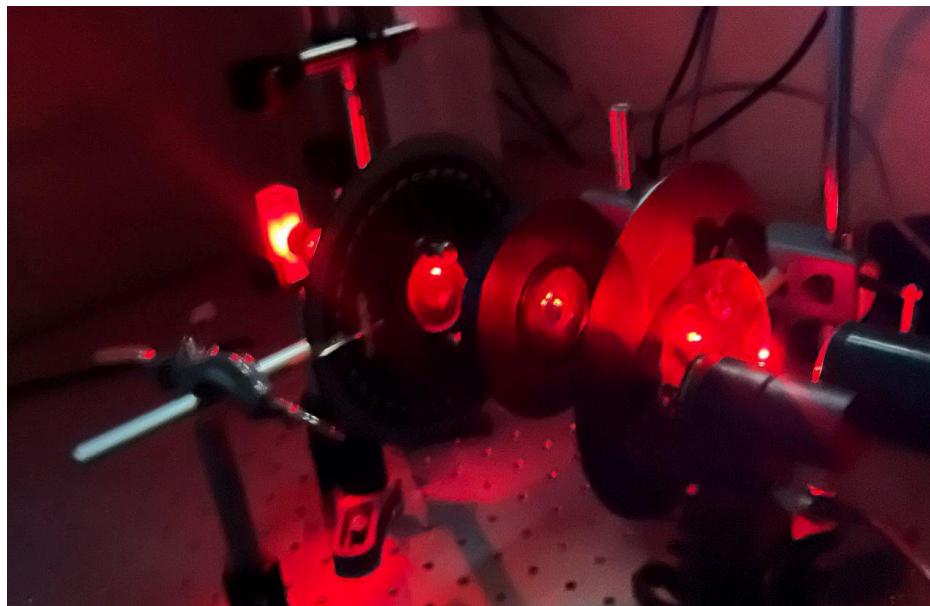


Projet : Etude et caractérisation de la diffusion de la lumière

UE-PHY3099L : Projets Expérimentaux Scientifiques

Année 2024/2025



Ethan GAUVIN

Maya MADI

Sergio SERRANO

I Introduction

II Théorie

1. Théorie de Rayleigh
2. Théorie de Mie

III Résultats et analyse

1. Vérification de la loi de Malus
 - 1.1. Montage et protocole
 - 1.1.1. Loi de Malus avec Polariseur et analyseur
 - 1.1.2. Polariseur, analyseur, lame demi-onde
 - 1.2. Traitement de données
 - 1.3. Analyse et interprétation
2. Étude de Diffusion
 - 2.1. Montage et protocole
3. Etude de la polarisation de la lumière diffusée
 - 3.1. Montage et protocole
4. Incertitudes expérimentales

VI Conclusions

1. Conclusion
2. Limites et améliorations
3. Perspectives

VII Remerciements

VIII Bibliographie

IX Annexe

1. Valeurs nutritionnelles
2. Liste de matériel

I Introduction

Ce projet a pour but d'étudier la diffusion de la lumière par des solutions diffusantes de différentes compositions afin de caractériser les régimes de Rayleigh et de Mie et la transition les séparant.

Pour cela, nous avons comparé la lumière diffusée par de l'eau pure, du lait écrémé, du lait entier et des solutions de lait entier dilué — des solutions où la taille des particules et leur concentration varient. Le lait est une émulsion composée d'environ 87 % d'eau et 13 % de solides, dont des sucres (lactose, glucose, galactose, etc.), des minéraux (calcium, magnésium, etc.), des protéines, des lipides, des vitamines, etc. Dans le cadre de ce projet, nous nous intéressons aux protéines et aux lipides, qui sont les principaux responsables de la diffusion ainsi que de la couleur blanche opaque du lait grâce à leur forme et leur taille. Les lipides sont majoritairement des triacylglycérols sous forme de globules sphériques de diamètre de l'ordre du micromètre. Les protéines ont des tailles variant du nm à la centaine de nm. Le lait écrémé se distingue du lait entier par la quasi-absence de lipides, tout en gardant une teneur en protéines comparable (cf. Annexe). Par la suite, nous considérons le lait comme une solution homogène et non pas contenant des particules en suspension. Pour permettre cette approximation, nous veillons à garder le lait au frais, l'agiter préalablement à la mesure et le remplacer régulièrement afin d'éviter qu'il ne périme.

Lorsque les particules sont très petites devant la longueur d'onde incidente (un laser He-Ne rouge de longueur d'onde de 632 nm a été utilisé) le régime de Rayleigh s'applique, entraînant une diffusion dépendante de la polarisation de la lumière incidente. À l'inverse, le régime de Mie concerne des particules de taille comparable ou supérieure à la longueur d'onde, comme les lipides, modifiant la distribution angulaire et la sensibilité à la polarisation de la lumière diffusée. En étudiant la dépendance de l'intensité diffusée détectée sur l'angle de polarisation, nous pouvons analyser le régime de diffusion et l'influence de la taille et de la concentration des particules.

Ces études ont de nombreuses applications dans différents domaines tels que la physique atmosphérique, l'imagerie biomédicale, la chimie analytique, ou tout simplement l'analyse industrielle de la composition du lait.

II Théorie

1. Théorie de Rayleigh

La condition nécessaire pour le phénomène de diffusion de Rayleigh est que la longueur d'onde incidente doit être très grande devant la taille des particules composant le milieu diffusant. Ce qui est le cas des molécules d'air dans l'atmosphère, la diffusion de Rayleigh est responsable de la couleur bleue du ciel ainsi que les couleurs jaunes/oranges du coucher de soleil. Ce type de diffusion est élastique, c'est-à-dire que les photons conservent leur énergie cinétique lors de l'interaction rayonnement-matière.

Le champ électrique de la lumière incidente agit sur les charges présentes dans les particules. La lumière incidente étant polarisée, les molécules oscillent selon la direction de polarisation du champ incident et deviennent ainsi des dipôles rayonnants. Ce dipôle réemet de la lumière selon l'axe vertical avec une intensité proportionnelle à $I_0 \sin^2(\theta)$, θ étant l'angle entre la polarisation et l'axe vertical et I_0 l'intensité . L'intensité rayonnée est donc nulle dans la direction de l'axe du dipôle (c'est-à-dire dans la direction de polarisation) et maximale dans le plan perpendiculaire à cet axe. Cette répartition en trois dimensions forme un tore ou un « donut » centré sur la molécule, dont l'axe de rotation coïncide avec la direction de la polarisation incidente. En découplant ce donut par un plan

contenant l'axe de polarisation, on obtient une courbe en « figure 8 », formée de deux lobes symétriques séparés par un point nodal où l'intensité est nulle. Ces deux types de diagrammes de rayonnements sont visualisés ci-dessous. La lumière diffusée est polarisée linéairement de par l'approximation dipolaire.

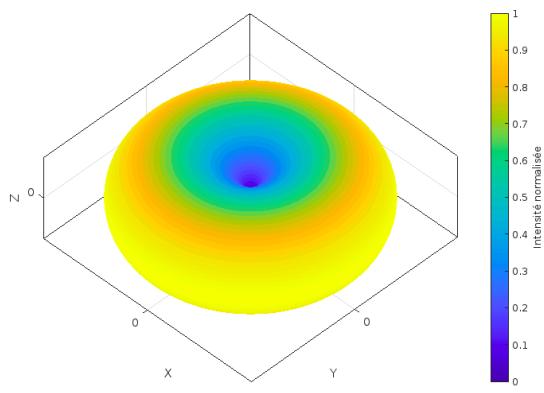


Figure 1 : Profil de diffusion en 3D

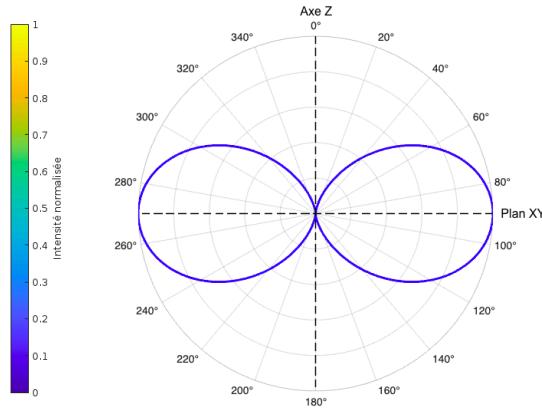


Figure 2 : Profil de diffusion : coupe transversale

2. Théorie de Mie

Cette théorie décrit la diffusion de la lumière par des particules de taille comparable ou supérieure devant la longueur d'onde. Elle dépend beaucoup de la forme des molécules.

Le tableau ci-dessous résume les différences principales entre les deux régimes.

Aspect	Rayleigh	Mie
Taille des particules	$\ll \lambda$	$> \lambda$ ou $\simeq \lambda$
Dépendance de l'intensité diffusée en λ	$\propto 1/\lambda^4$	Peu marquée
Distribution angulaire	Symétrique	Asymétrique, forte diffusion vers l'avant
Polarisation	Forte dépendance	Dépendance faible/variable
Diffusion	Élastique	Élastique
Exemple	Molécules d'air \Rightarrow couleur bleue du ciel/couleurs du coucher du soleil	Gouttelettes d'eau \Rightarrow arcs en ciel et gloires

De plus, la lumière diffusée dans le régime de Mie n'est pas polarisée même si la lumière incidente est polarisée. En effet, l'approximation dipolaire n'est plus possible.

III Résultats et analyse

1. Vérification de la loi de Malus

La loi de Malus consiste à retrouver l'état de polarisation d'une lumière polarisée incidente. En effet, en mesurant l'intensité de lumière transmise en fonction de l'orientation θ d'un polariseur, il est possible de mesurer l'axe de polarisation et donc, de vérifier que ça coïncide avec nos résultats attendus.

1.1. Montage et protocole

1.1.1. Loi de Malus avec Polariseur et analyseur

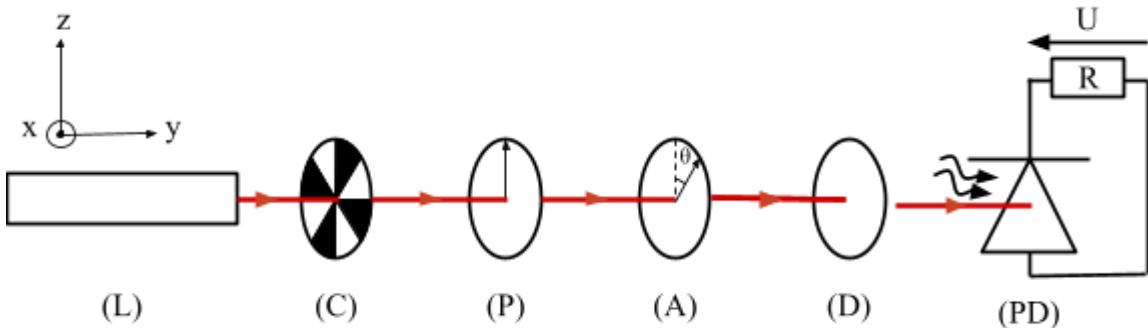


Figure 3 : Premier montage : laser L, chopper C, polariseur P, analyseur A, densité D, et photodiode PD branchée à un oscilloscope avec résistance de charge.

Protocole

- Dans un premier temps, réaliser le montage ci-dessus en excluant l'analyseur A. Fixer les composants optiques sur le même axe en s'assurant que le faisceau laser passe par leurs centres.
- Fixer l'angle du polariseur de manière à obtenir un maximum d'intensité.
- Dans un second temps, fixer le deuxième polariseur, l'analyseur A, entre la photodiode et le premier polariseur.
- Relever les valeurs de la tension crête-a-crête sur l'oscilloscope en fonction de l'angle de l'analyseur avec des pas de 10° sur un intervalle de 180° .
- Déterminer l'axe neutre des deux polariseurs (où l'on trouve une extinction ou un minimum d'intensité).

1.1.2. Polariseur, analyseur, lame demi-onde

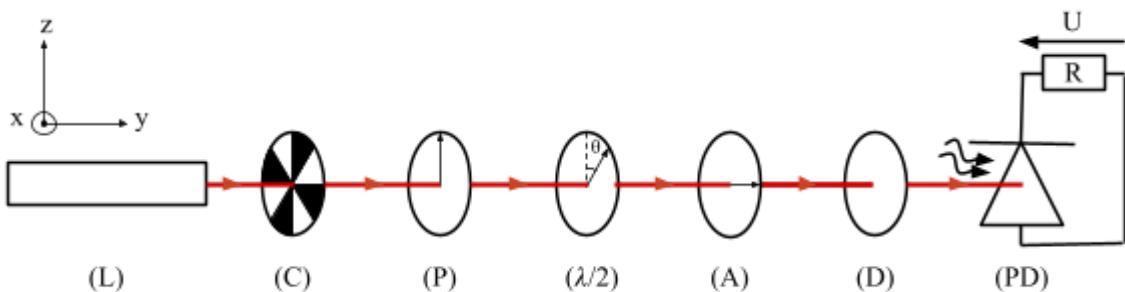


Figure 4 : Deuxième montage : laser L, chopper C, polariseur P, lame demi-onde $\lambda/2$, analyseur A, densité D, et photodiode PD branchée à un oscilloscope avec résistance de charge.

Protocole

- Avec le premier montage, placer les deux polariseurs de manière à trouver l'extinction.
- Fixer la lame demi-onde entre les deux polariseurs.
- Tourner la lame demi-onde sur un intervalle de 180° avec des pas de 10° et relever les valeurs de la tension crête-a-crête détectée sur l'oscilloscope en fonction de l'angle de la lame demi-onde.
- Déterminer les deux axes neutres de la lame (où l'on trouve une extinction).

1.2. Traitement de données

Nous cherchons ensuite à tracer les données et effectuer l'ajustement des courbes obtenues à l'aide d'un programme python (voir Jupyter Notebook).

La dépendance de la tension mesurée est décrite par la loi de Malus et donc varie en \cos^2 .

→ Premier montage : Analyseur et polariseur

$$I(\theta) \propto \cos^2(\theta - \theta_0)$$

L'ajustement donc suit cette forme :

$$U(\theta) = A \cos^2(\theta - \theta_0) + B$$

La période est donc de 180° .

→ Deuxième montage : Analyseur, lame demi-onde et polariseur

La lame demi-onde introduit une rotation de la direction de polarisation de $2(\theta - \theta_0)$

L'ajustement donc suit cette forme :

$$U(\theta) = A \cos^2(2(\theta - \theta_0)) + B$$

La période est donc de 90° .

A, θ_0 et B sont les paramètres de l'ajustement, où A est l'amplitude de la modulation, θ_0 le décalage sur l'axe horizontal et B l'offset ou le bruit, représentant la tension résiduelle réelle mesurée en condition d'extinction.

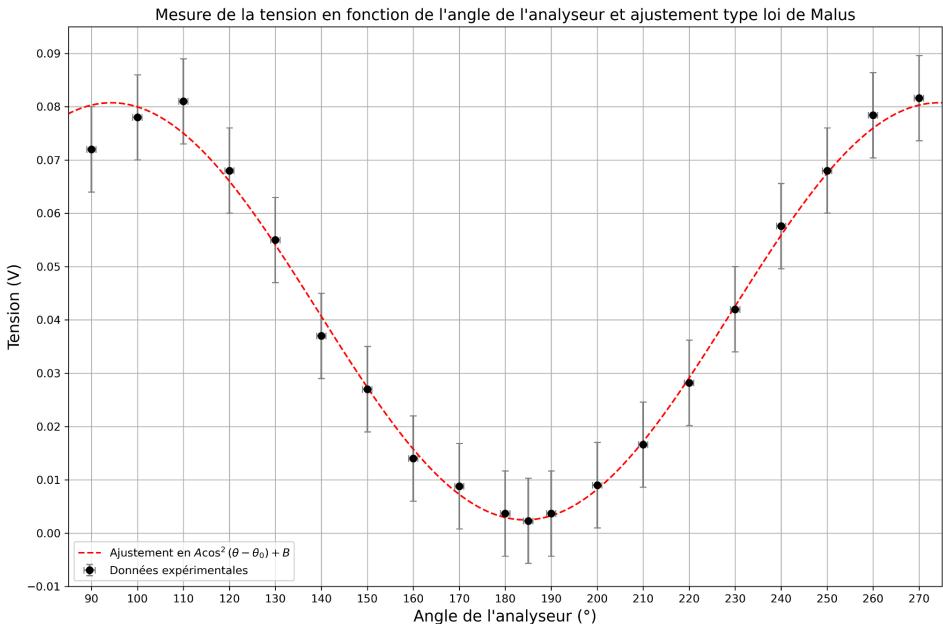


Figure 5 : Loi de Malus (polariseur et analyseur)

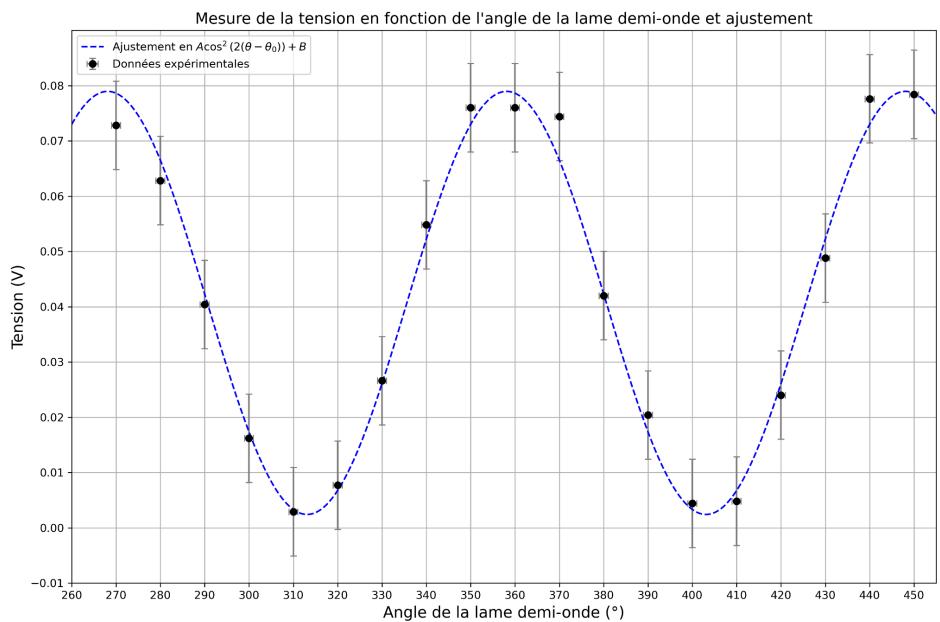


Figure 6 : Polariseur, analyseur, lame demi-onde

1.3. Analyse et interprétation

Nous cherchons maintenant à déterminer les axes neutres des polariseurs et de la lame demi-onde, ce qui sont les positions pour lesquelles on observe un minimum d'intensité. La détermination de ces axes nous permet de trouver la relation entre l'angle sur le composant optique et l'angle de la polarisation par rapport à la verticale. Pour les deux polariseurs, il y a deux angles d'extinction et donc un axe neutre. Pour la lame demi-onde, il y a quatre angles d'extinction, formant deux axes neutres.

Pour l'analyseur, nous observons ces deux angles d'extinction : $\theta_{ext}^{analyseur} = 4.3^\circ, 184.3^\circ$.

L'angle de la polarisation α s'écrit donc : $\alpha_{pol}^{analyseur} = \theta - (\theta_{ext}^{analyseur} + 90)$ avec $\theta_{max}^{analyseur} = \theta_{ext}^{analyseur} + 90$.

Les angles d'extinction de la lame demi-onde se trouvent à $\theta_{ext}^{\lambda/2} = 43.1^\circ, 133.1^\circ, 223.1^\circ, 313.1^\circ$.

L'angle de la polarisation α s'écrit donc : $\alpha_{\lambda/2}^{pol} = 2(\theta - (\theta_{ext}^{\lambda/2} + 45))$ avec $\theta_{max}^{\lambda/2} = \theta_{ext}^{\lambda/2} + 45$.

Par exemple, dans la partie étude de diffusion, nous avons tourné la lame demi-onde sur l'intervalle $270^\circ-90^\circ$. La formule pour l'angle de la polarisation devient $\alpha_{\lambda/2}^{pol} = 2(\theta - (\theta_{ext}^{\lambda/2} + 45)) = 2(\theta - (223.1 + 45)) = 2(\theta - 268.1)$

2. Étude de Diffusion

2.1. Montage et protocole

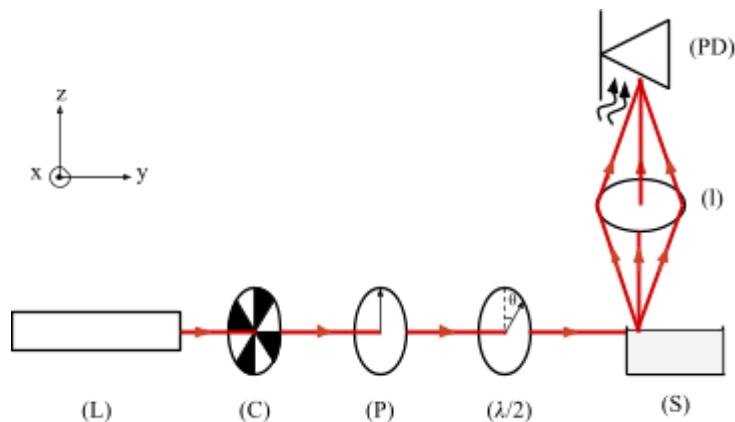


Figure 7 : Troisième montage : laser L, chopper C, polariseur P, lame demi-onde $\lambda/2$, cuve avec solution C, lentille de collecte l, et photodiode amplifiée PD branchée à un oscilloscope.

Réglages préliminaires:

- Remplir la cuve de 9,8 mL de lait.
- Ajuster le laser pour qu'il passe juste en dessous de la surface de la solution et le fixer
- Faire en sorte que tous les éléments optiques soient bien perpendiculaires à la direction de propagation du laser (on peut s'aider des reflets du laser pour cela).
- Placer la lentille de collecte à 7,5 cm au-dessus du lieu de diffusion au niveau de l'avant de la cuve.
- Ajuster la photodiode de telle sorte que toute la lumière collectée par la lentille arrive dans le capteur de la photodiode (on cherche à maximiser l'intensité lumineuse reçue) la distance avec la photodiode est alors d'une dizaine de centimètres.

Protocole :

- Remplir la cuve de 9,8 mL de la solution à étudier.
- Placer le polariseur à un angle de 270 degrés (à la verticale).
- Utiliser l'oscilloscope pour mesurer l'amplitude crête à crête (ne pas oublier d'allumer le chopper).
- Répéter la mesure en faisant tourner la lame demi-onde de 10 degrés à chaque nouvelle mesure sur 180 degrés.

Les résultats suivent la forme $\cos^2\theta + C$, et plus le facteur de dilution augmente plus C diminue (voir fig 8 et annexe). En effet, la partie indépendante de la polarisation correspond au régime de Mie et plus on dilue, plus on se rapproche du régime de Rayleigh. On constate que la période est de 180 degrés ce qui est cohérent avec le profil symétrique de la diffusion de Rayleigh. On constate également que l'intensité diffusée diminue lorsque le facteur de dilution augmente car il y a de moins en moins de molécules ayant un fort pouvoir diffusant (molécules présentes dans le lait).

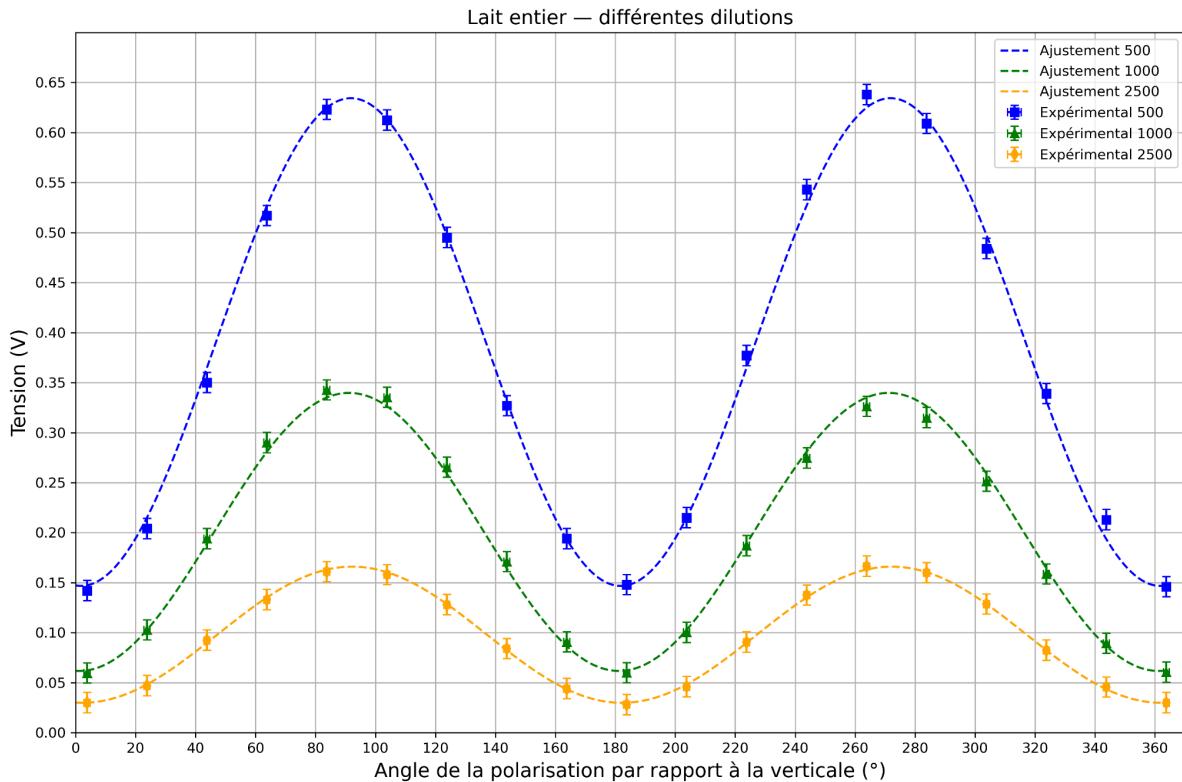


Figure 8 : Comparaison profil de diffusion de différentes dilutions

Avec un repère polaire, il est possible d'identifier le profil de diffusion de chaque solution, cela nous permet de visualiser la diffusion en 360° de la cuve sur un graphe. Dans la figure X on peut imaginer la cuve dans le milieu du repère placé verticalement, avec une lumière incidente arrivant de la gauche et polarisée verticalement. Les deux lobes correspondent aux maxima de diffusion, les angles pour lesquels la lumière diffusée est la plus intense.

Ce format nous permet aussi de visualiser que plus la solution est diluée, plus la figure se rapproche du modèle de la diffusion de Rayleigh. On observe alors mieux la forme de ‘8’, qui en 3D aurait la forme d'un tore.

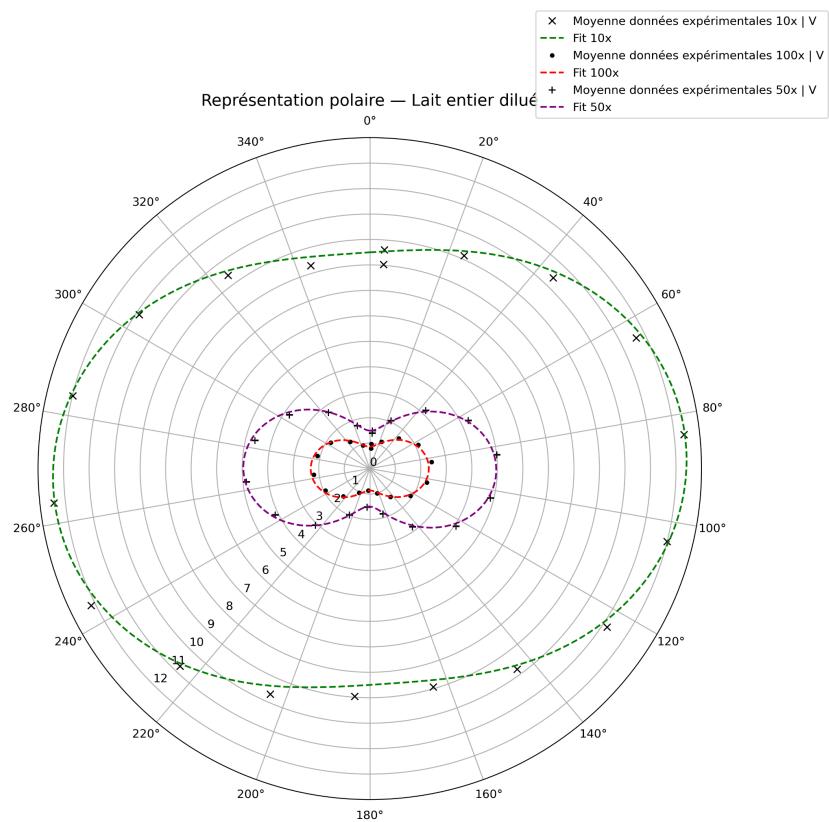


Figure 9 : Comparaison dilutions facteurs 10, 50 et 100 en repère polaire

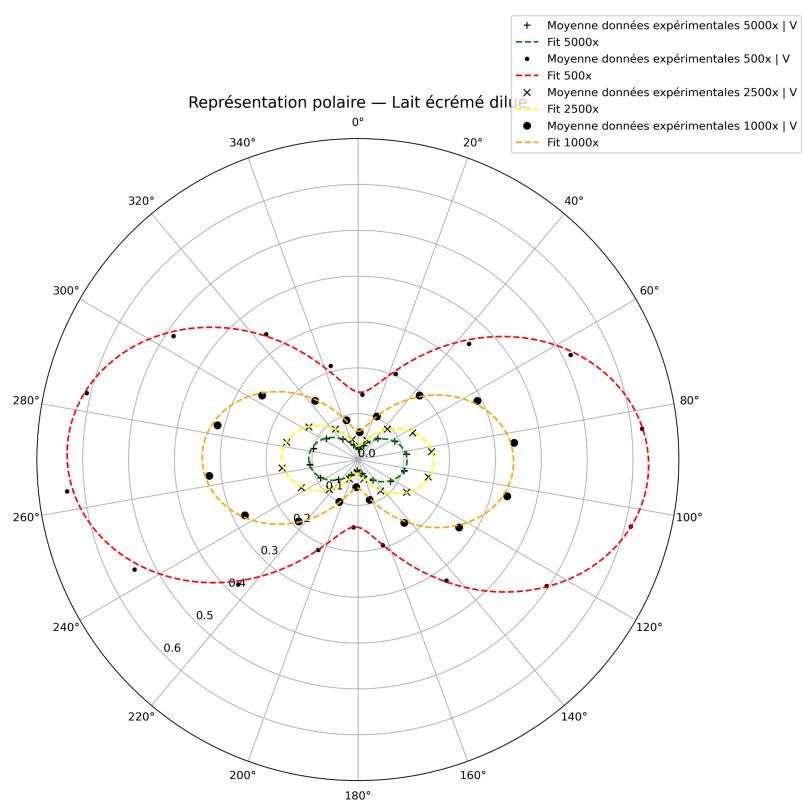


Figure 10 : Comparaison dilutions facteurs 500, 1000, 2500 et 5000 en repère polaire

Nous avons ensuite étudié ce contraste en fonction des dilutions.

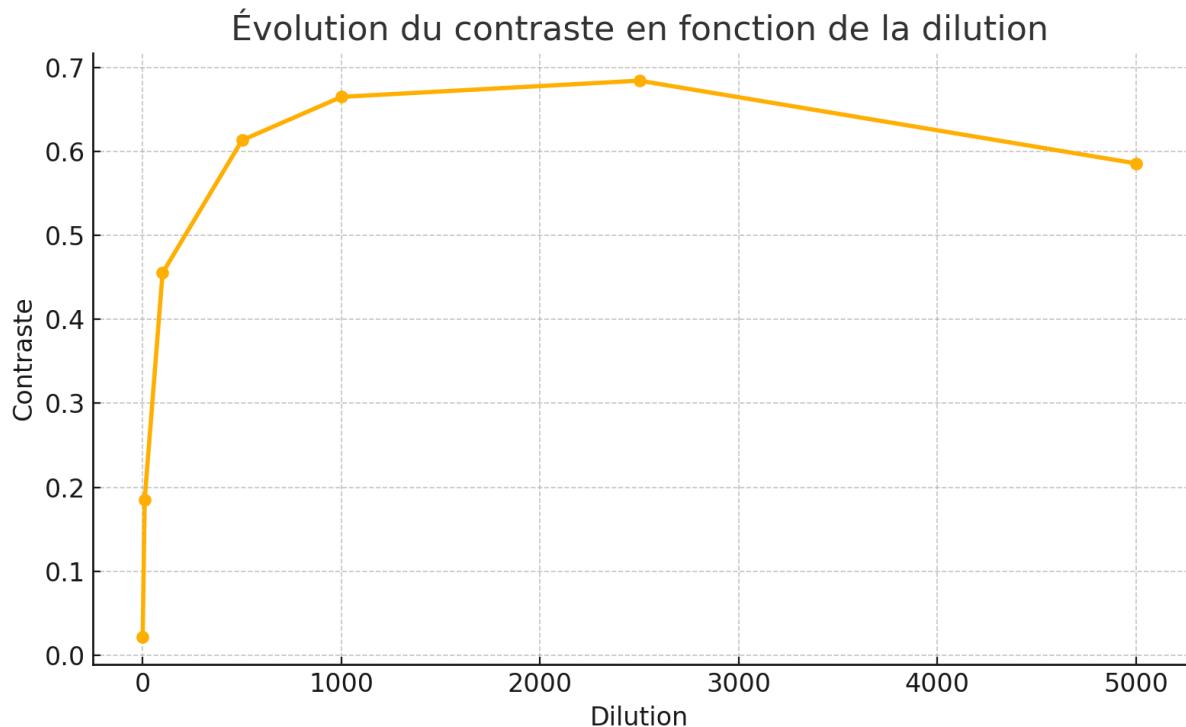


Figure 11 : Graphe du contraste en fonction des dilutions du lait entier (facteurs 0, 10, 100, 1000, 2500, 5000)

La courbe représentant le contraste en fonction de la dilution du lait. Dans les faibles dilutions (solution concentrée en lait), le contraste est faible, car la diffusion est dominée par le régime de Mie, dans lequel la polarisation a peu d'effet sur la lumière diffusée à 180° , entraînant une faible modulation du signal détecté. Au fur et à mesure que le lait est dilué, la concentration en particules diminue, et on se rapproche du régime de Rayleigh, où la dépendance angulaire de la polarisation devient marquée (selon une loi en $\cos^2\theta$), ce qui augmente le contraste observé. La courbe atteint un maximum autour d'une dilution de 2500, traduisant une zone optimale où la diffusion est suffisamment faible pour laisser passer la lumière, mais encore assez présente pour produire un contraste fort lié à la polarisation. La baisse du contraste observée au-delà de cette dilution est probablement liée à une limite instrumentale or, à très faible concentration, l'intensité lumineuse transmise devient trop faible pour être mesurée de façon fiable par la photodiode, ce qui réduit artificiellement le contraste apparent.

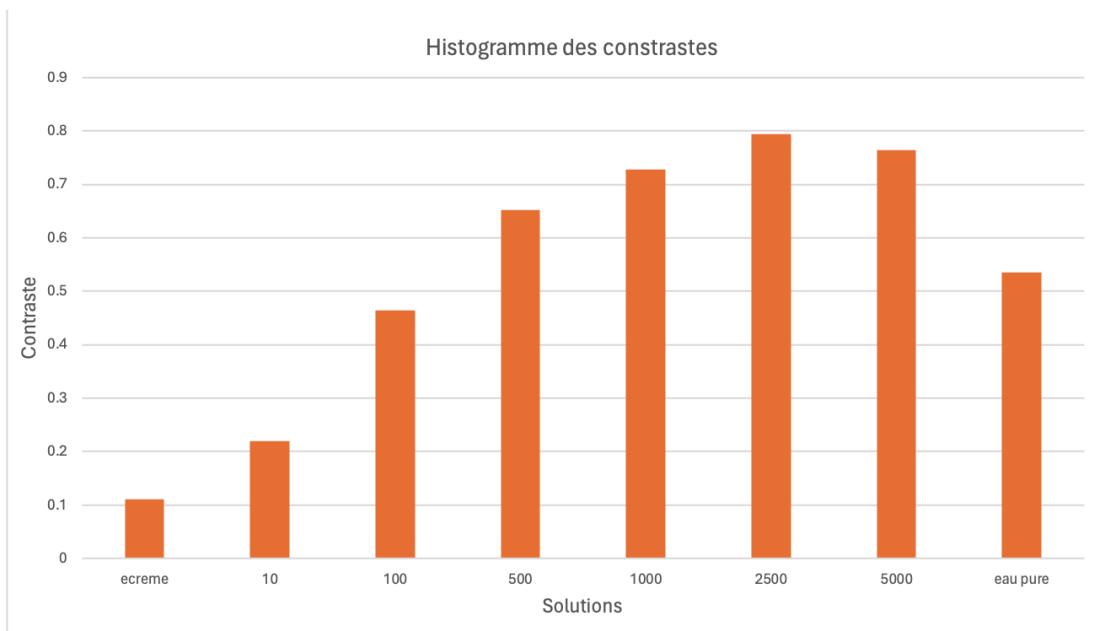


Figure 12 : Histogramme des contrastes pour différentes solutions

Soit la formule:

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

D'après la diffusion de Rayleigh, si on n'avait ni l'effet du multidiffusion ni l'influence de Mie, soit le cas d'un eau parfaitement propre, le $I_{\min}=0$ or, le contraste devrait être théoriquement égale à 1.

Dans cet histogramme on observe aussi comment le lait écrémé à un contraste inférieure à celui du lait entier. Ceci est explicable car le lait écrémé n'a pas de lipides.

Un autre facteur pouvant diminuer le contraste est l'effet de multidiffusion. En effet, une particule diffusante n'agit pas seule : la lumière qu'elle diffuse peut être rediffusée par d'autres particules dans le milieu, ce qui crée une chaîne de diffusions successives. Cet effet devient significatif lorsque la solution contient une forte densité de particules, comme dans le lait entier ou écrémé.

Cependant, plus la solution est diluée et donc transparente, moins la lumière a de chances d'interagir plusieurs fois. La probabilité de multidiffusion diminue, ce qui permet à la lumière diffusée de conserver plus fidèlement l'information directionnelle et de polarisation. Cela contribue à augmenter le contraste observé.

Il est toutefois important de noter que le régime de diffusion a un impact encore plus marqué sur la modulation. Par exemple, bien que le lait entier et le lait écrémé aient une concentration similaire, le contraste est plus élevé dans le lait écrémé car l'absence de lipides réduit la contribution du régime de Mie et rapproche le système du régime de Rayleigh, plus sensible à la polarisation.

3. Etude de la polarisation de la lumière diffusée

3.1. Montage et protocole

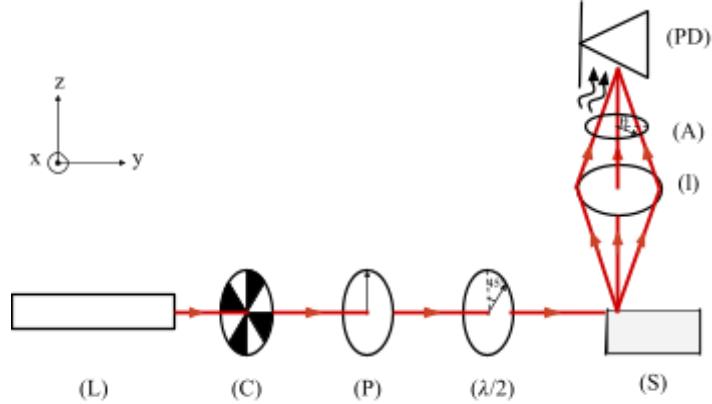


Figure 13 : Quatrième montage : laser L, chopper C, polariseur P, lame demi-onde $\lambda/2$, cuve avec solution C, lentille de collecte l, analyseur A, et photodiode amplifiée PD branchée à un oscilloscope.

Protocole

- Faire les réglages préliminaires et ajouter l'analyseur.
- Utiliser l'oscilloscope pour déterminer la tension crête à crête.
- Faire tourner l'angle de l'analyseur par incrément de 10 degrés sur 180 degrés et répéter la mesure.

Comme dit précédemment la lumière diffusée dans le cas de la diffusion de Rayleigh est polarisée linéairement tandis que pour le régime de Mie la lumière diffusée n'est pas polarisée. Pour différencier ces deux régimes on peut donc étudier la polarisation de la lumière diffusée.

Premier cas : le lait entier

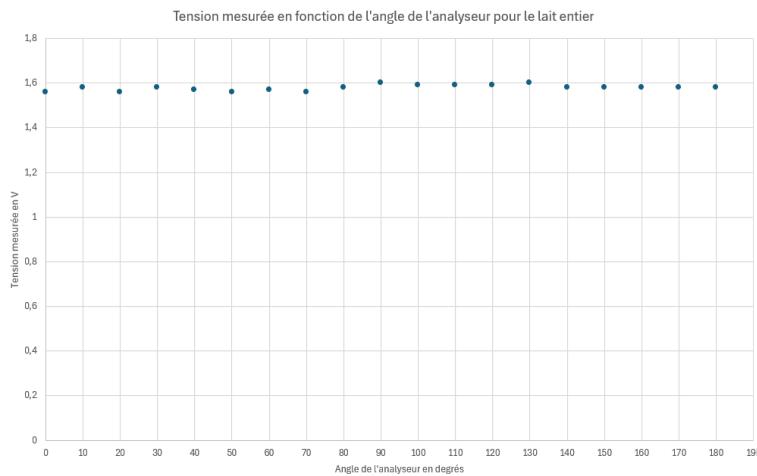


Figure 14 : Lait entier

Comme on peut le voir, la tension mesurée est à peu près constante en fonction de l'angle de polarisation. On en déduit que la lumière diffusée par le lait entier n'est pas polarisée, ce qui confirme notre hypothèse qui était que la diffusion pour le lait entier est majoritairement due aux molécules de lipides (grandes devant la longueur d'onde du laser) qui entraînent un régime de diffusion de Mie.

Deuxième cas : le lait écrémé

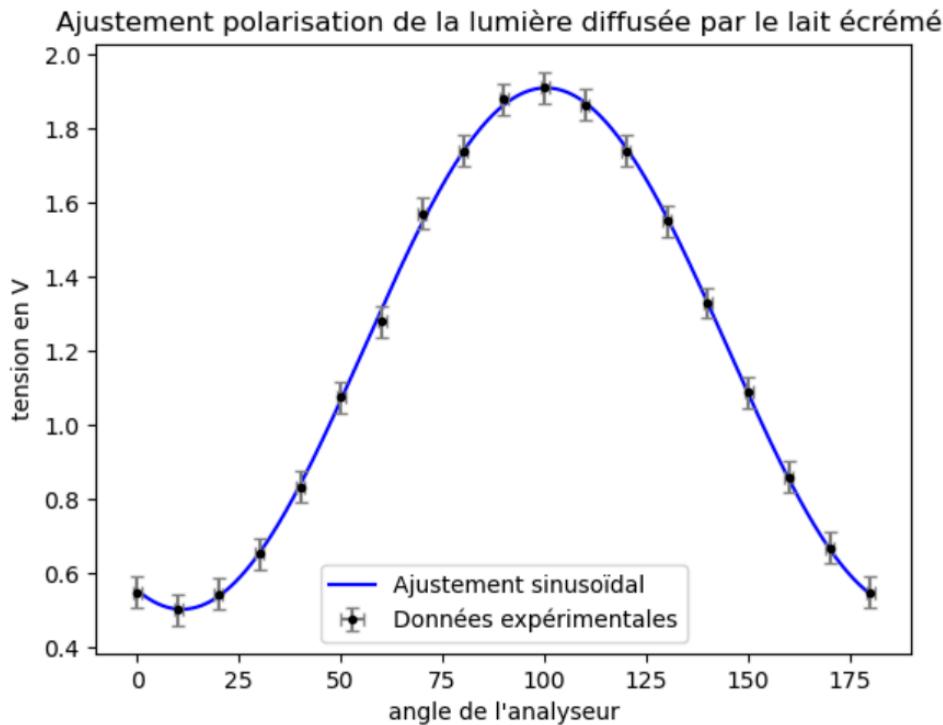


Figure 15 : Étude de la polarisation de la lumière diffusion pour le lait écrémé

Dans le cas du lait écrémé on s'attend à une diffusion qui mélange le régime de Rayleigh et le régime de Mie car il n'y a plus de lipides mais seulement des protéines qui sont responsables de la diffusion. Ces molécules ont des tailles variant du nm à quelques centaines de nm. C'est bien ce qu'on constate: il y a une partie de la lumière diffusée qui est polarisée et une partie qui n'est pas polarisée et qui correspond à l'offset de 0.5V. La tension suit une loi de Malus avec un offset.

Troisième cas : Solution diluée

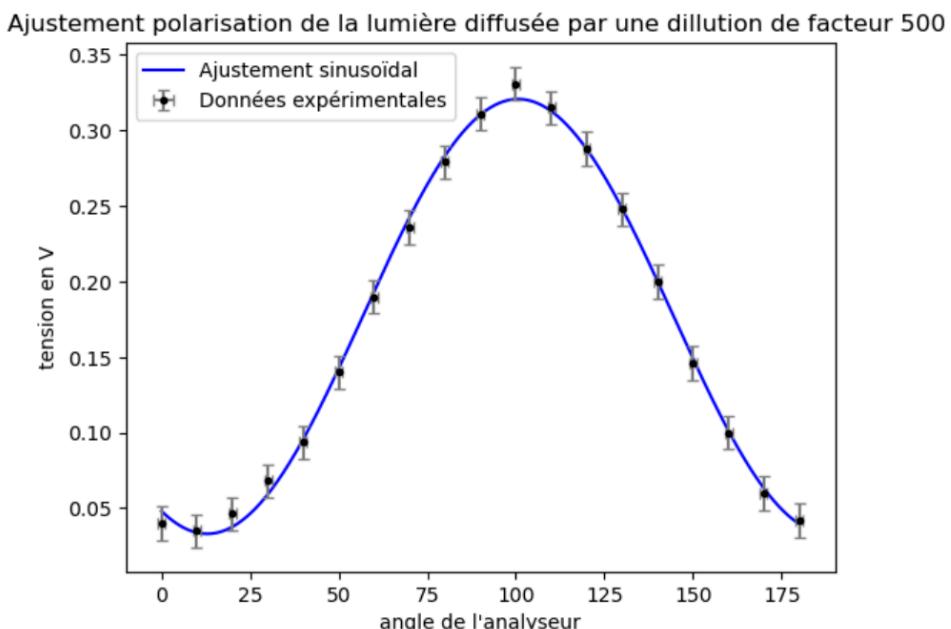


Figure 16 : Étude de la polarisation de la lumière diffusion pour le lait entier dilué

Pour la solution diluée on s'attend à ce que toute la lumière diffusée soit polarisée car on se situe dans le régime de Rayleigh. C'est bien ce qu'on observe : la tension suit une loi de Malus (un \cos^2) ce qui montre que la lumière est polarisée linéairement.

4. Incertitudes expérimentales

Pour calculer nos incertitudes expérimentales nous avons pris la plus petite variation détectable par l'oscilloscope lors de la mesure VPP, cette valeur dépend du calibre de l'oscilloscope et elle n'est donc pas la même pour toutes les mesures (appelons cette valeur U_{min}). En plus de cette incertitude nous avons ajouté le bruit électronique lié à l'utilisation de la photodiode amplifiée qui était d'environ 10mV (appelons cette valeur U_{bruit}).

$$\text{On a donc } \Delta U = \sqrt{U_{min}^2 + U_{bruit}^2}$$

VI Conclusions

1. Conclusion

Nos expériences nous ont bien permis d'observer et de différencier les régimes de Mie et de Rayleigh. Nous avons observé différentes solutions ce qui nous a permis de mettre en évidence certaines caractéristiques de chaque régime. Pour le régime de Rayleigh nous avons observé la dépendance sinusoïdale avec la polarisation de la lumière incidente ainsi que la polarisation de la lumière diffusée. À contraria pour le régime de Mie nous avons observé une diffusion qui ne varie pas selon des modèles simples selon l'angle de polarisation de la lumière incidente. Nous avons également observé que la lumière diffusée n'est pas polarisée dans le régime de Mie.

2. Limites et améliorations

Mesure de la photodiode

D'une part, la photodiode n'est pas suffisamment sensible pour détecter des intensités très faibles. D'autre part, le bruit électronique masque ces faibles signaux, rendant leur détection imprécise comme dans le cas de l'eau distillée.

Problème des bords

Le bord de la cuve diffuse beaucoup de lumière vers le haut. Pour minimiser cet effet, on a noirci les bords avec un feutre noir.

Solution envisageable :

Le rajout d'un diaphragme pourrait permettre de sélectionner que la lumière diffusée par la solution dans la cuve.

Effet de multi-diffusion et d'absorption

L'effet de multidiffusion est compliqué à supprimer particulièrement pour les solutions qui diffusent beaucoup, on la minimise en pointant le laser le plus proche possible de la surface. Pour que le niveau soit toujours au plus proche de la surface une fois le laser fixé, on mesure à chaque fois le même volume avec une seringue ce qui crée des incertitudes.

Solution envisageable :

Utilisation d'une pipette pour plus de précision.

Bruit électronique

Le bruit électronique masque les faibles signaux.

Solution envisageable :

Utiliser une détection synchrone pour moyenner le bruit électronique et pouvoir effectuer des mesures plus précises avec l'eau notamment.

3. Perspectives

Afin de continuer à étudier la diffusion il pourrait être intéressant de vérifier la dépendance entre l'intensité et la longueur d'onde ($I \propto 1/\lambda^4$). Il serait également intéressant de reproduire l'expérience avec plus de dilutions afin d'étudier la relation entre le facteur de dilution et l'intensité diffusée.

VII Remerciements

Nous remercions nos encadrants M. C. Bonnet, M. E. Cottancin et M. G. Cagnoli pour leur accompagnement.

VIII Bibliographie

Katsumata, T., Aizawa, H., Komuro, S., Ito, S., & Matsumoto, T. (2020, June 23). *Quantitative analysis of fat and protein concentrations of milk based on fibre-optic evaluation of back scattering intensity*. International Dairy Journal.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958694620301138>

Types of light scattering. Oxford Instruments. (n.d.).

<https://andor.oxinst.com/learning/view/article/scattering-of-light-an-overview-of-the-various-forms-of-light-scattering>

Wikimedia Foundation. *Théorie de Mie*. Wikipedia.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_de_Mie

Wikimedia Foundation. *Rayleigh scattering*. Wikipedia.

https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_scattering

Wikimedia Foundation. *Milk*. Wikipedia.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Milk>

IX Annexe

1. Valeurs nutritionnelles

Le tableau ci-dessous résume les valeurs nutritionnelles pour le lait entier et le lait écrémé utilisés dans les expériences effectuées.

Valeurs nutritionnelles moyennes pour 100g	Lait entier CARREFOUR CLASSIC'	Lait écrémé CARREFOUR CLASSIC'
Matieres grasses (g) Dont acides gras saturés(g)	3,6 2,2	- -
Glucides (g) Dont sucres (g)	4,8 4,8	4,8 4,8
Protéines (g)	3,3	3,3
Sel (g)	0,13	0,10
Calcium (mg)	120	120

2. Liste de matériel

Équipement	Référence ou spécifications le cas échéant
Laser HeNe	632 nm
Photodiode	THORLABS SM1PD1A
Photodiode amplifiée	THORLABS PDA100A2
Densité optique	THORLAB SNE10A
Lentille de collecte	THORLABS LB1471
Lentille de focalisation	THORLABS LB1092
Résistance de charge	1 MΩ
Breadboard optique	1m × 1m au minimum
Polariseur (×2)	didalab
Lame demi-onde	Adaptée à 632 nm
Cuve transparente en verre	2 cm de longueur × 1 cm de largeur
Seringue	100mL, grad = 1mL
Support cuve	Au choix
Chopper	Au choix

Oscilloscope	Au choix
Bechers, fioles	Au choix
Divers solutions	Voir annexe 1
Eau distillée	-