

Mesure de la diffraction de Bragg sur un réseau cubique

Yohann Bertrand William Trudel et Aubert Lamy

Université du Québec à Trois-Rivières

RÉSUMÉ

La diffraction de Bragg est très utile pour pouvoir étudier la structure d'un réseau cristallin. En effet, elle permet de trouver les différents plans du réseau à partir desquels on peut facilement reconstituer le réseau dans son ensemble. Pour ce faire il nous faut utiliser une source d'ondes électromagnétiques avec une longueur d'onde plus petite que 2 fois la distance entre les plans, ensuite en étudiant les pics d'interférence positive on peut déterminer la distance entre 2 plan parallèle, puis s'en servir pour trouver le paramètre de la maille du réseau.

1. A) But de la manipulation

Cette expérience en trois parties a pour but: 1) de comprendre le fonctionnement de l'équipement et du type d'onde utilisé, 2) d'étudier le comportement des ondes réfléchies et 3) d'étudier la diffraction de Bragg. Nous avons trouvé que le relevé du cadran du récepteur était proportionnel aux champs électriques de l'onde, que l'onde était polarisée et quelle n'était ni une onde plane ni une onde sphérique, car elle n'avait pas les propriétés d'aucune des 2, l'onde que nous observions ressemblait plus à un mélange entre les deux. Ensuite, nous avons trouvé que l'angle auquel on trouvait l'intensité maximale après une réflexion était égal à l'angle incident dans les limites de l'incertitude, sauf s'il y avait interférence avec l'onde non-réfléchi, dans notre cas nous avons eu une interférence à un angle d'incidence de $90 \pm 1^\circ$ car notre angle réfléchi était de $75 \pm 1^\circ$. Finalement, nous avons trouvé que la diffraction de Bragg permettait de calculer l'écart en différent plan de

diffraction et donc le paramètre de maille d'un réseau, qui s'avère être dans notre cas la distance entre les billes, en effet la distance théorique entre les billes est de $3,76 \pm 0,01$ cm et la distance expérimentale est de $3,95 \pm 0,11$ cm ce qui nous donne 4,81% d'écart entre les deux, mais qui n'est pas dans les limites de l'incertitude. Ce faible pourcentage d'écart est le résultat d'une sélection des pics de diffraction et nous verront dans l'analyse pourquoi nous avons dû le faire et de quelle façon cela va diminuer la pertinence de nos résultats.

B) schéma du montage

Matériel :

- Émetteur d'onde radio
- Récepteur d'onde radio
- Pied à coulisse
- Plaque de métal (réflecteur)
- Goniomètre
- Support de composant rotatif
- Table rotative
- Réseau cubique

Schémas de la partie 1 :

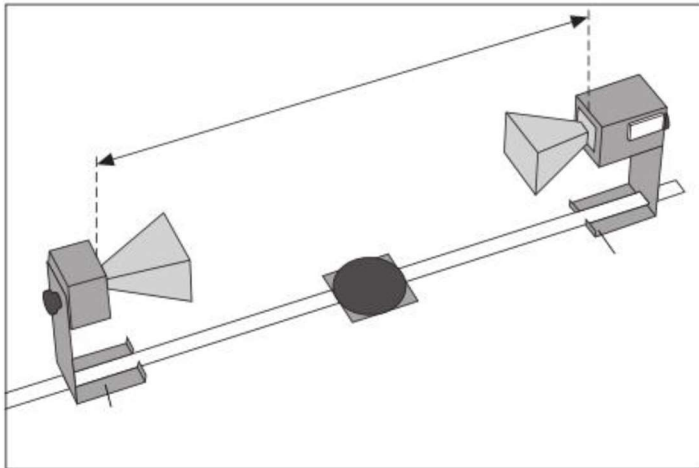


Figure 1.1 Configuration de l'équipement

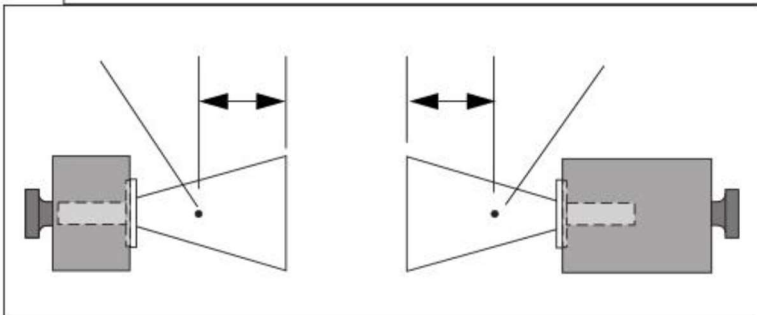
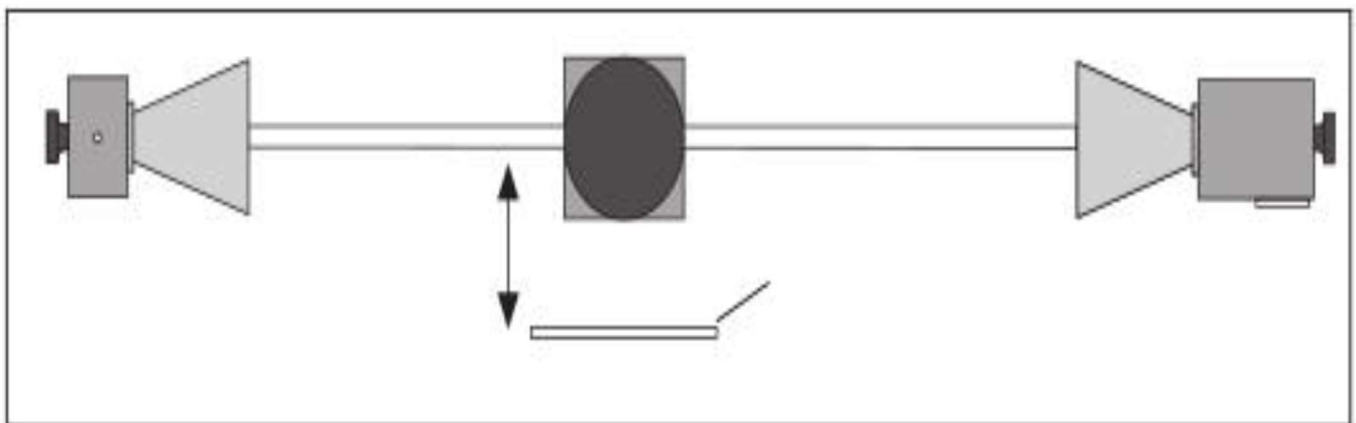


Figure 1.2 Configuration de l'équipement

Figure 1.3 Réflexions



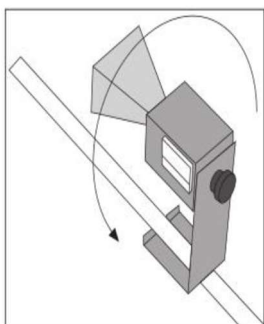


Figure 1.4 Polarisation

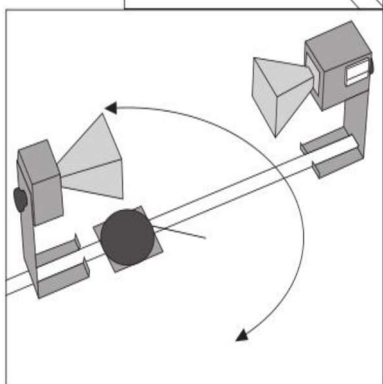


Figure 1.5 Distribution du signal

Schémas de la partie 2 :

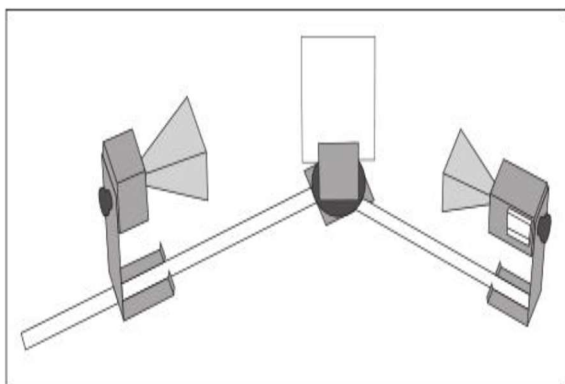


Figure 2.1 configuration de l'équipement

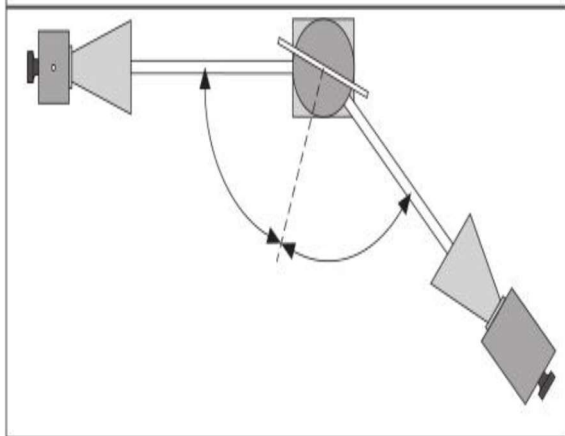


Figure 2.2 Angles d'incidence de réflexion

Schémas de la partie 3 :

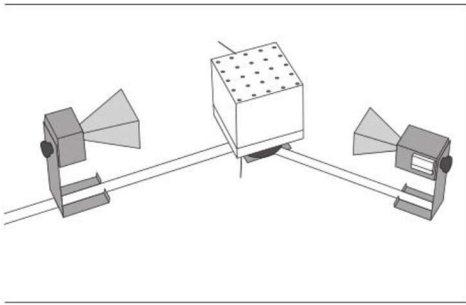


Figure 3.1 Configuration de l'équipement

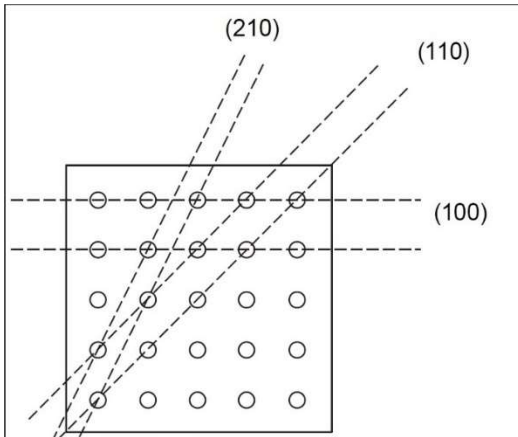


Figure 3.2 Plans "atomiques" du cristal Bragg

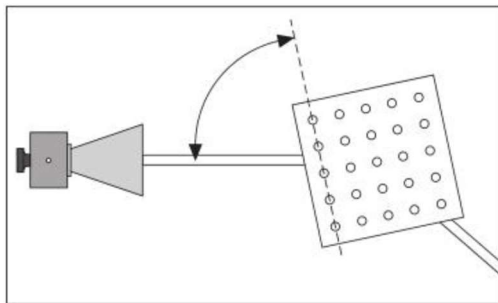


Figure 3.3 Angle rasant

C) Méthode utilisé

Lorsqu'un assemblage périodique de diffuseurs (les atomes du cristal) est irradié avec des ondes électromagnétiques appropriées (rayons-X), le patron d'interférence obtenu est caractéristique de

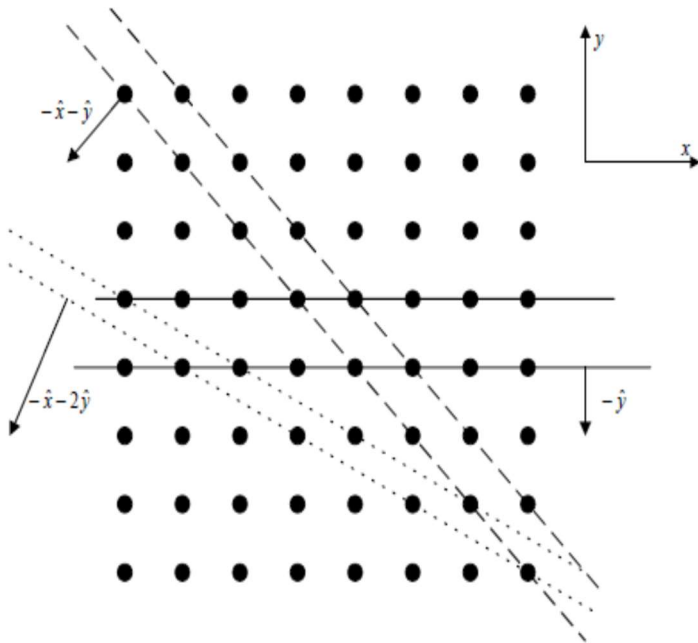


Figure 2. Quelques plans du réseau carré; les plans en trait plein sont des plans $(0\bar{1})$, les plans en trait hachuré sont de la famille $(\bar{1}\bar{1})$ tandis que ceux en pointillé ont les indices $(\bar{1}\bar{2})$. On peut remarquer que plus les indices de Miller des plans sont élevés, plus la distance entre les plans diminue.

la structure irradiée. Bragg a proposé une explication simple de ce patron d'interférence (voir la figure 1).

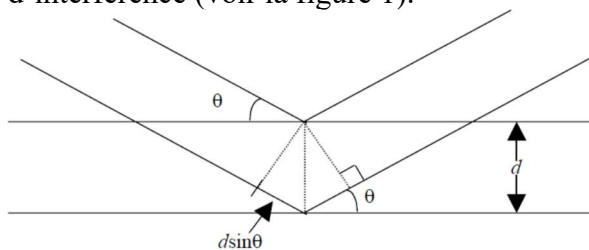


Figure 1. Dérivation de l'équation de Bragg.

i) Nous considérons une série de plans parallèles situés à une distance d l'un de l'autre.

ii) Une onde de longueur d'onde λ est incidente à un angle θ où θ est mesuré à partir du plan du cristal.

iii) La différence de chemin optique pour des rayons réfléchis par deux plans adjacents (séparés par une distance d) est $2d \sin \theta$.

iv) Il y a une interférence constructive si la différence de chemin optique est égale à n c'est à dire un nombre entier de longueur d'onde. Nous obtenons alors la formule de Bragg

$$2d \sin(\theta) = n\lambda \quad (1)$$

Cette formule nous dit donc dans quelle direction nous pouvons trouver des interférences constructives.

La loi de Bragg est une conséquence de la périodicité du réseau. Il est important de remarquer qu'il faut nécessairement avoir $\lambda \leq 2d$; c'est ce qui détermine le type de radiation électromagnétique utilisé. Dans notre cas, $n=1$. Dans un cristal, on peut définir une multitude de familles de plan parallèles, chacune de ces familles pouvant donner un maximum d'interférence (voir la figure 2).

Chacune de ces familles de plan est identifiée avec ses indices de Miller; il s'agit des plus petits entiers (kl) tels que la normale à un plan de la famille soit donnée par $kx + ly$ où x et y sont de vecteurs unitaires dans les directions x et y respectivement. Puisque nous pouvons définir deux normales pour un plan en particulier, nous choisirons arbitrairement de poser que la normale d'un plan parallèle à l'axe des x pointera vers le bas. Les normales pour les autres plans correspondent à cette normale ayant subi une rotation du même angle ($< 90^\circ$) que la rotation que ces plans ont effectué par rapport à l'axe des x . En utilisant cette convention, les indices de Miller des plans parallèles à l'axe des x sont $(0-1)$ tandis que les plans qui sont à 45° par rapport à l'axe

des x et à l'axe des $-y$ sont des plans $(-1-1)$. On représente aussi les valeurs négatives dans les indices de Miller avec une barre au-dessus de l'indice.

Puisqu'en général λ et d sont fixes, il nous faut varier θ si nous voulons trouver une configuration qui satisfasse la condition de Bragg. Pour ce faire, nous pouvons garder le cristal fixe tout en ayant la source qui effectue une rotation autour de celui-ci et le détecteur qui fait également un angle θ par rapport à l'échantillon. Le diffractomètre que nous utilisons a plutôt la configuration dites Bragg-Brentano (aussi appelée θ - 2θ) dans laquelle la source est fixe, l'échantillon tourne d'un angle θ et le détecteur tourne d'un angle 2θ . C'est la configuration de la majorité des diffractomètres.

Maille élémentaire

Un solide cristallin est constitué par la répétition périodique dans les 3 dimensions de l'espace d'un motif atomique (ou moléculaire) qui est appelé *maille*. La périodicité de la structure d'un cristal est donc représentée par un ensemble de points régulièrement disposés. Cet ensemble est appelé *réseau cristallin* et les points le constituant sont appelés *nœuds* du réseau. La maille élémentaire est la maille de volume minimal qui contient un seul nœud du réseau. La répétition périodique de cette maille dans les trois dimensions de l'espace suffit à reproduire l'intégralité du réseau et de la structure.

La maille est définie par les trois vecteurs \mathbf{a} , \mathbf{b} et \mathbf{c} , linéairement indépendants. Le choix de ces trois vecteurs n'est pas unique, on peut donc définir plusieurs mailles élémentaires qui pourront plus ou moins bien montrer la symétrie du réseau. On utilise généralement les paramètres de maille : les longueurs des vecteurs, a , b et c , et les angles formés entre eux, α , β et γ . Les distances interplanaires sont notées avec les

indices de Miller $dhkl$. Elles se calculent à partir des vecteurs et angles de la maille élémentaires ainsi que les indices de Miller. Pour une maille cubique on a : $a = b = c$ et $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. La distance inter-planaire s'exprime alors pour une maille cubique :

$$d_{hk}^2 = \frac{a^2}{(h^2 + k^2 + l^2)} \quad (2)$$

On voit que, à l'inverse si on connaît la valeur numérique $dhkl$ et les indices de Miller on peut calculer le paramètre de maille a .

Lorsque la condition de Bragg est respectée il y a interférence constructive et on observe un pic sur la courbe de l'intensité mesurée par le détecteur en fonction de l'angle θ (patron de diffraction). Comme la source est monochromatique, la mesure de l'angle θ nous donne la distance inter-planaire pour cette famille de plan. Pour chaque pic de Bragg on connaît donc la valeur numérique de $dhkl$. Cependant, pour utiliser l'équation (2) et déterminer le paramètre de maille nous devons savoir les valeurs des hkl correspondants à chaque pic. Pour les déterminer on se sert du fait que les indices de Miller ne peuvent prendre que des valeurs entières. Donc, le rapport entre deux $dhkl$ sera un rapport de deux entiers. Par essais et erreurs on trouve facilement les indices de miller pour un cristal cubique. Il suffit de se rappeler que selon l'équation (2) la valeur maximale de $dhkl$ est a , donc il est très important de s'assurer que vous mesurer le pic de Bragg qui a l'angle le plus faible (plus grande valeur de $dhkl$). Pour les matériaux de ce laboratoire ce pic est à un angle de plus de 20° donc, vous devez mesurer à partir de 20° . Pas nécessaire de mesurer les angles plus faibles, il n'y a rien dans cette région. Ce premier pic de Bragg a les indices de Miller les plus faibles. Vous devez donc

essayer des valeurs telles que 001 ou 011 ou 111. Après avoir assigné des indices de Miller à ce pic, faites le rapport des $dhkl^2$ avec les autres pics et voyez si vous avez des valeurs qui donnent des entiers pour les indices de Miller des autres pics. Si ce n'est pas le cas alors assignez d'autres indices de Miller au pic initial et recommencer la procédure. Une fois les indices de Miller déterminées vous pouvez calculer le paramètre de maille a .

La loi de Bragg fournit un outil puissant pour étudier la structure cristalline en établissant un lien entre les espacements inter-planaires dans le cristal et les angles de diffusion des rayons X incidents. Dans cette expérience, la loi de Bragg est démontrée à l'échelle macroscopique à l'aide d'un « cristal » cubique constitué de sphères métalliques de 10 mm incrustées dans un cube en éthafoam. Le rayonnement sera cependant du type hyperfréquence.

Avant de réaliser cette expérience, vous devez comprendre la théorie derrière la diffraction de Bragg. En particulier, vous devez comprendre les deux critères à respecter pour qu'une vague soit diffractée d'un cristal dans un angle particulier. À savoir, il y a un plan d'atomes dans le cristal orienté par rapport à l'onde incidente, tel que:

1. L'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion, et

2. L'équation de Bragg, $2d\sin\theta = n\lambda$, est satisfaite; où d est l'espacement entre les plans de diffraction, θ est l'angle rasant de l'onde incidente, n est un entier, et λ est la longueur d'onde du rayonnement.

Donc la partie 1 du laboratoire servira à introduire le système micro-onde qui sera utilisé. La partie 2 étudiera le phénomène de réflexion et la troisième partie sera consacrée à Bragg.

2. Déroulement des manipulations

Procédure partie 1

1. Pour débiter il faut précisément placer l'émetteur et le récepteur sur le moniteur comme le montre la figure 1.1, l'émetteur étant fixé au bras fixe. Assurez-vous de régler l'émetteur et le récepteur sur la même polarité - les cornets doivent avoir la même orientation, comme indiquée.

2. Branchez l'émetteur et le récepteur. Tournez le sélecteur INTENSITY sur le récepteur pour passer de OFF à 10X (ou 30X au besoin). (Les DEL doivent s'allumer sur les deux unités).

3. Réglez l'émetteur et le récepteur de sorte que la distance entre la diode source dans l'émetteur et la diode de détection dans le récepteur (la distance marquée **R** sur la figure 1.1) soit de 40 cm (voir figure 1.2 pour la localisation des points d'émission et de réception). Les diodes se trouvent aux emplacements situés juste au-dessus des points marqués «T» et «R» sur les stands.

Ajustez les boutons INTENSITY et VARIABLE SENSIBILITY sur le récepteur pour que le cadran lise 1.0 (pleine échelle)

4. Ajustez la distance **R** à chacune des valeurs indiquées dans le tableau 1.

Enregistrez la lecture de l'appareil de mesure pour chaque valeur de **R**. (N'ajustez pas les contrôles du récepteur entre les mesures.)

Après avoir effectué les mesures, effectuez les calculs indiqués dans le tableau.

5. Réglez **R** sur une valeur comprise entre 70 et 90 cm. Tout en regardant le cadran, diminuez lentement la distance entre le transmetteur et le récepteur. L'aiguille au cadran augmente-t-elle régulièrement à mesure que la distance diminue?

6. Réglez **R** entre 50 et 90 cm. Déplacez un réflecteur, son plan parallèle à l'axe du faisceau micro-ondes, vers et à l'opposé de

L'axe du faisceau, comme indiqué à la figure 1.3. (Mettre à 10X au besoin). Observez les lectures de l'appareil. Pouvez-vous expliquer vos observations aux étapes 5 et 6 ? (Ne vous inquiétez pas si vous ne pouvez pas, vous aurez la possibilité d'investiguer de près ces phénomènes lors de d'autres expériences.) Pour l'instant, tenez compte des points suivants: Les réflexions d'objets proches, y compris du dessus de table, peuvent affecter les résultats de vos expériences en micro-ondes. Pour réduire les effets des réflexions parasites, veillez à ce que votre table d'expérimentation ne contienne aucun objet, en particulier des objets en métal, autres que les composants requis pour l'expérience en cours.

7. Desserrez la vis à la main située à l'arrière du récepteur et faites-le pivoter comme indiqué à la figure 1.4. Cela fait varier la polarité de la détection maximale. (Regardez dans le récepteur et remarquez l'alignement de la diode du détecteur.)

Observez les lectures du cadran en effectuant une rotation complète du pavillon.

Un petit miroir peut être utile pour visualiser la lecture du cadran lorsque le récepteur est allumé. A quelle polarité le récepteur ne détecte aucun signal ?

NOTE : Essayez également de faire tourner le cornet de l'émetteur. Une fois l'opération terminée, réinitialisez l'émetteur et le récepteur afin que leurs polarités correspondent (par exemple, les deux cornets sont à l'horizontale ou les deux sont à la verticale).

8. Positionnez l'émetteur de manière à centrer la surface de sortie du cornet directement sur le centre de la plaque de degré du bras du goniomètre (voir Figure 1.5). Le récepteur étant face à l'émetteur et le plus en arrière possible sur le bras du goniomètre, réglez les commandes du récepteur sur 1,0. Ensuite, tournez le bras

rotatif du goniomètre comme indiqué sur la figure. Définissez l'angle de rotation (mesuré par rapport au point à 180 degrés de l'échelle en degrés) pour chacune des valeurs indiquées dans le tableau 1,2 et enregistrer la lecture du cadran à chaque réglage.

Procédure partie 2

1. Disposez l'équipement comme indiqué à la figure 2.1 avec le transmetteur fixé au bras fixe du goniomètre. Assurez-vous de régler l'émetteur et le récepteur sur la même polarité. Les cornets doivent avoir la même orientation que celle indiquée.

2. Branchez le transmetteur et mettez le bouton de sélection INTENSITY du récepteur à 30X.

3. L'angle entre l'onde incidente de l'émetteur et une ligne perpendiculaire au plan du réflecteur est appelé l'angle d'incidence (voir la figure 2.2). Ajustez le support de composant rotatif de sorte que l'angle d'incidence soit égal à 45°.

4. Sans déplacer ni l'émetteur ni le réflecteur, faites pivoter le bras mobile du goniomètre jusqu'à ce que la lecture soit au maximum. L'angle entre l'axe du cornet du récepteur et une ligne normale au plan du réflecteur est appelé l'angle de réflexion.

5. Mesurez et enregistrez l'angle de réflexion pour chacun des angles d'incidence présentés à la Table 2.1.

Procédure partie 3

1. Disposez l'équipement comme indiqué à la figure 12.1.

2. Notez les trois familles de plans indiquées dans la figure 12.2. (Les désignations (100), (110) et (210) sont les indications de Miller pour ces ensembles de plans.) Réglez l'émetteur et le récepteur afin qu'ils soient

face à face. Alignez le cristal de sorte que les plans (100) soient parallèles au faisceau hyperfréquence incident. Ajustez les commandes du récepteur pour fournir un signal lisible. Enregistrez la lecture du cadran.

3. Faites pivoter le cristal (avec la table rotative) d'un degré dans le sens des aiguilles d'une montre et le bras du goniomètre rotatif de deux degrés dans le sens des aiguilles d'une montre. Notez l'angle rasant du faisceau incident et le relevé du cadran. (L'angle rasant est le complément de l'angle d'incidence. Il est mesuré par rapport au plan examiné, PAS à la face du cube; voir la figure 12.3.)

4. Continuez de cette manière en tournant le bras du goniomètre de deux degrés pour chaque rotation d'un degré du cristal. Notez l'angle et la lecture du cadran à chaque position. (Si vous devez régler le paramètre INTENSITY sur le récepteur, veillez à l'indiquer dans vos données.)

5. Représentez graphiquement l'intensité relative du signal diffracté en fonction de l'angle rasant du faisceau incident. À quels angles se produisent des pics définis pour l'intensité diffractée?

6. Utilisez vos données, la longueur d'onde connue du rayonnement micro-ondes (2,85 cm) et la loi de Bragg pour déterminer l'espacement entre les plans (100) du cristal de Bragg. Mesurez l'espacement entre les plans directement et comparez-le avec votre détermination expérimentale.

7. Recommencez l'expérience pour les familles de plans (110) et (210).

3. Résultats

Résultat partie 1

Tableau 1.1 donnée de m en fonction de R

R (cm) $\pm 0,5$	Lecture mesure (M) $\pm 0,01$	M X R (cm) $\pm 0,6$	M X R ² (cm ²) ± 32
40,0	1,00	40,0	1600
50,0	0,84	42,0	2100
60,0	0,70	42,0	2520
70,0	0,58	40,6	2842
80,0	0,47	37,6	3008
90,0	0,44	39,6	3564
100,0	0,40	40,0	4000

L'intensité de l'appareil était sur 30X

$M \times R$ moyen : $40,3 \pm 0,6$ cm

Graphique 1.1 intensité en fonction de la distance

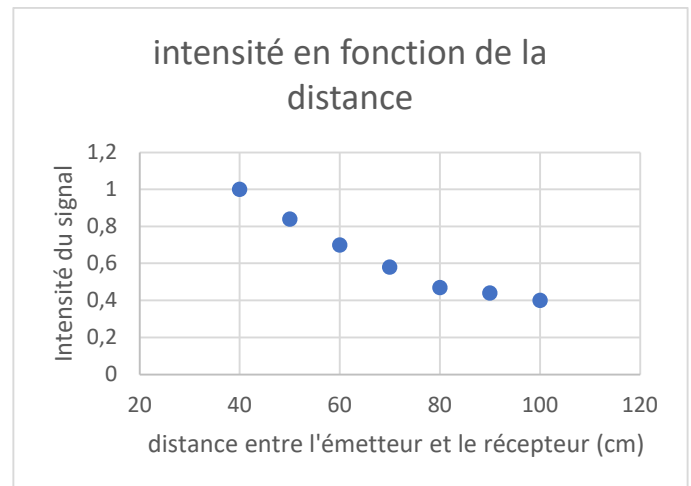
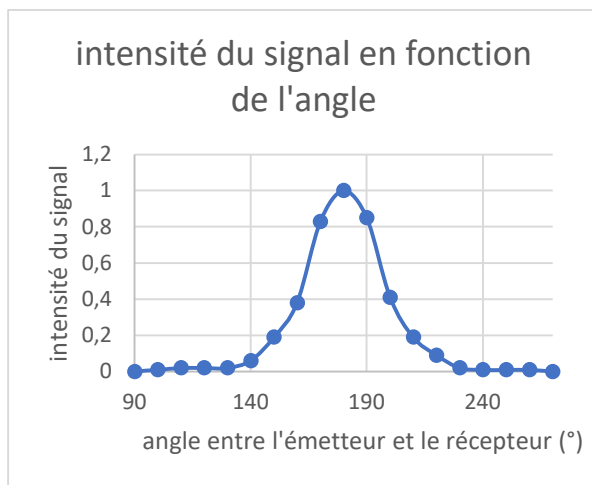


Tableau 1.2 donnée de m en fonction de l'Angle du récepteur

Angle du récepteur (°)	Lecture du cadran (Intensité du signal)
± 1	$\pm 0,01$
90	0,00
100	0,01
110	0,02
120	0,02
130	0,02
140	0,06
150	0,19
160	0,38
170	0,83
180	1,0
190	0,85
200	0,41
210	0,19
220	0,09
230	0,02
240	0,01
250	0,01
260	0,01
270	0,00

L'intensité de l'appareil était sur 30X

Graphique 1.2 : intensité du signal en fonction de l'angle



Exemple calcul partie 1

Calcul de $M \times R$:

$$M \times R = 1,00 \times 40$$

$$M \times R = 40 \text{ cm}$$

Calcul de l'incertitude de $M \times R$:

$$\frac{\delta(M \times R)}{M \times R} = \sqrt{\left(\frac{\delta M}{M}\right)^2 + \left(\frac{\delta R}{R}\right)^2}$$

$$\delta M \times R = 40,0 \sqrt{\left(\frac{0,01}{1}\right)^2 + \left(\frac{0,5}{40}\right)^2}$$

$$\delta M \times R = 0,6 \text{ cm}$$

Calcul de $M \times R^2$:

$$M \times R^2 = 1,00 \times 40^2$$

$$M \times R^2 = 1600 \text{ cm}^2$$

Calcul de l'incertitude de $M \times R^2$:

$$\frac{\delta(M \times R^2)}{M \times R^2} = \sqrt{\left(\frac{\delta M}{M}\right)^2 + 2\left(\frac{\delta R}{R}\right)^2}$$

$$\delta M \times R = 1600,0 \sqrt{\left(\frac{0,01}{1}\right)^2 + 2\left(\frac{0,5}{40}\right)^2}$$

$$\delta M \times R = 32 \text{ cm}^2$$

Calcul $M \times R$ moyenne :

$$M \times R_{\text{moy}} = \frac{\sum_{i=1}^j d_i}{j}$$

$$\begin{aligned} & M \times R_{\text{moy}} \\ &= \frac{40 + 42 + 42 + 40,6 + 37,6 + 39,6 + 40}{7} \end{aligned}$$

$$M \times R_{\text{moy}} = 40,3 \text{ cm}$$

Calcul de l'incertitude de $M \times R$ moyenne :

$$\delta M \times R_{\text{moy}} = 0,6 \text{ cm}$$

Car l'incertitude de la moyenne est égale à la moyenne des incertitudes.

Résultat partie 2

Tableau 2.1 Angle de réflexion par rapport à l'angle de d'incidence

Angle d'incidence (°) ± 1	Angle de réflexion (°) ± 1
20	20
30	32
40	40
50	48
60	58
70	70
80	80
90	75*

La donnée avec un * est une erreur causée par le fait que le récepteur détecte à la fois le signal réfléchi et le signal directement émis.

Résultat partie 3

Tableau 3.1 : Mesure de l'intensité du signal pour le plan 100

Angle rasant (°) $\pm 0,5$	Angle (°) ± 1	Mesure cadran (mA) $\pm 0,01$
0,0	180	0,53
1,0	182	0,52
2,0	184	0,51
3,0	186	0,48
4,0	188	0,42
5,0	190	0,37
6,0	192	0,32
7,0	194	0,36
8,0	196	0,40
9,0	198	0,40
9,5	199	0,39
10,0	200	0,30
10,5	201	0,24
11,0	202	0,18

11,5	203	0,10
12,0	204	0,11
12,5	205	0,15
13,0	206	0,21
13,5	207	0,25
14,0	208	0,32
14,5	209	0,36
15,0	210	0,28
15,5	211	0,25
16,0	212	0,14
16,5	213	0,15
17,0	214	0,16
17,5	215	0,18
18,0	216	0,32
18,5	217	0,35
19,0	218	0,44
19,5	219	0,46
20,0	220	0,41
20,5	221	0,40
21,0	222	0,26
21,5	223	0,24
22,0	224	0,21
22,5	225	0,26
23,0	226	0,40
23,5	227	0,40
24,0	228	0,49
24,5	229	0,52
25,0	230	0,52
25,5	231	0,52
26,0	232	0,49
27,0	234	0,44
28,0	236	0,30
29,0	238	0,24
30,0	240	0,20
31,0	242	0,18
32,0	244	0,17
33,0	246	0,13
34,0	248	0,08
35,0	250	0,05
36,0	252	0,03
37,0	254	0,02
38,0	256	0,01
39,0	258	0,02
40,0	260	0,05
41,0	262	0,06
42,0	264	0,08
43,0	266	0,09
44,0	268	0,09
45,0	270	0,06

L'intensité de l'appareil était sur 10X

Graphique 3.1 : Intensité du signal en fonction de l'angle rasant pour le plan 100

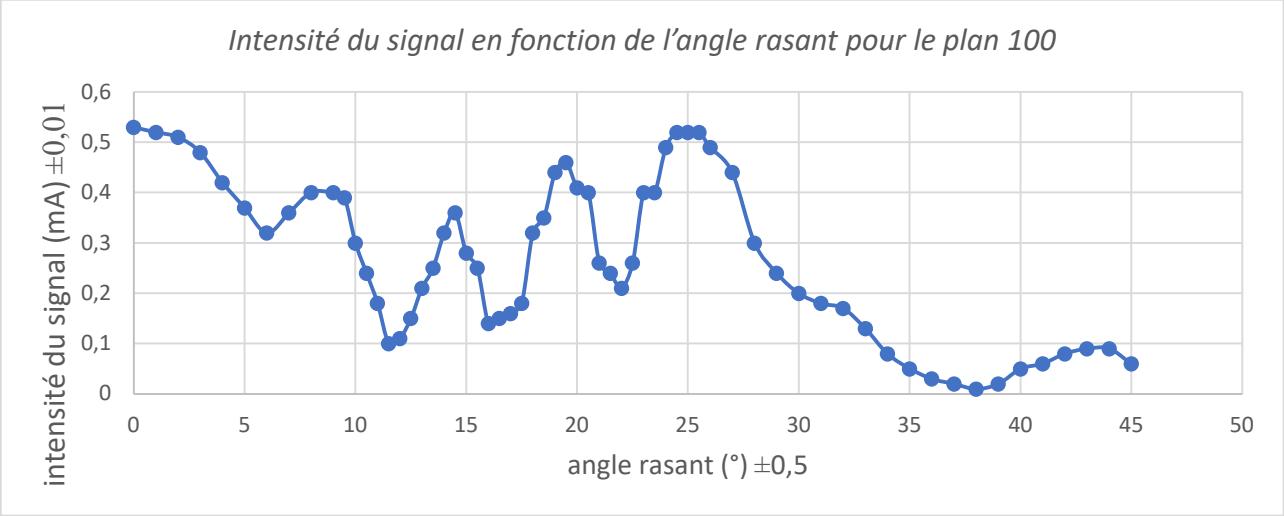


Tableau 3.2 : Mesure de l'intensité du signal pour le plan 110

Angle rasant (°) $\pm 0,5$	Angle (°) ± 1	Mesure cadran (mA) $\pm 0,01$
0,0	180	0,63
1,0	182	0,61
2,0	184	0,61
3,0	186	0,60
4,0	188	0,58
5,0	190	0,54
6,0	192	0,49
7,0	194	0,44
8,0	196	0,39
9,0	198	0,37
10,0	200	0,38
11,0	202	0,30
12,0	204	0,24
13,0	206	0,18
14,0	208	0,14
15,0	210	0,12
16,0	212	0,10
17,0	214	0,11
18,0	216	0,09
19,0	218	0,04
20,0	220	0,03
21,0	222	0,06
22,0	224	0,04
23,0	226	0,00
24,0	228	0,04
25,0	230	0,14
26,0	232	0,16
27,0	234	0,13
28,0	236	0,20
29,0	238	0,34
30,0	240	0,41
31,0	242	0,41

32,0	244	0,40
33,0	246	0,44
34,0	248	0,46
35,0	250	0,42
36,0	252	0,33
37,0	254	0,21
38,0	256	0,17
39,0	258	0,11
40,0	260	0,09
41,0	262	0,08
42,0	264	0,08
43,0	266	0,07
44,0	268	0,06
45,0	270	0,04

L'intensité de l'appareil était sur 10X

Graphique 3.2 : Intensité du signal en fonction de l'angle rasant pour le plan 110

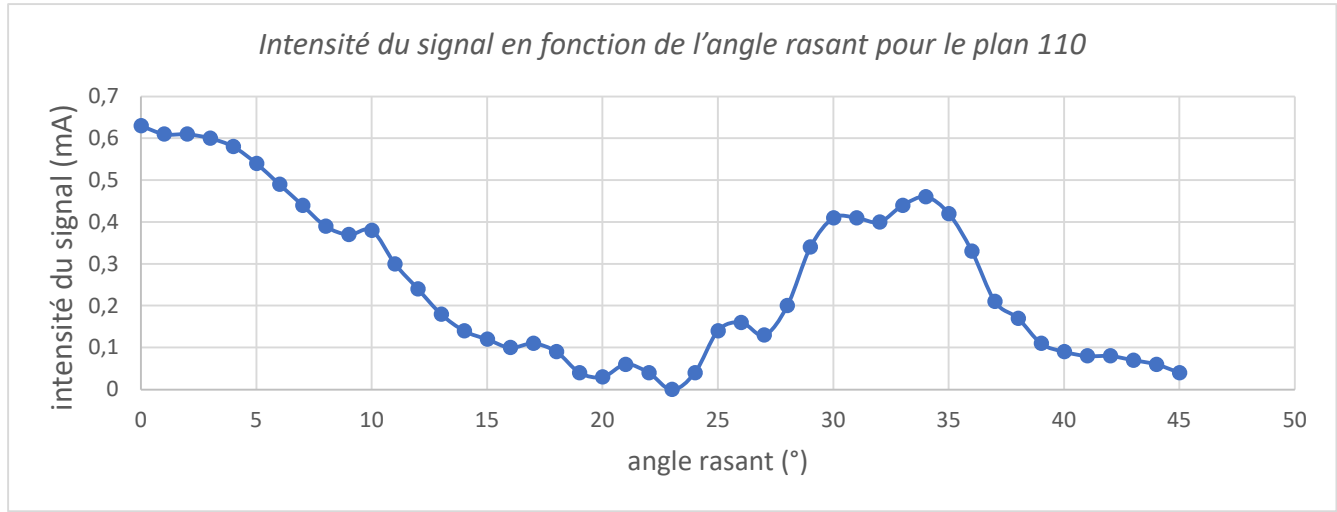


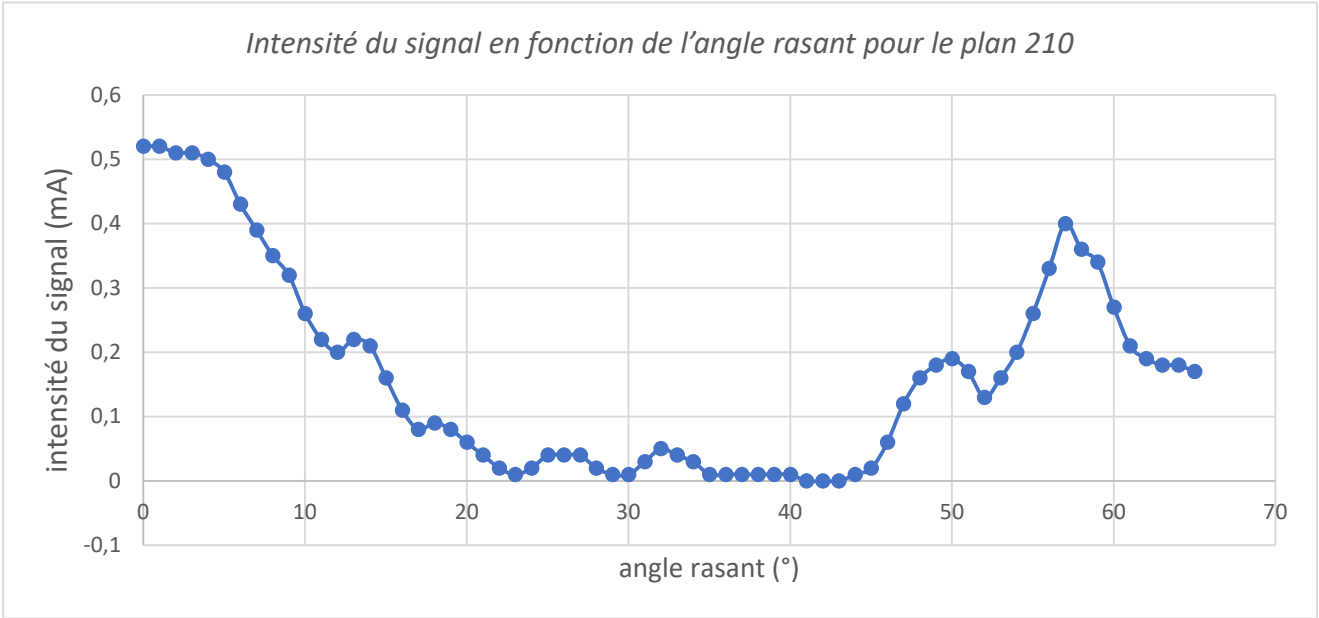
Tableau 3.3 : Mesure de l'intensité du signal pour le plan 210

Angle rasant (°) ±0,5	Angle (°) ±1	Mesure cadran (mA) ±0,01
0,0	180	0,52
1,0	182	0,52
2,0	184	0,51
3,0	186	0,51
4,0	188	0,5
5,0	190	0,48
6,0	192	0,43
7,0	194	0,39
8,0	196	0,35
9,0	198	0,32
10,0	200	0,26
11,0	202	0,22
12,0	204	0,20
13,0	206	0,22
14,0	208	0,21
15,0	210	0,16
16,0	212	0,11
17,0	214	0,08
18,0	216	0,09
19,0	218	0,08
20,0	220	0,06
21,0	222	0,04
22,0	224	0,02
23,0	226	0,01
24,0	228	0,02
25,0	230	0,04
26,0	232	0,04
27,0	234	0,04
28,0	236	0,02
29,0	238	0,01
30,0	240	0,01
31,0	242	0,03
32,0	244	0,05

33,0	246	0,04
34,0	248	0,03
35,0	250	0,01
36,0	252	0,01
37,0	254	0,01
38,0	256	0,01
39,0	258	0,01
40,0	260	0,01
41,0	262	0,00
42,0	264	0,00
43,0	266	0,00
44,0	268	0,01
45,0	270	0,02
46,0	272	0,06
47,0	274	0,12
48,0	276	0,16
49,0	278	0,18
50,0	280	0,19
51,0	282	0,17
52,0	284	0,13
53,0	286	0,16
54,0	288	0,20
55,0	290	0,26
56,0	292	0,33
57,0	294	0,40
58,0	296	0,36
59,0	298	0,34
60,0	300	0,27
61,0	302	0,21
62,0	304	0,19
63,0	306	0,18
64,0	308	0,18
65,0	310	0,17

L'intensité de l'appareil était sur 10X

Graphique 3.3 : Intensité du signal en fonction de l'angle rasant pour le plan 210



Tableaux 3.4 Angle des pics et distance inter-planaire calculé pour le plan 100

	Angle (°) ± 0,5	d (cm) ± 0,11
Pic #1	9,5	8,63
Pic #2	14,5	5,69
Pic #3	19,5	4,27
Pic #4	25,0	3,37
Pic #5	32,0	2,69
Pic #6	44,0	2,05

Les pics en gris sont à rejetés car ils sont probablement des pics venant d'interférence avec d'autre plans ou trop faible.

Tableaux 3.5 Angle des pics et distance inter-planaire calculé pour le plan 110

	Angle (°) ± 0,5	d (cm) ± 0,11
Pic #1	10,0	8,21
Pic #2	17,0	4,87
Pic #3	21,0	3,98
Pic #4	26,0	3,25
Pic #5	30,0	2,85
Pic #6	34,0	2,55

Les pics en gris sont à rejetés car ils sont probablement des pics venant d'interférence avec d'autre plans ou trop faible.

Tableaux 3.6 Angle des pics et distance inter-planaire calculé pour le plan 210

	Angle (°) ± 0,5	d (cm) ± 0,11
Pic #1	13,0	6,33
Pic #2	18,0	4,61
Pic #3	26,0	3,25
Pic #4	32,0	2,69
Pic #5	50,0	1,86
Pic #6	57,0	1,70

Les pics en gris sont à rejeter car ils sont probablement des pics venant d'interférence avec d'autres plans ou trop faible.

Tableaux 3.7 distance inter-planaire expérimentale moyenne

	Espacement (cm) ± 0,11
Plan 100	3,82
Plan 110	2,88
Plan 210	1,78

Tableau 3.8 donnée théorique

Espacement entre les billes	3,76 ± 0,01 cm
Longueur d'onde de la source	2,85 ± 0,01 cm

Tableau 3.9 distances entre les billes expérimentales

	Distance entre les billes (cm) ± 0,11
Plan 100	3,82
Plan 110	4,07
Plan 210	3,98
Moyenne	3,95

Exemple de calcul partie 3 :

Calcul de l'espacement d entre les plans :

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}$$

$$d = \frac{n \times 2,85 \text{ cm}}{2 \times \sin 99,5}$$

$$d = \frac{1 \times 2,85 \text{ cm}}{2 \times \sin 19,5}$$

$$d = 4,27 \text{ cm}$$

Calcul de l'incertitude de d :

$$\frac{\delta(d)}{d} = \sqrt{\left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)^2 + 2\left(\frac{\delta\sin\theta}{\sin\theta}\right)^2}$$

$$\delta d = 4,27 \sqrt{\left(\frac{0,01}{2,85}\right)^2 + 2\left(\frac{\sin 0,5}{\sin 19,5}\right)^2}$$

$$\delta d = 0,11 \text{ cm}$$

Calculs des distances entre les billes expérimentales:

a = espacement entre les billes

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

$$3,82^2 = \frac{a^2}{(1^2 + 0^2 + 0^2)}$$

$$a = 3,82 \text{ cm}$$

Calcul de l'incertitude de a expérimentale:

$$\frac{\delta(d_{hkl})}{d_{hkl}} = \frac{\delta a}{a}$$

$$\delta a = 3,82 \frac{0,20}{3,82}$$

$$\delta a = 0,20 \text{ cm}$$

Calcul de a expérimentale moyenne :

$$a_{\text{moy}} = \frac{\sum_{i=1}^j d_i}{j}$$

$$a_{\text{moy}} = \frac{4,27 + 3,37}{2}$$

$$a_{\text{moy}} = 3,82 \text{ cm}$$

Calcul de l'incertitude de d_{hkl} moyen expérimentale:

$$\delta a_{\text{moy}} = 0,11 \text{ cm}$$

Car l'incertitude de la moyenne est égale à la moyenne des incertitudes.

Calcul de la distance inter-planaire expérimentale moyenne :

$$d_{\text{moy}} = \frac{\sum_{i=1}^j d_i}{j}$$

$$d_{\text{moy}} = \frac{5,69 + 4,27 + 3,37}{3}$$

$$d_{\text{moy}} = 4,44 \text{ cm}$$

Calcul de l'incertitude de d_{hk} moyen expérimentale:

$$\delta d_{hkl} = 0,20 \text{ cm}$$

Car l'incertitude de la moyenne est égale à la moyenne des incertitudes.

Calcul du pourcentage d'écart

$$\% \text{ d'écart} = \frac{|d_{100 \text{ théorique}} - d_{100 \text{ exp}}|}{d_{100 \text{ théorique}}} \times 100$$

$$\% d_{100} = \frac{|3,76 - 3,95|}{3,76} \times 100$$

$$\% d_{100} = 5,05 \%$$

4. Analyse :

Dans la première partie de cette expérience nous devions étudier les comportements de l'onde émise par l'émetteur. Nous avons trouvé que l'onde émise n'était pas directement proportionnelle à l'intensité de l'onde, car elle ne variait pas en $1/R^2$, mais elle semblait proportionnelle au champ électrique car lorsqu'on prenait la mesure et qu'on la multipliait avec la distance on obtenait une constante de $40,3 \pm 0,6 \text{ cm}$ en moyenne, donc cela veut dire que les valeurs mesurées par le récepteur sont inversement proportionnelles à la distance. Malgré tout nous avons trouvé un guide sur notre expérience ^[1] disant qu'il n'y a pas de lien entre le champ électrique et la mesure du détecteur, mais nos données montrent clairement un facteur de $1/r$ entre la distance et l'intensité de nos mesure. Ensuite nous avons testé qualitativement si une rotation de l'émetteur provoquait un changement de l'intensité. Nous avons trouvé qu'à un angle de 90° l'intensité chutait à 0 nous en avons conclu que l'émetteur produisait une onde polarisée et que à une polarité de 90° et de 270° l'intensité était minimale et qu'à 0° et 180° l'intensité était maximale. Par après, nous avons fait varier l'angle du goniomètre pour comprendre les comportements de l'onde émise. Nous avons trouvé que l'intensité en fonction de l'angle variait selon une distribution gaussienne centré à 180° . D'après nos résultats nous pouvons dire que l'onde émise par le récepteur n'est ni sphérique ni plane mais à des caractéristiques des deux. En effet, l'onde ne

se propage pas dans toutes les directions comme une onde sphérique le ferait, mais ne vas pas seulement dans une direction comme une onde plane. Selon nous l'émetteur simule une onde plane au mieux de ce qui est possible dans un environnement ouvert et expérimental.

Dans la deuxième partie, nous avons testé les différentes propriétés de la réflexion des ondes. Nous avons trouvé que l'angle de réflexion était égal dans les limites de l'incertitude avec l'angle d'incidence, sauf dans le cas où les deux angles étaient de $90 \pm 1^\circ$. Dans ce cas particulier, nous soupçonnons que puisque l'onde n'était pas parfaitement plane l'onde réfléchi entraînait en interférence avec l'onde qui allait directement de l'émetteur au récepteur et c'est pour ça que nous avons trouvé le maximum d'intensité à l'angle $75 \pm 1^\circ$. Normalement, avec une vraie onde plane il n'y aurait pas dû y avoir de réflexion du tout puisque la surface réfléchissante était parallèle au chemin de l'onde. Nous avons aussi testé différents matériaux réfléchissant comme de l'éthafoam, du carton, du bois, du plastique et aucun deux ne parvenaient à faire réfléchir l'onde de façon significative, de plus ils laissaient tous passer une grande partie de l'onde au travers d'eux.

Dans la troisième partie, nous avons étudié la diffraction de Bragg. Pour trois plans différents (100, 110 et 210) nous avons fait varier l'angle rasant de façon à obtenir des pics d'intensité qui seraient dû à une interférence constructive entre deux rangés de ces plans. Il est à noter que pour le plan 100 nous avons dû reprendre des points plus proches (espacé de $0,5^\circ$ au lieu d'un 1°) les

uns des autres pour que les pics soient plus facilement identifiables. Nous avons trouvé pour chaque plan 6 pics d'intensité, mais plus de la moitié d'entre eux étaient trop faible pour être considérée où provenaient de l'interférence d'un autre plan. En effet pour le plan 100 seuls les pics #3 et #4 ont été gardés, pour le plan 110 les pics #4, #5 et #6 et pour le plan 210 les plans #5 #6. À partir de ces pics nous avons calculés une distance inter-planaire expérimentale moyenne de $3,82 \pm 0,11$ cm pour le plan 100, $2,88 \pm 0,11$ cm pour le plan 110 et $1,78 \pm 0,11$ cm pour le plan 210. Nous avons ensuite calculé la distance entre les billes expérimentales pour chaque plan. Elle était pour le plan 100 de $3,82 \pm 0,11$ cm, pour le plan 110 de $4,07 \pm 0,11$ cm et pour le plan 210 de $3,98 \pm 0,11$ cm ce qui fait une moyenne de $3,95 \pm 0,11$ cm. En comparaison la distance théorique entre les billes que nous avons mesurée est de $3,76 \pm 0,01$ cm donc il y a un écart de 1,59% avec la distance entre les billes calculées pour le plan 100, 8,24% avec la distance entre les billes calculées pour le plan 110, 5,85% avec la distance entre les billes calculées pour le plan 210 et 5,05% d'écart entre la moyenne des distances entre les billes et la valeur théorique, mais qui n'est pas dans l'incertitude. Cet écart est très faible ce qui semble signifier que nos résultats confirment la théorie, mais le nombre de pics que nous avons dû rejeter est trop élevé pour que nos résultats puissent être fiable. Bien entendu, nous pourrions rejeter moins de pics, mais lorsque l'incertitude sur l'espacement des plans a seulement une incertitude de 0,11 cm et que nos valeurs soient à plus de 1 cm d'écart ils nous semble illogique de considérer ses résultats comme valide. En effet on peut facilement rejeter des pics très faible comme le pic #2 du plan 210, car il pourrait

seulement être causé par l'incertitude du capteur, mais pour en arriver à nos résultats nous avons dû rejeter le pic #2 du plan 100, car il est à presque 2 cm de plus que la distance théorique et pourtant l'amplitude de ce pic n'est vraiment pas négligeable nous en avons donc conclu que ce pic, comme d'autre, devait être dû à l'interférence positive d'un autre plan. Cependant, selon le guide de notre expérience les pics avant environ 20° ne devraient pas être considérés, ce qui explique en partie nos résultats et pourquoi nous avons dû rejeter tant de pics. Aussi ils mentionnent qu'un pourcentage d'erreur de 10 à 15 % pour cette expérience est très acceptable donc nous aurions pu rejeter quelques pics de moins et resté dans cette marge. De plus, on peut remarquer que pour le plan 110 nous avons gardé 3 pics au lieu de 2 et nous voyons déjà une légère augmentation du pourcentage d'écart et l'effet serait s'accroîtuerait pour chaque pic supplémentaire. Si nous n'avions pas su à l'avance la configuration du réseau ils auraient fallu placer l'émetteur et le récepteur en ligne droite et faire tourner le réseau jusqu'à trouver le signal le plus fort, à ce moment nous aurions su que ce plan était le plan 100, car c'est celui qui a l'intensité la plus élevée. Ensuite nous aurions facilement pu calculer les autres plans à partir de celui-ci. Nous aurions certainement pu tester d'autres plan avec ce montage, mais on voit qu'avec les plans les plus simples (et donc ceux qui ont les pics les plus identifiables), il a été très complexe de savoir quels pics rejetés. Si nous voulions tester d'autres plans, nous pensons qu'un réseau plus grand faciliterait grandement la validité des résultats, car avec seulement 6 billes par côtés des plans plus complexe ne pourrait comporter que 2 ou 3 billes et cela rendrait les mesures très difficiles, parce que

l'interférence serait très faible. Aussi il faudrait penser à prendre une longueur d'onde plus petite, car il ne faut pas que la longueur d'onde soit plus petite que 2 fois la distance entre 2 plans.

5. Conclusion :

Cette expérience en trois parties avait pour but: 1) de comprendre le fonctionnement de l'équipement et du type d'onde utilisé, 2) d'étudier le comportement des ondes réfléchis et 3) d'étudier la diffraction de Bragg. Nous avons trouvé que le relevé du cadran du récepteur était proportionnel aux champs électriques de l'onde, que l'onde était polarisée et quelle n'était ni une onde plane ni une onde sphérique. Ensuite, nous avons trouvé que l'angle auquel on trouvait l'intensité maximale après une réflexion était égal à l'angle incident dans les limites de l'incertitude, sauf s'il y avait interférence avec l'onde non-réfléchi. Finalement, nous avons trouvé que la diffraction de Bragg permettait de trouver l'écart entre les billes, et donc le paramètre d'une maille, en effet la distance théorique entre les billes est de 3,76 cm et la distance expérimentales est de 3,95 cm ce qui nous donne 4,81% d'écart entre les deux, mais qui n'est pas dans les limites de l'incertitude. Ce faible pourcentage d'écart est le résultat d'une sélection des pics de diffraction et nous avons vu dans l'analyse pourquoi nous avons dû le faire et de quelle façon cela diminue la pertinence de nos résultats. Si nous avions à refaire ce laboratoire, il serait pertinent de trouver un goniomètre plus précis et avec un système pour modifier l'angle plus efficace (peut être comme un système à engrenage comme celui d'une horloge)

que d'y aller à la main, car nous avons remarqué que de très légère variation d'angle pouvait causer de grand changement d'intensité. De plus le support du cube était très peu stable, il était très facile de le bouger et il était impossible de savoir comment le replacer parfaitement.

6. Référence :

[1] Complete Microwave Optics System Experiment Guide [Microwave Optics Experiment Guide \(pasco.com\)](https://www.pasco.com/resources/experiments/microwave-optics-experiment-guide).

[2] protocole Bragg Disponible sur le portail de Cours