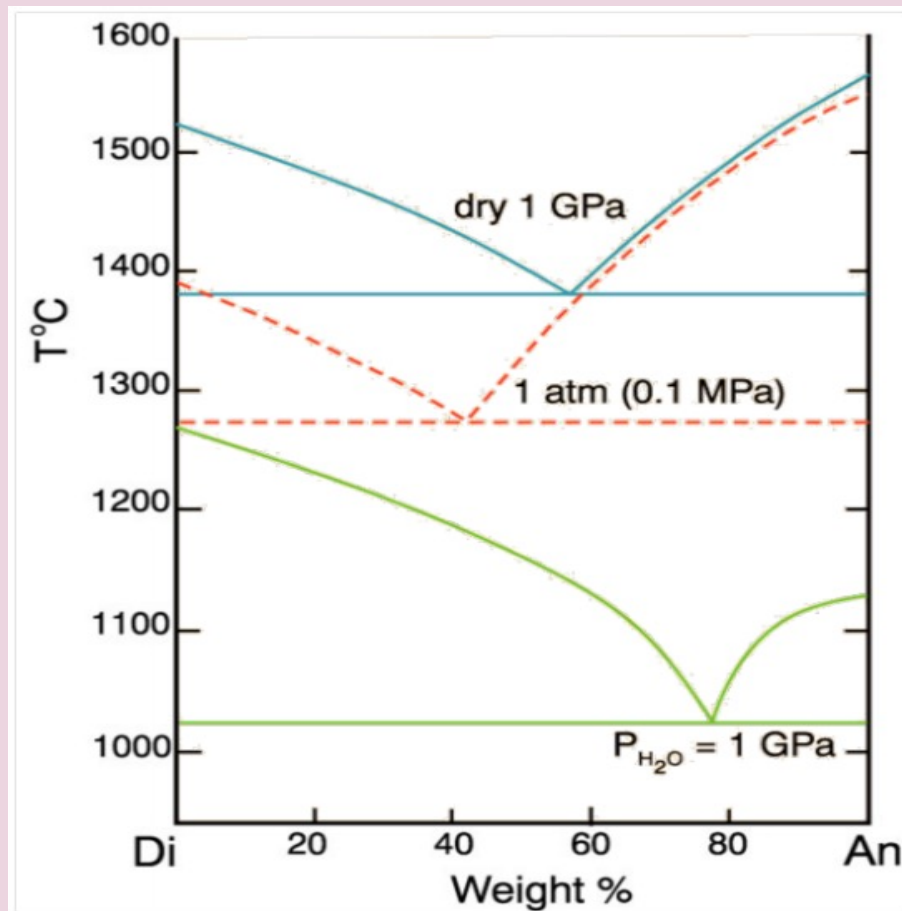


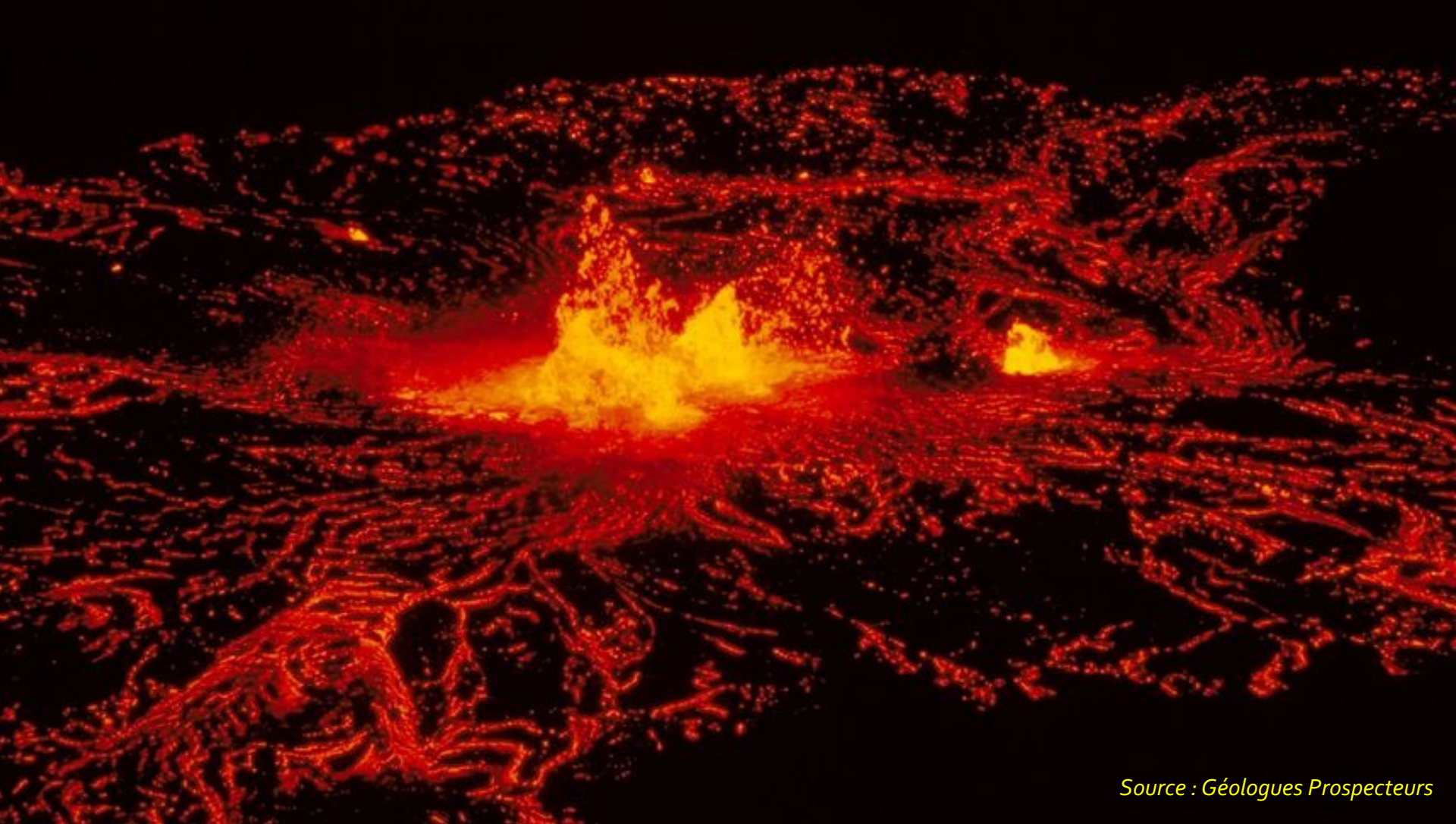
*Source : Géologues Prospecteurs*

## A. Les principaux mécanismes de fusion des roches

### 3. Effet de la pression et de la présence de fluide sur les diagrammes de phase





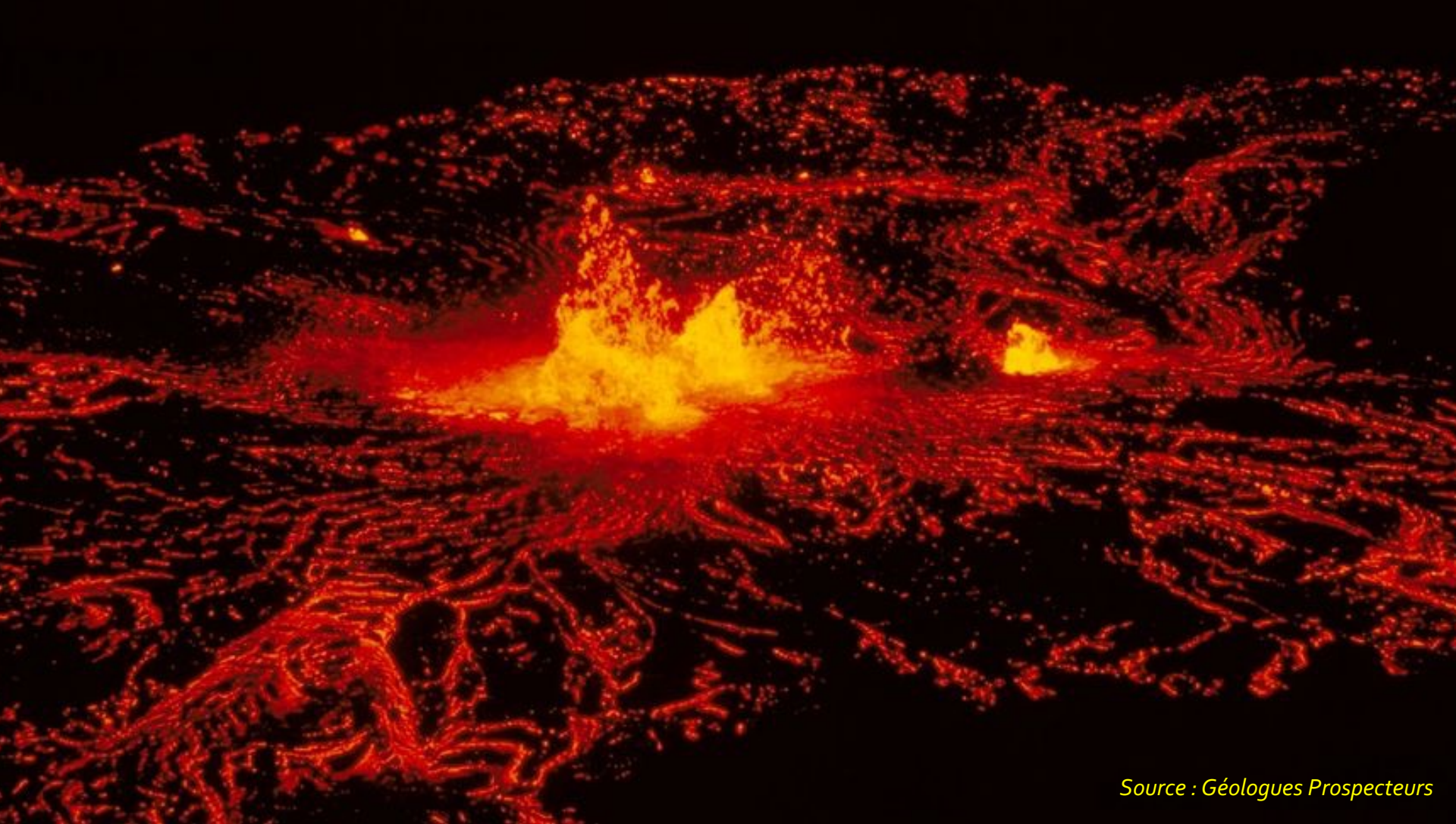


*Source : Géologues Prospecteurs*

## **II. La composition du magma dépend de la nature de la source et du taux de fusion partielle**

### **A. Les apports des données géochimiques**





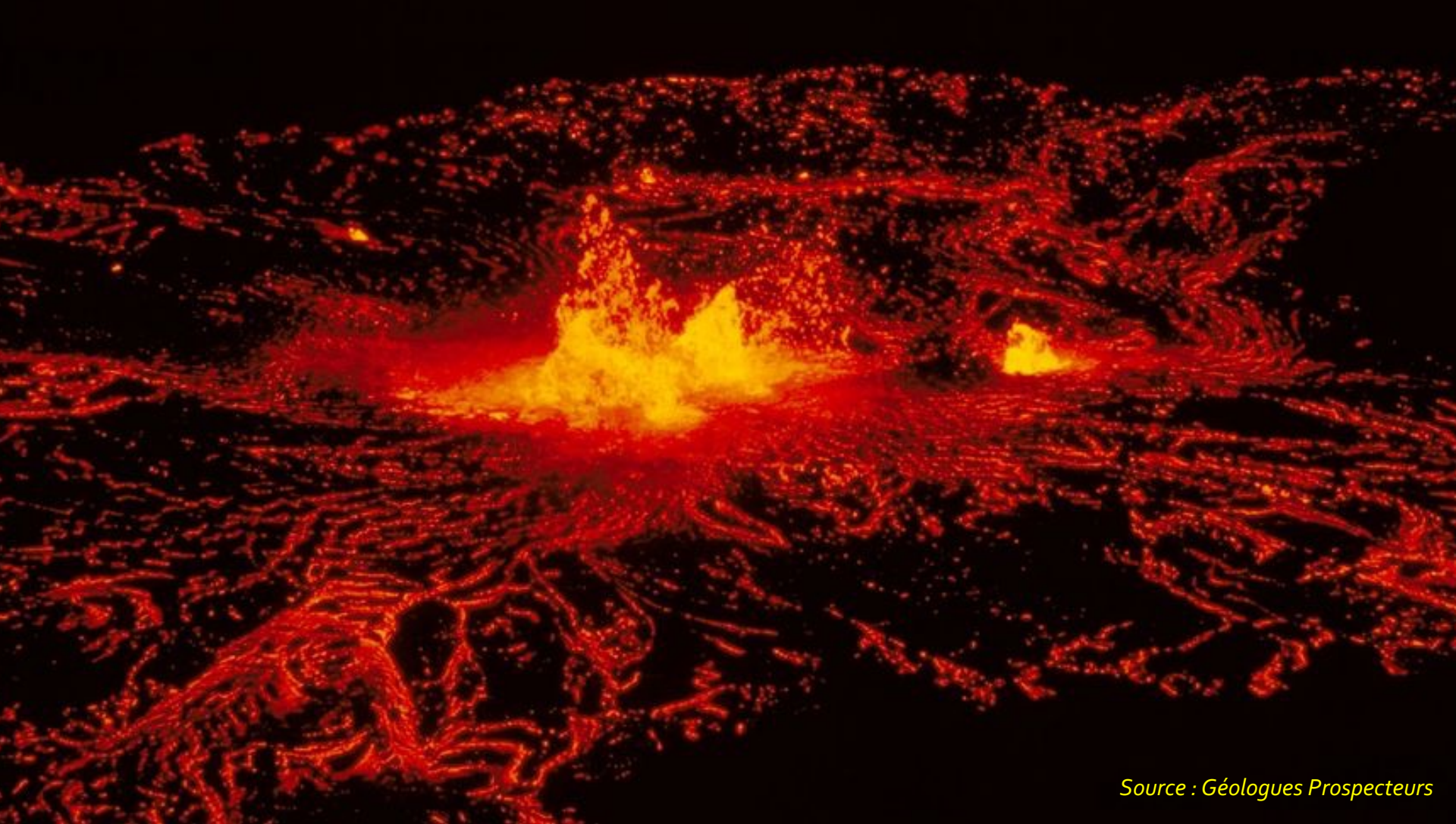
*Source : Géologues Prospecteurs*

## A. Les apports des données géochimiques

### 1. Répartition des éléments chimiques dans les phases liquide et solide et taux de fusion







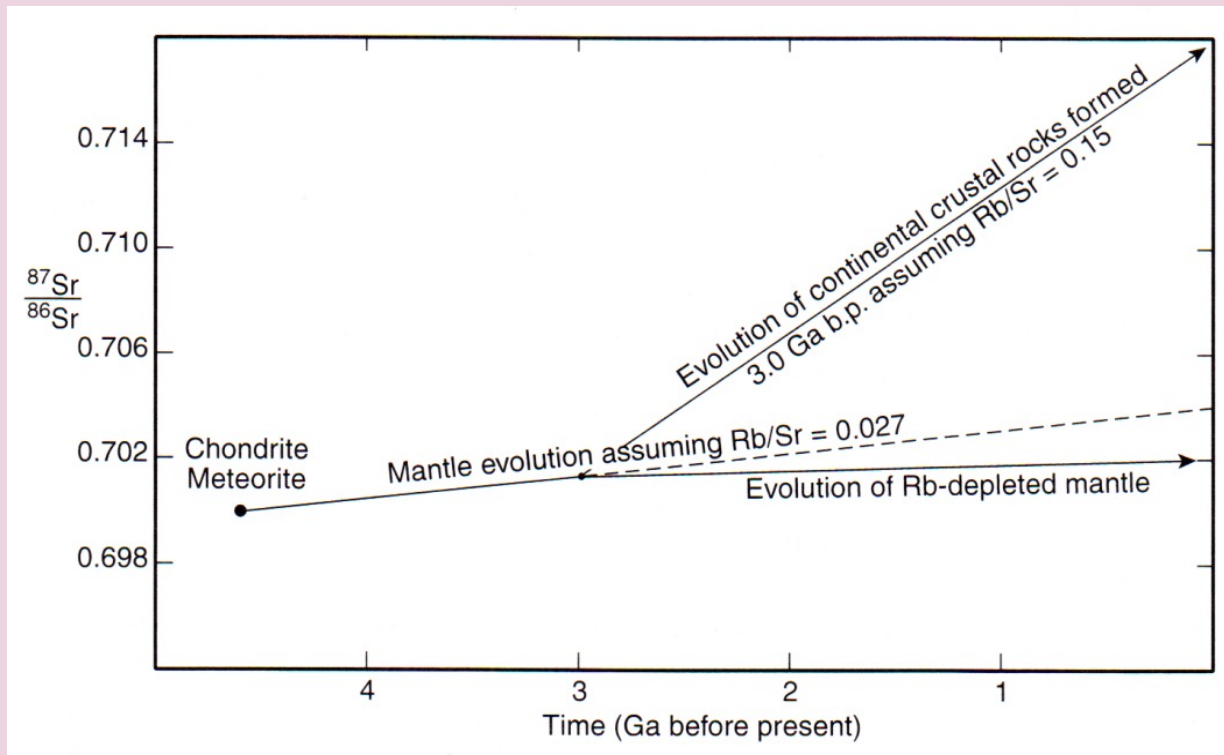
*Source : Géologues Prospecteurs*

## A. Les apports des données géochimiques

2. Les rapports isotopiques permettent d'identifier deux sources majeures des liquides magmatiques

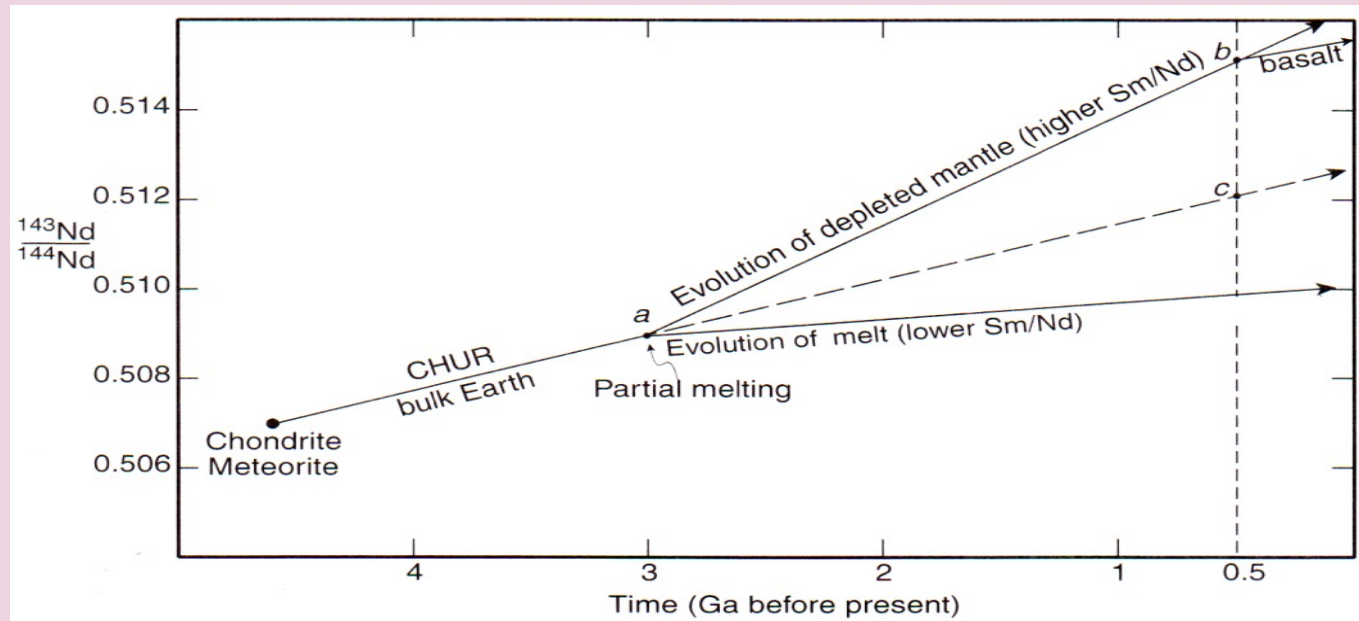
**Le rubidium est un élément fortement incompatible, davantage que le strontium.**

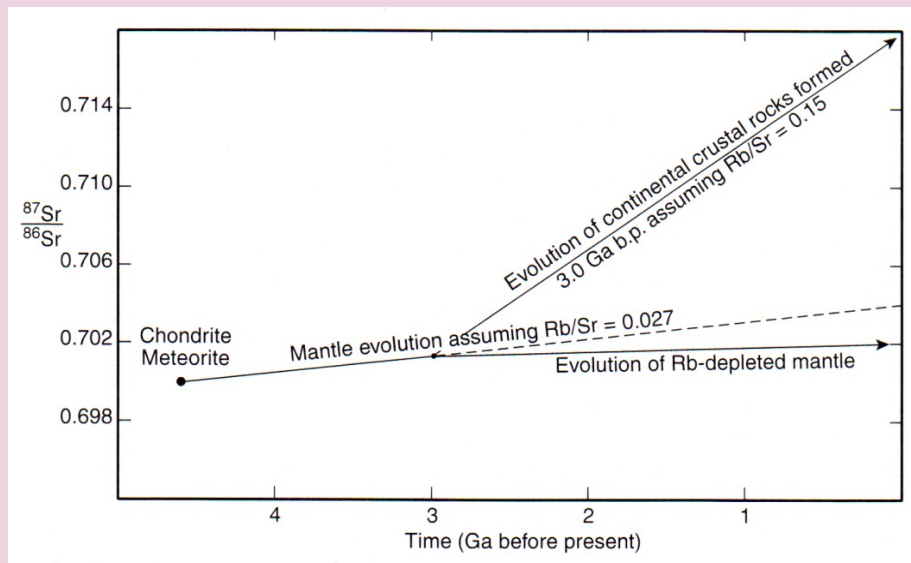
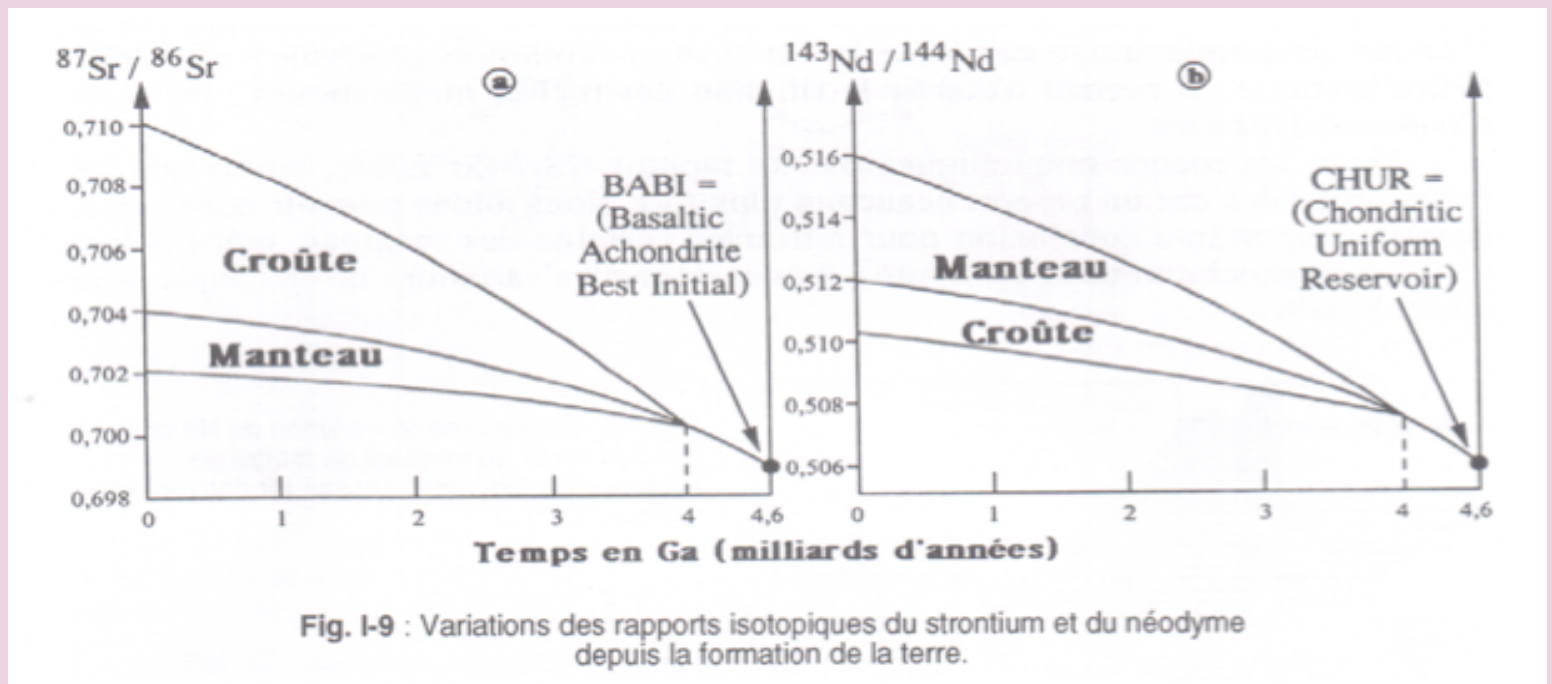
→ Quel lien peut-on faire entre le  $^{87}\text{Rb}$ , l'évolution du rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  et le liquide magmatique issu d'une fusion partielle d'une roche source du rubidium ?



Le samarium et le néodyme, eux, sont deux terres rares légères incompatibles, mais le néodyme est plus incompatible que le samarium. (donc plus de Nd dans le liq)

→ Quel lien peut-on faire entre le Sm, le  $^{143}\text{Nd}$ , le rapport Sm/Nd, l'évolution du rapport  $^{143}\text{Nd} / ^{144}\text{Nd}$  et le liquide magmatique issu d'une fusion partielle d'une roche source du rubidium ?





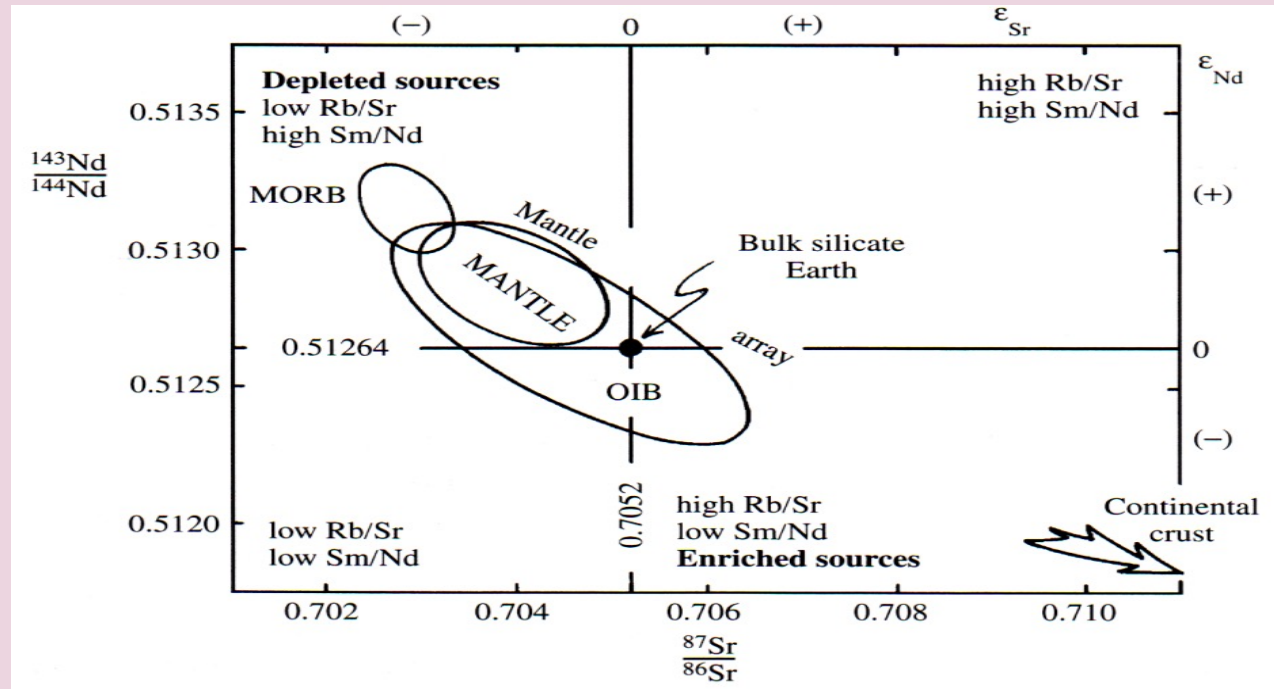


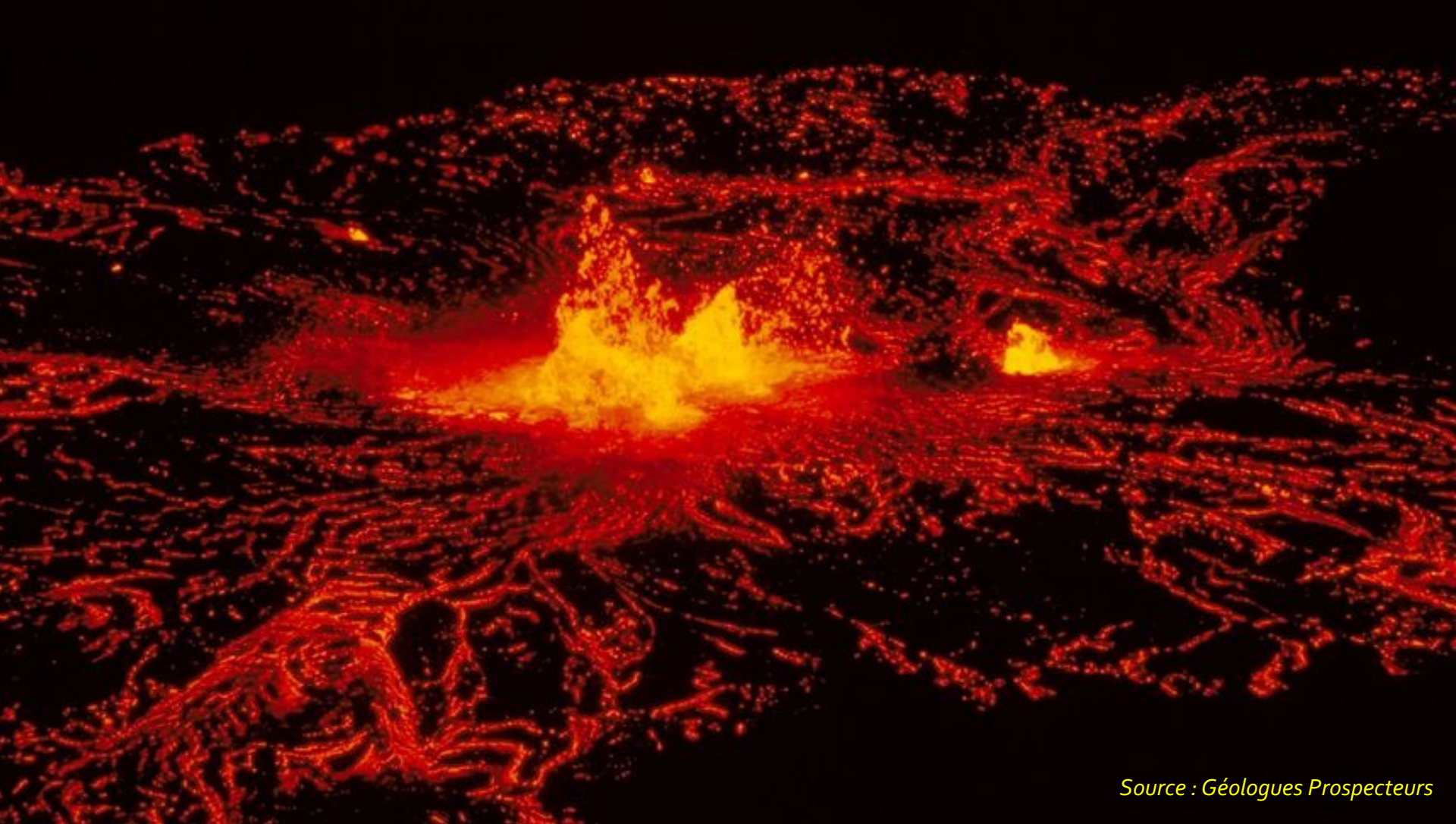
### Diagramme isotopique Néodyme/Strontium.

Toutes les roches terrestres dérivent d'une Terre primordiale (Bulk silicate Earth) ayant subi plusieurs épisodes de fusion partielle.

MORB : Mid-Oceanic Ridge Basalts = basaltes des dorsales

OIB : Ocean Island Basalts = basaltes des îles océaniques.





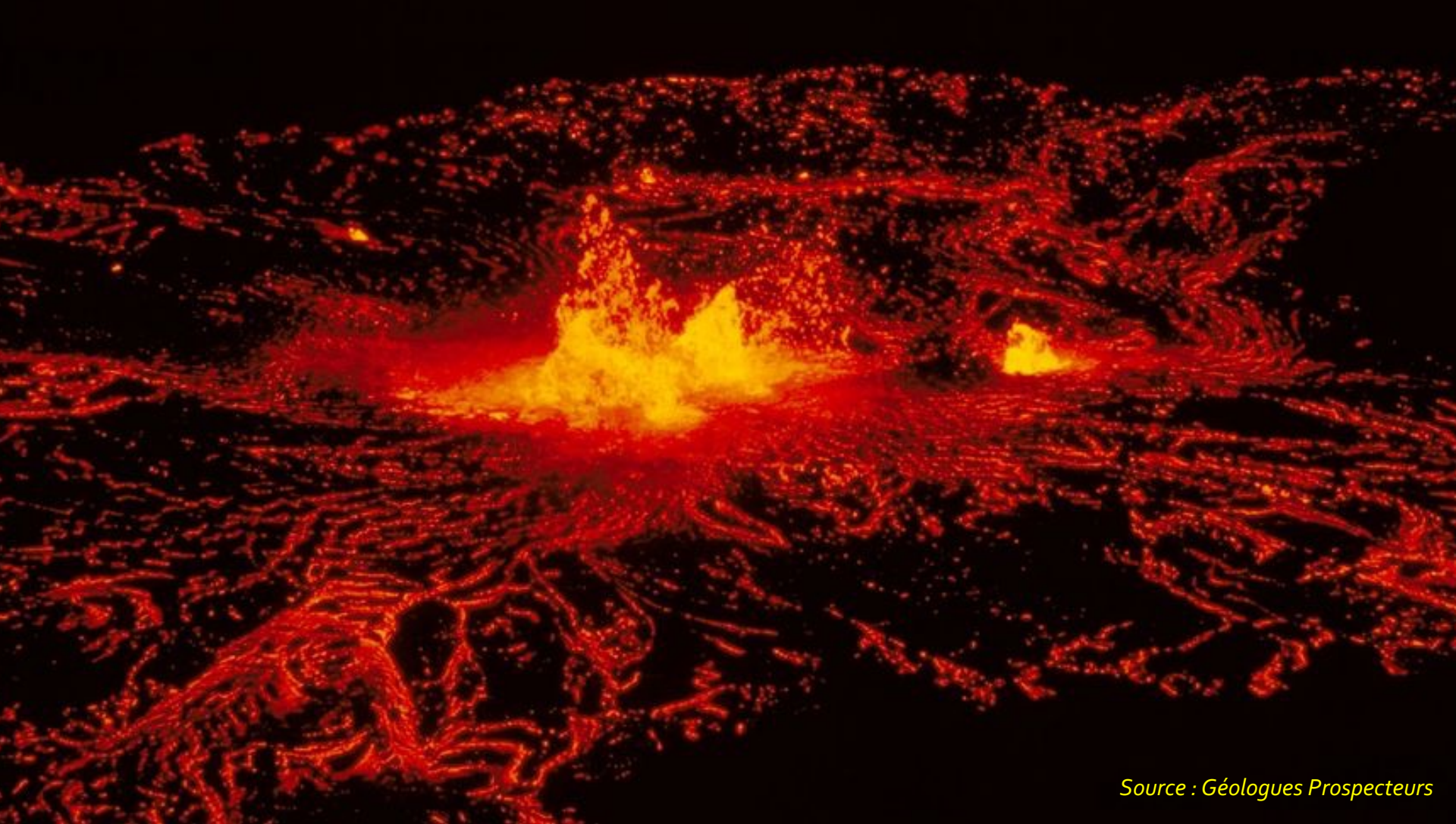
*Source : Géologues Prospecteurs*

## **B. La fusion partielle d'une péridotite produit un liquide basaltique**

### **1. Le magma basaltique correspond à l'eutectique d'un mélange ternaire**







*Source : Géologues Prospecteurs*

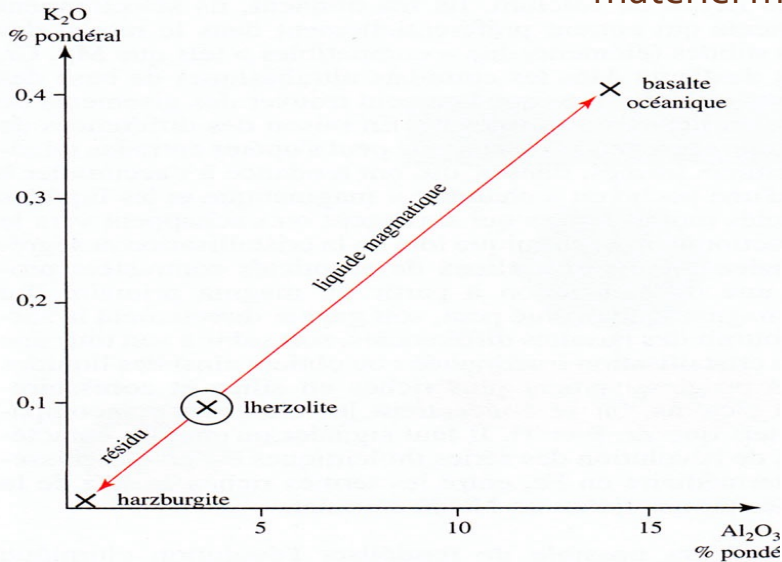
## **B. La fusion partielle d'une péridotite produit un liquide basaltique**

### **2. Taux de fusion et composition du magma obtenu**



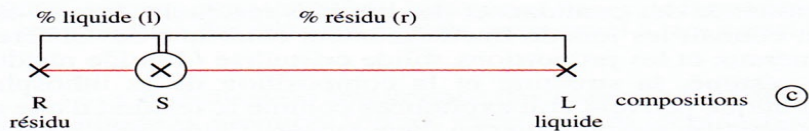
## détermination du taux de fusion partielle\*\*\*

La « pyrolite » est un modèle établi par Green et Ringwood en 1963, il s'agit d'une roche synthétique composée de  $\frac{3}{4}$  de péridotite et  $\frac{1}{4}$  de basalte tholéiitique censée représenter le matériel mantellique de départ.



|                         | Harzburgite ophiolitique | Lherzolite à grenat | Pyrolite | Basalte océanique |
|-------------------------|--------------------------|---------------------|----------|-------------------|
| $\text{SiO}_2$          | 42,3                     | 45,3                | 45,2     | 47,1              |
| $\text{TiO}_2$          | 0,1                      | 0,2                 | 0,7      | 2,3               |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 0,5                      | 3,6                 | 3,5      | 14,2              |
| $\text{FeO}$            | 7,1                      | 7,3                 | 9,2      | 11,0              |
| $\text{MnO}$            | 0,1                      | 0,1                 | 0,14     | 0,2               |
| $\text{MgO}$            | 49,6                     | 41,3                | 37,5     | 12,7              |
| $\text{CaO}$            | 0,1                      | 1,9                 | 3,1      | 9,9               |
| $\text{Na}_2\text{O}$   | 0,1                      | 0,2                 | 0,6      | 2,2               |
| $\text{K}_2\text{O}$    | 0,005                    | 0,1                 | 0,13     | 0,4               |

(a)



Péridotites, basaltes et fusion partielle.

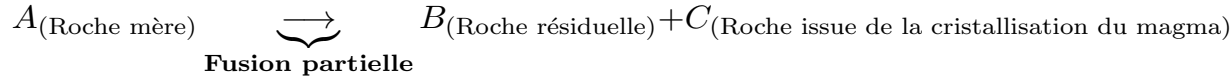
- Analyses chimiques représentatives (d'après Brown et Mussett).
- Diagramme  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{K}_2\text{O}$ .
- Relations entre compositions chimiques et pourcentages de fusion (règle du levier, voir fiche « Thermodynamique »).

Dans l'exemple proposé, le taux de fusion est  $f = \frac{RS}{RL}$ , on peut aussi l'estimer directement avec le tableau en utilisant un élément très hygromagmatophile comme le potassium :  
 Soit une masse  $m_l$  de lherzolite qui fond donnant un liquide basaltique de masse  $m_b$  et un résidu harzburgitique de masse  $m_h$ , on a :

$$m_l = m_b + m_h \text{ et } f = \frac{m_b}{m_l}.$$

Par conservation de la masse,  $m_l \times [K]_l = m_b \times [K]_b + m_h \times [K]_h$   
 $m_l \times [K]_l = m_b \times [K]_b + (m_l - m_b) \times [K]_h$   
 $[K]_l = f \times [K]_b + (1 - f) \times [K]_h$   
 Soit  $f = \frac{[K]_l - [K]_h}{[K]_b - [K]_h}$

# MÉTHODE DE CALCUL DU TAUX DE FUSION PARTIELLE A PARTIR DE LA COMPOSITION EN OXYDES DE 3 ROCHES ... ET AUTRES EXERCICES PASSIONNANTS.



## • Les données du problèmes :

|           | Roche A                       | Roche B  | Roche C  |
|-----------|-------------------------------|----------|----------|
|           | <i>éléments incompatibles</i> |          |          |
| $Al_2O_3$ | $i_{1A}$                      | $i_{1B}$ | $i_{1C}$ |
| $K_2O$    | $i_{2A}$                      | $i_{2B}$ | $i_{2C}$ |
| $RbO$     | $i_{3A}$                      | $i_{3B}$ | $i_{3C}$ |
| ...       | $i_{nA}$                      | $i_{nB}$ | $i_{nC}$ |
|           | <i>éléments compatibles</i>   |          |          |
| $MgO$     | $c_{1B}$                      | $c_{1B}$ | $c_{1C}$ |
| ...       | $c_{nA}$                      | $c_{nB}$ | $c_{nC}$ |

$i_{1A}$  = est % d'oxyde de l'élément incompatible n°1 dans la roche A

*Rappel* : les oxydes ne sont pas des minéraux.

## • Ce que vous devez en faire :

### 1 - Déterminer le type de roche :

- la roche concentrée en éléments compatibles est **la roche résiduelle**.
- la roche concentrée en éléments incompatibles est **la roche issue de la cristallisation du magma engendré**.
- la roche contenant des proportions intermédiaires est **la roche mère**.

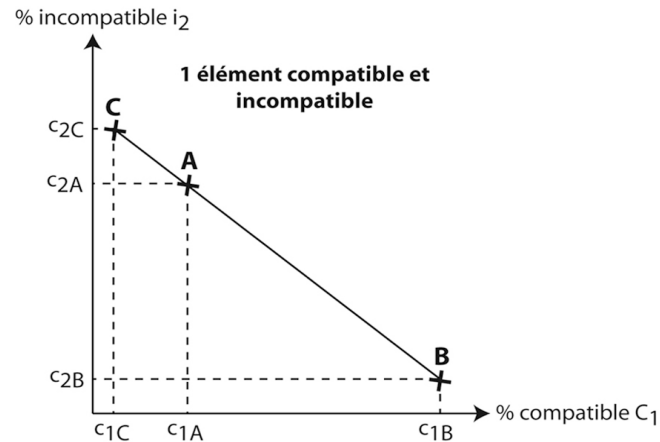
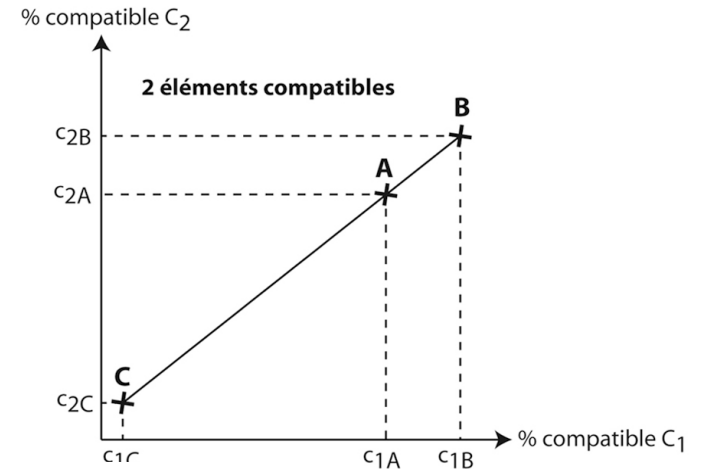
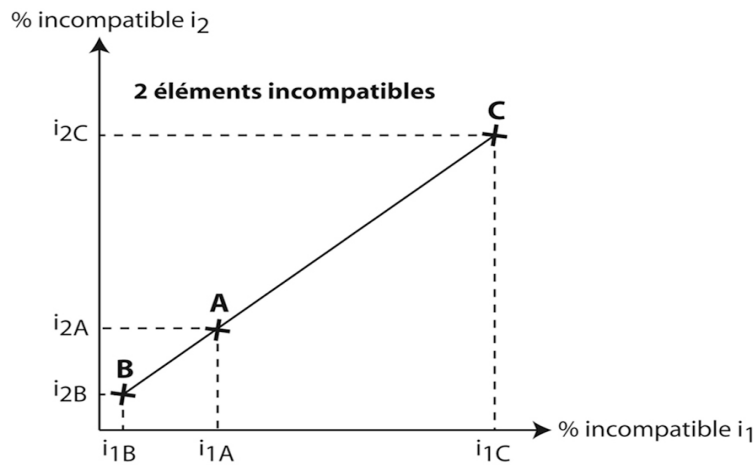
D'une manière pratique, prendre 1 élément (compatible ou incompatible) et étudier sa répartition au sein des 3 types de roches :

$$i_{xB} < i_{xA} < i_{xC}$$

$$c_{xC} < c_{xA} < c_{xB}$$

## 2 - Montrer que 3 roches sont liées génétiquement :

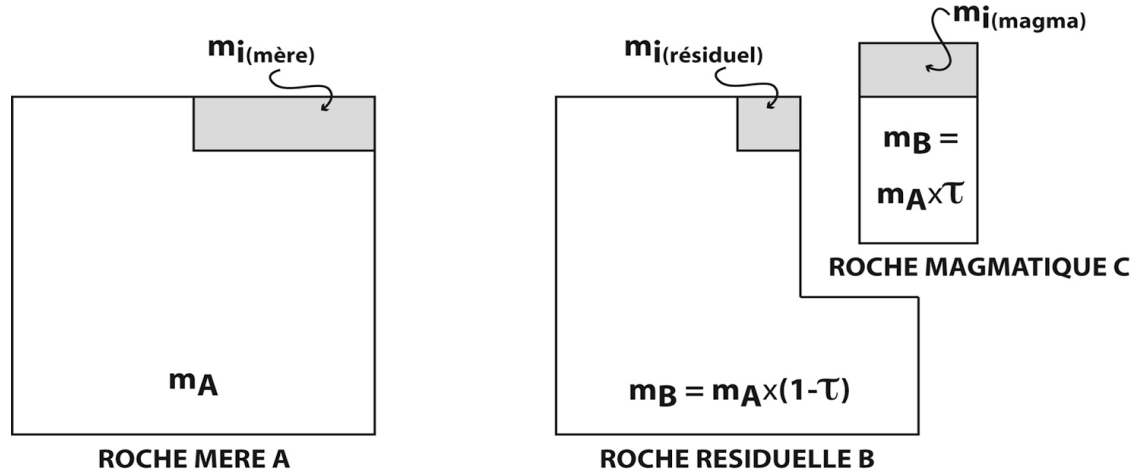
Construire un graphique avec le pourcentage d'un élément en fonction du pourcentage d'un autre élément, par exemple  $\%K_2O$  en fonction du  $\%Al_2O_3$ . Si les 3 roches sont alignées sur une même droite, elles sont génétiquement liées. Celle du milieu a donné les 2 autres par **fusion partielle**.





### 3 - Calculer le taux de fusion partielle $\mathcal{T}$ :

On choisit **un** élément (compatible ou incompatible).



On écrit la conservation de la matière :

$$m_{i(\text{mère})} = m_{i(\text{résiduel})} + m_{i(\text{magma})}$$

$$m_A \cdot i_A = m_B \cdot i_B + m_C \cdot i_C$$

$$m_A \cdot i_A = m_A \cdot (1 - \tau) \cdot i_B + m_A \cdot \tau \cdot i_C$$

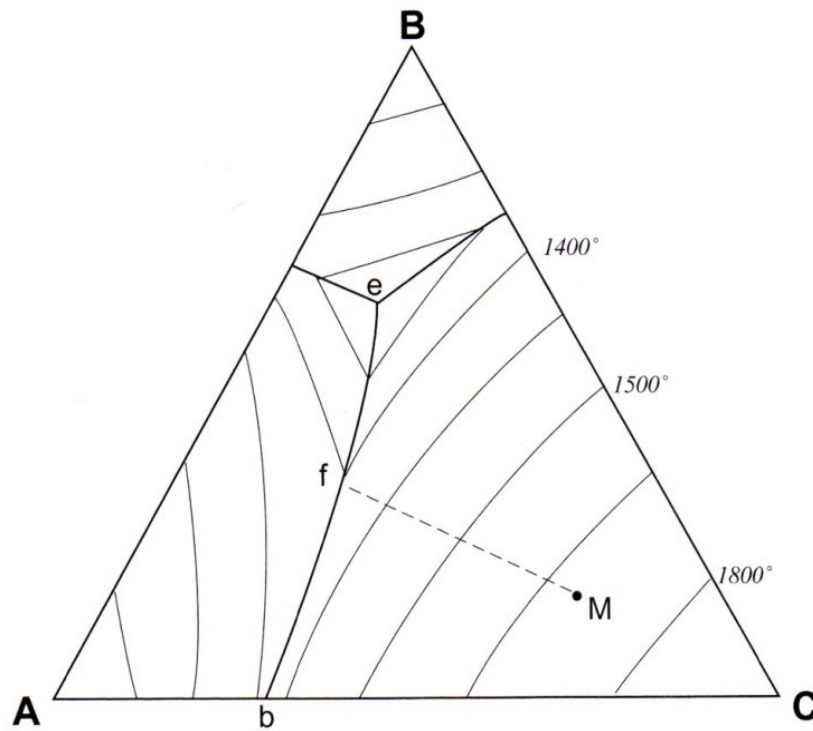
$$i_A - i_B = \tau(i_C - i_B)$$

$$\text{donc} \rightarrow \tau = \frac{i_A - i_B}{i_C - i_B} \quad \text{par exemple : } \tau = \frac{\%K_2O_{(A)} - \%K_2O_{(B)}}{\%K_2O_{(C)} - \%K_2O_{(B)}}$$

*Remarque* : Si on fait le calcul pour d'autres éléments, on doit obtenir la même chose (si il n'y a pas eu contamination).

*Remarque* : Si on utilise un élément très incompatible :  $i_B \ll i_A$  et  $i_C$ , on peut s'implifier l'équation :

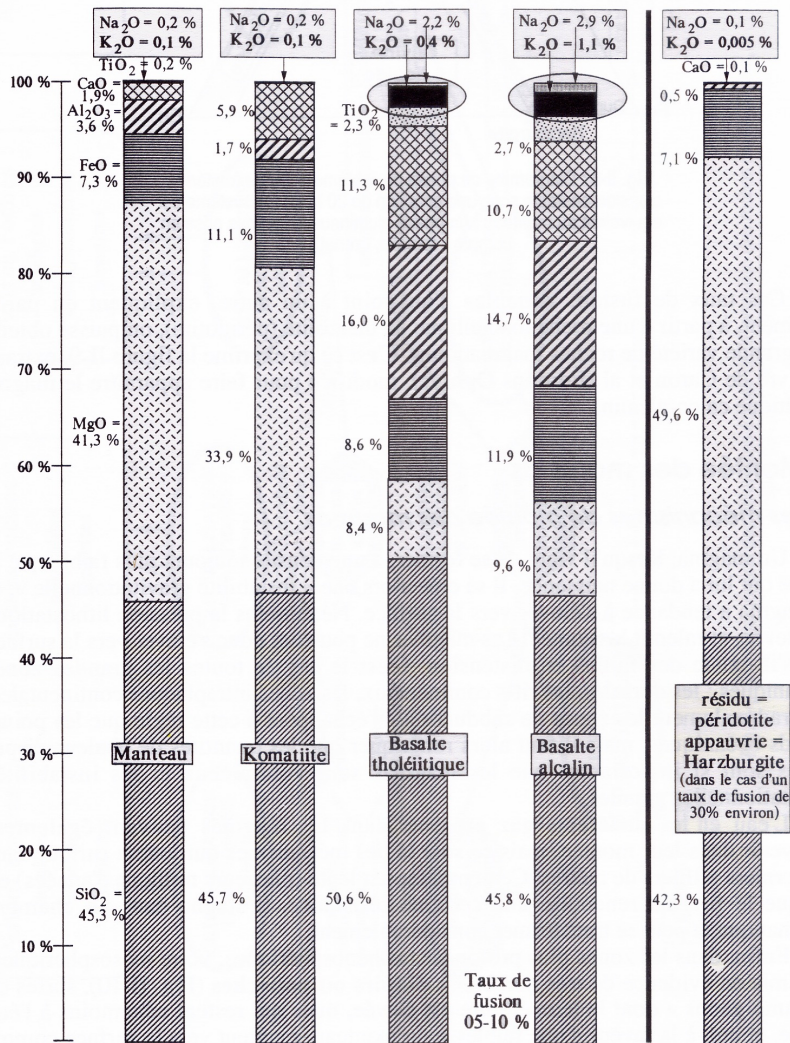
$$\tau = \frac{i_A}{i_C}$$



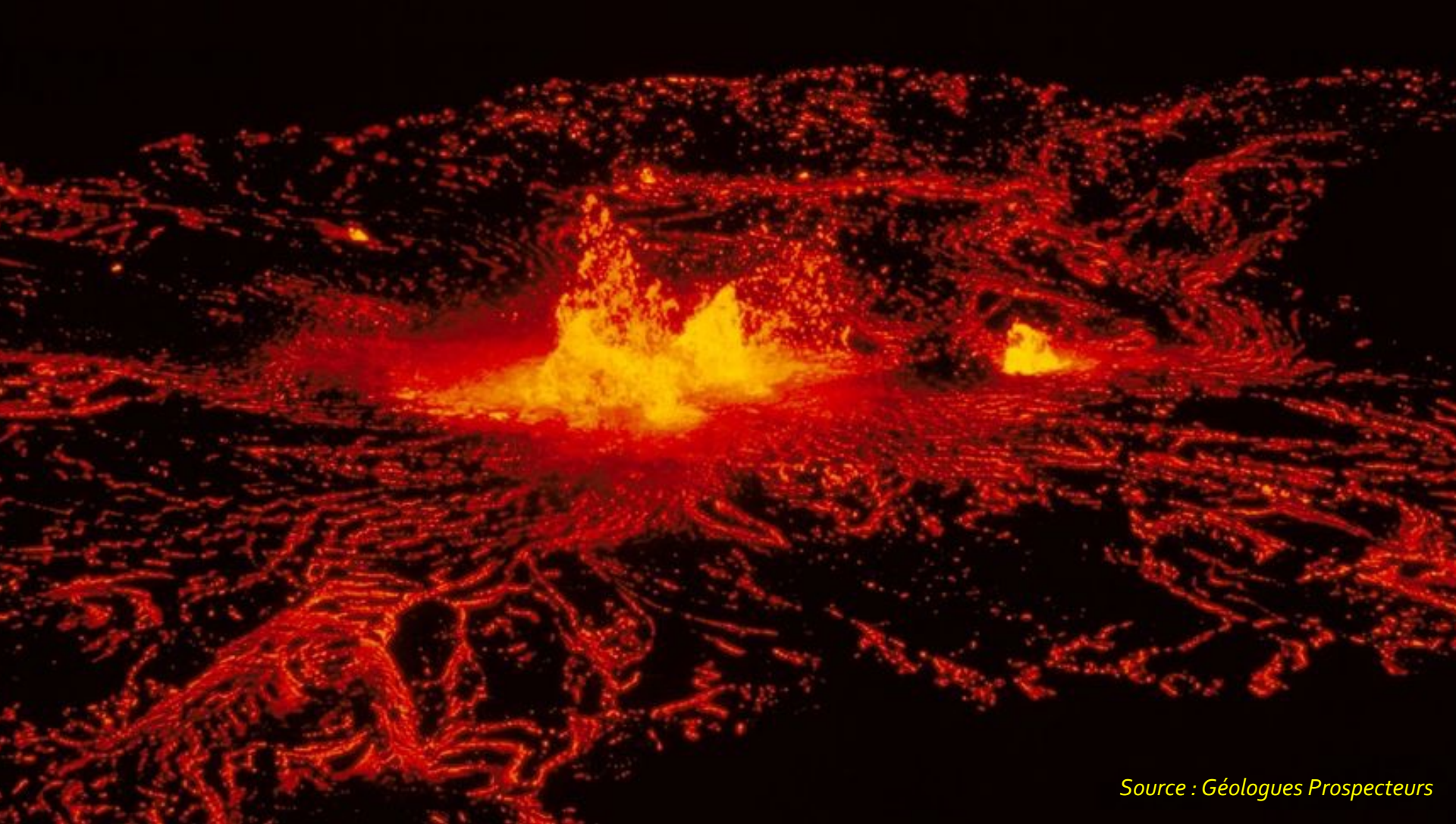
**Variation de composition d'un liquide formé par fusion partielle d'un système ternaire simple avec eutectique.**

M. composition du solide soumis à fusion partielle, b. eutectique binaire du système A + C, e. eutectique ternaire. En cas de fusion fractionnée, la variation est *discontinue* : e, puis b, puis C. En cas de fusion à l'équilibre, la variation est *continue* : e → f → M et les compositions différentes (Maaløe, 1985).

- Quel lien peut-on établir entre la nature du magma et la fusion partielle ?



Formation des différents types de basaltes (actuels ou anciens : Komatiites) en fonction des taux de fusion, et composition chimique du résidu non fondu (Harzburgite).

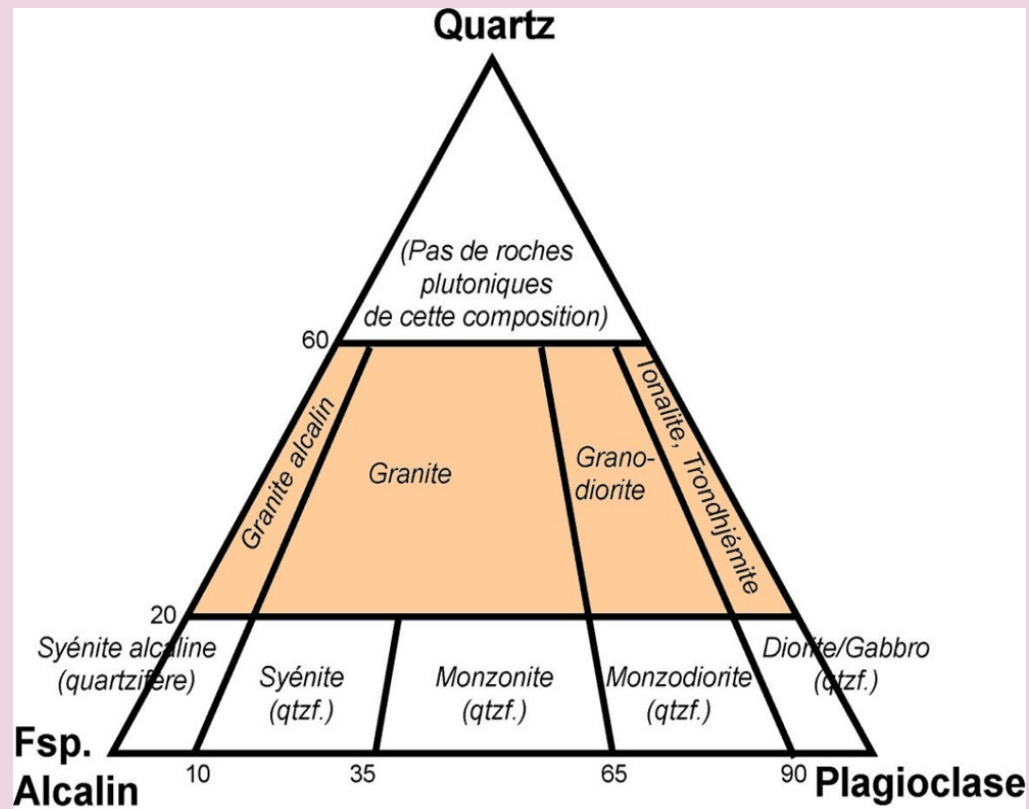


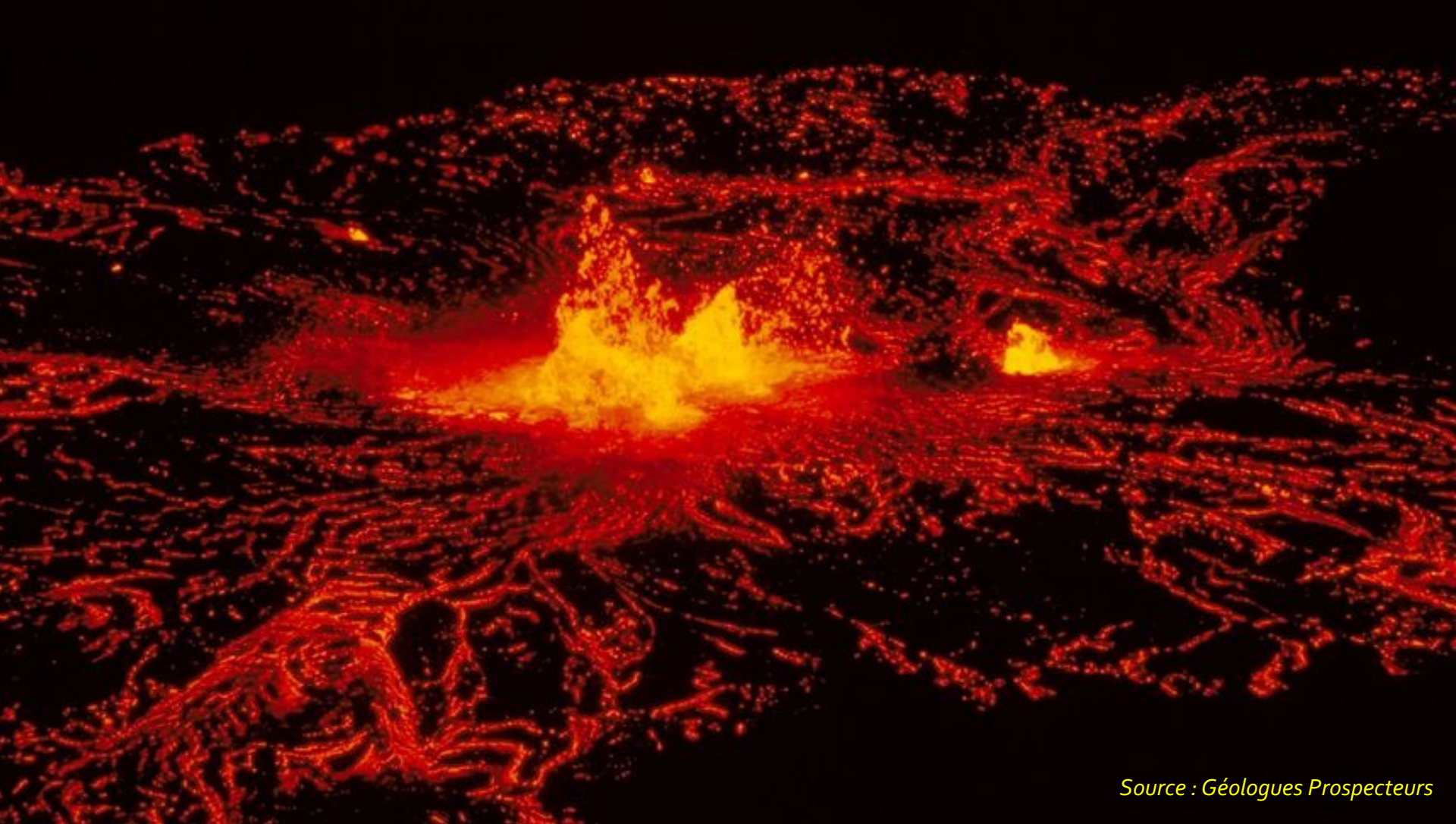
*Source : Géologues Prospecteurs*

**C. La fusion partielle de la croûte continentale (anatexie crustale) produit un liquide granitique**

**1. Origine des granites (vue simplifiée)**



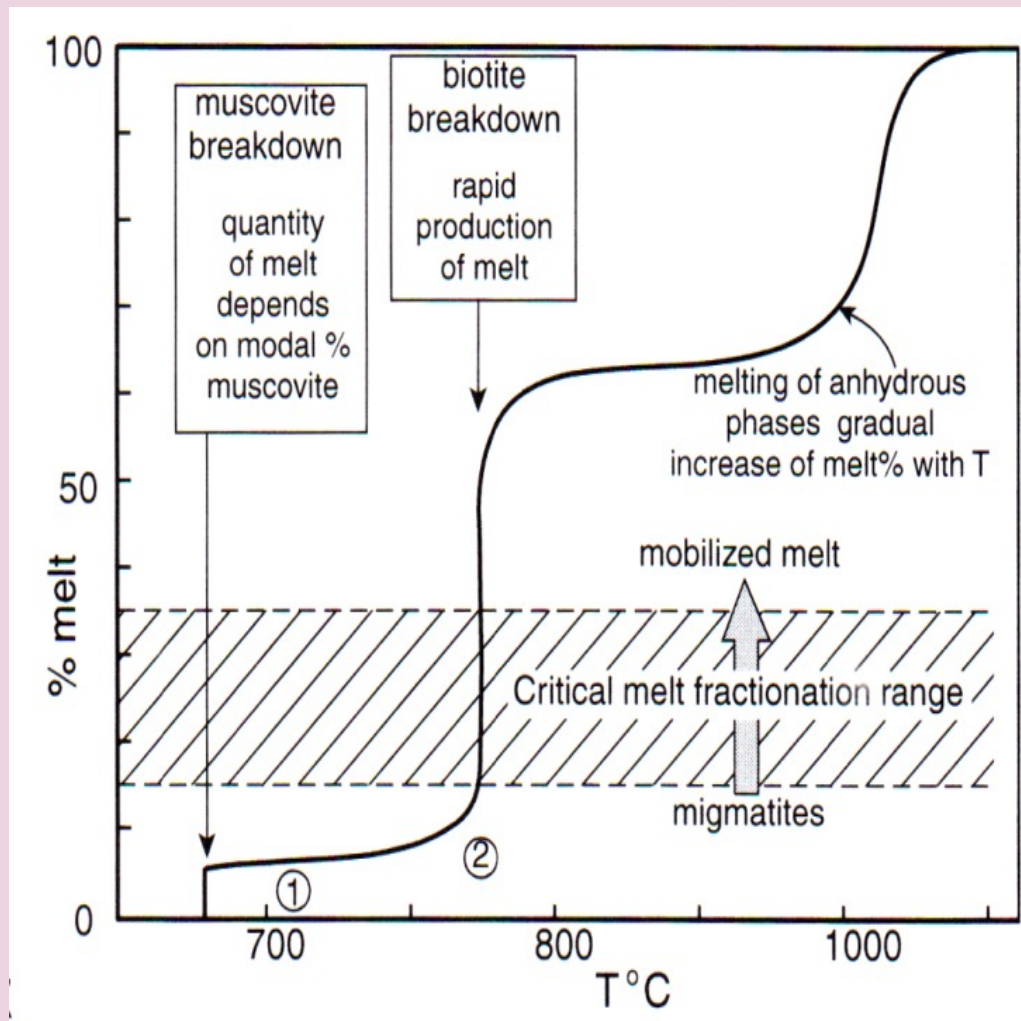




*Source : Géologues Prospecteurs*

**C. La fusion partielle de la croûte continentale (anatexie crustale) produit un liquide granitique**

**2. L'anatexie crustale indissociable du métamorphisme**



évolution du taux de fusion au cours du réchauffement d'une roche crustale contenant de la muscovite et de la biotite.

En dessous d'un certain taux de fusion, le liquide, riche en silice et visqueux ne peut s'échapper et reste dans la roche source, à l'origine de **migmatites**.





Migmatite  $\Rightarrow$  Début de Fusion  
partielle produisant un magma de  
composition granitique

{ niveau clair  $\Rightarrow$  origine Magmatique  
 { niveau sombre  $\Rightarrow$  origine Métamorphe

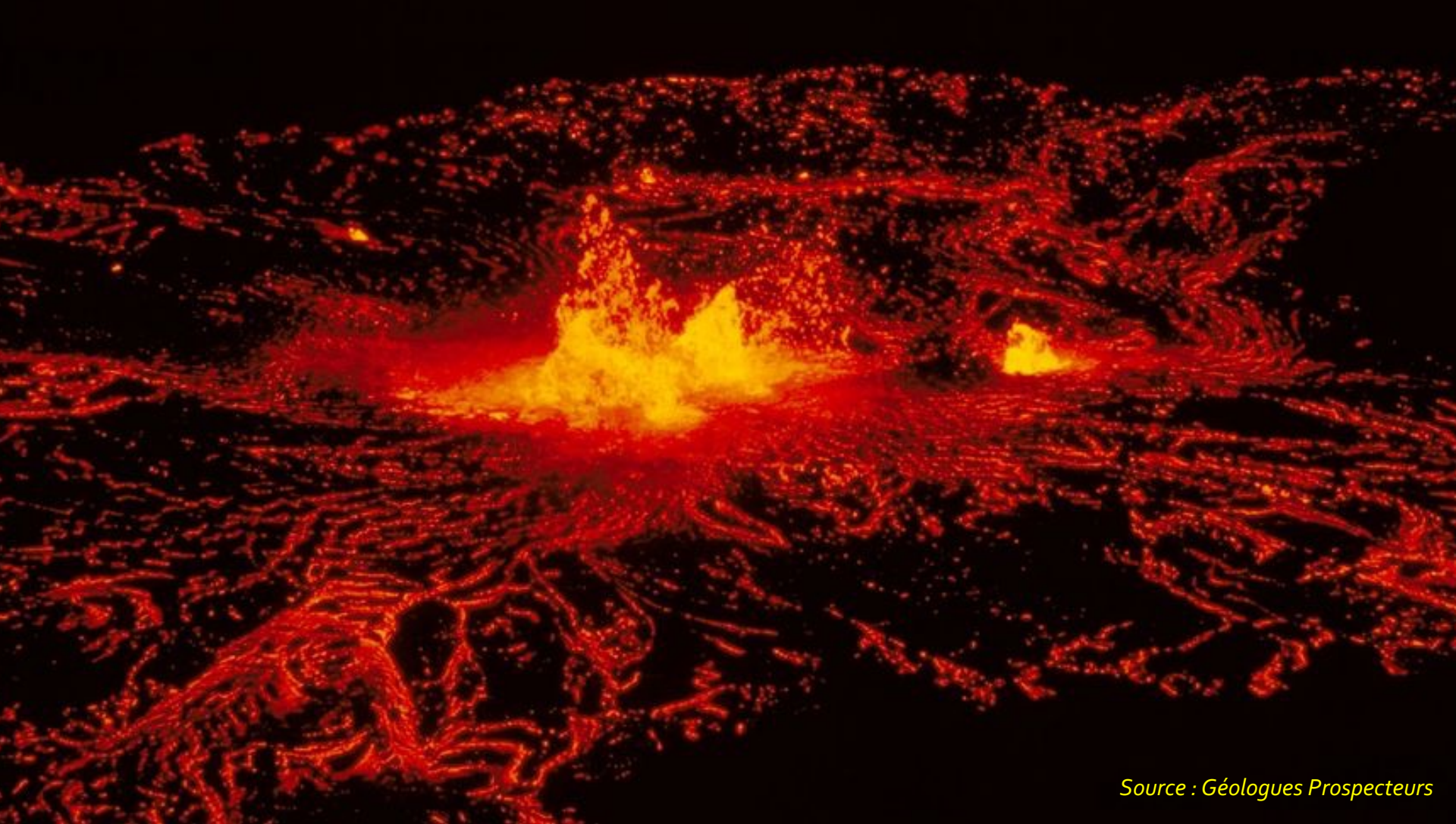
minéraux blanc  
 $\hookrightarrow$  Feldspath  
 minéraux gr-s  
 sile  
 $\hookrightarrow$  Quartz

{ Texture  
 grossière  
 $\Downarrow$   
 R. magmatique  
 $\Downarrow$   
 Type granitique

On ne distingue pas les minéraux -  
 Couleur sombre  $\Rightarrow$  Biotite

}  $\Rightarrow$  Plaque. }  $\Rightarrow$  Issue du  
 Protomagma





*Source : Géologues Prospecteurs*

**C. La fusion partielle de la croûte continentale (anatexie crustale) produit un liquide granitique**

**3. La fusion partielle produit, à partir de roches crustales différentes, des liquides identiques de composition granitique dans la croûte continentale**

