

Exercice n°1**SERIE N°1**

Données :

Élément	Ga	Al	As	In	P
Numéro atomique Z	31	13	33	49	15
Rayon covalent (nm)	0.126	0.118	0.119	0.144	0.106
Masse molaire ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	70	27	75	115	31

Constante d'Avogadro : $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

- Déterminer les configurations électroniques des atomes Ga, In, Al, As et P dans leur état fondamental.
- Classer ces éléments en deux groupes selon la colonne de la classification périodique à laquelle ils appartiennent.
- Justifier que le Gallium et l'Arsenic s'associent pour donner un solide de formule chimique GaAs (Arsénure de Gallium).
- Faire une liste de tous les composés analogues à GaAs que l'on peut construire à partir de deux éléments pris dans le tableau donné au début de cette partie. Ces matériaux sont appelés « composés binaires III-V ».

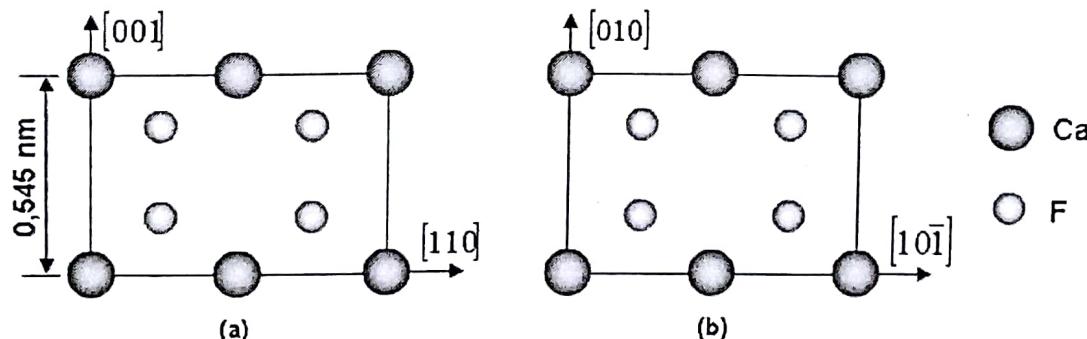
Exercice n°2

1) Dessinez les directions cristallographiques suivantes [100], [110], [111] [112] et [$\bar{1}\bar{1}\bar{1}$] (remarque : les directions doivent être représentées à l'intérieur des cubes)

2) Représenter les plans cristallographiques suivants (100), (110), (111), (112), (124), (210), (003) et (013) (remarque : les plans doivent être représentées à l'intérieur des cubes)

Exercice n°3

Le fluorure de calcium cristallise selon le système cubique et la figure ci-contre montre la disposition des ions Ca et F dans deux plans particuliers de cette maille cubique.

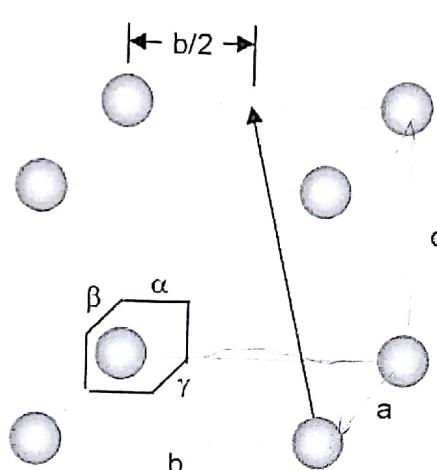


- Quels sont les indices de Miller des plans (a) et (b) ?
- Quels sont les indices de la direction réticulaire définie par l'intersection des plans (a) et (b) ?
- Quel est le réseau de Bravais du fluorure de calcium ? Justifiez votre réponse

- d) Quel type de site occupent les ions F dans le réseau de Bravais défini par les ions Ca ? Quelle est la proportion de ces sites occupés dans une maille élémentaire ?
e) Combien d'ions Ca et d'ions F appartiennent au motif associé à ce cristal ? Donnez les coordonnées relatives des ions du motif dans la maille.
f) Quelle est la masse volumique théorique (en g/cm³) du fluorure de calcium ?
Données : Masse atomique (g/mole): Ca = 40,08 F = 19,00

Exercice n°4

Considérez la maille élémentaire du polonium (Po) représentée ci-contre.



Bien entendu, dans le cristal réel, les atomes de polonium se touchent. Le motif associé à cette maille est constitué d'un atome sphérique de rayon R et les paramètres de la maille sont tels que: $a = b = c = 0,3354 \text{ nm}$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$:

- a) Déterminez le système cristallin, le réseau de Bravais ainsi que la compacité de cette maille.
b) Donnez le nom du site situé au centre de la maille. Combien la maille possède-t-elle de tels sites en propre ?
c) Exprimez, en fonction du rayon R des atomes de polonium, le rayon r de ce site.
d) Dans le cas où ce site est occupé par un autre atome, quel est alors le réseau de Bravais ? Justifiez votre réponse.
e) Indexez la direction dessinée sur la figure ci-dessus.
f) Dans la maille donnée sur le formulaire de réponse, dessinez les plans $(\bar{1}\bar{1}1)$ et (011) .
g) Calculez la densité surfacique d'atomes de polonium (en at/nm²) dans le plan $(\bar{1}\bar{1}1)$
h) Quelle est la masse volumique du polonium?

On donne: $M_{Po} = 209 \text{ g.mol}^{-1}$ $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Exercice n°5

Le silicium cristallise dans une structure cubique à faces centrées dans laquelle un site tétraédrique sur deux est occupé par un atome de Si.

- 1) tracer la maille élémentaire en perspective et sa projection sur le plan xoy.
- 2) représenter la famille de plans réticulaire {100}, {110} et {111}.
- 3) Quelle est la densité surfacique d'atomes sur chacun de ces plans.
- 4) Quel est l'angle entre 2 directions cristallographiques différentes

- 5) Calculer la distance interréticulaire pour chaque famille de plans

Exercice n°6

1. On considère un réseau cubique de paramètre de maille a .
- 1.1. Préciser les indices de Miller des faces du cube.
- 1.2. Tracer le plan (311).
- 1.3. Exprimer la distance entre 2 plans parallèles consécutifs de la famille de plan (311) en fonction du paramètre de maille a . On rappelle, dans le cas d'un cube :

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

2. On bombarde un cristal d'aluminium par un faisceau de rayons X de longueur d'onde $\lambda = 154$ pm. On observe un faisceau diffracté au premier ordre sous un angle Θ de $39,2^\circ$ pour les plans réticulaires (311).

Calculer le paramètre a de la maille de l'aluminium.

Retrouver cette valeur, sachant que l'aluminium cristallise dans le réseau cubique à faces centrées et que le rayon de l'atome d'aluminium est de 143 pm.

Exercice n°7

I. Réseau direct

Déterminer le motif atomique et caractériser le réseau de Bravais (base (\vec{a}_1 , \vec{a}_2 , \vec{a}_3), forme, volume, compacité et masse volumique de la maille élémentaire correspondante) pour chacune des structures cristallines proposées ci-dessous:

1. réseau cubique simple composé d'atomes identiques,
2. réseau cubique centré composé d'atomes identiques (Exemples: Na, K, Ru, Cr, Fe, Mn), on notera $a\vec{i}$, $a\vec{j}$ et $a\vec{k}$ les vecteurs définissant les arêtes du cube simple,
3. réseau cubique centré composé d'atomes A et B placés respectivement sur les nœuds de deux réseaux cubiques simples décalés d'une demi-grande diagonale (Exemple: CsCl),
4. réseau cubique faces centrées composé d'atomes identiques (Exemples: Ar, Ag, Al, Au, Ca, Cu, Ni), on notera a arêtes du cube simple, $a\vec{i}$, $a\vec{j}$ et $a\vec{k}$ les vecteurs définissant les arêtes du cube simple
5. structure "diamant", composée d'atomes identiques placés aux nœuds de deux réseaux cubiques faces centrées décalés d'un quart de grande diagonale (Exemples: C, Si, Ge),
6. structure "blende de zinc", composée d'atomes A et B placés respectivement sur les nœuds de deux réseaux cubiques faces centrées décalés d'un quart de grande diagonale (Exemples: CuCl, ZnS, ZnSe, CdTe, AlAs, GaAs, InAs, SiC),
7. graphène, composée d'atomes de C placés sur les nœuds d'un réseau en nid d'abeilles,
8. graphite, constitué de l'empilement de feuilles de graphène décalées une fois sur deux d'une arête d'hexagone,
9. réseau hexagonal compact composé d'atomes identiques.

II. Réseau réciproque

Déterminer le réseau réciproque et la première zone de Brillouin dans chacun des cas proposés ci-dessus.

Exercice 8 :

La maille du composé cubique AuCu possède les atomes suivants : Au en $(0,0,0)$ et $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$, Cu en $(\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2})$ et $(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$.

- Calculer le facteur de structure F_{hkl} de AuCu.
- Déduire les conditions d'extinction associées aux réflexions hkl .

Exercice 9 :

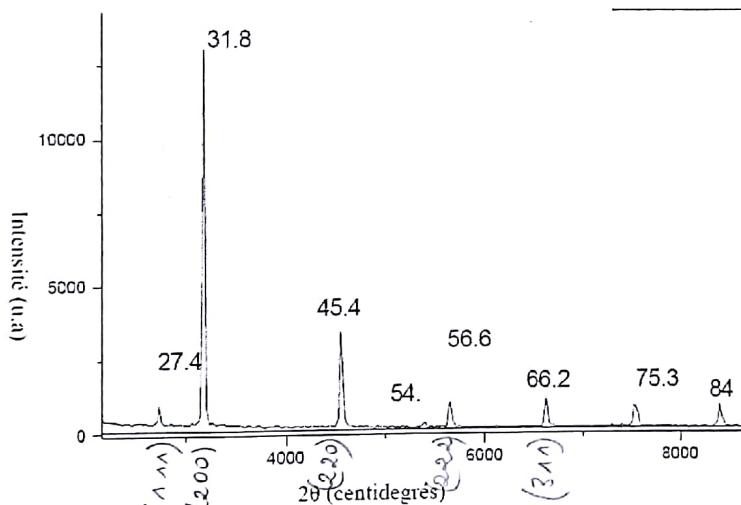
On considère la structure cubique de NaCl dans la quelles les ions Na^+ et Cl^- ont pour coordonnées:

Na^+ $(0,0,0), (\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0), (0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ et $(\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2})$

Cl^- $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}), (0,0,\frac{1}{2}), (\frac{1}{2}, 0, 0)$ et $(0, \frac{1}{2}, 0)$

- Donner le mode de réseau et le motif associé à ce cristal.
- Calculer le facteur de structure F_{hkl} de NaCl en utilisant le réseau et le motif.
- Discuter de l'effet de la parité des indices hkl sur la valeur du facteur de structure.
- Calculer F_{111} et F_{002} . Qu'en concluez-vous?

Le diagramme de diffraction de poudre réalisé pour NaCl est représenté ci-dessous :



La longueur d'onde utilisée correspond à la raie K_α du cuivre ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$).

Les enregistrements font apparaître des raies pour les valeurs suivantes de l'angle de diffusion 2θ (en degrés) :

27,4 31,8 45,4 54 56,6 60 66,2 75,3 84,0

- Calculer les d_{hkl} correspondant à toutes les raies.
- Retrouver le mode de réseau du NaCl.
- Calculer son paramètre de maille.

Exercice 10 :

Le silicium cristallise dans la structure diamant. Le réseau est cubique faces centrées et les coordonnées des atomes du motif sont Si (0,0,0) et Si (1/4,1/4,1/4).

- 1) Calculer le facteur de structure F_{hkl} , en déduire les conditions d'extinction.
- 2) Calculer les d_{hkl} correspondant à toutes les raies.
- 3) Le premier pic de diffraction apparaît pour un angle de Bragg $2\theta = 28.436^\circ$. En déduire le paramètre de maille du silicium ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$).

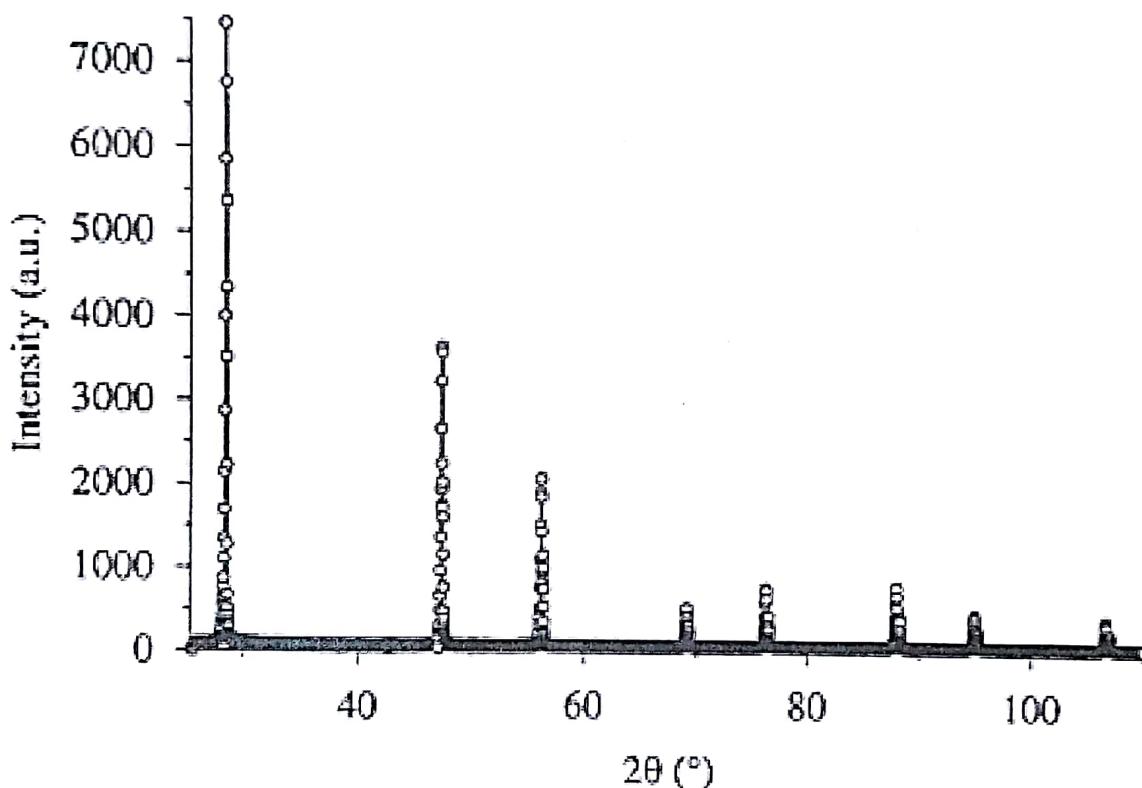


Diagramme de diffraction obtenu sur une poudre de silicium, représentant l'intensité diffractée en fonction de l'angle de diffusion 2θ .

Exercice 11:

Les éléments de la colonne 18 sont des gaz inertes monoatomiques à température ambiante, d'où le nom de « gaz nobles » donné aux éléments de cette famille. Il faut les porter à des températures très basses (voir tableau) pour obtenir des cristaux.

On obtient alors des structures cubiques faces centrées compactes, comme pour les métaux... pourtant, de par leurs propriétés physiques et chimiques, ce sont bien des cristaux moléculaires !

Le néon, l'argon, le krypton et le xénon cristallisent selon un réseau cubique à faces centrées.

- 1) Représenter une maille élémentaire cubique à faces centrées et calculer la compacité.
- 2) Calculer la masse volumique à l'état solide pour chacun des « gaz » nobles.
- 3) Quelles sont les valeurs des rayons atomiques ?

- 4) Pourquoi classe-t-on ces cristaux parmi les cristaux « moléculaires » ? Quel type de force unit les atomes ? Pourquoi l'empilement est-il compact ?
 5) Calculer l'énergie d'une liaison entre deux atomes d'argon sachant que l'enthalpie standard de sublimation de l'argon vaut $\Delta_{\text{sub}} H^0 = 7 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$.
 6) Justifier l'évolution des températures de fusion quand on passe du néon au xénon.
 Données :

Gaz noble	néon	argon	krypton	xénon
Numéro atomique	10	18	36	54
Masse molaire ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	20,2	39,9	83,8	131,3
Paramètre de maille (pm)	452	543	559	618
Température de fusion (K)	24,5	83,9	116	161

Exercice 12 :

Calculer la constante de Madelung pour une ligne droite infinie d'ions de signes alternés.

Exercice 13 :

En utilisant le potentiel de Lennard-Jones, calculer le rapport des énergies de cohésion du néon dans les structures CC et CFC. Les sommes pour la structure :

CC sont $C_{12} = 9,11418$; $C_6 = 12,2533$.

CFC sont $C_{12} = 12,13188$; $C_6 = 14,45392$

Exercice 14 :

Les mesures faites pour H_2 gazeux donnent pour valeurs des paramètres de Lennard-Jones :
 $\epsilon = 50 \cdot 10^{-16} \text{ erg}$ et $\sigma = 2,96 \text{ \AA}$

Trouver l'énergie de cohésion en kJ par mole de H_2

Faire le calcul pour une structure CFC. On traitera chaque molécule H_2 comme une sphère.

La valeur de l'énergie de cohésion est 0,751 kJ/mol, c'est à dire beaucoup moins que celle calculée/ les corrections quantiques doivent donc avoir une importance considérable.

Exercice 15 :

Dans les halogénures alcalins (cristaux dont les éléments sont de la 1^{re} et la 7^{ème} colonnes), on peut considérer les ions comme des sphères dures de rayon r^+ (cation) et r^- (anion).

a) Quelle inégalité doit satisfaire le rapport r^-/r^+ pour que, dans le réseau cubique simple (structure CsCl), les ions + et - se touchent le long de la diagonale sans que les plus gros des ions de même signe aux sommets du cube ne se recouvrent partiellement ?

b) Quelle inégalité doit satisfaire le rapport r^-/r^+ pour que dans le réseau cubique à faces centrées les ions de signes opposés disposés le long des faces du cube se touchent sans que les plus gros des ions de même signe ne se recouvrent partiellement ?

c) Selon ces deux hypothèses (soit cristal CS et CFC), montrez que le CsCl est susceptible de cristalliser soit avec le réseau cubique simple, soit avec le réseau cubique à faces centrées en vérifiant les inégalités obtenues en a) et b). Évaluer dans ces deux hypothèses la distance r_0

entre plus proches voisins de signes opposés et le paramètre de maille du cube. Faites la même chose pour le NaCl. Est-ce que le NaCl peut cristalliser dans ces deux formes ? Utilisez les valeurs $r^+(\text{Na}^+)=0.98 \text{ \AA}$, $r^+(\text{Cs}^+)=1.67 \text{ \AA}$, $r^-(\text{Cl}^-)=1.81 \text{ \AA}$.

d) Utilisez la formule de l'énergie de cohésion (U_c) afin de calculer le rapport $U_c(\text{cs})/U_c(\text{cfc})$ pour le CsCl et NaCl. Pouvez-vous maintenant montrer que le CsCl cristallise dans la forme cubique simple ? Utilisez $\rho=0.345 \text{ \AA}$, $a_{\text{cfc}}=1,747565$ et $a_{\text{cs}}=1.762675$.

Exercice 16 :

A partir de λ et ρ et des constantes de Madelung, calculer l'énergie de cohésion de KCl en supposant qu'il cristallise dans la structure ZnS. Comparer cette valeur à la valeur calculée pour KCl cristallisant dans la structure NaCl.

Exercice 17 :

L'oxyde de baryum à la structure NaCl. Estimer les énergies de cohésion par molécule, rapportées aux atomes neutres séparés, en envisagent les hypothèses : cristal Ba^+O^- puis $\text{Ba}^{2+}\text{O}^{2-}$.

La distance internucléaire entre plus proches voisins, déterminée expérimentalement est $R_0=2,76 \text{ \AA}$; Les potentiels de première et seconde ionisation de Ba sont 5,19 et 9,96 eV ; les affinités électroniques de premier et second électron ajoutés à l'atome d'oxygène neutre sont 1,5 et -9,0 eV. La première affinité électronique de l'atome d'oxygène neutre est l'énergie libérée par la réaction $\text{O}+\text{e} \rightarrow \text{O}^-$

La seconde affinité électronique est l'énergie libérée par la relation $\text{O}^-\text{e} \rightarrow \text{O}^{2-}$

Quel état de valence probable peut-on prédire ? Supposer que R_0 est la même pour les deux formes et négliger l'énergie de répulsion.

Exercice 18 :

On considère une chaîne linéaire de pas a , composée d'atomes de masse M .

1. Soit u_n l'écart à l'équilibre de la position du $n^{\text{ème}}$ atome. Déterminer l'équation différentielle satisfait par u_n .
2. On cherche pour un des solutions en onde plane $u_s(t) = u_s e^{iska-i\omega t}$. Déterminer la relation de dispersion des modes de vibration.
3. Déterminer la vitesse de groupe au voisinage du centre de la première zone de Brillouin. Que représente la grandeur obtenue ?
4. Examiner, au voisinage du centre de zone et en bord de zone, le sens de déplacement de deux atomes voisins.

Exercice 19 :

On considère maintenant une chaîne linéaire diatomique composée d'atomes de masses M_1 et M_2 , occupant respectivement les sites pairs et impairs du réseau.

1. En reprenant la méthode précédente, déterminer la relation de dispersion des modes de vibration.
2. Pour les deux branches de dispersion obtenues, examiner, au voisinage du centre de zone, le sens de déplacement de deux atomes voisins. Quelle est la branche acoustique ? La branche optique ?
3. Quelle est la vitesse de groupe des phonons optiques au voisinage du centre de zone.

Exercice 20 :

Considérons les modes normaux d'une chaîne linéaire pour laquelle les constantes de rappel entre plus proches voisins sont alternativement C et $10C$. Les masses des atomes sont égales et la distance interatomique est $a/2$. Trouver $\omega(K)$ en $K=0$ et $K=\pi/a$. Tracer la relation de dispersion.

Exercice 27 :

Soit une rangée d'atomes équidistants de « a » formé d'atomes identiques de masse m . Chaque atome est soumis à une constante de rappel C_1 exercée par ses plus proches voisins et C_2 exercée par ses seconds voisins.

1. L'interaction entre les seconds voisins change-t-elle la structure du réseau réciproque ?
2. Etablir l'équation régissant le déplacement de l'atome n , soit u_n (par rapport à sa position d'équilibre) en fonction de U_{n+1} , U_{n-1} , U_{n+2} , U_{n-2} .
3. Etablir la relation de dispersion des phonons longitudinaux, $\omega = f(k)$, à partir d'une solution de la forme $u_n = A \exp i(\omega t - kx_n) \approx A \exp i(\omega t - kna)$.

Exercice 28 :

On considère une chaîne de N atomes identiques avec les conditions aux limites périodiques. La distance d'un atome à son voisin de droite est a_1 et celle à son voisin de gauche est a_2 .

- a) Déterminer le réseau réciproque et la première zone de Brillouin
- b) Ecrire les équations du mouvement de deux atomes voisins
- c) Calculer la relation de dispersion des phonons.
- d) Déterminer les modes particuliers au centre et au bord de la première zone de Brillouin.

Exercice 21 :

Calculez la fréquence propre d'une impureté de masse $M \neq m$ à la position $n=0$ dans une chaîne linéaire. Utilisez une solution de la forme $u_n = A \exp(-K|n|-i\omega t)$ pour le déplacement des atomes. (Notez que K est complexe.)

- Écrire les équations du mouvement et obtenir une expression de ω
- Sachant que ω doit être réel pour que ce soit une onde, en déduire une condition sur K .
- En se servant de la condition sur K , dessiner à quoi ressemble le mode de vibration.
- Résoudre pour ω . Pour quelles valeurs de M le mode est-il localisé ?

Exercice 22 :

Un solide est constitué de N atomes situés aux nœuds d'un réseau cristallin, qui peuvent vibrer autour de leur position d'équilibre. En première approximation, on peut assimiler le solide à un ensemble de $3N$ oscillateurs harmoniques (discernables bien sûr), isotropes (pour faire simple) et (surtout) indépendants.

- Dans le modèle d'Einstein, tous ces oscillateurs ont la même pulsation ω_0 . Calculer
 - l'énergie moyenne ;
 - la capacité calorifique à volume constant, C_V , du solide. Tracer la courbe $C_V(T)$. Quel est le comportement de C_V à haute et basse température ?
- Dans le modèle de Debye, on tient compte des interactions entre atomes en considérant des oscillateurs qui n'ont plus les mêmes pulsations
 - Déterminer l'énergie moyenne du système
 - Calculer sa capacité calorifique. Étudier les cas limites.

Exercice 25 : « Récit de leur découverte par deux prix Nobel »

www.larecherche.fr [lien : <http://goo.gl/SRC7m>], par Alex Müller et J. Georg Bednorz (prix Nobel 1987 pour « leur percée importante dans la découverte de la supraconductivité de matériaux céramiques. »)

C'est en janvier 1986 que le premier indice tangible d'une possible supraconductivité à haute température a été découvert au laboratoire de recherche IBM de Zurich, installé dans le petit village de Rüschlikon. En refroidissant un échantillon d'oxyde de cuivre, de baryum et de lanthane, J. G. Bednorz a constaté que la résistivité électrique de cet échantillon commençait à décroître rapidement à une température de l'ordre d'une vingtaine de kelvins. Puis, en changeant la concentration de baryum, on a pu observer ce début de décroissance à une trentaine de kelvins. Trente kelvins, cela correspond à moins deux cent quarante-trois degrés Celsius : c'est donc encore une température relativement basse. Mais dans le domaine des supraconducteurs, cela représentait un progrès considérable que la plupart des physiciens n'attendaient plus. [...]

Notre première réaction a été de vérifier que nous n'avions pas commis d'erreur de mesure. [...] Pour être bien sûr du résultat obtenu, nous avons donc reproduit plusieurs fois les expériences en utilisant différentes méthodes de mesures de la température. Finalement, c'est en avril 1986 qu'un premier article intitulé « Possible High T_c Superconductivity in the Ba-La-CuO System » a été publié dans la revue allemande Zeitschrift für Physik.

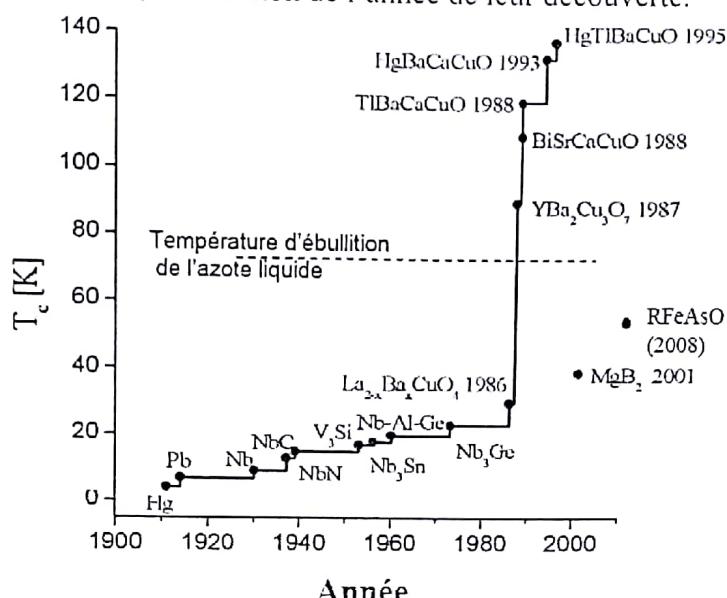
A l'époque, nous n'étions que deux à travailler sur le sujet. Puis pendant l'été 1986, M. Takashige, professeur assistant à l'université de Tokyo, en visite au laboratoire de Rüschlikon, est venu se joindre à nous. Après les mesures de résistivité électrique, c'est donc à trois que nous avons continué les recherches, par des mesures de susceptibilité magnétique. En septembre, le deuxième indice sérieux de l'existence de la supraconductivité à haute température a pu être obtenu [...]

Cette fois, l'affaire était devenue très sérieuse. Le 10 octobre 1986, une deuxième publication intitulée "Susceptibility Measurements Support High T_c Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System" était soumise à la revue Europhysics Letters.

Parallèlement, les premières confirmations sont venues du Japon, où le professeur S. Tanaka et son équipe ont été les premiers à corroborer les résultats obtenus à Rüschlikon. La nouvelle a été annoncée dans le grand quotidien japonais Asahi Shinbun. Puis, fin décembre 1986, en remplaçant le baryum par du strontium dans les composés, deux équipes ont réussi à augmenter les températures de transition jusque vers quarante kelvins : celle du professeur Tanaka à Tokyo et un groupe des laboratoires ATT Bell, aux Etats-Unis. De son côté, C. W. Chu et ses collaborateurs obtenaient également d'intéressants résultats à l'université de Houston, au Texas. En mettant sous pression les premiers composés au baryum, ils arrivaient aussi à des températures de transition de l'ordre de cinquante kelvins. Dès cette époque, Chu avait la conviction intime de pouvoir dépasser le "mur" des soixante-dix-sept kelvins température de l'azote liquide. La suite des événements a montré que son optimisme était bien justifié. [...]

Pour les applications, c'est déjà un avantage considérable puisqu'on peut alors se contenter d'un refroidissement par circulation d'azote liquide. [...] A l'heure actuelle, des budgets considérables ont été affectés aux recherches sur les supraconducteurs à haute température, principalement au Japon et aux Etats-Unis, et, plusieurs milliers de physiciens à travers le monde étudient tous les aspects scientifiques et techniques de ces matériaux.

Dans la figure ci-dessus, nous avons une illustration des température critique de différents matériaux supraconducteurs, en fonction de l'année de leur découverte.



- Expliquer l'origine de la résistivité électrique.
- Existe-t-il des supraconducteurs à la température ambiante ?
- Quelle est la deuxième propriété, en plus de la résistance nulle, qui caractérise les matériaux supraconducteurs ?
- Quels sont les atomes communs aux cuprates, l'état supraconducteur des cuprates nécessite-t-il de l'hélium liquide.

Exercice 26 :

D'un poids de 130 tonnes, l'aimant Iseult équipera le plus puissant scanner IRM du monde dédié à l'imagerie médicale. Seules les propriétés physiques de la supraconduction permettent d'atteindre une intensité aussi élevée. Les 182 kilomètres de fil supraconducteur, en alliage nobium-titane, sont enroulés sur 170 « double galettes ». Elles sont ensuite assemblées entre elles pour former un « conduit » de 90 centimètres d'ouverture au sein duquel le champ magnétique sera de 11,7T. Le volume au cœur de l'aimant permettra l'imagerie du corps entier du patient.

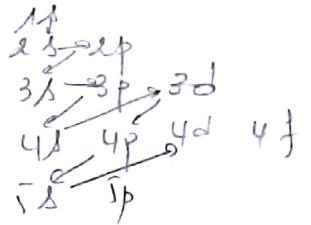
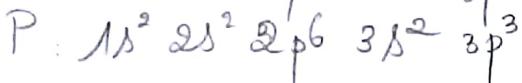
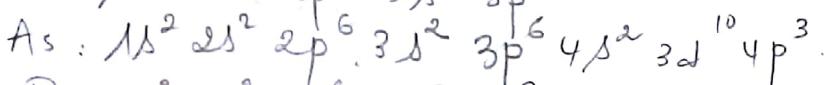
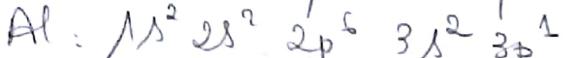
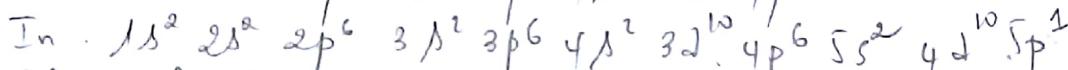
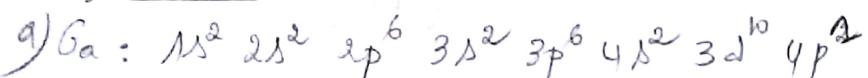
Peut-on réaliser un champ magnétique B de 11.7T à l'aide d'un solénoïde de diamètre D=1.00m ; de longueur L=1.00m et formé par l'enroulement d'une seule rangée de spires jointives en cuivre recouvert d'un film isolant ? Le fil de cuivre a un diamètre d=1.00mm et on néglige l'épaisseur de film isolant. Le cuivre est souvent utilisé pour fabriquer des bobines magnétiques, les caractéristiques physiques du cuivre sont les suivantes :

Densité : $d = 8,92 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$, Capacité thermique massique : $c = 390 \text{ J.kg}^{-1}.^\circ\text{C}^{-1}$

Résistivité électrique : $\rho = 1,6 \mu\Omega.\text{cm}$; température de fusion : $\theta_{\text{fus}} = 1083^\circ\text{C}$

- Déterminer l'intensité du courant traversant le solénoïde
- Déterminer la puissance électrique reçue par le fil
- Répondre à la question posée dans le problème
- Répondre à la question quand le solénoïde est immergé dans l'hélium liquide à 4 K
- Proposer une solution au problème

Ex 1:



b) 3^é de valence et 13^{ème} colonne du tableau périodique
 5^é " " " " 15^{ème} " " " "

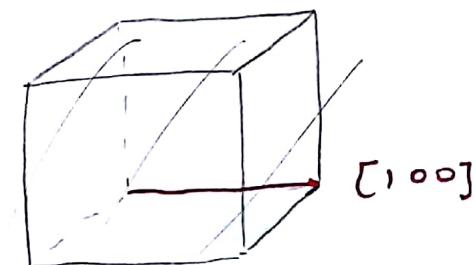
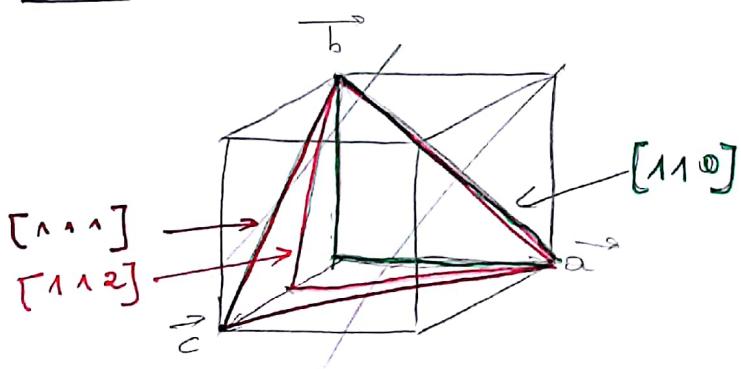
g) $\text{Ga}^0 \cdot \text{Si} \cdot \{ \text{s.c type P (trous majoritaires)}$

$\cdot \text{As:} \cdot \text{Si} \cdot \{ \text{s.c type n (é majoritaires)}$

g) 5^é de V + 3^é de V = 8^é \Rightarrow obéit à la règle de l'octet. \Rightarrow GaAs solide stable.

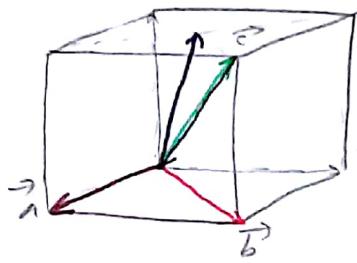
d) GaAs, GaP, AlAs, AlP, InAs, InP $\left\{ \begin{array}{l} \text{s.c III-V} \\ \end{array} \right.$

Ex 2:



Ex 2:

1)



[100]

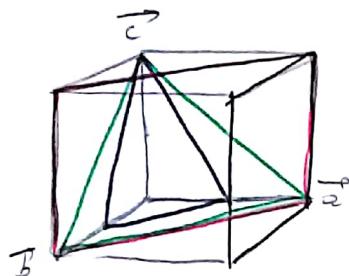
[110]

[111]

[112]

[111̄]

2)



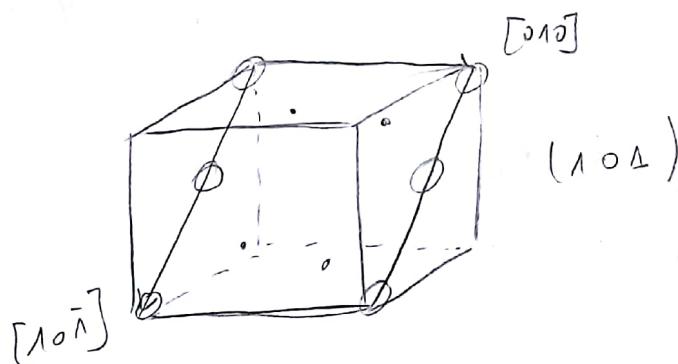
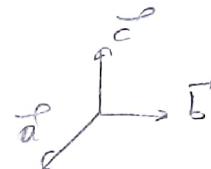
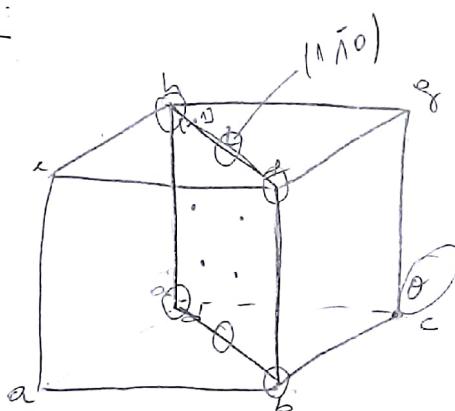
(100)

(110)

(111)

(112)

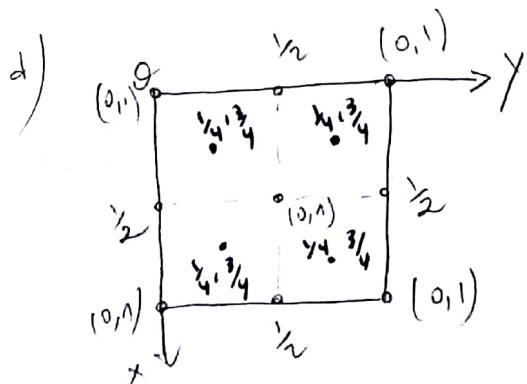
Ex 3:



[010]

(101̄)

c) réseau CFC. $8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4$ atomes Ca par maille.



• Ca (16 sommets)

• F (8 atomes)

↳ 8 sites tétra du syst CFC

e) le motif est constitué de $\left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ Ca} \\ 2 \text{ F} \end{array} \right.$

	x	y	z
Ca	0	0	0
F	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
F	$\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{4}$

(coordonnées réduites)

$$f = \frac{4 \times \left(\frac{M_{\text{Ca}}}{N_A} \right) + 8 \times \left(\frac{M_F}{N_A} \right)}{a^3}$$

$$a = 0,545 \text{ nm.}$$

$$\text{A.N. } f = 3,2 \text{ g.cm}^{-3}$$

2x4:

$$\text{a/ } C = \frac{V_{\text{atome}}}{V_{\text{maille}}} = \frac{\pi}{6} = 0,52$$

$$\text{nombre d'atomes/maille} = 8 \times \frac{1}{8} = 1$$

C système c.s. : les atomes sont uniquement au sommet
 système cristallin : $a = b = c$ et $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
 \Rightarrow Système Cubique

b) le site est défini par les 8 atomes qui l'entourent. Ces atomes étant aux sommets d'un cube, le site est donc cubique.

Il est à la totalité à la maille et il n'y en a aucun autre du même type sur les faces ou les arêtes de la maille. Il y a donc 1 site cubique en propre/maille

c) rayon r du site en ff° du rayon R des atomes de Polonium.

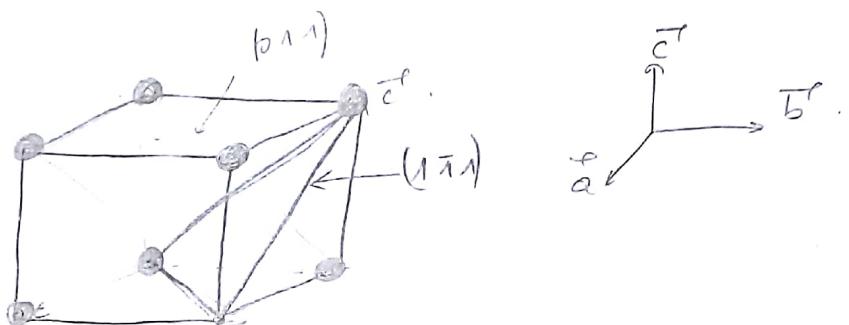
$d = 2r$ de l'atome qui peut se loger dans le site cubique est égal à $d = 2r = (\alpha\sqrt{3} - 2R) = (2R\sqrt{3} - 2R) = 2R(\sqrt{3} - 1)$

$$r = R (\sqrt{3} - 1) = 0,732 R$$

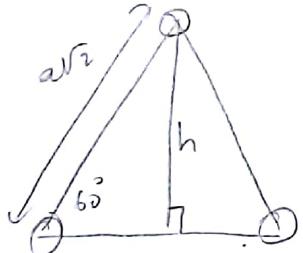
d) Réseau de Bravais si le site est occupé par un autre atome. Puisque l'atome en insertion de le site cubique pourra un ϕ égal à 0,732 fois le diamètre de l'atome de Polonium. le réseau de Bravais étant défini avec des atomes de même nature (ceux de Polonium), le réseau reste donc CS

e) indices de la direction tracée sur la figure $\begin{pmatrix} \bar{2} & \bar{1} & \bar{2} \end{pmatrix}$
 $-\frac{1}{2}\bar{a} - \frac{1}{2}\bar{b} + \bar{c}$

f)



g)



$$\begin{aligned} S_{\text{triangle}} &= \frac{a\sqrt{2} \cdot h}{2} \\ &= \frac{a\sqrt{2}}{2} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} a = \frac{\sqrt{3}}{2} a^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h^2 + \left(\frac{a\sqrt{2}}{2}\right)^2 &= (a\sqrt{2})^2 \Rightarrow h = \left(2a^2 - \frac{a^2}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \\ &= \sqrt{\frac{3}{2}} a. \end{aligned}$$

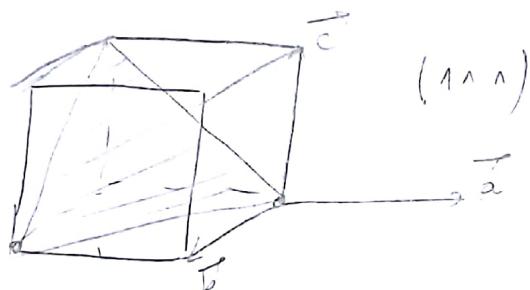
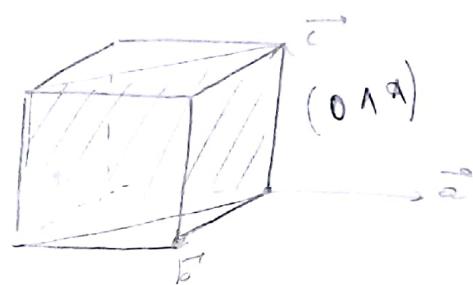
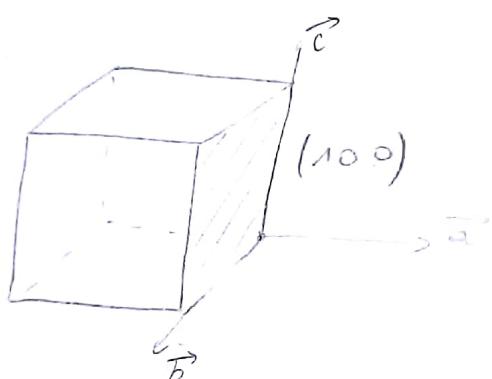
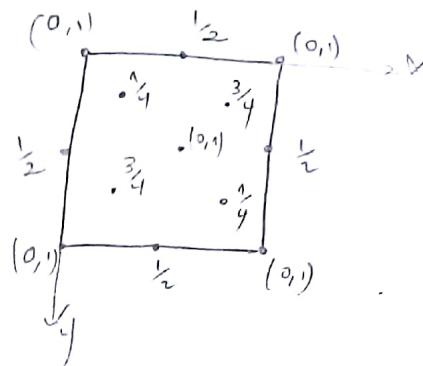
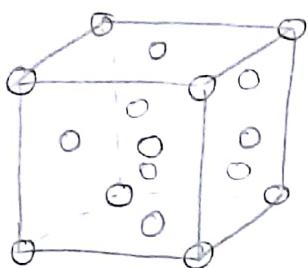
$$d(1\bar{1}1) = \frac{\frac{\sqrt{2}}{2}}{\frac{\sqrt{3}}{2} a^2} = \frac{1}{\sqrt{3} a^2} = 5,13 \text{ \AA/nm}^2.$$

$$\rho = \frac{M_P \cdot n_{\text{at}}}{N_A \cdot V} = \frac{M_P}{N_A \cdot a^3}$$

$$\text{AN: } \rho = \frac{209 \cdot 10^{-3}}{6,022 \cdot 10^{-23} \times 0,3354^3 \cdot 10^{-27}}$$

$$\Rightarrow g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Ex 5:



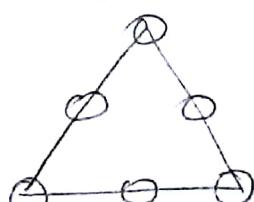
$$\{100\} = \{(010) (0\bar{1}0) (001) (100) (00\bar{1}) (\bar{1}00)\}$$

$$\{110\} = \{(110) (101) (011) (\bar{1}\bar{1}0) (1\bar{1}0) (10\bar{1})$$

$$(0\bar{1}1) (01\bar{1}) (\bar{1}01) (\bar{1}\bar{1}0) (0\bar{1}\bar{1}) (\bar{1}0\bar{1}) (\bar{1}\bar{1}\bar{1})\}$$

$\{111\}$

3) (111)



$$n_{at} = \frac{1}{6} \times 3 + 3 \times \frac{1}{2} = 2$$

$$d \{111\} = \frac{\frac{2}{\sqrt{3}} a^2}{\frac{\sqrt{3}}{2} a^2} = \frac{4}{\sqrt{3} a^2} = 7,83 \text{ nm}^2$$

③

Le plan ($1 \ 0 \ 0$)

$$S = a^2$$

$$a = 0,543 \text{ nm}$$

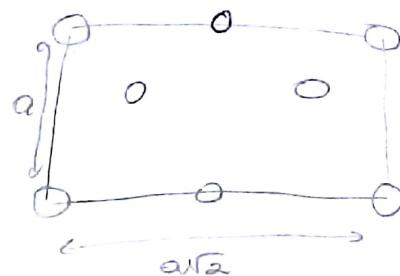
$$n_{\text{at}} = 4 \times \frac{1}{4} + 1 \\ = 2$$

$$\Rightarrow \{100\} = \frac{2}{a^2} = 6,78 \text{ at/nm}^2$$

Le plan ($1 \ 1 \ 0$)

$$S = a^2\sqrt{2}, a = 0,543 \text{ nm},$$

$$n_{\text{at}} = 4 \times \frac{1}{4} + 2 \times \frac{1}{2} + 2.$$



$$\Rightarrow \{110\} = \frac{4}{a^2\sqrt{2}} = 9,53 \text{ at/nm}^2.$$

$$\% \cos \phi = \frac{hh' + kk' + ll'}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \sqrt{h'^2 + k'^2 + l'^2}}$$

Angle	$1\ 0\ 0$	$1\ 1\ 0$	$0\ 1\ 0$	$0\ 0\ 1$	$1\ 0\ 1$
$1\ 0\ 0$	60°	45°	90°	90°	45°
$0\ 1\ 1$	90°	60°	45°	45°	60°
$1\ 1\ 1$	$54,7^\circ$	$35,3^\circ$	$54,7^\circ$	$54,7^\circ$	$31,4^\circ$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\therefore d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

$$d_{100} = a$$

$$d_{110} = \frac{a\sqrt{2}}{2}$$

$$d_{111} = \frac{a\sqrt{3}}{3}$$

Ex 7:

1- Réseau direct:

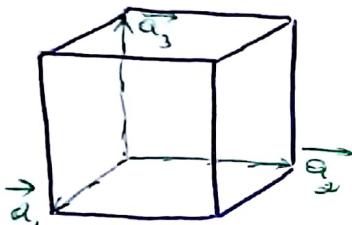
Les vecteurs fondamentaux du réseau réciproque

$$\vec{a}_1^* = \frac{2\pi}{v} (\vec{a}_2 \wedge \vec{a}_3)$$

$$\vec{a}_2^* = \frac{2\pi}{v} (\vec{a}_3 \wedge \vec{a}_1)$$

$$\vec{a}_3^* = \frac{2\pi}{v} (\vec{a}_1 \wedge \vec{a}_2)$$

1/ Cubique simple:



$$\begin{aligned}\vec{a}_1^* &= \vec{a}_1 \hat{i} \\ \vec{a}_2^* &= \vec{a}_2 \hat{j} \\ \vec{a}_3^* &= \vec{a}_3 \hat{k}.\end{aligned}$$

$$V_{cs} = \vec{a}_1^* \cdot (\vec{a}_2^* \wedge \vec{a}_3^*) = a^3$$

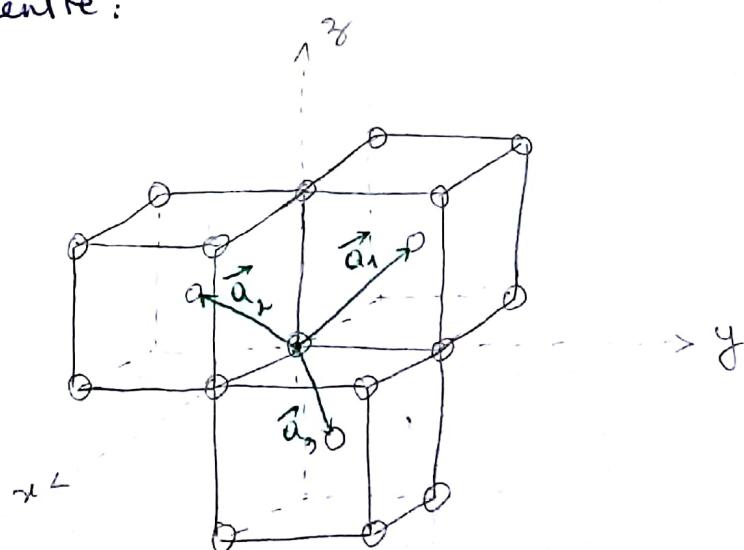
$$\vec{a}_1^* = \vec{a}_2^* = \vec{a}_3^* = \vec{a}$$

$$\vec{a}_1^* = \frac{2\pi}{a} \hat{i}$$

$$\vec{a}_2^* = \frac{2\pi}{a} \hat{j}$$

$$\vec{a}_3^* = \frac{2\pi}{a} \hat{k}.$$

2/ Cubique centré:



$$\begin{aligned}\vec{\alpha}_1 &= -\frac{a}{2} \vec{i} + \frac{a}{2} \vec{j} + \frac{a}{2} \vec{k} = \frac{a}{2} (-\vec{i} + \vec{j} + \vec{k}) \\ \vec{\alpha}_2 &= \frac{a}{2} (\vec{i} - \vec{j} + \vec{k}) \\ \vec{\alpha}_3 &= \frac{a}{2} (\vec{i} + \vec{j} - \vec{k}).\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_{cc} &= \vec{\alpha}_1 \cdot (\vec{\alpha}_2 \wedge \vec{\alpha}_3) \\ &= \frac{a^3}{2} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \left[\frac{a^2}{4} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} \right] = \frac{a^3}{2} \\ &= \frac{a^3}{4} \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}\end{aligned}$$

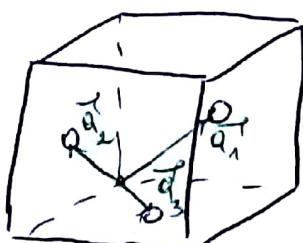
$$\begin{aligned}\vec{\alpha}_1 &= \frac{2\pi}{V_{cc}} \vec{\alpha}_2 \wedge \vec{\alpha}_3 \\ &= \frac{4\pi}{a^3} \frac{a}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} \wedge \frac{a}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} \\ &= \frac{\pi}{a} \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}\end{aligned}$$

$$= \frac{2\pi}{a} (\vec{j} + \vec{k}) = \frac{1}{2} \left(\frac{4\pi}{a} (\vec{j} + \vec{k}) \right)$$

$$\begin{aligned}\vec{\alpha}_2^+ &= \frac{2\pi}{a} (\vec{i} + \vec{k}) = \frac{1}{2} \left(\frac{4\pi}{a} \right) (\vec{i} + \vec{k}) \\ \vec{\alpha}_3^+ &= \frac{2\pi}{a} (\vec{i} + \vec{j}) = \frac{1}{2} \left(\frac{4\pi}{a} \right) (\vec{i} + \vec{j})\end{aligned}$$

Le réseau du CFC est un réseau cc de paramètre de maille $\frac{4\pi}{a}$.

2/ C.F.C



$$\begin{aligned}\vec{\alpha}_1 &= \frac{1}{2} a (\vec{j} + \vec{k}) \\ \vec{\alpha}_2 &= \frac{1}{2} a (\vec{i} + \vec{k}) \\ \vec{\alpha}_3 &= \frac{1}{2} a (\vec{i} + \vec{j})\end{aligned}$$

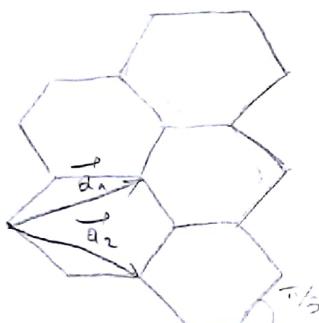
$$\vec{q}_1 = \frac{2\pi}{a} (-\vec{i} + \vec{j} + \vec{k})$$

$$\vec{q}_2 = \frac{2\pi}{a} (\vec{i} - \vec{j} + \vec{k})$$

$$\vec{q}_3 = \frac{2\pi}{a} (\vec{i} + \vec{j} - \vec{k}) = \frac{1}{2} \left(\frac{4\pi}{a} (\vec{i} + \vec{j} - \vec{k}) \right)$$

\Rightarrow Réseau réciproque du CFC est un réseau c.c de paramètre de maille $\frac{4\pi}{a}$.

7/ Graphène:



$$\vec{q}_1 \cdot \vec{q}_1^* = 2\pi.$$

$$\vec{q}_2 \cdot \vec{q}_2^* = 2\pi.$$

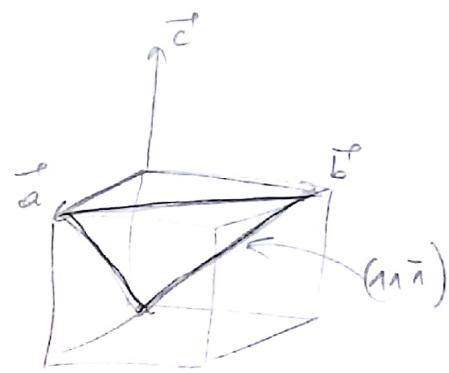
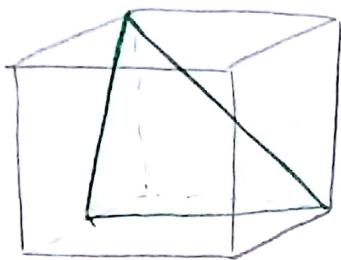
$$\vec{q}_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} a \vec{i} + \frac{1}{2} a \vec{j}$$

$$\vec{q}_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} a \vec{i} - \frac{1}{2} a \vec{j}.$$

$$\vec{q}_1^* = \frac{2\pi}{\sqrt{3} a} \vec{i} + \frac{2\pi}{a} \vec{j}$$

$$\vec{q}_2^* = \frac{2\pi}{\sqrt{3} a} \vec{i} - \frac{2\pi}{a} \vec{j}.$$

Ex 6 :



$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

$$d_{311} = \frac{a}{\sqrt{3^2 + 1^2 + 1^2}} = \frac{a}{\sqrt{11}}$$

2° Loi de Bragg: $a = d_{311} \sqrt{11}$

$$2 d_{hkl} \sin\theta = \lambda$$

$$\Rightarrow d_{hkl} = \frac{\lambda}{2 \sin\theta} \Rightarrow a = \sqrt{11} \cdot \frac{\lambda}{2 \sin\theta}$$

A.N.: $a = \sqrt{11} \cdot \frac{154}{2 \sin\theta} = 404 \text{ pm}$ avec $\theta = 39^\circ 2$.

Ex 8:

$$F(h, k, l) = \sum_j f_j e^{-2\pi i (y_j h + y_j k + z_j l)}$$

$$\begin{aligned} F(h, k, l) &= f_{Au} e^{-2\pi i (0h + 0k + 0l)} + f_{Au} e^{-2\pi i (\frac{1}{2}h + \frac{1}{2}k + 0l)} \\ &\quad + f_{Cu} e^{-2\pi i (\frac{1}{2}h + 0k + \frac{1}{2}l)} + f_{Cu} e^{-2\pi i (0h + \frac{1}{2}k + \frac{1}{2}l)} \\ &= f_{Au} \left(1 + e^{-i\pi(h+k)} \right) + f_{Cu} \left(e^{-i\pi(h+l)} + e^{-i\pi(k+l)} \right) \end{aligned}$$

Condition d'extinction $F_{hkl} = 0$.

$$\left. \begin{aligned} 1 + e^{-i\pi(h+k)} \\ e^{-i\pi(k+l)} + e^{-i\pi(h+l)} \end{aligned} \right\} = 0 \quad \left. \begin{aligned} h \text{ et } k \text{ de graine.} \\ \text{et } l \text{ quelconque.} \end{aligned} \right\}$$