

Rappels de cours

I- Introduction

Les diagrammes d'équilibre de phases sont des représentations visuelles de l'état d'un matériau en fonction de la température, de la pression, et des concentrations des composants constitutifs. L'état d'un matériau de deux composants à une pression constante peut être présenté sous la forme graphique bien connue de diagrammes de phase binaires. Ces diagrammes permettent aux scientifiques et technologues de connaître, à n'importe quelle température et n'importe quelle composition des constituants, les phases existantes dans les mélanges multiconstitués ainsi que leurs natures.

II- Notion de phases.

C'est l'état sous lequel on trouvera un constituant A ou un mélange de constituants A + B.

Pour définir une phase, il faut s'assurer que le système est bien homogène (même composition chimique et mêmes propriétés en tout point).

✓ Phase gazeuse.

Tous les gaz sont miscibles en toutes proportions. Une phase gazeuse peut avoir un ou plusieurs constituants: air (N_2 , O_2 , H_2O ).

✓ Phase liquide.

Certains liquides sont miscibles: eau + alcool (1 phase), d'autres non: eau + huile (2phases).

✓ Phase solide.

En général les solides sont non miscibles et il y a autant de phases que de constituants sauf dans le cas des solutions solides (alliages).

II- Variables d'un système.

Les variables intensives qui définissent un système à deux constituants A et B sont, si la pression (variable d'action) est fixée une fois pour toute, la température T (variable d'action) et les concentrations x_A ou x_B (variable de position) dans chacune des phases (i).

II- Variance d'un système.

La variance d'un système est le nombre de facteurs que l'on peut faire varier indépendamment les uns des autres sans provoquer la rupture de l'équilibre.

La règle des phases nous donne la variance d'un tel système :

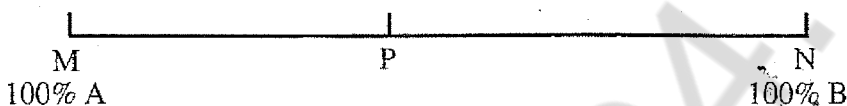
$$V = C + 1 - \phi = 3 - \phi$$

III- Diagrammes de composition

Un diagramme de composition correspond à une figure géométrique telle que chacun de ses points soit caractéristique d'une composition définie.

Dans un diagramme binaire, le diagramme de composition se traduit par un segment de droite MN dont les extrémités du segment matérialisent les deux constituants A et B purs.

En divisant MN en 100 parties égales tout point P, tel que $PM = y$ et $PN = x$ aura une composition de $x\%$ en A et de $y\%$ en B. Il caractérise ainsi une composition intermédiaire entre A et B qui s'écrira par la suite par A_nB_m .



Dans la pratique, il faut connaître la composition d'un composé, de préciser le pourcentage d'un des deux constituants; il s'agit généralement de l'espèce placée à droite dans le diagramme de composition.

Généralement dans un diagramme solide-liquide les diagrammes de composition sont décrits en en termes de **fraction molaire**.

$$x_B = \frac{\text{quantité de B}}{\text{quantité de (A+B)}} = \frac{n_B}{n_T} = \frac{n_B}{n_A + n_B}$$

$$x_A = \frac{\text{quantité de A}}{\text{quantité de (A+B)}} = \frac{n_A}{n_T} = \frac{n_A}{n_A + n_B}$$

IV- Analyse thermique

La principale méthode expérimentale relative à la détermination, d'un point de vue thermodynamique, des diagrammes de phases, consiste en l'**analyse thermique**

IV-1- Définition

L'analyse thermique consiste à relever en fonction du temps t , l'évolution de la température T d'un produit. Le produit, chauffé jusqu'à l'état liquide, se refroidit lentement, sous la pression atmosphérique.

L'étude de l'évolution de la température T au cours du temps t , traduit la restitution partielle de l'énergie thermique qu'il avait emmagasinée.

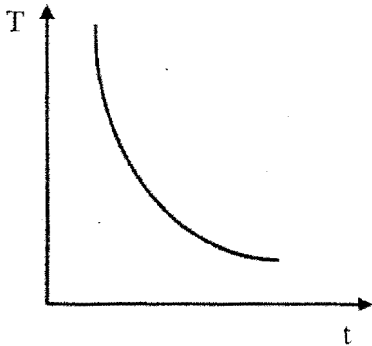
La vitesse $v(t)$ de refroidissement d'un corps dépend pour l'essentiel de la différence ΔT entre sa température réelle T et la température de référence T° à laquelle il doit être ramené:

$$v(t) = - dT/dt = k \Delta T = k (T - T^\circ)$$

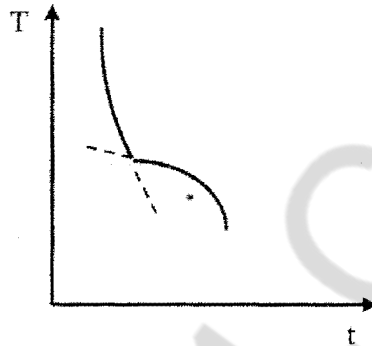
$$\text{Ce qui est équivalent à : } dT/(T - T^\circ) = - k dt$$

$$\ln(T - T^{\circ}) = -k(t - t^{\circ}) \quad \Delta T = e^{-k(t-t^{\circ})}$$

la température décroît exponentiellement au cours du temps



Sans changement d'état de la matière



avec changement d'état de la matière

Le coefficient k fait intervenir les capacités calorifiques à pression constante C_p des divers constituants du système. Or celle-ci diffèrent selon les états de la matière en étant, à l'état liquide très supérieures à celles des autres états. L'allure des courbes d'analyse thermique est donc susceptible de varier.

✓ Si toutes les phases du système sont dans un même état, k peut être considéré comme constant: la vitesse décroît alors au cours du temps par suite de la diminution de ΔT . La courbe $\Delta T = e^{-k(t-t^{\circ})}$ d'une solution S présente alors une concavité tournée vers la droite.

✓ Lorsque la solution S est en cours de cristallisation, double phénomène antagoniste agit sur le système:

↗ Transformation liquide-solide toujours accompagnée de la libération de l'énergie de cristallisation $\Delta H^{\circ}_{(cris)} < 0$, ce qui augmente la quantité de chaleur à extraire du système et s'oppose donc à son refroidissement.

↗ Réduction de la capacité calorifique par remplacement progressif d'une certaine quantité de liquide par la même quantité de solide. $\Delta H(T) = \Delta H^{\circ}(T) + \int_{T^{\circ}}^T \Delta C_p dT$, le système avec $\Delta C_p < 0$, emmagasine de l'énergie lors d'un abaissement de la température.

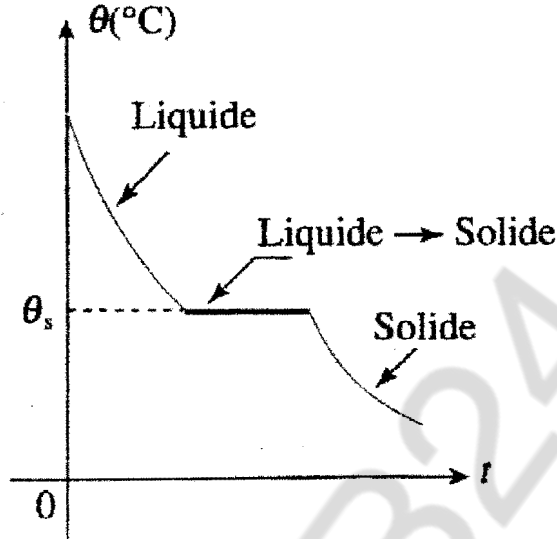
La résultante des deux effets apparaît sur la figure, la vitesse de refroidissement, d'abord ralentie en début de cristallisation vis à vis de l'état liquide, s'accélère ensuite dans la mesure où ΔT s'accroît. La concavité de la courbe $\Delta T = e^{-k(t-t^{\circ})}$ est alors tournée vers la gauche.

L'analyse thermique est basée sur l'interprétation de la courbe donnant, en fonction du temps, la variation de la température d'un système en cours de refroidissement. Les changements d'état, les transformations allotropiques, les réactions chimiques, qui s'accompagnent d'un effet thermique, se manifestent sur la courbe par des points singuliers.

IV- 2- Courbes d'analyse thermique

L'allure de la courbe de solidification dépend de la composition de l'ensemble.

IV- 2- 1- Courbe a: solidification à température constante.



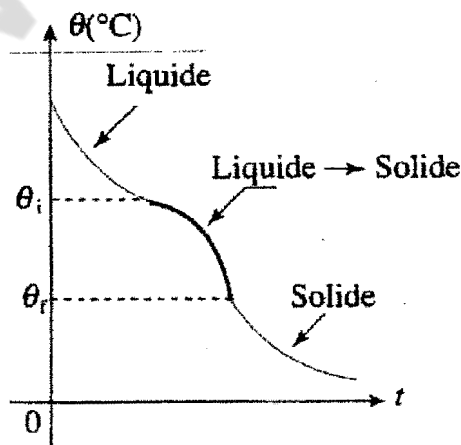
Courbe a

Pendant toute la durée de la solidification, la température reste égale à θ_s et l'analyse chimique montre que le solide qui se dépose et le liquide conservent la même composition.

Trois cas se présentent :

- S'il s'agit d'un **corps pur** (100% de M.) ce palier est normal, car un corps pur fond et se solidifie à température constante.
- Si c'est un corps composé homogène, c'est une **combinaison chimiquement définie (CCD)**.
- Si c'est un corps composé hétérogène, c'est un mélange particulier appelé: **eutectique**.

IV- 2- 2- Courbe b: solidification à température variable.

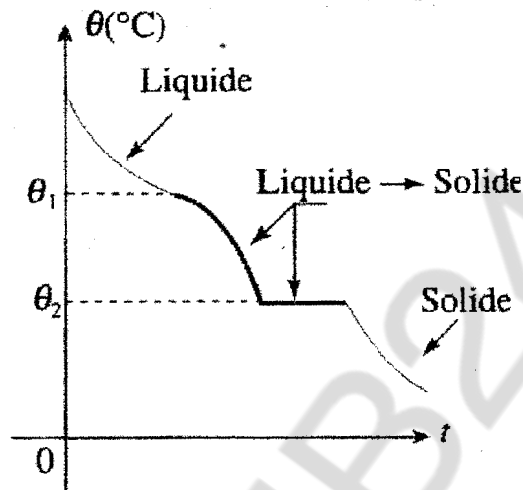


Courbe b

Le premier cristal apparaît à la température θ_i et la dernière goutte de liquide disparaît à la température θ_f .

Pendant cette solidification, l'analyse chimique montre que les compositions, différentes, du liquide et du solide varient : le composé est un mélange.

IV- 2- 3- Courbe c: solidification en deux parties (superposition des courbes a et b).



Courbe c

Grâce à la micrographie, on constate que, de θ_1 , à θ_2 , il se dépose un **solide homogène** (corps pur, CCD); à la température θ_2 constante, le solide devient **hétérogène**, par formation d'un **eutectique**.

On répète cette "analyse thermique" pour autant de mélanges différents qu'il est nécessaire. Quelle que soit la composition du mélange. Grâce aux points singuliers observés sur chaque courbe, on peut construire le diagramme de *solidification* qui est également un *diagramme d'équilibre* entre les phases et permet, en outre, de déceler la formation de combinaisons nouvelles et de déterminer leur constitution.

Définition:

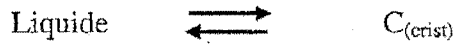
* Un eutectique est un mélange de deux corps purs qui fond et se solidifie à température constante, contrairement aux mélanges habituels. Il se comporte en fait comme un corps pur du point de vue de la fusion

* Liquidus : Courbe d'équilibre qui sépare un domaine monophasé liquide d'un domaine biphasé comprenant un liquide et un solide. Courbe d'apparition des premiers cristaux lors d'une cristallisation.

* Solidus : Courbe d'équilibre séparant un domaine biphasé L+S d'un domaine biphasé où tous les constituants sont sous forme solide. Limite de température sous laquelle il ne subsiste que du solide.

* Un composé défini à fusion congruente est un composé dont le liquide et le solide ont même composition.

Lorsque le composé C fond de façon congruente, la courbe de liquidus passe par un maximum au niveau de ce composé. En ce maximum, qui correspond au point de fusion du composé C, on a l'équilibre invariant :



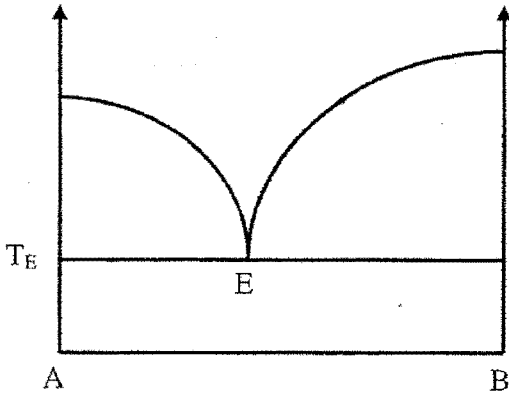
Le composé défini a une structure cristalline qui lui est propre et se comporte comme un corps pur.

* Un composé défini à fusion non congruente est un composé qui se transforme avant de fondre.

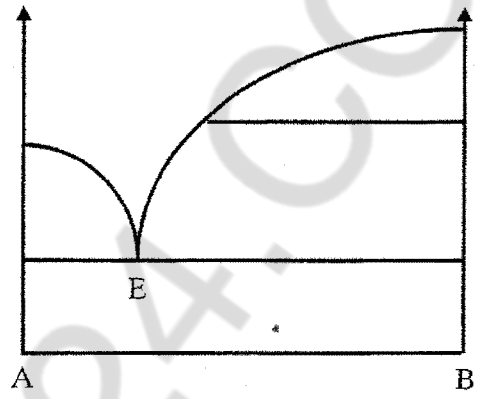


(I) Diagramme avec non-miscibilité à l'état solide

A - Constituants A et B cristallisent à l'état pur

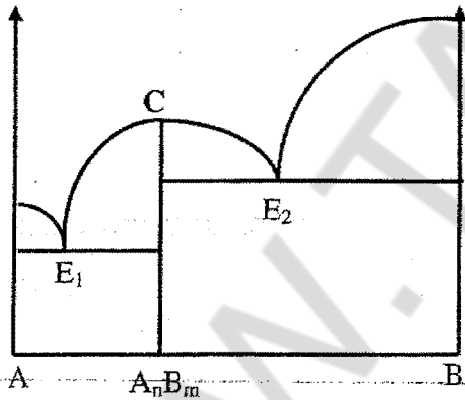


Eutectique simple
En E ($v = 0$) à T_E :
liquide \longleftrightarrow solide A + solide B

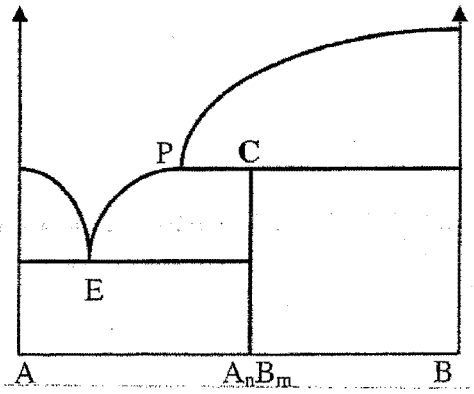


Eutectique simple
Existence de variété allotropique de B : $B_\alpha \longleftrightarrow B_\beta$

B - Existence de composés définis entre A et B



Composé défini à fusion congruente
2 eutectiques E_1 et E_2
en C :
solide (A_nB_m) \longleftrightarrow liquide (A_nB_m)



Composé défini à fusion non congruente
1 eutectique E
en C :
solide (A_nB_m) \longleftrightarrow solide (B) + liquide (P)

(II) Diagramme avec -miscibilité totale à l'état solide

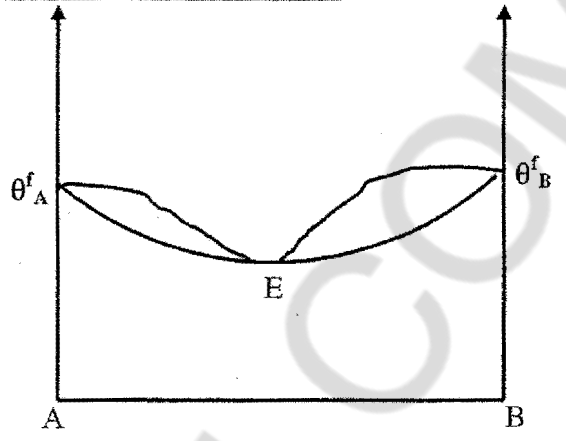
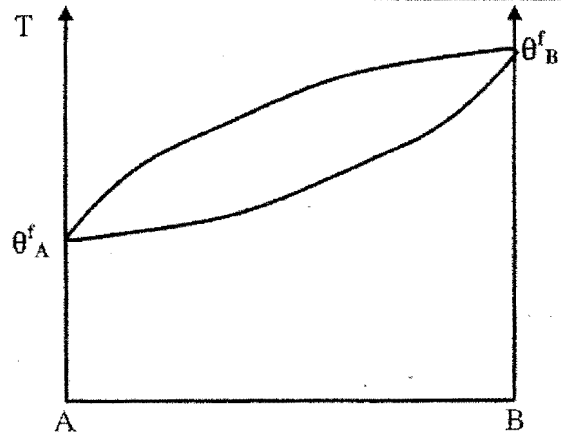
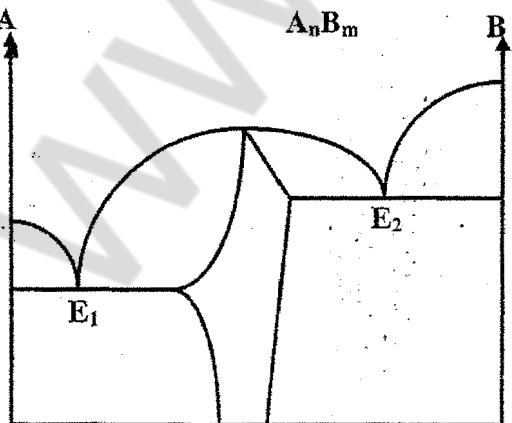
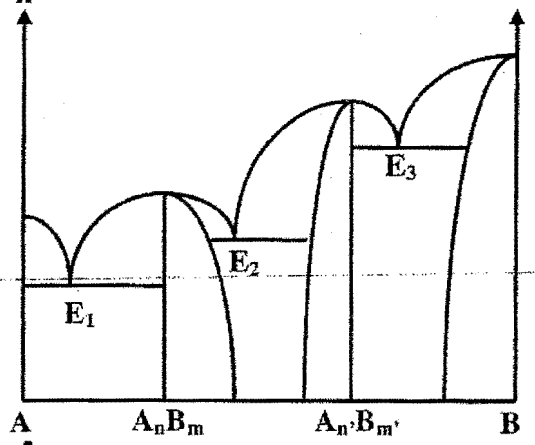
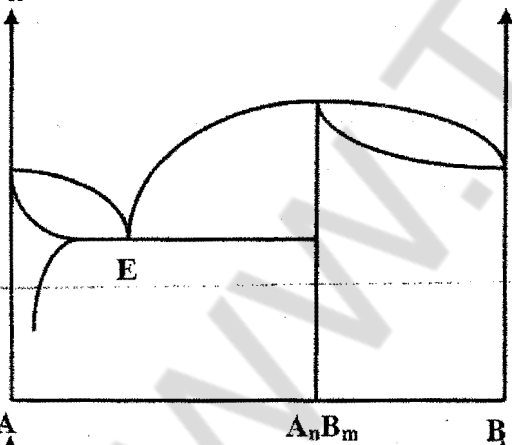
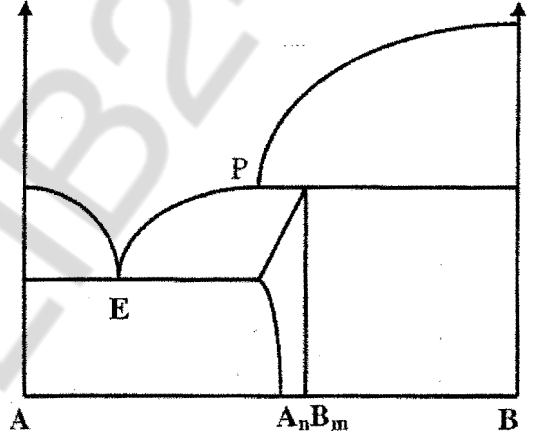
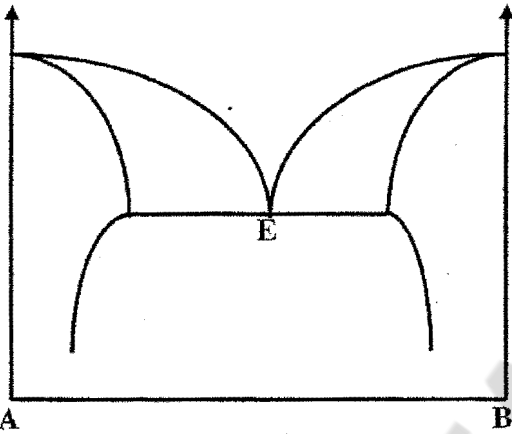


Diagramme avec miscibilité partielle à l'état solide

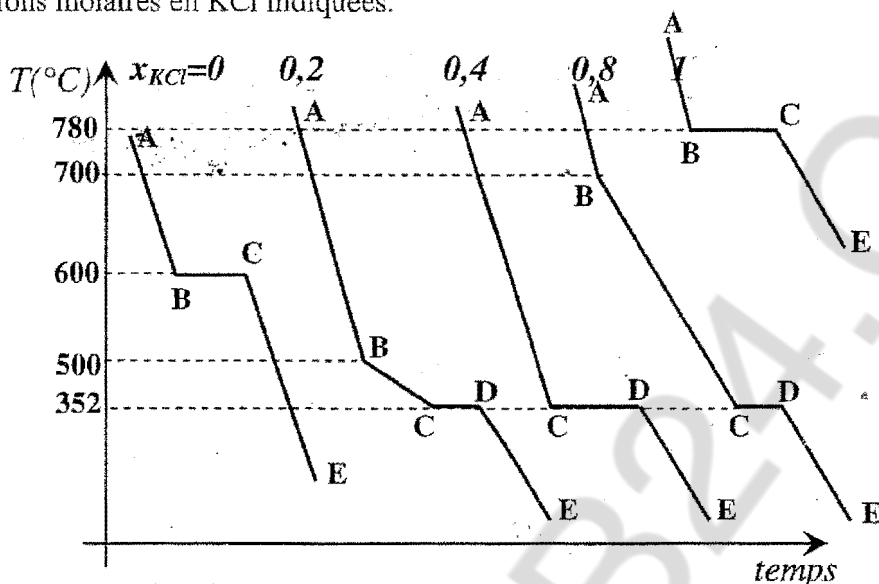


Exercices : DEUXIEME PARTIE
DIAGRAMME BINAIRE

WWW.TALIB24.COM

Exercice 1. Etude d'une courbe d'analyse thermique

On étudie ici le mélange binaire LiCl-KCl. On donne les courbes d'analyse thermique pour les fractions molaires en KCl indiquées.



- 1) LiCl et KCl sont-ils non miscibles à l'état solide ?
- 2) Tracer l'allure du diagramme binaire et préciser la nature des phases présentes dans les différents domaines.

☆☆☆

☆

Exercice 2. Etude diagramme binaire Germanium-silicium

On donne le tableau des températures du solidus et du liquidus du système Ge - Si.

- 1) Construire le diagramme d'équilibre température - fraction massique de ce système et identifier chaque région.
- 2) Soit l'alliage obtenu en mélangeant 8,43g de silicium et 14,52 g de germanium
 - 2-a) Calculer la fraction massique globale du silicium dans ce mélange.
 - 2-b) Cet alliage est porté à 1200°C. Déterminer la nature et la composition massique de chacune des phases.
 - 2-c) Déterminer les masses des phases en présence à 1200°C.

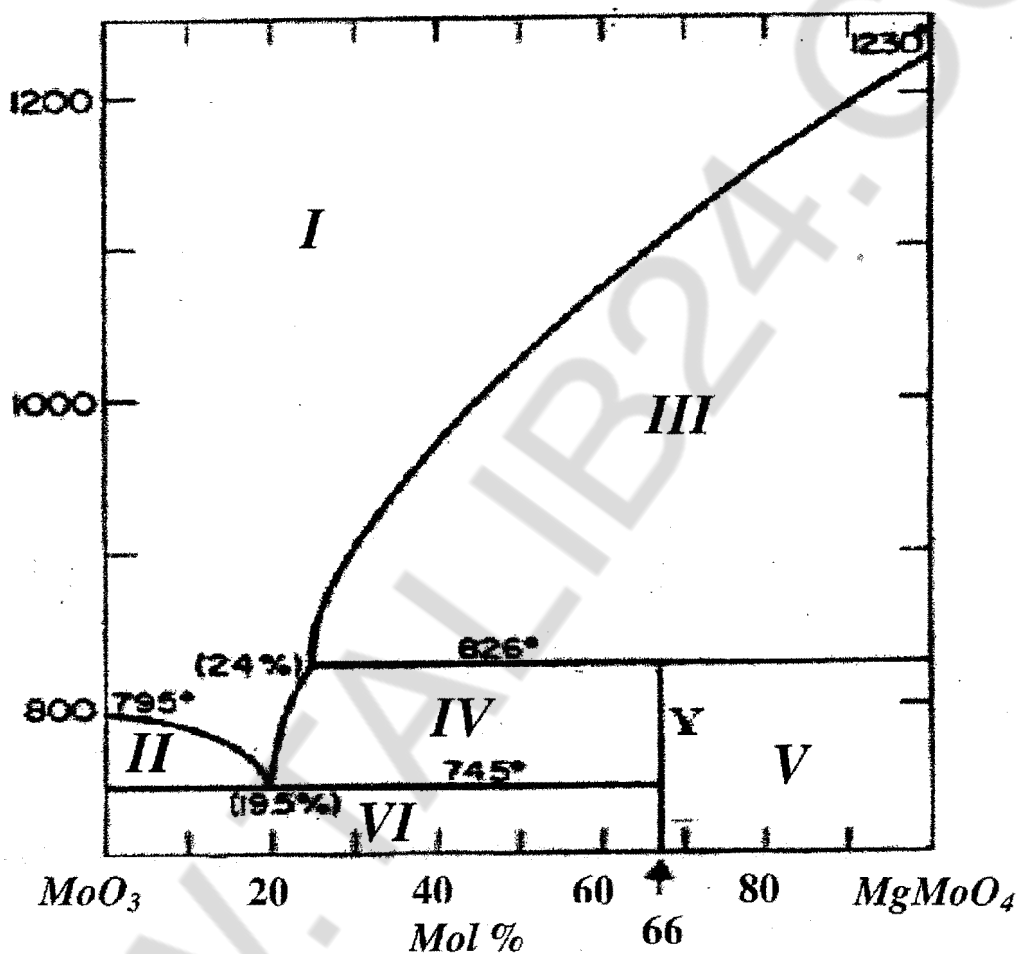
Composition %m de Si	Température Solidus (°C)	Température Liquidus (°C)
0	938	938
10	1005	1147
20	1065	1226
30	1123	1278
40	1178	1315
50	1232	1346
60	1282	1367
70	1326	1385
80	1359	1397
90	1390	1408
100	1414	1414

☆☆☆

Exercice 3 : Etude diagramme binaire MoO_3 - MgMoO_4

On donne le diagramme de phase du système MoO_3 - MgMoO_4 à la pression atmosphérique.

1) Préciser la formule chimique du composé défini Y.



2) Sur le diagramme, faire apparaître la courbe du liquidus et celle du solidus.

3) Indiquer les phases existant dans les différents domaines..

4) Tracer l'allure de la courbe d'analyse thermique que l'on obtiendrait lors du refroidissement de 1200°C à 700°C d'un liquide de composition équimolaire en MoO₃ et MgMoO₄. Pour cela :

- On précisera la ou les phases en présence au cours du temps.

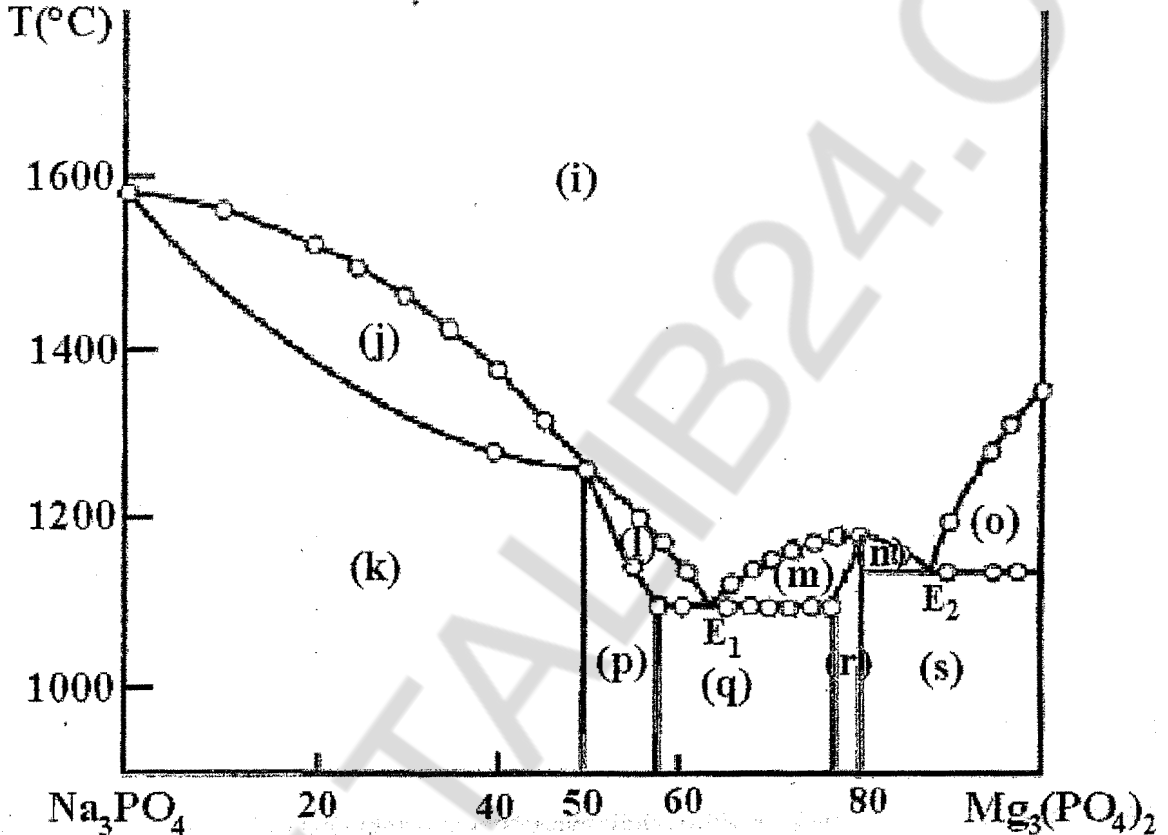
5) Donner la fraction des phases en présence et leurs compositions chimiques à 827°C puis à 825°C.

☆☆☆

Exercice 4 : Etude diagramme binaire $\text{Na}_3\text{PO}_4 - \text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$

La figure ci-jointe représente le diagramme de phases du système $\text{Na}_3\text{PO}_4 - \text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$

- 1) Donner les formules des composés définis que l'on écrira sous la forme $\text{Na}_x\text{Mg}_y(\text{PO}_4)_z$ et indiquer le type de fusion qu'ils présentent.
- 2) Indiquer les phases présentes dans chaque domaine (i, j, k, l, m, n, p, q, r et s)
- 3) Etablir la formule mathématique de la courbe d'analyse thermique et représenter schématiquement l'allure des courbes d'analyse thermique des compositions (20% et 70% en $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$) lors du refroidissement de 1600°C à 1000°C .

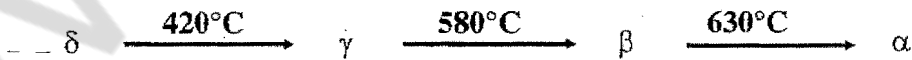


☆☆☆
☆

Exercice 5 : Etude diagramme binaire $\text{Na}_2\text{MoO}_4 - \text{MoO}_3$

L'analyse thermique du système $\text{Na}_2\text{MoO}_4 - \text{MoO}_3$ révèle :

Na_2MoO_4 et MoO_3 fondent respectivement à 690°C et 800°C . Quatre variétés allotropiques de Na_2MoO_4 sont connues :



Ce système comporte trois autres composés définis : $\text{Na}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$, $\text{Na}_2\text{Mo}_3\text{O}_{10}$ et $\text{Na}_2\text{Mo}_4\text{O}_{13}$.

$\text{Na}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ est un composé à fusion congruente ($T_f = 610^\circ\text{C}$). $\text{Na}_2\text{Mo}_3\text{O}_{10}$ et $\text{Na}_2\text{Mo}_4\text{O}_{13}$ sont des composés à fusion non congruente. Les températures de décomposition sont 520°C pour $\text{Na}_2\text{Mo}_3\text{O}_{10}$ et 510°C pour $\text{Na}_2\text{Mo}_4\text{O}_{13}$. Il y a présence de deux eutectiques E_1 et E_2 ($T_{E1} = 560^\circ\text{C}$; $T_{E2} = 500^\circ\text{C}$)

- 1) Dessiner à partir de ces données, le diagramme de phases le plus simple.
- 2) Indiquer les phases présentes dans chaque domaine.
- 3) Tracer et commenter les courbes d'analyse thermique des compositions suivantes : 52% mol Na_2MoO_4 – 48% mol MoO_3 et 48% mol Na_2MoO_4 – 52% mol MoO_3 . Préciser les réactions qui se produisent, à chaque palier, lors du refroidissement.

☆☆☆

Exercice 6 : Etude diagramme binaire A-B

A et B sont deux oxydes mixtes de masses molaires $M_A = 174,266\text{g}$ et $M_B = 136,14\text{g}$. Ils fondent respectivement à $T_f(A) = 1011^\circ\text{C}$ et $T_f(B) = 1462^\circ\text{C}$. Le composé A présente une solution solide. Il existe deux composés définis C (66% mol en B) et D (75% mol en B) à fusion non congruente. Les températures de décomposition sont 936°C pour C et 1004°C pour D. Il existe un eutectique E_1 (34mol % en B; 875°C). L'analyse chimique des composés C et D donne les résultats suivants exprimés en pourcentage massique.

Composé	% massique en K	% massique en Ca	% massique en S
C	17,519	17,958	21,507
D	13,426	20,644	21,976

- 1) Déterminer les formules chimiques les plus simples des composés C et D. En déduire celles de A et B.
- 2) Dessiner, à partir de ces données, le diagramme de phases le plus simple et indiquer les phases présentes dans chaque domaine.
- 3) Tracer et commenter la courbe d'analyse thermique du composé C.

Données:

Masse atomique $M_K = 39,1\text{ g/mol}$; $M_{Ca} = 40,08\text{ g/mol}$; $M_S = 32,00\text{ g/mol}$; $M_O = 16,00\text{ g/mol}$

☆☆☆

Exercice 7 : Etude diagramme binaire Na-K

Na et K fondent respectivement à 98°C et 65°C . Ils forment un composé solide NaK qui se décompose à 10°C en donnant un solide et un liquide contenant en moles 60% K. Il existe un eutectique à -12°C .

- 1) A partir de ces informations, dessiner le diagramme de phases le plus simple.
- 2) Indiquer les phases présentes dans chaque domaine.

☆☆☆

Exercice 8 : Etude diagramme binaire A-B

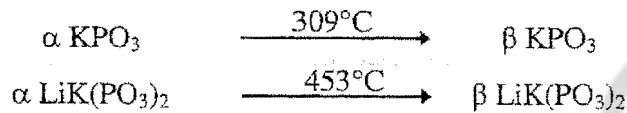
L'étude du système binaire A-B révèle l'existence de trois composés définis intermédiaires AB , AB_2 et AB_4 , les points de fusion de A et B sont respectivement 700°C et 800°C . Le composé AB est un composé à fusion congruente ($T_f = 560^\circ\text{C}$). AB_2 et AB_4 sont des composés à fusion non congruente. Les températures de décomposition sont 450°C pour AB_2 et 350°C pour AB_4 , il y a présence de deux eutectiques E_1 (25%B, $T_{E1} = 500^\circ\text{C}$) et E_2 (90%B, $T_{E2} = 250^\circ\text{C}$).

- 1) Dessiner à partir de ces données, le diagramme de phase le plus simple.
- 2) Indiquer les phases présentes dans chaque domaine.

☆☆☆

Exercice 9 : Etude diagramme binaire LiPO_3 - KPO_3

Les composés LiPO_3 et KPO_3 fondent respectivement à 660°C et 800°C . Ils forment un composé à fusion congruente $\text{LiK}(\text{PO}_3)_2$ qui fond à 554°C . KPO_3 et $\text{LiK}(\text{PO}_3)_2$ possèdent deux variétés allotropiques (α et β) il existe deux eutectiques (E_1 et E_2) dans le diagramme :



(α variété basse température);
E1 (30% mol KPO_3 , 520°C)

(β variété haute température)
E2 (65% mol KPO_3 , 542°C)

- 1) A partir de ces données tracer le diagramme de phases du système LiPO_3 - KPO_3
- 2) Quelles sont les phases présentes dans les différentes régions ?
- 3) Tracer les courbes d'analyse thermique pour les compositions 50% et 80% mol. KPO_3 .

☆☆☆

Exercice 10 : Etude diagramme binaire A-B

Le tableau ci-dessous donne les températures correspondant aux « cassures » et « paliers » des courbes de refroidissement relatif au diagramme binaire A-B.

Fraction molaire B	T(°C) Cassure	T(°C) Palier	Longueur palier
0	--	280	--
0,1	259	180	9
0,2	232	180	18
0,3	197	180	27
0,4	274	180	24
0,5	380	180	12

Fraction molaire B	T(°C) Cassure	T(°C) Palier	Longueur palier
0,6	--	400	--
0,7	384	260	6
0,8	339	260	12
0,9	280	260	18
0,95	280	260	13
1,0	--	320	--

- 1) Construire le diagramme binaire A-B et indiquer la nature des phases.
- 2) Indiquer la courbe de liquidus et celle du solidus.
- 3) Que forment les deux composés A et B ?
- 4) Préciser les compositions en fraction molaires et en fractions massiques des composés définis, ainsi que des points caractéristiques.

Données : Masses molaires respectives de A et B : 452 g/mol et 388 g/mol .

☆☆☆

Exercice 11 : Etude diagramme binaire A-B

Le tableau ci-dessous donne les températures correspondant aux " cassures " et " paliers " dans les courbes de refroidissement relatives au diagramme binaire A-B:

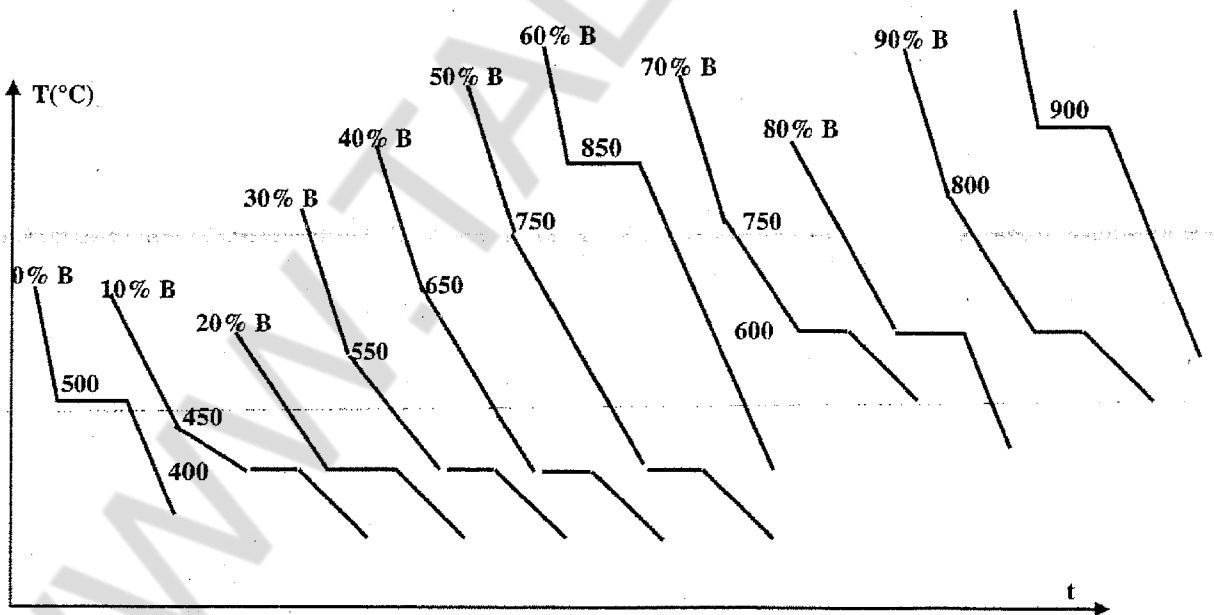
% molaire	Température (°C)		
	1 ^{er} cassure	1 ^{er} palier	2 ^{ème} palier
0		500	
10	450	400	
20		400	
30	550	400	
40	670	400	
50	750	700	400
60	850	700	400
70	940	700	400
80	1000	700	
90	1060	700	
100		1100	

- 1) A partir de ces données construire le diagramme de phases le plus simple.
- 2) Donner les coordonnées des différents points caractéristiques.

☆☆☆

Exercice 12 : Etude diagramme binaire A-B

- 1° Tracer le diagramme binaire A-B. A partir des courbes d'analyses thermiques, enregistrées lors d'un refroidissement.
- 2° Donner les coordonnées des différents points caractéristiques.



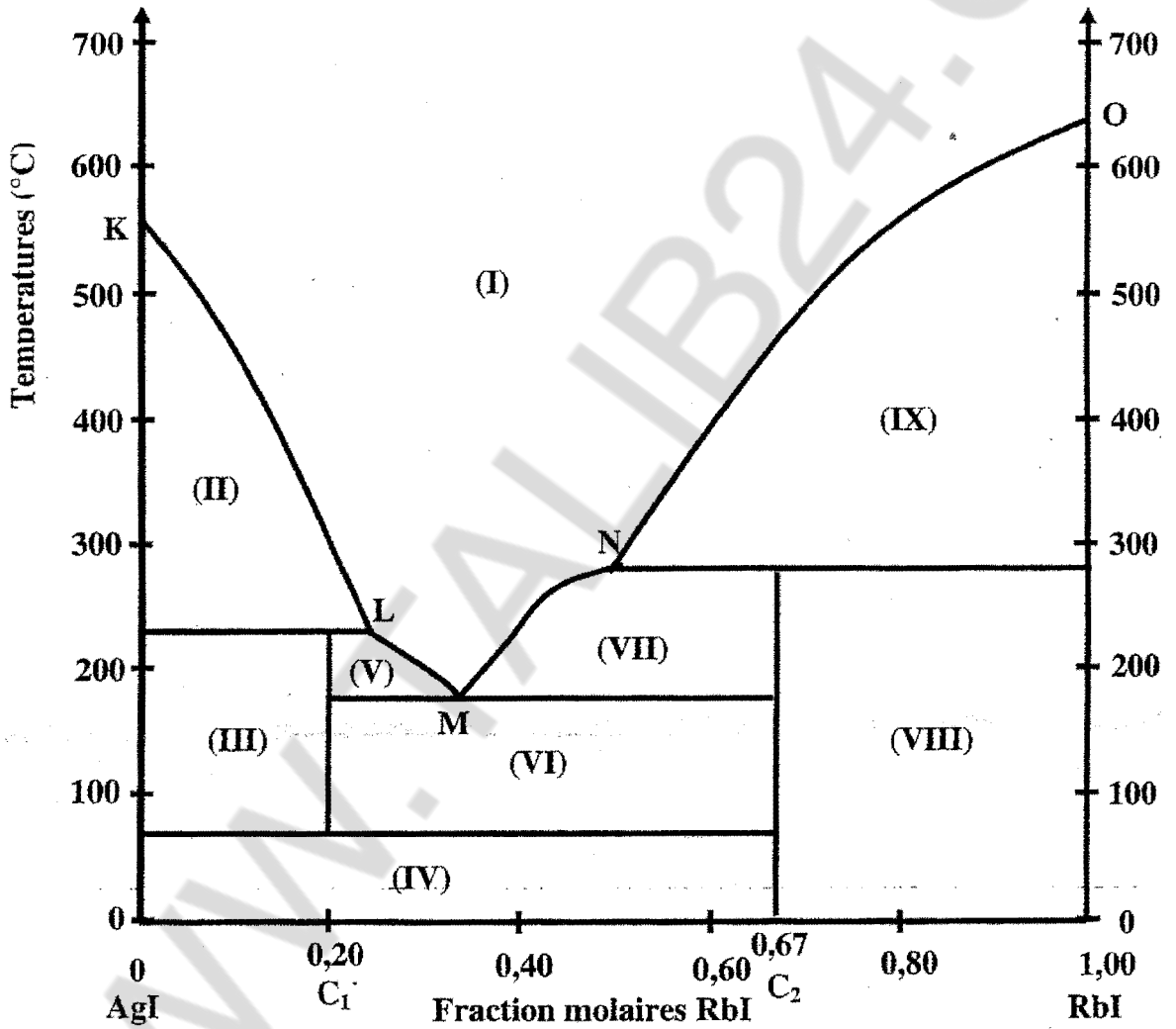
☆☆☆

Exercice 13 : Etude diagramme binaire AgI-RbI

Le diagramme d'équilibre du système AgI-RbI est donné ci-dessous.

- 1) Donner la formule de chaque composé défini que présente ce système.

- 2) Préciser la nature des phases en présence dans les domaines de (I) à (IX).
- 3) Un mélange de 10,0g de AgI et 13,6g de RbI est porté à 600°C puis refroidi dans les conditions de l'équilibre jusqu'à la température de 30°C.
- 3-a) Tracer l'allure de la courbe de refroidissement obtenue.
- 3-b) Donner la nature et la quantité (en grammes) des phases obtenues à 30°C.
- Les masses molaires sont : $\text{AgI} = 234,77 \text{ g.mol}^{-1}$; $\text{RbI} = 212,37 \text{ g.mol}^{-1}$



☆☆☆

SOLUTIONS DES EXERCICES

WWW.TALIB24.COM

Ex. 1 :

1) D'après l'allure des courbes des mélanges, LiCl et KCl sont non miscibles à l'état solide.

Courbe ($x_{KCl}=0$). – Relative à LiCl pur 0% KCl pour 100 % LiCl. La température baisse régulièrement : AB de 780°C à 600°C, la solidification commence et la température reste fixe jusqu'à solidification totale: palier BC, puis la masse de LiCl solide se refroidit : CE

Courbe ($x_{KCl}=0,2$). – Solution renfermant 20 % KCl pour 80 % LiCl. En B, vers 500°C, des cristaux de LiCl commencent à apparaître (point de solidification commençante). A partir de ce moment la pente de la courbe de refroidissement diminue : branche BC. La solidification de LiCl provoque l'enrichissement de la solution en KCl. Lorsque le titre en KCl atteint 40% (point C), on observe un dépôt simultané de cristaux de LiCl et de KCl. Ce dépôt, constitué par de petits cristaux juxtaposés, porte le nom d'eutectique. Sa composition reste constante jusqu'à la solidification totale qui s'effectue à température constante (palier CD).

Courbe ($x_{KCl}=0,4$). – Elle se rapporte à la solution ayant la composition de l'eutectique (40% de KCl). Cette solution se solidifie entièrement à 352°C (palier CD), comme le ferait un corps pur et le dépôt de (eutectique) garde la même composition du commencement à la fin de la cristallisation.

Courbe ($x_{KCl}=0,8$). – le mélange de titre en KCl (80%) supérieur à celui de l'eutectique. La solidification commence en B par un dépôt de cristaux de KCl qui se poursuit jusqu'en C. On a ensuite un palier CD, à 352°C, correspondant au dépôt de l'eutectique jusqu'à solidification totale.

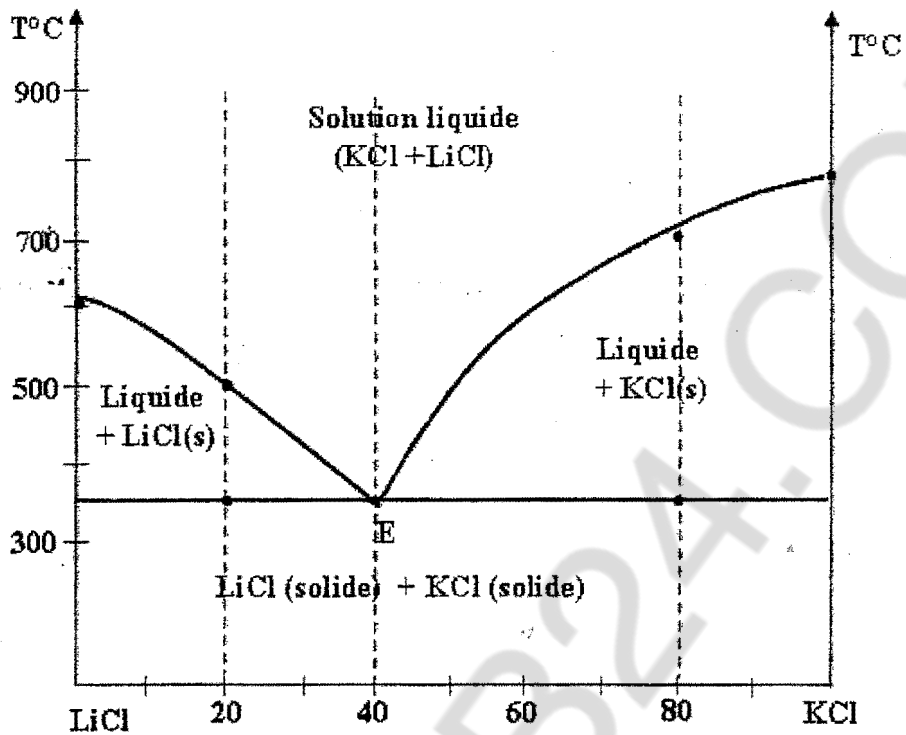
Courbe ($x_{KCl}=1$). – Relative à KCl pur 0% LiCl pour 100 % KCl. La température baisse régulièrement : AB de 780°C, la solidification commence et la température reste fixe jusqu'à solidification totale: palier BC, puis la masse de KCl solide se refroidit : CE

Pendant la période comprise entre l'apparition des premiers cristaux et le dépôt de l'eutectique, on a en présence une phase liquide et une phase solide, comme on opère à pression constante la variance du système est : $v = 2 + 1 - 2 = 1$

Le système est univariant. Sur le palier eutectique CD, on a un dépôt simultané de fins cristaux de KCl et de LiCl enchevêtrés qui sont en équilibre avec la solution : on a donc trois phases : $v = 2 + 1 - 3 = 0$.

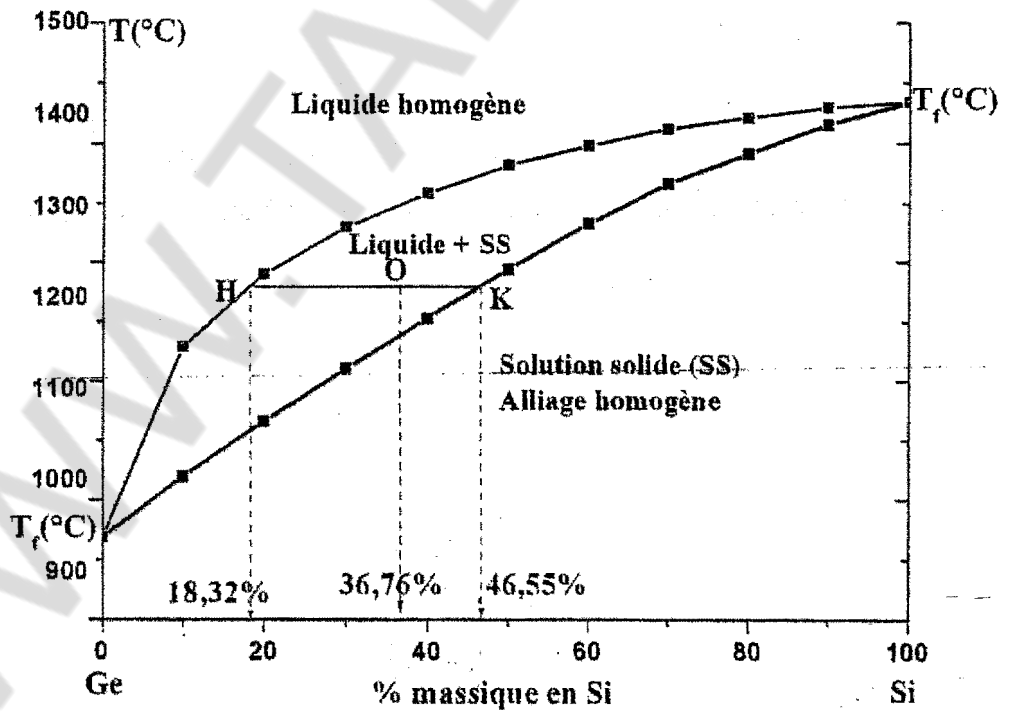
Le système devient invariant, ce qui explique que le dépôt de l'eutectique s'effectue toujours à la même température.

2) Les résultats obtenus permettent de tracer le diagramme binaire en portant en abscisse les titres des solutions et en ordonnée les températures de solidification commençante.



☆☆☆

Ex. 2 :



Le diagramme (liquidus + solidus) a la forme d'un fuseau qui délimite, à l'intérieur, le domaine dans lequel coexistent le liquide et les cristaux mixtes (Solution solide) en toutes proportions. Donc il y a miscibilité totale à l'état solide.

Les courbes de refroidissement de tous les alliages ont la même allure, elles ne présentent pas de palier, mais seulement deux points singuliers correspondant, le premier au début, le second à la fin de la solidification.

2-a) Calcul de la fraction massique : $\omega_{Si} = \frac{m_{Si}}{m_{Si} + m_{Ge}} = \frac{8,43}{8,43 + 14,52} = 0,367$

2-b) A la composition 36,7% en Si et à l'isotherme T=1200°C, il existe deux phases : la phase liquide et la solution solide de l'alliage.

L'isotherme T=1200°C coupe la courbe du liquidus en H, à $\omega_{Si, L} = 1,832$ et la courbe de solidus en K, à $\omega_{Si} = 4,655$.

2-c) les masses des phases en présence à 1200°C

Application de la règle des moments : $m_L \times \overline{OH} = m_{SS} \times \overline{OK}$

$$\frac{m_L}{OK} = \frac{m_{SS}}{OH} = \frac{m_L + m_{SS}}{HK}, m_L = m_T \times \frac{\overline{OK}}{\overline{HK}} = 22,95 \times \frac{(46,55 - 36,76)}{(46,55 - 18,32)} = 7,941g$$

$$m_L = m_T \times \frac{\overline{OK}}{\overline{HK}} = 22,95 \times \frac{(46,55 - 36,76)}{(46,55 - 18,32)} = 7,941g$$

$$m_{SS} = m_T \times \frac{\overline{OH}}{\overline{HK}} = 22,95 \times \frac{(36,76 - 18,32)}{(46,55 - 18,32)} = 14,991g$$

☆☆☆

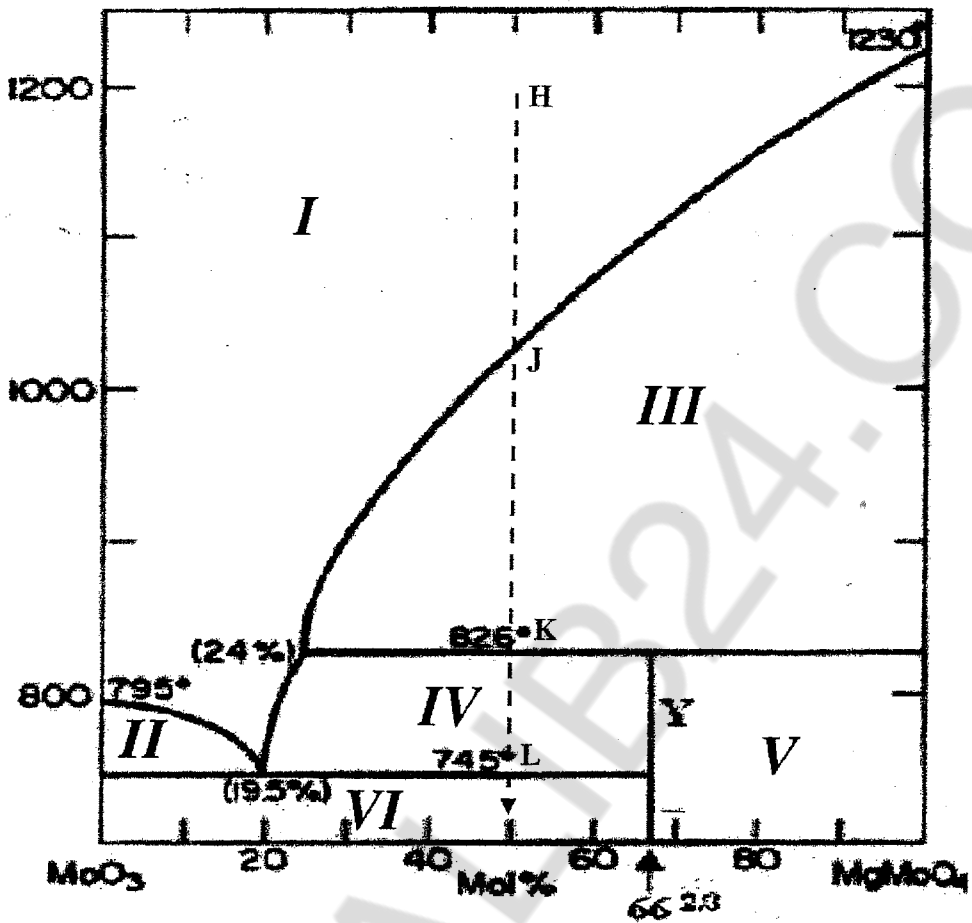
Ex. 3 :

Ce diagramme de miscibilité totale à l'état liquide et non miscibilité à l'état solide est caractérisé par : - la formation d'un composé défini a fusion non congruente pour $x_{MgMoO_4} = 0,66$, soit $(MoO_3)_a(MgMoO_4)_b$ le composé défini,

La fraction molaire : $x_{MgMoO_4} = 0,66 = \frac{b}{a+b}$, $0,66 = \frac{1}{1 + \frac{a}{b}}$, soit $\frac{a}{b} = \frac{1}{2}$, $a=1$ et $b=2$

D'où la formule chimique du composé défini Y = $(MoO_3)_1(MgMoO_4)_2 \equiv Mg_2Mo_3O_{11}$

- l'existence d'un seul point eutectique : E (19,5%, T_E= 745°C)



2)- la branche de liquidus est le lieu de solidification commençante.

- la branche de solidus est le lieu de solidification finissante.

Domaine I : Liquide homogène

Domaine II : Liquide + MoO_3 (s)

Domaine III : Liquide + MgMoO_4

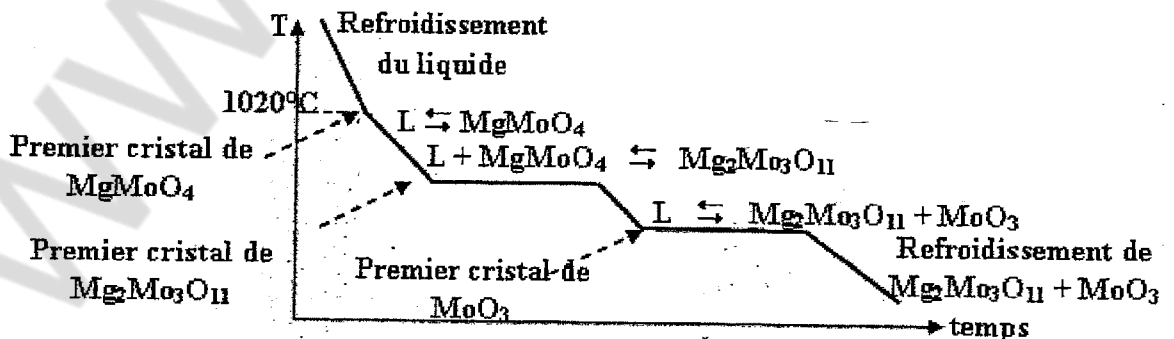
Domaine IV : Liquide + $\text{Mg}_2\text{Mo}_3\text{O}_{11}$ (s)

Domaine V : $\text{Mg}_2\text{Mo}_3\text{O}_{11}$ (s) + MgMoO_4 (s)

Domaine VI : MoO_3 (s) + $\text{Mg}_2\text{Mo}_3\text{O}_{11}$ (s)

4) l'allure de la courbe d'analyse thermique du mélange équimolaire :

Un mélange équimolaire est un mélange de composition 50% en MoO_3 et 50% en MgMoO_4 .



5) La fraction des phases en présence et leurs compositions chimiques pour un mélange équimolaire:

à 827°C : 50% $MgMoO_4$ et 26% Liquide

à 825°C : 16% $Mg_2Mo_3O_{11}$ et 26% Liquide

☆☆☆

Ex.4 :

Ce diagramme est caractérisé par : - la formation de deux composés définis à fusion congruente.

$x_{Mg_3(PO_4)_2} = 0,50$, soit $[Na_3PO_4]_a[Mg_3(PO_4)_2]_b$ le composé défini,

La fraction molaire : $x_{Mg_3(PO_4)_2} = 0,50 = \frac{b}{a+b}$, $0,50 = \frac{1}{1+\frac{a}{b}}$, soit $\frac{a}{b} = 1$, $a = 1$ et $b = 1$

D'où la formule chimique du composé défini : $[Na_3PO_4]_1[Mg_3(PO_4)_2]_1 \equiv Na_3Mg_3(PO_4)_3$



$x_{Mg_3(PO_4)_2} = 0,80$, soit $[Na_3PO_4]_a[Mg_3(PO_4)_2]_b$ le composé défini,

La fraction molaire : $x_{Mg_3(PO_4)_2} = 0,80 = \frac{b}{a+b}$, $0,80 = \frac{1}{1+\frac{a}{b}}$, soit $\frac{a}{b} = \frac{1}{4}$, $a = 1$ et $b = 4$

D'où la formule chimique du composé défini : $[Na_3PO_4]_1[Mg_3(PO_4)_2]_4 \equiv Na_3Mg_{12}(PO_4)_9$



- l'existence de deux eutectiques :

E_1 (64%, $T_{E1} = 1100^\circ C$)

E_2 (90%, $T_{E2} = 1150^\circ C$)

2) Domaine i : Liquide homogène

Domaine j : Liquide + SS.α

Domaine k : SS.α

Domaine l : Liquide + SS.β

Domaine m : Liquide + SS. γ

Domaine n : Liquide + $Na_3Mg_{12}(PO_4)_9$ (s)

Domaine o : Liquide + $Mg_3(PO_4)_2$ (s)

Domaine p : SS.β

Domaine q : SS.β + SS. γ

Domaine r : SS. γ

Domaine s : $Na_3Mg_{12}(PO_4)_9$ (s) + $Mg_3(PO_4)_2$ (s)

Avec : SS.α c'est solution solide continue entre Na_3PO_4 et $Na_3Mg_3(PO_4)_3$

SS.β c'est solution solide limite de $Na_3Mg_3(PO_4)_3$ (s)

SS.γ c'est solution solide limite de $Na_3Mg_{12}(PO_4)_9$ (s)

3) L'analyse thermique consiste à relever en fonction du temps t, l'évolution de la température T d'un produit. Le produit, chauffé jusqu'à l'état liquide, se refroidit lentement, sous la

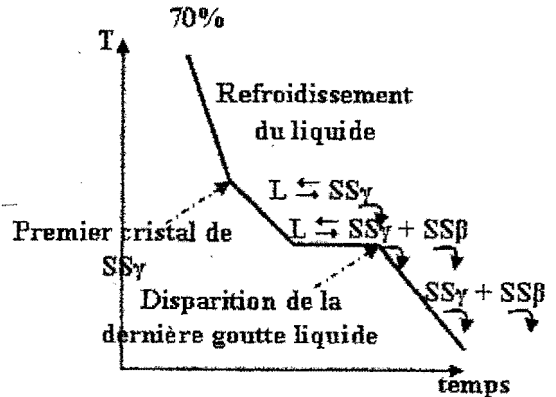
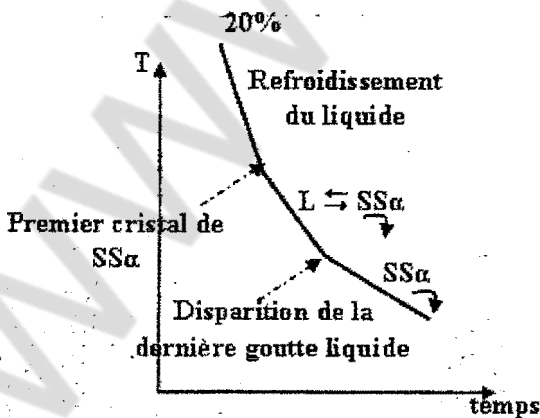
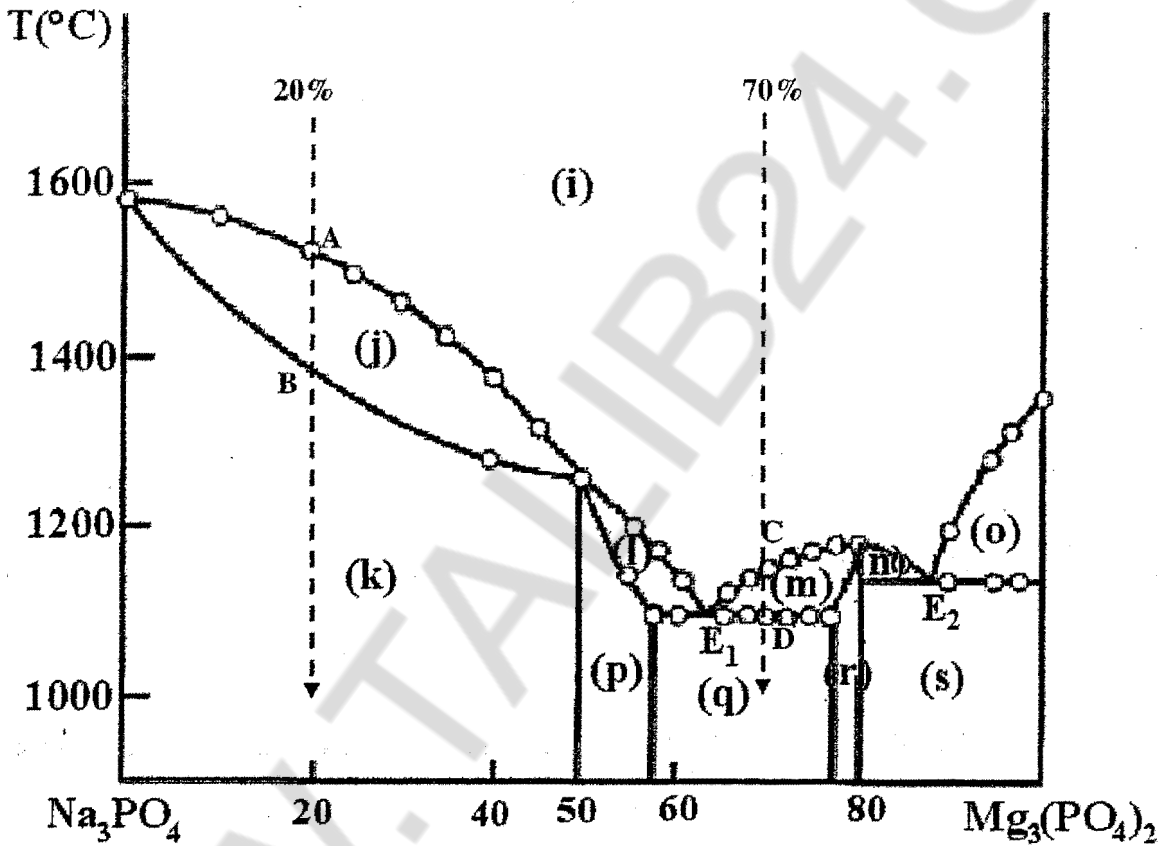
pression atmosphérique. L'étude de l'évolution de la température T au cours du temps t , traduit la restitution partielle de l'énergie thermique qu'il avait emmagasinée.

La vitesse $v(t)$ de refroidissement d'un corps dépend pour l'essentiel de la différence ΔT entre sa température réelle T et la température de référence T° à laquelle il doit être ramené:

$$v(t) = -dT/dt = k \Delta T = k(T - T^\circ) \quad \text{Ce qui est équivalent à : } dT/(T - T^\circ) = -k dt$$

$$\ln(T - T^\circ) = -k(t - t^\circ) \quad \Delta T = e^{-k(t-t^\circ)}$$

la température décroît exponentiellement au cours du temps



☆☆☆

Ex. 5 :

Le diagramme de phases comporte :

Quatre variétés allotropiques, δ , γ , β et α de Na_2MoO_4

Un composé défini a fusion congruente $\text{Na}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$



$\text{Na}_2\text{Mo}_2\text{O}_7 \equiv (\text{Na}_2\text{MoO}_4)_1(\text{MoO}_3)_1$ la composition est $\chi(\text{MoO}_3) = 50\%$

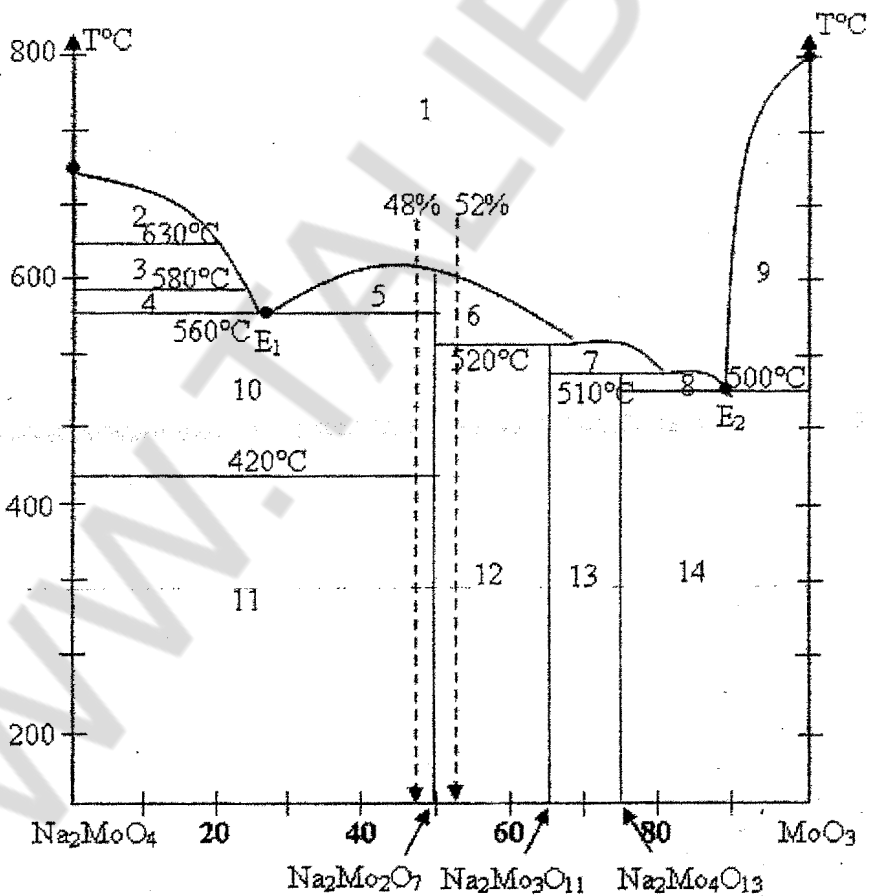
Deux autres composés définis a fusion non congruente $\text{Na}_2\text{Mo}_3\text{O}_{10}$ et $\text{Na}_2\text{Mo}_4\text{O}_{13}$



$\text{Na}_2\text{Mo}_3\text{O}_{10} \equiv (\text{Na}_2\text{MoO}_4)_1(\text{MoO}_3)_2$ la composition est $\chi(\text{MoO}_3) = 66,67\%$

$\text{Na}_2\text{Mo}_4\text{O}_{13} \equiv (\text{Na}_2\text{MoO}_4)_1(\text{MoO}_3)_3$ la composition est $\chi(\text{MoO}_3) = 75\%$

Il y a présence de deux eutectiques E_1 et E_2 ($T_{E1} = 560^\circ\text{C}$; $T_{E2} = 500^\circ\text{C}$)



2) Les phases présentes dans les différents domaines du diagramme :

Domaine 1 : Liquide homogène

Domaine 2 : Liquide + Na_2MoO_4 variété α

Domaine 3 : Liquide + Na_2MoO_4 variété β

Domaine 4 : Liquide + Na_2MoO_4 variété γ

Domaine 5 : Liquide + $\text{Na}_2\text{Mo}_2\text{O}_7(\text{s})$

Domaine 6 : Liquide + $\text{Na}_2\text{Mo}_2\text{O}_7(\text{s})$

Domaine 7 : Liquide + $\text{Na}_2\text{Mo}_3\text{O}_{11}(\text{s})$

Domaine 8 : Liquide + $\text{Na}_2\text{Mo}_4\text{O}_{13}(\text{s})$

Domaine 9 : Liquide + $\text{MoO}_3(\text{s})$

Domaine 10 : Na_2MoO_4 variété γ + $\text{Na}_2\text{Mo}_2\text{O}_7(\text{s})$

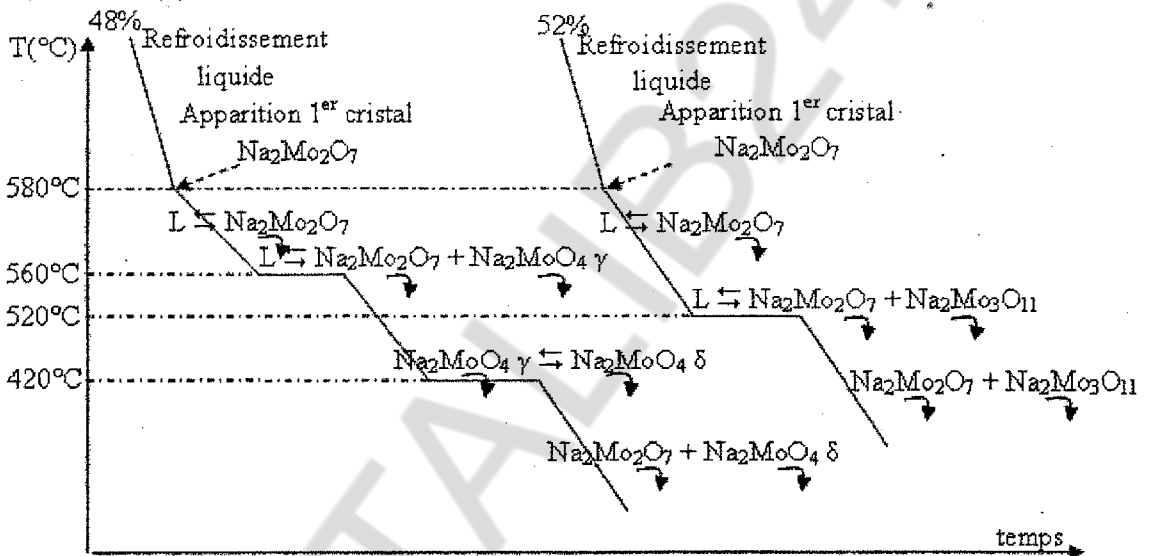
Domaine 11 : Na_2MoO_4 variété δ + $\text{Na}_2\text{Mo}_2\text{O}_7(\text{s})$

Domaine 12 : $\text{Na}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ + $\text{Na}_2\text{Mo}_3\text{O}_{11}(\text{s})$

Domaine 13 : $\text{Na}_2\text{Mo}_3\text{O}_{11}(\text{s})$ + $\text{Na}_2\text{Mo}_4\text{O}_{13}(\text{s})$

Domaine 14 : $\text{Na}_2\text{Mo}_4\text{O}_{13}(\text{s})$ + $\text{MoO}_3(\text{s})$

3) Allure des courbes de refroidissement des compositions 48% mol MoO_3 et 52% mol MoO_3 :



☆☆☆

Ex. 6 :

1) Les formules stœchiométriques des composés définis à fusion non congruente C et D :

$$C \equiv K \frac{17,519}{39} Ca \frac{17,958}{40,08} S \frac{21,507}{32} O \frac{43,016}{16}$$

$$D \equiv K \frac{13,426}{39} Ca \frac{20,644}{40,08} S \frac{21,976}{32} O \frac{43,954}{16}$$

$$C \equiv K_{0,449} Ca_{0,448} S_{0,672} O_{2,6885}$$

$$D \equiv K_{0,344} Ca_{0,515} S_{0,686} O_{2,747}$$

on divise par le plus petit nombre 0,448 :

on divise par le plus petit nombre 0,344 :

$$C \equiv KCaS_{\frac{3}{2}}O_6 \equiv K_2Ca_2S_3O_{12} \equiv K_2Ca_2(SO_4)_3$$

$$D \equiv KCa_{\frac{3}{2}}S_2O_8 \equiv K_2Ca_3S_4O_{16} \equiv K_2Ca_3(SO_4)_4$$

$$\% \text{ massique en O} = (100 - \% m_K - \% m_{Ca} - \% m_S)$$



La formule stœchiométrique la plus simple de A est : K_2SO_4 de masse molaire de 174 g/mol.
La formule stœchiométrique la plus simple de B est : $CaSO_4$ de masse molaire de 136 g/mol

A partir des données on trace le diagramme binaire le plus simple :

Le diagramme de phases comporte :

K_2SO_4 présente une solution solide.

Deux composés définis à fusion non congruente :

$C \equiv K_2Ca_2(SO_4)_3 \equiv (K_2SO_4)_1(CaSO_4)_2$ la composition est $\chi(CaSO_4) = 66\%$

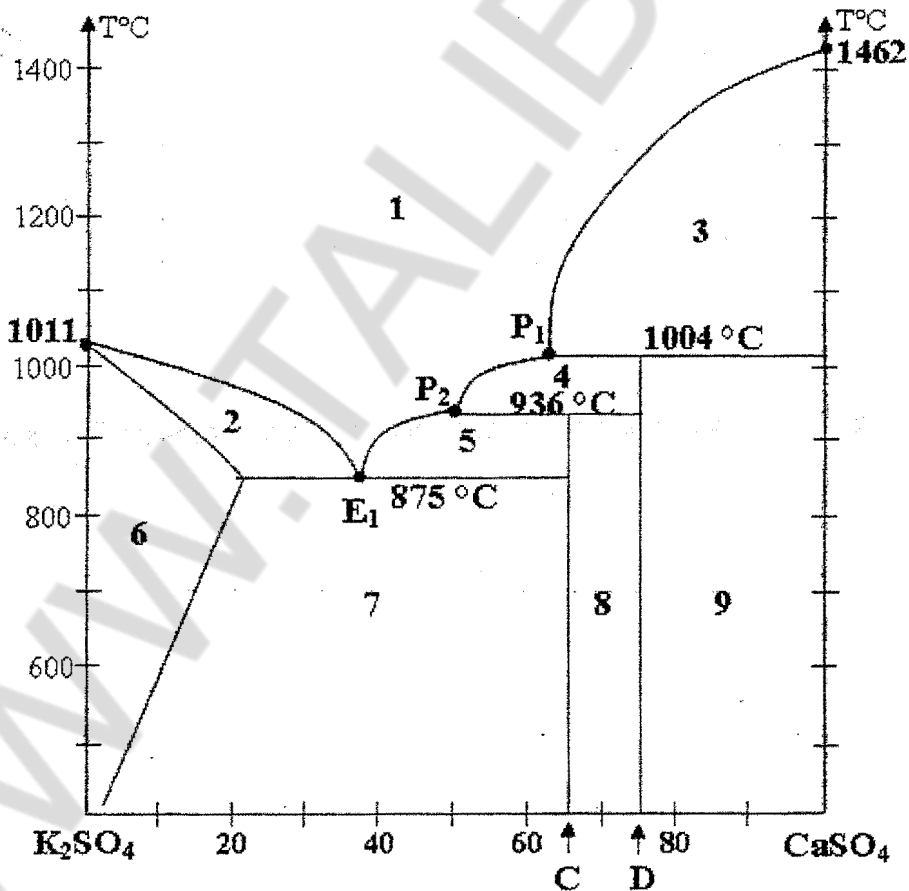
C \longrightarrow Liquide (P_2) + solide X

$D \equiv K_2Ca_3(SO_4)_4 \equiv (K_2SO_4)_1(CaSO_4)_3$ la composition est $\chi(CaSO_4) = 75\%$

D \longrightarrow Liquide (P_1) + solide Y

L'existence de deux péritectiques P_1 et P_2

Il y a présence d'un eutectique E_1 ($\chi = 34\%$; $T_{E_1} = 875^\circ C$)



2) Les phases présentes dans les différents domaines du diagramme :

Domaine 1 : Liquide homogène

Domaine 2 : Liquide + SS de K_2SO_4

Domaine 3 : Liquide + $CaSO_4(s)$

Domaine 4 : Liquide + $K_2Ca_3(SO_4)_4(s)$

Domaine 5 : Liquide + $K_2Ca_2(SO_4)_3$ (s)

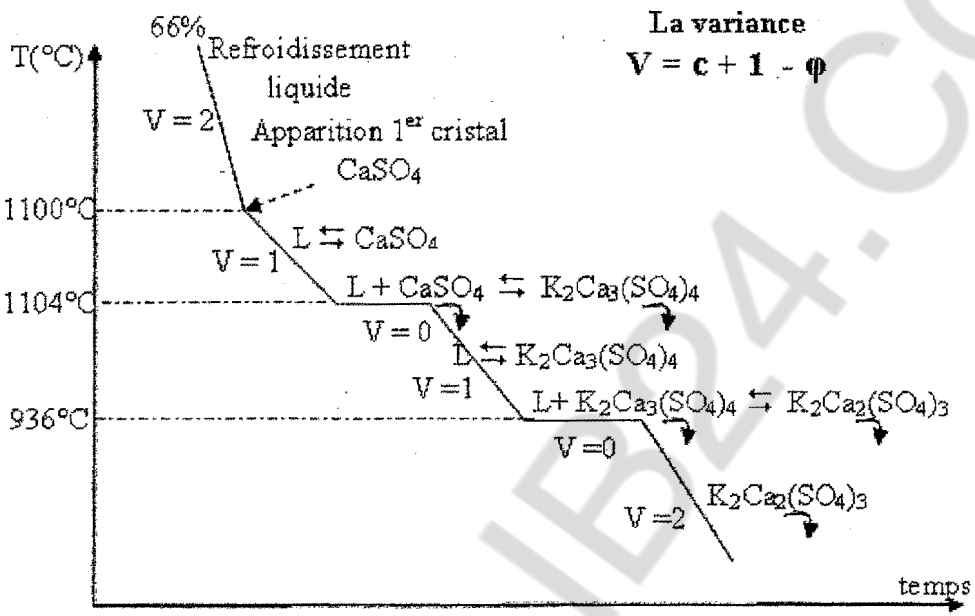
Domaine 6 : SS limité de K_2SO_4

Domaine 7 : SS de $K_2SO_4 + K_2Ca_2(SO_4)_3$ (s)

Domaine 8 : $K_2Ca_2(SO_4)_3$ (s) + $K_2Ca_3(SO_4)_4$ (s)

Domaine 9 : $K_2Ca_3(SO_4)_4$ (s) + $CaSO_4$ (s)

3) La courbe d'analyse thermique du composé C de composition est $\chi(CaSO_4) = 66 \%$



☆☆☆

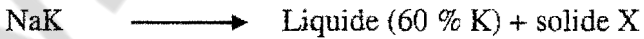
Ex. 7 :

$T^{\circ}f(Na) = 98^{\circ}C, T^{\circ}f(K) = 65^{\circ}C$

Na et K forment un composé solide NaK, c'est un composé définie à fusion non congruente :

La composition de NaK est $\chi(K) = 50 \%$

Il se décompose à $10^{\circ}C$;



Il existe un eutectique à $-12^{\circ}C$.

2) Les phases présentes dans les différents domaines du diagramme :

Domaine I : Liquide homogène

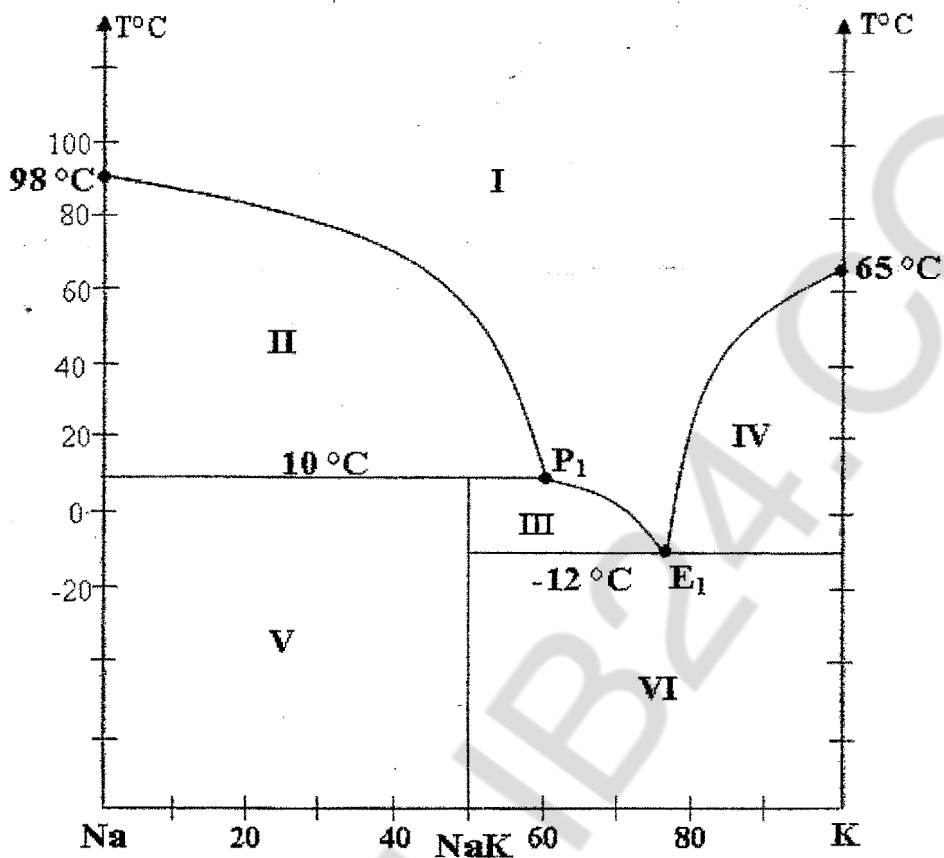
Domaine II : Liquide + Na(s)

Domaine III : Liquide + NaK(s)

Domaine IV : Liquide + K(s)

Domaine V : Na(s) + NaK (s)

Domaine VI : NaK(s) + K(s)



☆☆☆

Ex. 8 :

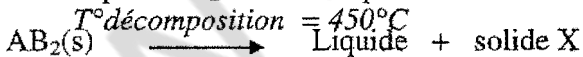
$T^{\circ}f(A) = 700^{\circ}\text{C}$, $T^{\circ}f(B) = 800^{\circ}\text{C}$

Il existe trois composés définis intermédiaires AB, AB_2 et AB_4 :

Le composé AB est un composé à fusion congruente : $\text{AB(s)} \xrightarrow{T^{\circ}f(\text{AB}) = 560^{\circ}\text{C}} \text{AB(liquide)}$

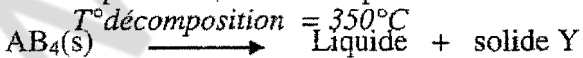
La composition de AB est $\chi(B) = \frac{1}{1+1} = 50\%$

Le composé AB_2 est un composé à fusion non congruente :



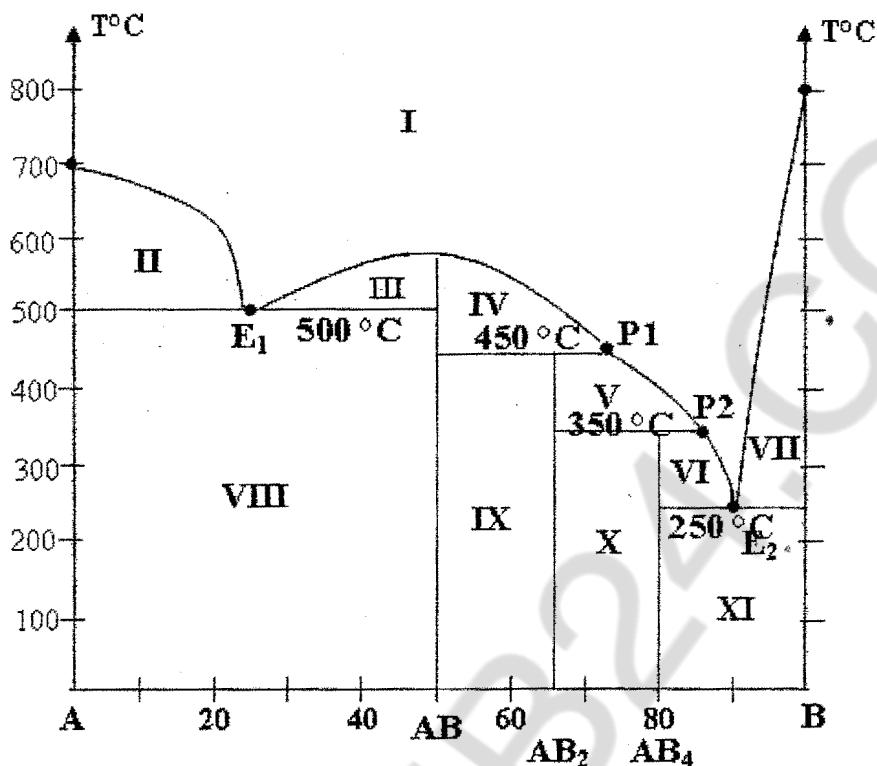
La composition de AB_2 est $\chi(B) = \frac{2}{1+2} = 66\%$

Le composé AB_4 est un composé à fusion non congruente :



La composition de AB_4 est $\chi(B) = \frac{4}{1+4} = 80\%$

Il y a présence de deux eutectiques E_1 (25%B, $T_{E_1} = 500^{\circ}\text{C}$) et E_2 (90%B, $T_{E_2} = 250^{\circ}\text{C}$).



2) Les phases présentes dans les différents domaines du diagramme :

Domaine I : Liquide homogène

Domaine II : Liquide + A(s)

Domaine III : Liquide + AB(s)

Domaine IV : Liquide + AB(s)

Domaine V : Liquide + AB₂(s)

Domaine VI : Liquide + AB₄(s)

Domaine VII : Liquide + B(s)

Domaine VIII : A(s) + AB(s)

Domaine IX : AB(s) + AB₂(s)

Domaine X : AB₂(s) + AB₄(s)

Domaine XI : AB₄(s) + B(s)

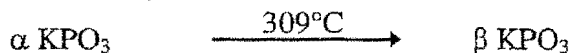
☆☆☆

Ex. 9 :

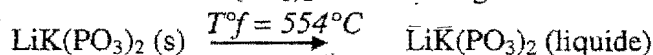
$$T^{\circ}f(\text{LiPO}_3) = 660^{\circ}\text{C}$$

$$T^{\circ}f(\text{KPO}_3) = 800^{\circ}\text{C}$$

KPO₃ possède deux variétés allotropiques (α et β)

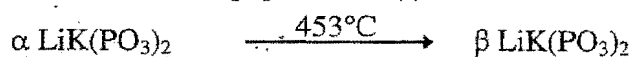


Il existe un composé intermédiaire LiK(PO₃)₂ à fusion congruente:

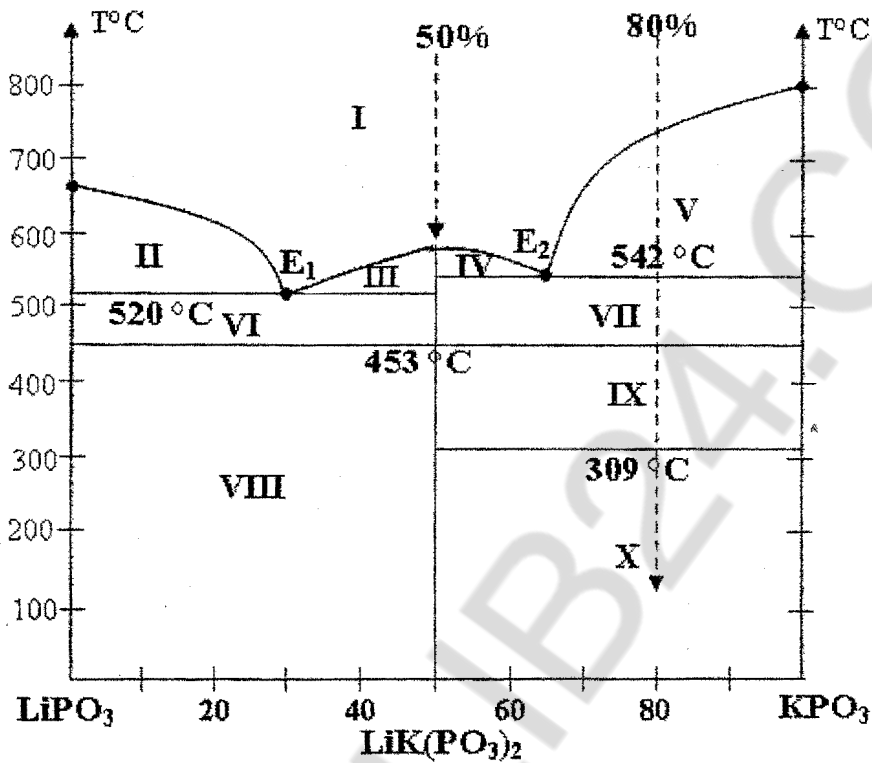


La composition de $\text{LiK}(\text{PO}_3)_2 \equiv (\text{LiPO}_3)_1(\text{KPO}_3)_1$ est $\chi(\text{KPO}_3) = \frac{1}{1+1} = 50\%$

LiK(PO₃)₂ possède deux variétés allotropiques (α et β)



Il existe deux eutectiques E1 (30% mol KPO_3 , 520°C) et E2 (65% mol KPO_3 , 542°C) dans le diagramme.



2) Les phases présentes dans les différents domaines du diagramme :

Domaine I : Liquide homogène

Domaine II : Liquide + $\text{LiPO}_3(\text{s})$

Domaine III : Liquide + $\text{LiK}(\text{PO}_3)_2(\text{s})$ variété β

Domaine IV : Liquide + $\text{LiK}(\text{PO}_3)_2(\text{s})$ variété β

Domaine V : Liquide + $\text{KPO}_3(\text{s})$ variété β

Domaine VI : $\text{LiPO}_3(\text{s})$ + $\text{LiK}(\text{PO}_3)_2(\text{s})$ (s) variété β

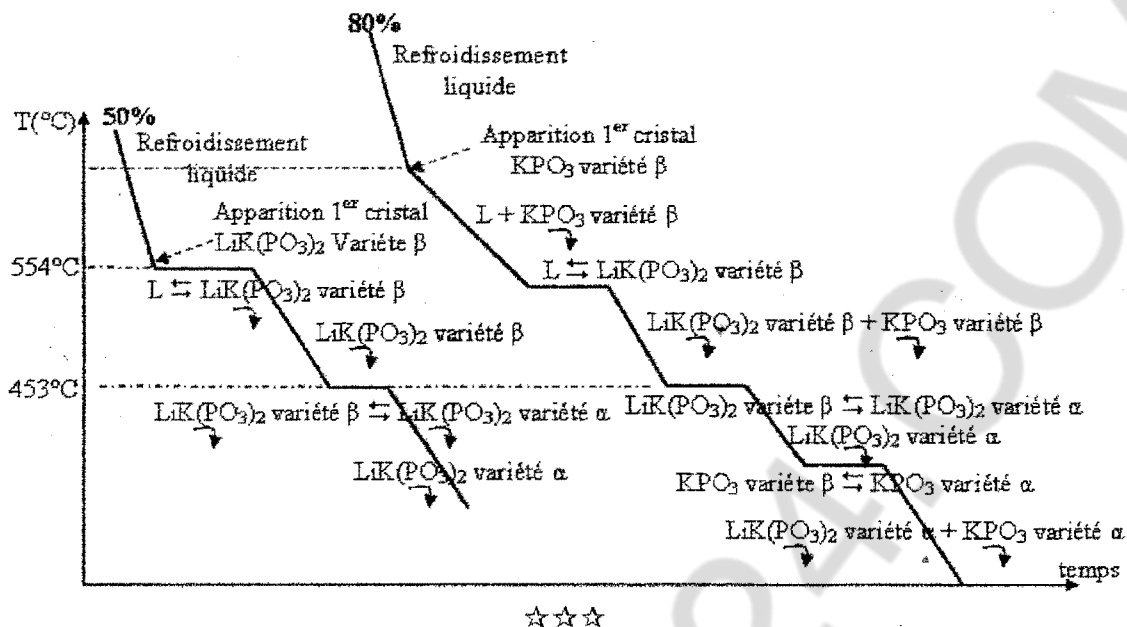
Domaine VII : $\text{KPO}_3(\text{s})$ β + $\text{LiK}(\text{PO}_3)_2(\text{s})$ (s) β

Domaine VIII : $\text{LiPO}_3(\text{s})$ + $\text{LiK}(\text{PO}_3)_2(\text{s})$ (s) variété α

Domaine IX : $\text{KPO}_3(\text{s})$ variété β + $\text{LiK}(\text{PO}_3)_2(\text{s})$ (s) variété α

Domaine X : $\text{KPO}_3(\text{s})$ variété α + $\text{LiK}(\text{PO}_3)_2(\text{s})$ variété α

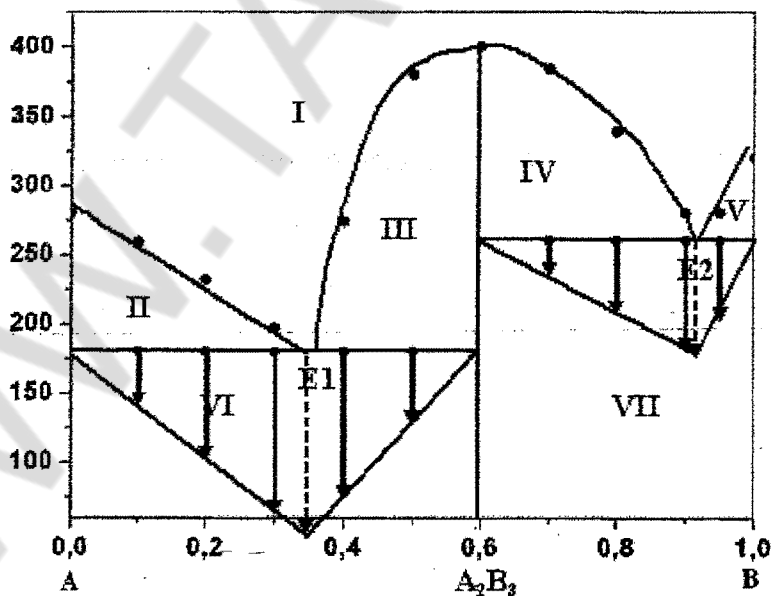
3) Allure des courbes d'analyse thermique des compositions 50% et 80% mol. KPO_3 .



Ex. 10 :

1) La construction du diagramme binaire A-B à partir des courbes expérimentales d'analyse thermique:

On porte verticalement la durée du palier eutectique sur chaque titre étudié, les points obtenus appartiennent aux côtés d'un triangle dont l'abscisse du troisième sommet nous donne le titre de l'eutectique : on construit le triangle de Tamman.



Le tracé expérimental du diagramme fait apparaître deux eutectiques notes E1 et E2, Pour E1 : $\chi(B) = 0,34$ et $TE1 = 180^\circ\text{C}$, Pour E2 : $\chi(B) = 0,93$ et $TE2 = 260^\circ\text{C}$

Les corps purs A et B forment un composé défini pour $\chi(B) = 0,60$, soit A_2B_3 le composé défini,

$$\text{La fraction molaire : } \chi_{AaBb} = 0,60 = \frac{b}{a+b}, 0,60 = \frac{1}{1+\frac{a}{b}}, \text{ soit } \frac{a}{b} = \frac{2}{3}, a=2 \text{ et } b=3$$

Composé défini : $A_2B_3(s)$

Les phases présentes dans les différents domaines du diagramme :

Domaine I : Liquide homogène

Domaine II : Liquide + A(s)

Domaine III : Liquide + $A_2B_3(s)$

Domaine IV : Liquide + $A_2B_3(s)$

Domaine V : Liquide + B(s)

Domaine VI : A(s) + $A_2B_3(s)$

Domaine VII : $A_2B_3(s)$ + B(s)

Calcul des fractions massiques correspondantes:

$$\chi_B = \frac{n_B}{n_A + n_B} = \frac{\frac{m_B}{M_B}}{\frac{m_A}{M_A} + \frac{m_B}{M_B}}, \text{ or } \omega_B = \frac{m_B}{m_A + m_B}, m_A = \frac{m_B(1 - \chi_B)M_A}{\chi_B M_B}$$

$$\omega_B = \frac{\chi_B M_B}{(1 - \chi_B)M_A + \chi_B M_B}$$

Application numérique : Pour E1 : $\chi(B) = 0,34$, $\omega(B) = 0,306$,

Pour E2 : $\chi(B) = 0,93$, $\omega(B) = 0,914$,

Pour $\chi(B) = 0,60$, le système est à l'état solide sous la forme de $A_2B_3(s)$

$$0,60 = \frac{n_B}{n_A + n_B} = \frac{\frac{m_B}{388}}{\frac{m_A}{452} + \frac{m_B}{388}}, \omega_B = 0,562 \quad \omega_A = 0,437$$

☆☆☆

Ex. 11 :

Construction du diagramme binaire A-B à partir des courbes expérimentales d'analyse thermique:

Le tracé expérimental du diagramme binaire A-B fait apparaître un eutectique E1,

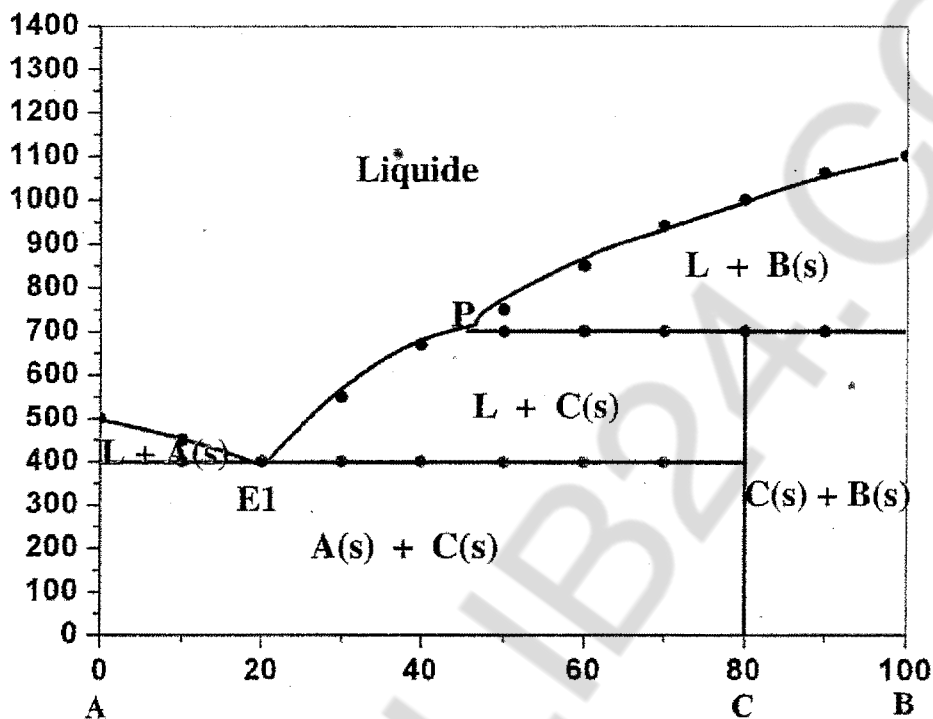
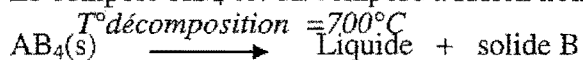
Pour E1 : $\chi(B) = 0,20$ et TE1 = 400°C,

Les corps purs A et B forment un composé défini à fusion non congruente, pour $\chi(B) = 0,80$, soit A_2B_4 le composé défini, de fraction molaire :

$$\chi_{AaBb} = 0,80 = \frac{b}{a+b}, 0,80 = \frac{1}{1+\frac{a}{b}}, \text{ soit } \frac{a}{b} = \frac{1}{4}, a=1 \text{ et } b=4$$

Composé défini : $AB_4(s)$

Le composé AB_4 est un composé à fusion non congruente :



☆☆☆

Ex. 12 :

Le tracé expérimental du diagramme fait apparaître deux eutectiques notes E1 et E2,

Pour E1 : $\chi(B) = 0,20$ et $TE1 = 400^{\circ}C$, Pour E2 : $\chi(B) = 0,80$ et $TE2 = 600^{\circ}C$

Les corps purs A et B forment un composé défini pour $\chi(B) = 0,60$, soit A_aB_b le composé défini,

$$\text{La fraction molaire : } \chi_{AaBb} = 0,60 = \frac{b}{a+b}, \quad 0,60 = \frac{1}{1 + \frac{a}{b}}, \text{ soit } \frac{a}{b} = \frac{2}{3}, \quad a = 2 \text{ et } b = 3$$

Composé défini : $A_2B_3(s)$

Les phases présentes dans les différents domaines du diagramme :

Domaine I : Liquide homogène

L+A : Liquide + A(s)

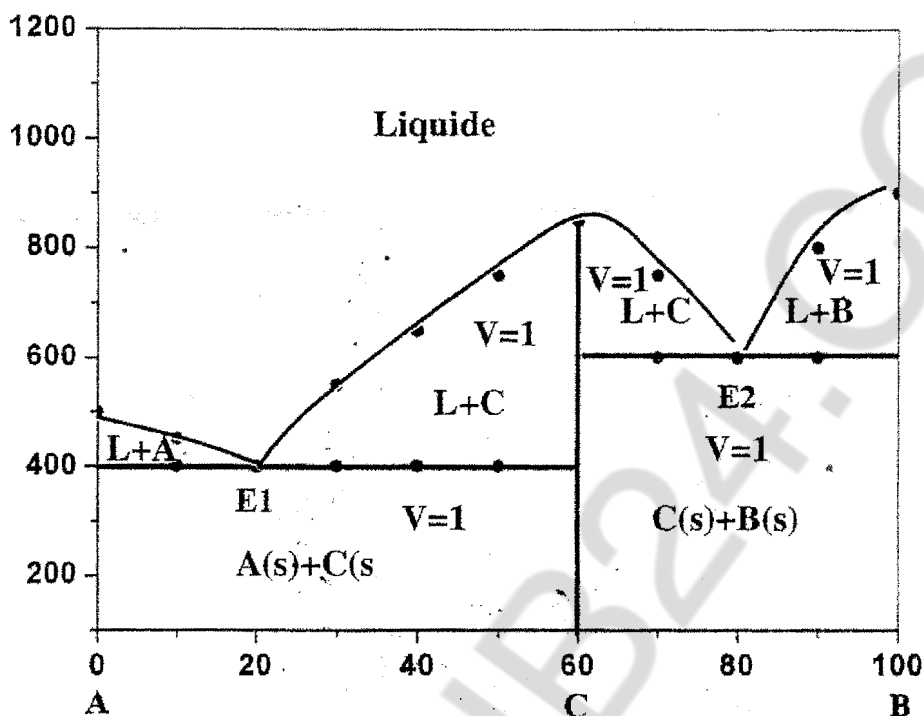
L+C : Liquide + $A_2B_3(s)$

L + C : Liquide + $A_2B_3(s)$

L + B : Liquide + B(s)

A + C : A(s) + $A_2B_3(s)$

B + C : $A_2B_3(s)$ + B(s)



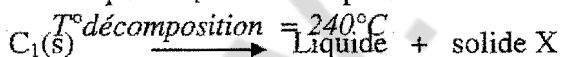
☆☆☆

Ex. 13 :

$T^{\circ}f(AgI) = 550^{\circ}C,$ $T^{\circ}f(B) = 640^{\circ}C$

Il existe deux composés définis intermédiaires C_1 et C_2 :

Le composé C_1 est un composé défini à fusion non congruente :



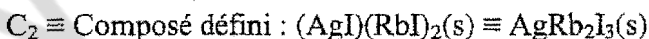
La composition de C_1 est : $\chi_{C_1} = 0,20 = \frac{b}{a+b}$, $0,20 = \frac{1}{1+\frac{a}{b}}$, soit $\frac{a}{b} = \frac{4}{1}$, $a = 4$ et $b = 1$



Le composé C_2 est un composé défini à fusion non congruente :



La composition de C_2 est : $\chi_{C_2} = 0,67 = \frac{b}{a+b}$, $0,67 = \frac{1}{1+\frac{a}{b}}$, soit $\frac{a}{b} = \frac{1}{2}$, $a = 1$ et $b = 2$



Les phases présentes dans les différents domaines du diagramme :

Domaine I : Liquide homogène

Domaine III : $\text{AgI(s)} + \text{Ag}_4\text{RbI}_5(\text{s})$

Domaine V : Liquide + $\text{Ag}_4\text{RbI}_5(\text{s})$

Domaine VII : Liquide + $\text{AgRb}_2\text{I}_3(\text{s})$

Domaine IX : Liquide + RbI(s)

Domaine II : Liquide + AgI(s)

Domaine IV : $\text{AgI(s)} + \text{AgRb}_2\text{I}_3(\text{s})$

Domaine VI : $\text{Ag}_4\text{RbI}_5(\text{s}) + \text{AgRb}_2\text{I}_3(\text{s})$

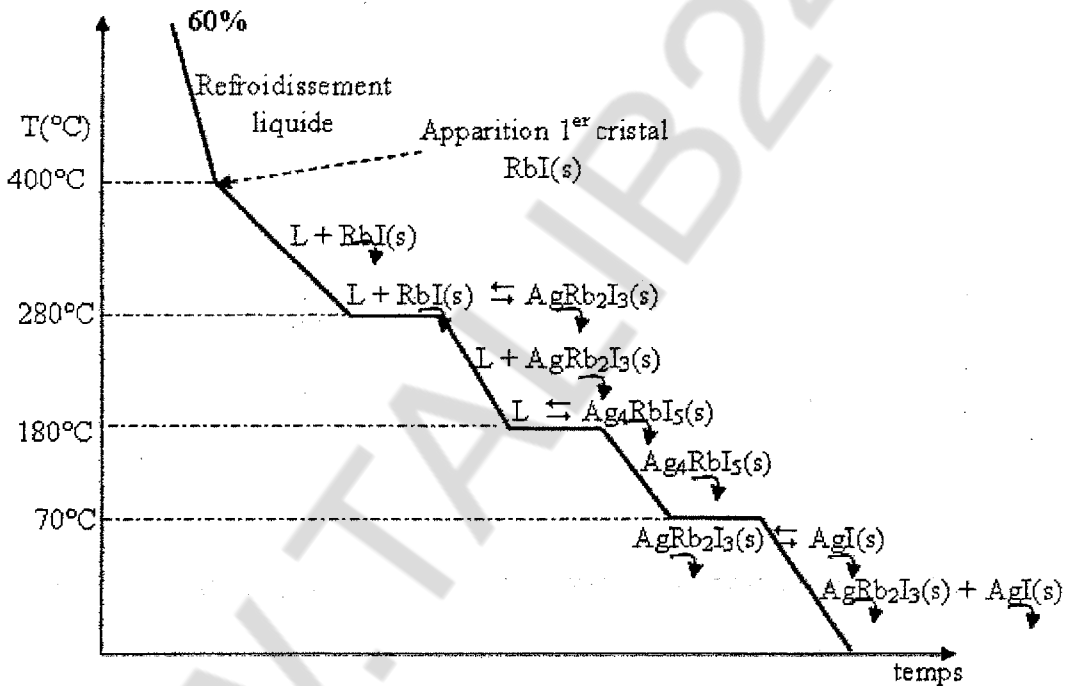
Domaine VIII : $\text{AgRb}_2\text{I}_3(\text{s}) + \text{RbI(s)}$

3) La composition du mélange de 10,0g de AgI et 13,6g de RbI est :

$$n_{\text{AgI}} = \frac{10}{234,77} = 0,0426 \quad \text{et} \quad n_{\text{RbI}} = \frac{13,6}{212,37} = 0,064 \quad \text{ainsi}$$

$$\chi_{\text{RbI}} = \frac{n_{\text{RbI}}}{n_{\text{AgI}} + n_{\text{RbI}}} = \frac{0,064}{0,064 + 0,0426} = 0,6$$

La courbe de refroidissement de 600°C à 30°C pour une composition de 0,6



3-b) La quantité (en grammes) des phases obtenues à 30°C .

Les phases présentes à 30°C sont AgI(s) et $\text{C}_2 \equiv \text{AgRb}_2\text{I}_3(\text{s})$

Application de la règle des moments : $m_{\text{AgI}} \times \overline{OH} = m_{\text{C}_2} \times \overline{OK}$

$$\frac{m_{\text{AgI}}}{\overline{OK}} = \frac{m_{\text{C}_2}}{\overline{OH}} = \frac{m_{\text{AgI}} + m_{\text{C}_2}}{\overline{HK}}$$

$$m_{\text{AgI}} = m_T \times \frac{\overline{OK}}{\overline{HK}} = 23,60 \times \frac{(0,67 - 0,60)}{0,67} = 2,465 \text{ g}$$

$$m_{C_2} = m_T \times \frac{\overline{OH}}{\overline{HK}} = 23,60 \times \frac{(0,60)}{(0,67)} = 21,134g$$

