

« Un peu de réflexion, des vies sauvées »



Benjamin Masson
Jules Tillement

Elèves de Terminale S1 option SI
Lycée Rosa Parks
Neuville/Saône

1.	Résumé	3
2.	Remerciements.....	4
3.	Introduction.....	4
4.	Qu'est-ce que la rétro réflexion ?	4
5.	Les systèmes catoptriques.....	5
6.	Vérification de la taille des grains de la poudre rétro réfléchissante.	5
	a) <i>Expérience de la diffraction de la lumière laser. Théorème de Babinet.....</i>	5
	b) <i>Résultats.....</i>	6
7.	Simulation sous « Géogébra » du trajet de la lumière dans un grain homogène sphérique.....	7
	c) <i>Pourquoi utiliser un logiciel de simulation ?.....</i>	7
	a) <i>Les paramètres à fixer.....</i>	7
	b) <i>Premières observations.....</i>	7
	d) <i>Pour quels indices la rétro réflexion peut-elle avoir lieu ?.....</i>	8
	e) <i>Pour quel angle d'incidence la rétro réflexion a-t-elle lieu.....</i>	9
8.	Vérification expérimentale.....	11
9.	« Profil » de la lumière rétro réfléchi par les billes	12
	a) <i>Expériences.....</i>	12
	b) <i>Modélisation de la rétro réflexion.....</i>	13
10.	Quantité de lumière rétro réfléchi	18
11.	Pourquoi n'observe-t-on pas un phénomène de dispersion ?	18
12.	Conclusion.....	19

1. Résumé

Nous voulons comprendre comment une poudre rétro réfléchissante constituée de grains sphérique de taille $50\ \mu\text{m}$ réfléchit la lumière.

Une étude sous Géogebra permet de trouver les valeurs de l'angle d'incidence et de l'indice de réfraction du matériau qui donnent la meilleure rétro réflexion. Nous avons pu vérifier ces valeurs à l'aide de dispositifs simples tels qu'une boule remplie d'eau.

Nous avons également, grâce un modèle mathématique de la quantité de lumière rétro réfléchi fourni par notre référent scientifique, retrouver l'indice de réfraction du verre utilisé pour réaliser ces poudres.

2. Remerciements

Nous remercions Monsieur Olivier Tillement du laboratoire ILM de l'université Lyon1 qui nous a remis un flacon de poudre rétro réfléchissante et qui nous a accueillis dans son laboratoire pour que l'on présente nos expériences au public lors de la fête de la science, madame Dugourgeot proviseur du lycée Rosa Parks qui nous prête toute l'année une salle pour l'atelier scientifique et Monsieur Jouve notre professeur de physique qui nous a guidé pour réaliser ce projet. Nous remercions aussi le comité des Olympiades de Physique pour la subvention qu'il nous a accordé.

3. Introduction

Les poudres rétro réfléchissantes sont utilisées dans les costumes de pompier, gendarmes, agents de sécurité, les bandes de signalisation routières.

Monsieur Tillement utilise des poudre rétro réfléchissantes dans le cadre de ses recherches et nous en a prêté un flacon afin que l'on comprenne comment la lumière peut ainsi se réfléchir en bafouant apparemment les lois de l'optique.



Le flacon de poudre rétro réfléchissante pris avec un appareil photo muni d'un flash.

4. Qu'est-ce que la rétro réflexion ?

On dépose une très fine couche de poudre sur une surface et on la photographie avec un appareil photo, le flash étant activé, en se plaçant à 2 m environ.

Sur la photo, on constate que la surface apparaît très brillante, de même couleur que la lumière du flash. Si on incline la surface par rapport à l'axe de l'objectif de l'appareil photo, la surface présente toujours le même aspect. Il n'y a pas de phénomène de dispersion, la couleur de la lumière reste identique à celle de la source.



La poudre utilisée se comporte comme si elle renvoyait systématiquement la lumière dans la direction du faisceau incident

5. Les systèmes catoptriques

Un catadioptré est constitué par trois miroirs placés sur les trois côtés d'un angle d'un cube. Ce système existe depuis très longtemps et est très efficace.

Nous en avons fabriqué un avec trois miroirs. Certains dispositifs microscopiques rétro réfléchissants s'en inspirent.



Nous avons pu vérifier que la lumière réfléchié repart dans la même direction que le rayon incident.

6. Vérification de la taille des grains de la poudre rétro réfléchissante.

a) Expérience de la diffraction de la lumière laser. Théorème de Babinet.

Pour vérifier la dimension des grains de poudre, nous avons déposé très peu de poudre sur une lame de verre.

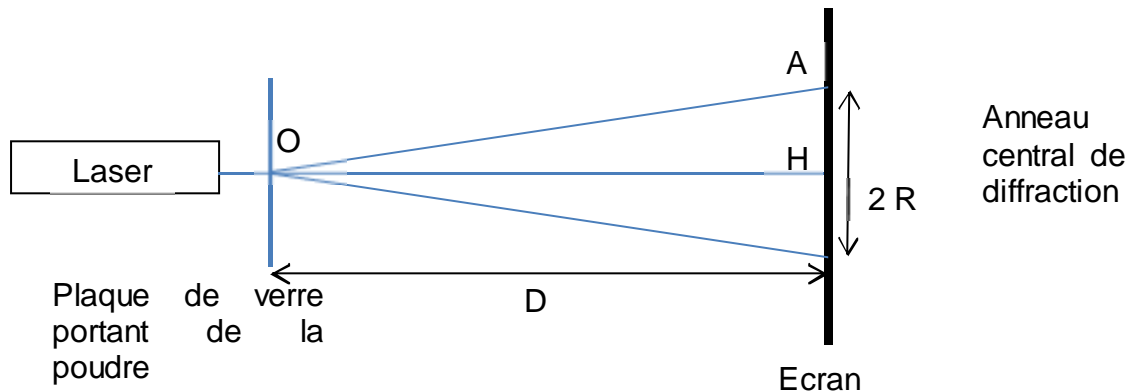
Nous avons ensuite illuminé cette plaque avec un faisceau laser et observé la figure de diffraction sur un écran situé à 5 m.

Nous obtenons une figure de diffraction constituée par des cercles concentriques.



La tâche centrale possède une demi largeur angulaire donnée par la relation $\theta = 1,22 \frac{\lambda}{a}$ qui est celle donnée par un seul obstacle sphérique de diamètre a , mais le théorème de Babinet montre que la figure de diffraction obtenue pour l'ensemble des grains est identique.

Pour obtenir θ , on utilise la trigonométrie dans le triangle AHO rectangle en H.



On obtient $\tan(\theta) = \frac{R}{D}$ où R est le rayon du premier anneau sombre et D la distance plaque de verre – écran.

En considérant que θ est petit, on peut écrire que $\tan(\theta) \approx \theta$.

Donc $\theta = 1,22 \frac{\lambda}{a} = \frac{R}{D}$ ce qui permet de trouver

$$a = 1,22 \lambda \frac{D}{R}$$

b) Résultats

$D = 5 \text{ m}$, $\lambda = 633 \text{ nm}$ et nous mesurons $R = 7,8 \text{ cm}$

$$\text{Donc } a = 1,22 \times 6,33 \times 10^{-7} \frac{5}{\times 0,78} = 49 \mu\text{m}$$

Le laboratoire qui a prêté ces poudres nous a fourni une photo de ces grains pris au microscope électronique à balayage. La taille indiquée est de $50 \mu\text{m}$.

Notre mesure est donc correcte.

7. Simulation sous « Géogebra » du trajet de la lumière dans un grain homogène sphérique

c) Pourquoi utiliser un logiciel de simulation ?

La taille des grains étant microscopique, les raisons expliquant la rétro réflexion de ces billes nous paraissant souvent peu convaincantes (par exemple la réflexion totale sur le fond des billes) et de plus, le nombre de valeurs pour chaque paramètre à prendre en compte étant important, nous avons pensé à simuler la propagation de la lumière en utilisant le logiciel Géogebra.

Dans ce logiciel nous pourrons étudier l'influence de l'indice de réfraction du matériau utilisé et l'angle d'incidence de la lumière.

a) Les paramètres à fixer

- On a d'abord créé un cercle $c : x^2 + y^2 = 100$
- On a ensuite créé deux curseurs pour pouvoir faire varier l'angle d'incidence (α) et l'indice optique de notre bille (n).

- On a tracé une parallèle à l'axe des abscisses liée à l'angle d'incidence.
- Pour chaque angle calculé, on a utilisé la normale
- L'angle du rayon réfracté₁ (γ) est lié à l'angle du rayon incident (α) par la relation $\gamma = \text{Arcsin}(\sin(\alpha)/n)$

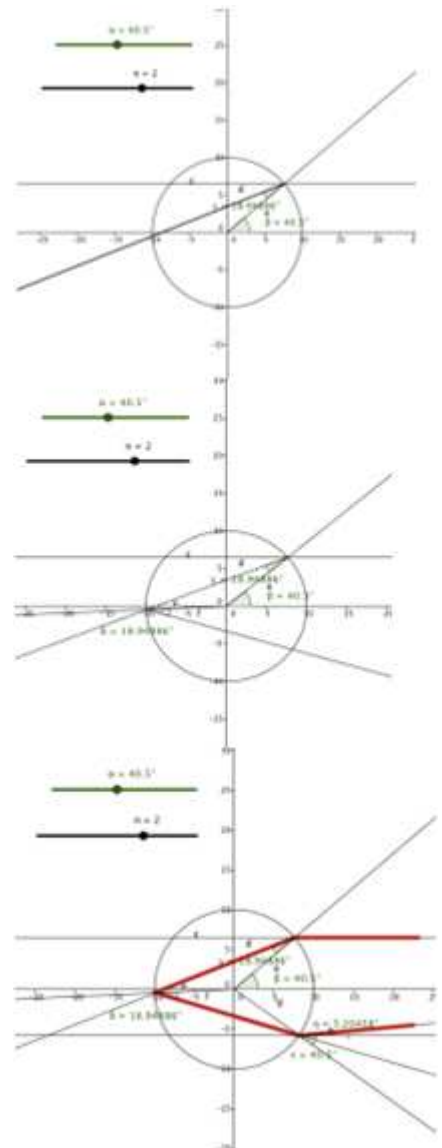
- Le rayon est ensuite réfléchi avec le même angle (γ)

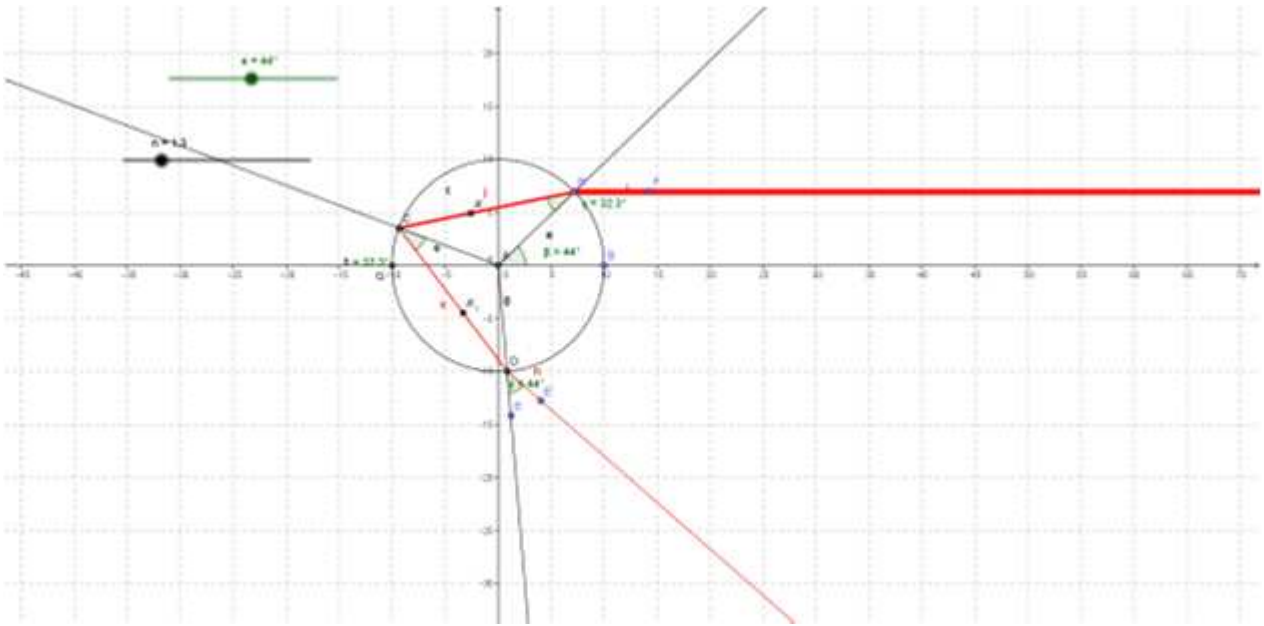
- A la sortie de la bille, on a l'angle réfracté égal à l'angle d'incidence (α) donc $\varepsilon = \alpha$

- L'intérêt de la modélisation sous GeoGebra était de connaître l'angle du rayon émergent (β) par rapport à la parallèle à l'axe des abscisses c'est-à-dire le rayon incident.

b) Premières observations

Nous donnons ici une construction obtenue pour un indice de réfraction 1,3 (de l'eau par exemple) et un angle d'incidence de 44°. Nous ne dessinons que les rayons pouvant être à l'origine de la rétro réflexion, le rayon réfléchi en B, le rayon réfracté en C et le rayon réfléchi en D ne sont pas construits. Nous en tiendrons compte plus tard pour évaluer la proportion de lumière rétro réfléchie





Nous constatons que pour que le rayon rétro-réfléchi soit parallèle au rayon incident, il faudra, par raison de symétrie, que le rayon réfracté en B vienne rencontrer le dioptre au point G, c'est-à-dire que C doit être sur G.

En C il peut y avoir réflexion totale puisqu'on passe d'un milieu ayant un indice de réfraction plus grand vers l'air d'indice égal à 1

Un tableau donne ici les angles limites de réfraction pour différents indices.

Pour déterminer cet angle nous utilisons la loi de Descartes $n_1 \times \sin(i_1) = n_2 \times \sin(i_2)$ avec n_1 l'indice du milieu, n_2 l'indice de l'air et pour une émergence rasante, soit $i_2 = 90^\circ$.

$$i_L = \arcsin\left(\frac{1}{n_1}\right)$$

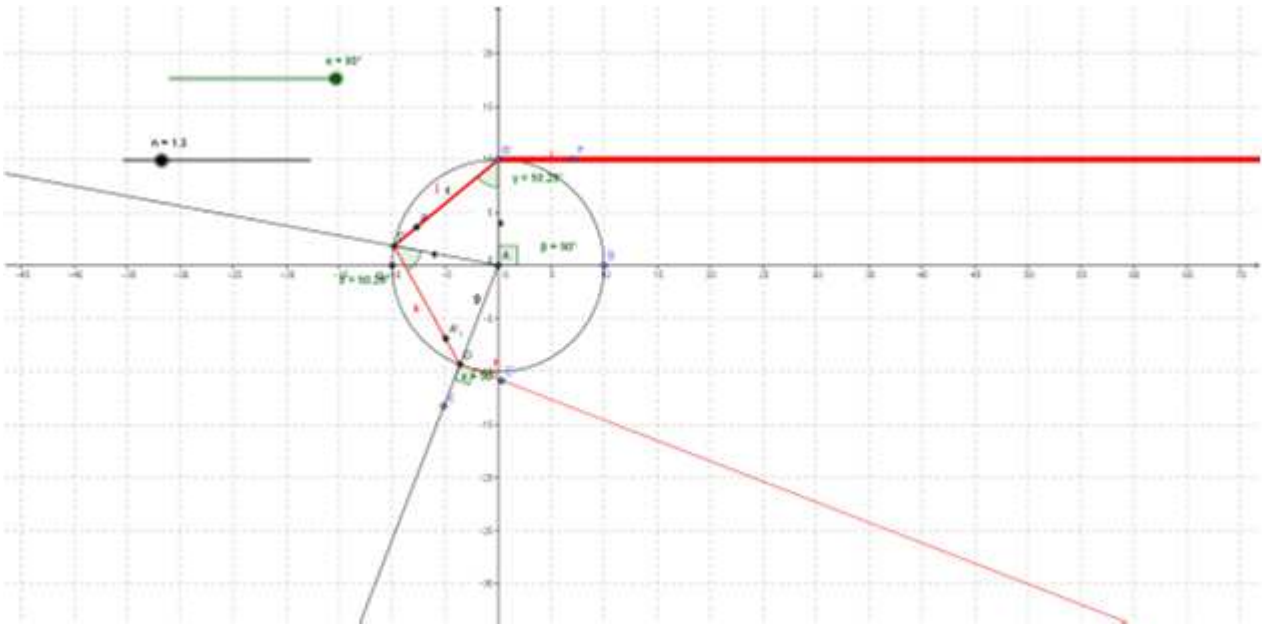
n	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
i_L (deg)	50,2	45,5	41,8	38,7	36,0	33,7	31,7	30,0

d) Pour quels indices la rétro réflexion peut-elle avoir lieu ?

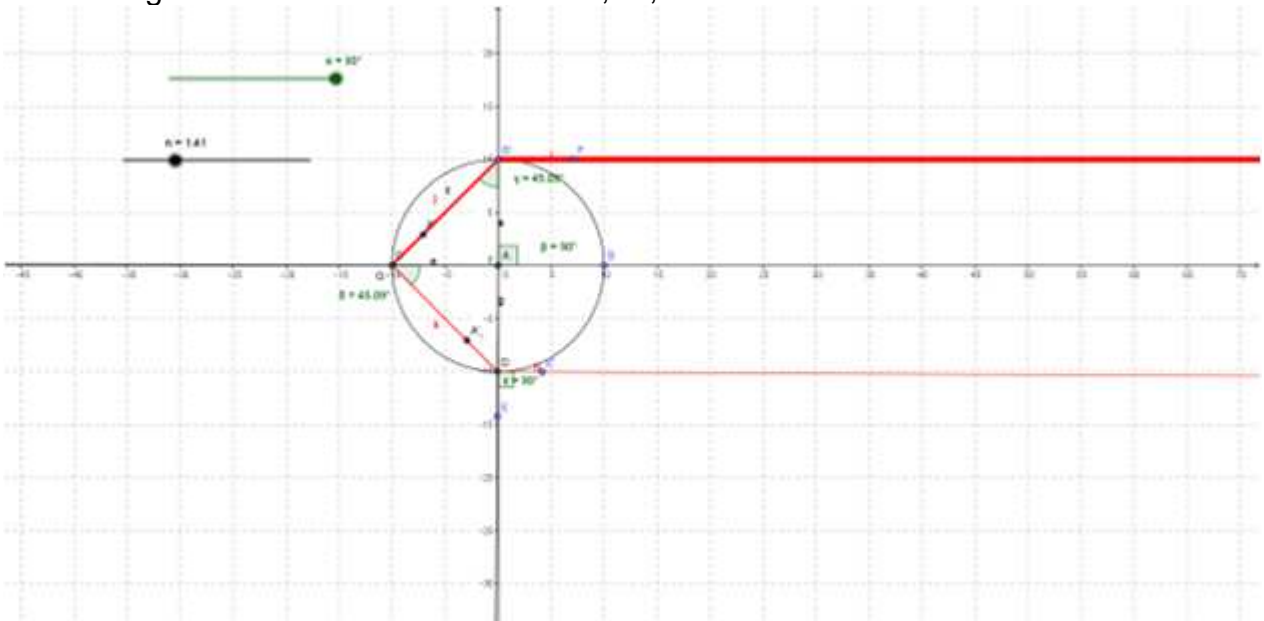
Grâce aux curseurs, nous pouvons faire varier à volonté les valeurs de l'indice de réfraction et de l'angle d'incidence.

Pour des indices de réfraction inférieurs à 1,5 la simulation Géogébra montre qu'il est impossible d'obtenir un rayon émergent parallèle au faisceau émergent sauf pour le rayon qui heurte normalement la surface de la sphère

Par exemple sur la figure ci-dessous, l'indice $n = 1,3$ et l'angle d'incidence est $\alpha = 90^\circ$, le point C n'est pas sur G, et le rayon émergent n'est pas parallèle au rayon incident.



On cherche donc, pour l'incidence de 90° l'indice qui conduit à la rétroreflexion.
 On trouve un indice $n = 1,42$, l'angle de réfraction est alors de 45° exactement. Or pour cet indice l'angle limite de réfraction est de $44,7^\circ$, il aura donc réflexion totale en G.



e) Pour quel angle d'incidence la rétro réflexion a-t-elle lieu

Pour un indice de 1,6 par exemple la rétro réflexion a lieu pour un angle d'incidence de 74°

8. Vérification expérimentale

Nous avons à notre disposition une boule en matière plastique remplie d'eau dans laquelle on dissout un peu de fluorescéine. On fait converger un fin pinceau de lumière laser verte. On constate qu'il est impossible, hormis le cas de l'incidence normale, d'obtenir un faisceau émergent parallèle au faisceau incident. Cela est conforme aux résultats donnés par Géogébra



Incidence normale



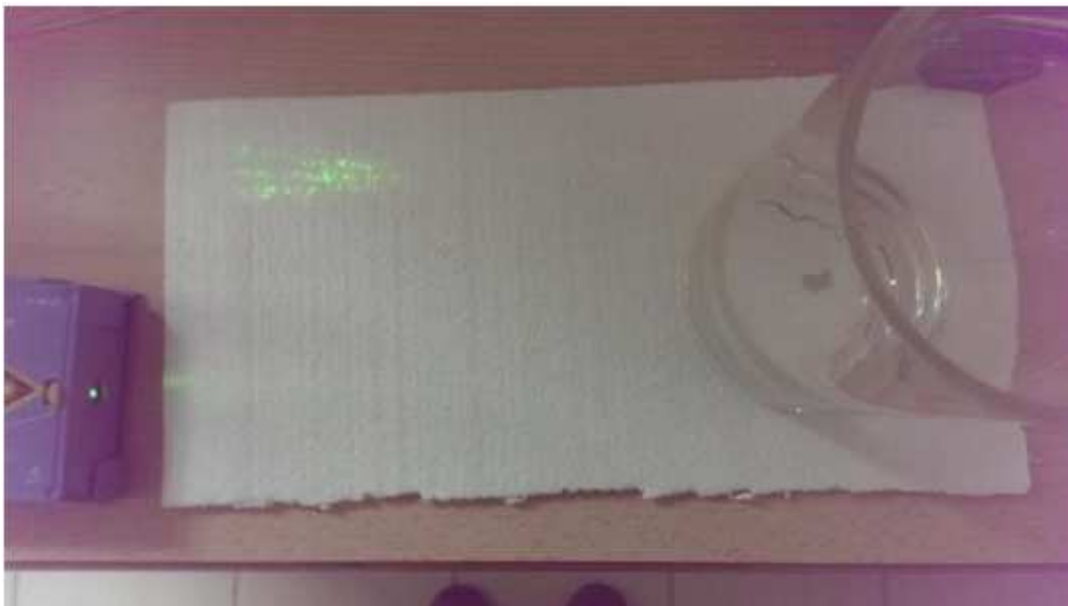
30° environ



80° environ

On également utilisé le fond épais en verre d'un vase.

On constate que pour l'incidence proche de 90°, le phénomène de rétro réflexion a lieu.



L'indice de réfraction de ce verre doit être de l'ordre 1,46 pour la radiation verte de 540 nm.

9. « Profil » de la lumière rétro réfléchée par les billes

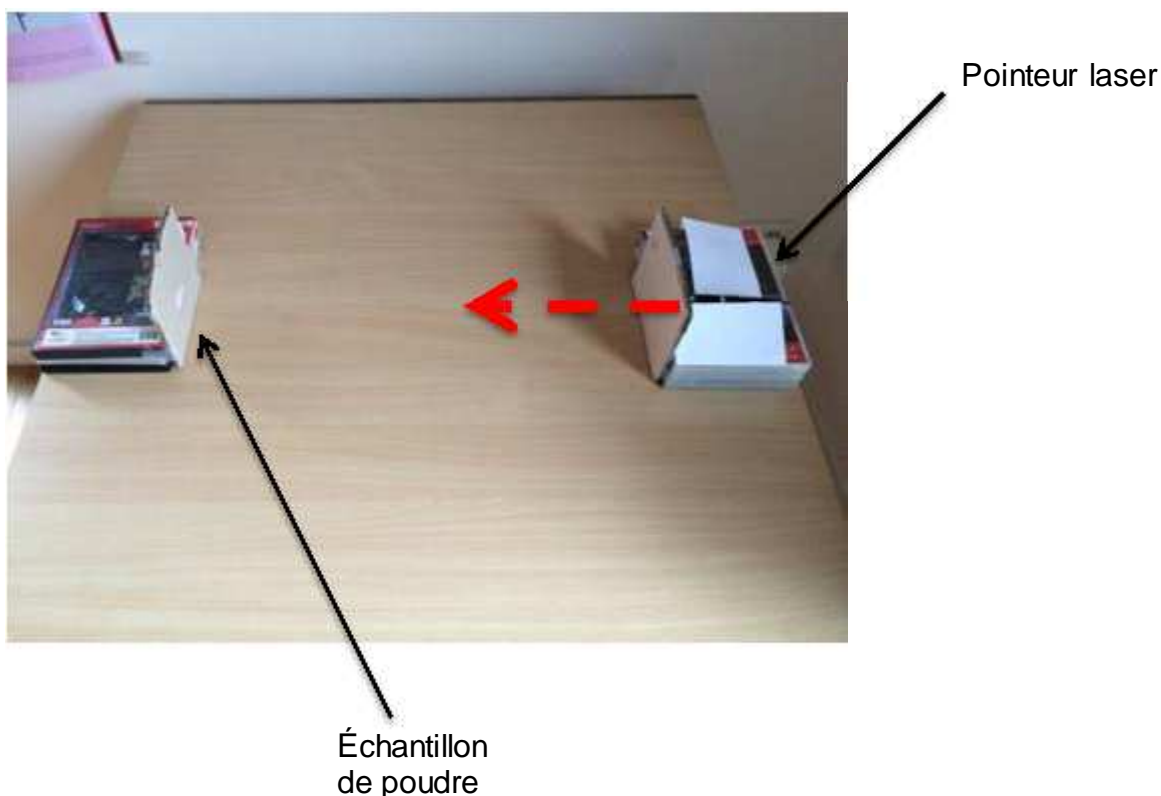
Seule une très petite proportion de la lumière est réellement rétro réfléchée. Elle correspond au rayon lumineux pour lesquels la réfraction sur le dioptre d'entrée les dévie vers le point S, situé sur le diamètre parallèle à la direction du faisceau incident. Du fait de la symétrie sphérique, ces rayons ressortent parallèles à eux-mêmes.

En utilisant les courbes tracées donnant l'angle d'émergence en fonction de l'angle d'incidence, nous nous sommes aperçus qu'il y avait une zone où la lumière devait être très présente.

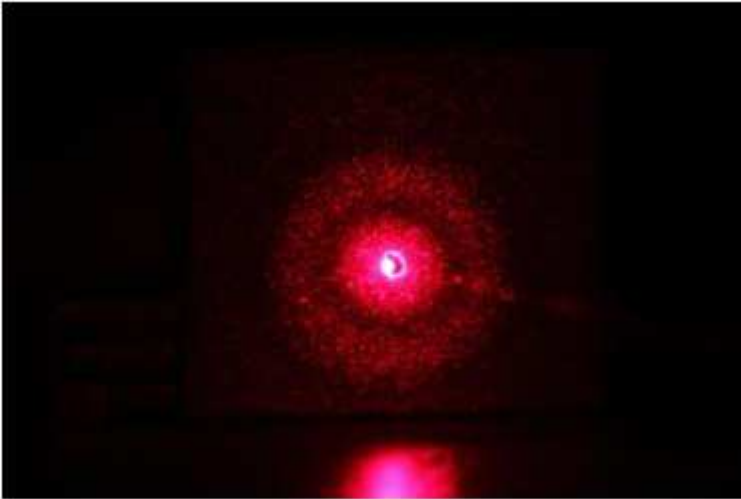
Nous avons donc essayé de modéliser plus précisément et aussi visualiser cette zone de rétro réflexion sur un écran.

a) Expériences

Nous avons mis en place une première expérience. Nous avons remarqué que l'angle de réflexion totale variait selon les différents indices.



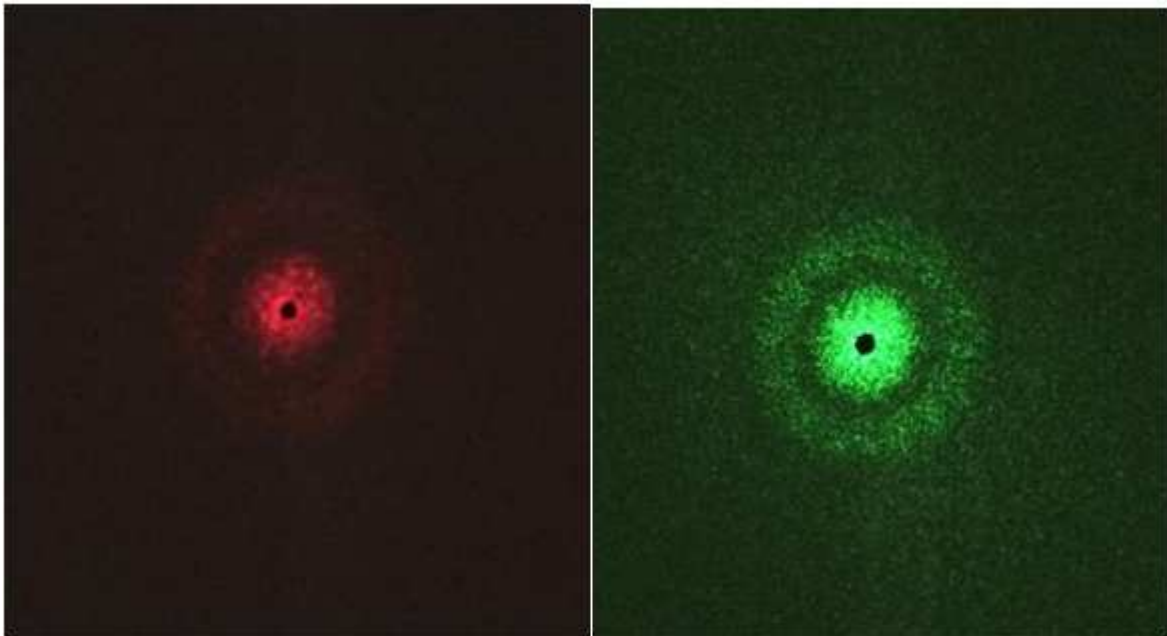
Nous faisons ensuite le noir total et nous obtenons une figure particulière :



Nous avons deux cercles sur notre écran !

Nous avons pensé à de la diffraction donc nous avons mis en place une vérification de notre figure

On sait que la tâche de diffraction varie avec la longueur d'onde, donc nous avons fait le test avec 2 lasers de longueur d'onde 532 et 650 nm et nous avons obtenu la même figure.



Nous avons mesuré le diamètre des cercles et trouvé la même valeur. Notre référent scientifique nous a précisé que la figure obtenue était liée à l'indice de réfraction.

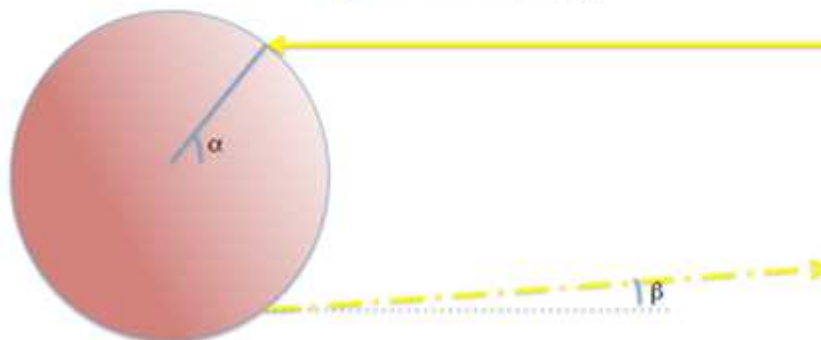
b) Modélisation de la rétrodifflexion

En reprenant les calculs sur l'angle d'émergence en fonction de l'angle d'incidence

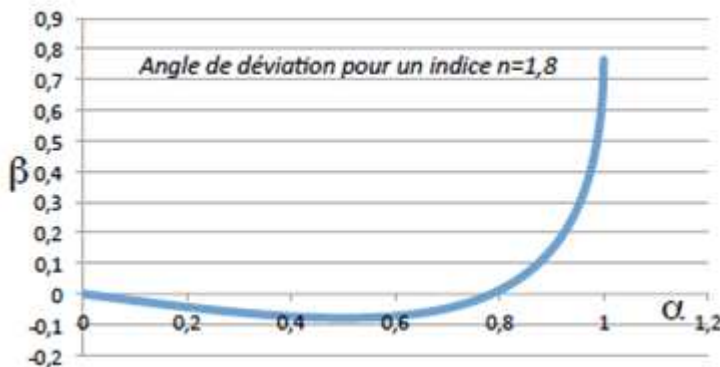
Hypothèses

- Nous possédons des billes parfaitement sphériques
- L'angle α est l'angle d'incidence du rayon lumineux
- L'angle β est l'angle d'émergence du rayon lumineux

Angle de déviation de la lumière rétrodiffusée (β)
 En fonction de l'angle d'entrée sur la sphère (α)
 $\beta = 2\alpha - 4\text{Arcsin}((\sin\alpha)/n)$



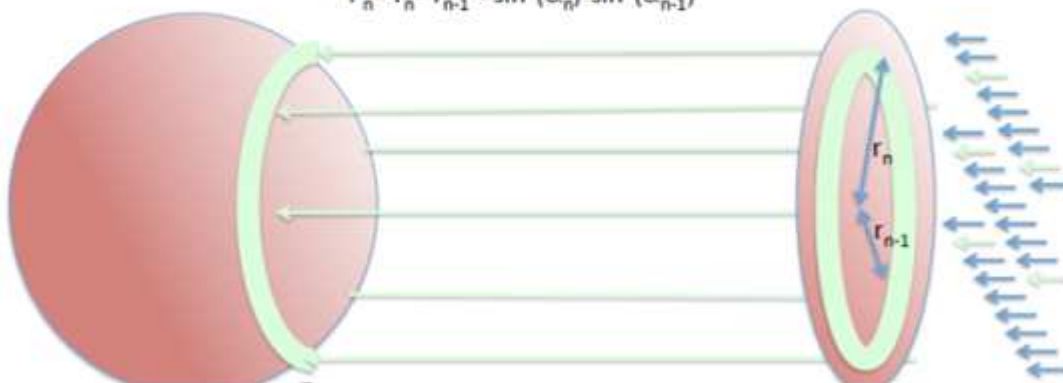
Si on prend un exemple d'indice de 1,8. Voici la courbe de l'angle rétro-réfléchi en fonction de l'angle d'incidence.



Si on considère maintenant la proportion de lumière incidente qui arrive à un angle donné (en fait entre deux angles fixés pour nos calculs). Cela revient à calculer la proportion de l'aire de l'anneau (correspondant à la projection entre l'angle α_n et α_{n-1}) par rapport à la surface du disque totale correspondant à la zone d'éclairage de la sphère dans sa totalité.

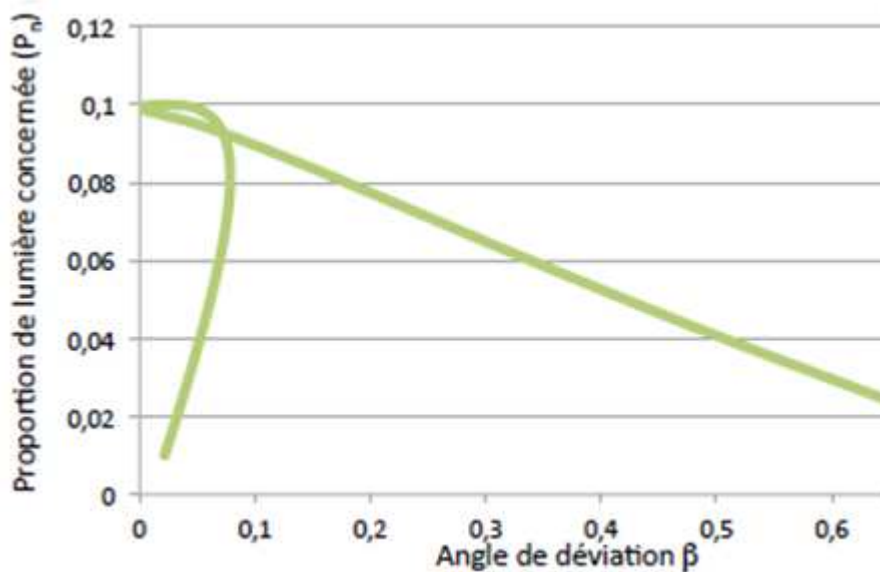
Proportion de lumière arrivant sur la zone concernée de la sphère entre l'angle α_{n-1} et l'angle α_n
 (surface du ruban vert sur surface du disque rouge)

$$P_n = r_n^2 - r_{n-1}^2 = \sin^2(\alpha_n) - \sin^2(\alpha_{n-1})$$



Pour une zone d'angle d'incidence donnée, on a alors un angle de déviation (β) et une proportion d'éclairage.

On a alors représenté, la proportion de lumière concernée en fonction de l'angle de déviation β (et même de la valeur absolue, car dans notre cas, on regarde tout l'effet de l'anneau).

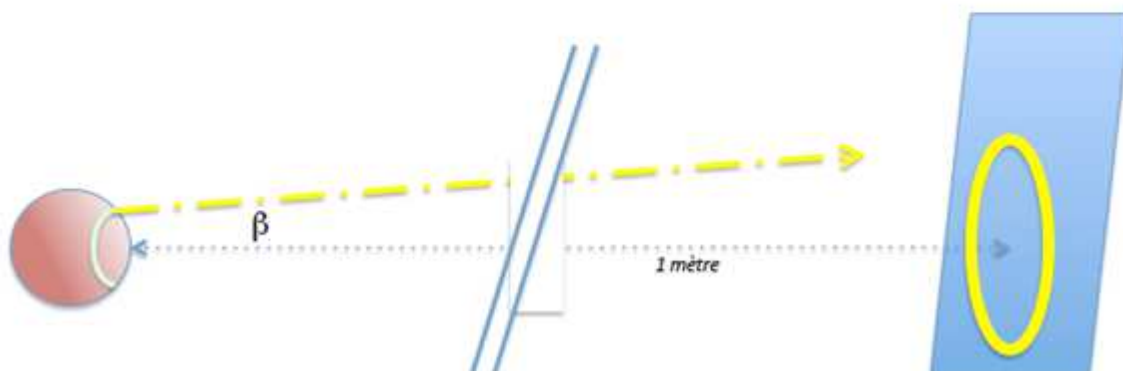


Pour une dernière étape, nous nous sommes enfin intéressés à la quantité de lumière rétrodiffusée par les billes sur l'écran. Dans cette étape il faut alors encore considérer aussi qu'une partie de la lumière se répartie sur un anneau de l'écran (et l'intensité lumineuse doit alors être répartie sur tout l'anneau de projection).

Lumière rétrodiffusée entre l'angle β_{n-1} et l'angle β_n

(somme des proportions de lumière P_n des zones concernées)

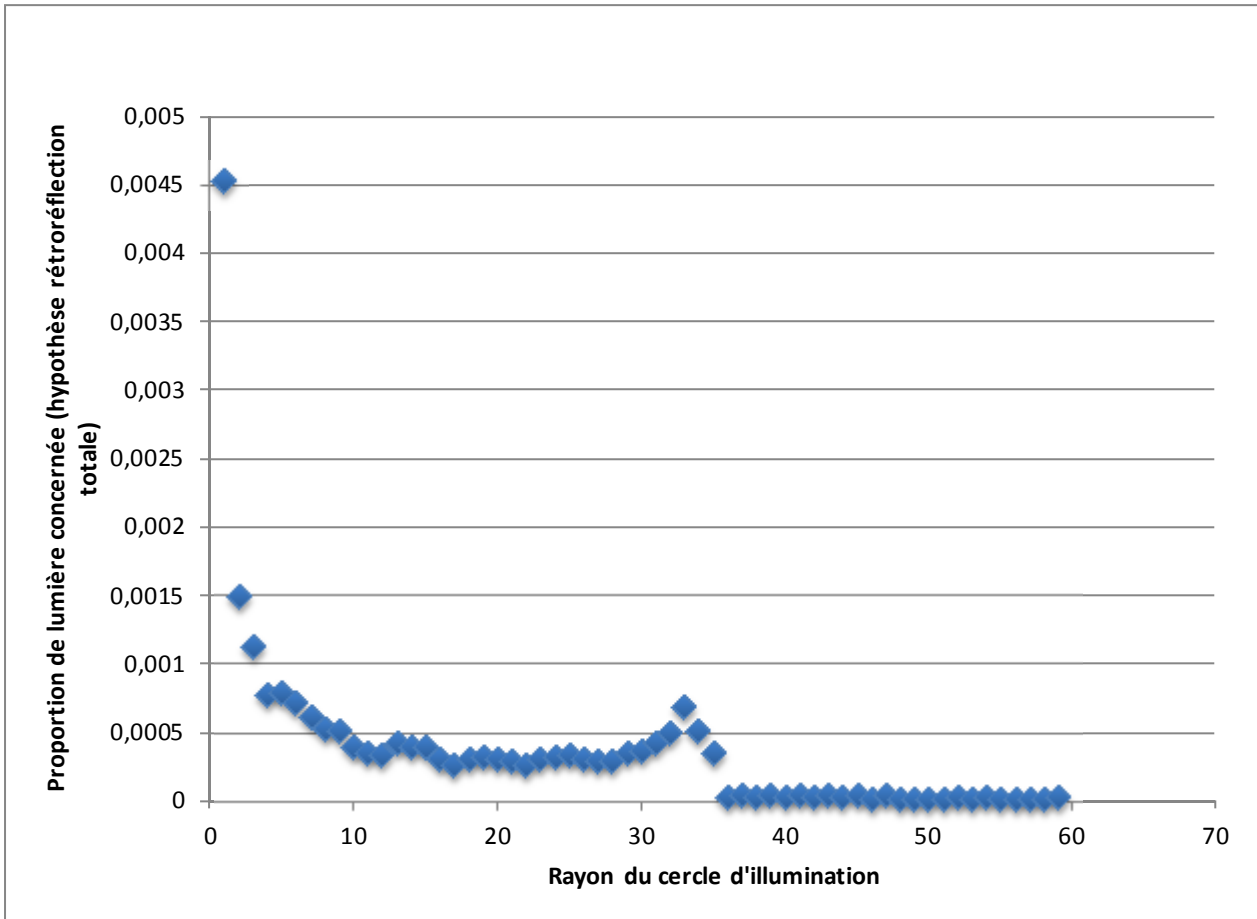
Pour obtenir une intensité de lumière, on divise par la surface du papier illuminée par la rétrodiffusion



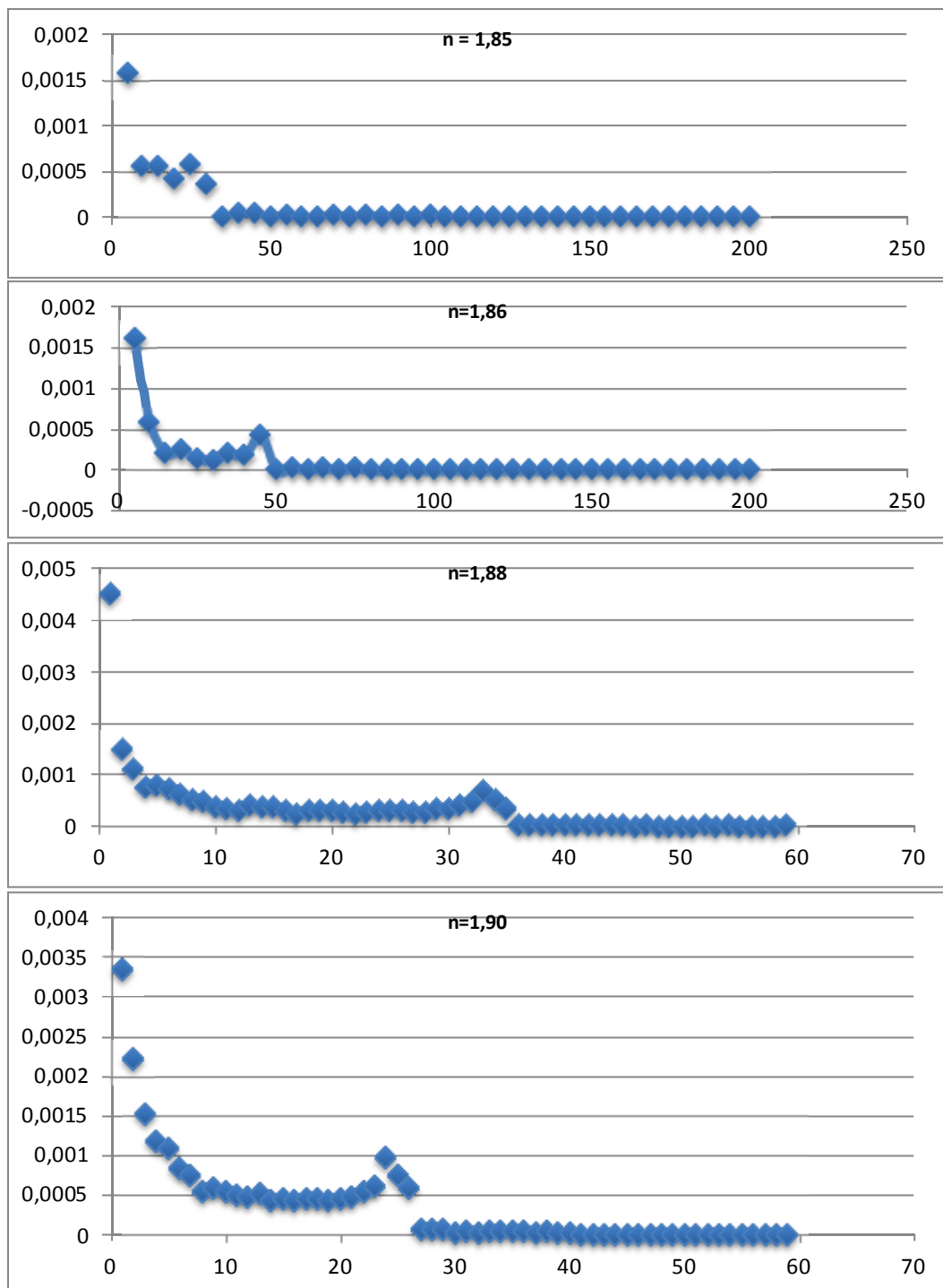
En travaillant sur Excel par angle d'incidence séparé de 0.05 rad, on additionne alors les différentes quantités de lumières concernées entre les différents anneaux (espacées ici de 5 mm à une distance 1 m).

On obtient alors une courbe montrant un « profil » de répartition de l'intensité lumineuse sur un écran placé à une distance de 1 m.

Voici la courbe obtenue pour un indice de 1,88. Il s'agit de l'indice qui se rapproche le plus des résultats expérimentaux observés.



En fait le profil est vraiment très différent en fonction des indices. Et si on regarde les résultats obtenus pour différents indices, on voit que $n=1,88$ est vraiment très proche du résultat expérimental obtenu (alors que 1,86 ou 1,90 s'en éloigne considérablement sur le rayon du « dernier » cercle visible).



Nous avons voulu savoir si un tel résultat était possible. En regardant sur Internet les indices élevées des différents verres, nous avons vu qu'un verre commercial semblait parfaitement correspondre : le LaSF39...*Lanthanum dense flint!*

10. Quantité de lumière rétro réfléchie

A chaque rencontre avec le dioptre verre-air, la lumière se partage en un faisceau réfléchi et un faisceau réfracté.

Les coefficients de transmission et de réflexion en énergie dépendent de l'angle d'incidence, mais pour des angles inférieurs à 30° ils varient peu et sont presque égaux à ceux de l'incidence normale :

Le coefficient de réflexion donné par le fabricant du LaSF39

(<http://refractiveindex.info/?shelf=glass&book=SCHOTT-LaSF&page=N-LASF9>) est $R = 0,09$ environ

Coefficient de transmission $T = 1 - R = 0,91$

$n_1 = 1$ et $n_2 = 1,9$.

Première rencontre : la lumière entre dans la bille

La proportion d'énergie transmise est $T_1 = 0,91$

Deuxième rencontre : la lumière est réfléchi au fond de la bille

La proportion d'énergie réfléchi est $R_2 = 0,09$

Troisième rencontre : la lumière sort de la bille

La proportion d'énergie transmise $T_3 = 0,91$

Donc la proportion d'énergie lumineuse rétro réfléchie est égale au produit des trois proportions précédentes : $p = T_1 \cdot R_2 \cdot T_3 = 7,5 \cdot 10^{-2} = 7,5 \%$

Cette faible valeur explique pourquoi le phénomène ne peut être vu que la nuit ou le jour avec une source très intense de lumière telle qu'un flash d'appareil photo.

11. Pourquoi n'observe-t-on pas un phénomène de dispersion ?

Nous n'avons pas de réponse certaine à cette question. Nous pensions que la dispersion du matériau était très faible : l'indice pourrait varier peu avec la longueur d'onde de la lumière.

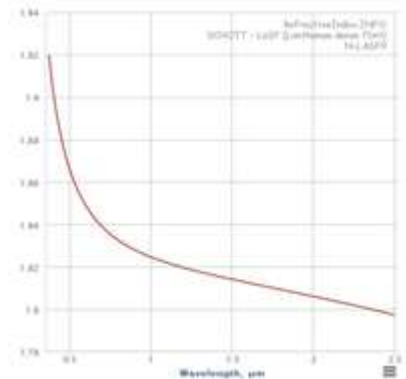
La page internet du fabricant donne la variation de l'indice de ce matériau avec la longueur d'onde.

Dans le visible, l'indice de réfraction varie entre 1,9 à 400 nm et 1,83 à 800 nm.

L'eau qui donne le phénomène de l'arc en ciel a un indice qui varie dans des proportions plus petites 1,35 à 400 nm et 1,325 à 800 nm.

Ce n'est pas la faible variation de l'indice de réfraction qui explique l'absence de dispersion.

L'absence de dispersion est donc sans doute due au phénomène d'accumulation de lumière dans la direction du faisceau incident pour une grande plage de l'angle d'incidence.



12. Conclusion

La propriété de rétro réflexion des poudres microscopiques n'est pas due à la réflexion totale comme on le croit souvent. Elle provient de la réflexion partielle de la lumière sur le fond de la bille

La rétro réflexion de ces poudres n'est possible que si l'indice de réfraction est supérieur à 1,5 environ. Le phénomène est le meilleur pour un indice égal à 1,9. La mesure du diamètre de l'anneau de rétro réflexion nous a permis de trouver la valeur de l'indice de réfraction de notre poudre et ainsi d'en déduire sa composition chimique.

Nous sommes très heureux de participer aux olympiades de physique nationales.

Notre projet sur l'étude des billes rétro réfléchissantes a été très enrichissant et très intéressant pour nous. Ce travail nous a permis de mieux comprendre comment expliquer un phénomène en partant d'observations et aboutir à un travail complet sur le sujet.