

Diffusion anormale:

Etude des vitraux de Pierre Soulagés

TALLA DIAGNE & FABIEN TRAYNARD

IOGS Rhône-Alpes

Ce projet étudie la diffusion anormale de la lumière à travers les vitraux de Pierre Soulagés à l'abbaye de Conques. En utilisant des techniques optiques avancées, nous avons mesuré la fonction de dispersion de point (PSF) et analysé les histogrammes de luminance pour comparer ces vitraux à des matériaux traditionnels (papier, soie). Les résultats révèlent des distributions non gaussiennes en transmission sous éclairage collimaté, mettant en évidence une diffusion anormale. Des méthodes de traitement d'image (stacking, HDR) ont été employées pour améliorer la précision des mesures. Cette étude contribue à une meilleure compréhension des propriétés optiques uniques des vitraux de Pierre Soulagés, ouvrant des perspectives pour leur conservation et valorisation.

Mots-clés: Optique appliquée, PSF, diffusion anormale, histogramme de luminance

1. Introduction

Les vitraux de Pierre Soulagés à l'abbaye de Conques se distinguent par leur interaction complexe avec la lumière générant des effets de diffusion anormale. Bien que des TP Projets récents à l'IOGS ont déjà étudié certaines propriétés de ces vitraux, il reste encore des zones d'ombres. Ce projet vise à combler cette lacune en explorant les mécanismes de diffusion de la lumière à travers ces vitraux, en mesurant la PSF et en analysant les histogrammes de luminance. Des configurations expérimentales variées (réflexion, transmission, éclairages collimatés et lambertiens) ont été testées, et des techniques de traitement d'image (stacking, HDR) ont été utilisées pour améliorer la précision des mesures. Les résultats obtenus apportent un éclairage nouveau sur les propriétés optiques uniques de ces vitraux et leur comportement sous différents éclairages.

2. Chapitres de rappels

Dans cette première partie de ce rapport, nous tenons à rappeler quelques notions qui seront essentielles pour la bonne compréhension de la suite

2.1. La PSF

La Point Spread Function (PSF) est un concept central en optique et en traitement d'image. Elle décrit la réponse d'un système optique à une source lumineuse ponctuelle. C'est une fonction à deux dimensions $PSF(x, y)$ qui peut être exprimée comme une convolution entre la source lumineuse et la réponse du système.

Dans le cas des vitraux de Pierre Soulagés, la PSF est influencée par : la structure interne du matériau (rugosité, hétérogénéité), les conditions d'éclairage (collimaté ou lambertien), l'angle d'incidence de la lumière.

2.2. Histogrammes de luminance

Un histogramme de luminance représente la distribution de l'intensité lumineuse dans une image. Il permet d'analyser les propriétés de diffusion et de transmission de la lumière à travers un matériau. Une distribution gaussienne indique une diffusion

homogène, tandis qu'une distribution asymétrique ou multimodale peut révéler une diffusion anormale.

2.3. Traitement d'image : Stacking et HDR

Le stacking et la création d'images HDR (High Dynamic Range) sont des techniques de traitement d'image utilisées pour améliorer la qualité et la précision des mesures. Le stacking consiste à superposer plusieurs images d'une même scène pour réduire le bruit et améliorer le rapport signal sur bruit (SNR). Une image HDR combine quant à elle plusieurs images prises à différents temps d'exposition pour capturer une plage dynamique étendue. Elle permet entre autre une réduction du bruit dans les images, une amélioration de la précision des mesures de luminance et une capture de détails dans les zones sombres et claires d'une scène.

3. Travail effectué

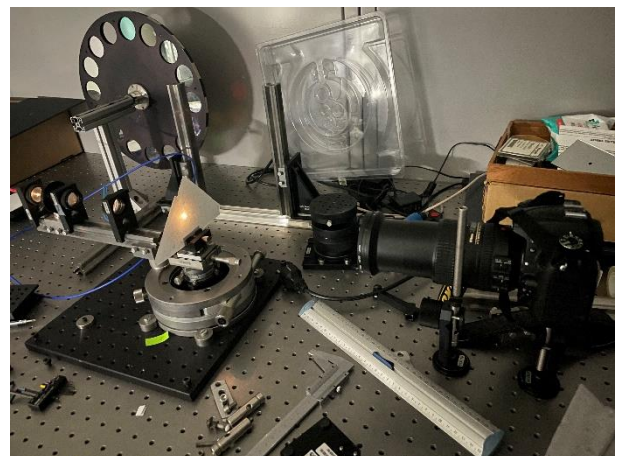


Figure 1. Photographie du setup de mesure de PSF en transmission avec un éclairage collimaté.

3.1. Montage expérimental

Le banc optique, illustré à la Figure [1], est constitué d'une source fibrée et d'un système de lentilles permettant de générer un faisceau lumineux collimaté ou focalisé. Ce faisceau est dirigé vers le vitrail, où il interagit avec la surface et la structure interne du matériau. Une caméra Nikon est utilisée pour capturer les images résultantes, permettant d'analyser la diffusion et la transmission de la lumière à travers le vitrail. L'ensemble est monté sur une plateforme stabilisée pour assurer des mesures précises et reproductibles.

3.2. Acquisition et traitement des données

Des images ont été prises à différents temps d'exposition (1/10e, 1, 5, 15 secondes) pour créer des images HDR. Voyant que ce n'était parfois pas suffisant car les images étaient encore saturées, il a fallu également utiliser une densité optique OD3 pour diviser le temps d'exposition par 1000. Des mesures de PSF ont été réalisées sur les vitraux, ainsi que sur des matériaux de référence (feuille de papier par exemple). Les images ont été traitées à l'aide de logiciels tels que GIMP et Python pour effectuer le stacking et créer des images HDR. Les histogrammes de luminance ont été tracés pour analyser la distribution de la lumière. L'ensemble des codes Python rédigés peut être retrouvé en annexe.

Pour obtenir une image de PSF exploitable, on commence donc par superposer plusieurs prises de vue avec des temps d'exposition variés. Cette étape nécessite un alignement précis des motifs au pixel près. On prend ensuite l'image la plus exposée (celle où une large zone centrale est saturée) et on l'utilise comme base.

Le processus consiste à identifier les zones non saturées de cette première image, à les sélectionner et à les effacer dans les images suivantes. On répète cette opération pour chaque niveau d'exposition, créant ainsi une pile d'images où chaque pixel est soit lumineux mais non saturé, soit transparent dans les zones sombres (révélant ainsi l'image sous-jacente plus exposée).

Une fois la pile constituée, on ajuste la luminosité de chaque image en la réduisant proportionnellement à l'inverse du temps d'exposition (1/exposition). Le résultat est une image globalement sombre, mais qui évite la saturation dans les hautes lumières et limite le bruit dans les zones sombres.

Enfin, pour rendre l'image plus lisible et en faire ressortir les détails, on applique une transformation non linéaire : au lieu d'un simple ajustement linéaire de la luminosité, on utilise une échelle proche du logarithme de la luminance. C'est cette dernière étape, souvent ajustée à l'œil, qui complique l'exploitation précise des mesures quantitatives.

4. Résultats

4.1. Analyse des histogrammes de luminance

Les histogrammes de luminance révèlent des comportements optiques distincts selon le type d'éclairage utilisé. En particulier, les distributions observées en transmission avec un éclairage collimaté diffèrent significativement de celles obtenues avec un éclairage lambertien :

Avec un faisceau collimaté :

- En transmission : Les histogrammes présentent des courbes asymétriques avec une queue de distribution étirée vers les hautes intensités

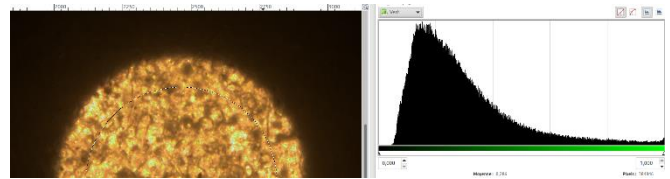


Figure 2. Histogramme de l'image du vitrail avec un faisceau collimaté, mesure en transmission

- En réflexion : Des distributions similaires, asymétriques et étirées, sont observées, confirmant que la diffusion anormale est un phénomène global, affectant à la fois la transmission et la réflexion

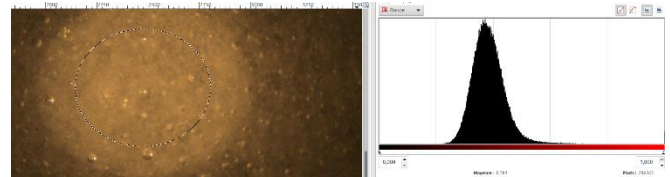


Figure 3. Histogramme de l'image du vitrail avec un faisceau collimaté, mesure en réflexion

Avec un éclairage sphérique :

- En transmission : Les histogrammes montrent des distributions gaussiennes, caractéristiques d'une diffusion homogène et isotrope

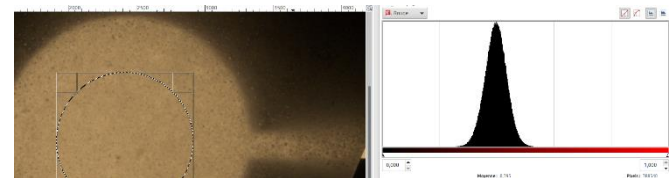


Figure 4. Histogramme de l'image du vitrail avec un éclairage lambertien, mesure en transmission

4.2. Mesures de PSF et influence de la focalisation

Pour mesurer la fonction de dispersion de point (PSF), nous avons d'abord procédé au stacking des images afin de réduire le bruit et d'améliorer la précision des mesures. En traçant le profil d'intensité, nous avons observé que la courbe obtenue était trop épaisse en cas de saturation, ce qui pourrait être dû à la taille du faisceau lumineux collimaté

Pour résoudre ce problème, nous avons refait les mesures en focalisant le faisceau directement sur le vitrail, ce qui a permis d'obtenir des résultats plus précis et plus fiables. La focalisation du faisceau a permis de réduire l'influence du fond sur la PSF, améliorant ainsi la précision des mesures. Cependant, des artefacts optiques ont été observés dans certaines configurations, nécessitant des ajustements supplémentaires pour optimiser les résultats. Ces artefacts pourraient être dus à des réflexions parasites ou à des imperfections dans l'alignement du système optique. (voir Figure 5)

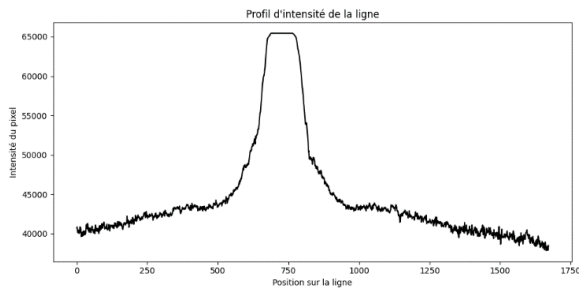
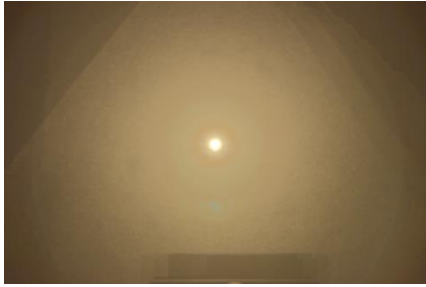


Figure 5. PSF avec un faisceau focalisé

4.3. Comparaison avec les matériaux de référence

Les résultats obtenus sur les vitraux à ceux des matériaux de référence (papier en l'occurrence ici). Alors que ces derniers présentent des distributions de lumière homogènes et prévisibles, les vitraux montrent des comportements optiques plus complexes, confirmant leur caractère unique.

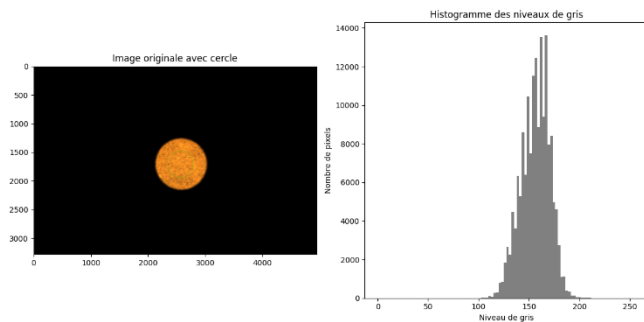


Figure 6. Histogramme de luminance d'une feuille de papier illuminé avec un faisceau collimaté, mesure en transmission

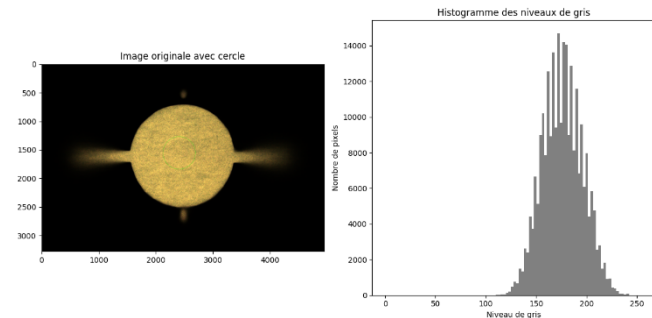


Figure 7. Histogramme de luminance d'une feuille de papier illuminé avec une sphère intégrante, mesure en transmission

Pour le papier, les histogrammes de luminance montrent des distributions gaussiennes, caractéristiques d'une diffusion homogène et isotrope. Sous éclairage collimaté (Figure 6) et avec une sphère intégrante (Figure 7), la lumière est répartie de manière uniforme, confirmant un comportement optique prévisible et standard. Ces résultats contrastent fortement avec ceux des vitraux.

4.4. Influence de l'épaisseur du vitrail

Pour étudier l'influence de l'épaisseur sur les propriétés optiques des vitraux, les morceaux ont été soigneusement superposés et l'espace entre eux a été rempli avec un mélange de sucre et d'eau jusqu'à saturation. Ce mélange a été choisi pour son indice de réfraction proche de celui du verre, permettant de minimiser les réflexions parasites aux interfaces entre les morceaux de vitrail. Cette méthode permet de simuler un matériau homogène d'épaisseur variable tout en conservant les propriétés optiques intrinsèques des vitraux.

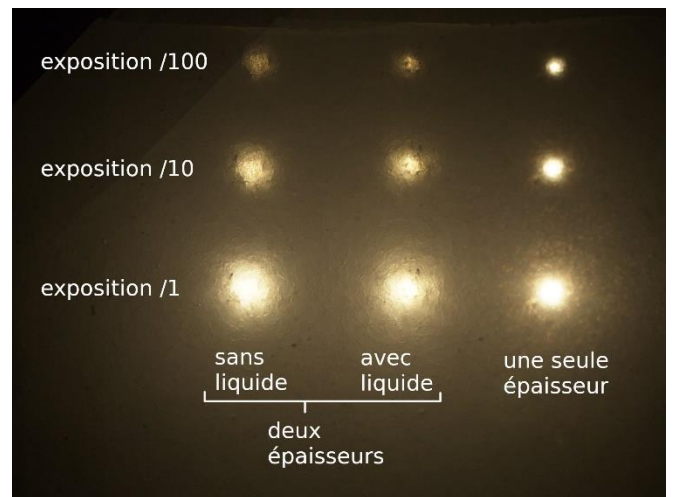


Figure 8. Faisceau lumineux sur le vitrail pour différents temps d'exposition de la caméra, puis en superposant 2 morceaux avec et sans sirop de glucose entre

La figure 8 ci-dessus illustre clairement cette étude, montrant les résultats pour différentes configurations : avec et sans liquide d'indice, ainsi que pour une et deux épaisseurs de vitrail. Les images révèlent que l'ajout du liquide d'indice réduit les réflexions et homogénéise la transmission de la lumière, tandis que l'augmentation de l'épaisseur étale la lumière, surtout en l'absence de liquide. Cependant, loin du centre, les comportements sont similaires, suggérant que les pertes de lumière sont faibles dans les zones périphériques.

Dans une seconde partie, des mesures de flux lumineux ont été réalisées sous éclairage collimaté. Le flux a été normalisé par rapport au flux réfléchi lambertien pour permettre une comparaison directe entre les différentes configurations. Les résultats, illustrés dans la figure ci-dessous, montrent l'évolution du flux en fonction de l'épaisseur du verre (en mm).

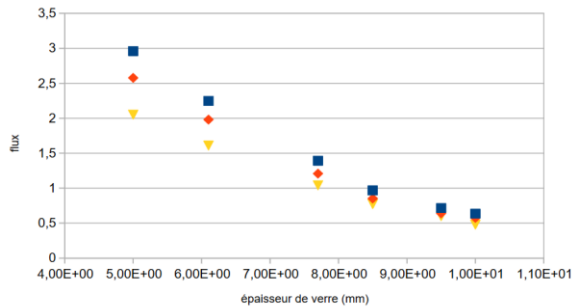


Figure 9: Flux collimaté en fonction de l'épaisseur, normalisé par rapport au flux réfléchi lambertien

Le flux lumineux diminue progressivement avec l'augmentation de l'épaisseur du verre, ce qui est attendu en raison de l'absorption et de la diffusion accrues dans un matériau plus épais. Cependant, cette diminution n'est pas linéaire, suggérant que les propriétés optiques du verre (comme la rugosité des interfaces ou les hétérogénéités internes) jouent un rôle significatif dans la transmission de la lumière. Les courbes pour les différentes couleurs (Rouge, Vert, Bleu) montrent des comportements similaires, mais avec des variations d'intensité. Par exemple, le flux pour la lumière bleue diminue plus rapidement que pour la lumière rouge, ce qui pourrait être dû à une absorption plus forte dans le verre pour les longueurs d'onde plus courtes. Néanmoins, d'après la figure 10, cette dépendance à la longueur d'onde semble disparaître avec un éclairage lambertien.

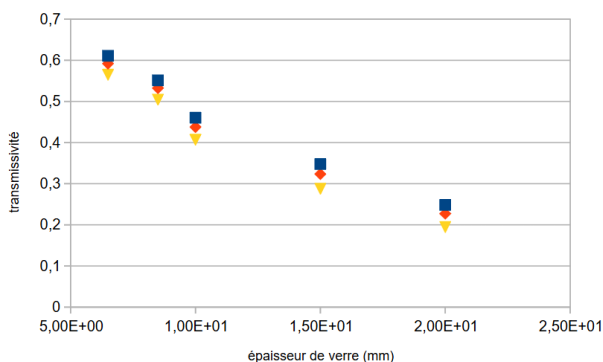


Figure 10: Luminance transmise en fonction de l'épaisseur, éclairage lambertien

4.5. Influence des angles d'incidence et d'observation

Dans la même dynamique que dans la partie précédente, nous avons cherché à déterminer comment l'angle d'incidence peut faire varier la luminance mesurée. En faisant des mesures jusqu'à 15 degrés avec un faisceau collimaté large, la quantité de lumière transmise décroît nettement avec l'angle. Et pareil que dans la dernière partie, la couleur semble également avoir une influence

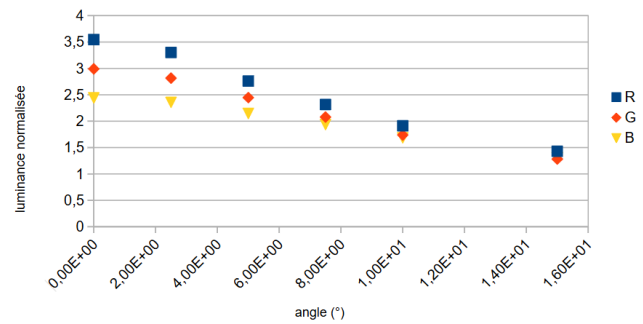


Figure 11: Luminance moyenne transmise en fonction de l'épaisseur, lumière collimatée, normalisée par rapport au flux réfléchi lambertien

sur la variation : le Rouge semble décroître un peu plus que le Bleu. On obtient une courbe identique en modifiant cette fois l'angle d'observation (ie de la caméra par rapport au vitrail).

5. Conclusion

Ce TP projet a permis d'explorer encore plus en profondeur les propriétés optiques uniques des vitraux de Pierre Soulages. En comparaison, les matériaux traditionnels comme le papier montrent des distributions gaussiennes, caractéristiques d'une diffusion homogène. Les techniques de traitement d'image (stacking, HDR) ont amélioré la précision des mesures, bien que des ajustements manuels aient limité leur exploitation quantitative. L'étude de l'épaisseur a montré que l'augmentation de celle-ci étale la lumière, surtout sans liquide d'indice, mais les pertes restent faibles en périphérie. Les mesures de flux ont confirmé l'influence de l'épaisseur et des propriétés optiques du verre sur la transmission.

Les objectifs ont été atteints, ouvrant des perspectives pour la conservation et la valorisation des vitraux. Pour aller plus loin, il serait intéressant d'étudier l'impact de l'angle d'incidence et d'améliorer les techniques de mesure pour des analyses quantitatives plus précises.

6. Remerciements

Nous souhaitons tout d'abord remercier Simon Milcent et Kevin Vynck de l'Institut Lumière Matière (ILM) de Lyon pour leurs précieuses contributions à notre étude. Nous remercions Mathieu Hébert et Thierry Fournel pour leurs conseils avisés, leur encadrement tout au long du projet et leurs retours critiques. Nous remercions également beaucoup Nicolas Aimé pour son aide précieuse dans la mise en place et l'optimisation du montage expérimental.

7. Références

- [1] Vanina AMBLAS, Alexandre BEBON
"Exploration des propriétés optiques d'un vitrail de l'abbaye de Conques"