

**Synthèse (Corrigé)**

**QUESTIONS DE COURS (2 PTS)**

1- Pour chaque minéral de la première colonne du tableau suivant, donner sa formule chimique, que vous trouverez dans la colonne 2.

Calcite =	$CaCO_3$ (0,125)
Diamant =	$C$ (0,125)
Dolomite =	$CaMg(CO_3)_2$ (0,125)
Fluorite =	$CaF_2$ (0,125)
Graphite =	$C$ (0,125)
Halite =	$NaCl$ (0,125)
Olivine =	$(Mg,Fe)_2SiO_4$ (0,125)
Pyrite =	$FeS_2$ (0,125)
Quartz =	$SiO_2$ (0,125)
Magnétite =	$Fe_3O_4$ (0,125)

2- Quelle est la différence entre :

Le polymorphisme et l'isomorphisme (0,25)

*Deux espèces minérales sont **polymorphes** si elles ont la même composition chimique et des structures cristallines différentes.*

*Deux espèces minérales sont **isomorphes** si elles ont la même structure cristalline et des compositions chimiques différentes.*

Un minéral et un minéraloïde (0,25)

*Un **minéral** est un composé solide, naturel, possédant une composition chimique définie et une structure atomique ordonnée. Un **minéraloïde** est un minéral auquel il manque une structure atomique ordonnée.*

Forme et habitus (0,25)

*Une **forme** cristalline est l'ensemble de toutes les faces égales, c'est-à-dire correspondantes par symétrie d'un cristal. **L'habitus** est le terme utilisé pour décrire l'aspect externe du minéral.*

### EXERCICE 1 (4 PTS )

1. L'analyse chimique d'un grenat a donné les résultats suivants (pourcentage en poids des oxydes) (le nombre d'oxygène dans la formule chimiques des grenats est 12) :

Masse molaire	Oxydes	Poids (%)
60	SiO <sub>2</sub>	40.57
102	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.99
72	FeO	4.86
40	MgO	6.31
56	CaO	25.24
	Total	99.7

Déterminer la formule chimique de ce grenat.

Oxydes	Poids (%)	Masse molaire	Proportion molaire	Nbre Cation	Prop. Cation.	Nbre Oxygène	Prop. Oxy.	Cat/Oxy
SiO <sub>2</sub>	40.57	60	0.67	1	0.67	2	1.34	3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.99	102	0.22	2	0.22	3	0.66	1
FeO	4.86	72	0.0675	1	0.0675	1	0.0675	0.3
MgO	6.31	40	0.16	1	0.16	1	0.16	0.7
CaO	25.24	56	0.45	1	0.45	1	0.45	2
							2.6675	

$$\text{COEFFICIENT OXY} = 12/2.6675 = 4.4985$$

La formule chimique de ce grenat est donc : **Ca<sub>2,0</sub>Mg<sub>0,7</sub>Fe<sub>0,3</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>** (1,25)

2. La composition chimique de certains Grenats peut être exprimée par le pourcentage molaire de trois pôles : Grossularite (pôle calcique, Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>), almandin (pôle ferreux, Fe<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>), et pyrope (pôle magnésien, Mg<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>). Un grenat qui est composé de 40 % (mole) de Grossularite, 15 % (mole) d'almandin et 45 % (mole) de pyrope est exprimé par la formule Grs<sub>40</sub>Alm<sub>15</sub>Pyp<sub>45</sub>. Exprimer cette formule en terme de composition en oxydes appropriés (% en poids). (Commencer par écrire la formule chimique de ce grenat.).

$$\text{Grs}_{40}\text{Alm}_{15}\text{Pyp}_{45} = 0.4 (\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}) + 0.15 (\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}) + 0.45 (\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}) = 1.2 \text{CaO} + 0.45 \text{FeO} + 1.35 \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 3 \text{SiO}_2$$

Oxydes	Masse molaire	Coefficient	Proportion oxydes	Poids (%)
SiO <sub>2</sub>	60	3	180	41.32 (0,25)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	102	1	102	23.41 (0,25)
FeO	72	0.45	32.4	7.43 (0,25)
MgO	40	1.35	54	12.36 (0,25)
CaO	56	1.2	67.2	15.42 (0,25)
			435.6	

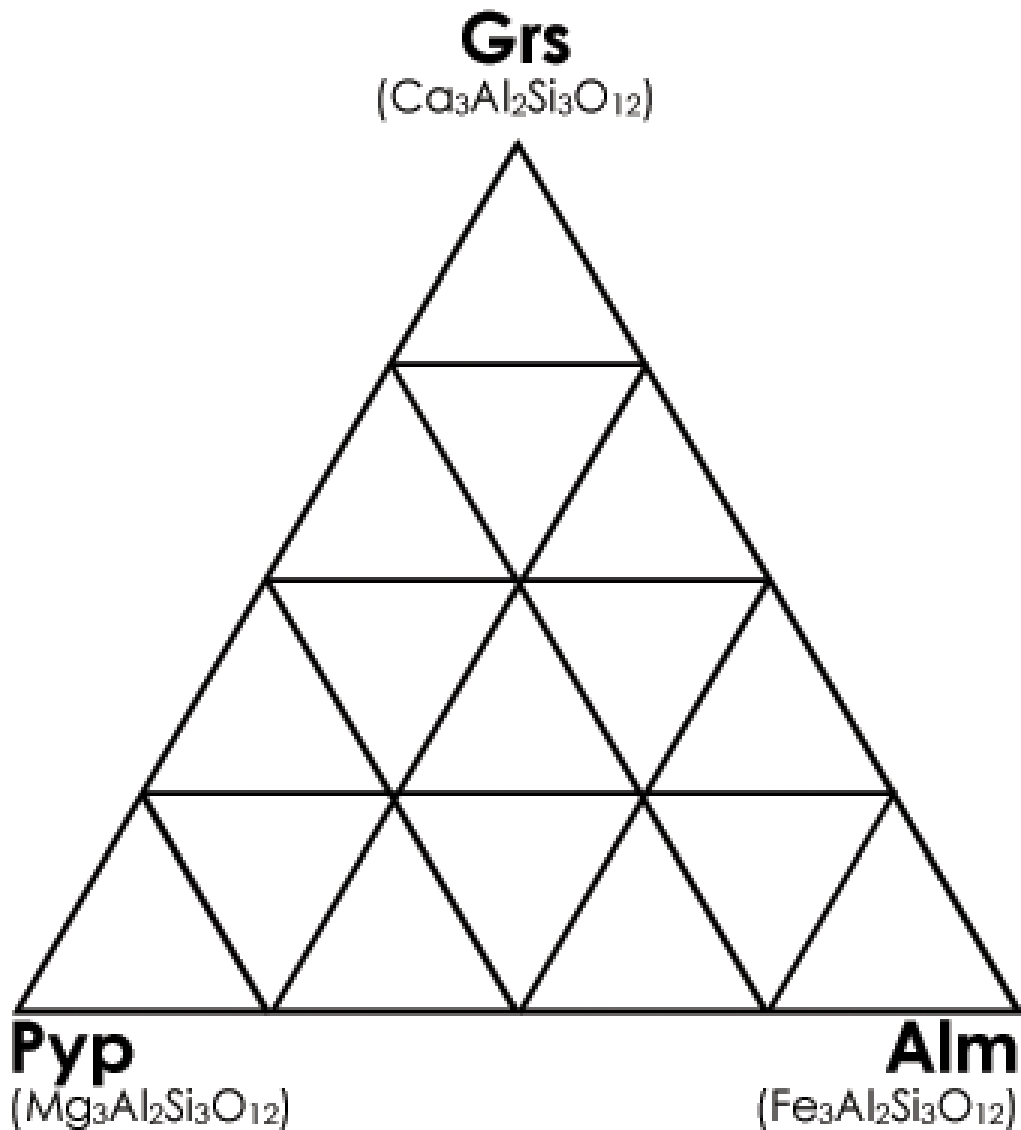
3. Représenter les trois grenats suivants dans le diagramme ternaire de la figure ci-dessous :

- a.  $\text{Ca}_{2.0}\text{Mg}_{0.7}\text{Fe}_{0.3}\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
- b.  $\text{Ca}_{1.5}\text{Mg}_1\text{Fe}_{0.5}\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
- c.  $\text{Grs}_{40}\text{Alm}_{15}\text{Pyp}_{45}$

$$\begin{aligned} \text{Ca}_{2.0}\text{Mg}_{0.7}\text{Fe}_{0.3}\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} &= 0.66 \text{ GrS} + 0.23 \text{ Pyp} + 0.1 \text{ Alm} \\ &= 66 \% \text{ GrS} + 23 \% \text{ Pyp} + 10 \% \text{ Alm. (0,25)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ca}_{1.5}\text{Mg}_1\text{Fe}_{0.5}\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} &= 0.50 \text{ GrS} + 0.33 \text{ Pyp} + 0.16 \text{ Alm} \\ &= 50 \% \text{ GrS} + 33 \% \text{ Pyp} + 16 \% \text{ Alm (0,25)} \end{aligned}$$

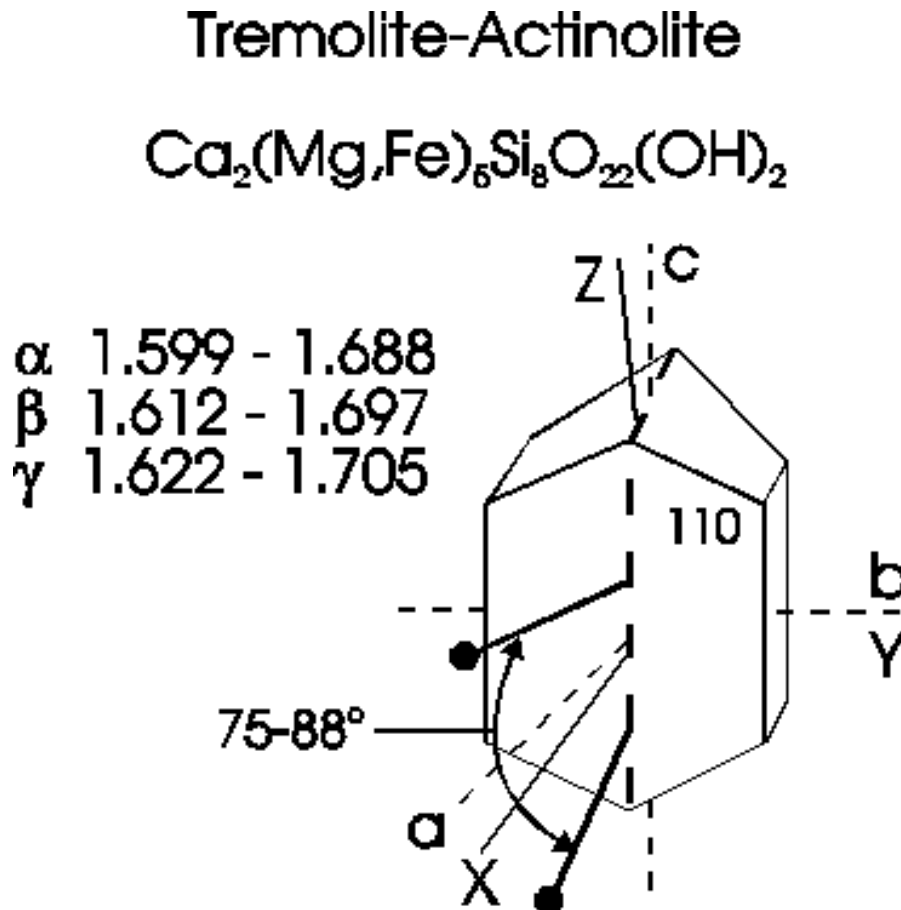
$$\text{Grs}_{40}\text{Alm}_{15}\text{Pyp}_{45} = 40 \% \text{ GrS} + 45 \% \text{ Pyp} + 15 \% \text{ Alm (0,25)}$$



(0.75)

## EXERCICE 2 (2 PTS)

Etant donné la figure ci-contre qui représente l'orientation des directions optiques des minéraux Trémolite-Actinote de la série des amphiboles, répondez aux questions suivantes (*toutes les réponses seront clairement argumentées*) :



1. Dans quel système cristallisent ces minéraux ?

*Y coïncide avec b, a ne coïncide pas avec X et c ne coïncide pas avec Z, donc le système est monoclinique. (0,25 + 0,25)*

2. Quel est le signe optique de ces minéraux?

*X est la bissectrice aiguë des axes optiques, donc le minéral est de signe optique négatif. (0,25 + 0,25)*

3. Quelle est la couleur d'interférence d'un cristal d'actinolite qui montre des figures d'interférence BXO ? (commencer par déterminer sa biréfringence, commencer par déterminer sa biréfringence, l'épaisseur de la lame mince est de 0,03 mm )

$BXO$  correspond au plan  $XY$ . La biréfringence de ce plan =  $\beta - \alpha = 1.697 - 1.688 = 0.009$ . (0,25)

La couleur qui correspond à  $b = 0,009$  et  $e = 0,03$  mm sur l'échelle des teintes de Newton est : jaune du premier ordre. (0,5)

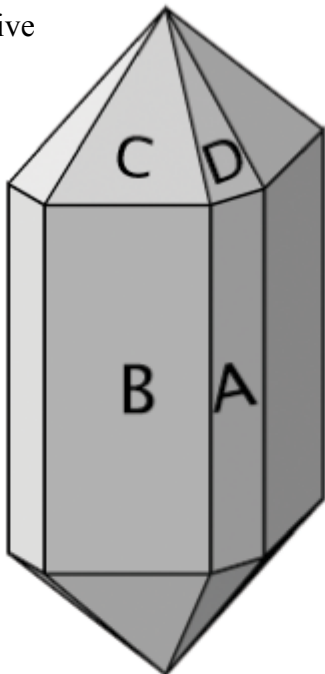
4. Quelle est la biréfringence maximale de la trémolite ?

$$b_{max}(\text{Trémolite}) = \gamma_{(\text{Trémolite})} - \alpha_{(\text{Trémolite})} = 1,622 - 1,599 = 0,023 \text{ (0,25)}$$

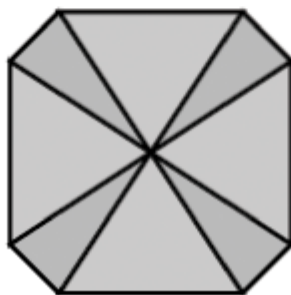
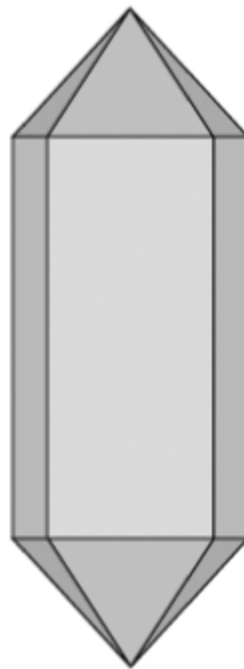
### PROBLEME (12 PTS)

Une variété du zircon ( $ZrSiO_4$ ) se présente sous la forme cristalline suivante :

Vue en perspective



Vue de face



Vue à partir du haut

## Partie I : Cristallographie (5 pt)

1. Déterminer les éléments de symétrie de ce cristal. En déduire la notation d'Hermann-Mauguin relative à ce minéral

*Les éléments de symétrie du cristal représenté sur la figure sont :*

*1 axe de rotation d'ordre 4 (0,25)*  
*4 axes de rotation d'ordre 2 (0,25)*  
*5 plans de symétrie (0,25)*  
*1 centre de symétrie (0,25)*

*La notation d'Hermann-Mauguin :*

*Unicité des éléments de symétrie : (0,25)*  
 *$1 A_4$*   
*2 axes de symétrie d'ordre 2 uniques*

*3 plans de symétrie uniques*

*Les axes de symétrie sont perpendiculaires aux plans de symétrie.*

*D'où :  $4/m 2/m 2/m$  (0,25)*

2. A quel système cristallin appartient-il ?

*Le cristal possède un axe de symétrie d'ordre 4, il appartient donc au système quadratique. (0,25)*

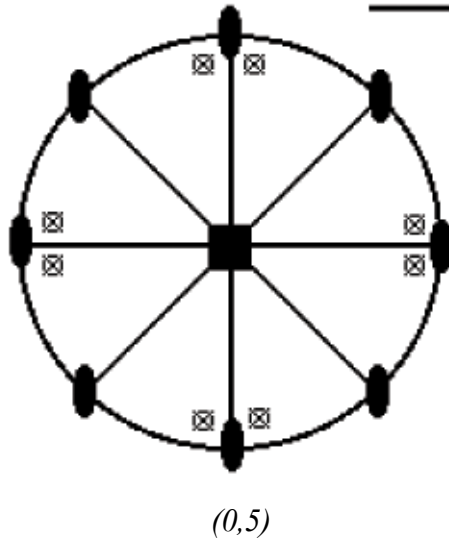
3. Donner les indices de Miller des faces A, B, C et D.

*A : (110) (0,25)*  
*B : (100) (0,25)*  
*C : (101) (0,25)*  
*D : (111) (0,25)*

4. Quelles sont les formes présentes dans ce cristal. Indiquer leurs noms et leurs symboles.

*2 prismes tétraonaux de symbole  $\{100\}$  et  $\{110\}$  0,25 + 0,25*  
*2 dipyramides tétraonales de symbole  $\{101\}$  et  $\{111\}$  0,25 + 0,25*

5. Dessiner la projection stéréographique des éléments de symétrie et des points équivalents.



6. Calculer le rapport  $c/a$  de ce minéral sachant que l'angle  $\rho$  de la face (327) est de  $25,088^\circ$ . (Rappel :  $\rho$  est l'angle entre l'axe  $c$  et la normale de la face).

Examinons le cristal dans le plan  $(c,t)$ , où  $t$  est la normale de la face :

$$\text{TAN}(\rho) = c/7t \dots\dots\dots (1)$$

Déterminons  $t$  en examinant le cristal dans le plan  $(a,b)$  :

$$\text{TAN}(\varphi) = (3b)/(2a) \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{COS}(\varphi) = 2t/b \dots\dots\dots (3)$$

A partir de l'équation (3) :  $t = [\text{COS}(\varphi) * b]/2$

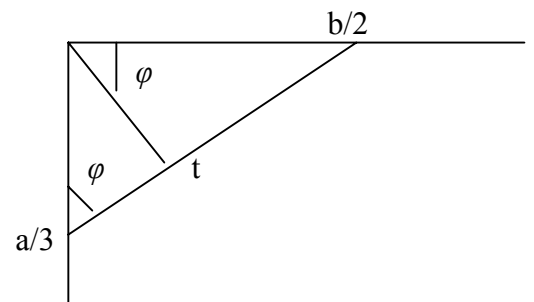
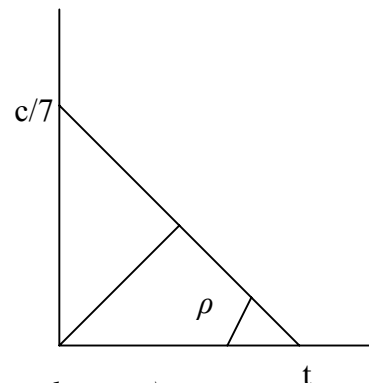
A partir de l'équation (2) :  $\text{TAN}(\varphi) = 3/2$ , car  $a = b$  (système quadratique).

$$\varphi = \text{ATAN}(3/2) = 56^\circ,31 \quad (0,25)$$

A partir de l'équation (1) :

$$\text{TAN}(\rho) = 2c/[7(\text{COS}(\varphi) * b)] \quad (0,25)$$

$$\begin{aligned} D'o\grave{u} : (c/a) &= [\text{TAN}(\rho) * 7\text{COS}(\varphi)]/2 \\ &= [\text{TAN}(25,088^\circ) * 7\text{COS}(56^\circ,31)]/2 \\ &= (0,46817886 * 7 * 0,55469922)/2 \\ &= 0,9089 \quad (0,25) \end{aligned}$$



## Partie II : Diffraction des rayons X (2 pt)

On a réalisé un spectre de poudre avec des cristaux du zircon précédent.

- 1- Etablir la relation donnant les valeurs des  $d_{hkl}$  pour le zircon en fonction des paramètres du réseau cristallin et des indices de Miller (hkl). Exprimez cette relation en fonction du rapport (a/c), qui a été calculé dans la première partie (question 6). Il est demandé une démonstration complète en utilisant les vecteurs du repère réciproque.

Système quadratique, donc  $a = b \neq c$  et  $(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = 90^\circ$ ,  $(\mathbf{a}, \mathbf{c}) = 90^\circ$  et  $(\mathbf{b}, \mathbf{c}) = 90^\circ$

$$d_{hkl} = 1/|\mathbf{N}^*|$$

avec  $\mathbf{N}^*$  = vecteur normal au plan d'indices (hkl) exprimé dans le repère réciproque, soit  $\mathbf{N}^* = h\mathbf{a}^* + k\mathbf{b}^* + l\mathbf{c}^*$  (0,25)

Relations entre les vecteurs du réseau direct et du réseau réciproque :

$$\begin{array}{lll} \mathbf{a} \cdot \mathbf{a}^* = 1 & \mathbf{a} \cdot \mathbf{b}^* = 0 & \mathbf{a} \cdot \mathbf{c}^* = 0 \\ \mathbf{b} \cdot \mathbf{a}^* = 0 & \mathbf{b} \cdot \mathbf{b}^* = 1 & \mathbf{b} \cdot \mathbf{c}^* = 0 \\ \mathbf{c} \cdot \mathbf{a}^* = 0 & \mathbf{c} \cdot \mathbf{b}^* = 0 & \mathbf{c} \cdot \mathbf{c}^* = 1 \end{array}$$

donc :  $(\mathbf{a}^*, \mathbf{b}) = 90^\circ$  et  $(\mathbf{a}^*, \mathbf{c}) = 90^\circ$ , donc  $(\mathbf{a}, \mathbf{a}^*) = 0^\circ$  car  $(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = 90^\circ$  et  $(\mathbf{a}, \mathbf{c}) = 90^\circ$ .  
 $(\mathbf{b}^*, \mathbf{a}) = 90^\circ$  et  $(\mathbf{b}^*, \mathbf{c}) = 90^\circ$ , donc  $(\mathbf{b}, \mathbf{b}^*) = 0^\circ$  car  $(\mathbf{b}, \mathbf{a}) = 90^\circ$  et  $(\mathbf{b}, \mathbf{c}) = 90^\circ$ .  
 $(\mathbf{c}^*, \mathbf{a}) = 90^\circ$  et  $(\mathbf{c}^*, \mathbf{b}) = 90^\circ$ , donc  $(\mathbf{c}, \mathbf{c}^*) = 0^\circ$  car  $(\mathbf{c}, \mathbf{a}) = 90^\circ$  et  $(\mathbf{c}, \mathbf{b}) = 90^\circ$ .

ainsi :  $|\mathbf{a}^*| = 1/|\mathbf{a}|$ ,  $|\mathbf{b}^*| = 1/|\mathbf{b}|$  et  $|\mathbf{c}^*| = 1/|\mathbf{c}|$

$$\mathbf{N}^* \cdot \mathbf{N}^* = h^2 \mathbf{a}^{*2} + k^2 \mathbf{b}^{*2} + l^2 \mathbf{c}^{*2} = h^2 (1/a)^2 + k^2 (1/a)^2 + l^2/c^2 \text{ car } a = b$$

$$\text{Ainsi } |\mathbf{N}^*| = \sqrt{h^2 (1/a)^2 + k^2 (1/a)^2 + l^2/c^2} \quad (0,25)$$

$$\text{Finalement : } \boxed{d_{hkl} = 1/\sqrt{h^2 (1/a)^2 + k^2 (1/a)^2 + l^2/c^2}} \quad (0,25)$$

En fonction de c/a :

$$\boxed{d_{hkl} = a/\sqrt{h^2 + k^2 + l^2 (a/c)^2}}$$

avec  $a/c = 1.100$  soit

$$\boxed{d_{hkl} = a/\sqrt{h^2 + k^2 + 1.21 l^2}} \quad (0,25)$$



- 2- On donne les angles de diffraction  $2\theta$  pour le spectre de poudre précédent réalisé avec une anticathode de cuivre (longueur d'onde  $\lambda_{Cu} = 1,54 \text{ \AA}$ ). Compléter le tableau suivant et déterminer les valeurs des paramètres  $a$  et  $c$ .

$2\theta$	13.42	16.26	44.06
$d_{hkl}$	<b>6.59</b>	<b>5.44</b>	<b>2.05</b>
(hkl)	(100)	(001)	(111)

A partir de la relation  $2.d.SIN(\theta) = \lambda$ , et  $d = \lambda/(2 SIN(\theta))$ , on calcul  $d(100)$ ,  $d(001)$  et  $d(111)$ , en remplaçant les valeurs de  $\theta$  et  $\lambda_{Cu} = 1,54 \text{ \AA}$ . (0,25) + (0,25) tableau)

En choisissant la première colonne, et en remplaçant (hkl) par (100) dans l'équation finale de la question précédente, on trouve :

$$a = 6,59 \text{ \AA} \text{ et } c/a = 0,9089, \text{ donc } c = 5,99 \text{ \AA}. (0,5)$$

### Partie III : Cristalochimie (2 pt)

Les atomes  $SiO_4$  et Zr occupent les positions suivantes dans la maille primitive :

Zr : ( 0,0,0) ; (1/2,1/2,1/2) ; (1/2,0,1/4), (0,1/2,3/4)

$SiO_4$  : (1/2,1/2,0) ; (0,0,1/2) ; (0,1/2,1/2) ; (1/2,0,3/4)

1. Représenter la projection orthogonale de cette structure dans le plan (001)

2. Déterminer le nombre de formule unité par maille (Z)

Nombres de Zr dans la maille =  $(1/8)*8 + 1 + 2*(1/2) + 2*(1/2) = 4$

Nombres de  $SiO_4$  dans la maille =  $(1/4)*4 + 2*(1/2) + 2*(1/2) + 2*(1/2) = 4$

le nombre de formule unité par maille (Z) =  $4Zr + 4 SiO_4 = 4Zr SiO_4$

$$Z = 4$$

3. Les masses molaires de Zr et de  $SiO_4$  sont 91,22 g/mole et 92,02 g/mole, respectivement. Calculer la masse volumique du zircon?  
N (nombre d'Avogadro) =  $6,022*10^{23}$  atomes/mole.

$$M_v = Z.M/V.N.10^{-24}$$

$$Z = 4$$

$$M = 183,24 \text{ g}$$

$$N = 6,022*10^{23} \text{ atomes/mole}$$

$$V = a^2c = (6,59)^2 * 5,99 = 260,134 \text{ \AA}^3$$

$$M_v = 732,96 / (260,134 * 6,022*10^{23} * 10^{-24}) = 4,6788 \text{ g/cm}^3.$$

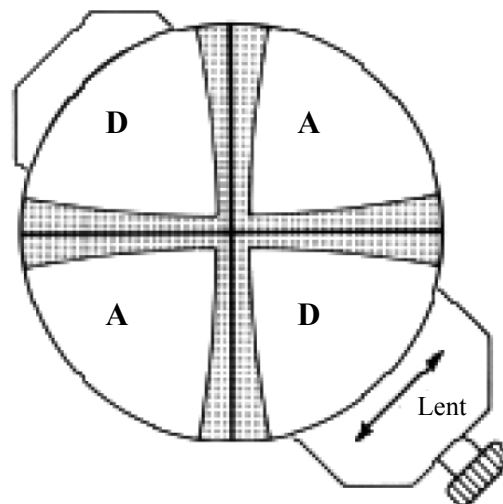
#### Partie IV : Optique cristalline (3 pt)

Dans cette partie, on se propose d'observer différentes sections du zircon au microscope polarisant. Les lames minces possèdent une épaisseur de 0,03 mm. Deux sections, notées A et B sont observées. Les observations effectuées sont données dans le paragraphe suivant.

**Section A** : le minéral possède un relief élevé qui ne change pas au cours de la rotation de la platine en lumière naturelle (LPNA). Le minéral est coloré en vert et cette couleur ne change pas en LPNA au cours de la rotation de la platine. En utilisant la méthode d'immersion, on a mesuré l'indice de réfraction du minéral dans cette section, et on a trouvé  $n = 1,93$ .

**Section B** : le minéral possède un relief élevé qui change au cours de la rotation de la platine en lumière naturelle (LPNA). La couleur du minéral change du vert au bleu au cours de la rotation de la platine en (LPNA). En lumière polarisée analysée (LPA), la couleur d'interférence maximale observée correspond à une biréfringence de 0,06. Cette section est celle de la biréfringence maximale du zircon.

L'observation de la section A en lumière convergente a montré les figures d'interférences représentées sur la figure suivante. L'utilisation d'une lame auxiliaire nous a permis de déterminer les quadrants où on a un ajout du retard total de ceux où on a une diminution du retard total (retard de la lame mince+retard de la lame auxiliaire).



- 1- Déterminer la classe optique du minéral (isotrope, uniaxe ou biaxe) ? (justifiez votre réponse en utilisant la réponse à la question 2 de la partie I du problème)

*Le minéral appartient au système quadratique, donc il appartient à la classe optique : uniaxe. (0,25)*

- 2- Quel est le signe optique du minéral. Justifiez votre réponse

*Dans le quadrant NE-SW, on a diminution des retards, donc  $\omega$ , qui est parallèle au rayon lent de la lame auxiliaire est le rayon rapide du minéral, donc le petit indice de réfraction. (0,25)*

*Donc  $\varepsilon > \omega$ , le minéral est donc uniaxe positif. (0,25)*

- 3- Déterminer la valeur des indices de réfraction du minéral. Quelle est la teinte maximale observée sur la section B en LPA. Quel teinte observe t'on sur la section A en LPA

*Minéral uniaxe possède deux indices de réfraction :  $\omega$  et  $\varepsilon$ .*

*La section A est cyclique, car le relief ne change pas en LPNA (un seul indice de réfraction présent). Cet indice est  $\omega$  (indice de la section cyclique). Donc  $\omega = 1,93$ . (0,25)*

*La section B de biréfringence maximale est une section principale qui contient les deux indices  $\omega$  et  $\varepsilon$  avec  $b = \varepsilon - \omega$  (car le minéral est uniaxe +), donc :*

$$\varepsilon = 1,93 + 0,06 = 1,99 \text{ (0,25)}$$

*$b = 0,06$  et  $e = 0,03$  mm correspond à une teinte : (0,25)*

*La section A est éteinte en LPA, car c'est une section cyclique (0,25)*

- 4- Déterminer la formule pléochroïque du minéral

*$\omega = \text{vert}$ ,  $\varepsilon = \text{bleu}$  (0,25)+ (0,25)*

- 5- Quel type d'extinction observe t'on en LPA. Justifiez votre réponse

*L'extinction est droite, car le minéral appartient au système quadratique (uniaxe) et l'axe C est confondu avec l'axe optique du minéral. (0,25)*

- 6- Quels sont les indices de Miller des plans parallèles à la lame mince des section A et B du zircon. Donner tous les indices possibles pour chaque section !

*Section A cyclique, axe c perpendiculaire à la platine du microscope, donc les plans sont (001), (0,25)*

*Section B principale, donc les plans sont ceux qui comprennent a et c, ou (hk0) (0,25)*

*Bonne chance  
M.C. CHABOU*