



Vérification des lois de Snell-Descartes – Incertitudes

TP φ 2 corr

Capacités exigibles

Vérifier une loi à l'aide de données expérimentales.

Identifier les sources d'erreurs lors d'une mesure.

Évaluer l'incertitude-type d'une mesure obtenue à l'issue de la mise en oeuvre d'un protocole présentant plusieurs sources d'erreurs indépendantes dans les cas simples d'une expression de la valeur mesurée sous la forme d'une somme, d'une différence, d'un produit ou d'un quotient ou bien à l'aide d'une formule fournie ou d'un logiciel.

I Objectif

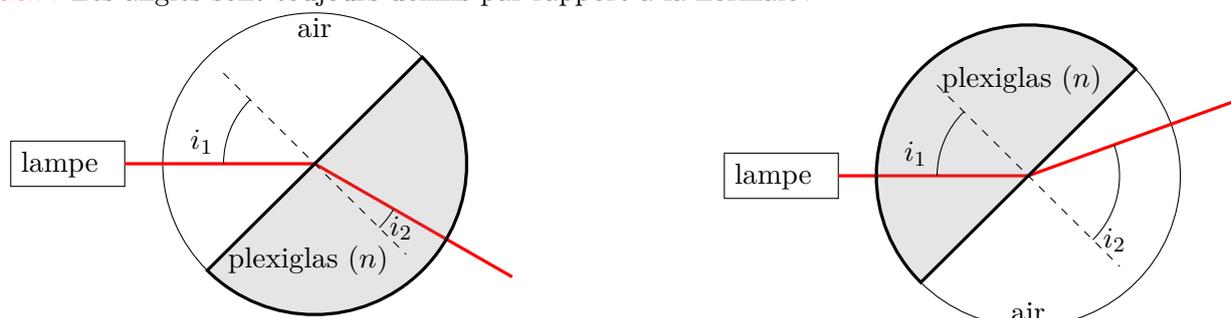
Le but de ce TP est de proposer un protocole, le plus abouti possible, de mesure de l'indice optique d'un matériau en prenant en compte les incertitudes. Il sera l'occasion de découvrir la notion de simulation par la méthode numérique de Monte-Carlo.

II Mesure de l'indice de réfraction d'un demi-disque de plexiglas

⚠ **Attention** : Avant d'allumer la lampe, on vérifie que la tension de l'alimentation est réglée sur 6 V pour ne pas griller la lampe.

On peut utiliser l'appareil dans deux configurations différentes : propagation d'un milieu moins réfringent vers un milieu plus réfringent (figure de gauche : Configuration 1) ou propagation d'un milieu moins réfringent vers un milieu plus réfringent (figure de droite : Configuration 2).

⚠ **Attention** : Les angles sont toujours définis par rapport à la normale !



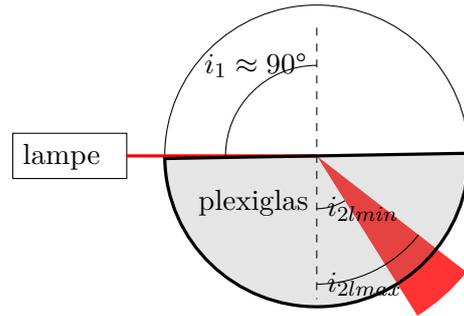
💡 Remarque

- On étalonne le matériel en actionnant les deux vis pour que le faisceau lumineux soit confondu avec la graduation 0° avant la traversée du plexiglas et après la traversée.
- On vérifie que le rayon réfracté se rapproche de la normale dans la configuration 1 alors qu'il s'éloigne dans la configuration 2.
- Dans la configuration 2, le rayon incident arrive sur le premier dioptre air/verre en incidence normale ce qui ne dévie pas le faisceau lumineux.
- Dans les deux configurations, on observe systématiquement un rayon réfléchi et un rayon réfracté sauf dans la configuration 2 lorsque i_1 est supérieur à un angle limite appelé $i_{1,\text{lim}}$.

A) Réfraction limite

Protocole expérimental :

- on fait tendre i_1 vers 90° .
- on estime $i_{2,\max}$ et $i_{2,\min}$ en prenant en compte les incertitudes.
- on obtient $i_{2,l} = \frac{i_{2,\max} + i_{2,\min}}{2}$
et $\Delta i_{2,l} = \frac{i_{2,\max} - i_{2,\min}}{2}$.

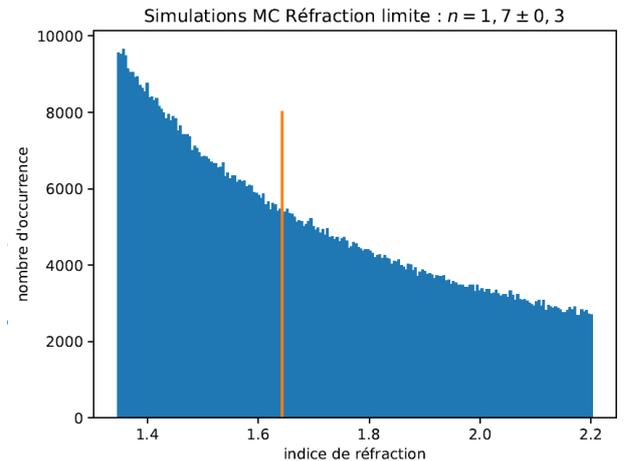


Observations expérimentales :

- Lorsque i_1 tend vers 90° , le rayon réfracté devient de moins en moins visible et le faisceau réfracté s'étale spatialement.
- Les valeurs de $i_{2,\min}$ et $i_{2,\max}$ sont obtenues en extrapolant le comportement du faisceau réfracté lorsque i_1 s'approche de 90° .
- Les incertitudes de mesures sont liées à la luminosité du faisceau réfracté, notamment à celle du rayon violet, et à l'étalement spatial de celui-ci.
- On obtient $i_{2,\max} = 48^\circ$, $i_{2,\min} = 27^\circ$ soit $i_{2,l} = 37,5$ et $\Delta i_{2,l} = 10,5^\circ$.

Résultats obtenus :

- Calcul direct : $n = \frac{1}{\sin i_{2,l}} = 1,64$ et $1,3 < n < 2,2$.
- Résultats issus de la simulation Monte-Carlo : $n = 1,69$ et $u(n) = 0,24$.
- Avec 1 chiffres significatif pour $u(n)$ tronqué par excès, on obtient : $n = 1,7 \pm 0,3$.



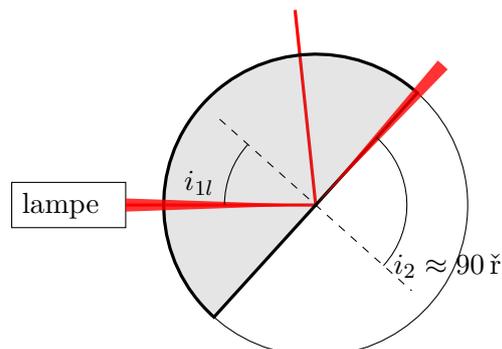
Commentaires :

- L'intervalle de valeurs obtenu $1,3 < n < 2,2$ est étendu mais est cohérent avec l'indice usuel du plexiglas (voisin de 1,5).
- La simulation Monte-Carlo nous permet de montrer que les indices obtenus dans la plage de valeur ne sont pas équiprobables, et les occurrences sont plus nombreuses pour les plus faibles valeurs d'indice, ce qui explique pourquoi la moyenne (1,68) n'est pas au centre de la plage des valeurs des indices.
- La dispersion des résultats au sein des différents groupes montre que cette mesure dépend beaucoup de l'expérimentateur et de l'évaluation des incertitudes.

Réflexion totale

Protocole expérimental :

- on augmente progressivement i_1 jusqu'à ce que i_2 vaille 90° .
- on estime $i_{1,\max}$ et $i_{1,\min}$ en prenant en compte les incertitudes.
- on obtient $i_{1,l} = \frac{i_{1,\max} + i_{1,\min}}{2}$
et $\Delta i_{1,l} = \frac{i_{1,\max} - i_{1,\min}}{2}$.

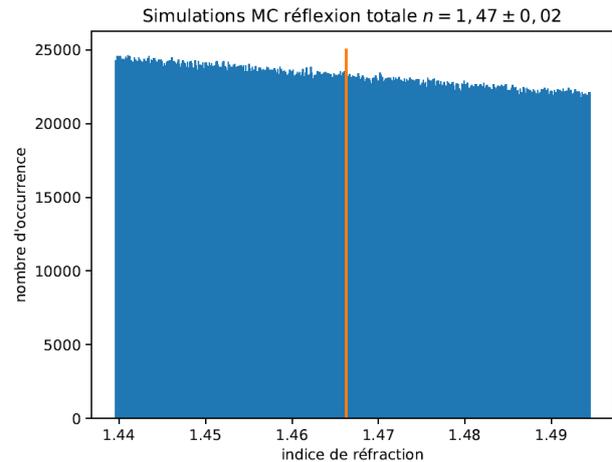


Observations expérimentales :

- Lorsque l'angle du rayon réfracté augmente on observe un phénomène dispersif (irisation du faisceau réfracté). Le plexiglas a un indice qui dépend de la longueur d'onde, si on note n_b et n_r l'indice du plexiglas pour le bleu et le rouge : $\sin i_1 = n_b \sin i_{2,b}$ et $\sin i_1 = n_r \sin i_{2,r}$. $i_{2,r}$ et $i_{2,b}$ sont ainsi différents et la différence augmente et s'observe lorsque l'angle i_1 augmente.
- Le phénomène dispersif implique qu'il faut choisir un i_2 moyen sur les différentes couleurs ce qui est une source d'incertitude.
- Une autre source d'incertitude est lié au capteur (oeil). Est ce que le rayon réfracté n'est plus présent ou est ce qu'il n'est plus détecté?
- L'incertitude de lecture (disque gradué en degré) et la largeur du faisceau incident (de l'ordre du demi-degré) sont également des sources d'incertitudes mais les incertitudes prépondérantes sont liées à la détection de l'absence du faisceau réfracté de couleur moyenne.
- On obtient $i_{1,\max} = 44^\circ$, $i_{1,\min} = 42^\circ$ soit $i_{1,1} = 43$ et $\Delta i_{1,1} = 1^\circ$.

Résultats obtenus :

- Calcul direct : $n = \frac{1}{\sin i_{1,1}} = 1,466$ et $1,439 < n < 1,494$.
- Résultats issus de la simulation Monte-Carlo : $n = 1,466$ et $u(n) = 0,015$.
- Avec 1 chiffres significatif pour $u(n)$ tronqué par excès, on obtient : $n = 1,47 \pm 0,02$.



Commentaires :

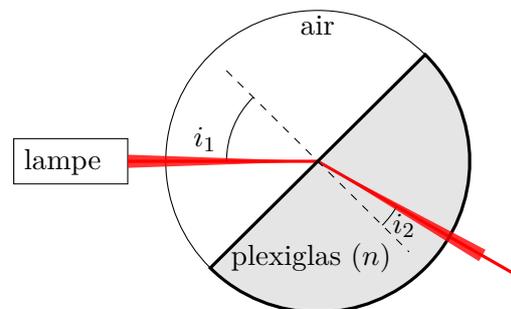
- La valeur obtenue de l'indice $1,44 < n < 1,50$ reste cohérente avec l'indice du plexiglas. L'intervalle est plus resserré que dans la manipulation précédente et les deux mesures sont cohérentes (écart normalisé : $Z - score = 0,9$).
- La répartition des indices dans la simulation Monte-Carlo n'est pas uniforme (les occurrences sont plus nombreuses pour les plus faibles valeurs d'indice).
- La dispersion des résultats au sein des différents groupes est bien moindre qu'à la première expérience montrant que ce protocole est moins manipulant-dépendant.

B) Mesure de l'indice du demi-disque de plexiglas à l'aide d'une série de mesures

Protocole expérimental :

- choix d'une configuration (ici configuration 1 mais les deux sont possibles).
- on choisit différentes valeurs d'angle d'incidence i_1 et on évalue la demi-étendue Δi_1 en prenant en compte les incertitudes.
- on mesure i_2 et on évalue la demi-étendue Δi_2 en prenant en compte les incertitudes.
- Par chaque observation, on obtient $n_{\text{exp}} = \frac{\sin i_1}{\sin i_2}$ et n et $u(n)$ à l'aide de la simulation Monte-Carlo.

Les résultats expérimentaux sont regroupés dans le tableau ci-dessous :



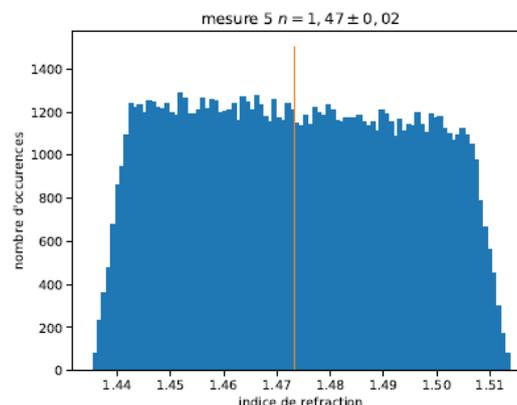
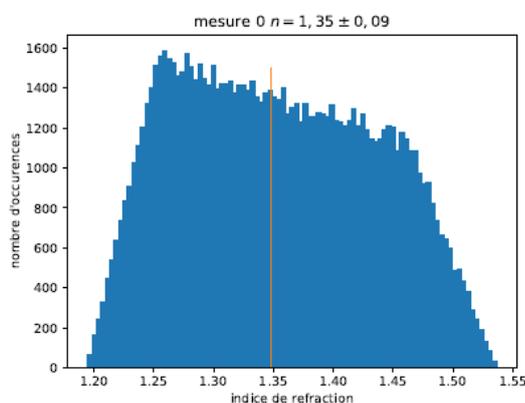
numéro de mesure	i_1 (°)	Δi_1 (°)	i_2 (°)	Δi_2 (°)
0	10	0,25	7	0,75
1	20	0,25	13,7	0,75
2	30	0,25	20,5	0,75
3	40	0,25	26	1
4	50	0,25	31	1
5	60	0,25	36	1
6	70	0,25	39,5	1,5
7	80	0,25	42	2
8	85	0,25	43,5	4,5

Observations expérimentales :

- La demi-étendue Δi_1 associée à la mesure de i_1 est liée à l'incertitude de lecture et à la largeur du faisceau (de l'ordre de 0.5°). Pour chaque observation, on a fait en sorte que la graduation soit au centre du faisceau, soit une demi-étendue constante égale à $\Delta i_1 = 0.25^\circ$.
- La demi-étendue Δi_2 associée à la mesure de i_2 évolue en fonction de l'angle d'incidence et l'incertitude est dominée par la largeur du faisceau réfracté (celui-ci s'élargit en raison du caractère dispersif du plexiglas).
- Pour la mesure 8, on retrouve une difficulté rencontrée lors de l'expérience de réfraction limite avec un faisceau réfracté très étendu.

Résultats obtenus : On peut commencer par observer quelques résultats de chacune des observations. Par exemple ci-dessous les observations 0 et 5.

On constate que ces deux observations ne donnent pas des incertitudes-type comparables alors que les demi-étendues associées à la caractérisation des incertitudes semblent proches. Après vérification, il n'y a pas d'erreurs expérimentales manifestes, et les résultats obtenus restent compatibles. Cet écart peut être expliqué par une incertitude relative plus grande pour la mesure 0 et par la fonction $\sin i$ qui a une pente plus élevée pour les faibles valeurs de i ($\Delta \sin i$ est plus important pour un même Δi lorsque i est faible).



Commentaires :

- Toutes les valeurs obtenues sont cohérentes entre elles. Des erreurs expérimentales (mauvaises lectures...) ont pu être détectées grâce aux représentations graphiques.
- Pour la mesure 8, on retrouve des résultats comparables aux résultats obtenus via la réfraction limite.
- En faisant la moyenne de toutes les simulations Monte-Carlo, on obtient $n = 1,4508 \pm 0,0002$.

Conclusion

Ce TP nous a permis d'évaluer de trois manières différentes l'indice de réfraction du plexiglas et d'introduire l'intérêt des simulations Monte-Carlo pour déterminer les incertitudes-type de mesure.