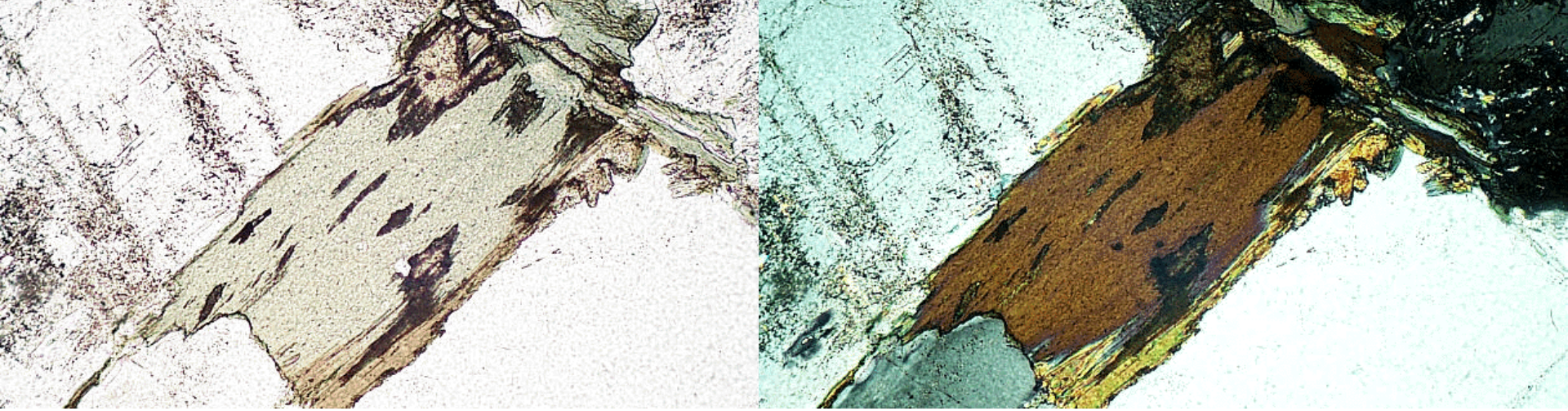


# LCTE 2.11 Métamorphisme



## 1. THERMODYNAMIQUE et ÉQUILIBRES MINÉRAUX

### 2. Expressions du métamorphisme dans l'orogène alpin

- ⇒ Orogenèse alpine
- ⇒ Métamorphisme HP-BT (Alpes Occidentales)
- ⇒ Métamorphisme MP-HT (Alpes Centrales)
- ⇒ Métamorphisme de faible degré
- ⇒ Métamorphisme de contact

# INTRODUCTION: Rappels sur le métamorphisme

## Roches métamorphiques:

⇒ Produits de la **recristallisation** et de la **déformation**, **à l'état solide**, d'une **roche initiale** sous l'effet de **variations** :

de la **pression** ( $P$ ),

de la **température** ( $T$ )

des **contraintes** ( $\sigma$ )

de la **composition des fluides**

des **conditions rédox**

...

⇒ Rôle de la **composition** ( $X$ ) de la **roche initiale** (= **protolithe**)

Pour des **roches de compositions différentes**, différents **assemblages de minéraux en équilibre** (**paragénèse**) sont possibles pour de **mêmes conditions  $PT$**  ;

⇒ Qu'est-ce qui contrôle le domaine de stabilité des paragenèses et comment représenter les paragenèses à l'équilibre ?

# INTRODUCTION: Rappels sur le métamorphisme

Les **minéraux** sont les **témoins des conditions physiques et chimiques** auxquelles ils se sont formés ;

La **présence de minéraux**, de **paragenèses** (associations stables), les **types de réactions**, et les **variations de composition** (minéraux zonés par exemple) donnent des **informations importantes** sur l'**histoire géologique** et les **processus de formation** ;

Pour le **géologue**, il est particulièrement important **d'estimer et comprendre** :

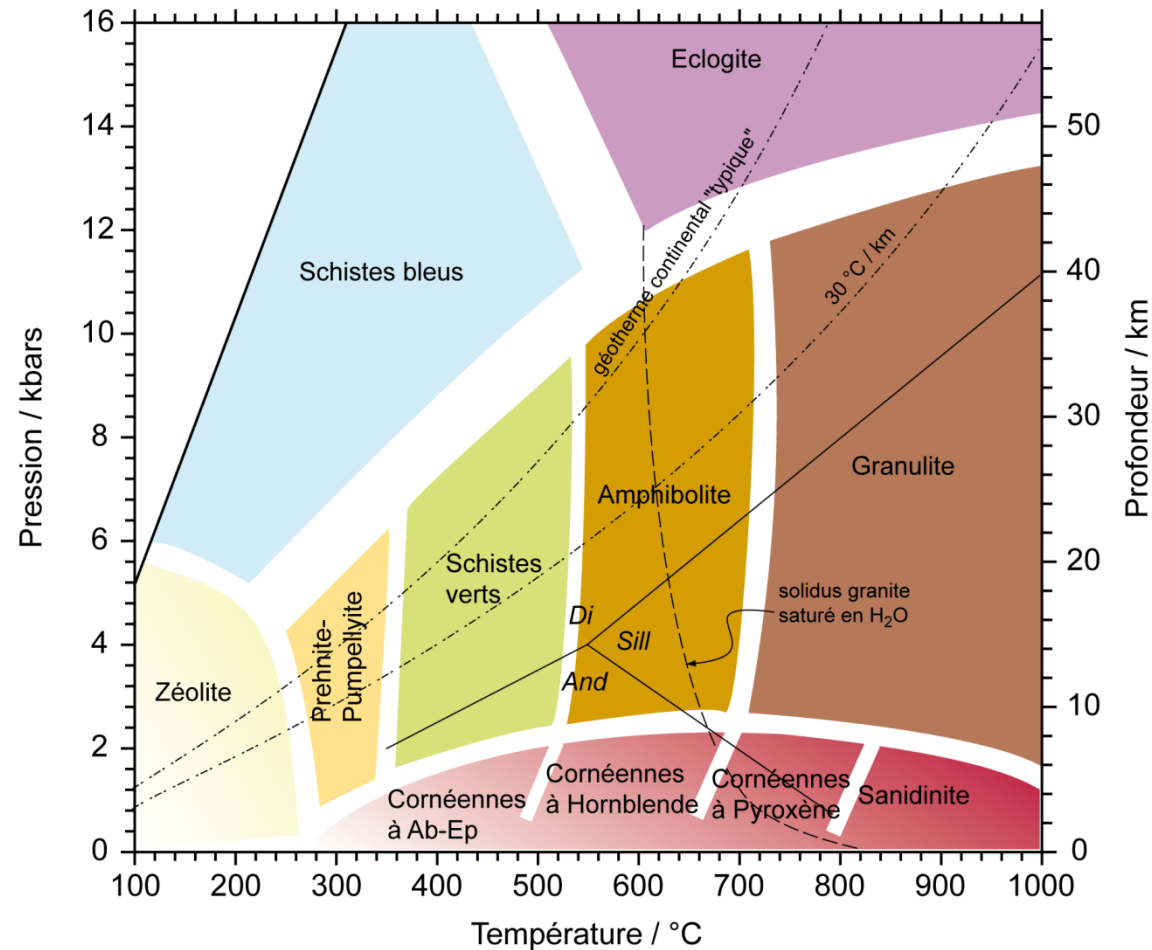
- ⇒ ***P*** et ***T*** (géothermobarométrie) ;
- ⇒ les **autres conditions** physico-chimiques (pH, eH, ...) ;
- ⇒ la **pression partielle** des gaz (fugacité de H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, etc ...)
- ⇒ le **fractionnement des éléments** traces et majeurs entre les phases (minéraux, fluides aqueux, liquides silicatés, ...) pour **caractériser** et **quantifier** les **processus pétrogénétiques** ;
- ⇒ la **géochronologie** et la **thermochronologie**.

# INTRODUCTION: Faciès métamorphiques

## Faciès métamorphiques

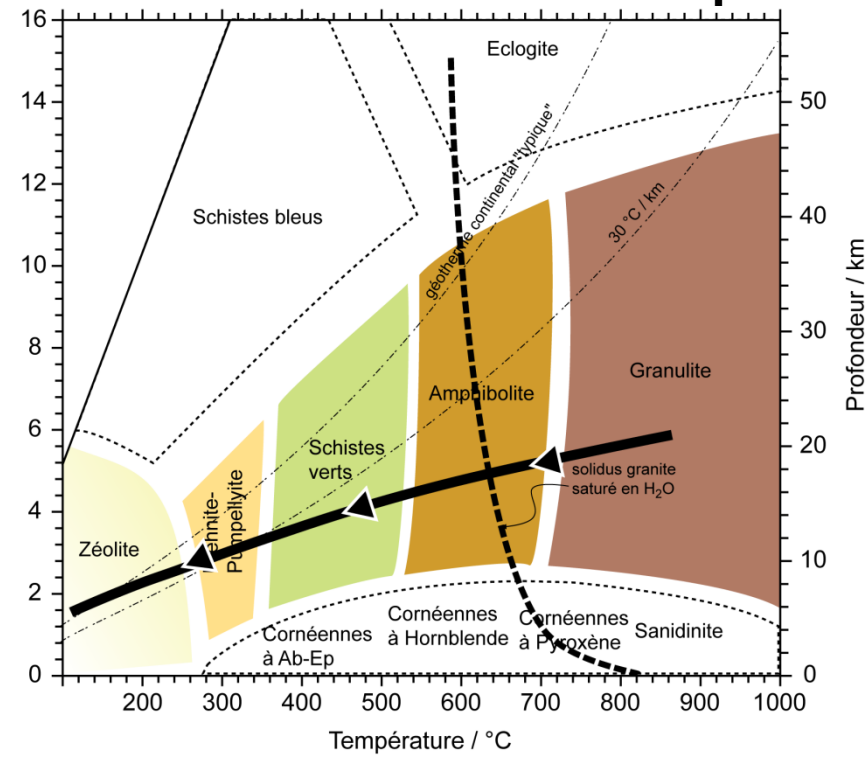
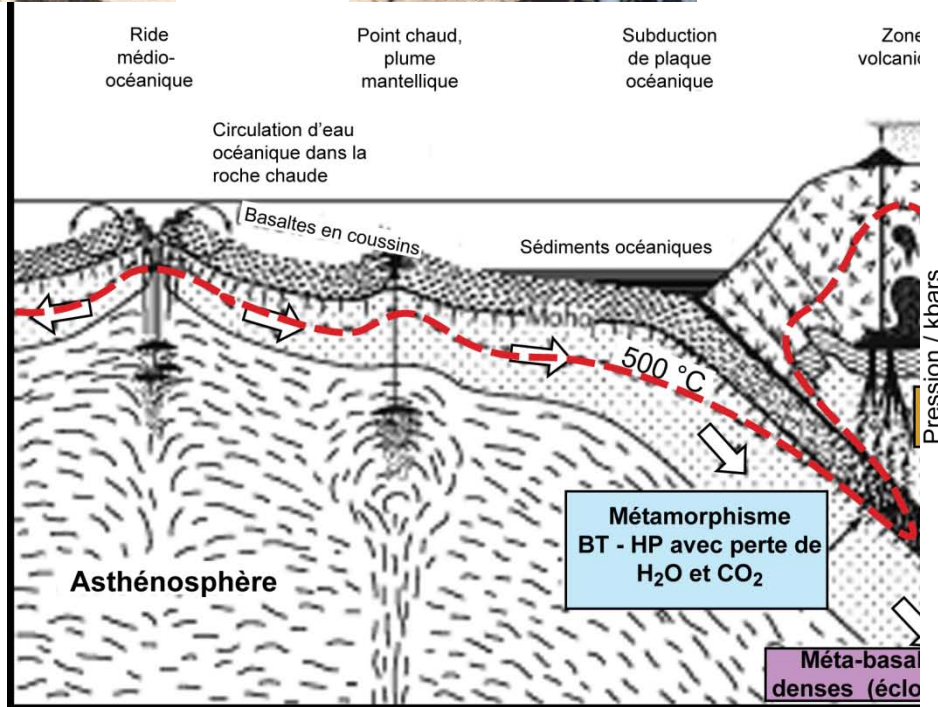
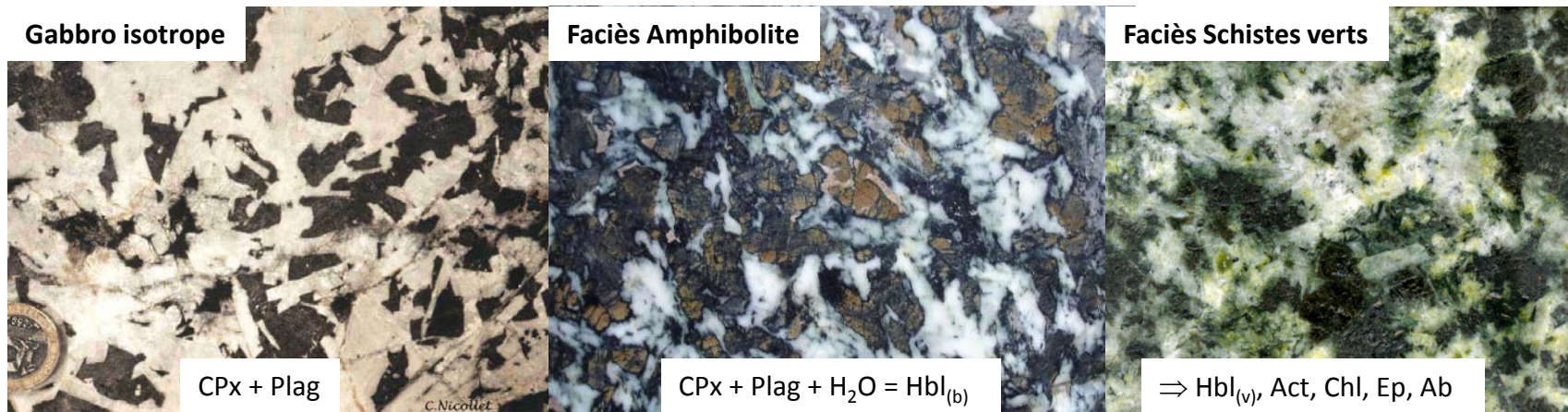
Regrouper des roches soumises à des intervalles de  $P$  et  $T$  données, indépendamment de leur composition chimique.

Les **noms de faciès** correspondent aux noms des **roches de composition basaltique**, métamorphisées dans les intervalles  $PT$  définis pour ce faciès.



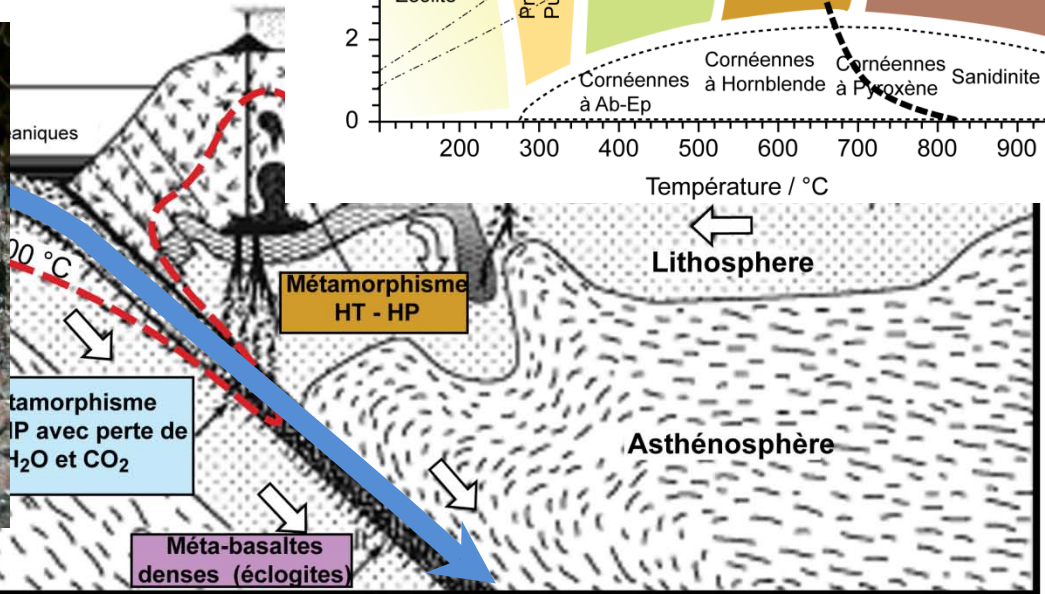
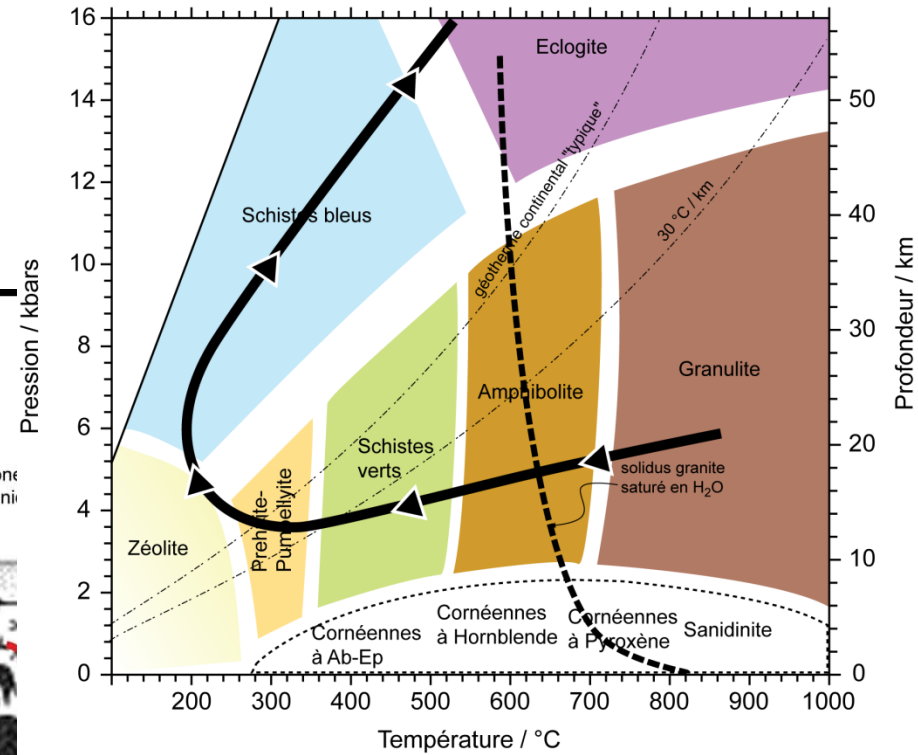
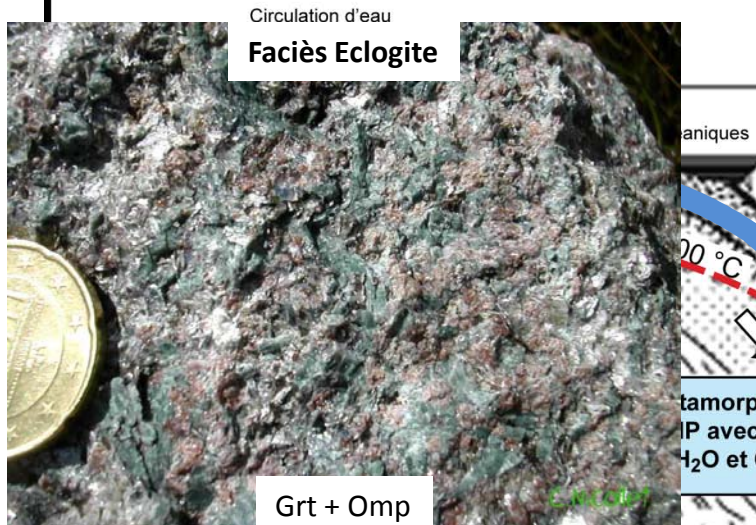


# INTRODUCTION: Trajet d'un gabbro de la croûte océanique





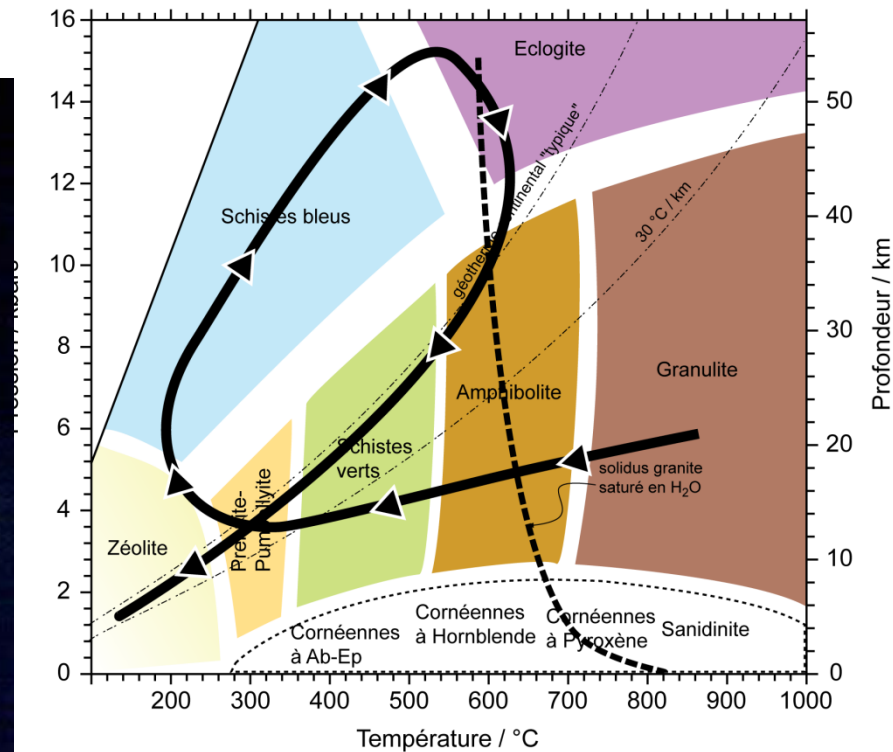
# INTRODUCTION: Trajet d'un gabbro de la croûte océanique



# INTRODUCTION: Trajet d'un gabbro de la croûte océanique



Echantillon Pierre Thomas, ENS Lyon



Lors de sa remontée (P décroissant) à la fin de l'orogénèse hercynienne, **les minéraux ont été très partiellement déstabilisés.**

**Grenat** et **jadéite** ont réagi pour donner une auréole réactionnelle noire d'**amphibole**, associée à du **plagioclase** et du **quartz** ; le **disthène** est partiellement transformé en (**andalousite**).

**Méta-basite éclogitique hercynienne de Loire Atlantique.**

rouge : **grenat**

vert : **jadéite** (pyroxène Na)

bleu pâle : **disthène** ( $\text{Al Si}_2 \text{O}_5$ )

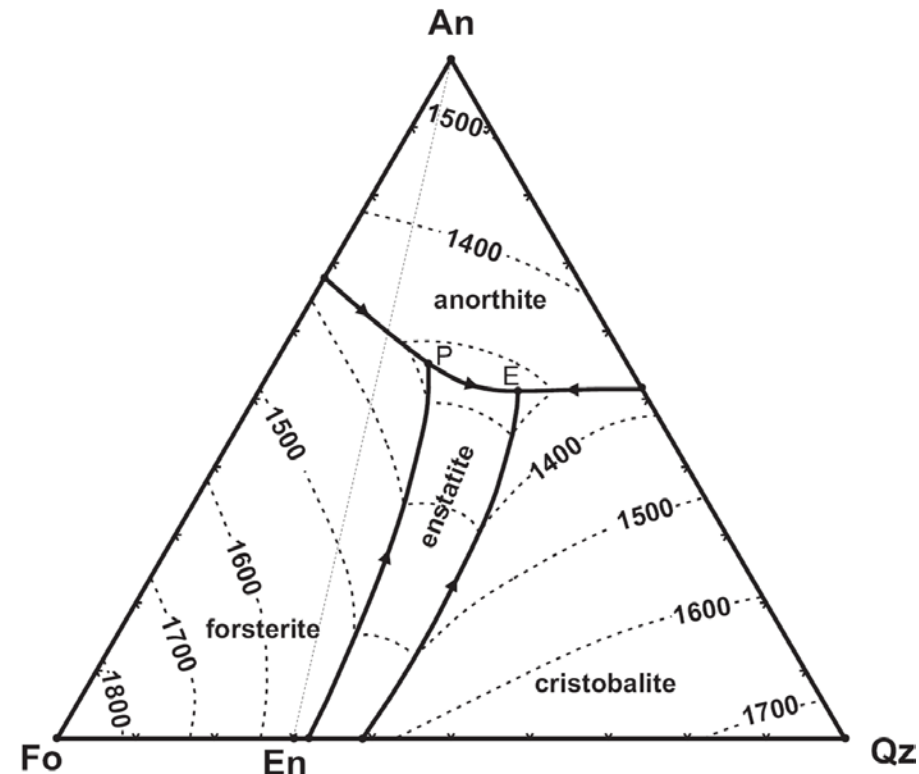
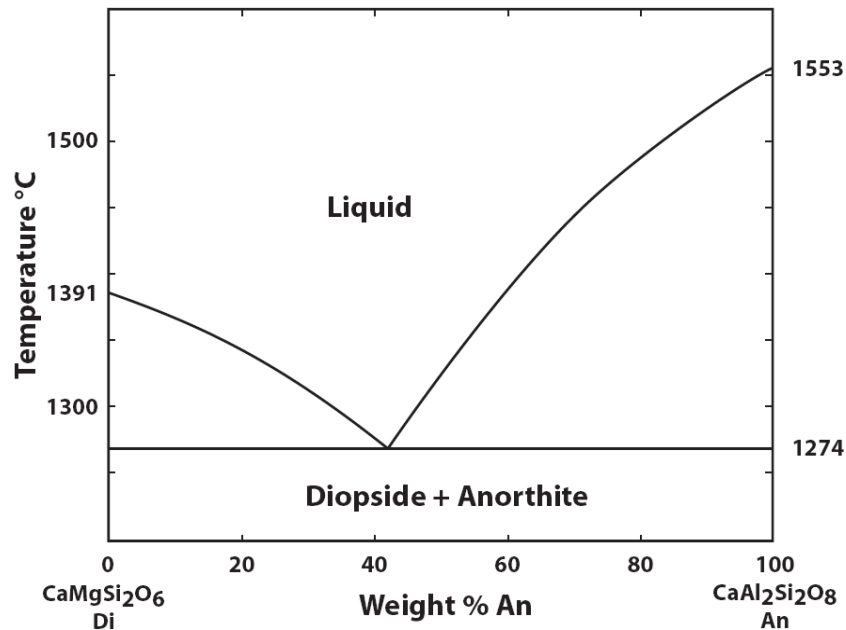
# INTRODUCTION: Relations de phases

## Diagrammes de phases:

⇒ Outil pour **contraindre** l'influence des différents paramètres (**PVTX**) qui contrôlent les **apparitions des phases, domaines de stabilité, ...** ;

⇒ **Représentation graphique** qui permet d'étudier les **relations de phases** en fonction des **conditions** imposées ;

⇒ Exemple des **diagrammes isobares** utilisés en **pétrologie magmatique**:

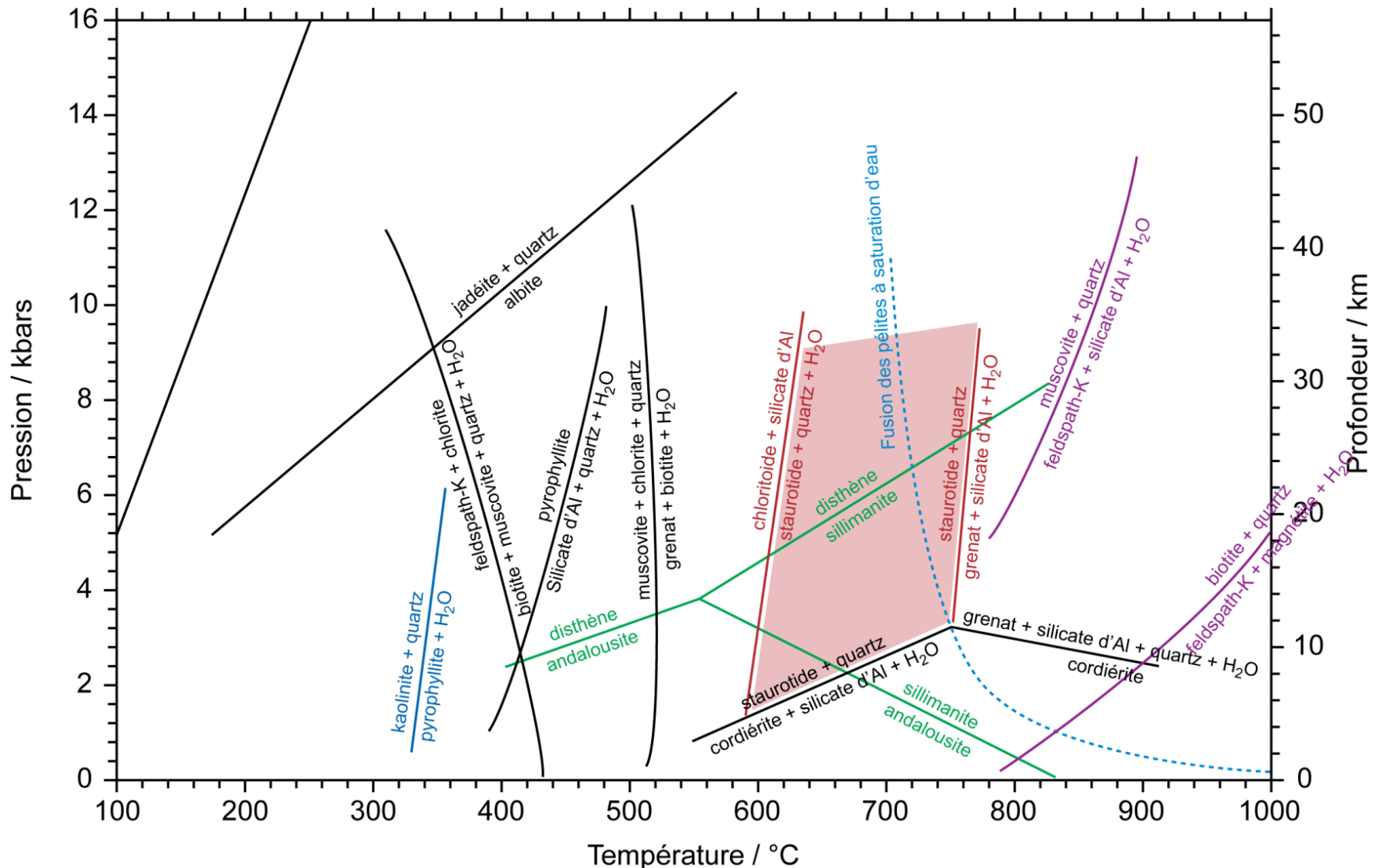


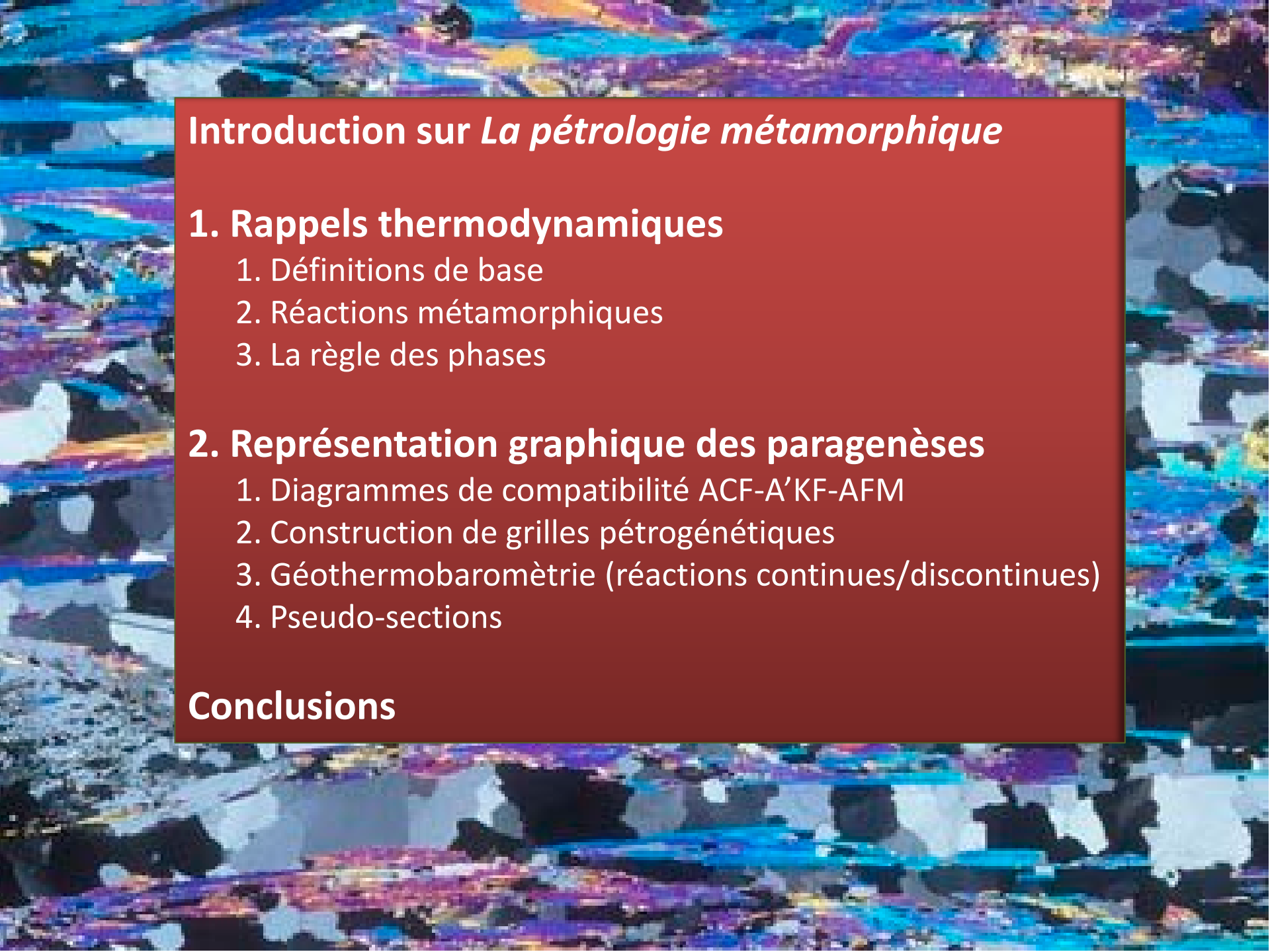


# INTRODUCTION: Relations de phases

## Diagrammes de phases:

⇒ En **pétrologie métamorphique** on va utiliser des **grilles pétrogénétiques** et des **pseudosections** :





# Introduction sur *La pétrologie métamorphique*

## 1. Rappels thermodynamiques

1. Définitions de base
2. Réactions métamorphiques
3. La règle des phases

## 2. Représentation graphique des paragenèses

1. Diagrammes de compatibilité ACF-A'KF-AFM
2. Construction de grilles pétrogénétiques
3. Géothermobarométrie (réactions continues/discontinues)
4. Pseudo-sections

## Conclusions

# 1. Rappels thermodynamiques

## 1. Définitions de bases



# 1. Rappels thermodynamiques

## 1. Définitions de base: Variables intensives / extensives

Variables d'état = grandeurs thermodynamiques décrivant l'état du système

Variables **extensives** sont liées à la dimension de l'objet

- ⇒ Volume ( $V$ )
- ⇒ Nombre de moles ( $n_i$ )
- ⇒ Entropie ( $S$ )
- ⇒ Enthalpie ( $H$ )
- ⇒ Energie libre de Gibbs ( $G$ )

Variables **intensives** sont indépendantes de la dimension (masse) de l'objet

- ⇒ Température ( $T$ )
- ⇒ Pression ( $P$ )
- ⇒ Fraction molaire ( $X_i$ )
- ⇒ Volume molaire ( $V_m$ ) / densité ( $\rho$ )

Toute forme d'**énergie** est le **produit** d'un paramètre intensif et extensif...  
Pour qu'un système évolue, il doit y avoir des **variations d'énergie** !

## 1. Définitions de base: **Energie**

**Roche** = Système thermodynamique hétérogène, caractérisé par son état: **ouvert**, **fermé**, **adiabatique**, ...

### Echange d'énergie avec l'extérieur:

Système **ouvert** :

- ⇒ Energie thermique,  $dq$  (**transfert de chaleur**)
- ⇒ Energie ou travail mécanique,  $dw$  (**transfert de volume**)
- ⇒ Energie chimique,  $d\mu$  potentiel chimique (**transfert de matière**)

Système **fermé** :  $\Rightarrow dq \neq 0$   
 $\Rightarrow dw \neq 0$   
 $\Rightarrow d\mu = 0$

Système **adiabatique** : Système **fermé** et **isolé thermiquement**

- $\Rightarrow dq = 0$
- $\Rightarrow d\mu = 0$
- $\Rightarrow dw \neq 0$

# 1. Rappels thermodynamiques

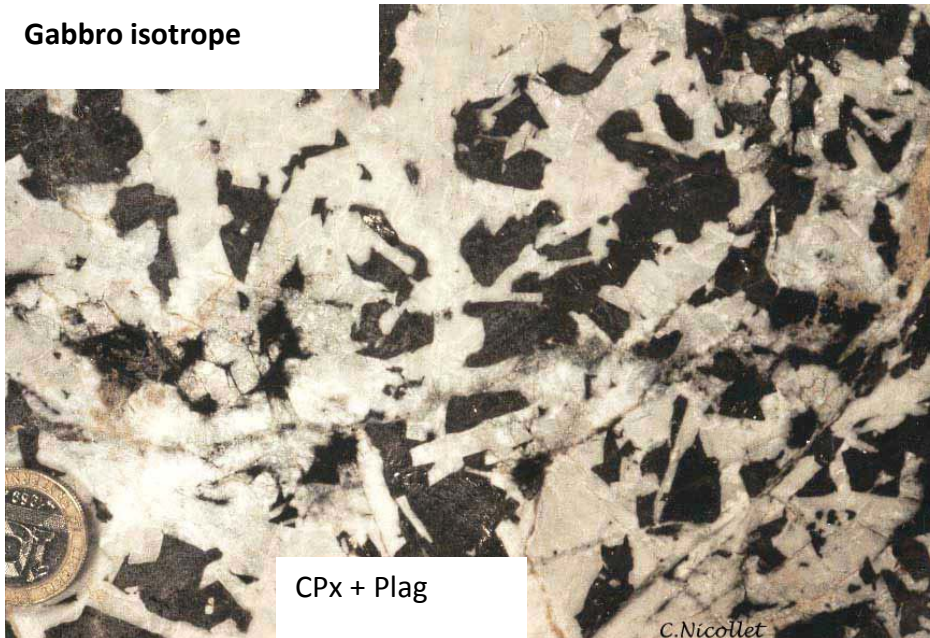
## 1. Définitions de base: **Système**

**Partie de l'univers choisie arbitrairement** en fonction du problème à résoudre ;

Il correspond à une **phase** ou une **association de phases** (S, L et/ou V) dont on cherche à étudier l'évolution ;

Un **système** peut être **ouvert** ou **fermé**.

Gabbro isotrope



**Système** = gabbro

# 1. Rappels thermodynamiques

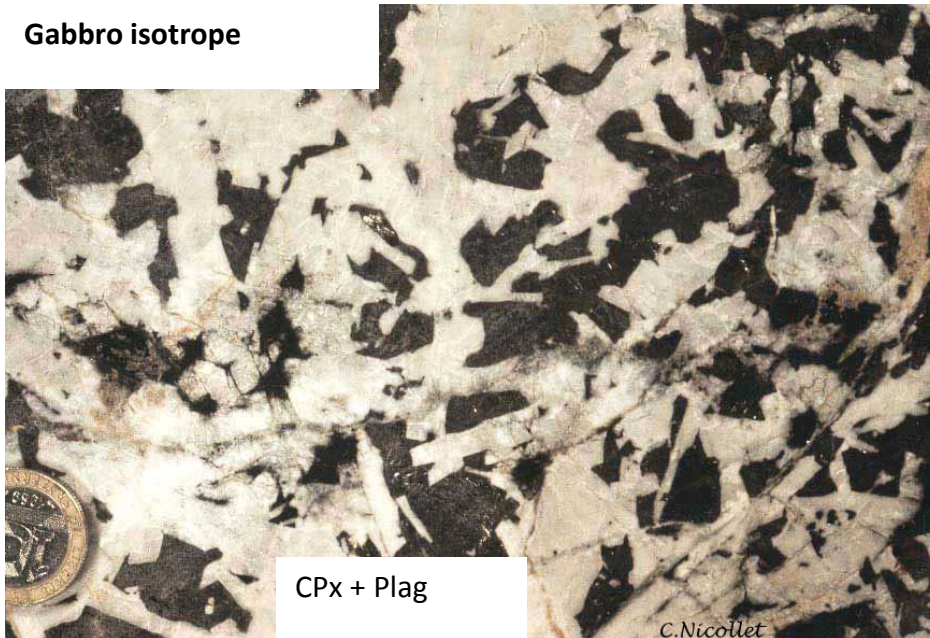
## 1. Définitions de base: Phases

Différents **matériaux** d'un **système** ;

**Chaque phase** est un **objet concret**, distinct physiquement et identifiable par ses propriétés ;

Un système peut être **polyphasé** (**hétérogène**) ou **monophasé** (**homogène**).

Gabbro isotrope



CPx + Plag

*C. Nicollet*

**Système** = gabbro

**Phases** = Cpx, Plagioclases



# 1. Rappels thermodynamiques

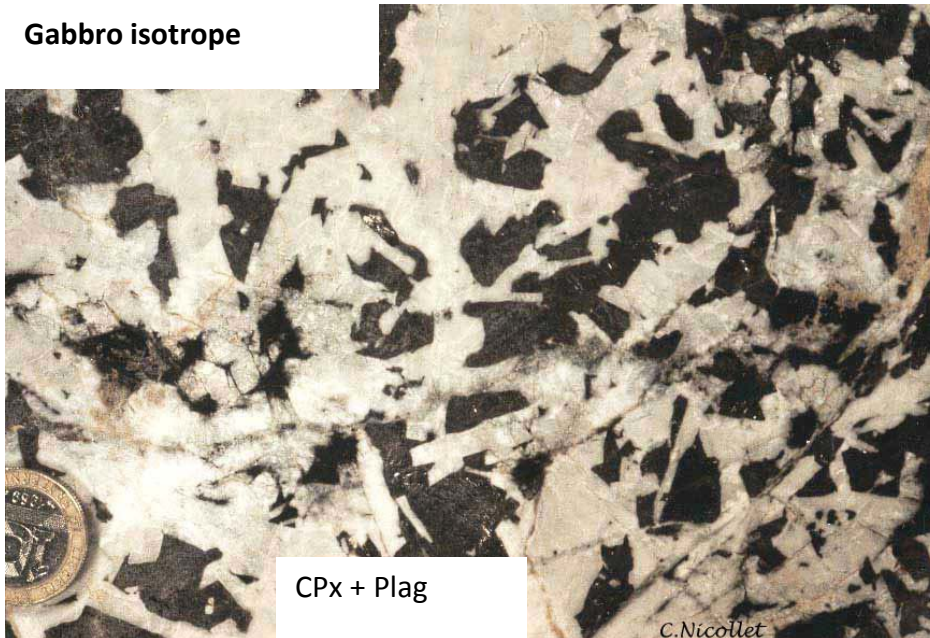
## 1. Définitions de base: Constituants

**Eléments ou molécules chimiques** constitutifs d'un **système** ;

Les **constituants des phases** sont les **espèces chimiques** nécessaires pour **décrire la variabilité chimique** des phases (Si, O, ...) ;

Les **constituants indépendants** (dont les proportions peuvent varier indépendamment les unes des autres) d'un système sont les **espèces chimiques minimales** permettant de **décrire le système** ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ , ...).

Gabbro isotrope



CPx + Plag

**Système** = gabbro

**Phases** = Cpx, Plagioclases

**Constituants des phases**

= Si, Ca, Mg, Al, O

**Constituants indépendants**

=  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ ,  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

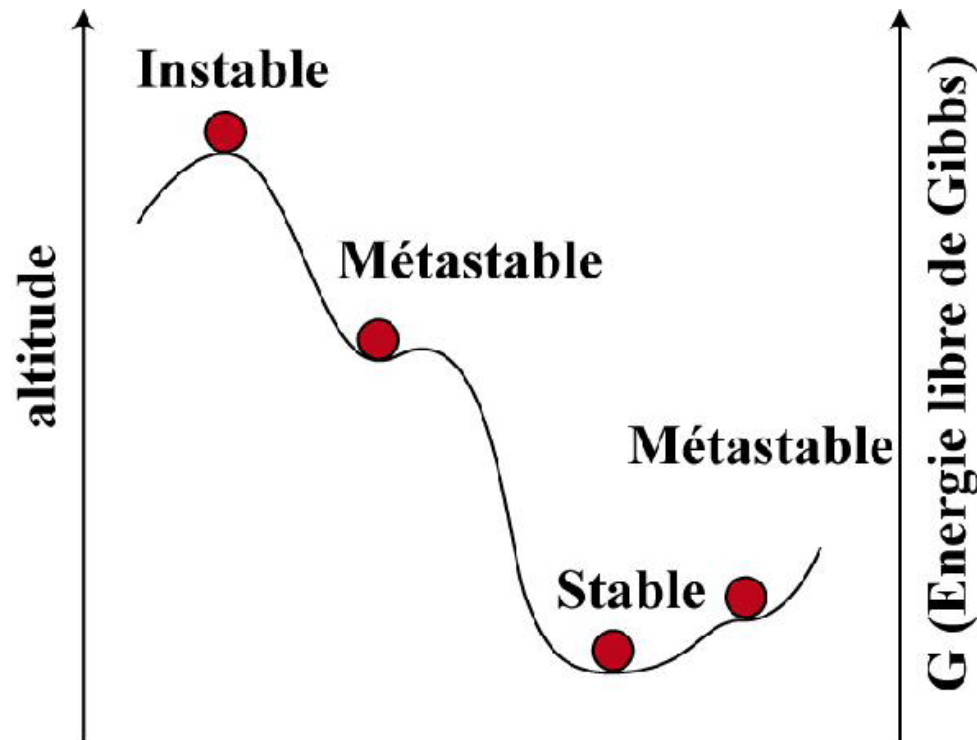
# 1. Rappels thermodynamiques

## 1. Définitions de base: **Stabilité, métastabilité, instabilité**

**Stable** = le système est à l'**équilibre** et dans son **état d'énergie minimum** ;

**Métastable** = le système à l'**équilibre** mais dans une **configuration d'énergie non** minimum ;

**Instable** = le système en **déséquilibre**.



# 1. Rappels thermodynamiques

## 1. Définitions de base: Stabilité, métastabilité, instabilité

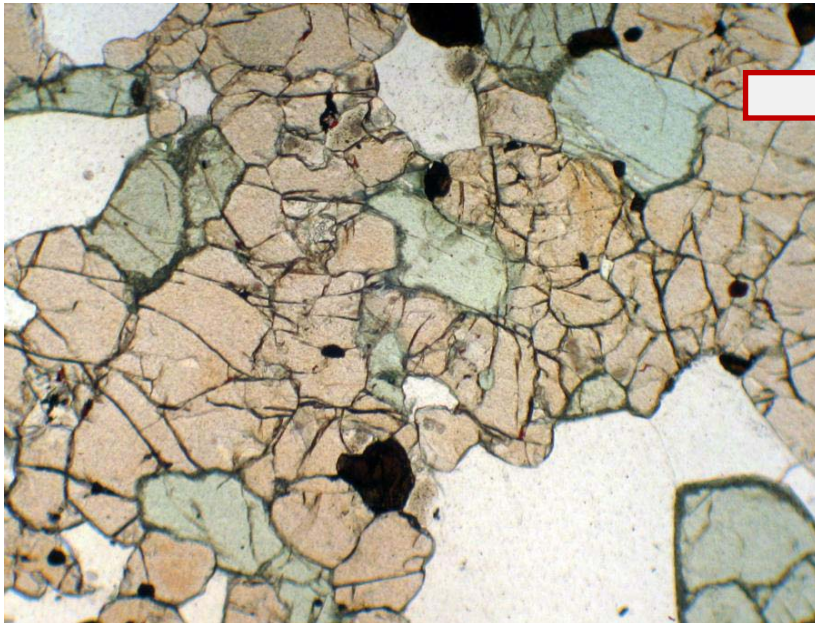
Dans les **conditions d'observations** (20 °C et 1 bar), cette **éclogite** est **métastable** ;

La **paragenèse grt-cpx-qz** subsiste **en dehors** de son **champ de stabilité** ;

Le **système** est en **équilibre** mais **pas** dans sa **configuration d'énergie** minimum ;

Le **passage à un état stable** ne se fera que si les **barrières cinétiques** sont franchies.

Réaction coronitique



Echantillon Pierre Thomas, ENS Lyon

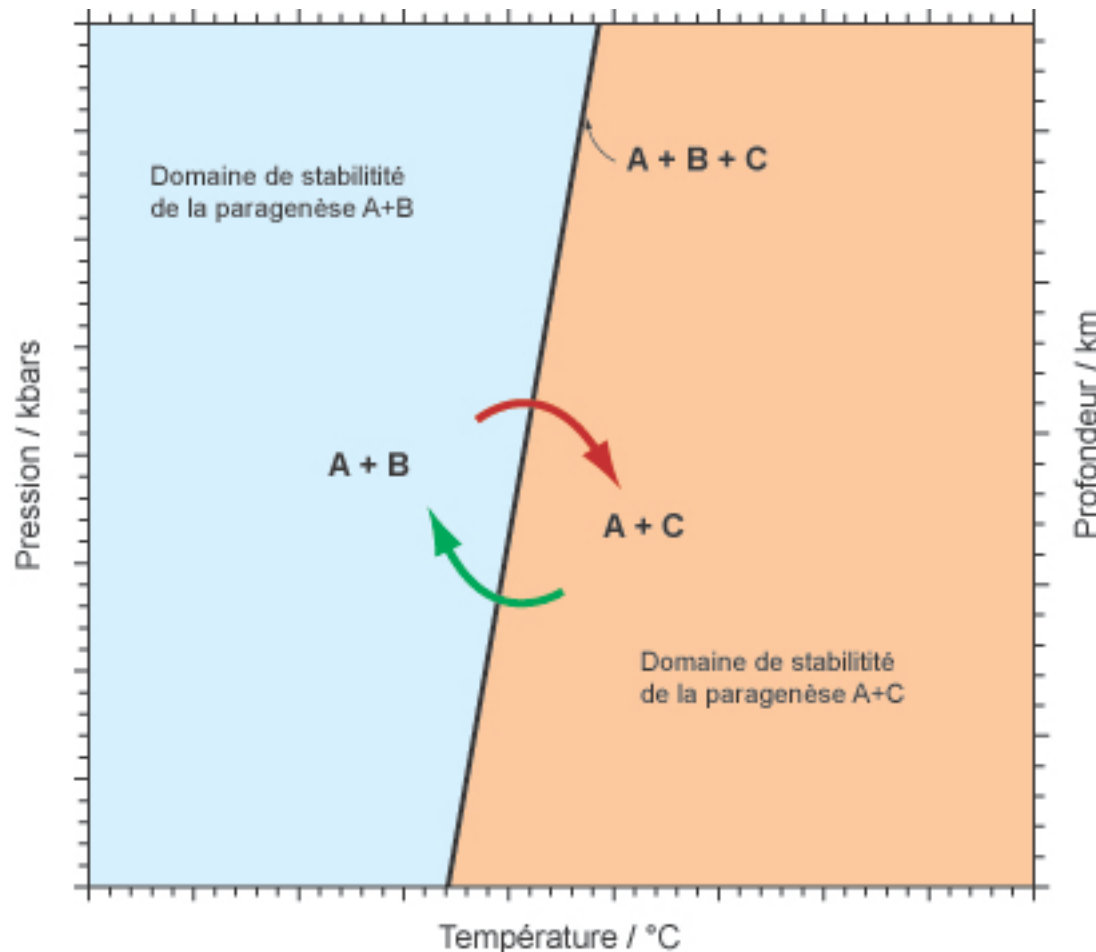
1. Rappels thermodynamiques
2. Réactions métamorphiques



# 1. Rappels thermodynamiques

## 2. Réactions métamorphiques: Paragenèses

**DOMAINES *PT* de STABILITÉ d'ASSEMBLAGES MINÉRAUX,**  
⇒ séparés par des **lignes réactionnelles**, qui marque l'apparition ou la disparition d'une nouvelle phase minérale.



# 1. Rappels thermodynamiques

## 2. Réactions métamorphiques: Types de réactions

### Réactions **polymorphiques**

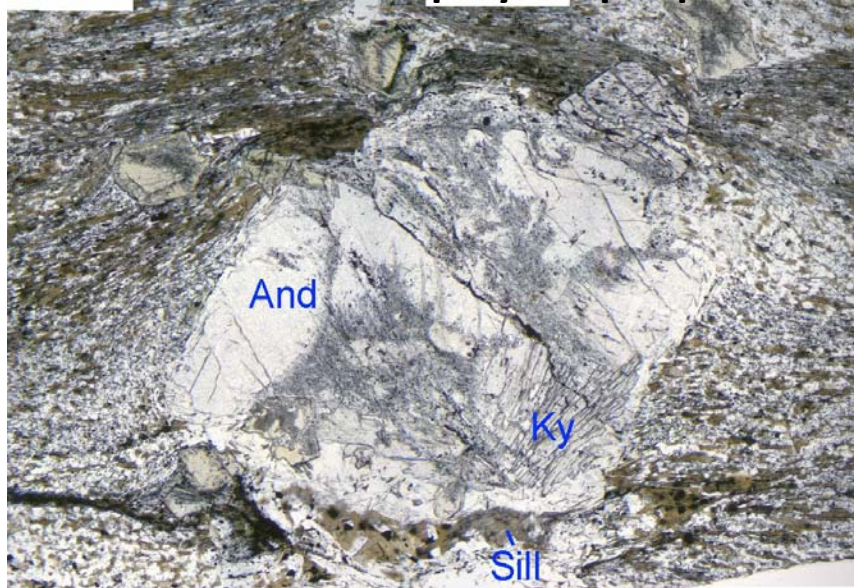
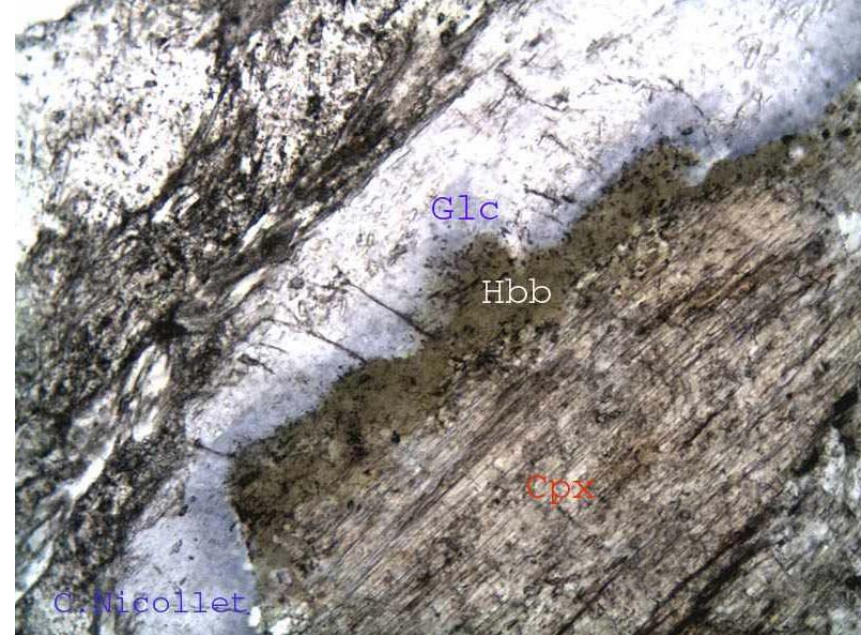
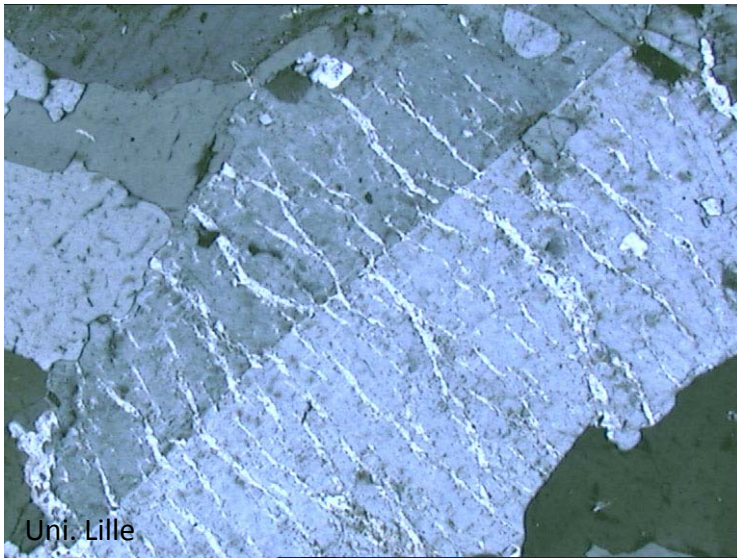


Photo: Pr. K. Hannula

### Réactions **interminérales**



C. Nicollet



Univ. Lille

Réaction d'**exsolution**  
(Feld.K – Plagio)

# 1. Rappels thermodynamiques

## 2. Réactions métamorphiques: **Interprétation thermodynamique**

Dans un **système fermé**, à **composition constante**, l'équilibre à ***P*** et ***T*** est donné lorsque l'**énergie libre *G*** (ou *énergie libre de Gibbs*) est **minimale** avec:

$$G = U - TS + PV$$

**U**, énergie interne

**S**, entropie (nombre de façons dont les constituants atomiques se répartissent dans un minéral)

**V**, volume du minéral ou de l'association de minéraux

En définissant **H**, l'**enthalpie** (ou chaleur spécifique), par  **$H = U + PV$** , on a :

$$G = H - TS$$

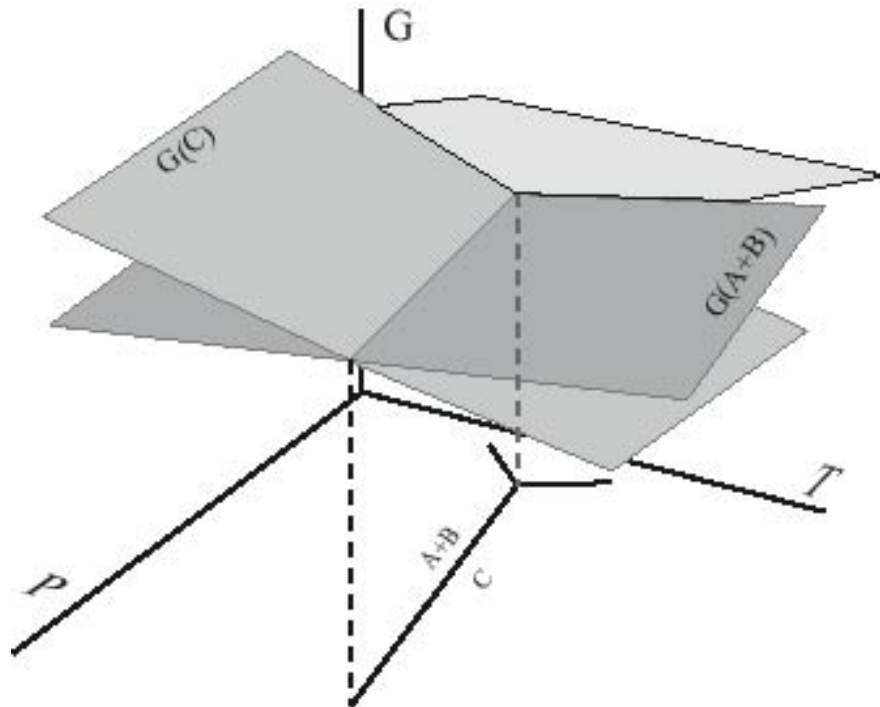
# 1. Rappels thermodynamiques

## 2. Réactions métamorphiques: **Interprétation thermodynamique**

A  **$P$** ,  **$T$**  et **composition chimique** fixées, lorsque plusieurs assemblages sont possibles, **celui qui a l'énergie libre la plus faible est stable** ;

Dans un **diagramme  $PTG$** , on peut définir une surface d'énergie libre pour chaque minéral ou associations de minéraux :

A BT, A+B est stable  
A HT, C est stable





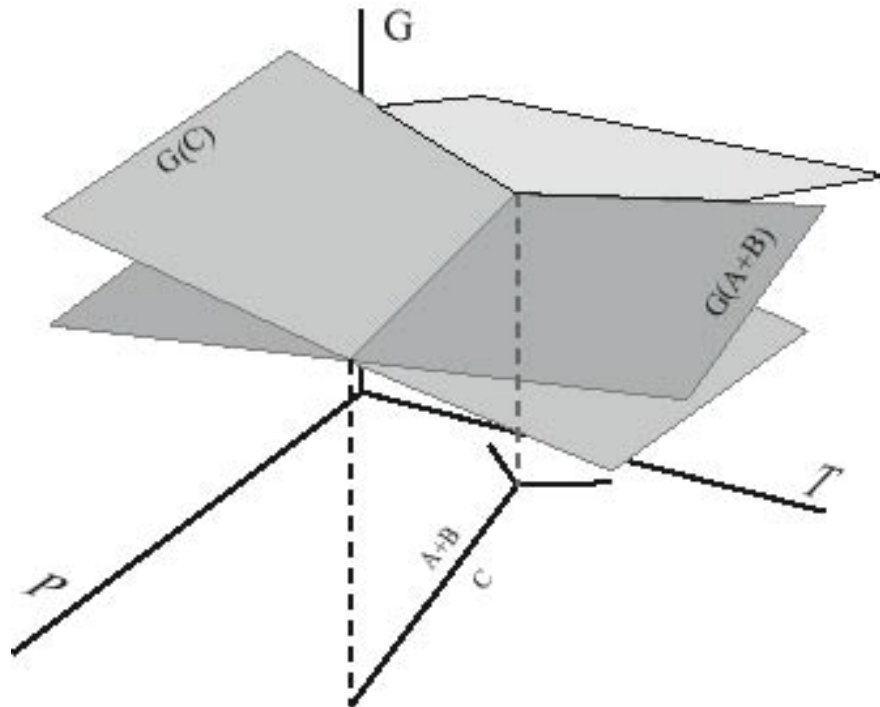
# 1. Rappels thermodynamiques

## 2. Réactions métamorphiques: Interprétation thermodynamique

Le passage du domaine A+B à C, par le biais de la réaction  $A+B=C$ , se fait lorsque  $G_C = G_{A+B}$ , c'est-à-dire lorsque la **variation d'énergie de la réaction**  $\Delta_r G = G_C - G_{A+B} = 0$  ;

**La réaction  $A+B = C$  quand  $\Delta_r G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ = 0$**

A BT, A+B est stable  
A HT, C est stable



# 1. Rappels thermodynamiques

## 2. Réactions métamorphiques: Interprétation thermodynamique

Une **variation de pression**  $\Delta P$  s'accompagne d'une **variation de volume**  $\Delta_r V$  de la réaction:

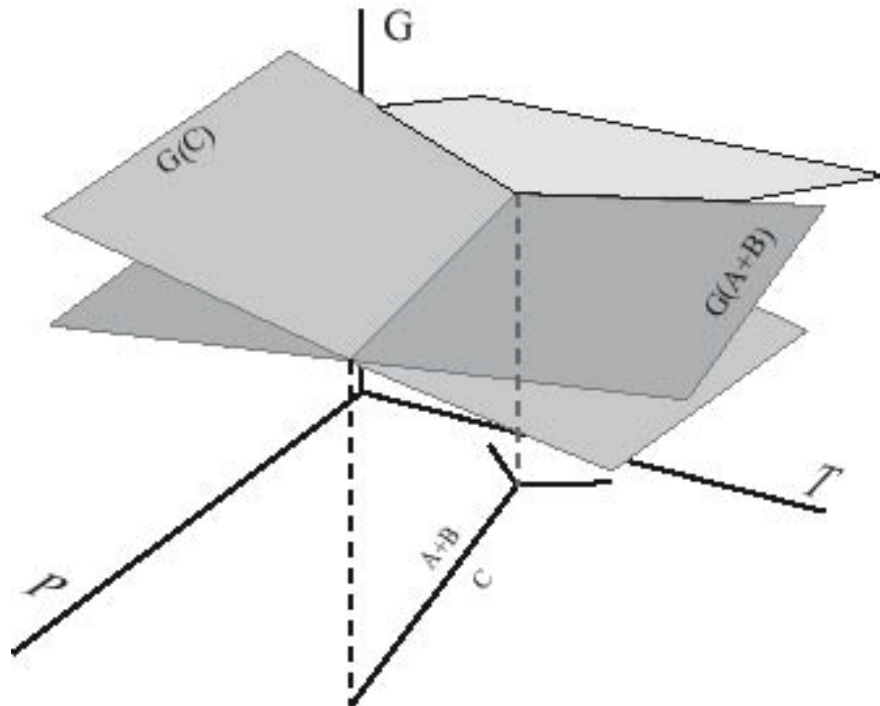
$$\Delta_r G = \Delta_r H^\circ - T\Delta_r S^\circ + \Delta_r V(\Delta P) = 0 \quad \text{avec } \Delta P = P - P^\circ \approx P$$

On peut donc écrire  $\Delta_r G = \Delta_r H^\circ - T\Delta_r S^\circ + P \cdot \Delta_r V = 0$  ou encore  $P = T \cdot (\Delta_r S^\circ / \Delta_r V) - \Delta_r H^\circ / \Delta_r V$

Ceci est l'équation d'une droite du type  $y = ax + b$  dans l'espace  $PT$ .

A BT, A+B est stable

A HT, C est stable



# 1. Rappels thermodynamiques

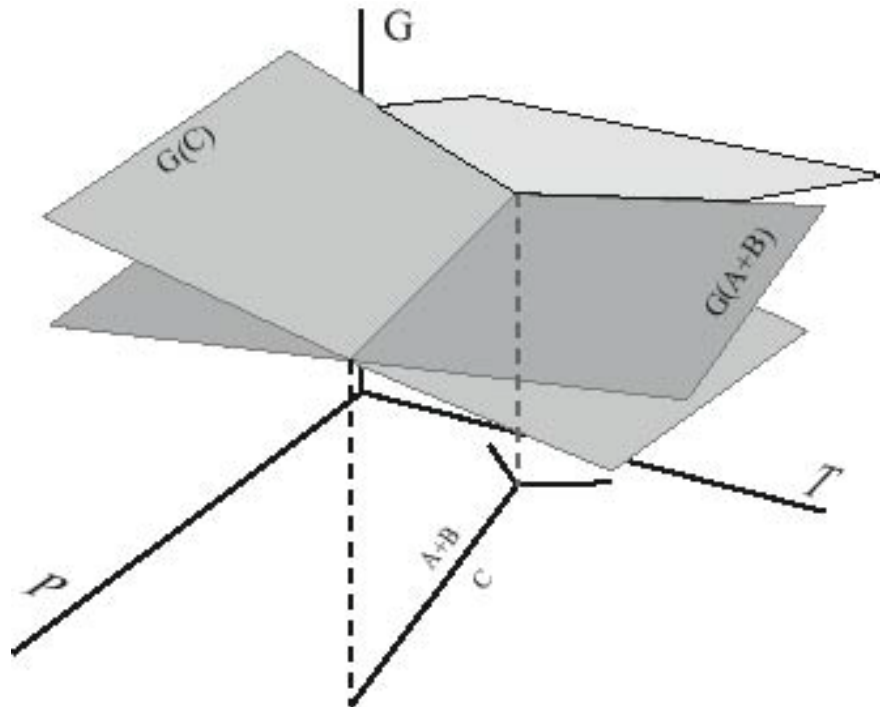
## 2. Réactions métamorphiques: Interprétation thermodynamique

Les valeurs de  $H^\circ$ ,  $S^\circ$  et  $V$  peuvent être **mesurées** et sont **connues** pour les **minéraux**:

**Bases de données thermodynamiques** utilisées dans des codes de calcul (**Perplex**, **Thermocalc**, ...).

A BT, A+B est stable

A HT, C est stable



1. Rappels thermodynamiques
3. La règle des phases (relation de Gibbs)



# 1. Rappels thermodynamiques

## 3. La règle des phases: énoncé

La **règle des phases** permet de prédire les **paragenèses des domaines divariants** de l'espace  $P$ - $T$  pour un **système chimique donné** et pour une **gamme de minéraux fixés**.

Elle guide à la **construction des grilles pétrogénétiques** constituées de **réactions minéralogiques** qui limitent les **domaines de stabilité** des différentes paragenèses.

# 1. Rappels thermodynamiques

## 3. La règle des phases: énoncé

On définit la **variance (nombre de degrés de liberté)** d'un système par la **règle des phases (relation de Gibbs)** :

$$V = k - \varphi + 2$$

**v** = **variance** ou **degrés de liberté** du système. C'est le **nombre de variables intensives pouvant varier de manière indépendante**, dans un domaine de valeur limité, **sans provoquer de changement de phase dans le système**. C'est aussi le nombre de variables indépendantes à fixer pour connaître précisément l'état du système ;

**k** = **nombre de constituants indépendants**. **Nombre minimum** de constituants permettant de décrire l'ensemble des phases présentes dans le système ;

**φ** = **nombre de phases distinctes** dans le système ;

**2** = **variables intensives qui permettent de caractériser le système à un moment donné**. En général, en géologie, on a recours à 2 variables intensives indépendantes : **P** et **T** (cf relation de Gibbs-Duhem).

# 1. Rappels thermodynamiques

## 3. La règle des phases: **variance**

Dans l'**espace  $P$ - $T$** , les domaines où

**$V = 0$**   $\Rightarrow$  0 degré de liberté (**points invariants**)

Il existe un couple unique  $TP$  où toutes les phases coexistent

**$V = 1$**   $\Rightarrow$  1 degré de liberté (**courbes monovariantes/univariantes de costabilité**)

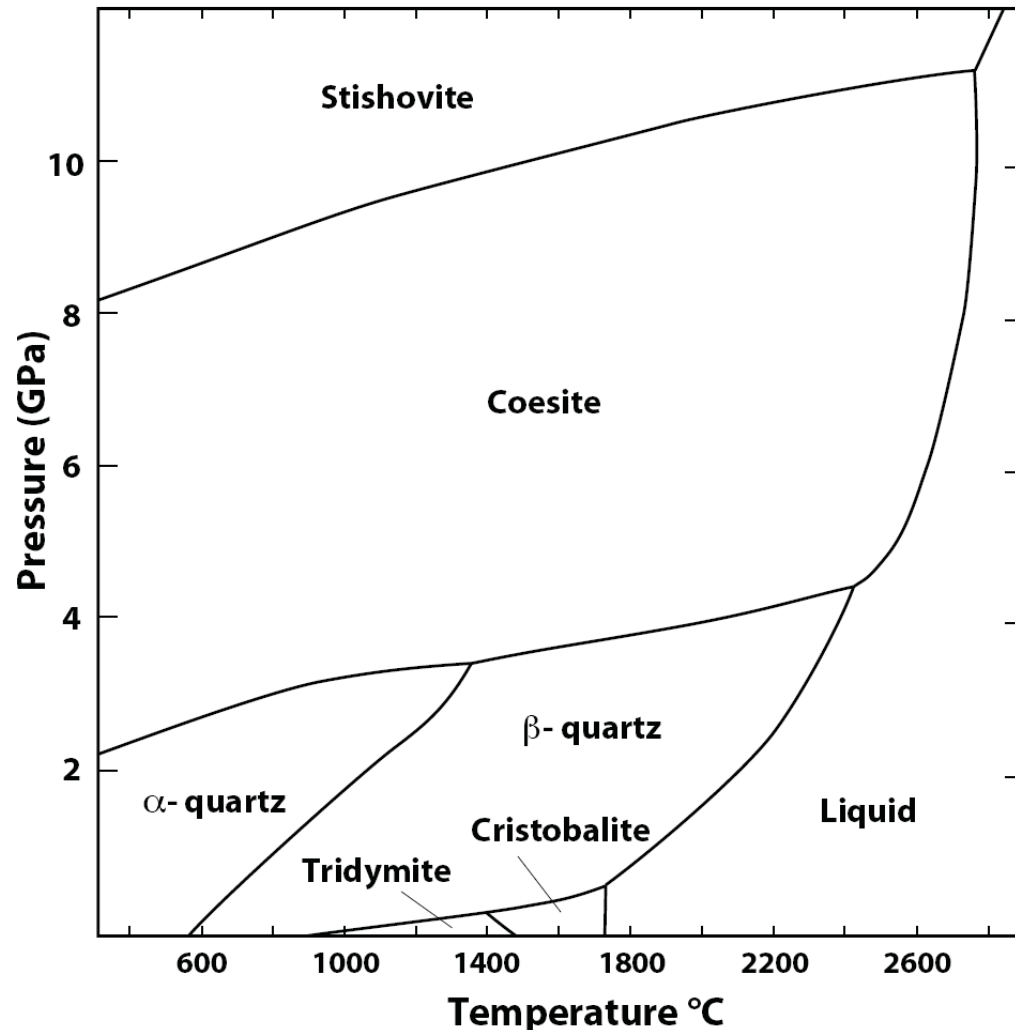
Si un paramètre est fixé ( **$T$** ), il n'existe qu'une valeur de l'autre paramètre ( **$P$** )

**$V = 2$**   $\Rightarrow$  2 degrés de liberté (**surfaces divariantes**),

Dans un certain domaine de valeurs, on peut changer  $P$  et  $T$  sans déstabiliser la/les phases à l'équilibre

# 1. Rappels thermodynamiques

## 3. La règle des phases: Exercice polymorphes $\text{SiO}_2$



### 1. Description du système

Combien de polymorphes de  $\text{SiO}_2$  sont représentés ?

Quelles sont les variables intensives ?

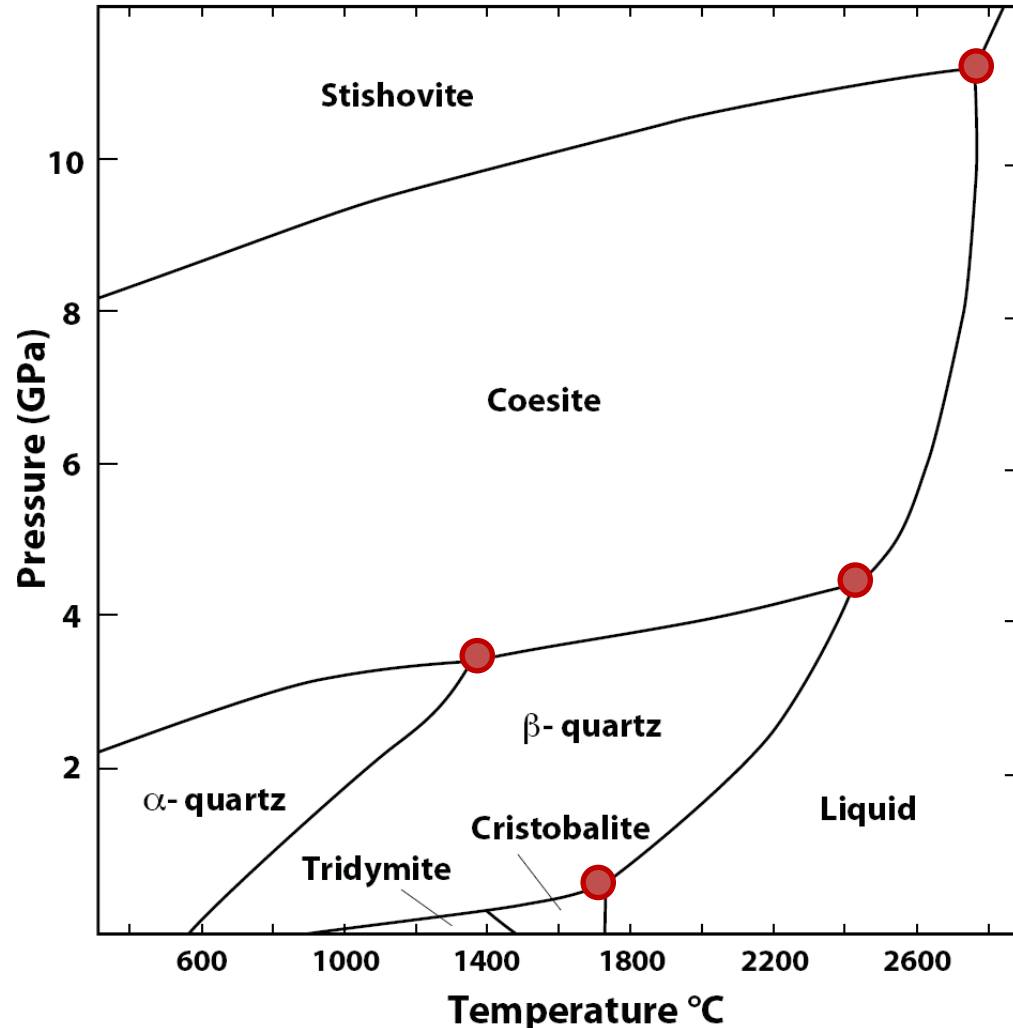
Combien y-a-t-il de constituants indépendants ?

Combien y-a-t-il de phases possibles dans ce système ?

### 2. A l'aide de la règle des phases, décrire le diagramme

# 1. Rappels thermodynamiques

## 3. La règle des phases: Exercice polymorphes $\text{SiO}_2$



### 1. Description du système

Combien de polymorphes de  $\text{SiO}_2$  sont représentés ?

Quelles sont les variables intensives ?

Combien y-a-t-il de constituants indépendants ?

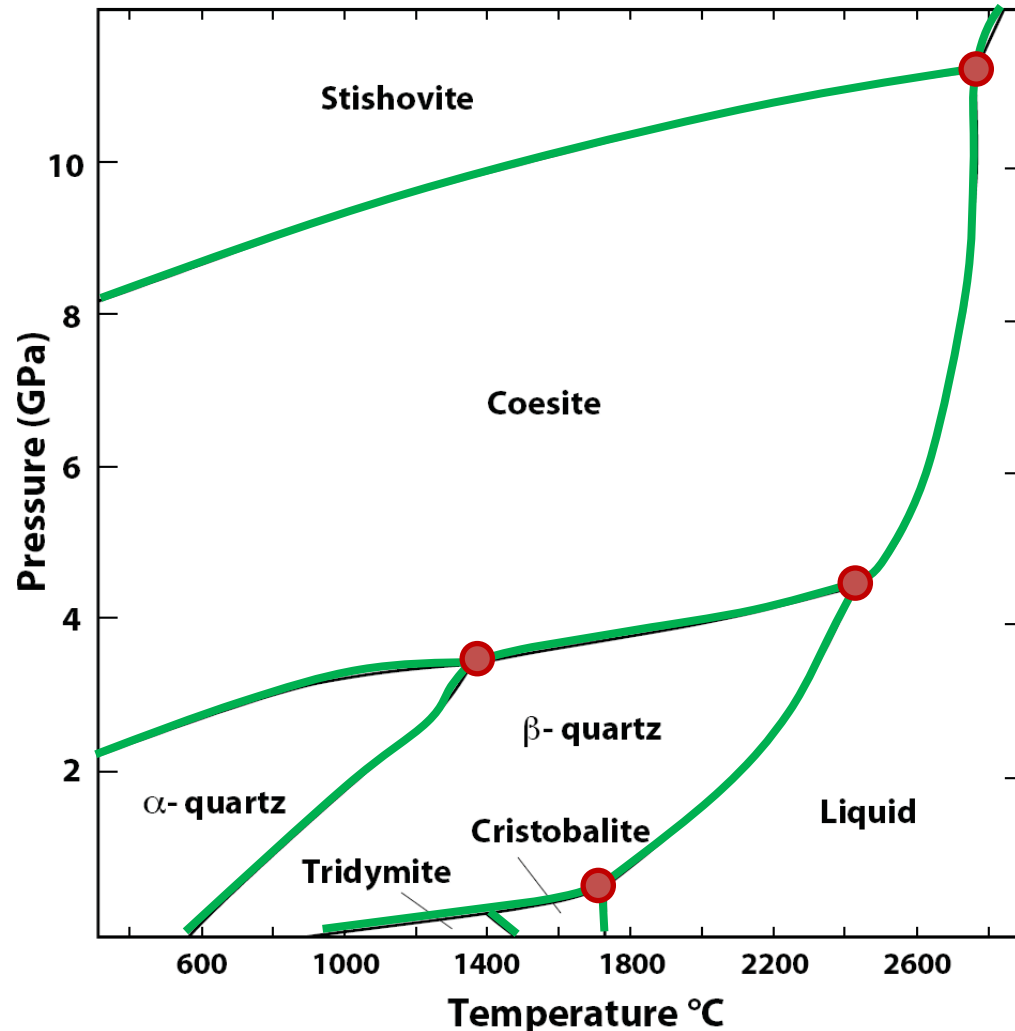
Combien y-a-t-il de phases possibles dans ce système ?

### 2. A l'aide de la règle des phases, décrire le diagramme



# 1. Rappels thermodynamiques

## 3. La règle des phases: Exercice polymorphes $\text{SiO}_2$



### 1. Description du système

Combien de polymorphes de  $\text{SiO}_2$  sont représentés ?

Quelles sont les variables intensives ?

Combien y-a-t-il de constituants indépendants ?

Combien y-a-t-il de phases dans ce système ?

### 2. A l'aide de la règle des phases, décrire le diagramme

Réactions polymorphiques à 1 constituant

Comment faire lorsque l'on passe à des systèmes plus complexes ?

# 1. Rappels thermodynamiques

## 3. La règle des phases: Hypothèses implicites

### THERMODYNAMIQUE à l'ÉQUILIBRE :

⇒ Les **systèmes géologiques** ont suffisamment de **temps** pour être **naturellement équilibrés** ;

### SYSTÈMES FERMÉS :

⇒ La **masse** du système reste globalement **constante** ;

⇒ Le **système est libre** de **consommer** ou **libérer** de l'**énergie** pour faire du **travail** ;

### ENERGIE :

⇒ Pour les systèmes géologiques, la **chaleur** et le **travail** sont considérés comme les **contributions énergétiques principales** du système ;

⇒ Autres facteurs externes non pris en compte (électriques, magnétiques, ...);

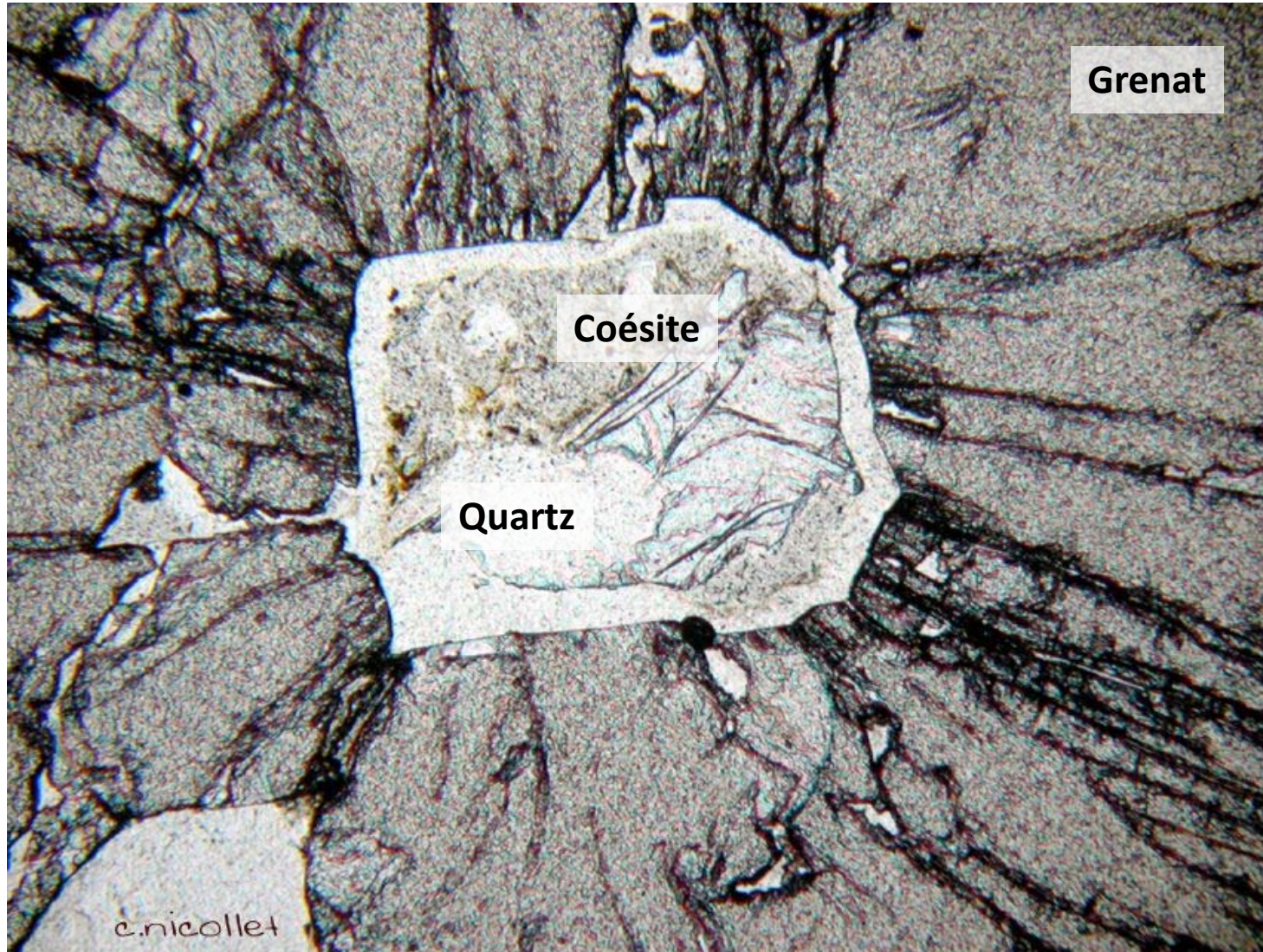
⇒ **Energies de surface** et **effets aux limites de grains** ne sont **pas considérés** ;

### CINÉTIQUE :

⇒ **Aucun effet cinétique** n'est considéré.

# 1. Rappels thermodynamiques

## 3. La règle des phases: **Hypothèses implicites**



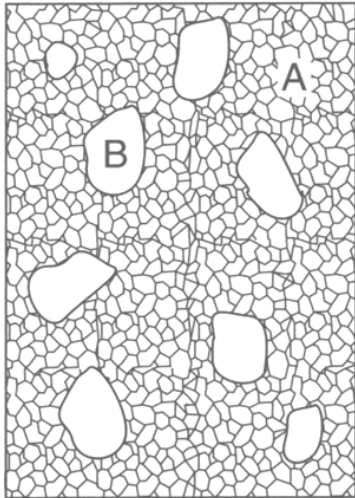
## 2. Représentation graphique des paragenèses

### 1. Diagrammes ACF, A'KF et AFM

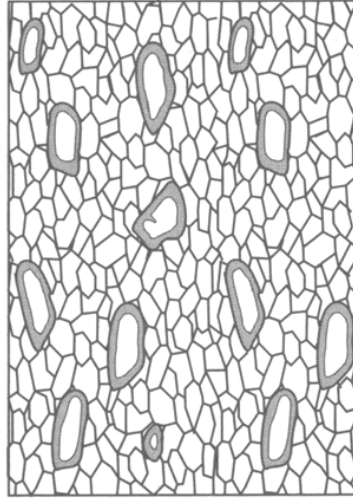


## 1. Diagrammes ACF, A'KF et AFM: Système à 2 constituants

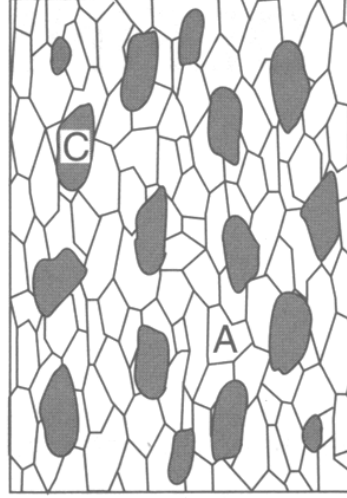
À P0-T0 la roche contient  
les minéraux A + B



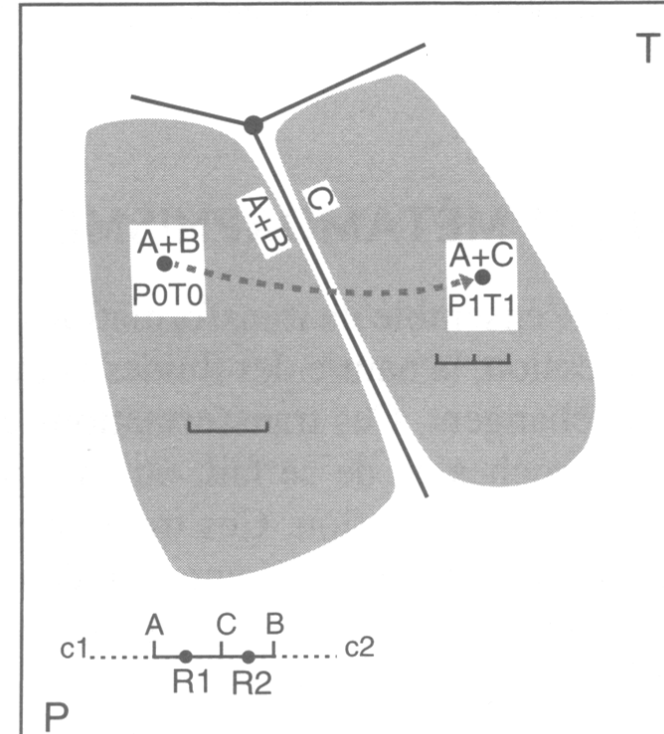
À P1-T1, la réaction  
 $A + B = C$  intervient...



... jusqu'à disparition  
de B.



Principes de la recristallisation métamorphique (d'après Nicollet, 2010).

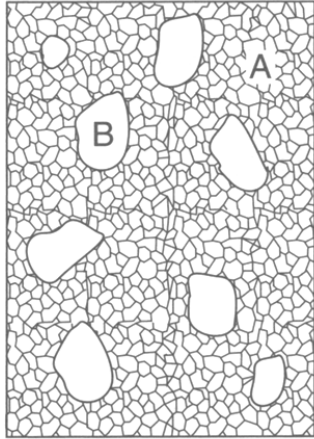




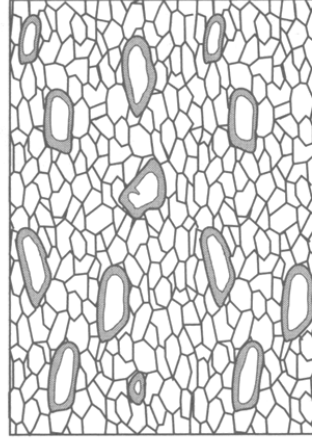
## 2. Représentation graphique des paragenèses

### 1. Diagrammes ACF, A'KF et AFM: Système à 2 constituants

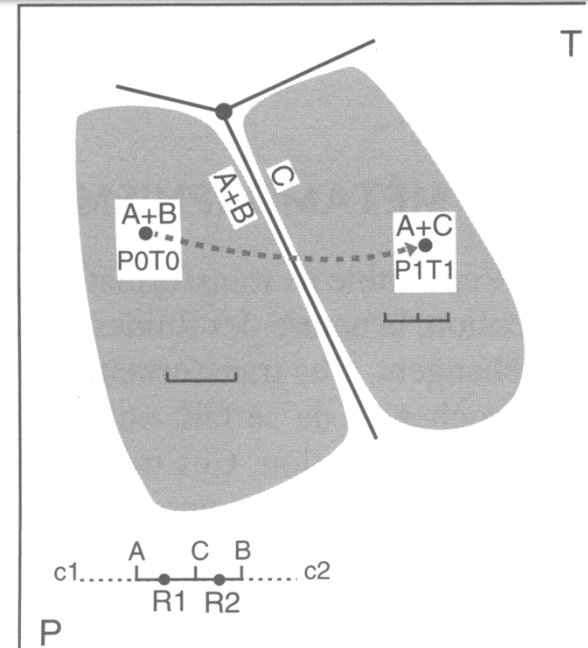
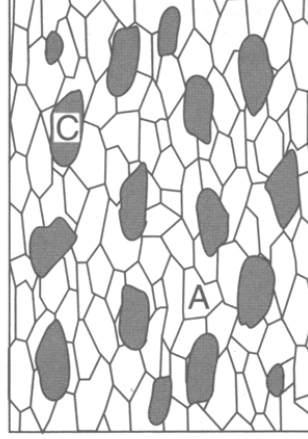
À P0-T0 la roche contient les minéraux A + B



À P1-T1, la réaction  $A + B = C$  intervient...



... jusqu'à disparition de B.



Assemblage **divariant** de 2 minéraux A-B est **remplacé** par un autre assemblage **divariant** A-C ;  
On passe par un **assemblage univariant** à 3 phases A-B-C lors de la réaction  $A+B=C$  ;

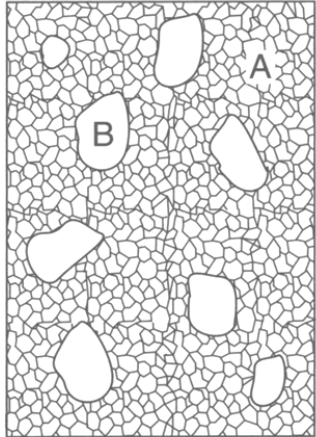
La **règle des phases** nous dit que ce **système contient 2 constituants chimiques indépendants** (c1 et c2) ;

Le **nombre de constituants chimiques indépendants** est donc une **contrainte majeure** qui **contrôle la minéralogie** d'une roche métamorphique :

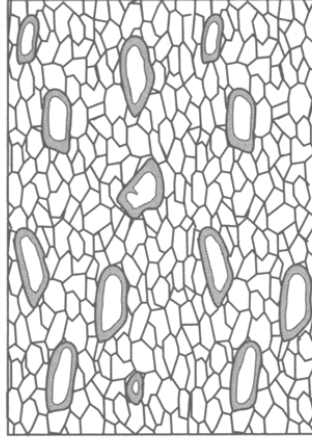
⇒ des **représentations graphiques** des **paragenèses minéralogiques** sont élaborées en fonction du **nombre de constituants indépendants**

## 1. Diagrammes ACF, A'KF et AFM: Système à 2 constituants

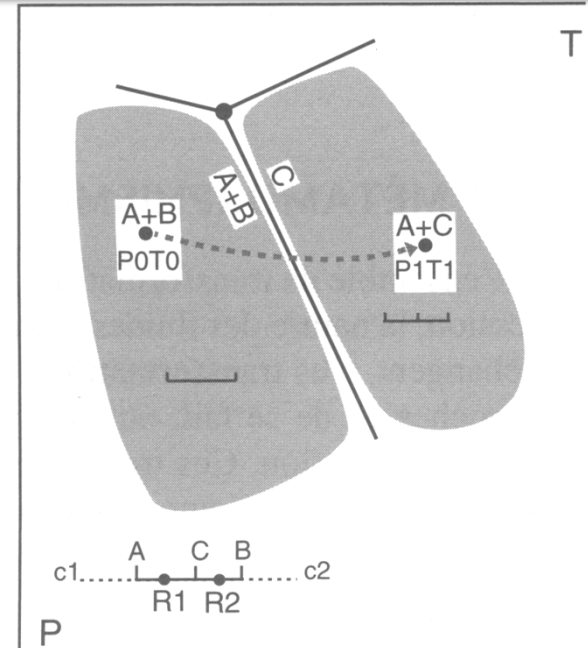
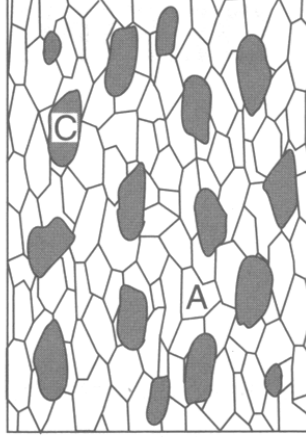
À P0-T0 la roche contient  
les minéraux A + B



À P1-T1, la réaction  
 $A + B = C$  intervient...



... jusqu'à disparition  
de B.



**Prédiction des paragenèses** des roches susceptibles de contenir les phases A, B et C dans les conditions **P0-T0** et **P1-T1**:

⇒ **Compositions** des **minéraux** et des **roches** les contenant visualisées sur un **segment** matérialisant les **variations** respectives de 2 constituants **c1** et **c2** ;

⇒ Cette **représentation** est en **accord** avec la  **règle des phases**  ;

⇒ Ces **segments** reportés dans les deux **champs divariants** permettent de prédire les **paragenèses** possibles ;

⇒ A BT, 1 seule paragenèse est possible quelque soit la composition de R ;

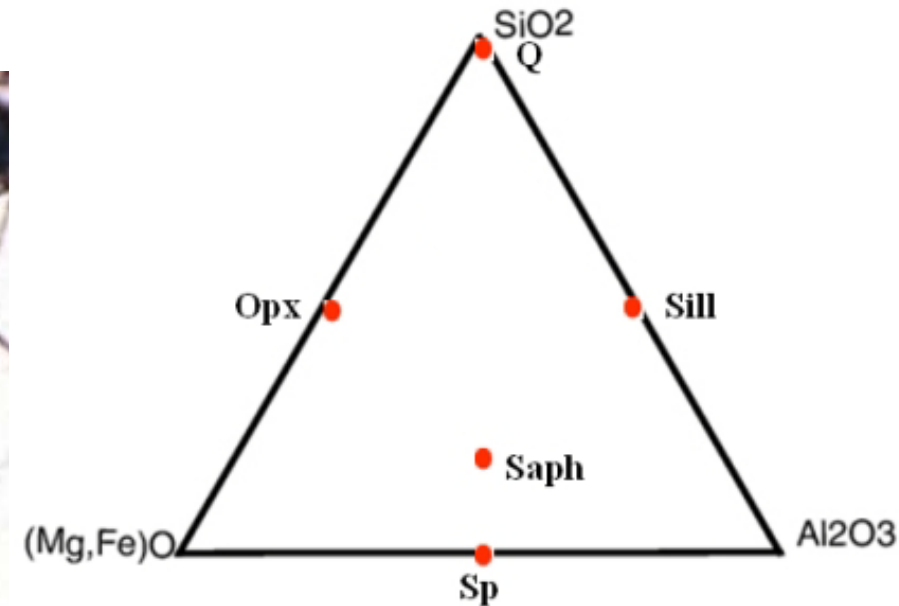
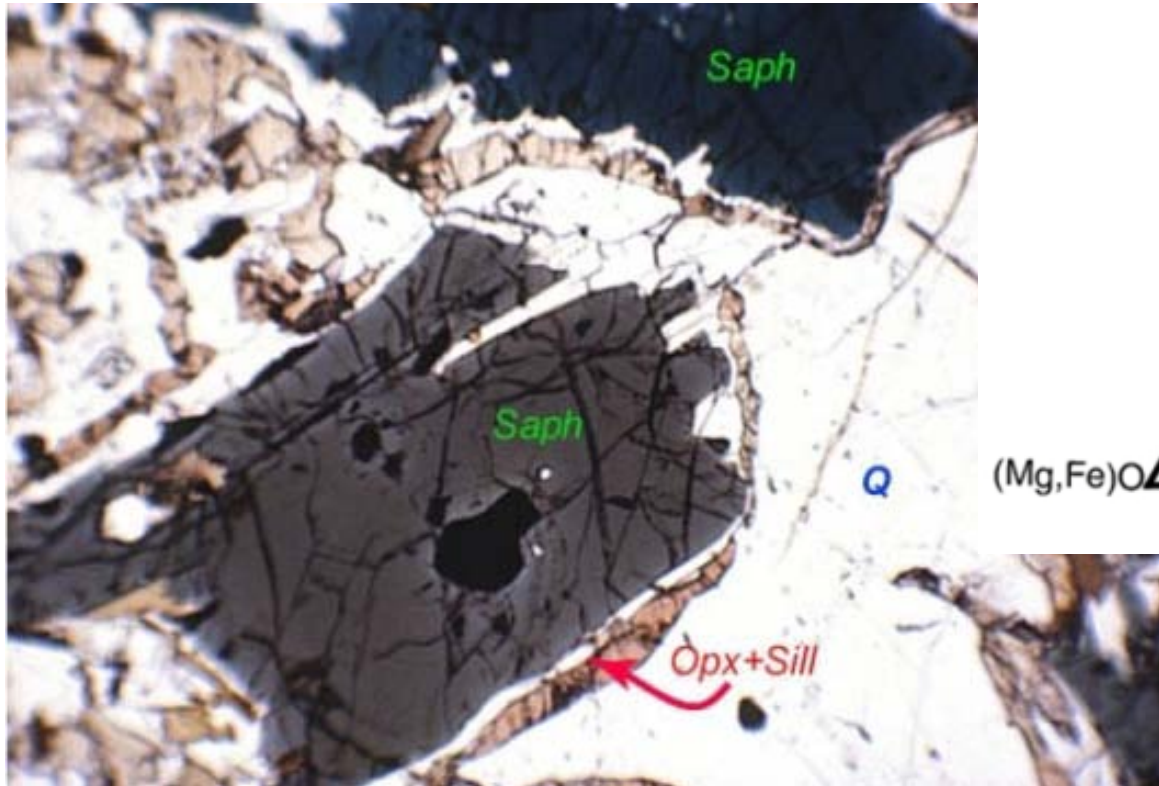
⇒ A HT, 2 paragenèses possibles en fonction de la **chimie** de la roche **R1** ou **R2**.

## 2. Représentation graphique des paragenèses

### 1. Diagrammes ACF, A'KF et AFM: **Système à 3 constituants**

3 constituants indépendants  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$

Les **variations de composition chimique** ainsi que les **pôles purs des différents minéraux** sont reportés dans un **triangle**.



Granulites alumineuses de la région d'Andriamena à Madagascar (C. Nicollet)

# 2. Représentation graphique des paragenèses

## 1. Diagrammes ACF, A'KF et AFM: **Système à 3 constituants**

La **roche C1** contient **Opx** + **Sill** + **Q**

La **roche C2** contient **Opx** + **Saph** + **Q**

Les **compositions chimiques** de ces **roches** sont données dans le tableau suivant :

|                                | <b>C 1</b> | <b>C2</b> |
|--------------------------------|------------|-----------|
| SiO <sub>2</sub>               | 66,00      | 66,30     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 27,00      | 12,00     |
| FeO                            | 3,00       | 12,27     |
| MnO                            | 0,02       | 0,07      |
| MgO                            | 4,00       | 7,40      |
| CaO                            | 0,36       | 0,12      |
| Na <sub>2</sub> O              | 0          | 0,05      |
| K <sub>2</sub> O               | 0,00       | 0,8       |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,50       | 1,10      |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,06       | 0,44      |
| PF                             | 0,09       | 0,20      |
| Total                          | 100,90     | 100,75    |

**SiO<sub>2</sub>**, **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**, **FeO** et **MgO** constituent **plus de 95%** de la roche ;

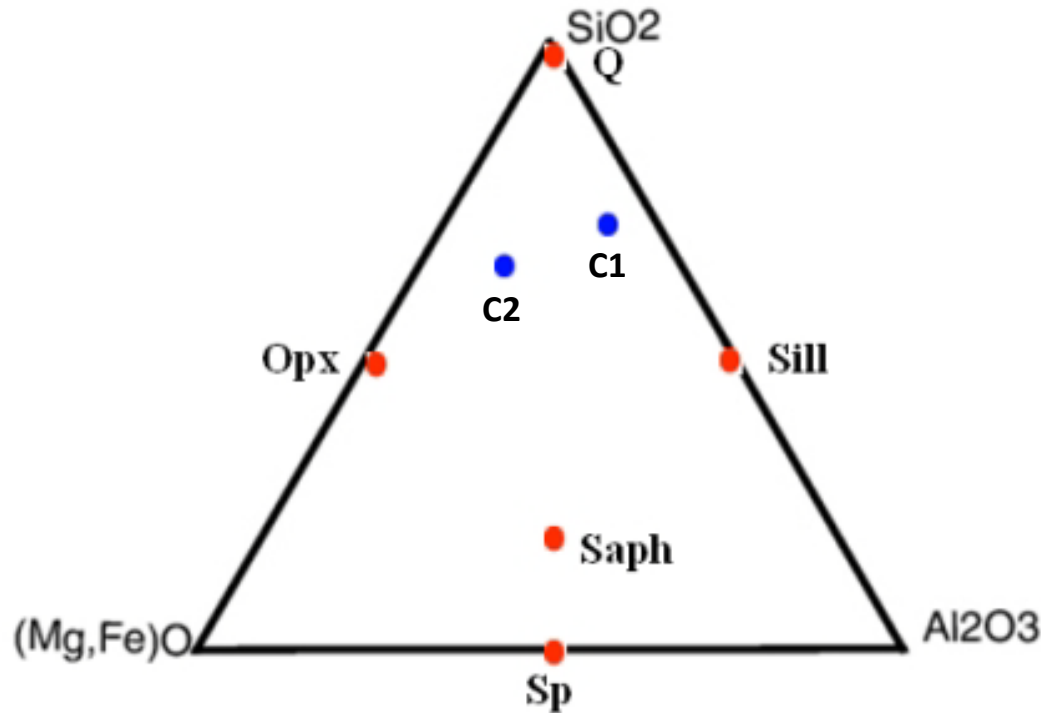
**Fe** et **Mg** sont des cations équivalents, **facilement interchangeables**  $\Rightarrow$  **solutions solides** (ex. Olivine, pyroxènes, ...)

Le **système** peut être **simplifié** à **SiO<sub>2</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – (Mg,Fe)O**

## 2. Représentation graphique des paragenèses

### 1. Diagrammes ACF, A'KF et AFM: Système à 3 constituants

Les compositions de **C1** et **C2** sont représentées par 2 points (bleu) dans un diagramme triangulaire simplifié  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Mg, Fe})\text{O}$  qui permet de représenter les minéraux possibles (rouge) pour ce système chimique :

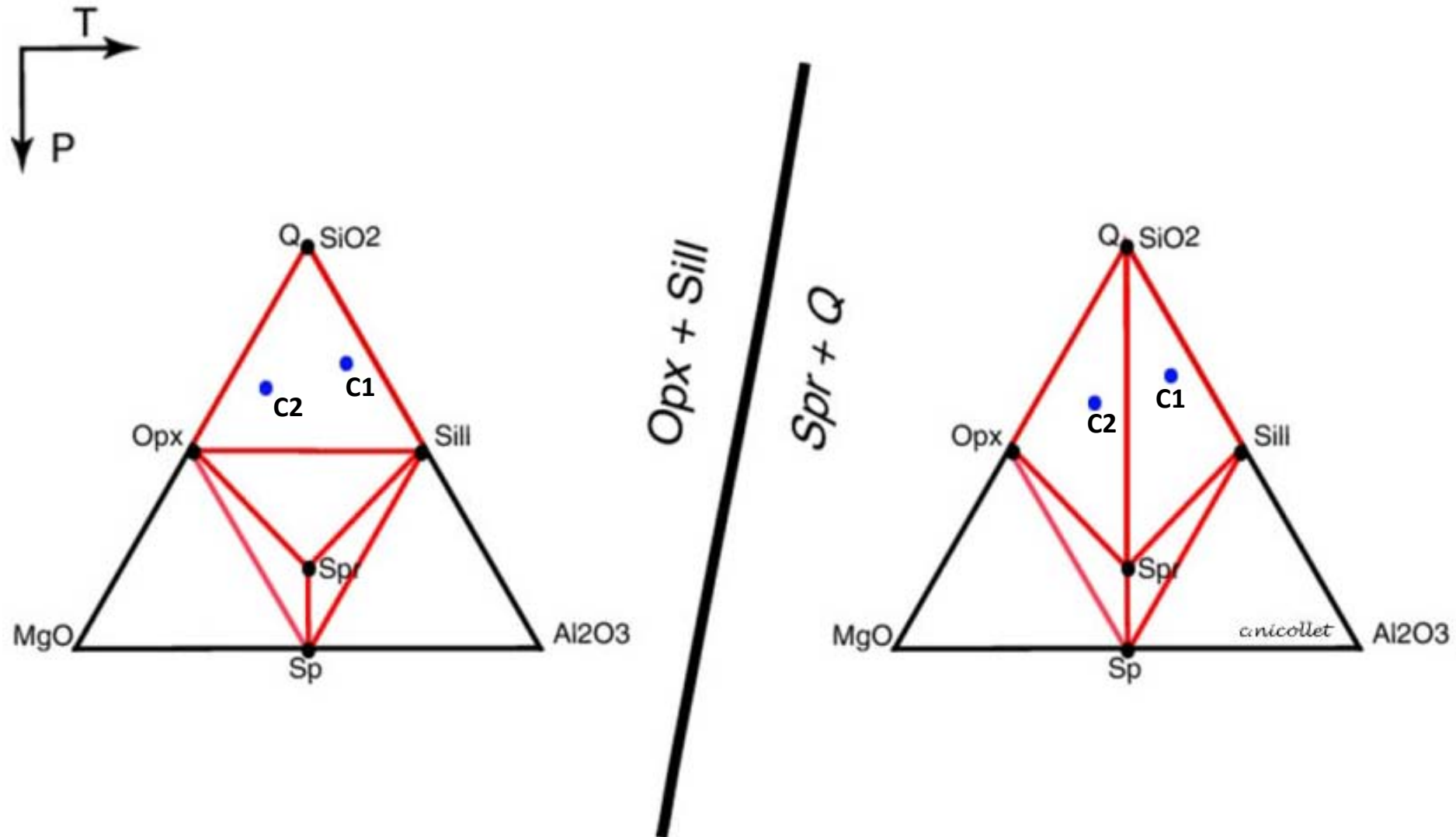


La règle des phases nous dit que le nombre de phases présentes à l'équilibre (domaines divariants) est égal au nombre de constituants indépendants (ici 3 minéraux).



## 2. Représentation graphique des paragenèses

### 1. Diagrammes ACF, A'KF et AFM: **Système à 3 constituants**

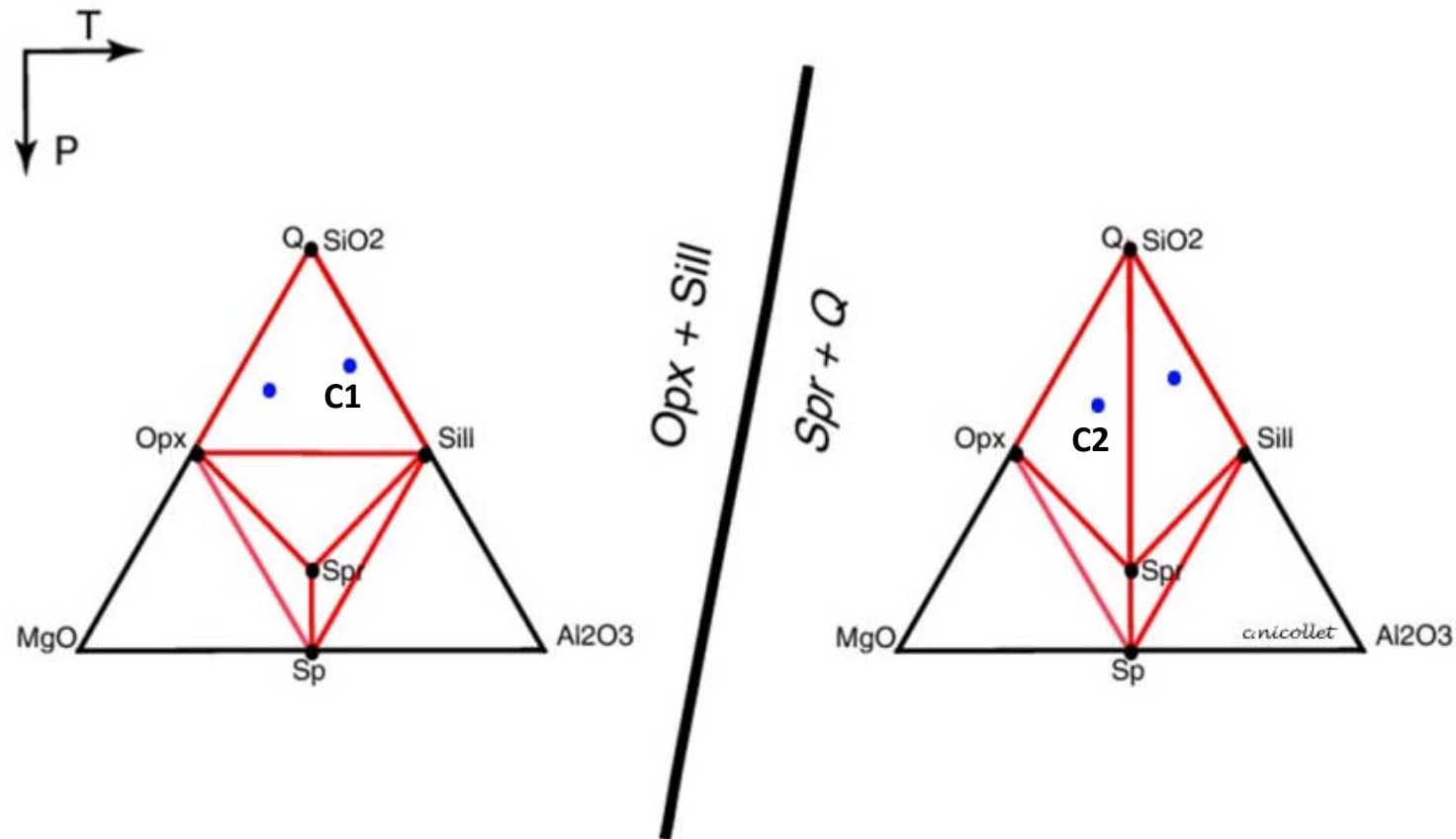


## 2. Représentation graphique des paragenèses

### 1. Diagrammes ACF, A'KF et AFM: **Système à 3 constituants**

La paragenèse **Opx + Sill + Q** de **C1** montre qu'elle s'est formée dans les **conditions  $P$ - $T$**  du **domaine divariant de gauche** ;

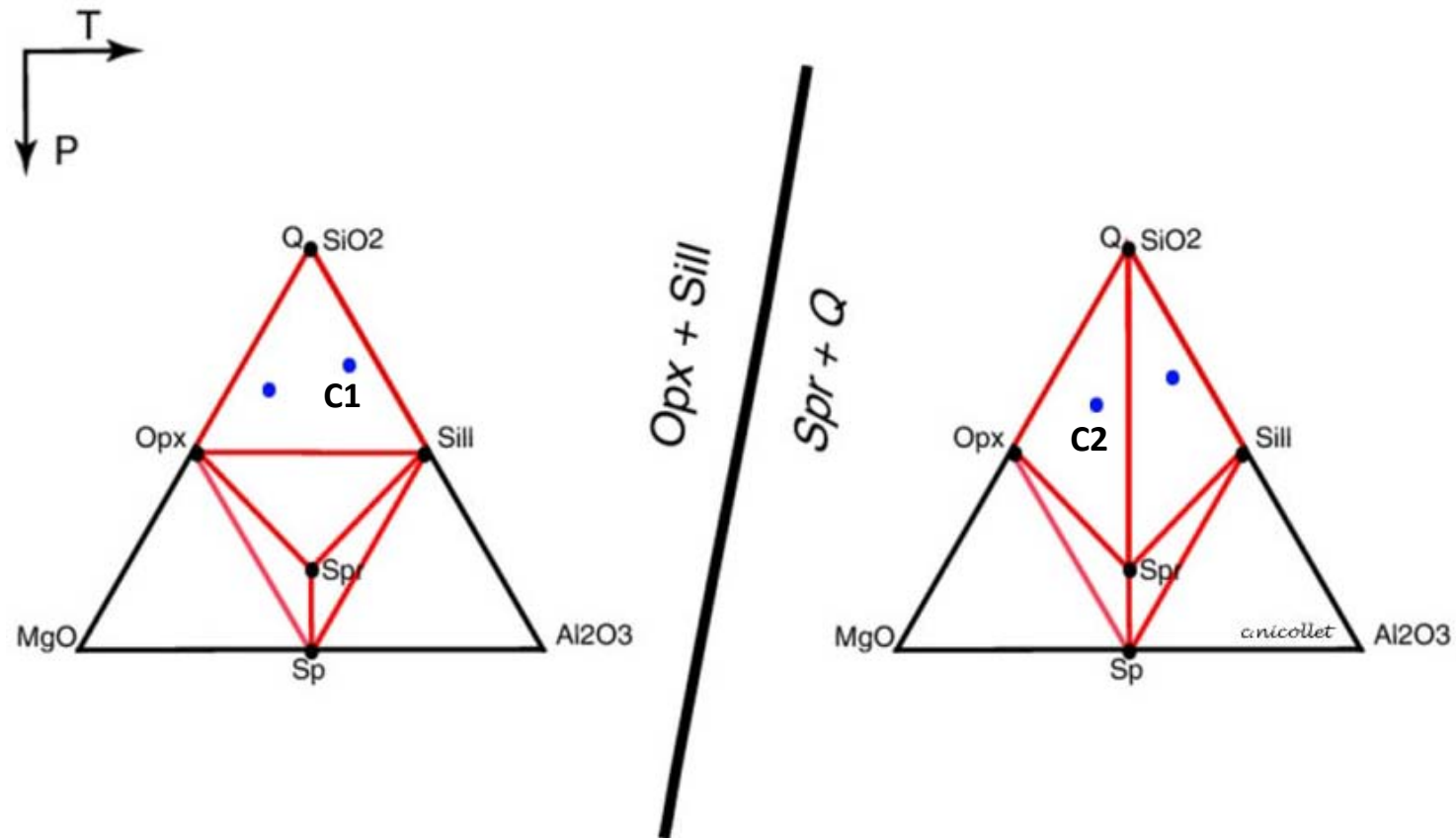
La paragenèse **Opx + Saph + Q** de **C2** montre qu'elle s'est formée dans les **conditions  $P$ - $T$**  du **domaine divariant de droite**.



## 2. Représentation graphique des paragenèses

### 1. Diagrammes ACF, A'KF et AFM: **Système à 3 constituants**

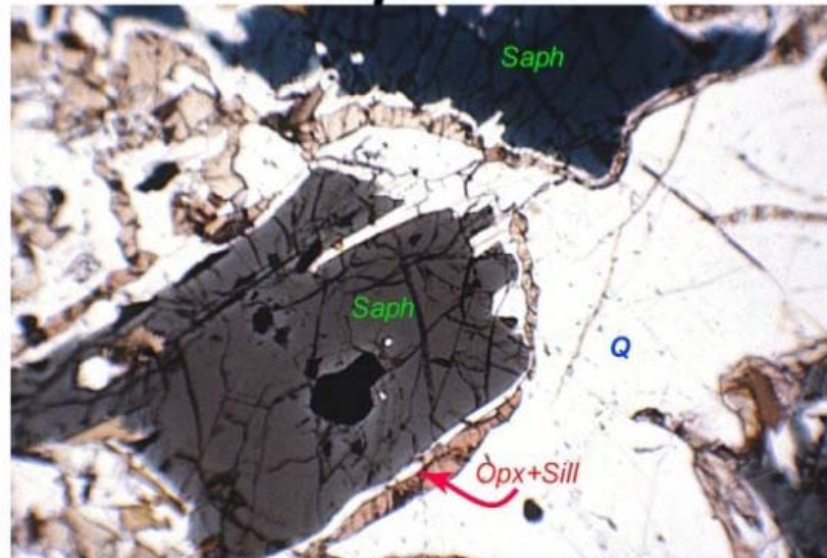
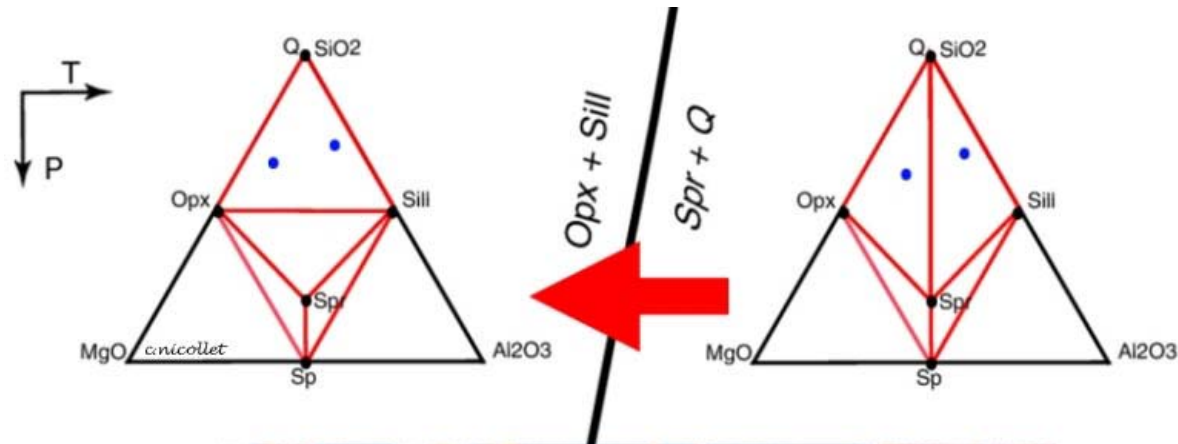
Ainsi, la simple **lecture** de cette figure montre que ces **2 roches** se sont formées dans des **conditions *P-T* différentes**.



## 2. Représentation graphique des paragenèses

### 1. Diagrammes ACF, A'KF et AFM: Système à 3 constituants

**Saphirine** et **quartz** étaient en contact **en équilibre** dans le **domaine divariant** de droite à **HT** ; Ils sont maintenant séparés par une **couronne** de **sillimanite** et d'**Opx**, suggérant un passage dans le **domaine divariant** de **BT**.



# 2. Représentation graphique des paragenèses

## 1. Diagrammes ACF, A'KF et AFM: Système à n constituants

Il est **rare** que la chimie d'une **roche** soit simplifiée par **3 constituants indépendants**.

Pour les **métabasites**, la **composition totale** est approchée par **5 constituants indépendants**:

**SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, MgO et CaO**

Il est cependant **difficile** de **représenter graphiquement** les **variations de 5 éléments**:

**Fe** et **Mg** sont des **constituants isomorphes**:

l'ajout d'un constituant n'augmente pas  
forcément le nombre de phases (**solutions solides**),  
en première approche un seul constituant  
(**Fe+Mg**)O est considéré.

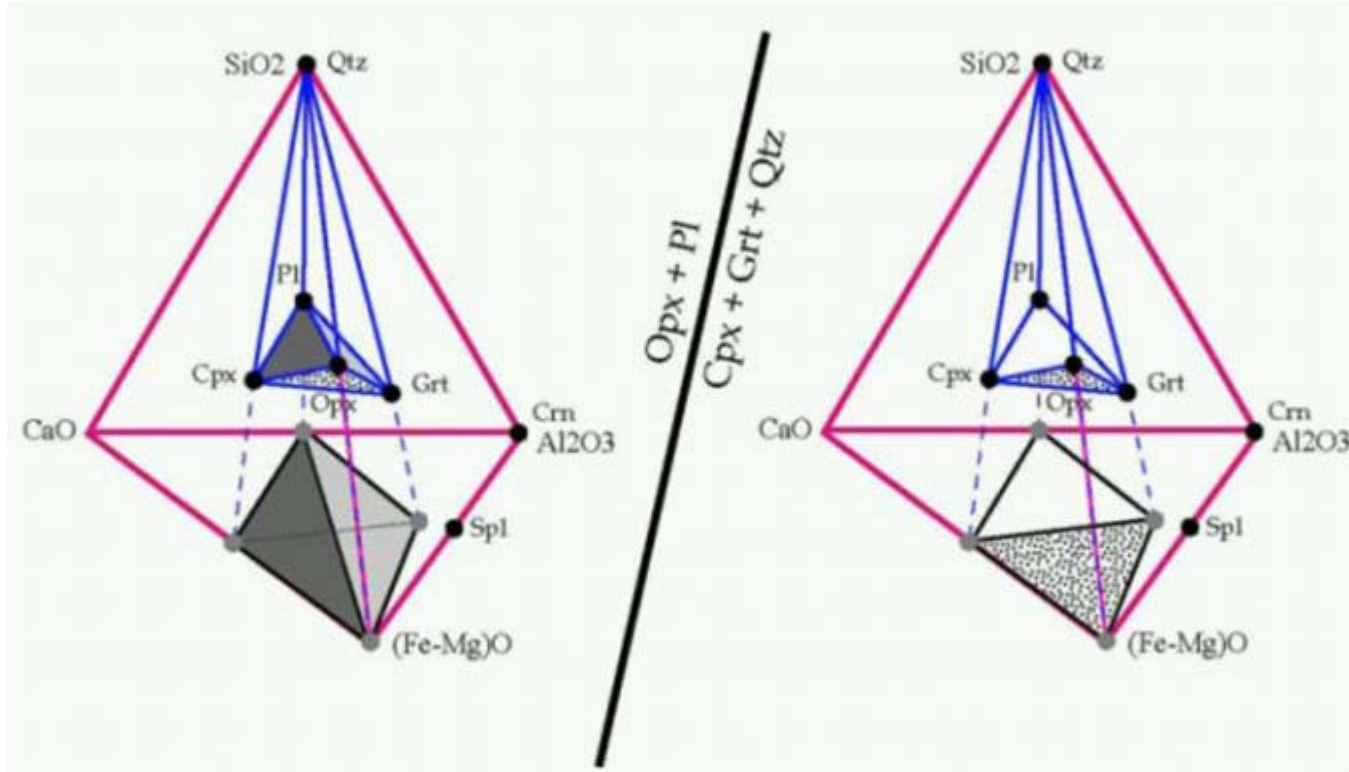
|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| SiO <sub>2</sub>               | 54·7   |
| TiO <sub>2</sub>               | 0·30   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 16·4   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2·47   |
| FeO                            | 7·61   |
| MnO                            | 0·17   |
| MgO                            | 6·38   |
| CaO                            | 9·74   |
| Na <sub>2</sub> O              | 1·41   |
| K <sub>2</sub> O               | 0·21   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0·025  |
| H <sub>2</sub> O+              | 1·52   |
| H <sub>2</sub> O-              | 0·12   |
| Total                          | 101·05 |



## 2. Représentation graphique des paragenèses

### 1. Diagrammes ACF, A'KF et AFM: Système à n constituants

Il reste encore **4 constituants** à représenter dans un **tétraèdre**:



Les paragenèses à spinelle ne sont pas montrées pour plus de clarté:

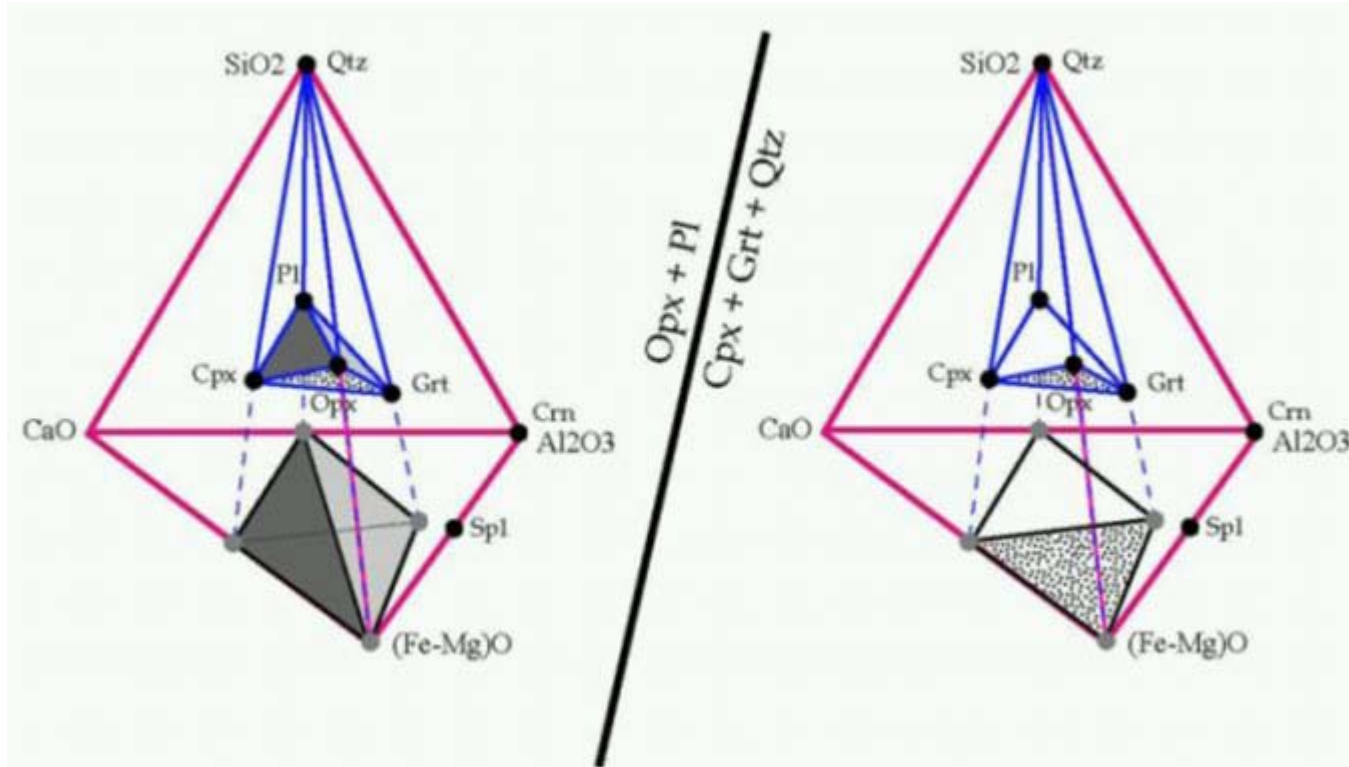
Qtz-Opx-Grt-Pl  
Qtz-Cpx-Opx-Pl  
Opx-Cpx-Pl-Grt  
Spl-Opx-Grt-Cpx  
Spl-Cpx-Grt-Pl

Qtz-Opx-Grt-Cpx  
Qtz-Cpx-Grt-Pl  
Spl-Opx-Grt-Cpx  
Spl-Cpx-Grt-Pl

## 2. Représentation graphique des paragenèses

### 1. Diagrammes ACF, A'KF et AFM: Système à n constituants

Il reste encore 4 constituants à représenter dans un tétraèdre:

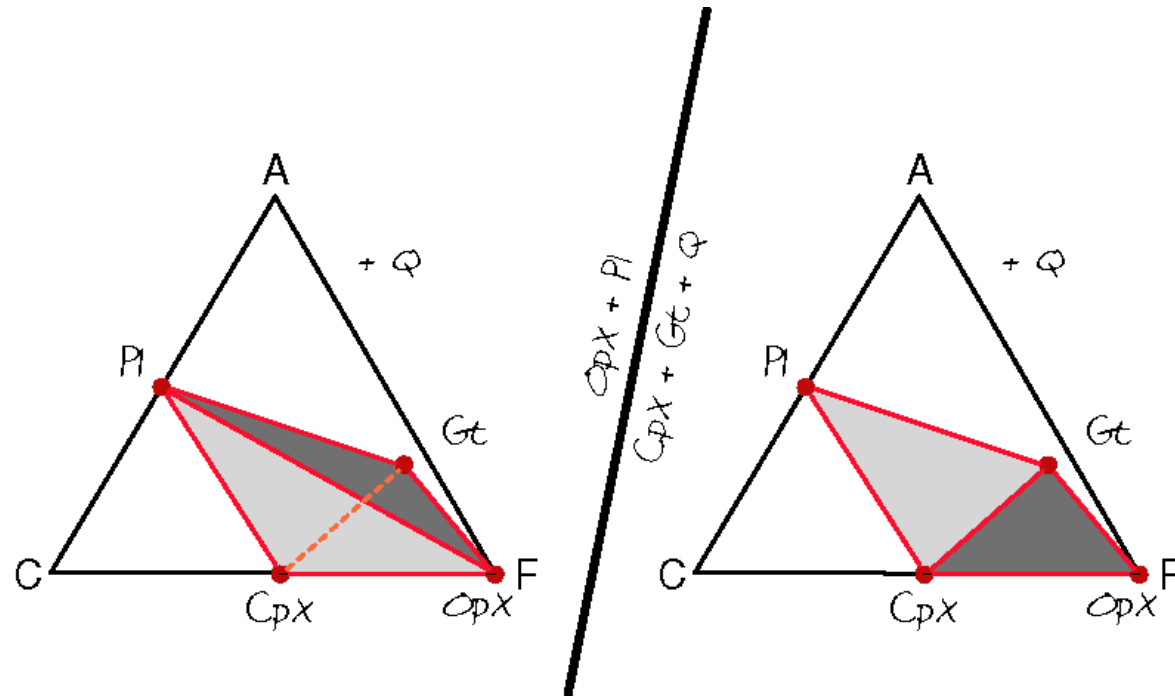


Ces diagrammes sont **peu lisibles**: **projeter le volume du tétraèdre** sur un **triangle** ;  
D'après la **règle des phases**, il nous faut **4 minéraux** pour avoir une **paragenèse**, ce qui est impossible à obtenir sans faire croiser les lignes de liaison ;  
**Un minéral** est choisi comme **pôle de projection**: dans la cas du **triangle ACF** des **roches basiques**, le **quartz est le pôle de projection** (il fait donc partie de la paragenèse).

## 2. Représentation graphique des paragenèses

### 1. Diagrammes ACF, A'KF et AFM: Système à n constituants

Cette condition est rappelée en écrivant toujours Qtz à côté du diagramme.



On passe d'un faciès **Granulites BP** à **MP** en franchissant l'**équilibre univariant**  $Opx + Pl = Cpx + Grt + Qtz$  ;

Les **roches magmatiques basiques**, issues de la **fusion partielle du manteau**, sont initialement **anhydres**. Elles sont souvent **hydratées** après ou même dès leur mise en place, dans le cas de la **croûte océanique**.

## 2. Représentation graphique des paragenèses

### 1. Diagrammes ACF, A'KF et AFM: Système à n constituants

#### Les paragenèses des métapélites

En général, les **phases hydratées** sont **abondantes** dans les **métapélites** et le **système est considéré saturé en  $H_2O$**  et une **phase V** est toujours présente.

##### Diagramme **A'KF**:

- ⇒ Projection du **tétraèdre  $SiO_2-Al_2O_3$ -« F »- $K_2O$**  sur le diagramme AKF à partir du **pôle de projection Qtz** ;
- ⇒ **Fe** et **Mg** sont considérés comme **un seul élément** ;
- ⇒ **Qtz** doit être **présent** dans la **paragenèse**.

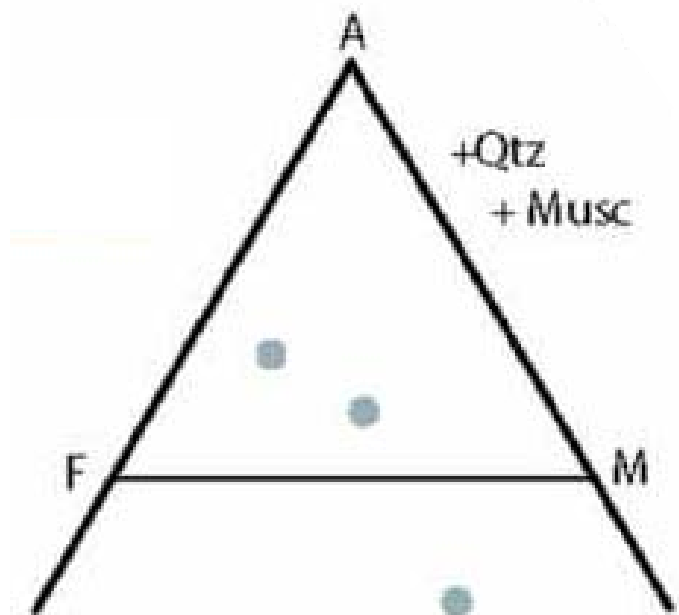
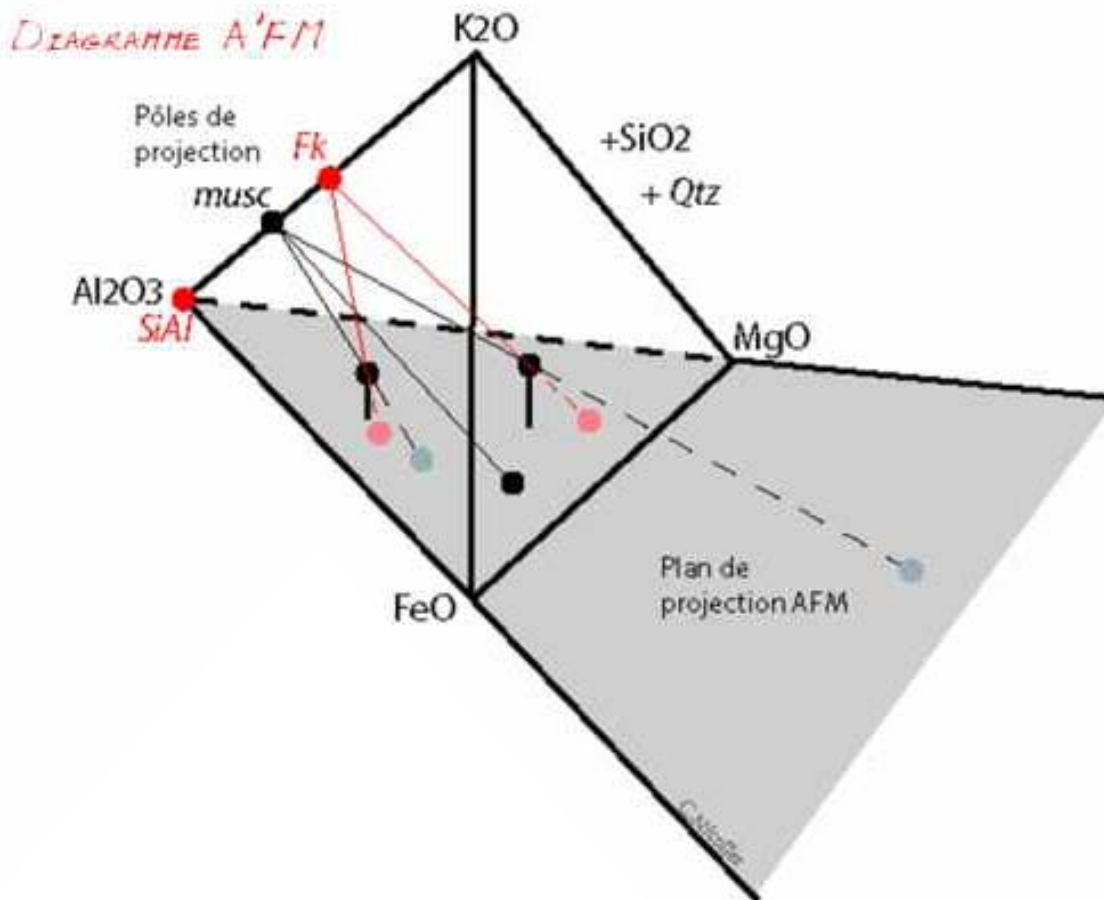
##### Diagramme **AFM**:

- ⇒ Ici, **Fe** et **Mg** sont considérés comme **2 constituants indépendants** ;
- ⇒ **Qtz** est toujours **présent** dans la **paragenèse** ;
- ⇒  **$Al_2O_3$ -FeO-MgO- $K_2O$**  sont représentés dans un **tétraèdre**.

# 2. Représentation graphique des paragenèses

## 1. Diagrammes ACF, A'KF et AFM: Système à n constituants

⇒ Définir une **surface** et un **pôle de projection** (qui doit coïncider avec un minéral pour éviter le croisement des lignes de liaison).





# 2. Représentation graphique des paragenèses

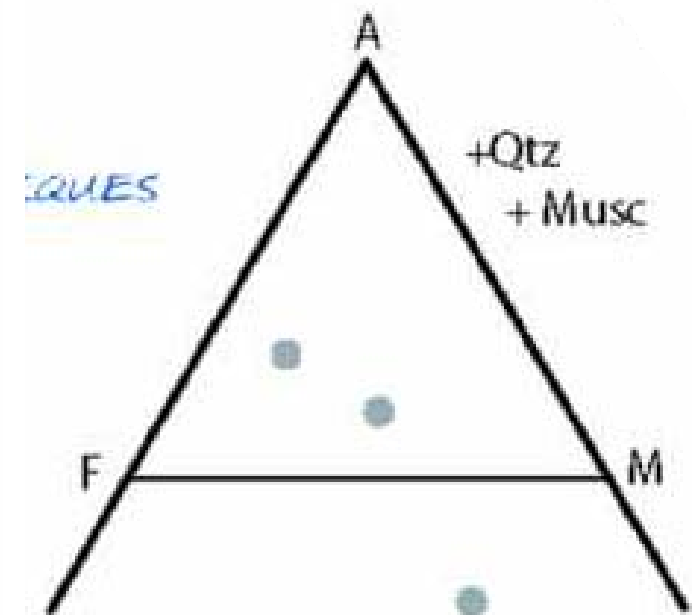
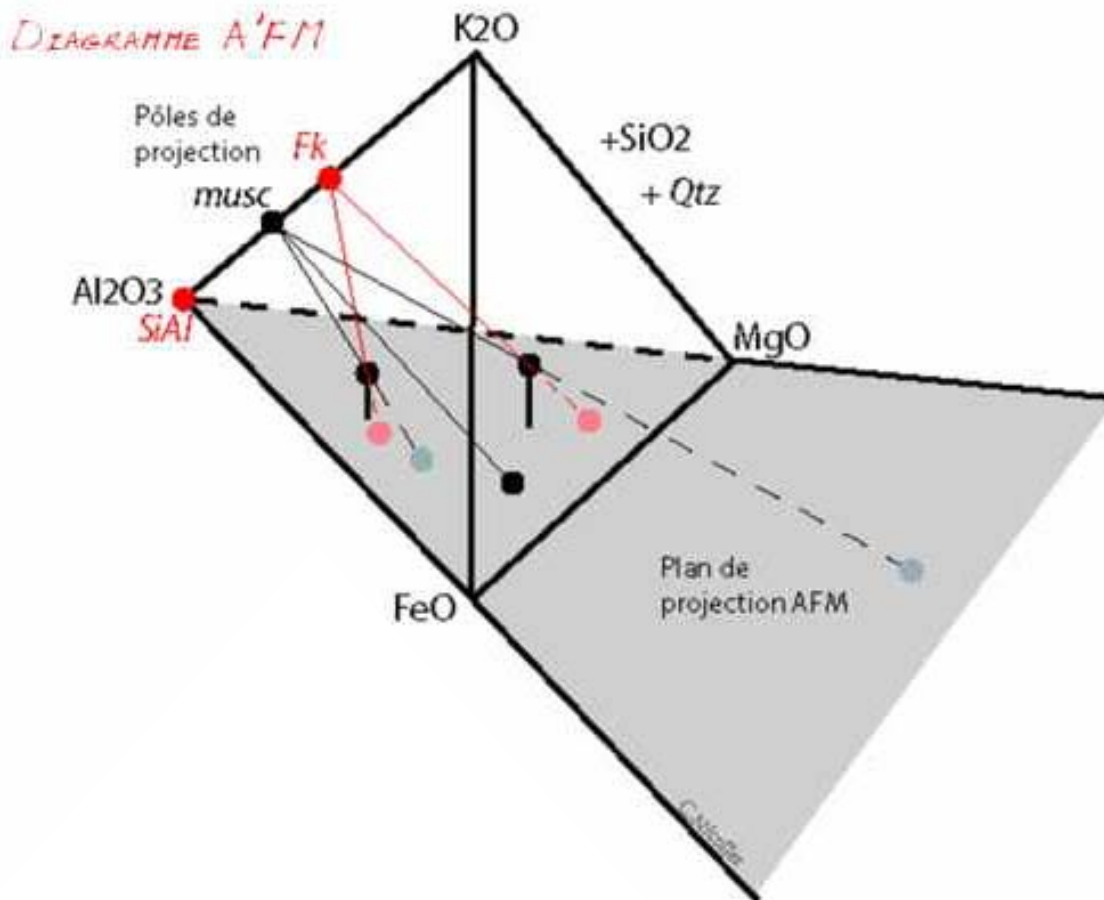
## 1. Diagrammes ACF, A'KF et AFM: Système à n constituants

La **base du tétraèdre AFM** sert de **plan de projection**;

Il n'y a pas de minéral commun aux métapélites au pôle opposé  $K_2O$  :

⇒ **BT** projection depuis **pôle Muscovite**

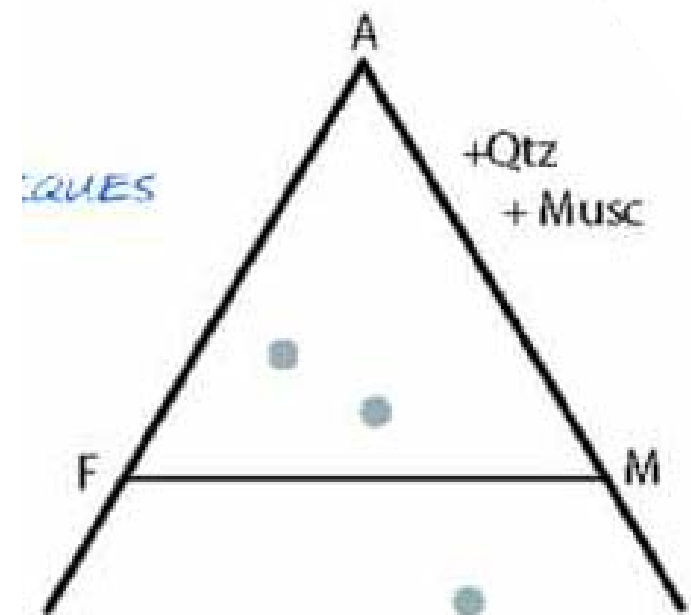
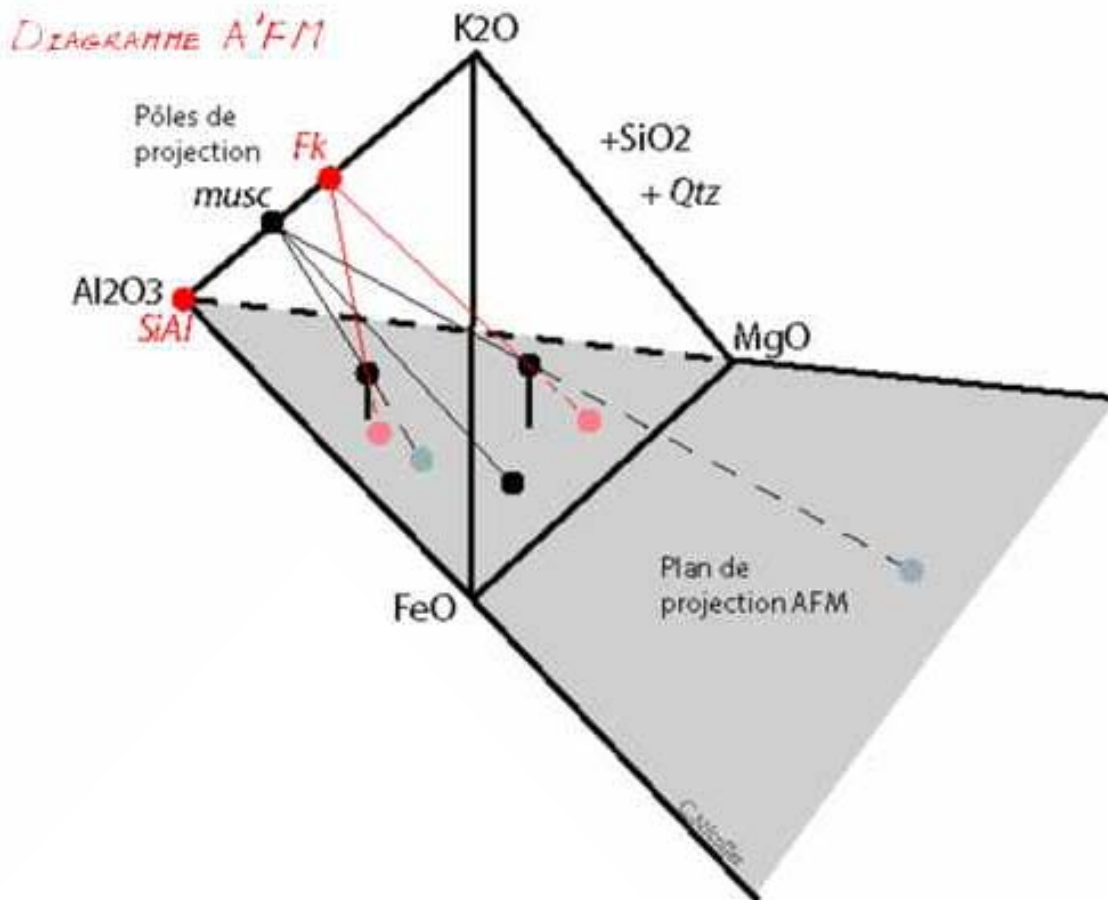
⇒ **HT** (Amphibolites/Granulites) projection depuis **pôle Feldspath K**



## 2. Représentation graphique des paragenèses

### 1. Diagrammes ACF, A'KF et AFM: Système à n constituants

Des minéraux peuvent se retrouver en projection **au-delà de la ligne FM** (FeO-MgO)



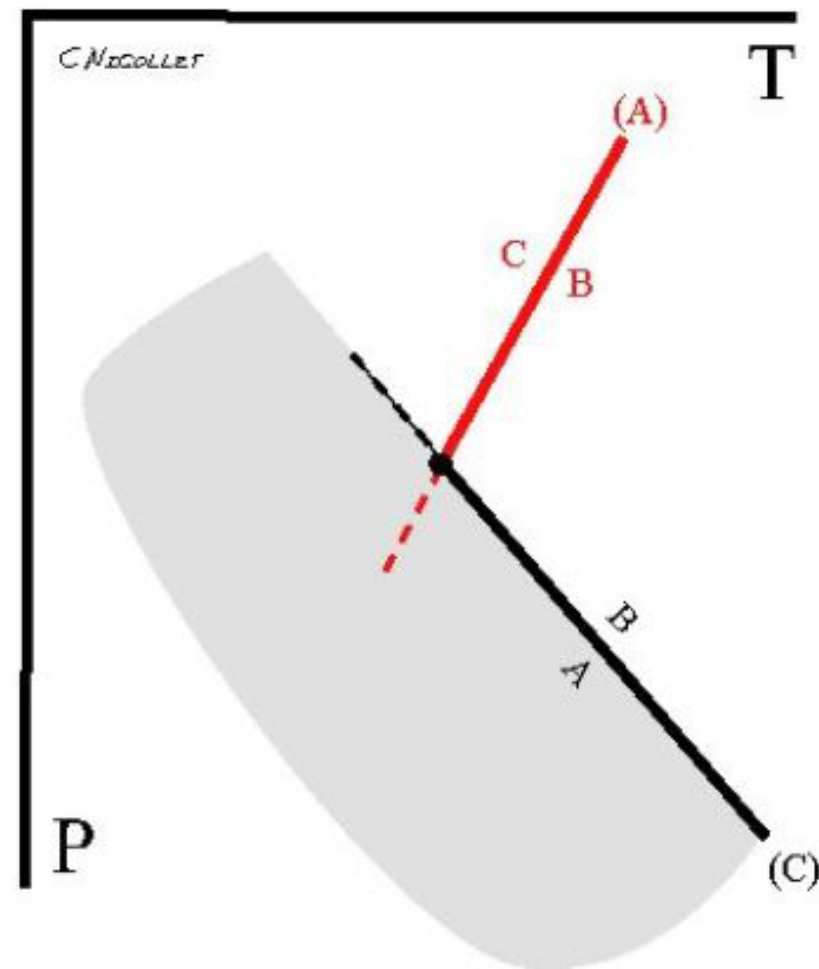
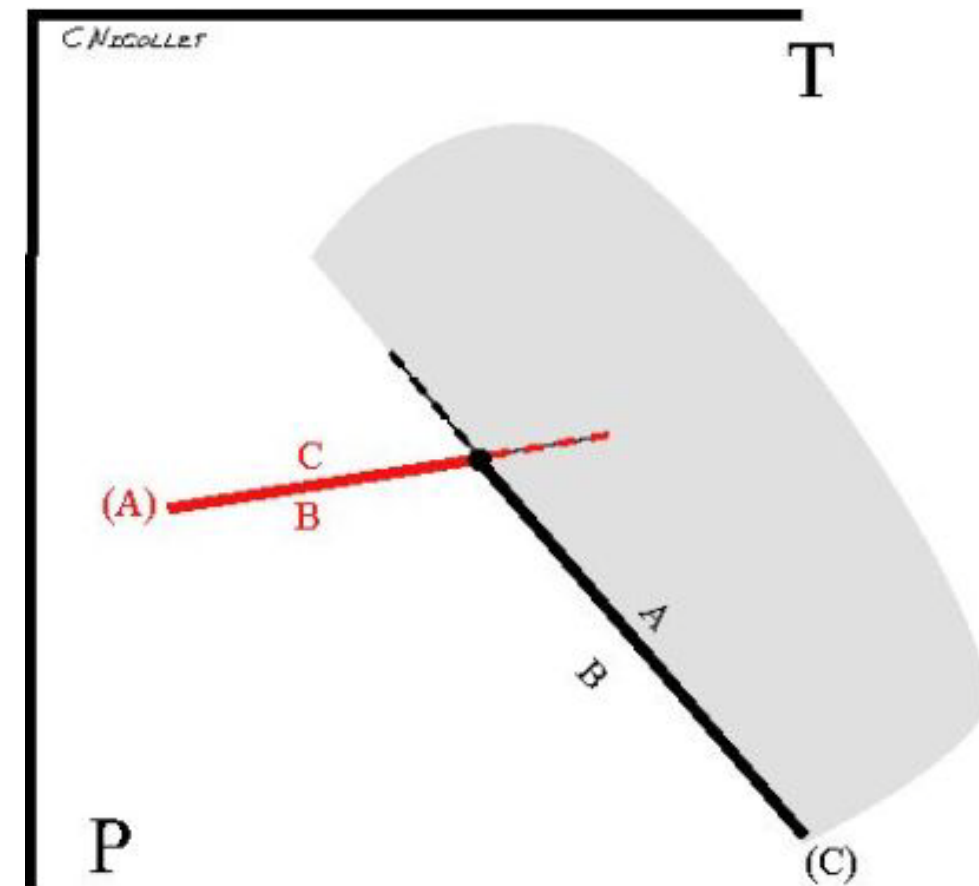
## 2. Représentation graphique des paragenèses

### 2. Construction des grilles pétrogénétiques

# 2. Représentation graphique des paragenèses

## 2. Grilles pétrogénétiques: 1 constituant chimique

La **règle des phases** indique qu'un tel **système chimique** contiendra au maximum 3 minéraux (pour une variance  $v=0$  ; **point invariant**) ;

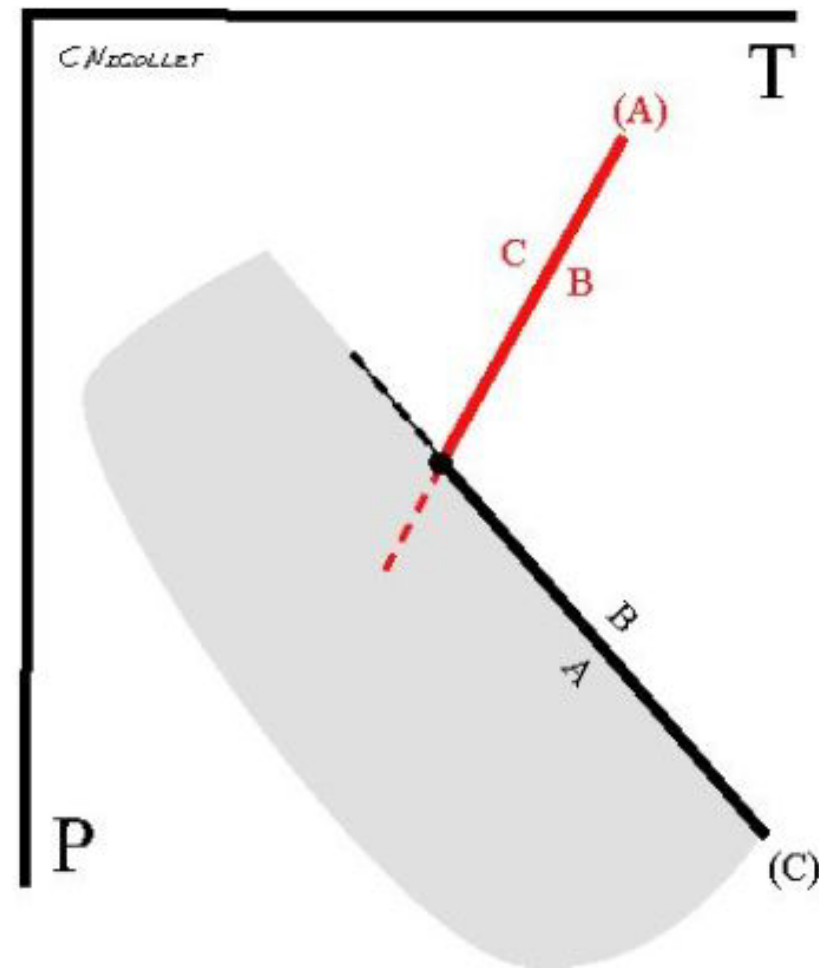
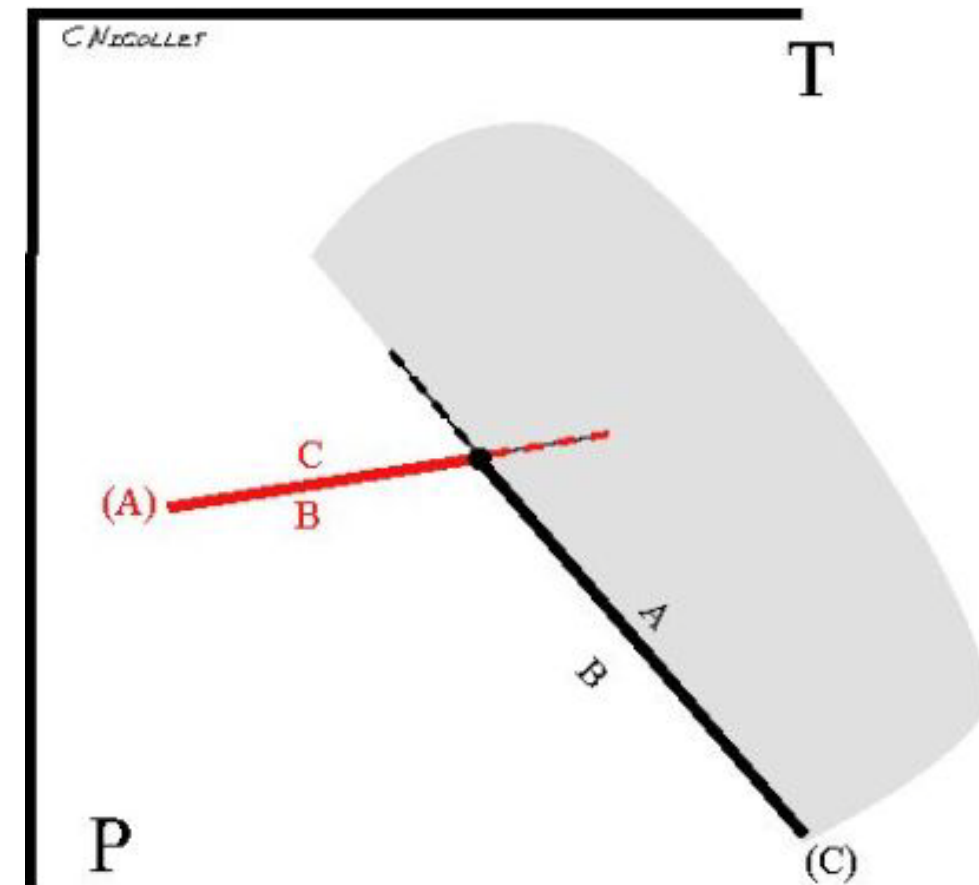


# 2. Représentation graphique des paragenèses

## 2. Grilles pétrogénétiques: 1 constituant chimique

Considérons les minéraux A, B et C ;

Ils s'arrangeront 2 à 2 pour définir les lignes univariantes ( $v=1$ ) qui séparent les équilibres divariants ( $v=2$ ) à un seul minéral.



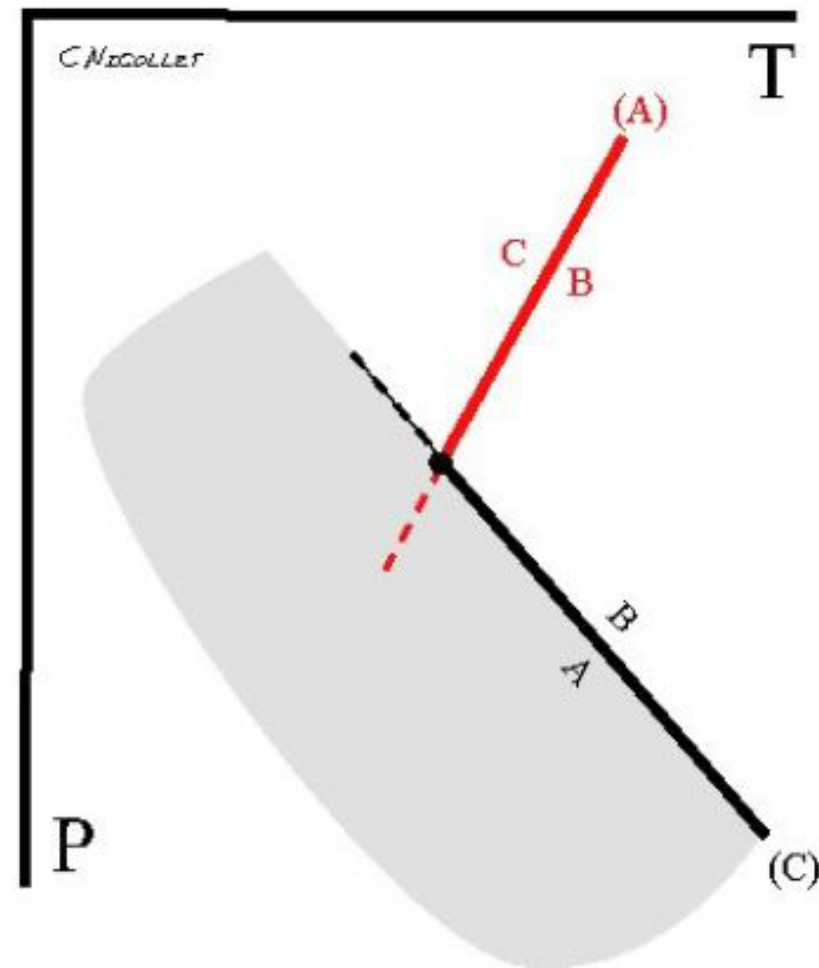
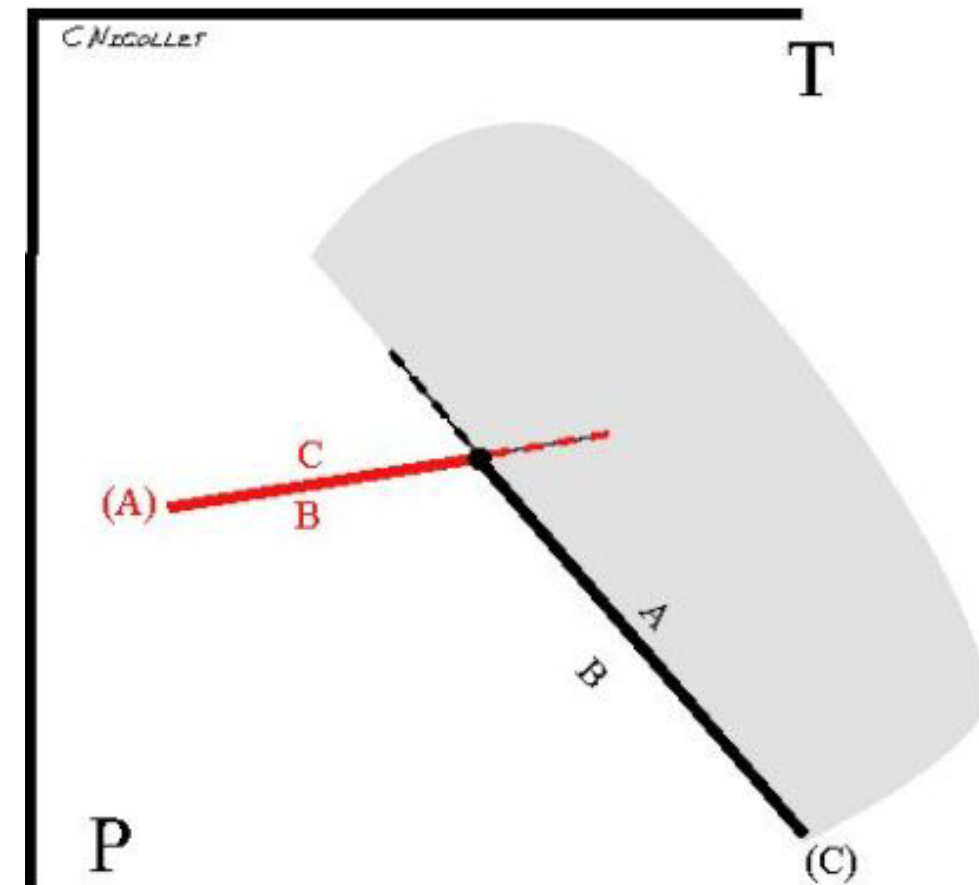


# 2. Représentation graphique des paragenèses

## 2. Grilles pétrogénétiques: 1 constituant chimique

Les 3 lignes univariantes autour du point univariant ont comme association :  $A+B$ ,  $B+C$  et  $C+A$  que l'on écrit aussi  $A=B$ , ...

Chaque équilibre porte le nom de la phase qui est absente :  $(A): B+C$ ,  $(B): A+C$  et  $(C): A+B$ .

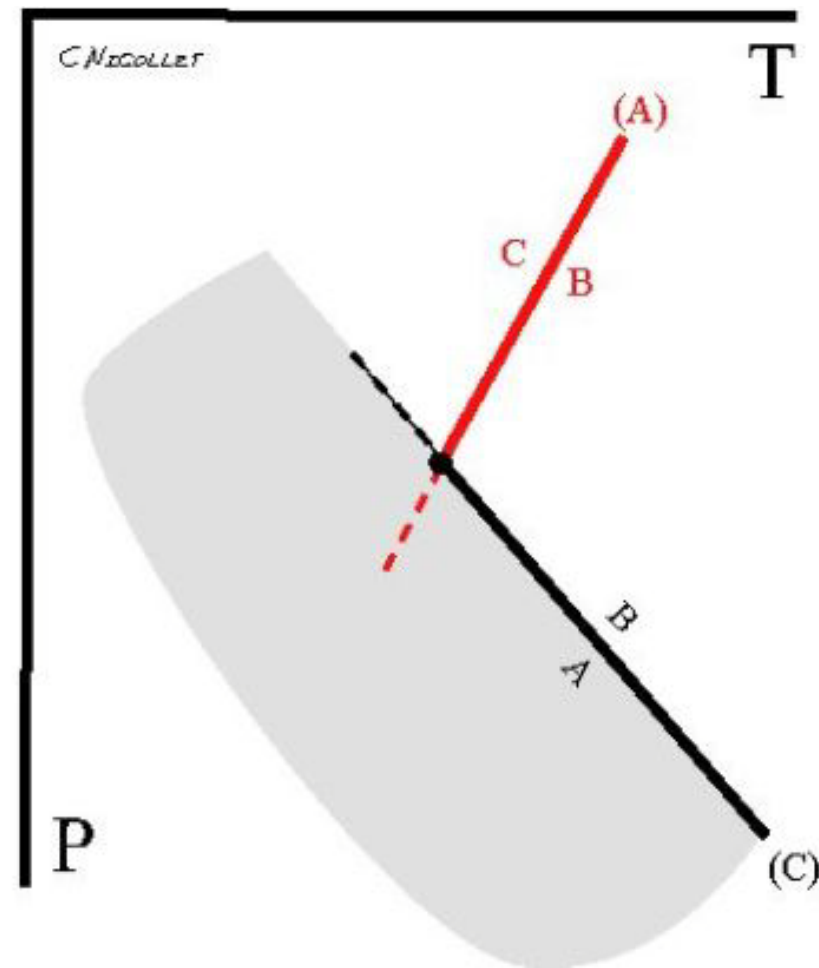
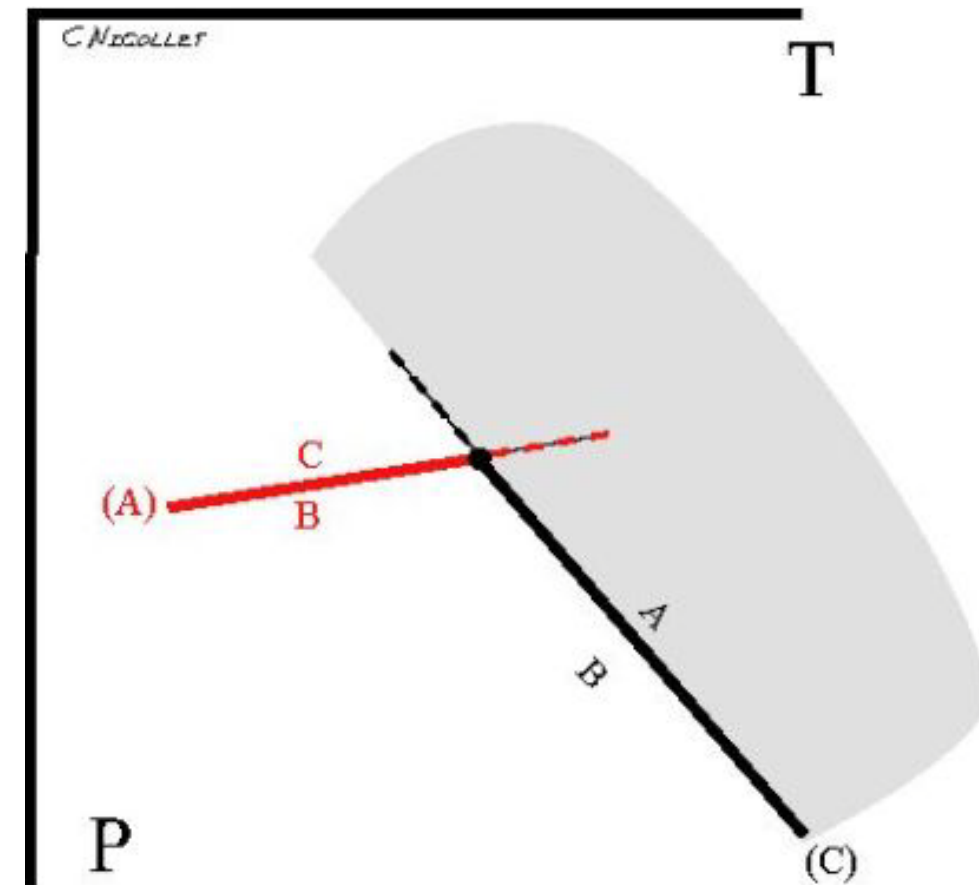


# 2. Représentation graphique des paragenèses

## 2. Grilles pétrogénétiques: 1 constituant chimique

Les 3 lignes univariantes autour du point univariant ont comme association :  $A+B$ ,  $B+C$  et  $C+A$  que l'on écrit aussi  $A=B$ , ...

Chaque équilibre porte le nom de la phase qui est absente :  $(A): B+C$ ,  $(B): A+C$  et  $(C): A+B$ .



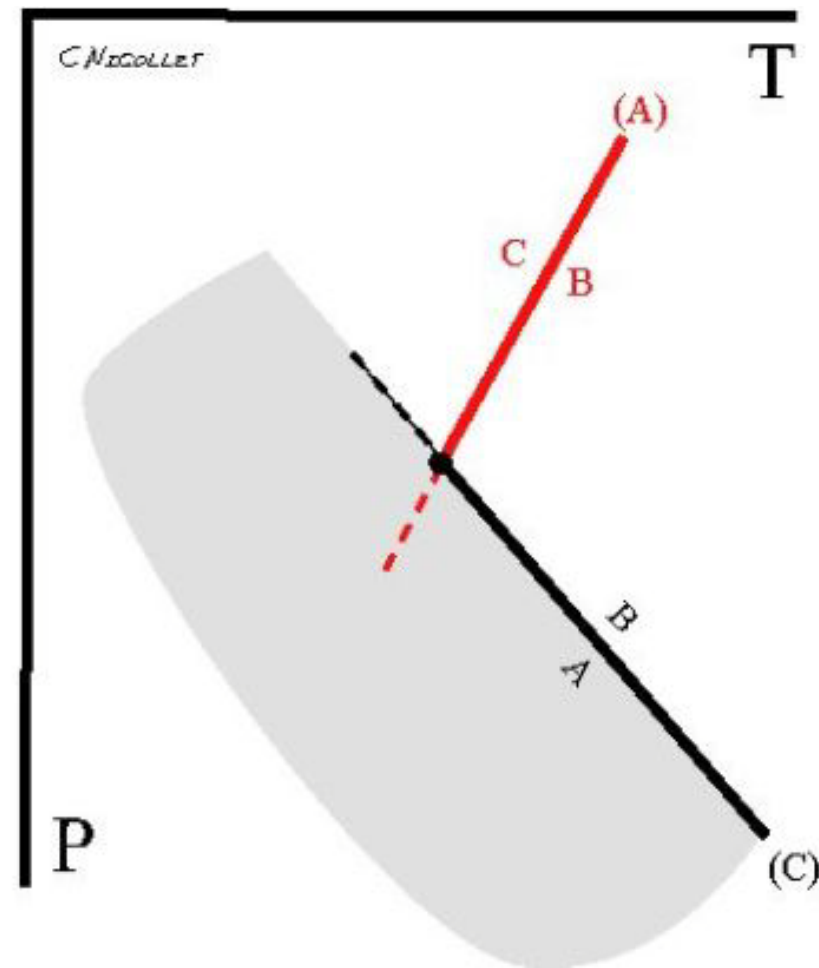
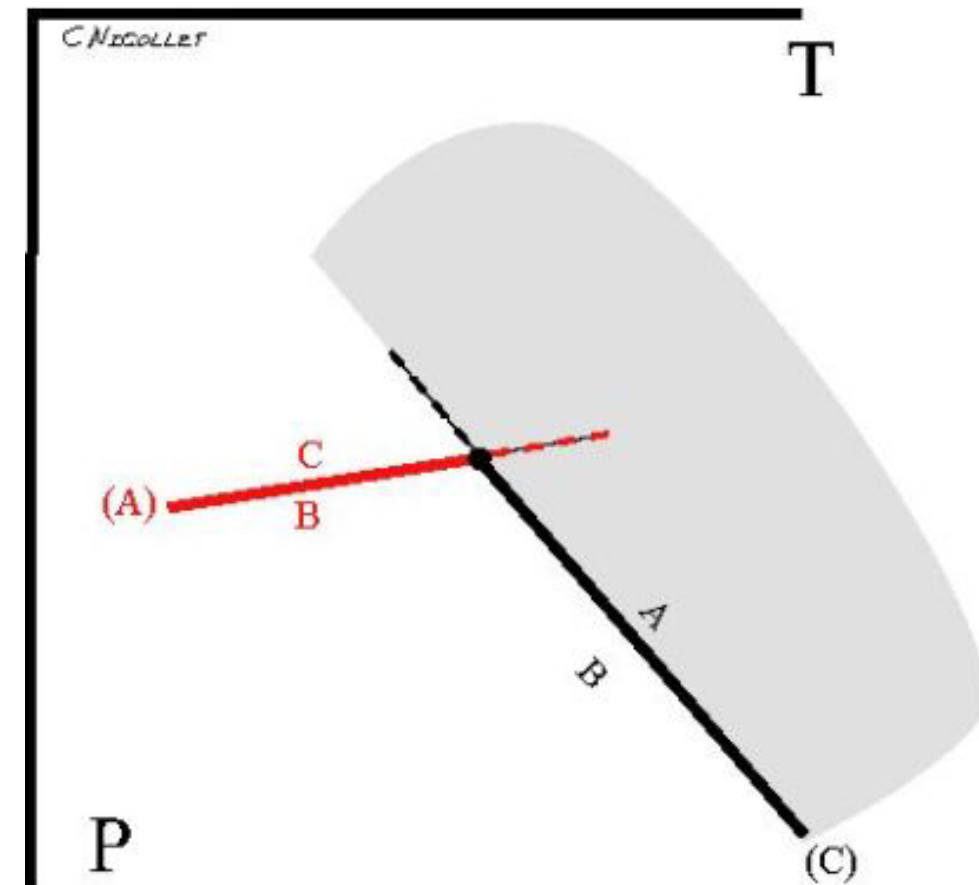
# 2. Représentation graphique des paragenèses

## 2. Grilles pétrogénétiques: 1 constituant chimique

Dessignons ces 3 lignes autour du point invariant.

Traçons la réaction (C) de manière totalement arbitraire.

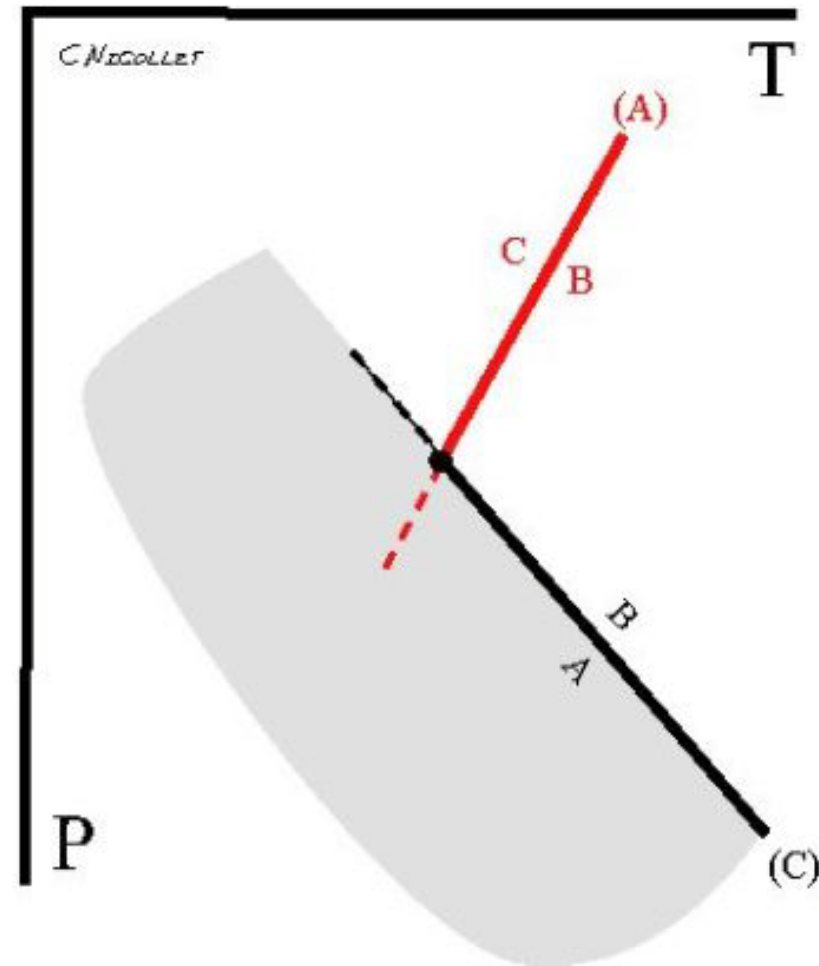
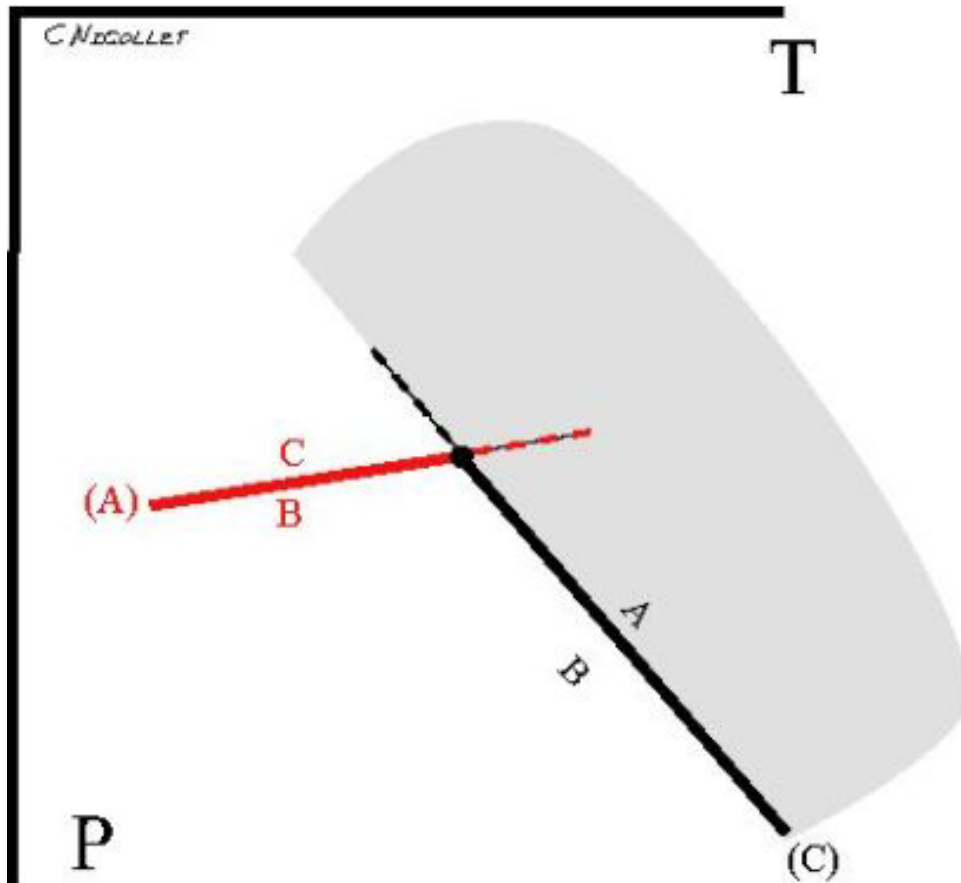
On définit une portion stable de la réaction en trait plein et une portion métastable, au-delà du point invariant, en tiret. 2 solutions sont envisageables pour positionner A et B respectivement.



# 2. Représentation graphique des paragenèses

## 2. Grilles pétrogénétiques: 1 constituant chimique

Pour positionner la réaction (A) par rapport à la réaction (C), il faut respecter la règle suivante:  
La réaction (A) ne peut pas se situer dans le demi-plan délimité par la réaction (C) dans lequel la phase A est stable (demi-plan gris sur la figure).  
Etc... pour les autres réactions et position de minéraux.

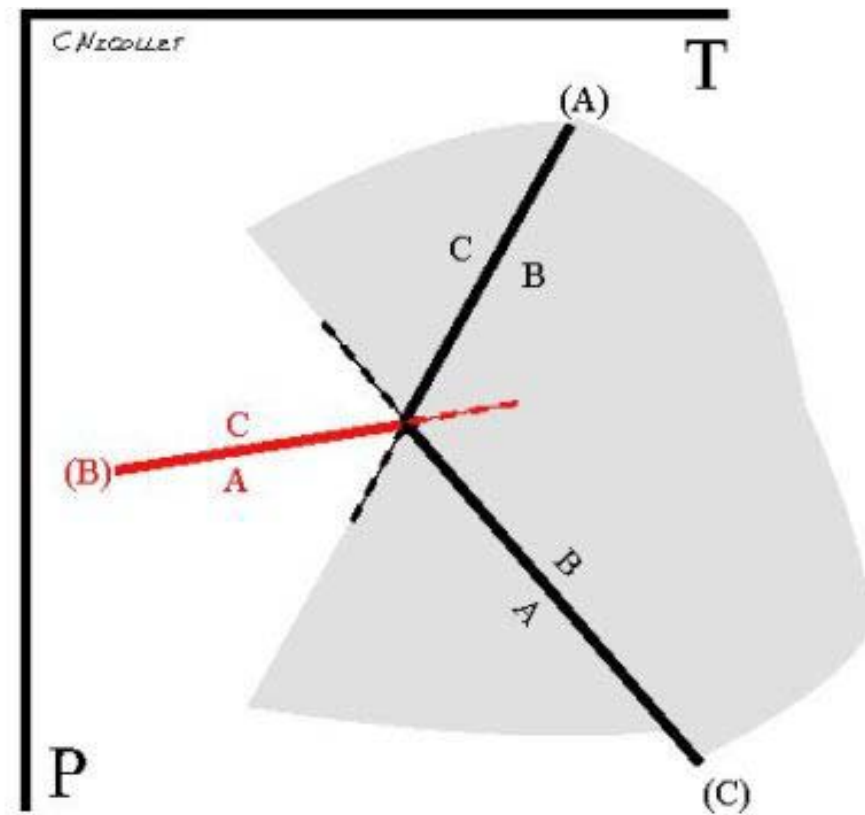
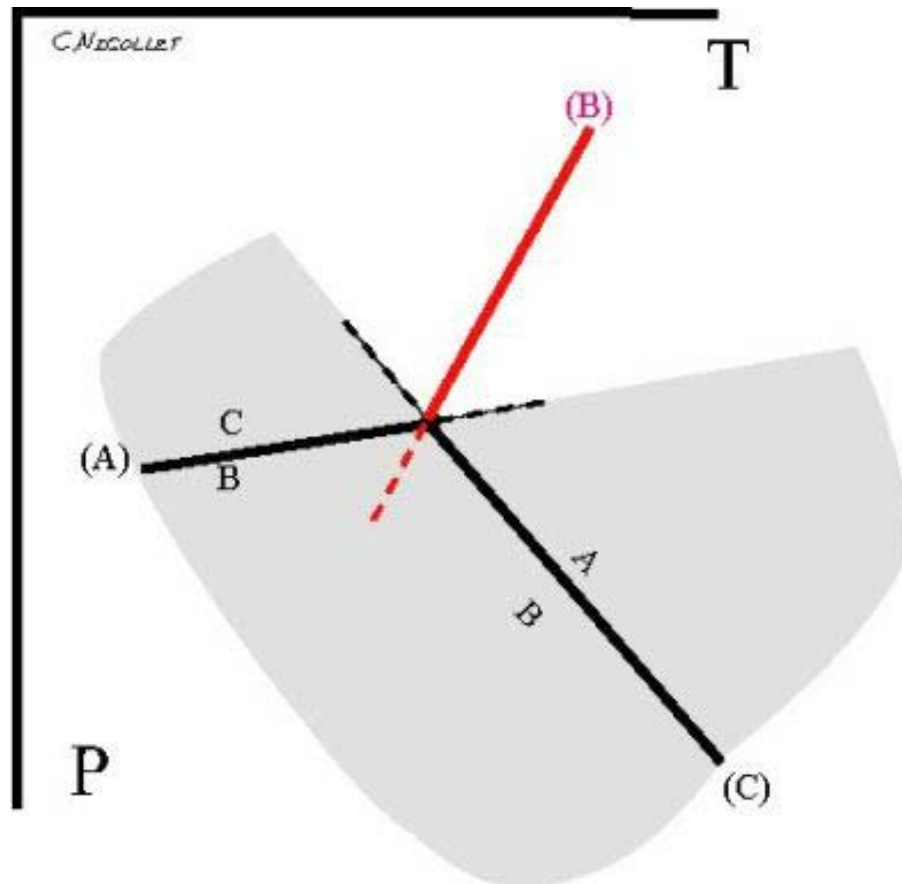


# 2. Représentation graphique des paragenèses

## 2. Grilles pétrogénétiques: 1 constituant chimique

La position de la réaction (B) est limitée à l'intersection des demi-plans définis par les réactions (A) et (C) ne contenant pas cette phase. Le choix entre les 2 solutions est obtenu en calculant, grâce aux **paramètres thermodynamiques** des **minéraux**, la pente des réactions.

*Règles de Schreinemakers.*



# 2. Représentation graphique des paragenèses

## 2. Grilles pétrogénétiques: 3 constituants chimiques

Construction d'une **grille** pour les **métapélites** dans des conditions de **très haute température**.

**6 minéraux** sont présents:

|                        |                                                                             |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| ⇒ <b>Quartz</b>        | $\text{SiO}_2$                                                              |
| ⇒ <b>Sillimanite</b>   | $\text{Al}_2\text{SiO}_5$                                                   |
| ⇒ <b>Saphirine</b>     | $(\text{Mg, Fe})_2\text{Al}_4\text{SiO}_{10}$                               |
| ⇒ <b>Orthopyroxène</b> | $(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3$                                               |
| ⇒ <b>Cordiérite</b>    | $(\text{Mg, Fe})_2\text{Si}_5\text{Al}_4\text{O}_{18}, n\text{H}_2\text{O}$ |
| ⇒ <b>Spinelle</b>      | $(\text{Mg, Fe})\text{Al}_2\text{O}_4$                                      |

Les **constituants chimiques** sont:

- ⇒  $\text{SiO}_2$
- ⇒  $\text{Al}_2\text{O}_3$
- ⇒ **MgO** (on considère des solutions solides Fe,Mg pour les compositions des minéraux ferromagnésiens)
- ⇒  $\text{H}_2\text{O}$ , on considère une cordiérite anhydre



# 2. Représentation graphique des paragenèses

## 2. Grilles pétrogénétiques: Règle des phases

La **règle des phases** fixe le nombre maximal de minéraux au **point invariant** à **c+2 minéraux** :  
⇒ **5 minéraux à l'équilibre**

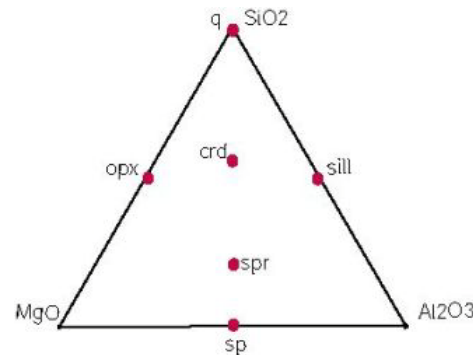
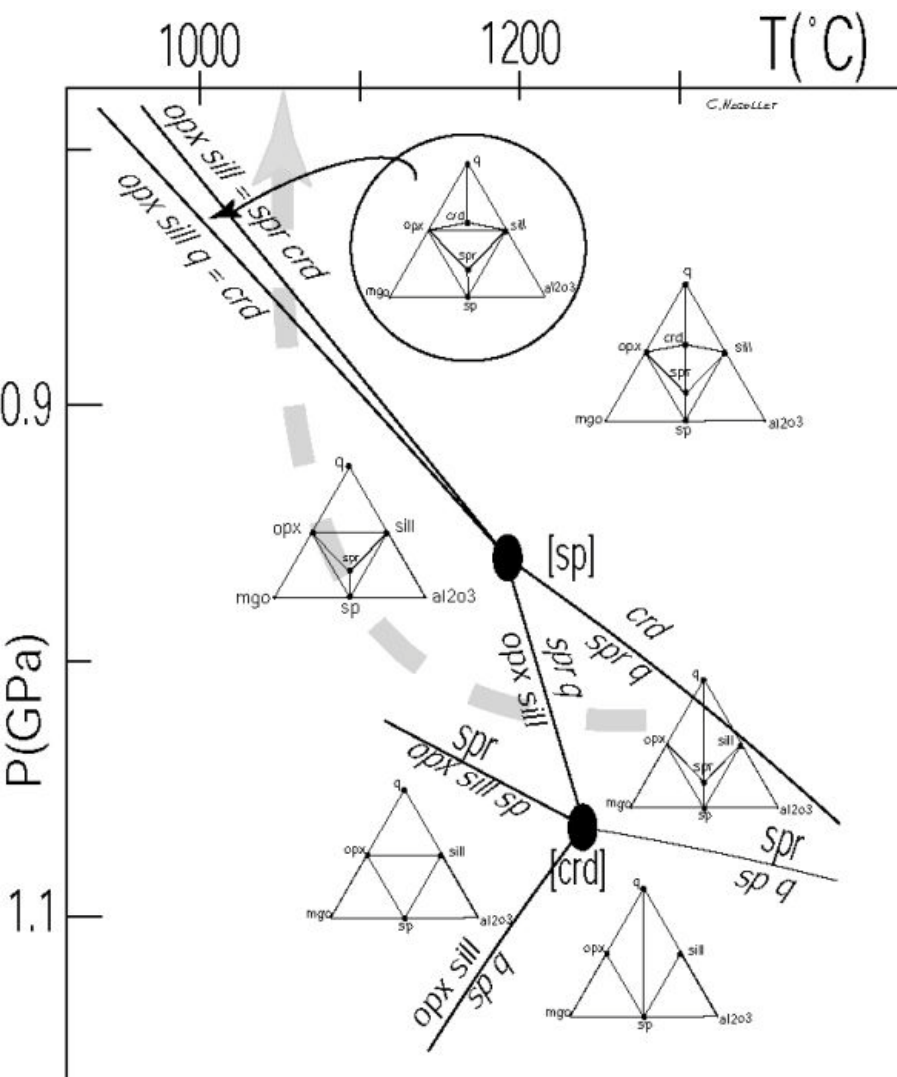
Il y a **6 combinaisons possibles** de 5 minéraux sur les 6 du système  
⇒ 6 points invariants  
⇒ chacun portera le nom de la phase absente

La **règle des phases** indique que les **assemblages divariants** contiennent **3 phases** :  
⇒ Dans le triangle **MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>**, les différents **assemblages divariants** sont obtenus **en traçant** toutes les **combinaisons possibles de triangles partiels** ayant pour **sommets trois minéraux**.

# 2. Représentation graphique des paragenèses

## 2. Grilles pétrogénétiques: Règle des phases

Assemblages divariants dans le système à 3 constituants indépendants  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$



7 triangles regroupent toutes les **paragenèses** ;

Chacun des triangles regroupe toutes les paragenèses d'un **espace divariant** ;

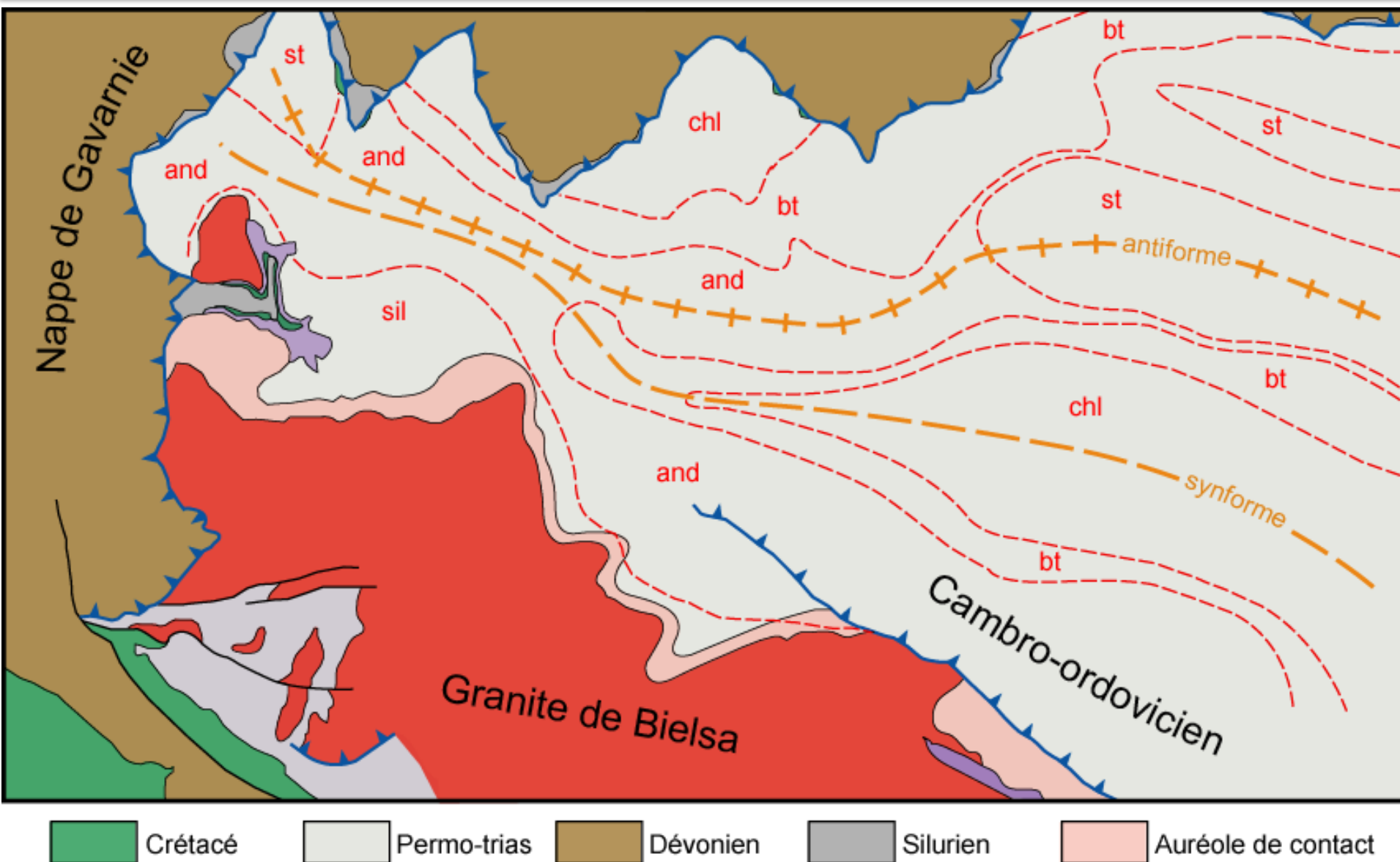
Ils sont **séparés** les uns des autres par une **ligne univariante** constituée des **4 minéraux** des deux lignes de liaison qui se **remplacent mutuellement** dans les deux triangles ;

Ex. avec Opx-Sill = Spr-Qtz (Spl, Crd).

2. Représentation graphique des paragenèses
3. Géothermobarométrie

## 2. Représentation graphique des paragenèses

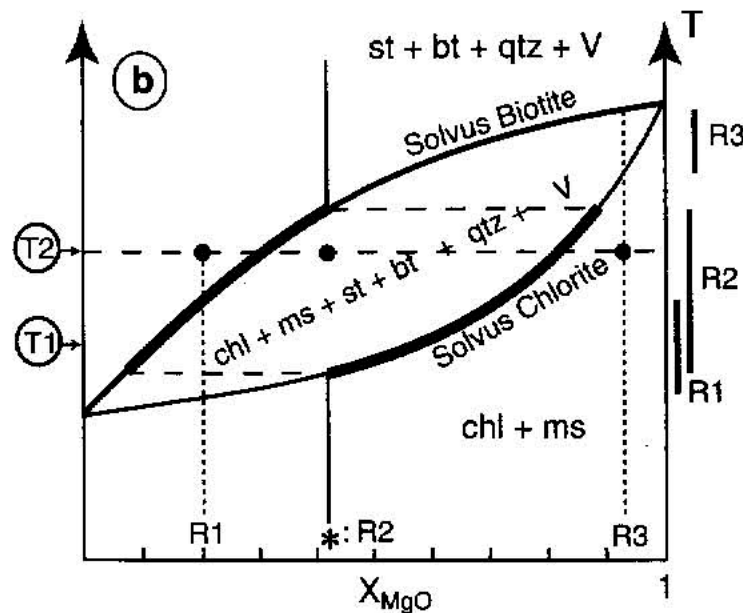
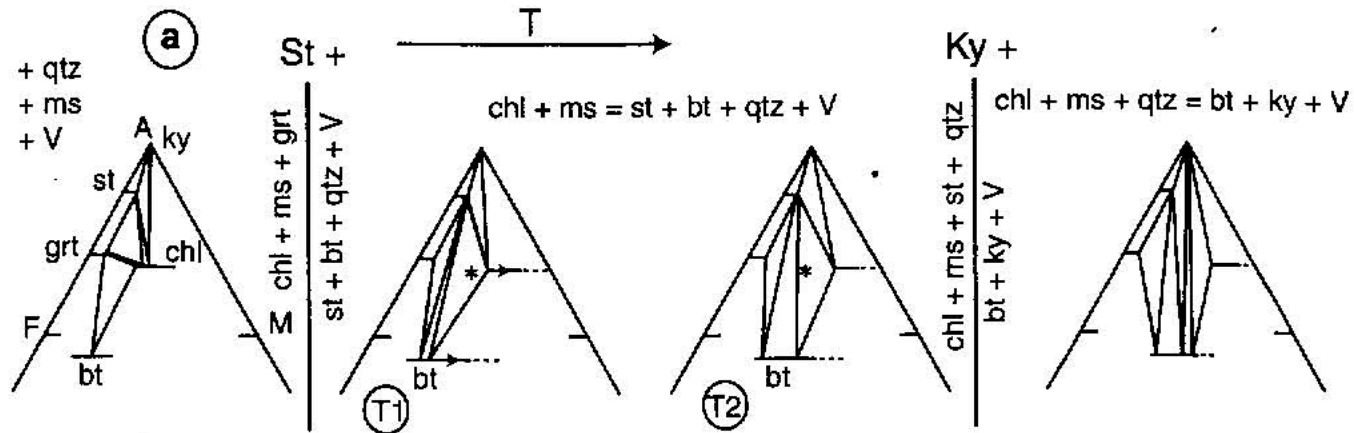
### 3. Géothermobarométrie: Zonation métamorphique



# 2. Représentation graphique des paragenèses

## 3. Géothermobarométrie: Réactions continues / discontinues

Réaction continue: **Chl + Ms = Std + Bt + Qtz + V**



## 2. Représentation graphique des paragenèses

### 4. Pseudo-sections



## 2. Représentation graphique des paragenèses

### 3. Pseudo-sections: Intérêt par rapport aux grilles pétrogénétiques

#### Grille pétrogénétique:

- ⇒ Une grille pétrogénétique montre **toutes les réactions possibles** pour un **système chimique**, indépendamment de la **composition précise** de la roche ;
  - ⇒ Uniquement **les équilibres invariants** et **univariants** ;
  - ⇒ Dans les **systèmes les plus grands**, les **grilles pétrogénétiques** ont **peu d'intérêt** car uniquement un **faible nombre de réactions univariantes stables** existent ;
  - ⇒ On a cependant les **informations principales** pour les **équilibres à faible variance**.
- 
- ⇒ **Grilles pétrogénétiques** et **diagrammes de compatibilité AFM** et **diagrammes thermobarométrie** sont nécessaires pour illustrer quantitativement les **assemblages minéraux à l'équilibre** !
- 
- ⇒ Si on connaît la **composition de la roche totale**, on peut **représenter** à la fois les **assemblages minéraux** et les **relations *PT*** graphiquement sur un simple diagramme de phases :

#### **PSEUDO-SECTIONS**

## 2. Représentation graphique des paragenèses

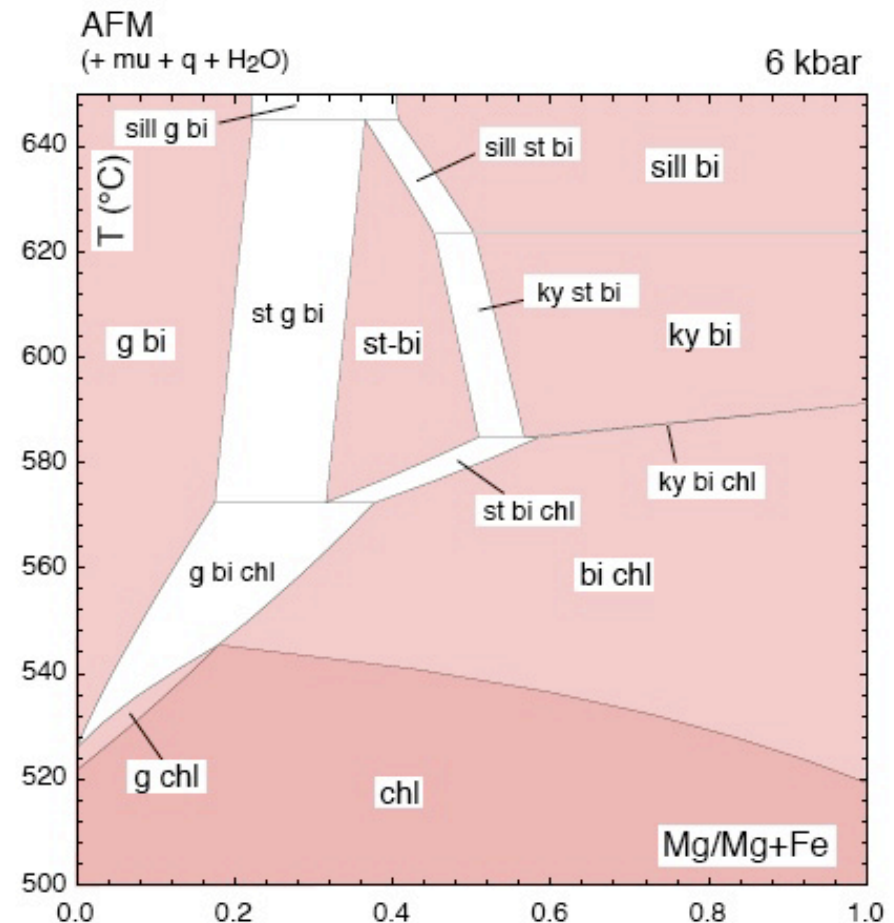
### 3. Pseudo-sections: Qu'est-ce que c'est ?

**Diagramme de phases** qui montre les **champs de stabilité** de **différents assemblages minéralogiques multivariants** ( $P, T, X_i$ ) **à l'équilibre** pour une **composition chimique fixée** de la roche ;

Diagrammes les plus souvent utilisés.

Il peut s'agir de **diagrammes**  **$PT$** ,  **$PX$**  ou  **$TX$**  ;

Par convention, les **domaines** les plus **foncés** ont des **variances plus élevées** ;  
Les domaines en **blanc** ont une **variance** de **2**.



## 2. Représentation graphique des paragenèses

### 3. Pseudo-sections: Qu'est-ce que c'est ?

Les **lignes** d'une pseudo-section **ne sont pas** des **réactions univariantes** comme dans les grilles pétrogénétiques, mais elles correspondent à des **lignes d'apparition** ou de **disparition** d'une phase: **réactions continues** ;

Les **champs en contact** séparés par une de ces lignes, ont **obligatoirement** une **différence de variance de 1** ;

Les **réactions discontinues univariantes** sont interprétées de la manière usuelle.

La **pseudo-section** donne la **position dans l'espace  $PT$**  du **champ** correspondant à l'**assemblage minéralogique** de la roche considérée ;

Elle peut également donner la **proportion** et la **composition** des **minéraux** (sous forme de courbes **isoplèthes**) dans ce champ ;

Elle prédit les **paragenèses** dans les différentes conditions de l'espace  $PT$  et permet ainsi de tracer des trajets  **$PTt$** .

## 2. Représentation graphique des paragenèses

### 3. Pseudo-sections: Composition dans le système NCKFMASH

