

1.2 Situation déclenchante

La détermination d'une masse volumique est une étape clé de l'expérience proposée ici.

Sur ce sujet, l'histoire (ou la légende) d'Archimède et de la couronne du roi Hieron II peut être racontée. Il s'agit d'un roi qui avait donné une certaine masse d'or à un artisan pour qu'il lui fabrique une couronne. Celui-ci aurait échangé une partie de l'or par la même masse de cuivre et aurait fabriqué la couronne avec l'alliage et non avec l'or pur. Le roi suspectant la fraude aurait demandé à Archimède de vérifier que la couronne était bien suspendue à la fraude aurait demandé à Archimède de déterminer le volume de la couronne par immersion dans l'eau. Le savant, pour répondre à cette question, détermina le volume de la couronne par déplacement d'eau et, obtenant sa masse par pesée, trouva ainsi l'indélébileté de l'artisan.

Un travail comparable peut être « rapidement » entrepris par les élèves pour qu'ils déterminent la masse volumique d'un caillou en le trempant dans une éprouvette d'eau.

Le terme « rapidement » a été mis entre guillemets car cette activité, qui semble simple, pose problème même au niveau du lycée.

2.1 Modèle et hypothèses adoptés

- les atomes sont en contact au sein d'une maille cristallographique, pas ;
- certains atomes sont en contact au sein d'une maille cristallographique, pas ;
- certains atomes sont en contact au sein d'une maille cristallographique, pas ;
- La cohésion du cristal est due à des forces attractives. Dans le cas du cristal ionique, il s'agit de forces électrostatiques.
- Nous considérons que la masse volumique déterminée par le rapport entre la masse d'échantillon et son volume est égale au rapport entre la masse de la maille cristallographique et le volume de celle-ci.

2.2 Principe des mesures

Chapitre 13 • Détermination expérimentale de l'ionisation de l'air

introduits dans une fiole jaugée ou dans un pycnomètre¹. L'élève complète au trait de jauge avec un liquide qui ne dissout pas ce cristal. La mesure de la masse de solvant nécessaire, la connaissance de la jauge et de la masse volumique du solvant permettant de remonter au volume des cristaux (voir le calcul ci-dessous),

Il faut impérativement utiliser un non-solvant du cristal étudié afin de ne pas rompre les liaisons dont on veut déterminer la longueur.

Ainsi, l'eau n'est pas un bon exemple de non-solvant dans la détermination de la longueur des liaisons ioniques d'un cristal de chlorure de sodium, elle casserait ces dernières comme le suggère la figure 13.1. En revanche, l'eau est parfaite s'il s'agit de cristaux de cuivre (insoluble) ou de fluorure de calcium dont la faible solubilité est $\approx 16 \text{ mg/L}$ à 20°C .

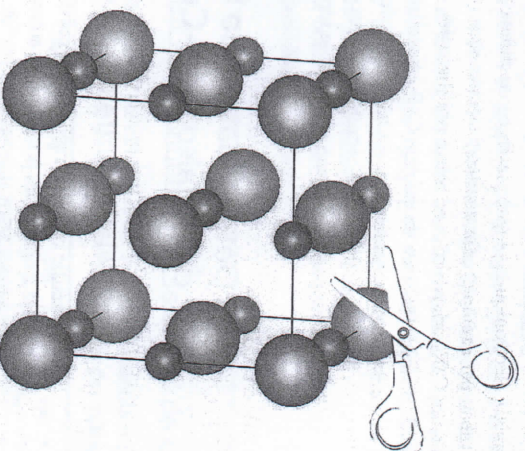


Figure 13.1 – Maille de NaCl^2 . Les ciseaux représentent l'effet de l'eau sur la maille de NaCl . Ce solvant détruirait les liaisons dont l'expérience vise à déterminer la longueur.

Les pycomètres s'apparentent à une fiole jaugée de petit volume et de grande précision. À la différence de la fiole jaugée, le volume d'un pycomètre n'est pas fourni par le constructeur et doit être mesuré au cas par cas. En 2017, un pycomètre à débordement coûtait environ 20 euros. Il existe également des pycomètres à traits de jauge, moins simples d'utilisation avec des élèves de lycée.

2. Par souci de clarté, cette figure ne montre pas les contacts entre atomes bien qu'ils soient importants pour les calculs à venir.

Nous décrivons dans un premier temps la mesure de la masse volumique du cuivre et de CaF_2 dans l'eau en utilisant une fiole jaugée, puis celle de NaCl dans le cyclohexane en utilisant un pycnomètre.

2.3 Réalisation des expériences

Tout corps cristallisé dans un réseau cubique est candidat pour cette expérience. Nous proposons ici un métal, le cuivre et un composé ionique, le fluorure de calcium. Le chlorure de sodium est également proposé, mais avec un autre mode opératoire plus élaboré.

2.4 Matériel et produits nécessaires

Matériel et produits : fiole jaugée de 50 mL ou 100 mL dont l'ouverture permet d'introduire (et de récupérer¹) facilement les cristaux ; entonnoir à poudre ; balance électronique (précise au cg ou mieux ; plus la balance est précise, meilleurs sont les résultats) ; thermomètre électronique ; pipette plastique ; spatule, capsule.

Cuivre Cu (en ruban par exemple), eau distillée, acétone pour dégraisser le cuivre² ou Fluorure de calcium CaF_2 cristallisé³ ; nous avons utilisé CaF_2 en poudre très fine produit commercial, et CaF_2 en graviers grossièrement concassés à partir d'un échantillon de fluorine, disponible dans les collections du laboratoire de géologie, qui avait été rapporté lors d'une sortie sur le terrain.

3 Détermination de la longueur de la liaison Cu-Cu

3.1 Relation entre masse volumique et distance Cu-Cu

La maille cristalllographique du cuivre est cubique faces centrées (CFC) d'arête a . La figure 2 montre les positions des atomes dans la maille et permet de constater que celle-ci contient $N = 4$ atomes de cuivre⁴ de masse m_{Cu} . Les atomes, dont le rayon est noté r_{Cu} sont au contact sur la diagonale d'une une face. Ainsi :

$$4r_{\text{Cu}} = a\sqrt{2}$$

1. Il faut pouvoir récupérer le corps utilisé et la fiole à la fin de l'expérience. Dans le cas des cristaux ioniques, il est possible de les récupérer par filtration.
2. Dégraisser le cuivre évite d'avoir des bulles d'air à sa surface, ce qui perturberait les mesures.
3. Ce composé est présent dans la nature sous forme de minerais de fluorine. Il s'agit de la principale source de fluor dans l'industrie.
4. La maille contient 4 atomes car : 1 atome à chaque sommet appartient à 8 cubes, seul $1/8$ de cet atome est donc dans la maille ; ces 8 atomes comptent donc pour $8 \times 1/8 = 1$ atome ; les 6 atomes au centre des faces appartiennent chacun à deux mailles, ils ne sont donc qu'à moitié dans la maille que nous considérons. Ces 6 atomes comptent donc pour $6 \times 1/2 = 3$ atomes. (voir chapitre 12, § 2.3)

La masse volumique ρ du cuivre est donc égale à la masse de 4 atomes de cuivre divisée par le volume de la maille. Cela conduit à la relation :

$$\rho = \frac{\text{masse des atomes d'une maille}}{\text{volume de la maille}} = \frac{N \cdot m_{\text{Cu}}}{a^3} = \frac{4}{a^3} \frac{M_{\text{Cu}}}{N_A}$$

M_{Cu} est la masse molaire de l'élément cuivre, N_A la constante d'Avogadro et ρ la masse volumique du cuivre déterminée expérimentalement ici. Cette relation donne le paramètre de maille :

$$a = \left(\frac{4M_{\text{Cu}}}{\rho N_A} \right)^{\frac{1}{3}}$$

et la distance d entre deux atomes de cuivre :

$$d = \frac{a\sqrt{2}}{2}$$

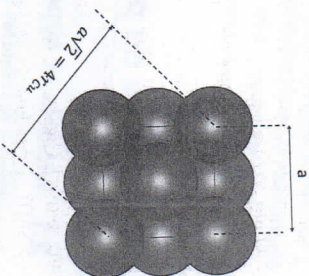


Figure 13.2 – Maille du cristal de cuivre vue suivant un axe du cube.

3.2 Détermination de la masse volumique par déplacement de solvant

Les données expérimentales recueillies sont :

- La masse de la fiole vide m_f
- La masse de la fiole pleine d'eau m_{f+eau} d'où l'on déduit $m_{eau} = m_{f+eau} - m_f$
- La masse de la fiole avec du cuivre m_{f+Cu} d'où l'on déduit la masse du cuivre $m_{Cu} = m_{f+Cu} - m_f$
- La masse de la fiole avec du cuivre et de l'eau $m_{f+eau+Cu}$; la distinction entre eau et eau permet de prendre conscience que la quantité d'eau n'est pas la même dans les deux cas.

Ces données permettent d'en déduire la masse du cuivre, son volume et donc sa masse volumique.

- Sa masse est donnée par : $m_{Cu} = m_{f+Cu} - m_f$.
- Son volume est le même que celui de l'eau déplacée *eau'* (figure 13.3) :
 - La masse de *eau'* est $m_{eau'} = m_{f+eau'+Cu} - m_{f+Cu}$.
 - La masse de *eau'* est $m_{eau'} = m_{eau} - m_{eau''}$.
 - Le volume du cuivre qui est également le volume de *eau'* est $V = m_{eau'} / \rho_{eau}$.
- L'expression de la masse volumique du cuivre est donc :

$$\rho_{Cu} = \frac{m_{Cu}}{V_{Cu}} = \frac{m_{Cu}}{m_{eau} - m_{eau'}} = \rho_{eau} \frac{m_{Cu}}{m_{eau} - (m_{f+eau'+Cu} - m_{f+Cu})}$$

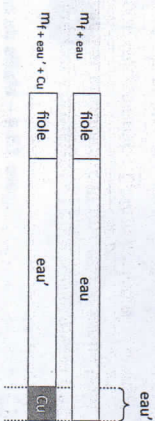


Figure 13.3 – Représentation de la fiole pleine d'eau, avec et sans cuivre.

Matériel et produits : fiole de 50 mL ou pycnomètre, copeau de cuivre d'une taille leur permettant d'entrer (et de sortir) de la fiole ou du pycnomètre.

Expérience	Commentaires
Tous les produits doivent avoir séjourné près de la balance suffisamment longtemps pour être à l'équilibre thermique.	Une variation de la température de l'eau pendant l'expérience est une source d'erreur significative.
Mesurer et noter la valeur de la température θ au niveau de la balance.	
Détermination du volume V_f de la fiole jaugée Peser la fiole jaugée vide et sèche avec son bouchon m_f .	Si le volume de la fiole est connu, sauter cette étape, mais on peut vouloir le vérifier si la température de travail est différente de 20 °C ou si la fiole est de classe B.
La remplir d'eau distillée jusqu'au trait de jauge en vérifiant qu'aucune bulle ne s'est coincée. Sécher avec précaution l'eau située sur les parois au-dessus du trait de jauge avec un papier absorbant.	Procéder comme pour une dilution. Ajuster au niveau du trait de jauge avec une pipette plastique. La moindre bulle conduit à une masse d'eau incorrecte.

Expérience	Commentaires
Ne pas tenir la fiole trop longtemps dans les mains.	Un réchauffement par la chaleur de la main est une source d'erreur.
Peser la fiole (et son bouchon) remplie jusqu'au trait de jauge (m_{f+eau}). La laisser quelques instants sur le plateau de la balance en vérifiant que le liquide reste exactement à hauteur du trait de jauge.	Cela permet de s'assurer que l'eau est à l'équilibre thermique. On peut en déduire m_{eau} puis $V_{eau} = m_{eau} / \rho_{eau}$. Attention, ρ_{eau} dépend de la température, utiliser la valeur tabulée (voir annexe).
Détermination de la masse volumique ρ_{cuivre} du cuivre à la température du laboratoire Vider la fiole, la sécher si possible à l'acétone. Introduire entre 10 et 20 g de cuivre et peser précisément sa masse m_{f+Cu} . Compléter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Attention qu'il n'y ait pas de bulle d'air coincée au niveau du cuivre. Noter la valeur de $m_{f+eau'+Cu}$.	On cherche ρ_{Cu} ; voir les calculs ci-dessus. Le cuivre peut être introduit sous forme de ruban (préalablement dégraissé à l'acétone) ou de copeaux. Il faut pouvoir le récupérer en fin d'expérience. Bannir la poudre de cuivre, qui tapisserait les parois de la fiole.

3.3 Traitement des données pour le cristal de cuivre Cu

Plusieurs déterminations ont été effectuées sur le même échantillon de cuivre. La masse volumique utilisée dans la suite du calcul sera la moyenne des valeurs obtenues.

Masse de l'eau m_{eau}/g	Fiole + cuivre $m_{f,Cu}/g$	Cuivre seul m_{Cu}/g	Fiole + eau' + Cu $m_{f+eau'+Cu}/g$	ρ_{Cu} g/mL
32,2406	46,2473	10,5057	77,3047	8,857
32,2244	46,2467	10,5051	77,2988	8,863
32,2271	46,2468	10,5053	77,2703	8,707

À la température de l'expérience (23,0 °C), la masse volumique de l'eau est 0,997541 g/cm^3 . Voir l'annexe de ce chapitre pour les valeurs à différentes températures.

La première masse volumique est calculée ainsi :

$$\rho_{Cu} = 0,997541 \frac{10,5057}{32,2406 - (77,3047 - 46,2473)} = 8,857 \text{ g.cm}^{-3}$$

La moyenne des masses volumiques est 8,81 g/ml ce qui conduit au paramètre de maille :

$$a = \left(\frac{4M_{Cu}}{\rho N_A} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{4 \times 63,546}{8,81 \times 6,022 \cdot 10^{23}} \right)^{\frac{1}{3}} = 362 \text{ pm}.$$

La valeur cristallographique tabulée est 361 pm. Nous en déduisons la distance Cu-Cu :

$$d = \frac{a\sqrt{2}}{2} = \frac{362 \times \sqrt{2}}{2} = 256 \text{ pm}.$$

Pour les calculs, les constantes comme la masse molaire ou la constante d'Avogadro doivent avoir plus de chiffres significatifs que les données expérimentales (ici la masse volumique du cuivre) pour garantir qu'elles ne contribuent pas à l'erreur sur les chiffres significatifs.

Les étudiants peuvent faire deux types d'erreurs :

- Des erreurs de mesures, souvent par manque de soin ; ils trouvent alors des valeurs éloignées de plus de 10 % de la valeur attendue.
- Des erreurs dues à la mauvaise compréhension des calculs effectués, en utilisant une masse pour une autre le plus souvent. Ils peuvent trouver, dans ce cas, des longueurs de liaison négatives.

Ceux qui trouvent la bonne valeur sont généralement impressionnés par l'expérience. Il peut être intéressant de fournir un protocole et le mode de calcul détaillés pour une structure cubique, puis de fournir les données (sans les calculs) pour traiter à la maison une autre structure.

4 Détermination de la distance Ca-F

Le travail ci-dessus concerne un corps métallique. Il est utile d'avoir aussi un protocole avec un composé ionique afin de satisfaire à certaines attentes sur les objectifs d'enseignement. De nombreux composés ioniques étant solubles dans l'eau, le fluorure de calcium, qui est à la fois insoluble et avec une maille cubique est un choix possible. Le travail décrit ci-dessus dans le cas du cuivre peut être répété avec CaF_2 . Ce qui change est le traitement des données puisque la maille n'est pas la même.

4.1 Principe du calcul

La maille cristallographique du fluorure de calcium est cubique d'arête a . Les ions calcium occupent les sommets de la maille et le centre des faces. Les ions fluorure occupent les 8 sites tétraédriques soit, en coordonnées réduites (voir chapitre 12, § 3.2), les positions :

(1/4, 1/4, 1/4), (3/4, 1/4, 1/4), (1/4, 3/4, 1/4), (1/4, 1/4, 3/4),
(3/4, 3/4, 1/4), (3/4, 1/4, 3/4), (1/4, 3/4, 3/4), (3/4, 3/4, 3/4).
Ces positions se retrouvent avec la figure 13.4.

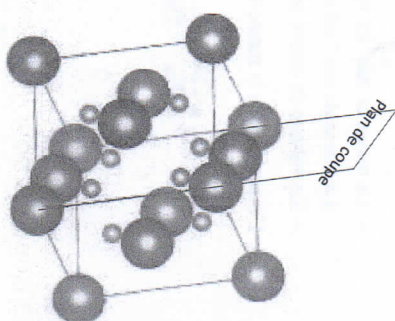


Figure 13.4 – Maille du cristal de fluorure de calcium ; le plan de coupe correspond à la figure suivante.
Les rayons des ions sont normalement $r_{Ca} = 114 \text{ pm}$ et $r_F = 119 \text{ pm}$. Le rayon de F^- a été diminué pour améliorer un peu la lisibilité de la structure.

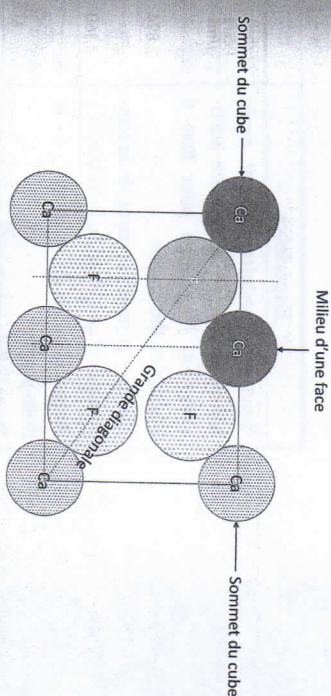


Figure 13.5 – Maille de CaF_2 vue en coupe suivant un plan passant par la diagonale d'une face.

La vue en coupe de la maille (Fig. 13.5), permet de trouver la relation entre la distance qui sépare les ions Ca^{2+} et F^- et l'arête du cube. Nous raisonnons uniquement sur les trois sphères du sommet supérieur gauche de cette figure. L'anion F^- est tangent aux deux cations Ca^{2+} , il est donc sur la médiatrice Ca-Ca. Cette médiatrice coupe la grande diagonale à son quart. La relation suivante sert de base au calcul :

$$d_{\text{CaF}} = a \frac{\sqrt{3}}{4}$$

La masse volumique de la maille est égale à la masse de quatre unités CaF_2 divisée par le volume de la maille soit, avec les notations déjà utilisées pour le cuivre (§ 3.2) :

$$\rho = \frac{4 \frac{M_{\text{CaF}_2}}{N_A}}{a^3}$$

d'où :

$$d_{\text{CaF}} = \left(\frac{3\sqrt{3} M_{\text{CaF}_2}}{16 N_A \rho} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Comme dans le cas du cuivre, la distance entre les ions se déduit de données connues (M_{CaF_2} et ρ) ou mesurées.

4.2 Traitement des données pour le cristal de fluorure de calcium CaF_2

Les déterminations de masses volumiques ont été effectuées sur deux échantillons de fluorure de calcium. L'un, commercial en poudre très fine parfaitement blanche, l'autre en graviers concassés de fluorine naturelle, légèrement grise, récupérée au laboratoire de géologie. Les résultats expérimentaux sont dans le tableau 13.2.

Tableau 13.2 Données expérimentales dans le cas de CaF_2 .

	Eau m_{eau}/g	Fluorure + CaF_2 $m_{\text{H}_2\text{CaF}_2}/\text{g}$	CaF_2 seul $m_{\text{CaF}_2}/\text{g}$	Fluorure + eau $m_{\text{H}_2\text{eau}+\text{CaF}_2}/\text{g}$	ρ_{CaF_2} g/mL
Échantillon commercial	53,0059	41,5354	10,9133	90,7770	2,894
Graviers concassés	50,0076	54,808	25,5426	96,746	3,160

La masse volumique de l'eau à la température de l'expérience (20,0 °C) est 0,998206 g/mL. Voir l'annexe pour des valeurs à une température différente. La masse volumique tabulée de la fluorine est 3,18 g/mL. L'expression donnant ρ a été démontrée au § 3.2.

Les deux échantillons sont physiquement différents, et l'écart de la masse volumique de celui en poudre fine avec la valeur de référence provient de la mauvaise mouillabilité de la poudre. Ce phénomène se reproduit avec toutes les poudres fines que nous avons testées (y compris avec d'autres espèces chimiques). Il est toujours préférable de travailler avec de gros cristaux. Seule la valeur $\rho_{\text{CaF}_2} = 3,16 \text{ g/cm}^3$ sera retenue. Le calcul numérique de ρ est effectué ainsi :

$$\rho_{\text{CaF}_2} = 0,98206 \frac{25,546}{50,0076 - (96,746 - 54,808)} = 3,160 \text{ g/mL}$$

$$d_{\text{CaF}} = \left(\frac{3 \times \sqrt{3} \times 78,075}{16 \times 6,022 \cdot 10^{23} \times 3,160} \right)^{\frac{1}{3}} = 2,37 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$$

Le paramètre de maille, calculée à partir de la masse volumique des graviers concassés, est donc $a = 548 \text{ pm}$ et la distance $\text{Ca}-\text{F}$ est $d_{\text{CaF}} = 237 \text{ pm}$ qui est la valeur tabulée.

5 Détermination de la distance Na-Cl

5.1 Principe de l'expérience

Pour faire le même travail avec un sel soluble dans l'eau, il convient de remplacer l'eau par un non-solvant du sel. Nous avons utilisé le cyclohexane pour étudier le chlorure de sodium. Cependant, la masse volumique du cyclohexane n'est pas tabulée avec précision en fonction de la température. Cette donnée se détermine avec le même pycnomètre à la température du laboratoire comme nous le décrivons ci-dessous.

5.2 Principe du calcul

La maille cristalllographique du chlorure de sodium est cubique faces centrées (CFC) d'arête a . La figure 13.6a montre les positions des ions dans la maille et permet de constater que celle-ci contient 4 ions Cl^- et autant d'ions Na^+ . La figure 13.6b précise les contacts entre les ions sur une face et montre que l'arête a de la maille CFC est égale à deux fois la distance entre Na^+ et Cl^- . La détermination de cette distance est l'objet de cette expérience.

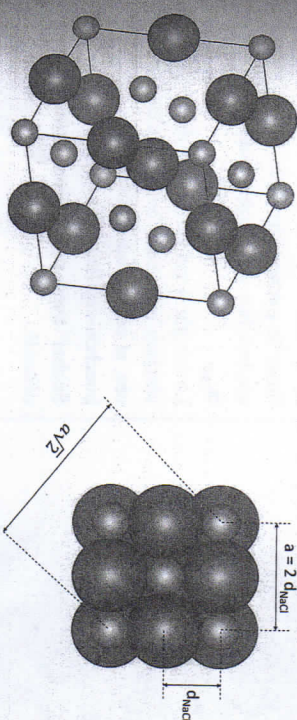


Figure 13.6 – (a) La maille de NaCl ; (b) Vue suivant l'axe a en mettant en évidence les ions au contact.

Comme précédemment, il est possible de déterminer ρ_{NaCl} si la masse volumique ρ_{NaCl} est connue. En effet, au niveau de la maille, ρ_{NaCl} est égale à la masse de 4 Na^+ et de 4 Cl^- divisée par son volume a^3 soit $8a^3$, d'où la relation¹ :

$$\rho_{NaCl} = \frac{4 \frac{M_{NaCl}}{N_A}}{8a^3}$$

Il reste donc à déterminer expérimentalement la masse volumique ρ_{NaCl} , ce qui est l'objet de l'expérience décrite ci-après.

5.3 Réalisation de l'expérience

Matériel et produits : pycnomètre à débordement ; chlorure de sodium en gros cristaux ; cyclohexane ; eau ; entonnoir à poudre ; balance électronique (précise au cg ou mieux) ; thermomètre électronique ; pipette plastique ; spatule, capsule.

Expérience	Commentaires
Tous les liquides doivent avoir séjourné près de la balance suffisamment longtemps pour être à l'équilibre thermique. Mesurer et noter la valeur de la température θ au niveau de la balance. Éviter de graisser le rodage du bouchon.	La précision du volume du pycnomètre impose un travail avec une température constante et connue. C'est la source majeure d'incertitude. Sur un rodage, on met entre 1 et 5 mg de graisse qui se dissoudra partiellement dans le solvant organique utilisé. C'est autant d'erreur.
Détermination de V_{pyc}, volume du pycnomètre Peser le pycnomètre vide et sec avec son bouchon-capillaire et noter la masse m_{pyc} . Le remplir à ras bord d'eau distillée en vérifiant qu'aucune bulle ne s'est coïncée, et en enfonçant avec précaution le bouchon-capillaire dans le col rodé. Sécher avec précaution l'eau qui a débordé.	Utiliser toujours le même bouchon-capillaire. La moindre bulle et la masse d'eau sera incorrecte. Le niveau de l'eau est fixé par le débordement : le pycnomètre utilisé est dit à débordement pour cette raison.

Expérience	Commentaires
Ne pas tenir le pycnomètre trop longtemps dans les mains. Peser le pycnomètre plein ($m_{pyc+eau}$). Le laisser quelques minutes sur le plateau de la balance en vérifiant que le liquide reste à hauteur du trait de jauge.	Un réchauffement par la chaleur main est une source d'erreur. Cela permet de s'assurer que le pycnomètre est proche de l'équilibre thermique. $V_{pyc} = V_{eau} = \frac{m_{pyc+eau} - m_{pyc}}{\rho_{eau}}$
Détermination de la masse volumique du cyclohexane Vider l'eau du pycnomètre, le sécher si possible à l'acétone, le rincer au cyclohexane puis le remplir comme précédemment de ce liquide. Le cyclohexane va déborder comme l'eau précédemment ; prévoir un papier absorbant pour l'essuyer. Ne pas réchauffer le pycnomètre avec les mains, le tenir plutôt avec deux doigts. Peser le pycnomètre plein ($m_{pyc+cyclo}$).	Le cyclohexane est préféré à de nombreux autres solvants car il ne dissout pas $NaCl$ et n'est pas toxique. Travailler sous hotte est toutefois conseillé. Attention à la ventilation qui ne doit pas perturber les mesures. $\rho_{cyclo} = \frac{m_{pyc+cyclo} - m_{pyc}}{V_{pyc}}$
Détermination de la masse volumique de $NaCl$ Vider le pycnomètre (on peut récupérer le cyclohexane pour s'en resservir). Le sécher. Vérifier sa masse à vide m_{pyc} . Y introduire environ 5 à 10 g de $NaCl$ sec et peser cette masse précisément ($m_{pyc+NaCl}$). Ajouter du cyclohexane sur le sel, jusqu'à la moitié du pycnomètre. Agiter et taper de façon à ne pas coincer d'air dans le sel. Compléter avec le même liquide, boucler, sécher, ajuster au trait de jauge ; Peser l'ensemble ($m_{pyc+NaCl+cyclo}$).	Le cyclohexane de la première pesée est parfaitement propre et peut donc resservir (économie, diminution des rejets de solvant). Si le pycnomètre n'a pas la masse à vide initiale, c'est qu'il n'est pas sec. Si $NaCl$ était humide, on pèserait de l'eau avec. Si on remplit trop le pycnomètre, on ne peut agiter efficacement le liquide pour chasser l'air.

1. 4 ions chlorure : 1 ion à chaque sommet ($8 \times 1/8 = 1$) + 1 ion au centre de chaque face ($6 \times 1/2 = 3$), 4 ions sodium : 1 ion au milieu de chaque arête ($12 \times 1/4 = 3$) + 1 ion au centre du cube ($1 \times 1 = 1$).

5.4 Traitement des données pour le cristal de chlorure de sodium NaCl

Toutes les mesures sont effectuées à 25,0 °C. La masse volumique de l'eau à cette température est 0,997047 g.cm⁻³. Un seul pycnomètre a été utilisé.

- Détermination du volume du pycnomètre

Le volume du pycnomètre est déterminé par le calcul suivant :

$$m_{\text{pyc}} = 25,9508 \text{ g}$$

$$m_{\text{pyc+eau}} = 51,7928 \text{ g}$$

$$V_{\text{pyc}} = \frac{m_{\text{eau}}}{\rho_{\text{eau}}} = \frac{m_{\text{pyc+eau}} - m_{\text{pyc}}}{\rho_{\text{eau}}} = \frac{51,7928 - 25,9508}{0,997047} = 25,92 \text{ cm}^3$$

- Détermination de la masse volumique du cyclohexane à 25,0 °C

$m_{\text{pyc+cyclo}} = 45,993 \text{ g}$ (en présence de cyclohexane, on ne peut empêcher une légère évaporation du solvant, la précision du dixième de milligramme devient superflue).

$$\rho_{\text{cyclo}} = \frac{m_{\text{cyclo}}}{V_{\text{pyc}}} = \frac{m_{\text{pyc+cyclo}} - m_{\text{pyc}}}{V_{\text{pyc}}} = \frac{45,993 - 25,9508}{25,92} = 0,7732 \text{ g.cm}^3$$

- Détermination de la masse volumique de NaCl

Cyclo $m_{\text{cyclo}}/\text{g}$	Pyc + NaCl $m_{\text{pyc+NaCl}}/\text{g}$	NaCl seul m_{NaCl}/g	Pyc + Cyclo' + NaCl $m_{\text{pyc+eau+NaCl}}/\text{g}$
20,042	30,7121	4,7613	49,072

Le calcul réalisé pour Cu ou CaF₂ avec l'eau est transposé pour NaCl avec le cyclohexane.

$$\rho_{\text{NaCl}} = \frac{m_{\text{NaCl}}}{V_{\text{NaCl}}} = \frac{m_{\text{NaCl}}}{\frac{m_{\text{cyclo}} - m_{\text{cyclo}'}}{\rho_{\text{cyclo}}}}$$

$$\rho_{\text{NaCl}} = \rho_{\text{cyclo}} \frac{m_{\text{NaCl}}}{m_{\text{cyclo}} - (m_{\text{pyc+cyclo}'} + m_{\text{NaCl}} - m_{\text{pyc+NaCl}})}$$

$$\rho_{\text{NaCl}} = 0,7732 \frac{4,7613}{20,042 - (49,072 - 30,7121)} = 2,189 \text{ g.cm}^{-3}$$

(le fournisseur donne 2,1650 g.cm⁻³).

Chapitre 13 • Détermination expérimentale de longueurs de liaisons

La distance d de Na-Cl est donc

$$d = \left(\frac{M_{\text{NaCl}}}{N_A} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{58,44}{6,022 \cdot 10^{23}} \right)^{\frac{1}{3}} = 281 \text{ pm}$$

Les tables donnent 278 pm.

6 Séquence d'enseignement

Étude des structures microscopiques s'enseigne au lycée ainsi qu'au niveau postbac. Les principaux concepts liés à cette thématique sont regroupés dans la carte mentale de la page suivante. Les chapitres précédents ont fourni des séquences pour l'enseignement des cristaux (métalliques, ioniques). Le travail expérimental ci-dessus peut venir s'insérer soit au niveau lycée (cas de Cu ou de CaF₂) soit au niveau postbac avec les mêmes expériences, voire avec le cas de NaCl. Ce dernier comporte l'utilisation de deux solvants ce qui se révèle problématique pour la compréhension de l'expérience et les calculs correspondants.

Pour ne pas se perdre dans les calculs ci-dessus, il faut avoir une bonne vision de ce qu'est une maille cristalline. De telles expériences constituent donc un approfondissement de l'étude des structures cristallines.