

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة فرحات عباس – سطيف –1-

Université Ferhat Abbès – Sétif -1-

THESE

Présentée à l'Institut d'Optique et Mécanique de Précision

Pour l'obtention du diplôme de

Doctorat en science

Option : Optique et Mécanique de Précision

Présentée par :

M^{elle} Adjouadi Noura

Thème :

**Influence de l'état de surface des pare-brises sur la
visibilité des conducteurs**

Soutenue le : 14/05/2015

Devant le jury composé de :

M. Mohamed Bouafia	Prof. U. Ferhat Abbès Sétif	Président
M. Naamane Laouar	MCA U. Ferhat Abbès Sétif	Rapporteur
M. Chabane Bousbaa	Prof. U. Ferhat Abbès Sétif	Rapporteur
M. Bouzid Abderrazak	Prof. U. Bordj-Bou-Arréredj	Examineur
M. Zoheir Rouabah	MCA U. Bordj-Bou-Arréredj	Examineur
M. Sofiane Mahtout	MCA U. A. Mira Béjaia	Examineur

Remerciements

Remerciements

Louange à Dieu, Puissant et Majestueux, le tout-Miséricordieux et qui grâce à lui j'ai pu achever ce travail.

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués aux laboratoires des Matériaux Non Métalliques (LMNM) et d'Optique Appliquée de l'université de Sétif-1-. A ce titre, je tiens à remercier :

Très vivement monsieur **N. LAOUAR**, Maître de Conférences classe A et monsieur **C. BOUSBAA**, Professeur à l'université de Sétif -1-, pour avoir dirigé ce travail, pour leur confiance ainsi que pour leurs conseils, leurs suivis et leurs disponibilités et m'avoir supporté le long de ce travail.

Monsieur **M. BOUAFIA**, Professeur à l'université de Sétif-1-, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury et pour l'intérêt qu'il a manifesté pour ce travail.

Messieurs **A. BOUZID**, Professeur à l'université de Bordj-Bou-Argeridj, **Z. ROUBAH** et **S. MAHTOUT**, Maîtres de Conférences classe A, aux universités de Bordj-Bou-Argeridj et de Bejaïa respectivement pour l'honneur qu'ils m'ont fait pour participer au jury et pour l'intérêt qu'ils ont manifesté pour ce travail.

Monsieur **N. BOUAOUADJA**, Professeur à l'université de Sétif-1-, Directeur du Laboratoire des Matériaux Non Métalliques (LMNM), pour son aide et pour la documentation qu'il m'a fournie ainsi que ses conseils et sa contribution à la correction de ce mémoire.

Messieurs **M. HAMIDOUCHE** et **H. OSMANI**, Professeurs à l'université de Sétif-1-, pour leurs conseils et leurs encouragements pour la persévérance dans ce travail.

Je ne peux oublier, bien sûr, tous les membres du Laboratoire des Matériaux Non Métalliques (LMNM) de l'université Sétif-1-, pour leurs aides et leurs conseils.

Messieurs **R. ALKAMA**, Professeur, et **K. IDJDARENE**, Maîtres de Conférences classe A, à l'université de Bejaïa, pour leur aide à la réalisation de cette thèse.

Remerciements

Mes parents, mes frères et sœurs pour leur patience et leur présence à mes côtés à chaque fois que j'ai besoin d'eux. Sans oublier mes amies **W. SLIMANI, S. MOUASSA, S. HADJI** et **F. ACHOURI** qui m'ont témoigné leur soutien.

Je tiens également à remercier tous ceux qui ont, de près ou de loin, participé à l'élaboration de ce travail.

Dédicaces

A mes parents;
A tous mes frères et sœurs;
A toute ma famille;
A tous mes collègues et amis.

Sommaire

Introduction générale.....1

Chapitre 1 : Erosion du verre

1.1 Introduction3

1.2 Historique3

1.3 Formation du verre3

1.4 Structure du verre4

1.5 Domaines d'applications du verre5

1.6 Pare brise5

 1.6.1 Cintrage par affaissement6

 1.6.2 Presse plieuse.....6

 1.6.3 Les zones du pare brise.....7

 1.6.4 Défauts et formes de fissure sur le pare brise.....8

 1.6.5 Facteurs de dégradation de la visibilité du pare brise.....9

1.7 Propriétés mécaniques du verre.....10

 1.7.1 Dureté10

 1.7.2 La ténacité.....12

1.8 Propriétés optiques du verre13

 1.8.1 Indice de réfraction.....13

 1.8.2 Transmission.....14

1.9 Erosion du verre14

 1.9.1 Mécanismes d'arrachement de matière pendant l'érosion15

 1.9.1.1 L'arrachement par la formation et la propagation des fissures.....15

 1.9.1.2 L'arrachement par effritement.....16

 1.9.1.3 L'arrachement par creusement et écaillage16

 1.9.2 Paramètres qui influencent l'érosion16

 1.9.2.1 Influence des paramètres liés à la cible et à la particule.....17

 1.9.2.2 Influence des paramètres liés aux conditions d'érosion18

 1.9.3 Quantification de l'érosion19

 1.9.4 Appareils souffleurs de sable.....21

1.10 Conclusion.....23

Chapitre 2 : La diffusion de la lumière par des surfaces rugueuses

2.1 Introduction	24
2.2 La diffusion de la lumière	24
2.2.1 Les types de diffusion de la lumière.....	24
2.2.2 Diffusion de la lumière par des particules.....	25
2.2.2.1 La théorie de lord Rayleigh	25
2.2.2.2 La théorie de Mie	27
2.2.3 Diffusion de la lumière par des surfaces rugueuses	29
2.2.3.1 Modèles mathématiques de la diffusion de la lumière par une surface rugueuse.....	31
2.2.3.2 Montages de mesure de diffusion de lumière par surfaces rugueuses	35
2.3 Mesure de la visibilité à travers les pare brise.....	36
2.3.1 Le hazemètre	37
2.3.2 Techniques de l'indice de la lumière perdue (en anglais stray light index (SLI))	39
2.3.2.1 Analyseur de lumière perdue(en anglais Stray light analyser).....	40
2.3.2.2 Technique du diaphragme angulaire	42
2.3.2.3 Analyseur de lumière perdue portatif.....	44
2.4 Conclusion.....	45

Chapitre 3 : Partie expérimentale

3.1 Introduction	46
3.2 Matériaux utilisés	46
3.3 Dispositif de sablage	47
3.4 Détermination de la densité des impacts de sable	48
3.5 Mesure de la Rugosité	52
3.6 Mesure de la transmission avec le microdensitomètre.....	53
3.6.1 Incidence normale à la surface	54
3.6.2 Incidence oblique à la surface	58
3.7 La diffusion transmise de la lumière en fonction d'angle de diffusion.....	60
3.7.1 Fonctionnement du montage	61
3.7.2 La diffusion de la lumière transmise en incidence normale.....	61
3.7.3 La diffusion de la lumière transmise en incidence oblique	68

Sommaire

3.8 La diffusion de la lumière en réflexion	70
3.9 Détermination de la limite de visibilité	73
3.9.1 La détection surfacique de la lumière diffusée en transmission.....	73
3.9.2 La détection surfacique de la lumière diffusée en réflexion	83
3.9.3 Détermination de la limite du flou	87
3.10 Conclusion.....	89
Conclusion générale	91
Bibliographie	93

INTRODUCTION GENERALE

Le verre est un matériau parmi les plus anciens qu'a connu l'humanité. Il existe dans la nature sous forme de roches vitreuses et de magmas comme il est mentionné par Barton et Guillemet (2005). Il a été utilisé comme moyen de chasse et de beauté par les hommes préhistoriques. L'élaboration du verre a été découverte au hasard par les phéniciens. Il est utilisé dans la vie en objet à usage quotidien. Le premier procédé d'élaboration est le soufflage pour produire les bouteilles, les coupes,...etc. Par la suite, plusieurs techniques sont connues pour fabriquer diverses formes de verres. Le verre plat, obtenu par étirage ou verre flot est utilisé pour le vitrage soit pour bâtiment ou véhicule.

Le pare-brise est un vitrage automobile qui est conçu pour assurer la sécurité des passagers et la bonne vision pour sa transparence. Il est apparu pour la première fois en verre ordinaire qui était dangereux parce qu'il éclatait sous un choc. Par la suite, il a été remplacé par le pare-brise feuilleté pour éviter les coupures en cas de bris de glace. Le verre feuilleté est un verre composé de deux feuilles de verre et d'une feuille de polymère qui est le Polyvinyle Butyral (PVB). Cette dernière sert à maintenir les débris de verre en cas de choc. Or, selon Pronck et al.(2006), il est continuellement affronté à des jets de particules, tels que les pierres, les cailloux et la grêle, qui donne des impacts tels que l'œil de bœuf, étoile, ail d'abeille, feuille de trèfle, demi-lune ou combinaison. Ces impacts sont les uns parmi les formes d'endommagement. Ce dernier peut se produire par le sablage qui cause l'érosion du verre. Celle-là est un moyen de décor des verres et des miroirs, mais elle représente un aspect néfaste dans d'autres domaines tel que l'aéronautique, l'hydropneumatique, dans les turbines à gaz, les valves des conduites de pétrole et les pare-brise des voitures. Elle est caractérisée par la dégradation de l'état de surface. Dans les vitrages automobiles, la visibilité est très importante dans la conduite qui sera détériorée pour les surfaces endommagées. Ce phénomène indésirable est appelé flou (en anglais "windscreen Haze"). Il est dû à la diffusion de la lumière pendant son interaction avec cette surface dégradée. La diffusion est définie comme étant le produit de la lumière avec un milieu dont les particules sont réparties d'une façon inhomogène. Ce phénomène naturel se produit lorsque la lumière rencontre des particules sur sa trajectoire. Ces particules peuvent être de dimensions inférieures à la longueur d'onde de la lumière. La diffusion est expliquée dans ce cas, par la théorie de Rayleigh. Si elles sont de dimensions comparables ou supérieures à la longueur d'onde, la diffusion est expliquée par la théorie de Mie. La diffusion de Rayleigh dépend de longueur d'onde de la lumière à la puissance quatre contrairement à la diffusion de Mie. Plusieurs

INTRODUCTION GENERALE

travaux scientifiques traitent la diffusion de la lumière par les surfaces de différents matériaux. Ces auteurs ont donné des approches mathématiques à ce phénomène sous des conditions bien choisies. Ils ont trouvé que l'intensité diffusée dépend de la longueur d'onde de la lumière, de la rugosité de la surface et la distance entre la surface et le point d'observation. D'autres auteurs ont étudiés la lumière diffusée par les surfaces du verre en particulier le pare-brise endommagé. Ces études sont menées dans différentes régions à travers le monde où les scientifiques ont trouvé que les différents endommagements sont le résultat de différentes conditions climatiques et d'environnement. Sauf que les pare-brises érodés par les particules de sable n'a pas été traité auparavant.

Aux temps des grandes tempêtes du sable dans le sud algérien, les pare-brises sont gravement endommagés par impact de particules de sable. Cet endommagement est causé par l'arrachement de matière par écaillage selon Bousbaa (2004). Ce qui rend la visibilité à travers ces pare-brise floue qui est dus à la diffusion de la lumière. Ceci peut être un facteur majeur dans les accidents de circulation. L'objectif de notre travail est d'étudier la diffusion de la lumière par des surfaces du verre endommagées par le sable et les paramètres qui l'influencent, ainsi que l'influence du sablage sur la visibilité. Notre but est de modéliser le phénomène de diffusion de la lumière engendré par les surfaces endommagées suite à l'impact par particules de sable.

Ce travail est structuré en trois chapitres qui sont brièvement décrits ci-dessous. Le premier chapitre présente un rappel sur le verre, sa constitution et ses propriétés mécaniques et optiques. Un rappel sur les pare-brises, leur façonnage et les défauts qui peuvent exister. Nous présentons aussi quelques notions de l'érosion, ses mécanismes, les paramètres qui l'influencent et les différents souffleurs qui permettent d'obtenir des surfaces érodées.

Le second chapitre est consacré à la diffusion de lumière et ses quelques théories. Nous présentons les différents modèles mathématiques de l'intensité diffusée par une surface rugueuse proposés dans la littérature ainsi que les différentes méthodes de mesure de diffusion de lumière. Il illustre aussi les quelques techniques qui mesurent la visibilité.

Le dernier chapitre concerne la partie expérimentale de notre étude, les résultats et leurs discussions. Ce travail est couronné par une conclusion générale qui résume l'essentiel de nos résultats.

Chapitre 1

Erosion du verre

1.1 Introduction

Le verre est un matériau dur et transparent. Il est fortement présent dans la vie quotidienne, vu ses qualités intéressantes et son coût réduit. Depuis sa découverte, le verre présente un grand intérêt pour l'homme. Il est utilisé en chimie, en médecine, en lunetterie, en astronomie, en bâtiment, en automobile et en télécommunication...etc. Ses propriétés mécaniques qui gèrent son utilisation sont la dureté et la ténacité. La transparence est la propriété optique la plus importante du verre. Il possède aussi d'autres propriétés optiques telles que l'indice de réfraction et la transmission optique. Mais il possède certains défauts que l'homme essaye de remédier et cherche à améliorer ses qualités de surface.

1.2 Historique

Le verre a été connu par les Egyptiens environ 7000 ans A-J. Au début, il a été utilisé comme bijoux et objets décoratifs. Par la suite, il a été moulé pour la vaisselle. Le verre existait dans la nature sous deux formes selon J. Barton et C. Guillemet (2005) :

- Le magma silicaté qui forme le manteau terrestre. Il conduit à des roches en partie vitreuse après son expulsion à travers les volcans.
- L'état vitreux de certains minéraux s'obtient sous l'action soit de la chute de météorite appelé tectite soit de la foudre appelé fulgurites.

L'élaboration du verre a été découverte au hasard. En voulant traiter la surface des poteries en matière fortement siliceuse, les artisans ont réalisé un mélange proche de l'eutectique $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$, par des cendres riches en potasse. Ainsi, l'élaboration du verre a été développée et améliorée à travers plusieurs pays par son utilisation dans la vie quotidienne comme ustensiles, vitres,...etc.

1.3 Formation du verre

Selon Zarzyky J. (1982): « le verre est un solide non cristallisé qui présente le phénomène de transition vitreuse ».

Le verre est obtenu de la phase liquide par solidification d'une façon rapide pour éviter la cristallisation. Pour obtenir un verre minéral, on mélange un certain nombre d'oxyde selon

les propriétés envisagées. Le verre est donc une mixture de plusieurs éléments qui peuvent être classés en trois catégories :

- **Première catégorie** : les verres formés par des oxydes formateurs dont les principaux SiO_2 , B_2O_3 , GeO_2 , P_2O_5 . Ces oxydes seuls ne peuvent pas former le verre, mais ils doivent être mixés en binaire ou multi-composants avec d'autres oxydes.
- **Deuxième catégorie** : ce sont les verres chalcogénures à base de Soufre, Sélénium ou Tellurium. Ces verres sont utilisés pour les semi-conducteurs.
- **Troisième catégorie** : englobe les verres ioniques, les verres halogénures à base de Nitrates, Sulfates et Carbonates.

D'autres catégories existent pour les composants organiques simples, les polymères organiques, les solutions aqueuses et les alliages métalliques.

1.4 Structure du verre

Le verre est un solide amorphe. Sa structure dérive de celle de la silice. La distance moyenne entre les atomes de silice vitreuse (SiO_2) est d'environ 3,6 Å et il n'y a pas d'ordre entre les atomes à des distances supérieures à 10 Å comme il a été cité par Doremus (1996).

L'obtention d'un solide amorphe consiste à un refroidissement rapide de l'état liquide sans cristallisation. Dans des travaux récents sur la structure du verre, Wright et al.(1991) ont classé la structure du verre en quatre classes d'arrangement structural. La première classe c'est l'atome central (Si) et les atomes voisins immédiats en formant les sommets des tétraèdres. La classe suivante c'est l'organisation des groupes structuraux autour du groupe central ensemble des unités I autour de l'unité centrale. La troisième est intermédiaire caractérisée par des arrangements ordonnés de plusieurs atomes distants à partir de l'atome central. La quatrième est la structure en longue distance caractérisée par des fluctuations de densité et de composition.

Selon Chiang et al. (1997), le réseau cristallin de la Silice est perturbé en remplaçant des cations (Si) d'oxyde formateur par des cations des oxydes modificateurs (Na, Ca, K) qui ouvrent le réseau et brisent sa périodicité. Ces éléments ne font pas parti du réseau vitreux mais ils contribuent à sa dépolymérisation. Ces éléments s'intercalent entre les tétraèdres et créent les oxygènes non pontants.

1.5 Domaines d'applications du verre

Vu ses propriétés multiples, le verre entre en application dans plusieurs domaines tels que :

- **Verres récipients** : utilisés comme emballage pour les boissons, produits alimentaires, parfums et cosmétique, produits pharmaceutiques et produits chimiques.
- **Verres domestiques** : utilisés pour les services à table, services pour cuisine et des objets décoratifs.
- **Verres spéciaux** : utilisés pour les téléviseurs, lampe, verre optique et industrie électronique, verre pour la conservation des déchets nucléaires.
- **Fibres de verre** : utilisées pour le renforcement. Ils sont d'excellents isolants thermique, acoustique et électrique.
- **Verre plat** : actuellement c'est un verre flotté utilisé en bâtiment et pour les vitres des véhicules.

Parmi tous ces types, c'est le verre plat qui nous intéresse dans la présente étude puisqu'il est la base des pare-brises que nous allons voir dans ce qui suit.

1.6 Pare-brise

Dans un véhicule, le verre constitue la matière première pour les vitrages et les rétroviseurs. Le vitrage qui joue un rôle plus important est le pare-brise. Sa fonction principale est de protéger les gens du vent et de la pluie. Il contribue aussi à la sécurité des passagers. Au paravent le pare-brise était composé d'une seule feuille de verre trempé. Pour plus de sécurité, les gens ont opté pour le verre feuilleté. Ce dernier est un verre composé de deux, ou plusieurs feuilles de verre, liées entre elles par un film intercalaire (généralement de butyral de polyvinyle (PolyVinyle Butyral PVB)). Le plastique adhère étroitement au verre et maintient en place les fragments cassés lors d'un choc. Le verre utilisé pour la fabrication du pare-brise est composé d'oxyde de silice, d'oxyde de sodium, magnésium et de calcium. L'épaisseur des feuilles de verre varie entre 1,5mm et 2,5mm comme il est indiqué par Bradshaw (1997) figure 1.1.

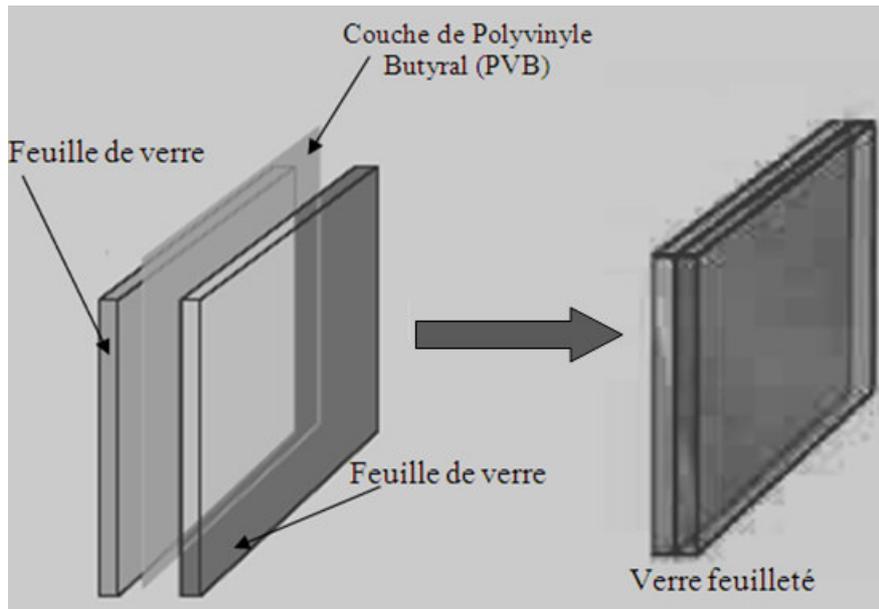


Figure 1.1 : Représentation du verre feuilleté d'après Glaströsch (2013)

Selon Bradshaw (1997), il existe deux méthodes pour façonner le pare-brise en verre feuilleté. La première méthode est par Cintrage par affaissement, la seconde c'est par presse plieuse.

1.6.1 Cintrage par affaissement

C'est une méthode utilisée généralement pour former les vitrages du devant des véhicules. Deux plaques de verre intercalées de feuille de Polyvinyle- Butyral (PVB) posées dans un moule de forme du pare-brise avec les dimensions finales. L'ensemble est chauffé pour que les feuilles prennent la forme du moule, ensuite il est refroidi doucement pour minimiser les tensions résiduelles figure 1.2a.

1.6.2 Presse plieuse

Cette méthode est très utilisée pour les vitres latérales et arrière. Elle est utilisée pour former une vitre d'une seule plaque d'épaisseur 3,2mm à 5mm. Le verre se déplace sur des rouleaux dans un four où il est chauffé à la température désirée. La plaque du verre chauffée est pressée d'un moule. Un autre moule de forme annulaire tient la plaque obtenue en place et assure que le verre ne glisse pas pendant le façonnage. Ensuite, le verre est refroidi rapidement. En premier lieu, la surface va durcir tandis que le cœur adouci peut se relaxer pour décharger les tensions. Lorsque le centre commence à durcir, le verre est exempt de tensions. La

contrainte de compression à la surface va être surmontée avant que le verre ne se casse figure 1.2b.

Pour plus de visibilité et moins de rayons infrarouge pénétrants dans le véhicule, le pare-brise est traité par dépôt de plusieurs couches minces. Ainsi, on peut obtenir plusieurs types de pare-brise tel que le pare-brise athermique, chauffants et autonettoyant.

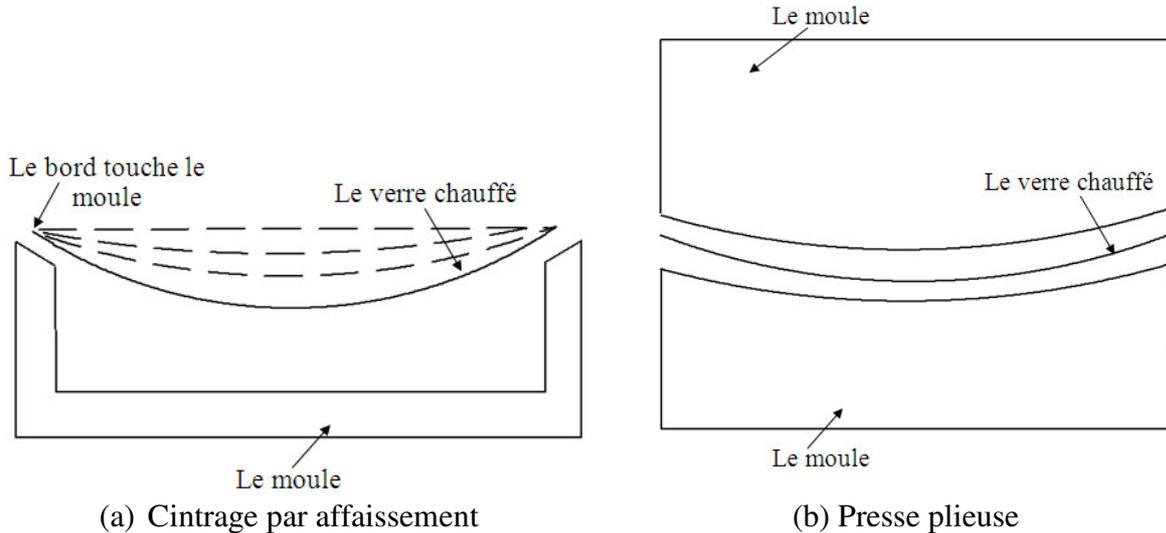


Figure 1.2 : Schéma des méthodes de façonnage du pare-brise d'après le site cmog.org

- (a) Le verre chauffé dans un seule moule.
- (b) Le verre chauffé entre deux moules.

1.6.3 Les zones du pare-brise

Selon Rosolen et al. (2005), La surface du pare-brise est divisée en trois zones telles qu'elles sont schématisées sur la figure1.3 selon la position des essuie-glaces :

- **Zone n° 1** : zone hors du balayage des essuie-glaces.
- **Zone n° 2** : zone de balayage des essuie-glaces.
- **Zone n°3** zone située dans le champ de balayage de l'essuie-glace en face du conducteur, dans le champ de vision direct de la route. Bidault (2004) a cité que cette zone est circulaire de diamètre 300mm située sur l'axe médian du conducteur et positionnée sur le pare brise à mi-hauteur de la zone de balayage de l'essuie-glace.

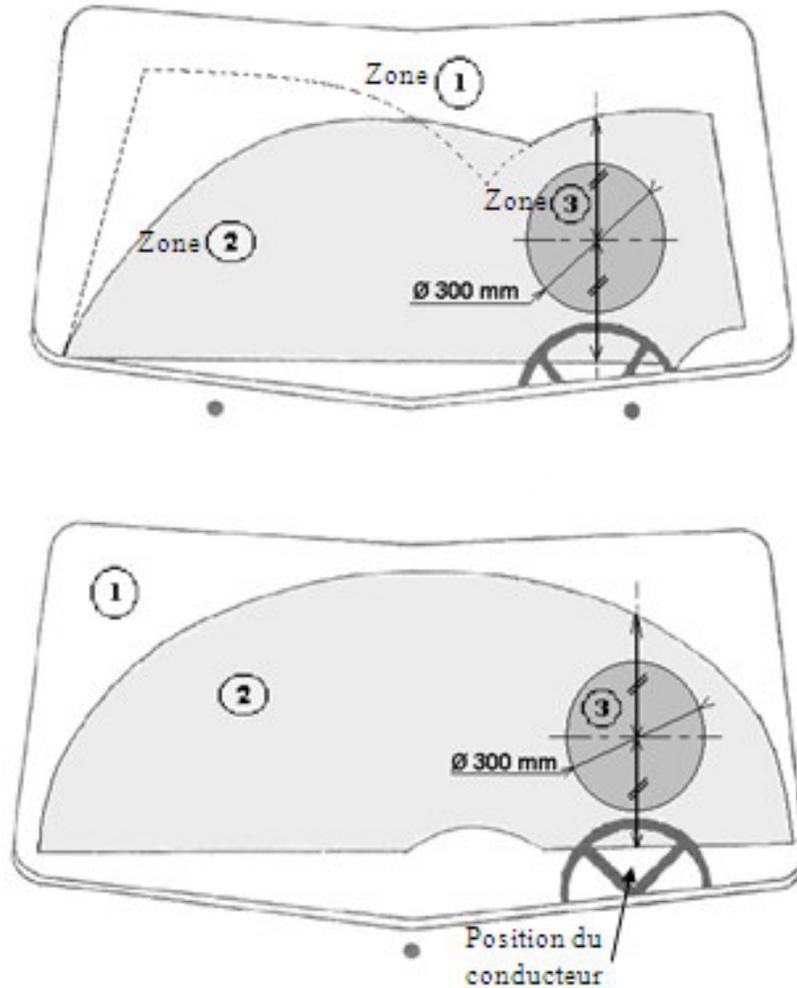


Figure 1.3 : Les différentes zones du pare-brise d'après Rosolen et al. (2005)

1.6.4 Défauts et formes de fissure sur le pare-brise

La fabrication et l'utilisation du pare-brise laisse paraître des défauts qui sont d'aspect :

- **Ponctuels** : tel que les bulles d'air, des impuretés.
- **Linéaires** : tel que les rayures éclatées.
- **Défauts de bord** : les éclats causés par les contraintes de serrage.

L'endommagement du verre du pare-brise se présente sous forme de cinq types fondamentaux : fissure, étoile, œil de bœuf, cratère et demi-lune. Ces défauts sont illustrés par la figure 1.4. En plus de ces catégories, il existe l'aile d'abeille, feuille de trèfle et combinaison entre deux ou plusieurs formes d'endommagement.

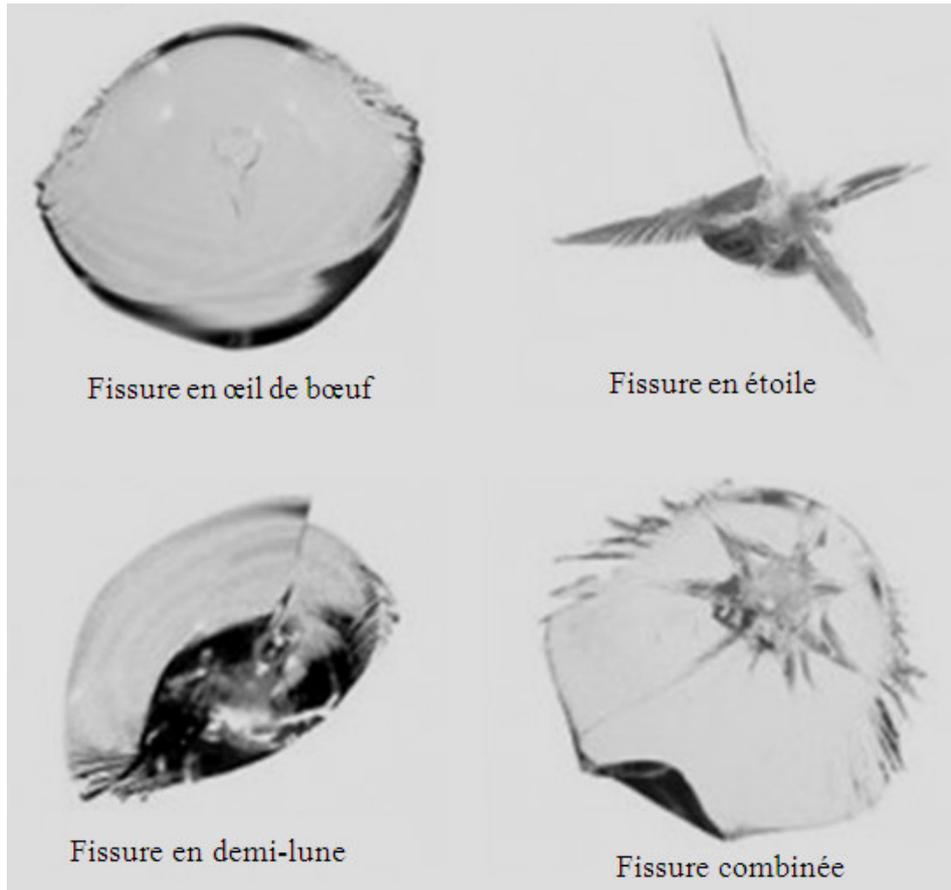


Figure 1.4 : Quelques différentes formes d’endommagement des pare-brises d’après le site yelp.com

1.6.5 Facteurs de dégradation de la visibilité du pare-brise

La dégradation de la visibilité à travers le pare-brise est causée par plusieurs facteurs tel que :

- **Endommagement par impact soudain et aléatoire** : durant son utilisation, le pare-brise est exposé à plusieurs attaques par des petites particules telles que les cailloux, gravillons, les particules de sable et de poussières.

- **Saleté** : la présence de saleté et de graisse dérange la vision du conducteur selon l’étude d’Allen(1974) sur l’effet de saleté du pare-brise et l’endommagement de la surface sur la visibilité. Il a trouvé que la présence de la saleté et des égratignures sur la surface extérieure des pare brises interfère avec la vision du conducteur surtout la nuit. Timmermann (1985) a conclu que la présence de graisse et de saleté sur la surface du pare-brise entraîne la diffusion de

la lumière. La saleté peut être l'origine des égratignures sur le pare-brise à cause du mauvais nettoyage qui peut augmenter la quantité de lumière perdue.

- **Délamination** : lorsque l'air pénètre entre les couches du pare-brise, il est emprisonné entre les couches des verres et la couche du polyvinyle butyral sous forme des micros bulles qui ne sont pas visibles. Les bulles se rapprochent sous l'effet de température pour former un espace large où le verre et le plastique se détachent cela peut causer la fatigue visuelle du conducteur.

- **Zone laiteuse** : elle se produit lorsque la couche Polyvinyle butyral (PVB) se détache et commence à reprendre son état initial, le pare-brise devient ainsi opaque et le conducteur se trouve en difficulté pour voir à travers ce pare brise.

- **Migration du plastique** : le tableau de bord de quelques véhicules est fabriqué à partir du plastique polymérique. Sous l'effet de chaleur le plastique «en anglais « plasticiser » » se libère et forme une couche mince sur la face interne du pare-brise et qui nécessite un nettoyage. Lorsque l'intérieur du pare-brise n'est pas nettoyé périodiquement cette couche s'accumule et va causer la dispersion de la lumière du soleil ou la lumière des phares des véhicules à travers le pare-brise et dérangera la vision du conducteur.

- **Réflexion de la lumière par le tableau de bord** : le tableau de bord fabriqué avec du plastique qui réfléchit la lumière sur le pare-brise. L'effet de cette réflexion sur la vision du conducteur a été étudié par Schumann et al. (1997) qui ont conclu que la performance visuelle des conducteurs diminue avec une grande réflexion du tableau de bord sur le pare-brise.

1.7 Propriétés mécaniques du verre

Comme chaque matériau, le verre possède plusieurs propriétés mécaniques qu'il faut connaître. Parmi les propriétés qui influencent le processus d'érosion sont la dureté et la ténacité que nous allons traiter dans ce qui suit.

1.7.1 Dureté

La dureté caractérise la résistance d'un matériau à la pénétration d'un corps. Elle est déterminée par les essais de dureté. L'essai Vickers est le plus généralisé pour la majorité des matériaux. Il consiste à utiliser un indenteur pyramidal avec un angle au sommet de 136° et un angle de contact de 22° figure 1.5. La dureté Vickers est le rapport entre la charge appliquée F et la surface de l'empreinte permanente.

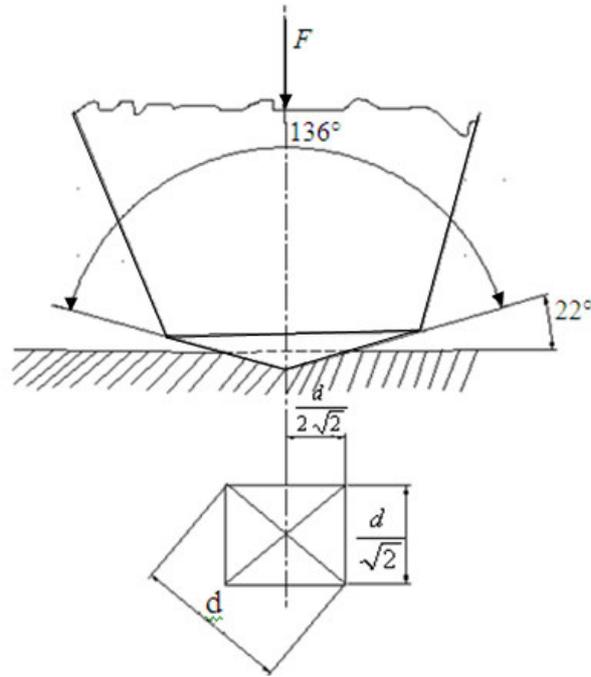


Figure 1.5 : Pyramide et empreinte Vickers (Georges Richardet (1970))

La dureté Vickers se calcul par la relation (1.1) suivante

$$H_v = 1,854 \frac{F}{d^2} \dots\dots\dots 1.1$$

Avec

F : la force appliquée [kgf]

d : la longueur moyenne des deux diagonales [mm]

Le tableau 1.1 donne les valeurs typiques de dureté Vickers de quelques verres et autres substances pour une charge appliquée de 40N.

Tableau 1.1 Dureté Vickers de quelques verres et autres substances d'après J. Barton et C. Guillemet (2005)

Matériau	Dureté Vickers [GPa]
Carbure de tungstène	24
Silice (à 300°K)	7,0
Borosilicate (à 300°K)	5,8
Sodocalcique (à 300°K)	5,5

A partir de ces valeurs, on peut voir que les verres sont moins durs que les autres matériaux cités dans le tableau 1.1 comme le carbure de tungstène. E. Le Bourhis et D. Metayer (2000), ont conclu que la dureté est en fonction de la température de l'environnement. Pour des températures inférieures à 200°C, elle est constante. Au-delà de 300°C, elle diminue.

1.7.2 La ténacité

La ténacité caractérise la résistance à la propagation d'un défaut "macroscopique" (fissure, porosité,... etc.) présent dans un matériau. La ténacité est déterminée expérimentalement au moyen d'éprouvettes pré-fissurées. Elle est déterminée par le facteur d'intensité de contrainte critique (K_{Ic}). La ténacité est établie à une puissance soit de -1/2 ou -3/2 de la longueur des fissures radiales selon le type de fissuration qui se produit. Bousbaa et al. (2003) ont utilisé le modèle suivant pour calculer la ténacité du verre selon l'analyse de Niihara :

$$K_{Ic} = \frac{0,035}{\phi} \left(H_V a^{1/2} \right) \left(\frac{E\phi}{H} \right)^{0,4} \left(\frac{l}{a} \right)^{-0,5} \dots\dots\dots 1.2$$

Avec

ϕ : Facteur pris égal à 3

H_V : la dureté Vickers

a : Longueur de la demi-diagonale

l : longueur de la fissure radiale avec $l = c-a$ figure 1.6.

E : Module d'élasticité

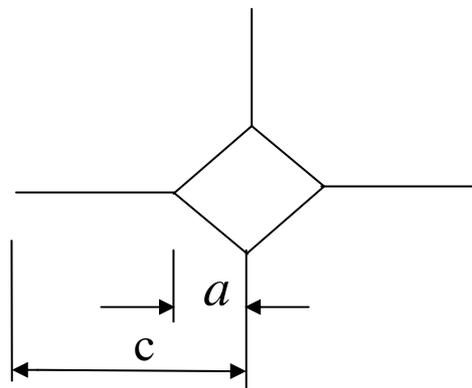


Figure 1.6 : Schéma qui représente les longueurs des fissures et de la demi-diagonale de l'empreinte d'indentation Vickers Anton et Subhash (2000)

Le tableau 1.2 représente la ténacité de quelques verres et autres matériaux.

Tableau 1.2 : Ténacité de quelques verres et autres matériaux d'après J. Barton et C. Guillemet (2005)

Matériau	K_{Ic} [MPa.m ^{1/2}]
Carbure de tungstène	14-16
Silice	0,74-0,81
Borosilicate	0,75-0,82
Sodocalcique	0,72-0,82

Les valeurs de la ténacité des verres sont très faibles devant celles des autres matériaux cités sur le tableau tel que le Carbure de tungstène. Dériano et al. (2004), ont montré que le logarithme de la longueur de la fissure ($\log c$) augmente au fur et à mesure que le logarithme de la charge appliquée ($\log F$) augmente pour différentes compositions du verre. L'augmentation de la longueur de la fissure (c) mène à la diminution de la ténacité (K_{Ic}).

1.8 Propriétés optiques du verre

La transparence est la propriété du verre la plus importante pour laquelle les humains ont donné un grand intérêt pour ce matériau. Cette propriété détermine le domaine d'utilisation de chaque type de verre. En plus de cette propriété, il est caractérisé par son indice de réfraction.

1.8.1 Indice de réfraction

L'indice de réfraction exprime le pouvoir d'un matériau de réfracter les rayons lumineux. Il provient du phénomène de réfraction qui désigne le changement de direction de la lumière lors de son passage d'un milieu à un autre. Il représente aussi le facteur de réduction de la vitesse de phase de la lumière dans le milieu. Plus l'indice de réfraction du matériau est élevé, plus la vitesse de la lumière qui le traverse est réduite et plus elle est réfractée.

On obtient l'indice de réfraction par le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de la lumière dans le milieu considéré.

$$n = \frac{V_0}{V_1} \dots\dots\dots 1.7$$

Où :

V_0 : La vitesse de la lumière dans le vide.

V_1 : La vitesse de la lumière dans le milieu considéré.

L'indice de réfraction du verre se situe entre 1,5 et 1,9 selon Bass et al. (1995). Le tableau 1.3 montre l'indice de réfraction de quelques milieu.

Tableau 1.3 : Indice de réfraction de quelques matériaux d'après Dupeux (2004)

Matériau	Indice de réfraction
Vide	1
Silice vitreuse	1,45
Verre borosilicate (pyrex)	1,47
Verre sodocalcique	1,52

1.8.2 Transmission

La transmission est le pouvoir d'un verre de laisser passer la lumière. Elle dépend des propriétés d'absorption et de réflexion et de l'état de surface. Lorsqu'on place une surface dans la trajectoire d'un faisceau lumineux, elle peut faire réfléchir et/ou transmettre des quantités différentes de lumière. Elle représente le passage d'un rayonnement à travers le verre sans changement de fréquence des radiations monochromatiques qui le composent. Le coefficient de transmission d'un verre est le rapport entre la lumière émergent et la lumière incidente. Les verres à vitre ont une transmittance de 0,98 pour une épaisseur de un centimètre. La transmittance chute une fois l'épaisseur est supérieure à un centimètre d'après Olive (2005).

1.9 Erosion du verre

L'érosion est l'arrachement de matière d'une cible par des particules qui l'attaquent. Le sablage est l'une des opérations qui cause l'érosion du verre. Il est le moyen de décor des verres et des miroirs. Mais elle représente un aspect néfaste dans d'autres domaines tel que l'aéronautique, l'hydropneumatique, dans les turbines à gaz, les valves des conduites de pétrole et les pare brise des voitures.

Les impacts de sable laissés sur la surface du verre durant le sablage sont similaires à l'empreinte causée par l'indentation. Les différents types d'indenteurs (aiguilé, sphérique, pyramidale,...) produisent une zone plastique avec des limites hémisphérique plastique/élastique selon Griffith (1993).

Pendant l'indentation, il y'a formation de deux types de fissures :

- Les fissures médiane et radiale ;
- Les fissures latérales, figure 1.7.

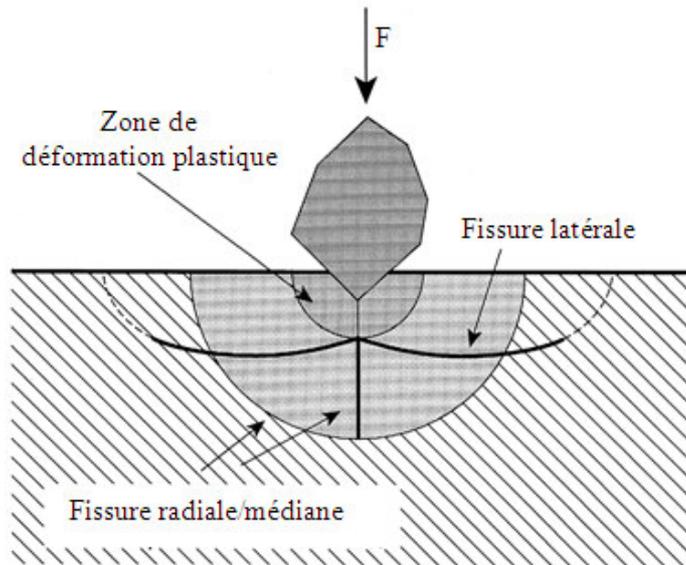


Figure 1.7 : Fissures médiane/radiale et latérale Bouten (1999)

Les fissures médianes sont les premières à se former pendant la phase de chargement et les fissures radiales se forment durant le déchargement Griffith (1993).

La fissure médiane peut se fermer durant le déchargement mais elle ne « guérit » pas.

Les fissures latérales suivent l'initiation des fissures médianes/radiales dans le cycle chargement et déchargement. Les fissures latérales peuvent se former à n'importe quel endroit autour des limites de la zone plastique et sous un chargement sévère.

1.9.1 Mécanismes d'arrachement de matière pendant l'érosion

D'après Srinivasan et al. (1987) et Ballout et al. (1996), ce n'est pas la cible uniquement qui subit des fissurations, mais les particules aussi se fissurent. Shipway et Hutchings (1996) ont trouvé que 22% des particules de Silicium sont fissurées pendant leurs impacts sur le verre.

1.9.1.1 L'arrachement par la formation et la propagation des fissures

Lorsque le matériau des particules est plus dur que celui de la cible, il y'a formation de fissures. Ces fissures peuvent être latérale, radiale ou annulaire. La création de ces fissures est dû à l'énergie cinétique de la particule et les fissures induites par indentation sont les plus fréquentes d'après Verspui et al. (1998). La taille de la fissure latérale augmente avec l'augmentation de la vitesse selon Slikkerveer et al. (1998). La taille de la fissure radiale est proportionnelle à l'extension de la fissure latérale.

Selon Srinivasan et al. (1987), l'extension de la fissure C est proportionnelle à la charge appliquée suivant la relation 1.9.

$$C \propto (F/K_c)^{2/3} \dots\dots\dots 1.9$$

Avec

F : charge appliquée.

K_c : Ténacité.

Dans leur étude sur l'érosion des matériaux fragiles par différents types de particules, Shipway et Hutchings (1996) ont trouvé que les surfaces des verres érodées présentent une morphologie avec plusieurs faces et une manifestation claire des fissures latérales à partir des fissures en forme de coquille.

1.9.1.2 L'arrachement par effritement

C'est le mécanisme qui se produit lorsque les particules sont plus fragiles (soft) que la cible. Shipway et Hutchings (1996) ont montré que l'érosion de la cible en carbure de Silicium et en carbure de Bore par des particules en silice se produit par un effritement car ces particules ne causent pas des indentations profondes.

1.9.1.3 L'arrachement par creusement et écaillage

Ce mécanisme d'arrachement se produit lorsque le matériau de la cible est ductile. Dans leur étude sur les mécanismes d'érosion dans les verres par des particules solides, Ballout et al. (1996) ont trouvé que les particules de formes sphériques interviennent par creusement dans l'arrachement de matière. Les particules aux bords tranchants causent l'écaillage.

1.9.2 Paramètres qui influencent l'érosion

Le phénomène d'érosion dépend de plusieurs paramètres liés essentiellement à la cible, à la particule et aux conditions de l'opération et l'environnement.

1.9.2.1 Influence des paramètres liés à la cible et à la particule

Les propriétés mécaniques du matériau de la cible et de la particule influencent l'érosion. Les paramètres les plus importants sont la ténacité et la dureté.

La ténacité des matériaux fragiles est un facteur plus important que la dureté selon Shipway et Hutchings (1996). Cette constatation est confirmée par Oka et al. (1997) ainsi que Kim et al. (1998). Ainsi, le taux d'érosion augmente avec la diminution de la ténacité des verres.

Barkoula et al. (2002) dans leur étude de l'érosion des polymères par des particules solides ont trouvé que la ténacité des particules peut influencer l'érosion si ces dernières se brisent en plusieurs fragments, l'énergie initiale et les contraintes sont réparties sur une large surface ce qui diminuera l'énergie dans le matériau et par conséquent l'érosion va diminuer. Si ces fragments sont pointus, alors l'endommagement peut augmenter.

Le taux d'érosion dépend de la dureté des particules et de la cible. Shipway et Hutchings (1996) ont exprimé cette relation par un rapport entre la dureté de la particule et celle de la cible ($\frac{H_p}{H_t}$). Si la particule est plus dure, c'est-à-dire ($\frac{H_p}{H_t}$) > 1, le taux d'érosion augmente. Si le rapport diminue le taux d'érosion diminue aussi c'est le cas des particules fragiles.

L'érosion dépend de la forme et de la taille de la particule érodant. La forme angulaire donne un taux d'érosion important qu'à celui donné par les formes sphériques. Xie et al. (1996) rapportent que les particules de forme angulaire produisent des fissures latérales dans la direction de la vitesse tangentielle pour des angles inférieurs à 30°. Elles créent des fissures latérales qui se propagent autour de la zone d'impact pour des angles supérieurs à 30°.

Wood et al. (1998) ont cité que la vitesse des particules est proportionnelle à la pression du flux pour les petites particules. Elle est proportionnelle à la pression élevée à la puissance 0,5 pour les grandes particules. Ballout et al. (1996) ont indiqué que si la taille des particules augmente, le taux d'érosion augmente. À un angle d'impact fixe, le taux d'érosion augmente au fur et à mesure que la taille des particules augmente et la vitesse acquise augmente. Si les particules et la cible sont du même matériau, c'est-à-dire le même module d'élasticité, l'érosion est faible.

Les particules de forme sphérique causent une déformation plastique. Tandis que les particules pointues causent une fragmentation comme l'ont bien cité Barkoula et al. (2002).

1.9.2.2 Influence des paramètres liés aux conditions d'érosion

L'érosion du verre est influencée par la vitesse d'impact, l'angle d'impact et la masse de particules projetées ou la durée d'exposition.

La taille des défauts augmente avec l'augmentation de la vitesse d'impact. L'augmentation de cette dernière entraîne l'augmentation de l'énergie cinétique des particules selon la relation fondamentale Bousbaa (2004)

$$E_c = \frac{1}{2} M_p V_p^2 \dots\dots\dots 1.10$$

Avec :

E_c : Energie cinétique des particules

M_p : Masse des particules

V_p : Vitesse des particules

Buijs et al. (1995) ont conclu, dans leur étude portant sur des verres sodo-calciques érodés par des particules d'Alumine, que le taux d'érosion augmente rapidement pour les vitesses inférieures à 100 m/s et la pente de la courbe s'approche de 7/3 pour les vitesses supérieures à 100 m/s. Au-dessus de 200 m/s, la taille des particules est réduite de 10%. En plus, l'augmentation de la vitesse entraîne l'augmentation de la quantité relative des particules fines dont la taille est inférieure à 20µm.

Ballout et al. (1996) ont indiqué que, pour les matériaux fragiles, l'érosion augmente en fonction d'angle d'impact pour atteindre un maximum à l'angle de 90° figure 1.7.

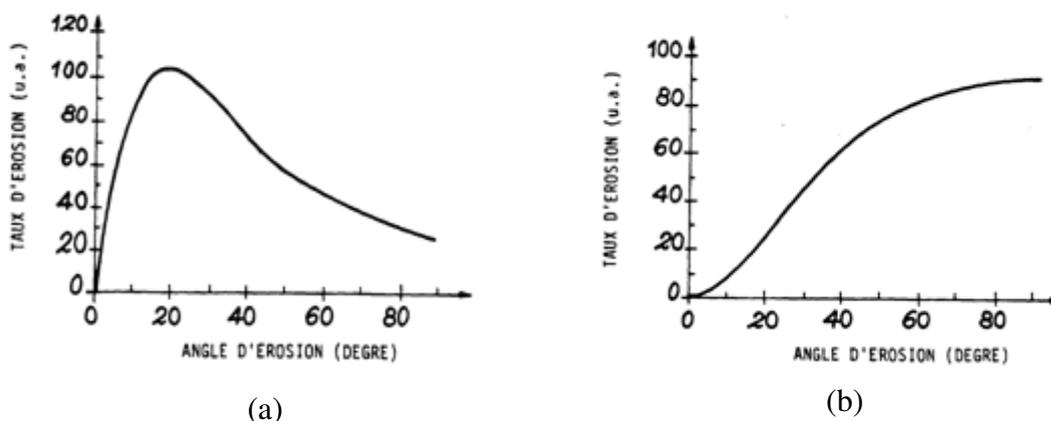


Figure 1.7 : Le taux d'érosion en fonction d'angle d'érosion

(a) Matériaux ductile (b) Matériaux fragile

d'après Paidassi et al. (1993)

A. D. Salman et al.(1995), ont trouvé que le maximum d'érosion des aciers par des particules d'Alumine se produit à 40°. Par contre, K. Haugen et al. (1995) ont constaté que le maximum d'érosion des aciers par les grains de sable est entre 15° et 30° et que les matériaux fragiles perdent entre 50 et 60% de leurs masses à l'angle d'impact de 90°. De leur côté, Oka et al. (1997) ont confirmé cette conclusion en trouvant que le taux d'érosion atteint le maximum à l'angle 90° à la vitesse 100m/s pour les matériaux fragiles. Par contre pour les matériaux plastiques, le maximum d'érosion est à l'angle 10° à la même vitesse.

Slikkerveer et al. (1998) ont montré que la tâche d'érosion est sous forme d'un cercle pour un angle d'impact de 90°. Elle est de forme elliptique pour les angles d'impact inférieurs à 90°. Lathabai et al. (1998) ont signalé que même pour les matériaux métalliques et les polymères la perte de masse par érosion augmente avec l'augmentation de l'angle d'impact avec un maximum à 30°. Mais la forme de la zone d'endommagement est la même que le verre.

Chevalier et al. (1995) indiquent que pour les forts taux du flux abrasif, les particules réfléchies par la surface interfèrent avec d'autres particules qui arrivent sur la cible et venir sur la surface. L'endommagement cumulatif d'érosion augmente linéairement avec la masse d'érodant après une période d'incubation sous toutes les conditions d'impact.

Ils ont constaté aussi que l'érosion est importante au centre du jet parce que c'est le point où l'énergie des particules est importante et le nombre des particules est élevé.

Burnett et al. (1995) de leur côté ont mentionné que le jet de particules va être divergé une fois le flux de masse de particule dépasse 1 kg/m²/s. Alors, la distance entre les particules doit être inférieure à 10 fois le diamètre moyen de la particule sinon les collisions entre les particules vont se produire.

1.9.3 Quantification de l'érosion

L'opération de l'érosion est influencée par la taille du jet des particules érosives qui arrivent sur la cible. L'expression du rayon du jet est donnée par Burnett et al. (1995) dans leur travail sous la forme de la relation 1.11 :

$$r_j = (3,92 \cdot 10^{-3} V_p + 0,075)x_d + r_b \dots\dots\dots 1.11$$

Où

r_j : Rayon du jet.

V_p : La vitesse de la particule.

x_d : Distance entre la buse et l'échantillon.

r_b : Rayon de la buse.

Dans la littérature, nous trouvons que l'érosion n'est pas en fonction d'un seul paramètre, mais en plus du taux d'érosion il y'a l'efficacité d'érosion.

Plusieurs chercheurs utilisent le taux d'érosion parmi eux Oka et al. (1997). Ils ont déduit la relation du taux d'érosion sous forme 1.12

$$\tau_R = q_1 (H_V)^{-B} (\sin \alpha)^{B1} \left(\frac{(q_2 - \sin \alpha)}{(q_2 - 1)} \right)^{B2} \dots\dots\dots 1.12$$

Où

q_1, B : Constantes à l'angle d'impact normal déterminées en fonction de vitesse d'impact, forme et taille des particules. Ils sont indépendants des propriétés des matériaux.

α : Angle d'impact

$q_2, B1, B2$: Constantes déterminées en fonction des propriétés des matériaux.

De leur coté, Barkoula et al. (2002) ont rapporté que l'efficacité d'érosion est donnée par la relation 1.13.

$$\eta = \frac{2\tau_R H}{\rho_C V_P^2} \dots\dots\dots 1.13$$

Où

η : Efficacité d'érosion

τ_R : Taux d'érosion

H : Dureté de la cible

ρ_C : Densité de la cible

V_p : Vitesse d'impact

Chevalier et al. (1995) ont conclu que le taux d'érosion n'est pas un paramètre pertinent pour évoluer l'érosion et que l'efficacité d'érosion est meilleure que le taux d'érosion. Même conclusion faite par Slikkerveer et al. (1998) dans l'étude d'endommagement par des particules tranchantes.

Lamy (1984) avait proposé un indicateur de la résistance à l'érosion appelé Indice de fragilité qui est déterminé par le rapport de dureté à la ténacité du matériau de cible ($\frac{H}{K_c}$).

Pour les matériaux fragiles, l'indice est décrit par $H^{0.5}/K_c^2$.

1.9.4 Appareils souffleurs de sable

Pour pouvoir étudier l'érosion et les paramètres qui l'influencent, on fait recours à des dispositifs qui consistent à lancer une ou plusieurs particules sur des cibles.

Burnett et al. (1995) ont rapporté que le premier simulateur a été conçu en 1955. En 1969, Goodwin avait conçu un banc d'essai très perfectionné qui peut atteindre une vitesse de 450m/s. Depuis cette date plusieurs autres conceptions ont été réalisées.

Ces dispositifs sont composés essentiellement d'un souffleur qui permet de créer un courant d'air pour transporter les particules en leurs fournissant une certaine vitesse. Il est doté d'un réservoir de particules avec des quantités et des dimensions bien déterminées selon l'étude. Il comporte aussi un porte échantillon qui permet de positionner la cible par rapport au jet des érodants. Les dimensions et les positions de ces composants sont définies selon l'objectif de l'étude.

Dans le tableau 1.4, nous citons quelques dispositifs et leurs caractéristiques utilisés dans l'opération de sablage, ainsi que le dispositif utilisé dans ce travail qui a été réalisé par Bousbaa et al. (2003). C'est un banc horizontal à buse de 1,5m et de diamètre de 25mm. Pour obtenir des vitesses aux alentours de 120Km/h soit 33m/s, qui représente la vitesse de pic maximal des tempêtes de sable dans le Sahara, on utilise un système de ventilation à hélices.

Tableau 1.4 : Différents appareils d'érosion et leurs caractéristiques

Appareil	Objectif	Longueur de buse	Diamètre intérieur De buse	Distance entre échantillon et buse	Vitesse d'impact	Angle d'impact	Taille des particules	Référence
système souffleur à air	Projection des particules d'Alumine et de verre sur un verre	/	/		64 à 87 m/s	7° à 90°	63µm à 406µm	Ballout et al. (1996)
testeur d'érosion par projection du sable	Particule de sable de silice sur des matériaux métalliques, plastique et céramique	/	4mm	10mm	130 m/s	3° à 90°	325µm	Oka et al. (1997)
machine à jets abrasifs air sonique	Grains d'Alumine sur le verre Borosilicaté AF-45	16mm	1,5mm		20 à 300 m/s	45°	9 à 200 µm	Slikkerveer et al. (1998)
machine à lancement de poudres	Particule en Zirblast (SEPR) sur un verre AF-45	30mm	2,2mm	40mm	10-200 m/s		46,2 à 484 µm	Verspui et al. (1998)
appareil d'érosion avec compresseur et injecteur de sable	Mélange de sable sur des matériaux des valves en pétrochimie	0,5-1,5m	16mm	28mm	375 m/s	20°-90°	195µm	Wood et Wheeler (1998)
appareil à jet d'impact	Particule liquide et sable sur matériau en transmission infrarouge	/	8mm		10-30 m/s			Jilbert et Field (2000)
appareil d'érosion air- sable	Particule de sable de silice sur des couches en diamant	/	16mm	30mm	268 m/s	30°-90°	194 µm	Wheeler et Wood (2001)
Souffleur du sable (utilisé dans ce travail)	Sable	1m	25mm	50mm	20m/s	0-90°		Bousbaa et al. (2003)

1.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un petit historique sur le verre qui est considéré parmi les matériaux les plus anciens utilisés par l'homme. C'est sa transparence qui lui donne son importance dans plusieurs domaines tels que le bâtiment et les véhicules. Il est utilisé pour les vitrages. Le plus important des vitrages automobile c'est bien le pare-brise. Il joue un rôle primordial dans la conduite selon la visibilité. Or, il est très exposé à des agents de l'environnement qui l'endommagent. Le vent de sable détériore les surfaces des verres et surtout les pare-brise. L'endommagement par des particules est simulé à un impact de l'indentation. La dureté et la ténacité sont les propriétés des verres qui déterminent l'érosion et son mécanisme.

L'érosion est quantifiée par soit le taux d'érosion ou l'efficacité d'érosion. Pour obtenir des surfaces érodées, on utilise des souffleurs de sable qui permettent de varier la vitesse d'impact, l'angle d'impact et la quantité de sable à projeter.

Chapitre 2

La diffusion de la lumière par des surfaces rugueuses

2.1 Introduction

Les surfaces rugueuses sont des surfaces qui présentent des irrégularités qui diffusent dans plusieurs directions. La diffusion des ondes électromagnétiques est utilisée pour déterminer les propriétés des matériaux. Labeyrie G. et al. (2004) ont mentionné qu'à la fin du 20^e siècle, la propagation des ondes dans les milieux diffusants est liée à l'astrophysique. A partir des années 80, son intérêt a été renouvelé dans pas mal d'application comme imagerie médicale. D'autres domaines qui exploitent la diffusion de lumière sont la tomographie optique, microscopie, la spectroscopie et la caractérisation des surfaces en déterminant leurs rugosités.

2.2 La diffusion de la lumière

La diffusion, en général, est le phénomène qui explique la déviation des particules en mouvement pendant leurs interactions avec d'autres objets. Ces particules en mouvement peuvent être celles de la lumière (photons) ou celles du son (phonons).

La diffusion de la lumière par des particules a été expliquée en 1868 expérimentalement par Tyndall. en 1871, c'est le tour de Rayleigh pour l'expliquer théoriquement selon Bruhat (1992). Elle consiste en une interaction entre une fraction de ce rayonnement et les atomes ou les molécules du milieu. Elle se traduit par une distribution angulaire de cette fraction du rayonnement (avec ou sans modification de longueur d'ondes).

Quand un faisceau lumineux rencontre une particule, il perd une partie de son énergie. Il y a donc atténuation du faisceau. Ce phénomène, appelé extinction, est dû à la diffusion et l'absorption. L'absorption signifie que l'énergie lumineuse est transformée en une autre forme d'énergie (énergie calorique par exemple). Selon Bedidi (1993), la diffusion concerne l'énergie redistribuée dans les différentes directions de l'espace en différentes proportions.

2.2.1 Les types de diffusion de la lumière

La diffusion se caractérise par une augmentation du rayonnement dans toutes les directions et une atténuation (ou extinction) dans la direction de propagation de l'onde. Dans le

domaine du visible, la diffusion est plus importante pour les ondes courtes (bleu) que pour les ondes longues (rouges).

Elle est appelée isotrope si elle est répartie dans toutes les directions. Lorsqu'elle obéit à un patron de réémission bien particulier selon la traversée, elle est appelée diffusion anisotrope.

Lorsqu'il n'y a pas (ou très peu) de changement d'énergie entre la radiation avant et après diffusion, on parle de diffusion élastique. La diffusion inélastique a donc lieu s'il y a un changement de la longueur d'onde entre le faisceau incident et le faisceau émis. On distingue deux types :

- La diffusion Raman est la diffusion inélastique d'ondes électromagnétiques par des atomes, des molécules ou des solides. La différence d'énergie entre un photon absorbé et un photon réémis est égale à la différence d'énergie entre deux états de vibration de l'objet diffusant.
- La diffusion Brillouin est la diffusion inélastique d'ondes électromagnétiques par un solide, elle concerne notamment les interactions avec les phonons acoustiques.

2.2.2 Diffusion de la lumière par des particules

Evgenij Zubko et al. (2007) ont rapporté que la diffusion de lumière par des particules joue un rôle important dans différentes applications scientifiques et techniques. Par exemple, en physique des comètes et la diffusion de la lumière du soleil par les particules de poussière. Parmi les théories qui expliquent la diffusion de la lumière par des particules, on cite la théorie Rayleigh et la théorie de Mie.

2.2.2.1 La théorie de lord Rayleigh

La diffusion Rayleigh est la diffusion des ondes électromagnétique par des particules de dimensions très petites par rapport à la longueur d'onde considérée qui est de l'ordre de $1/10$ de longueur d'onde.

Bruhat (1992) a rapporté dans son étude, que la théorie de lord Rayleigh dit " l'intensité de la lumière diffusée par un milieu trouble varie en raison inverse de la quatrième puissance de la longueur d'onde ". Cette théorie est applicable dans le cas des particules diffringentes dont les dimensions sont très petites devant la longueur d'onde. A condition que le volume contient un nombre assez grand de particules et que la phase de vibration est la même à tout

les points. H.E.Redmond et al. (2010) ont présenté la théorie de Rayleigh dans leur étude sur la diffusion et l'absorption par un vent de poussière.

Lorsqu'un faisceau de lumière d'intensité I_i est incident sur une particule figure 2.1. Cette dernière peut absorber et diffuser la lumière incidente.

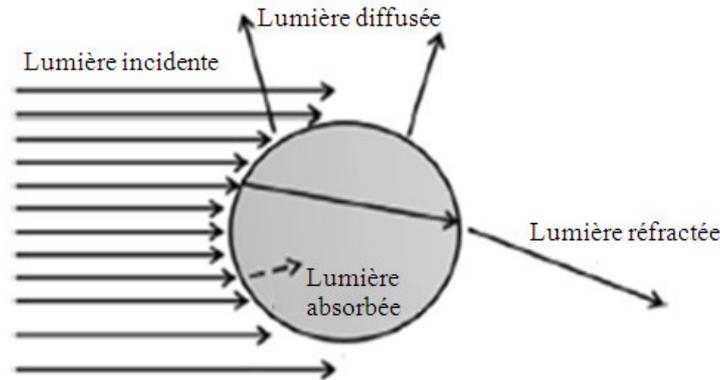


Figure 2.1 : Sources d'extinction de la lumière incidente sur une particule H.E.Redmond (2010)

L'énergie de lumière nette perdue du faisceau incident est appelée extinction. Elle est la somme de la diffusion et de l'absorption. L'énergie enlevée I_{ext} du faisceau incident est donnée par :

$$I_{ext} = I_i \sigma_{ext} \dots\dots\dots 2.1$$

Avec

$$\sigma_{ext} = \sigma_{sca} + \sigma_{abs} \dots\dots\dots 2.2$$

Où

σ_{ext} , σ_{sca} , σ_{abs} : les coupes d'extinction, de diffusion et d'absorption respectivement de la particule en question. Elles sont définies comme étant le produit de surface de coupe de la particule et un terme Q . La coupe de diffusion est donnée par la relation (2.3). Elle est le produit du facteur Q_{sca} et la section de la particule de rayon r .

$$\sigma_{sca} = Q_{sca} \times \pi r^2 \dots\dots\dots 2.3$$

Où

r : Rayon de la particule

Q_{sca} : Grandeur sans unité est le paramètre d'efficacité de la diffusion d'une seule particule, il est en fonction du rayon de la particule r , longueur d'onde de la lumière λ et de l'indice de réfraction de la particule n . Il est donné par la formule 2.4:

$$Q_{sca} = \frac{8}{3} \left(\frac{\pi(2r)}{\lambda} \right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \dots\dots\dots 2.4$$

La distribution angulaire de l'intensité diffusée par la particule est donnée par :

$$I_d(\theta_d) = I_0 \frac{8\pi^4 r^6}{\lambda^4 d_{ob}^2} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 (1 + \cos^2 \theta_d) \dots\dots\dots 2.5$$

Où

I_d : Intensité de la lumière diffusée

λ : Longueur d'onde de la lumière utilisée

d_{ob} : Distance entre le point d'incidence et le point de diffusion

La relation (2. 5) peut répondre à la vieille question concernant la couleur bleue du ciel. En fait, l'intensité diffusée est inversement proportionnelle à la puissance quatre (4) de la longueur d'onde de la lumière λ . Comme la plus petite longueur d'onde du spectre visible est le bleu, c'est la lumière de couleur bleue qui sera la plus diffusée.

2.2.2.2 La théorie de Mie

La diffusion de Mie est la diffusion élastique des ondes électromagnétiques. Elle concerne les particules de dimension égale ou supérieure à la longueur d'onde de la lumière.

Elle est réputée par sa complexité. Elle produit donc une lumière presque blanche lorsque le soleil illumine de grosses particules dans l'air, c'est cette dispersion qui donne la couleur blanche laiteuse à la brume et au brouillard.

Wang Nai-Ning et al. (1992) a utilisé la solution exacte de l'intensité diffusée par des particules sphériques donnée par la théorie de Mie. Elle est exprimée en terme de paramètre

de taille κ , l'indice de réfraction de la particule relatif au milieu où elle est suspendue m et l'angle de diffusion θ_d .

Sachant que la lumière incidente n'est pas polarisée de longueur d'onde λ , la distribution de la lumière diffusée est donnée par la relation (2.10):

$$I_d(\theta_d) = \frac{\lambda^2}{8\pi^2 d_{ob}^2} (i_1 + i_2) I_0 \dots\dots\dots 2.10$$

d_{ob} : La distance entre la particule et l'observateur

i_1 : Le terme qui décrit l'intensité de lumière diffusée avec une polarisation perpendiculaire au plan de diffusion.

i_2 : Le terme qui décrit l'intensité de lumière diffusée avec une polarisation parallèle au plan de diffusion.

Ces deux termes i_1 et i_2 sont donnés par les relations (2.11) et (2.12) :

$$i_1 = \left| \sum_{w=1}^{\infty} \frac{2w+1}{w(w+1)} (y_w \Pi_w + z_w \tau_w) \right|^2 \dots\dots\dots 2.11$$

$$i_2 = \left| \sum_{w=1}^{\infty} \frac{2w+1}{w(w+1)} (y_w \tau_w + z_w \Pi_w) \right|^2 \dots\dots\dots 2.12$$

τ_w et Π_w sont les fonctions angulaires de Mie données par :

$$\tau_w = \frac{d}{d\theta} P_w^1(\cos \theta) \dots\dots\dots 2.13$$

$$\Pi_w = P_w^1 \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \dots\dots\dots 2.14$$

Dans les équations ci-dessus, y_w et z_w sont donnés sous la forme de :

$$y_w = \frac{\psi_w(\kappa)\psi_w'(m\kappa) - m\psi_w'(\kappa)\psi_w(m\kappa)}{\zeta_w(\kappa)\psi_w'(m\kappa) - m\zeta_w'(\kappa)\psi_w(m\kappa)} \dots\dots\dots 2.15$$

$$z_w = \frac{m\psi_w(\kappa)\psi_w'(m\kappa) - \psi_w'(\kappa)\psi_w(m\kappa)}{m\zeta_w(\kappa)\psi_w'(m\kappa) - \zeta_w'(\kappa)\psi_w(m\kappa)} \dots\dots\dots 2.16$$

Où ψ_w et ζ_w sont les fonctions de Bessel-Ricatti données par :

$$\psi_w(\kappa) = \kappa J_w(\kappa) \dots\dots\dots 2.17$$

$$\zeta_w(\kappa) = \kappa h_w^{(1)}(\kappa) \dots\dots\dots 2.18$$

Avec :

$J_w(\kappa)$: fonction de Bessel sphérique du 1^{er} espèce d'ordre w .

$H_w^{(1)}$: fonction de Hankel sphérique du 1^{er} espèce d'ordre w .

κ : Paramètre de taille

$$\kappa = \frac{2\pi n_1 r}{\lambda} \dots\dots\dots 2.19$$

m : Indice de réfraction relatif

$$m = \frac{n_p}{n_1} \dots\dots\dots 2.20$$

n_p : indice de réfraction de la particule diffusante

n_1 : indice de réfraction du milieu

La diffusion de Mie n'est pas fortement dépendante de la longueur d'onde utilisée comme est le cas dans la diffusion de Rayleigh. De nos jours, la théorie de Mie est programmée avec plusieurs langages informatiques.

2.2.3 Diffusion de la lumière par des surfaces rugueuses

Zheng Zhenrong et al. (2010) ont évoqué que la méthode de diffusion de lumière est l'une des méthodes optiques qui mesure la rugosité de surface. Son avantage est qu'elle est sans contact et non destructive. John Stover (1975) avait considéré que la surface est une superposition de plusieurs réseaux sinusoïdaux. Il avait suggéré que l'utilisation de la fonction de densité spectrale (en anglais spectral density function (SDF)) est mieux pour caractériser la rugosité de surface que le calcul de la rugosité racine carré moyenne (en anglais root-mean-square (rms)).

Si une surface représente des irrégularités de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière (ou supérieure), la lumière est diffusée dans toutes les directions. Elson et Bennet (1979) ont

cité la théorie de diffusion vectorielle où la polarisation de lumière incidente et diffusée est prise en compte. La théorie scalaire de Kirchhoff est appliquée lorsque nous voulons simplifier les calculs ou introduire les paramètres de surfaces. Tansel Karabacak et al. (2000) ont mentionné que l'intensité diffusée est originaire de deux théories. La théorie scalaire (Beckmann-Kirchhoff) qui est exprimée en forme de série et la théorie vectorielle (Rayleigh-Rice) qui est en fonction de la polarisation de la lumière et du paramètre de surface diélectrique.

Quand un faisceau de lumière arrive sur une surface en verre sous incidence normale, plusieurs phénomènes peuvent se produire tel que la transmission, l'absorption et la diffusion.

Rolf Apetz et al. (2003) ont signalé que lorsque la surface d'un échantillon est lisse, la lumière diffusée est négligeable. Seule la lumière dans la direction spéculaire qui est prise en compte.

Le Bosse et al. (1997) ont expliqué qu'une partie de lumière incidente est diffusée dans la direction spéculaire. Une autre partie est diffusée dans une direction autre que la spéculaire. Si la rugosité de surface est considérable, la lumière est beaucoup plus diffusée figure 2.2.

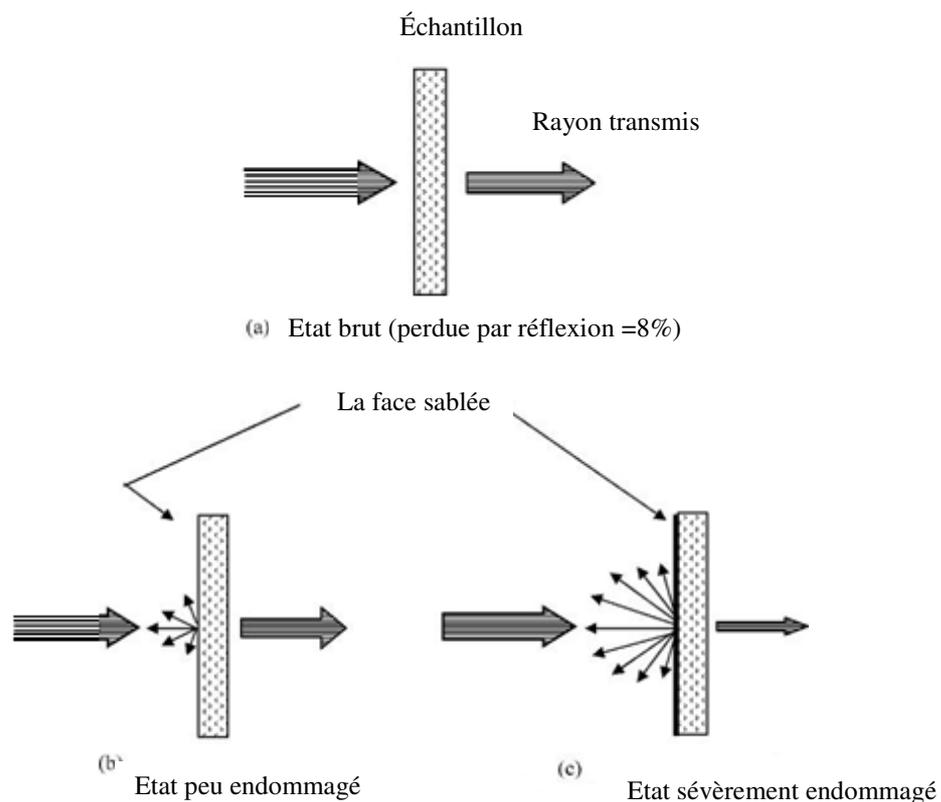


Figure 2.2 : Illustration schématique de la transmission de la lumière à travers Un verre ayant différents états de surface Adjouadi N. et al. (2007)

2.2.3.1 Modèles mathématiques de la diffusion de la lumière par une surface rugueuse

Jafari et al. (2005), dans leur étude sur les verres gravés, ont utilisé la théorie de diffusion de kirchhoff pour caractériser ces verres. Ils ont mentionné qu'elle est basée sur trois suppositions :

- La surface est observée du champ lointain ;
- La surface est vue plate ;
- Les propriétés optiques sont identiques localement à n'importe quel point de la surface.

Selon Ruiz Gale et al. (2007), nous considérons une surface rugueuse réfléchissante avec un plan moyen $z=0$, l'angle d'incidence et la direction d'observation donnée par θ_i et θ_d sont montrés par la figure 2.3.

Les quantités associées au champ d'incidence sont dénotées par « i » et celles qui sont associées au champ de diffusion par « d » figure 2.3.

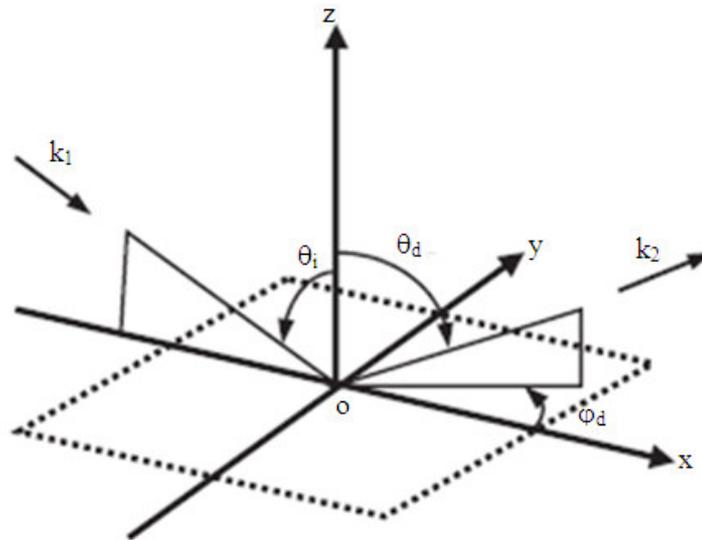


Figure 2.3 : Schéma illustrant l'angle d'incidence et la direction d'observation
Ruiz Gale et al. (2007)

Prenant $h(x,y)$ la hauteur de surface au point (x,y) . La rugosité de surface est considérée comme étant continue. La hauteur est une variable aléatoire avec une fonction de densité de probabilité $p(h)$ où $p(h)dh$ est la probabilité qu'un point de surface a une hauteur entre h et $h+dh$. La valeur de la racine carrée moyenne R_a est définie comme étant la rugosité.

$$R_a = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} h^2 P(h) dh} \dots\dots\dots 2.21$$

La distribution des hauteurs de surface est considérée de forme Gaussienne avec une déviation normalisée R_a est sous forme :

$$P(h) = \frac{1}{R_a \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{h^2}{2R_a^2}\right) \dots\dots\dots 2.22$$

L'amplitude des irrégularités de surface dans n'importe qu'elle direction dans le plan de surface peut être trouvée en utilisant la fonction d'auto corrélation de surface donnée par la relation (2.23) :

$$g(x_1, y_1, x_2, y_2) = \frac{\langle h(x_1, y_1)h(x_2, y_2) \rangle}{R_a^2} \dots\dots\dots 2.23$$

Dans la théorie de lumière diffusée, la fonction d'auto corrélation de surface est fréquemment considérée de forme Gaussienne,

$$g(t) = \exp\left(\frac{-t^2}{L^2}\right) \dots\dots\dots 2.24$$

t : distance entre deux points arbitraires

L : longueur de corrélation pour laquelle la fonction d'auto corrélation tend vers la valeur 1/e.

On considère une surface très rugueuse où ($R_a \gg \lambda$)

Avec :

λ : Longueur d'onde de la lumière.

L'intensité moyenne de diffusion est donnée par la formule ci-après :

$$\langle I_d(\theta_d) \rangle = \frac{\pi F^2 L^2}{A v_z^2 R_a^2} \exp\left[-\left(\frac{v_{xy} L}{2v_z R_a}\right)^2\right] \dots\dots\dots 2.25$$

A : surface éclairée

v_x, v_y, v_z : Les composantes du vecteur $v=k_1-k_2$

v : Vecteur qui dénote la variation dans le vecteur d'onde k due à la rugosité de surface

k_1 et k_2 : vecteurs d'onde d'incidence et d'observation respectivement.

$$v_{xy} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \dots\dots\dots 2.26$$

Dans le vide $|k| = k = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)$

$$v_x = kn_0(\sin \theta_i - \sin \theta_d \cos \varphi_d) \dots\dots\dots 2.27$$

$$v_y = -kn_0 \sin \theta_d \sin \varphi_d \dots\dots\dots 2.28$$

$$v_z = -kn_0(\cos \theta_i + \cos \theta_d) \dots\dots\dots 2.29$$

G est un facteur qui dépend des angles d'incidence et d'observation, il se calcul avec la relation (2.30),

$$G = \frac{1 + \cos \theta_i \cos \theta_d - \sin \theta_i \sin \theta_d \cos \varphi_d}{\cos \theta_i (\cos \theta_i + \cos \theta_d)} \dots\dots\dots 2.30$$

D'autres chercheurs utilisent la théorie scalaire de Kirchhoff . Sentenac et Greffet(1988) l'ont appliqué pour l'étude des verres. Iwasaki S. et T. Mukai (1999) l'ont utilisé pour l'étude des régolites et les petits corps dans le système solaire.

Edwin (1973), pour sa part, a appliqué l'équation de diffraction Fresnell-Kirchhoff, dans son étude sur les matériaux (Chromium, Aluminium et Argent) avec des rugosités qui varient entre 0,5 et 3nm. Si une lumière de longueur d'onde λ est incidente normalement sur une surface, alors l'intensité de la lumière diffusée $I_d(\theta_d)$ mesurée comme étant le flux par unité d'angle est donnée par la relation 2.31 :

$$I_d(\theta_d) = \pi \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2 [D - I_{rs}] \times \exp\left\{-\left(\frac{4\pi R_a}{\lambda}\right)^2\right\} \dots\dots\dots 2.31$$

Où :

θ_d : Angle de diffusion.

L : Longueur auto covariance de surface.

λ : Longueur d'onde de la lumière utilisée.

R_a : Rugosité moyenne carrée.

D : Constante qui dépend du flux incident et de la réflectance de la surface.

I_{rs} : Le flux réfléchi spéculairement donné par la relation (2.32):

$$I_{rs} = D \exp \left\{ - \left(\frac{4\pi R_a}{\lambda} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots 2.32$$

Cette formule devient compliquée et difficile mathématiquement pour les distributions des rugosités de surface complexes. Dans son étude, Edwin a choisi la forme gaussienne simple pour la distribution des rugosités de surface.

La distribution de la lumière diffusée $I_d(\theta_d)$ doit être symétrique par rapport au faisceau incident et indépendant de la polarisation de ce dernier. Ainsi avec ces limitations, le rapport entre la lumière diffusée spéculairement et la lumière diffusée doit être de même forme dans le cas de la surface diélectrique ainsi que le cas de la surface métallique.

Haiming Wang (1993) a utilisé l'intégrale de Stratton-Chu-Silver (S-C-S) qui utilise le vecteur de fonction de Green. Son étude porte sur du Silicone avec des rugosités de l'ordre de 0,0011 μ m. L'intensité de la lumière diffusée est de forme :

$$I_d = \frac{k^2 I_i}{(4\pi d_{ob})^2} Qg \dots\dots\dots 2.33$$

Où :

k : Vecteur d'onde.

g : Fonction qui décrit la contribution de rugosité de surface, fonction d'autocovariance.

Q : Facteur qui dépend de la polarisation du faisceau incident.

d_{ob} : Distance d'observation.

I_i : Intensité de lumière incidente.

Cette relation est exprimée par la loi de la convolution sous la condition que la rugosité du spectromètre et celle de la surface à étudier sont très inférieurs à la longueur d'onde de la lumière utilisée.

Egon et al. (1993) ont fait l'étude de l'intensité de la lumière réfléchiée spéculairement par des surfaces en acier avec des rugosités allant de 0,024 à 0,189 μm . Ils donnent l'expression de l'intensité réfléchiée spéculairement sous forme d'un rapport avec l'intensité totale donné par la relation 2.34 :

$$\frac{I_{rs}}{I_i} = \exp\left[-\left(\frac{4\pi R_a \cos \theta_i}{\lambda}\right)^2\right] \dots\dots\dots 2.34$$

Avec :

I_{rs} : Intensité réfléchiée spéculairement

I_i : Intensité incidente

R_a : Rugosité

θ_i : Angle d'incidence

λ : Longueur d'onde de la lumière

Jérôme Caron et al. (2002) ont étudié la diffusion de la lumière par des surfaces diélectriques en déterminant la diffusion de la lumière en réflexion et celle en transmission. Ils ont trouvé que leurs deux expressions sont semblables.

2.2.3.2 Montages de mesure de diffusion de lumière par surfaces rugueuses

L'étude de la diffusion de la lumière expérimentalement fait appel à un montage pratique.

Il existe des montages qui permettent la mesure de la diffusion de lumière en réflexion. La majorité des montages optiques destinés à la mesure de la lumière diffusée en réflexion par des surfaces rugueuses sont composés essentiellement d'un système d'éclairage, d'un système de détection. La plupart des sources d'éclairage utilisées sont des lasers. Les détecteurs, des photodiodes, camera CCD, photomultiplicateur et sphère intégrante sont employés. L'intensité de lumière diffusée est mesurée dans le but de déterminer les caractéristiques des surfaces étudiées dont la rugosité et la longueur d'auto covariance. On se limite à quelques montages.

Tableau 2.1 : Les différents montages expérimentaux de mesure de diffusion en réflexion

Montage	Source de lumière	Angle d'incidence	Angle de diffusion	Surface éclairée	Système de détection	Distance échantillon-détecteur	Rugosité	Référence
Instrument optique nommé DALLAS (Detector Array for Laser Light Angular Scattering)	Laser He-Ne	-54°	Mesuré dans l'hémisphère entier	2mm×3mm	Arrangement de 87 détecteurs espacés de 2° entre deux sur un support semi-circulaire centré sur la tâche illuminée	Rayon du support semi-circulaire	0.1 à 1.0µm	Vorburger et al. (1988)
Diffusiomètre	Laser He-Ne de longueur d'onde $\lambda=632,8$ nm	0°	En transmission : 90° à 179,95° 0,05° à partir de proche spéculaire à 90°	De diamètre 1mm	Photodiode avec une surface active de 10mm ² relié à un amplificateur et PC	200mm	1.1nm	Haiming Wang (1993)
Montage pour détection des radiations UltraViolet diffusées	Laser excimer (157, 193,248 nm)	45°			Camera CCD à Ultra Violet		0.5 à 1.5 nm	Hermann et al. (2005)
Instrument goniométrique par la mesure de la lumière diffusée dans la direction spéculaire	Laser He-Ne (0,633 µm)	6° à 82°	4° à 12°	2,6mm ×2,6mm	Photodiode S1226-44BK relié à un amplificateur, convertisseur et PC	> 0,4m	0.096 à 0.501 µm	Mendelejev (2006)

2.3 Mesure de la visibilité à travers les pare-brise

La vision joue un rôle primordial dans la conduite automobile, dans la mesure où elle permet d'acquérir des informations sur l'environnement routier et de réaliser des anticipations. En effet, on considère que la majorité des informations traitées par le conducteur (90%) sont d'origine visuelle. Paul Green et William T.Burgess (1981) ont signalé que les recherches sur les pare-brises sont concentrées sur les caractéristiques qui réduisent les blessures par des chocs risqués par des véhicules. Comme elles sont axées sur l'évaluation de la

perte de visibilité. Ils ont constaté que Hoffman (1973) a considéré que l'impact d'un objet avec le pare-brise est rarement une cause directe des accidents. Treat (1980) n'a pas pris l'endommagement du pare-brise comme facteur qui cause les accidents dans son étude.

Naturellement, les pertes de visibilité constituent un facteur majeur d'accidents. Les facteurs de perte de visibilité peuvent être classés en trois catégories selon Pronck et al. (2006) :

- Etat du pare-brise puisque le conducteur voit l'environnement à travers le pare-brise. Cette perception qu'il en a est altérée par tout ce qui en affecte la surface tel le voile d'eau, salissures, buée.
- Conditions d'éclairage tel que le soleil rasant et la nuit.
- Conditions atmosphériques tel que la pluie et le brouillard.

La perte de visibilité est quantifiée et mesurée par plusieurs techniques et par différents appareils. C'est la première catégorie des facteurs de perte de visibilité qui nous intéresse et dont nous allons exposer quelques méthodes.

Une ancienne technique décrite par Allen (1969) consiste à photographier la lumière des phares d'un véhicule venant du sens inverse à travers le pare-brise. Les pare-brises sont placés à un angle d'installation de 35°.

2.3.1 Le hazemètre

Le flou ou le voile "en anglais (haze)", est un trouble visuel causé par la diffusion de lumière. Il est un attribut apparent qui peut quantifier et évaluer la qualité des objets tel que liquide, verre, plastique, tableau de peinture et même les métaux.

Harry L. Task et al. (1986), la raison la plus majeure pour laquelle la transparence est détériorée c'est d'origine optique. Le problème optique est le « haze » ou la diminution du contraste. Le bureau national des standards (« NBS ») a définie le flou (Haze) comme étant le rapport de la lumière diffusée à la lumière totale qui traverse le vitrage. Il est donné par la relation 2.35 :

$$H = \frac{D}{D+T} \dots\dots\dots 2.35$$

Avec

H : le flou (Haze)

D : l'intensité de lumière diffusée

T : l'intensité de lumière transmise

La valeur du flou (Haze) est comprise entre 0 et 1. La valeur du flou égale à 0 c'est pour le cas d'absence de diffusion. La valeur du flou égale à 1 correspond à une diffusion totale.

Le hazemètre est cité par le standard Américain D 1003-61. Dans ce document, le flou « en anglais haze » a été décrit comme étant le pourcentage de la lumière transmise, qui traverse l'échantillon, déviée par la diffusion à partir du rayon incident. Dans cette méthode, seulement le flux de lumière dévié de plus de $2,5^\circ$ en moyenne est considéré à être le flou.

Cet appareil est constitué d'un système d'éclairage et d'un système de détection s'agissant d'une sphère intégrante figure 2.4.

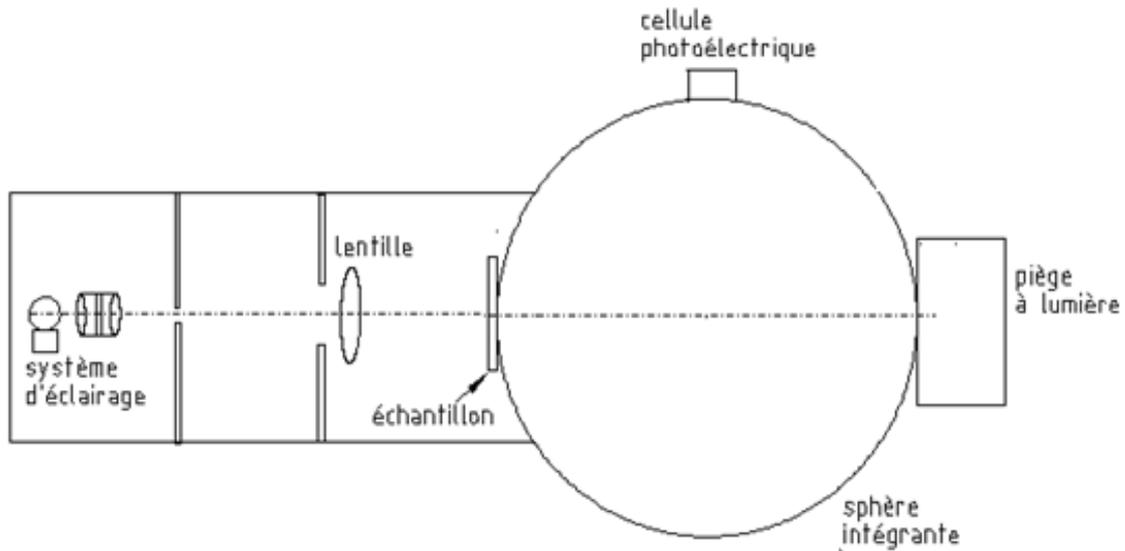


Figure 2.4 : Système d'éclairage et de détection du hazemètre Pronck et al.(2006)

A l'aide d'un galvanomètre, nous allons faire quatre lectures pour un seul échantillon en répétant les mesures. Le calcul de la transmission totale T_{tot} se fait par le rapport de l'intensité de la lumière totale transmise par l'échantillon avec l'intensité de la lumière incidente. Elle est donnée par la relation 2.36 :

$$T_{tot} = \frac{I_t}{I_0} \dots\dots\dots 2.36$$

Nous calculons aussi la transmission diffuse T_d qui est donnée par la relation 2.36 :

$$T_d = \frac{\left[I_0 - I_t \left(\frac{I_t}{I_0} \right) \right]}{I_0} \dots\dots\dots 2.37$$

Et enfin, nous calculons le flou *haze%* qui est le rapport de la transmission diffuse avec la transmission totale, il est donné par la relation 2.38:

$$haze\% = \frac{T_d}{T_{tot}} \times 100 \dots\dots\dots 2.38$$

Avec :

I_0 : Intensité de la lumière incidente

I_t : Intensité de la lumière totale transmise par l'échantillon

I_3 : Intensité de la lumière diffusée par l'instrument

I_4 : Intensité de la lumière diffusée par l'instrument et le pare-brise.

Avec ce calcul, la diffusion sera exprimée en pourcentage au lieu de valeurs comme mentionné par le Bureau National des standards.

2.3.2 Techniques de l'indice de la lumière perdue(en anglais **stray light index (SLI)**)

La lumière perdue (en anglais Stray light) est la somme de lumière qui n'est pas transmise parallèlement à la direction principale de la lumière sortante. Elle est due à la diffusion par les petits défauts de surface telle que les égratignures et les sites d'impacts. Son intensité dépend de l'angle de diffusion et de l'intensité du faisceau incident. Elle peut avoir une signification négative sur la vision et la perception des objets lors de la conduite. Son indice (SLI) a été déterminé par Timmermann (1985). Il l'a défini comme étant le rapport de l'intensité de la lumière diffusée à l'intensité de la lumière utilisée. Autre étude qui parlait de cet indice (SLI) est celle de Chimelarz et al. (1987). Derkum (1991) a montré que la lumière diffusée est différente selon le type d'endommagement (par exemple : égratignure, rayure,) et qui produit de différents types de distributions.

Plusieurs appareils qui déterminent l'indice de lumière diffusée sont conçus. Ils diffèrent de leurs modes d'utilisations et de leurs composants.

2.3.2.1 Analyseur de lumière perdue(en anglais Stray light analyser)

Cet appareil est décrit par Timmermann (1985) qui limite les mesures de lumière diffusée à une rangée d'angle de $1,5^\circ$ à 2° . Cette limitation est faite car:

- Cette gamme est en concordance avec le standard DIN 4646 pour la mesure du coefficient de réduction de luminance (en anglais "Stray Light Index" (SLI)) ;
- Selon la conduite la nuit, le phare d'un véhicule en face (en sens inverse), à la distance 60m et à une distance latérale de 1m, apparaît à un angle d'environ $1,75^\circ$ par rapport à la direction directe figure 2.5.

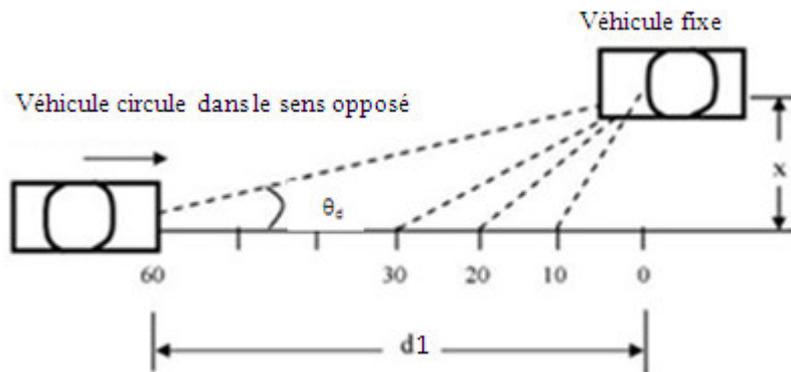


Figure 2.5 : Illustration d'angle d'observation pour la conduite nocturne d'après Pronk et al. (2006)

- L'intensité de lumière diffusée baisse dramatiquement une fois l'angle augmente ;
- La lumière diffusée est importante pour les petits angles qui sont inférieurs à 2° .

Un faisceau lumineux de diamètre 3,5cm est incident sur le pare-brise. Le faisceau direct est focalisé par le collimateur sur le plan focal où se trouve un détecteur pour le mesurer. La lumière diffusée dans les angles de $1,5^\circ$ à 2° est imagée comme un anneau sur le plan focal, elle est mesurée par le second détecteur figure 2.6.

La diffusion de la lumière par des surfaces rugueuses

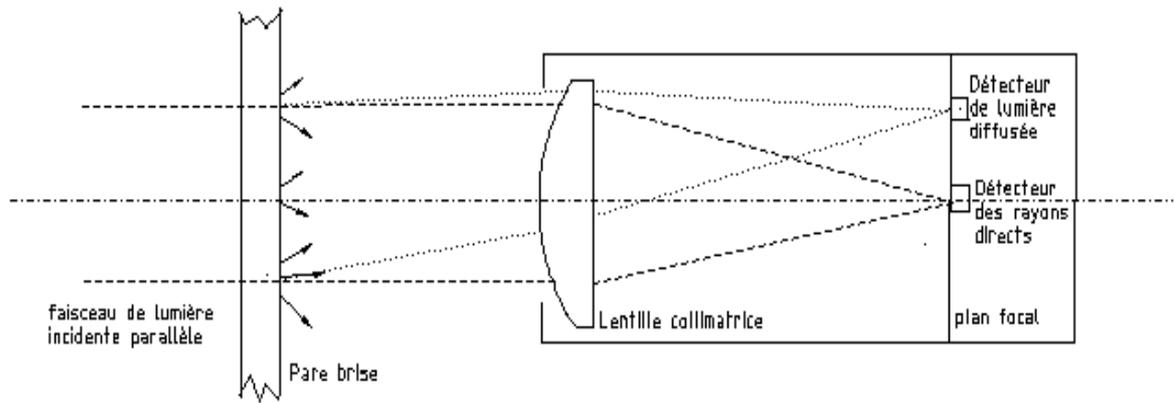


Figure 2.6 : Schéma du système de détection des intensités directe et diffusée
Pronk et al. (2006)

L'avantage de cette méthode par rapport au Hazemètre cité en haut, ce qu'elle peut être utilisée sur un pare-brise monté sur le véhicule figure 2.7.

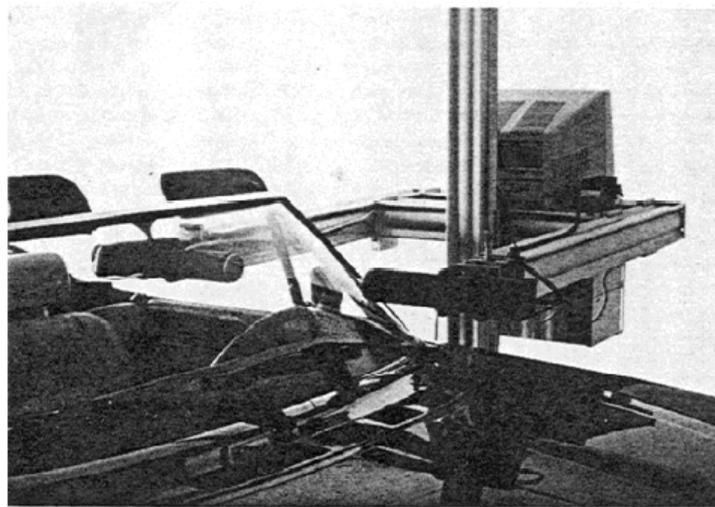


Figure 2.7 : appareil qui détermine l'indice de lumière diffusée Pronk et al. (2006)

Un exemple du diagramme de lumière perdue obtenu illustré par la figure 2.8. Les deux pics de l'indice de lumière perdue ('Stray Light Index' (SLI)) représentent la diffusion due aux essuie-glaces et sa moyenne représente la contribution approximative d'endommagement par cratères.

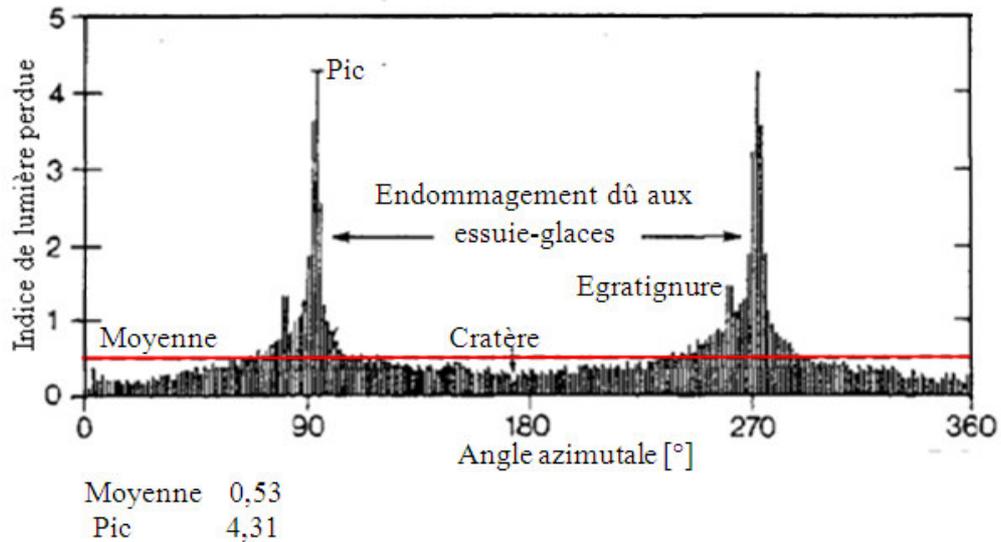


Figure 2.8 : Exemple de diagramme de lumière perdue
Timmermann (1985)

2.3.2.2 Technique du diaphragme angulaire

Cette technique de mesure de lumière diffusée est en accord avec le standard allemand DIN 52998-1. La lumière diffusée totale est enregistrée dans une zone entre les angles 1,5° et 2° par rapport à la direction de la lumière transmise directe non diffusée. Une valeur moyenne du coefficient de luminance réduite est employée pour déterminer la mesure de lumière diffusée. Le schéma de cette technique est montré par la figure 2.9.

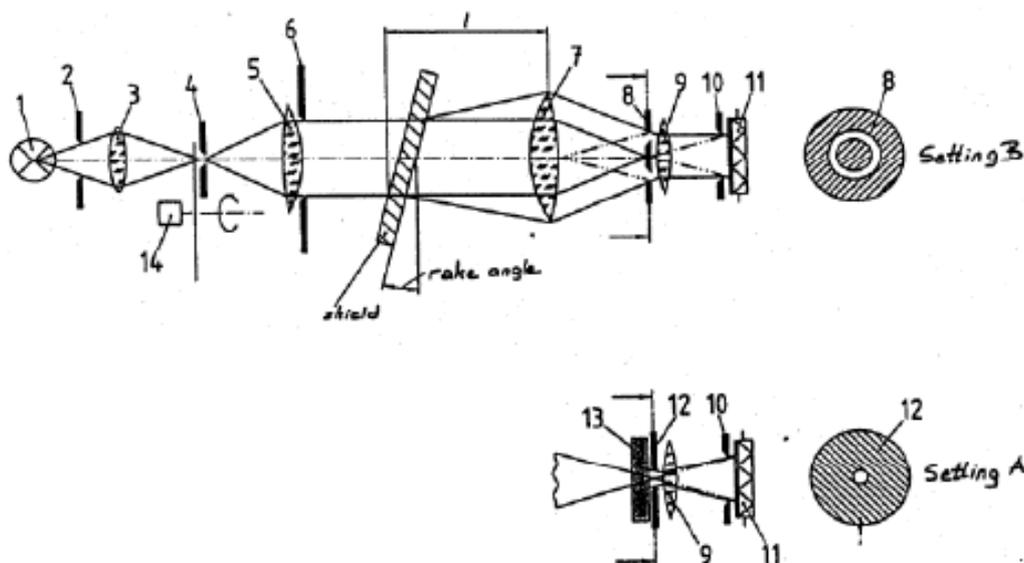


Figure 2.9 : Schéma de l'appareil du diaphragme angulaire
d'après Pronk et al. (2006)

Les différentes parties qui composent ce montage ainsi que le rôle de chacune sont mentionnées sur le tableau 2.2.

Tableau2.2 : Les composants du montage de la méthode du diaphragme angulaire

N°	Composant	Rôle
1	Source de lumière	Emettre de lumière
2	Diaphragme	Diaphragme du champ
3	Lentille intermédiaire	Former l'image de la source sur l'ouverture (4)
4	Diaphragme	Diaphragme d'ouverture
5	Collimateur	Produire un faisceau quasi parallèle
6	Diaphragme	Diaphragme d'ouverture
7	Collecteur	Former l'image de l'ouverture (4) en son plan focal
8	Diaphragme annulaire	Couvrir la lumière qui passe directement et laisse passer la lumière diffusée pour sortir aux angles entre 1,5° et 2° relative à la direction par laquelle passe à n'importe quel angle azimutal.
9	Diaphragme du champ	Former l'image du pare brise à une échelle réduite sur la tête photométrique (11)
10	Diaphragme	Diaphragme de lumière diffusée
11	Tête photométrique	Mesurer l'intensité
12	Diaphragme	Diaphragme d'ouverture
13	Filtre neutre	
14	Hachoir	

Avec cet appareil, on mesure l'intensité de lumière incidente I_0 en utilisant la lentille d'ouverture (12) sans le pare-brise. Puis, on mesure l'intensité de la lumière diffusée par l'instrument I en utilisant la lentille annulaire (8) sans le pare brise. Ensuite, une fois le pare-brise est placé, on mesure la lumière directe qui sort du pare-brise I en utilisant la lentille (12) puis l'intensité de lumière diffusée par le pare-brise et l'instrument en utilisant la lentille (8).

Un coefficient appelé coefficient de luminance réduite ou encore le degré de lumière diffusée q est calculé par la relation (2.39):

$$B = \frac{1}{\Omega} \left(\frac{I_4}{I_t} - \frac{I_3}{I_0} \right) \dots\dots\dots 2.39$$

Ou bien :

$$B = \frac{1}{\Omega} \left(\frac{(I_4 - T_{tot} I_3)}{I_t} \right) \dots\dots\dots 2.40$$

Avec

Ω : Angle spatial qui comprend la lentille annulaire dans ce cas prend la valeur : $1,67 \cdot 10^{-3}$ sr.

T_{tot} : Transmission totale calculée avec la relation (2.41) :

$$T_{tot} = \frac{I_t}{I_0} \dots\dots\dots 2.41$$

I_0 : La lumière incidente mesurée avec le diaphragme d'ouverture (12) sans le pare-brise

I_3 : La lumière diffusée par l'équipement mesurée avec la lentille annulaire (8) sans le pare-brise

I_t : La lumière directe qui quitte le pare-brise mesurée avec le diaphragme (12)

I_4 : La lumière diffusée sortante du pare-brise plus la lumière diffusée par l'équipement mesurée avec la lentille annulaire (8).

2.3.2.3 Analyseur de lumière perdue portatif

C'est un appareil qui est portable qui détermine l'indice de lumière perdue (en anglais stray light index (SLI)) décrit par Pronk et al. (2006). Il enregistre la lumière diffusée entre les angles $1,5^\circ$ et $2,5^\circ$. Les mesures se font sur le pare-brise monté sur le véhicule. Elles sont prises en six points dans la région de vision du conducteur figure 2.10a. Nous pouvons imprimer le diagramme des tâches figure 2.10b.

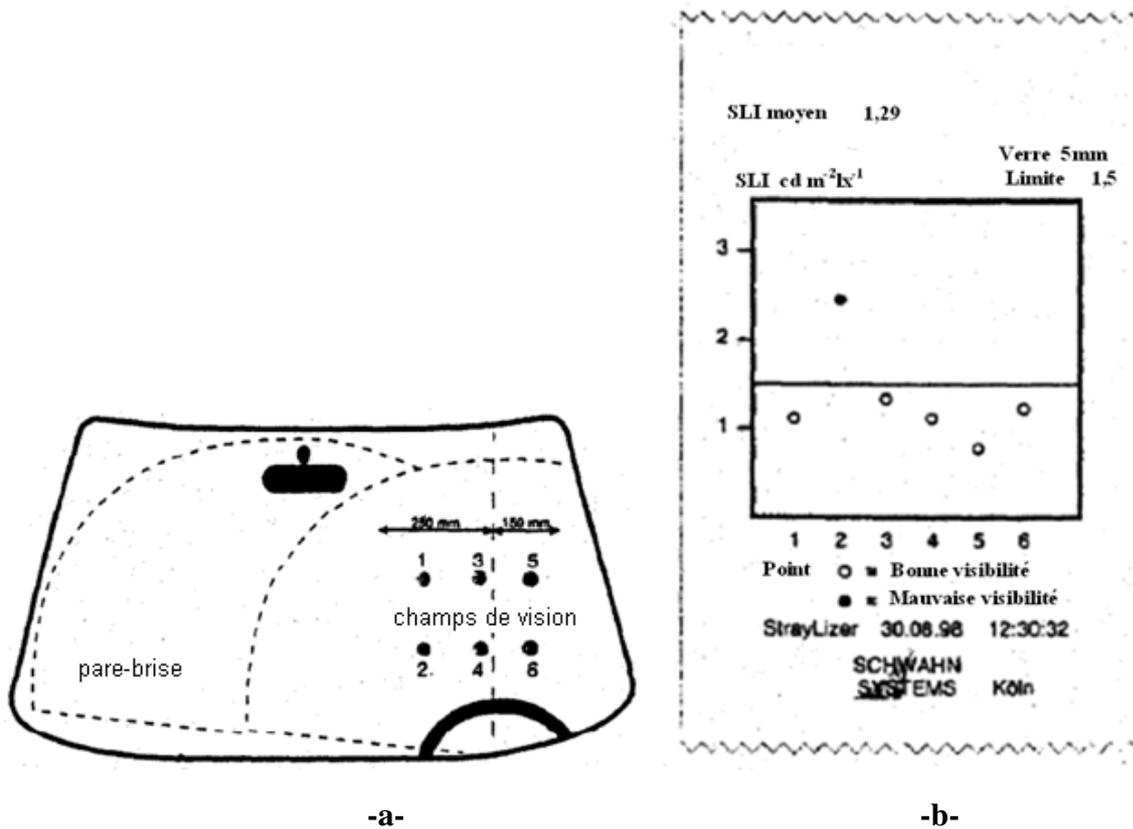


Figure 2.10 : La mesure de l'indice de lumière perdue (en anglais Stray Light Index (SLI)) avec straylizer Pronk et al. (2006)

- a)- la mesure en six points dans le champ de vision
- b)- diagramme des points imprimé

L'indice de chaque point est tracé sur le diagramme et la valeur moyenne des six points est donnée. La valeur de 1,5 a été adoptée comme une limite qui distingue entre l'endommagement du pare-brise accepté et celui rejeté, les valeurs inférieures à 1,5 représentent une bonne visibilité. Dans la littérature, il n'y a pas de précision sur le choix de six points et la valeur limite de 1,5.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé le phénomène relatif à la diffusion de la lumière par des surfaces rugueuses. Nous avons présenté les deux théories qui expliquent la diffusion des ondes électromagnétiques par des particules. La diffusion de Mie ne dépend pas fortement de longueur d'onde contrairement à celle de Rayleigh qui dépend de la longueur d'onde à la puissance quatre. La diffusion de la lumière par des surfaces rugueuses a été expliquée par la théorie la plus utilisée qui est l'approximation de Kirchhoff. Cependant, la diffusion de lumière est plus étudiée d'une façon expérimentale que théorique.

Chapitre 3

Partie expérimentale

3.1 Introduction

Le pare-brise est formé de deux plaques de verre liées par une couche de Polyvinyle Butyral (PVB). Durant l'opération d'érosion par les particules de sable, seulement la face extérieure du pare-brise qui est touchée. Pour cela, nous avons pris des échantillons d'une plaque de verre sodo-calcique.

Dans ce travail, nous allons étudier la transmission des échantillons en verre érodé par sablage en fonction de la masse de sable projetée et de l'angle d'incidence. Nous étudions aussi la distribution angulaire de l'intensité de lumière diffusée par les surfaces des verres érodés pour chaque état de surface et pour différents angles d'incidences.

3.2 Matériaux utilisés

Le matériau utilisé pour les échantillons est un verre silico-sodo-calcique. Sa composition chimique est présentée dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Composition chimique du verre utilisé

Oxydes	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	autres
%en poids	71,87	15,08	6,54	4,10	1,88	0,52

Quelques propriétés physiques de ce verre sont présentées dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Quelques propriétés du verre utilisé

Caractéristique	Valeur	Unité
Densité	2,45	g/cm ³
Dureté	5,45	GPa
Module de Young	75	Gpa
Indice de réfraction	1,52	-

La cible utilisée dans tous les essais est un verre de chaux sodée avec une épaisseur de 3 mm. Un lot d'échantillons de dimensions 40 mm x 40 mm est préparé. Un échantillon dans son état à la réception est considéré comme un échantillon de référence (en bon état). Les autres ont été soumis à des tests de décapage au sable d'un côté en faisant varier les masses projetées Mp: 5, 10, 20, 30, 50, 100, 150 et 200g.

L'érodant (sable) utilisée dans cette étude provient de la région de Ouargla (Algérie). Il possède une granulométrie moyenne assez homogène comprise entre 200 et 250 μm . Il est composé principalement de la silice. La forme générale des particules individuelles est variable: angulaire pour la plupart des petites particules et les plus grosses sont arrondies.

Dans leur travail, BOUSBAA et al.(2003), ont déterminé par indentation Vickers la micro-dureté et la longueur moyenne des fissures radiales qui donne une idée sur la ténacité du sable, ils ont obtenu les valeurs :

Dureté Vickers : $H_v = 14,49 \pm 3,28 \text{ GPa}$

Fissure radiale : $2C = 20,9 \pm 1,8 \mu\text{m}$

3.3 Dispositif de sablage

Ce dispositif a été réalisé au niveau du laboratoire des Matériaux Non Métalliques au Département d'Optique et de Mécanique de Précision. Son schéma de principe est présenté sur la figure 3.1.

Il est composé des éléments suivants :

- Un moteur de ventilation à vitesse variable;
- Une trémie de sable à débit variable;
- Une buse de diamètre 25 mm et de longueur 1 m;
- Un porte échantillon pivotable entre 0° et 90° .

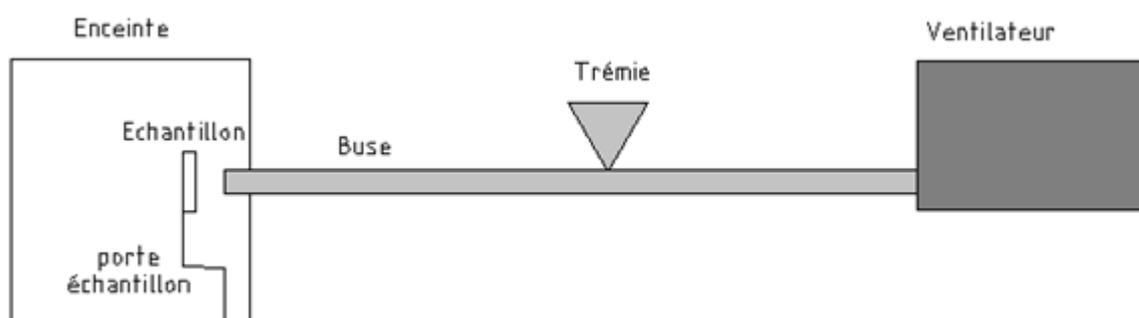


Figure 3.1 : Schéma du dispositif souffleur de sable utilisé

L'angle d'impact sélectionné dans cette étude correspond au cas le plus défavorable d'impact, c'est à dire une orientation normale de l'échantillon à l'écoulement de sable à l'angle de 90° . La vitesse de l'écoulement du sable est pris égal à environ 16,5 m / s, ce qui représente

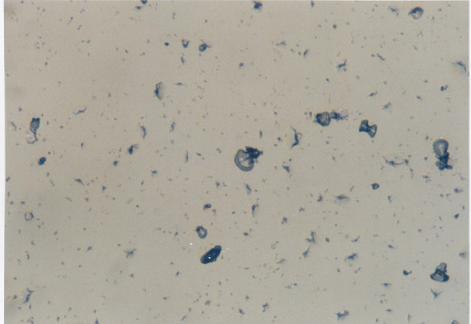
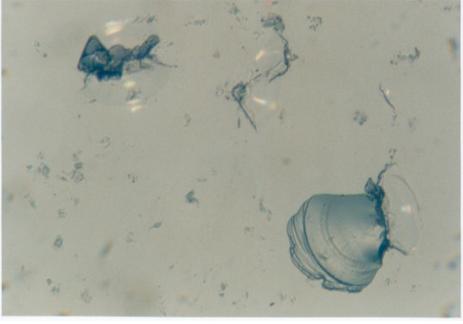
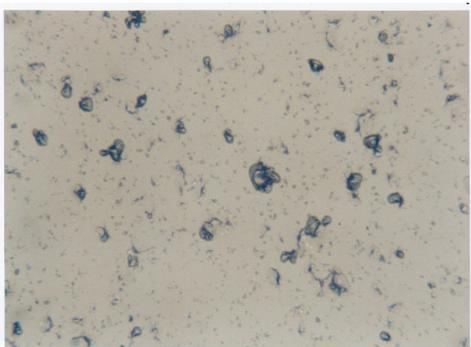
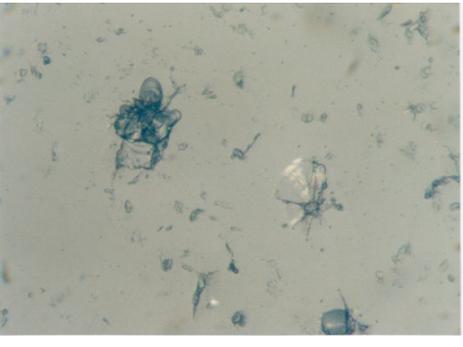
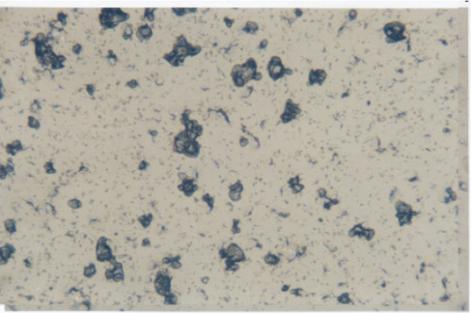
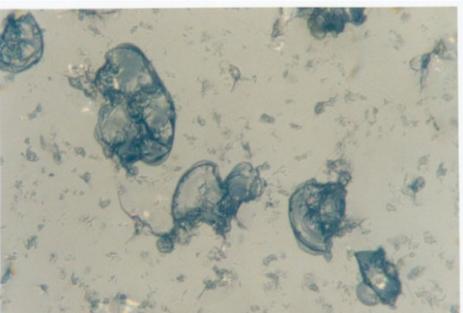
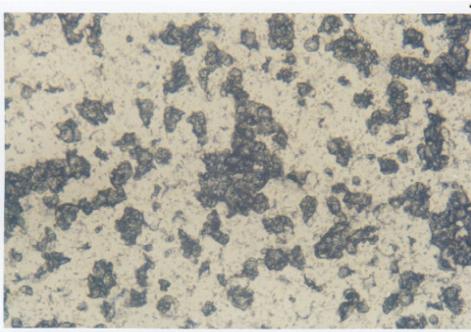
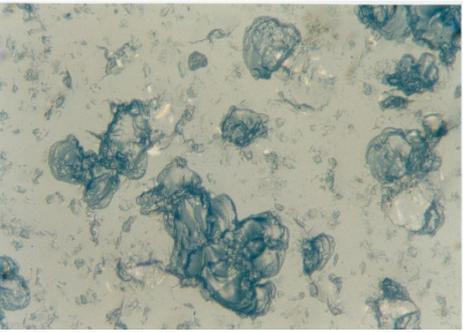
une vitesse moyenne habituellement rencontrées dans le Sahara d'Algérie. Dans des conditions réelles, les vents de sable commencent généralement à partir d'une vitesse d'environ 12 m/s. Les vitesses maximales enregistrées jusqu'à maintenant sont variables entre 25 et 30 m/s. Nous plaçons les échantillons de verre dans le porte échantillon à une distance de 50mm de la buse. Le porte échantillon est fixé dans une enceinte qui permet de récupérer le sable utilisé et d'empêcher le sable de s'éparpiller. Nous pesons le sable pour le verser dans la trémie. Le sable est ensuite envoyé dans la buse par un flux d'air soufflé à l'aide d'un ventilateur.

3.4 Détermination de la densité des impacts de sable

Nous avons utilisé un microscope métallographique de type Neophot 21 qui est disponible au niveau du laboratoire des matériaux non métalliques (LMNM). Il permet d'observer et de photographier les fissures pour voir leurs types et leurs propagations. L'observation se fait en deux agrandissements 50× et 320×.

Les photographies obtenues sont présentées par la figure (3.2). Celles à 50x nous permettent de voir la densité des impacts sur la surface du verre, tandis que celles à 320x nous aident à déterminer les types de fissures et leurs propagations.

Partie expérimentale

Grandisse- -ment Masse de Sable projeté	50x	320x
2g		
5g		
10g		
20g		

Partie expérimentale

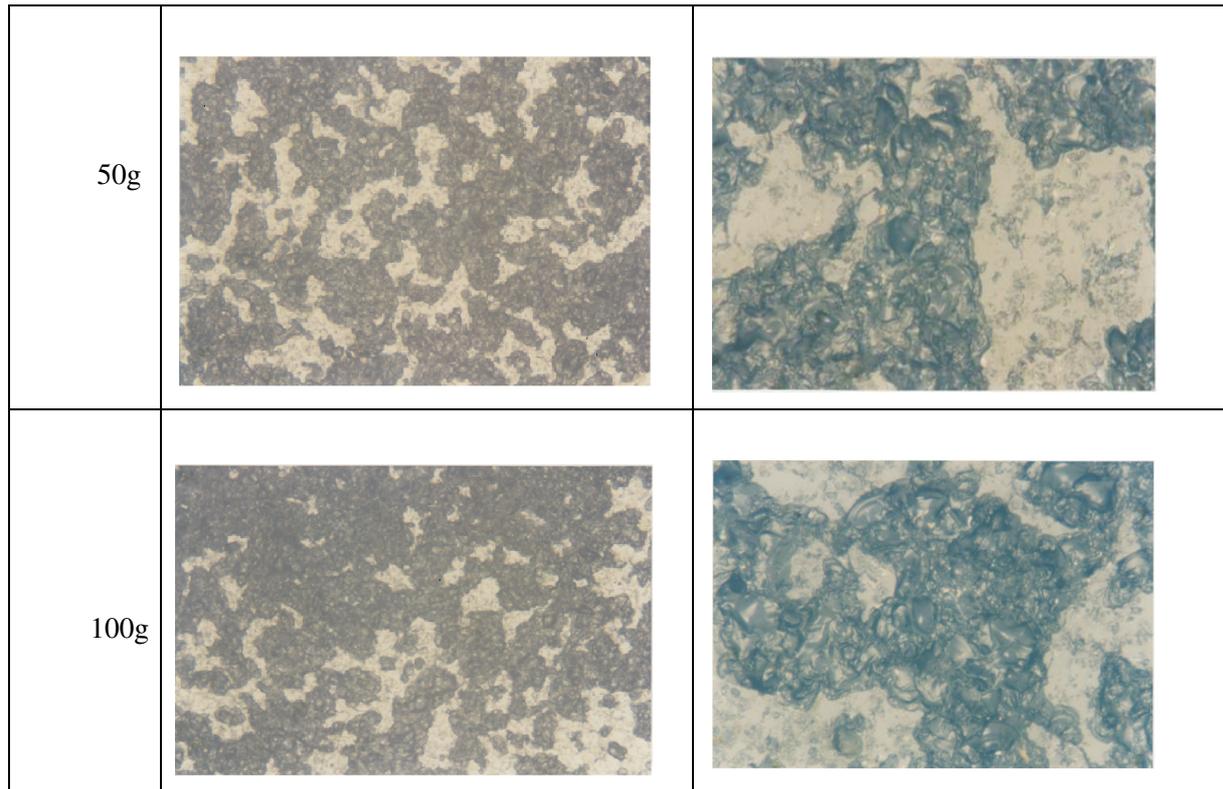


Figure 3.2 : Les photographies des échantillons obtenues avec le microscope métallographique

Nous voyons clairement que l'endommagement s'aggrave à mesure que la masse de sable projeté augmente. Avec l'agrandissement de 320x, les micrographies révèlent que l'enlèvement de matière se fait par fissuration et écaillage. A partir de 5g de sable projeté, il se manifeste un phénomène d'interaction des fissures qui s'amplifie au fur et à mesure et qui mène à un mécanisme de perte de masse par effritement. Vers 20g et probablement plus, il y a formation de zones endommagées plus ou moins étendues.

Les photographies de grandissement de 50x sont traitées par un logiciel de traitement d'image. Elles sont rendues des images binaires représentées sur la figure 3.3.

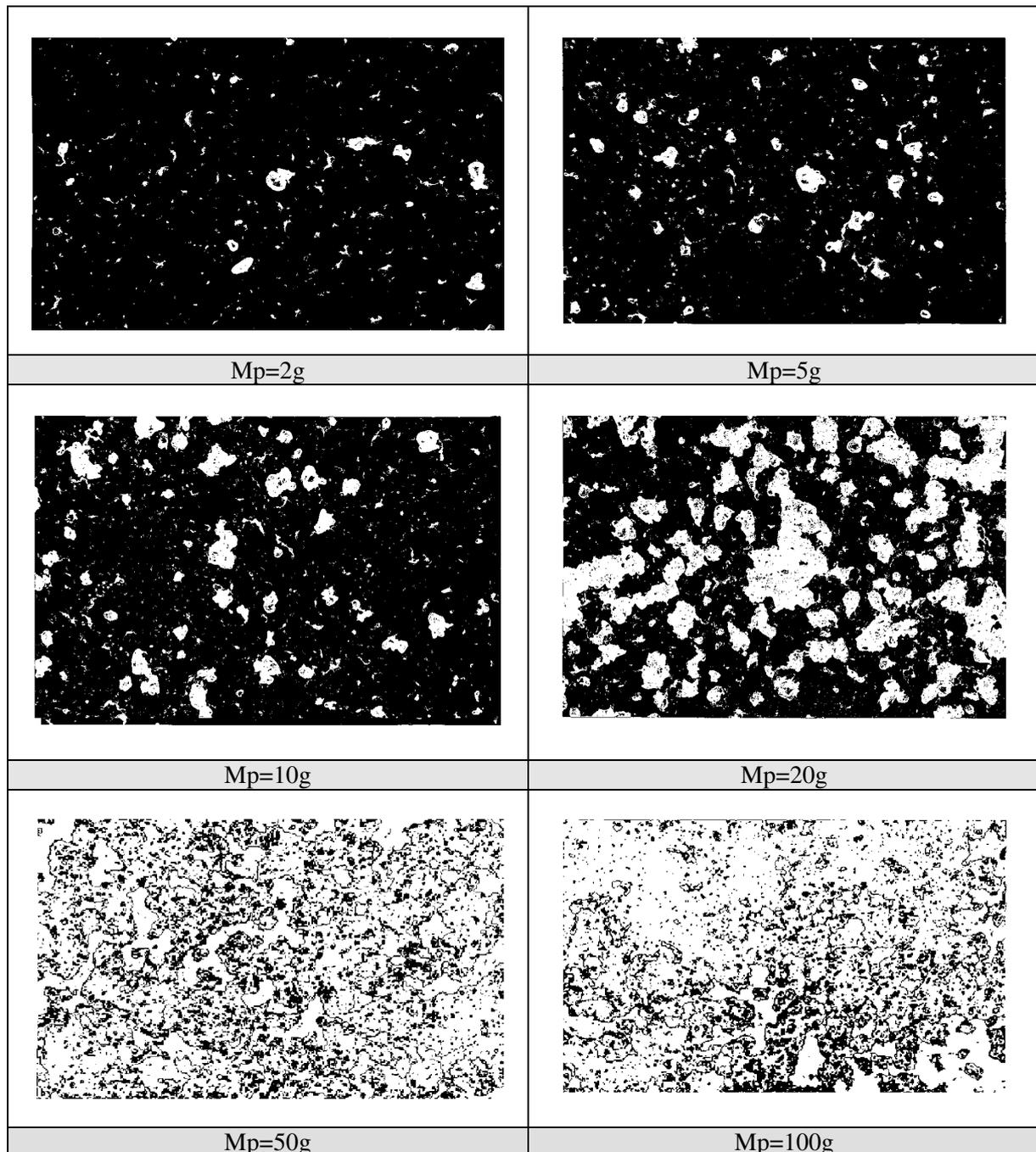


Figure 3.3 : les photographies en représentation binaire

Les zones en blanc représente les défauts sur le verre par contre les zones en noir c'est la surface du verre non touchée.

Le logiciel donne le nombre de pixels qui sont en blanc et ceux qui sont en noir ainsi que leur pourcentage. A partir de ces valeurs on a tracé la courbe de la figure 3.4. Cette figure représente le pourcentage des points blancs en fonction de la masse de sable projeté.

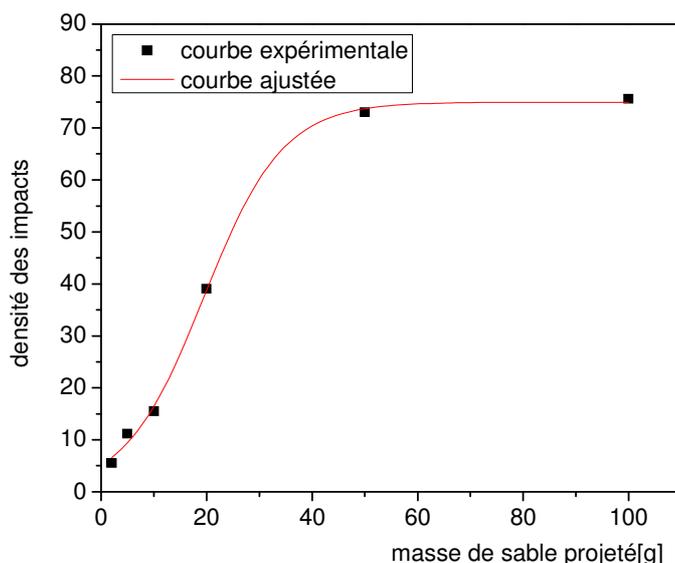


Figure 3.4 : Courbe de densité des impacts en fonction de la masse de sable projeté

L'évolution de la densité des impacts en fonction de la masse de sable montre qu'elle croît rapidement avec la masse de sable jusqu'à la masse de sable projeté de 50g pour devenir constante pour les masses supérieures.

La densité des impacts de sable suit la relation mathématique (3.1) obtenue par la régression des résultats avec un coefficient d'ajustement de 0,99793.

$$densité = \frac{74,95}{(1 + 13,5 \exp(-0,13Mp))} \dots\dots\dots 3.1$$

3.5 Mesure de la Rugosité

Afin de connaître l'état de surface des verres érodés en termes de valeurs, on a utilisé un rugosimètre de type MITUTOYO SURFTEST 301 disponible au niveau du laboratoire de métrologie de l'institut d'Optique et mécanique de précision. Le rugosimètre à action mécanique est muni d'un palpeur à contact avec la surface dégradée avec une course de mesure de

0,83mm. La figure 3.5 montre les courbes de rugosité arithmétique Ra, quadratique Rq et totale Rt en fonction de la masse de sable projetée.

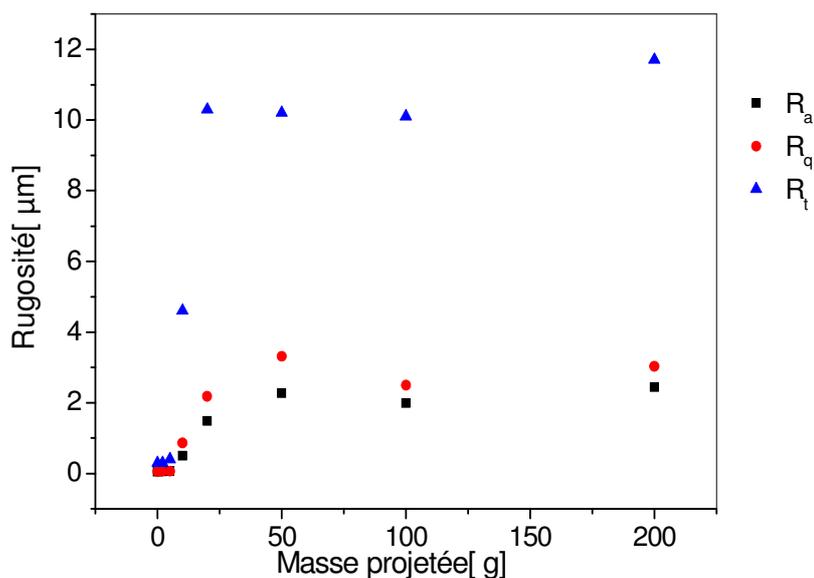


Figure 3.5 : La rugosité en fonction de la masse de sable projeté Adjouadi N. et al. (2007)

Le comportement des courbes est similaire : nous observons une augmentation de la rugosité suivie presque d'un palier. Ce dernier correspond à l'homogénéisation de la surface dégradée pour les fortes masses projetées. Le niveau de rugosité atteint est compris entre 10 et 12µm pour R_t , alors que celui correspondant au paramètre R_a , il est de l'ordre de 2,3µm pour une masse projetée de 200 g.

3.6 Mesure de la transmission avec le microdensitomètre

Dans cette étude, on a utilisé le microdensitomètre MD100 CARL ZEIS IENA pour la mesure de la transmission. Nous avons traité deux cas d'incidence de lumière. Une incidence normale à la surface du verre et une incidence oblique par rapport à la normale dans le but d'imiter l'inclinaison du pare brise sur le véhicule. Dans cette partie, nous allons utiliser un microdensitomètre afin de mesurer la transmission (T%) du verre après sablage avec différentes masses de sable.

En premier lieu, nous faisons les mesures pour une incidence de la lumière normale à la surface de l'échantillon. En second lieu, la mesure de la transmission (T%) se fera pour une incidence oblique, c'est-à-dire que nous allons créer un angle d'incidence de la lumière sur le verre.

3.6.1 Incidence normale à la surface

Un faisceau lumineux de la source (s) est réfléchi sur l'échantillon (E) par un miroir. Lorsque ce faisceau traverse l'échantillon sablé il sera récolté par l'objectif.

Nous prélevons pour chaque échantillon sablé la valeur de la transmission lue figure 3.6.

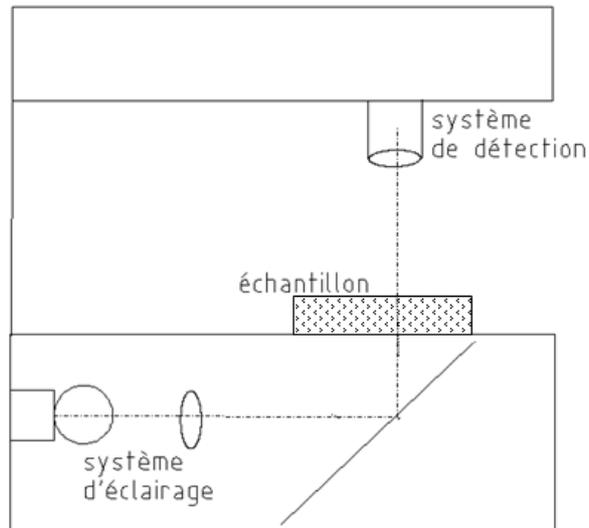


Figure 3.6 : Schéma de mesure avec le microdensitomètre pour une incidence normale $\theta_i = 0^\circ$

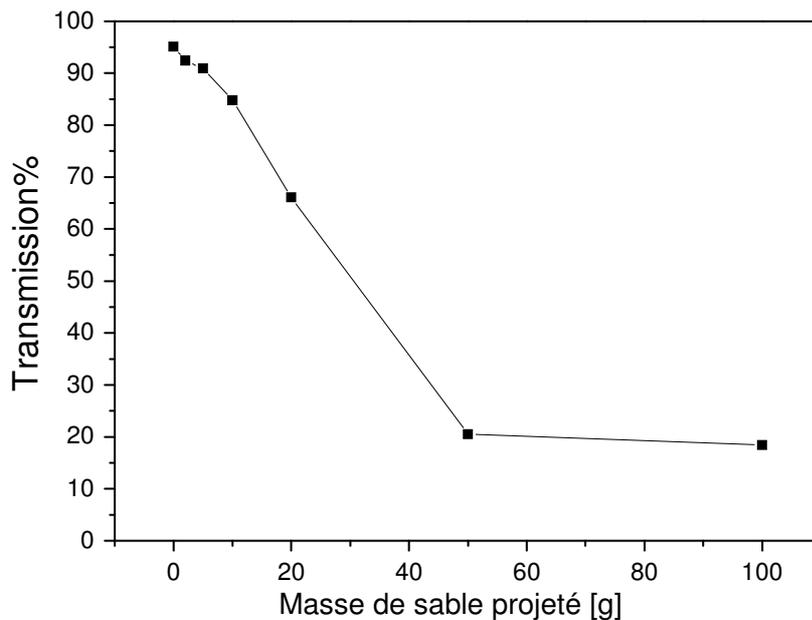


Figure 3.7 : La transmission mesurée en fonction de la masse de sable projeté

Comme premières constatations, nous pouvons dire que la transmission (T%) du verre diminue en fonction de la masse de sable projeté et elle diminue d'une manière non proportionnelle en fonction de la rugosité.

A partir des résultats de la transmission optique, la diffusion de la lumière est déduite tout en considérant que l'absorption est négligeable devant la transmission et la diffusion. Elle est calculée en appliquant la relation 3.2

$$T\% + D\% = 100\% \dots\dots\dots 3.2$$

Et le flou peut être calculé au moyen de la relation 3.3

$$H\% = \frac{D\%}{T\%} \cdot 100 \dots\dots\dots 3.3$$

Les résultats des calculs obtenus permettent de tracer la courbe de diffusion de lumière et le flou en fonction de la masse de sable projeté qui sont présentées sur la figure 3.8

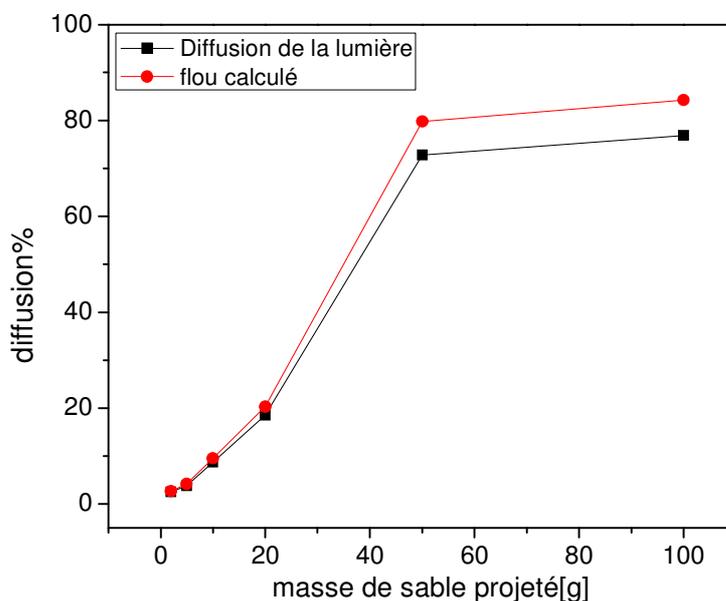


Figure 3.8 : La diffusion de la lumière et le flou en fonction de la masse de sable projeté

L'évolution du flou est comparable à celle de la diffusion de la lumière pour les masses de sable projeté inférieures à 20g. Il devient relativement supérieur au-delà.

La figure 3.9 représente la diffusion calculée en fonction de la masse de sable projeté et sa courbe approximative.

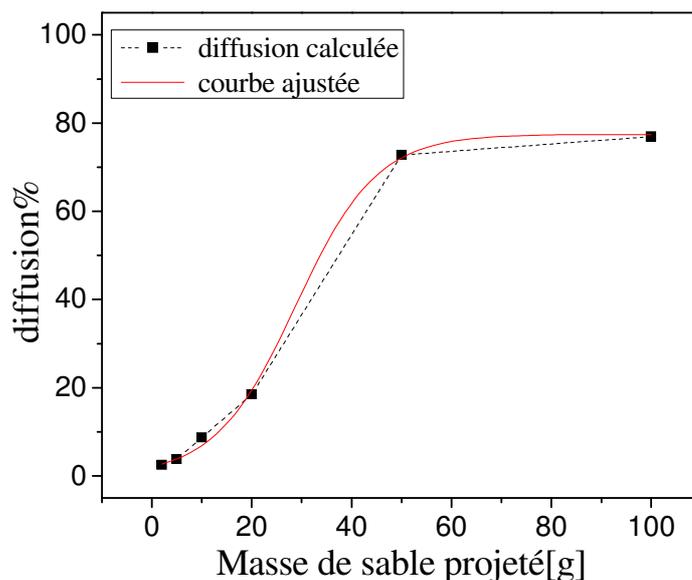


Figure 3.9 : La diffusion calculée et sa courbe approximative

De cette courbe expérimentale, nous tirons la courbe approximative qui suit la relation la forme donnée par la relation 3.4 avec un coefficient d'ajustement de 0,99864.

$$diffusion\% = \frac{77,44}{(1 + \exp(-0,12(Mp - 28,85)))} \dots\dots\dots 3.4$$

La figure 3.10 illustre le schéma qui montre la zone centrale de l'échantillon érodé où nous avons effectué la mesure de rugosité et de la transmission.

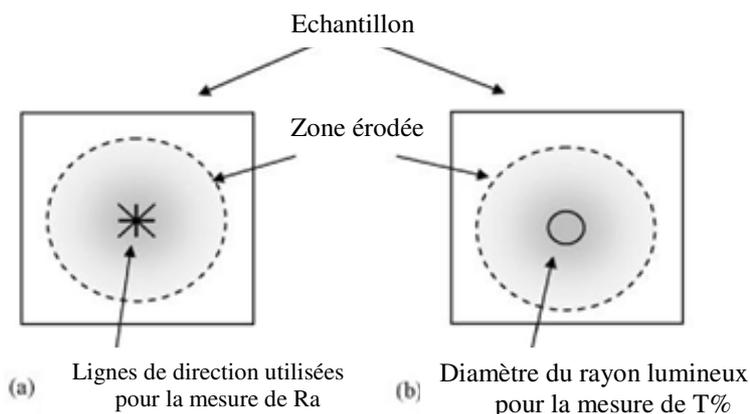


Figure 3.10 : Schéma montrant la zone centrale de l'échantillon érodé par sablage Adjouadi N. et al.(2007)

(a) Direction des lignes utilisées pour mesurer la rugosité

(b) Diamètre du faisceau lumineux pour mesurer la transmission optique

La valeur moyenne de rugosité est donnée selon quatre lignes de direction dans la zone centrale endommagée. Ceux de la transmission sont donnés en fonction d'une surface qui correspond au diamètre du faisceau de lumière incidente (2,2mm de la zone centrale). Ce faisceau intercepte un certain nombre de défauts supérieur. L'évolution de la transmission optique $T\%$ et la rugosité arithmétique Ra obtenu selon les masses de sable projetés M_p est présenté dans la figure 3.11.

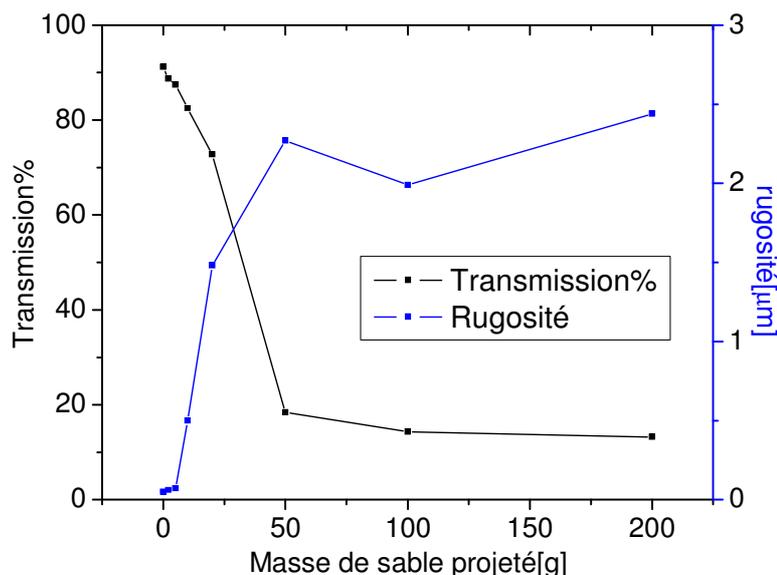


Figure 3.11 : Variation de la transmission optique en fonction de la rugosité montrant le point d'inflexion Adjouadi N. et al.(2007)

Nous constatons que la transmission et la rugosité évoluent dans des directions opposées.

La rugosité augmente fortement jusqu'à $2,27\mu\text{m}$ ($M_p = 50\text{g}$) et tend vers un niveau de saturation au-delà. Des études antérieures montrent que le comportement de rugosité présente les étapes suivantes: une forte augmentation jusqu'à une valeur maximale suivie d'un niveau "plateau" à peu près constante d'une forme ondulée de faible amplitude autour de ce plateau. Cette forme ondulée s'explique par l'élimination des pics (égalisation des faciès), puis la création des différences entre les creux et les pics.

La transmission optique diminue régulièrement jusqu'à environ 16% (150 g de la masse de sable projeté) et tend à se stabiliser au-delà. La chute de transmission totale est d'environ 76%. La perte de transmission se fait par réflexion pour les faibles masses de sable projeté parce que la surface érodée n'est pas suffisamment endommagée. Pour les grandes masses de sable projetés, la perte se fait principalement par diffusion à cause du grand nombre d'écailles

et les endommagements qui diffusent la lumière incidente. Il est bien connu que la première étape d'érosion du verre qui est essentiel pour la formation de la lumière parasite est la création d'écaillles et des rayures. Les sites d'endommagements résultants des particules de sable (allant dans l'intervalle 200-250 μm) sont souvent microscopiques, mais les microfissures et les défauts qui sont créés agissent comme centres de diffusion efficaces pour la lumière entrante. Par conséquent, la transmission optique diminue.

3.6.2 Incidence oblique à la surface

En réalité, les pare-brise des véhicules sont généralement constitués d'un double vitrage séparé par une feuille de Polyvinyle Butural (PVB) transparent et sont placées en position oblique. Le but est de voir l'influence de l'angle d'inclinaison du pare brise sur le véhicule sur la transmission. Pour obtenir des angles d'incidence autre que la direction normale, nous utilisons des cales étalons qui nous permettent de relever l'échantillon d'un cotés par rapport à l'horizontale. L'angle obtenu peut être calculé par le rapport de la valeur des cales par la distance entre le point d'appui de l'échantillon sur la table et la position des cales figure 3.12b.

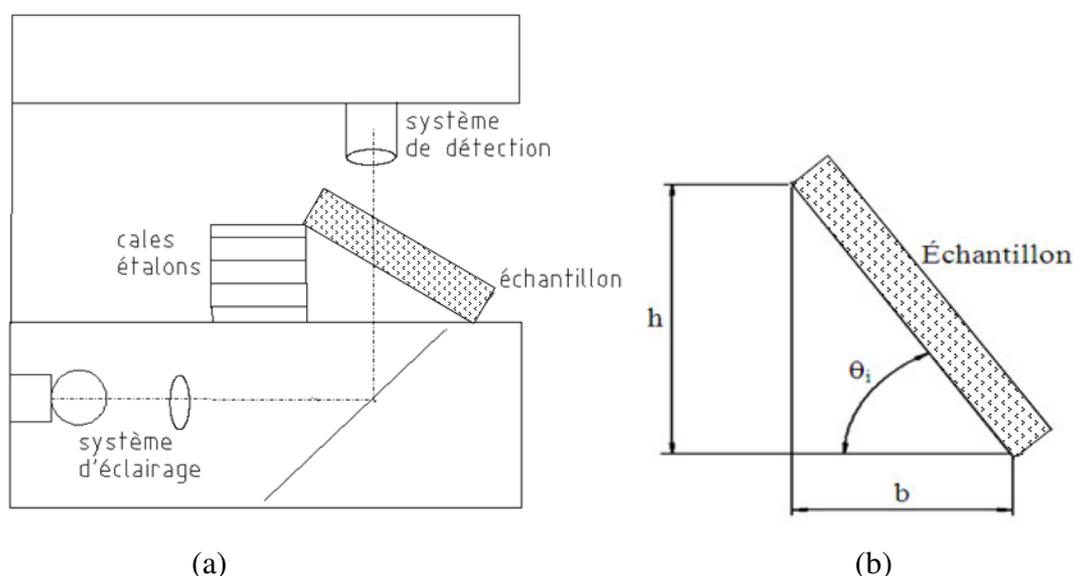


Figure 3. 12 : Schéma de mesure avec le microdensitomètre pour une incidence oblique

a- Sur le microdensitomètre

b- Schéma de calcul de l'angle d'inclinaison

Chaque angle est déterminé par la dimension des cales utilisées (h) et une longueur de base (b) déterminée à l'aide d'un papier millimétré déposé sur la plaque porte échantillon. L'angle est calculé par :

$$\operatorname{tg} \theta_i = \frac{h}{b} \dots\dots\dots 3.5$$

Pour chaque angle d'incidence θ_i , nous effectuons une série de mesurage de la transmission pour chaque échantillon. Nous traçons les courbes de transmission en fonction de la masse de sable projeté pour les différents angles d'incidence qui sont présentés sur la figure 3.13.

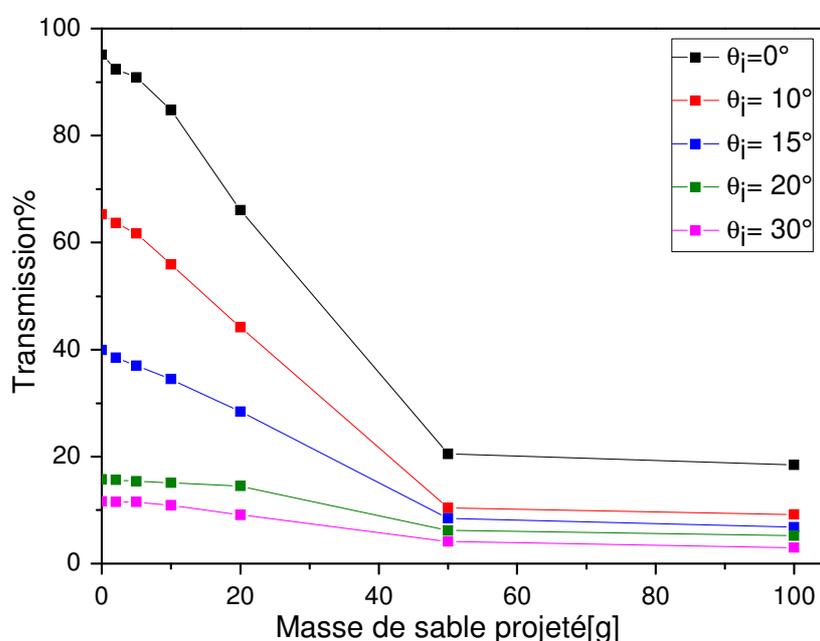


Figure 3.13 : Transmission en fonction de la masse de sable projeté pour chaque angle d'incidence

La courbe de transmission pour l'incidence normale est en décroissance jusqu'à la masse de sable de 50g avec un maximum pour l'échantillon non sablé qui est aux alentours de 92%. La transmission devient constante pour les masses de sables supérieure à 50g.

Pour les directions d'incidence autres que la normale, la tendance des courbes est la même que pour l'incidence normale sauf que les valeurs de transmission correspondantes se voient en diminution qui est due à la réflexion.

Pour les petites masses de sable, la rugosité est minime donc, la surface est peu endommagée et la transmission reste toujours proche de celle de l'échantillon sain. La transmission chute rapidement jusqu'à la masse de 50g, au-delà, elle devient constante. Cette constance est la conséquence du phénomène de saturation de l'érosion.

3.7 La diffusion transmise de la lumière en fonction d'angle de diffusion

Afin de déterminer la variation de la diffusion transmise en fonction des angles de diffusion, nous avons utilisé le montage optique présenté dans la figure 3.14. Ce montage est constitué essentiellement d'une source de lumière blanche à Xénon de type Oriol (200-500W, Xe/HgXe), la puissance utilisée est 350Watt. D'un système d'éclairage Köhler et d'un système de détection.

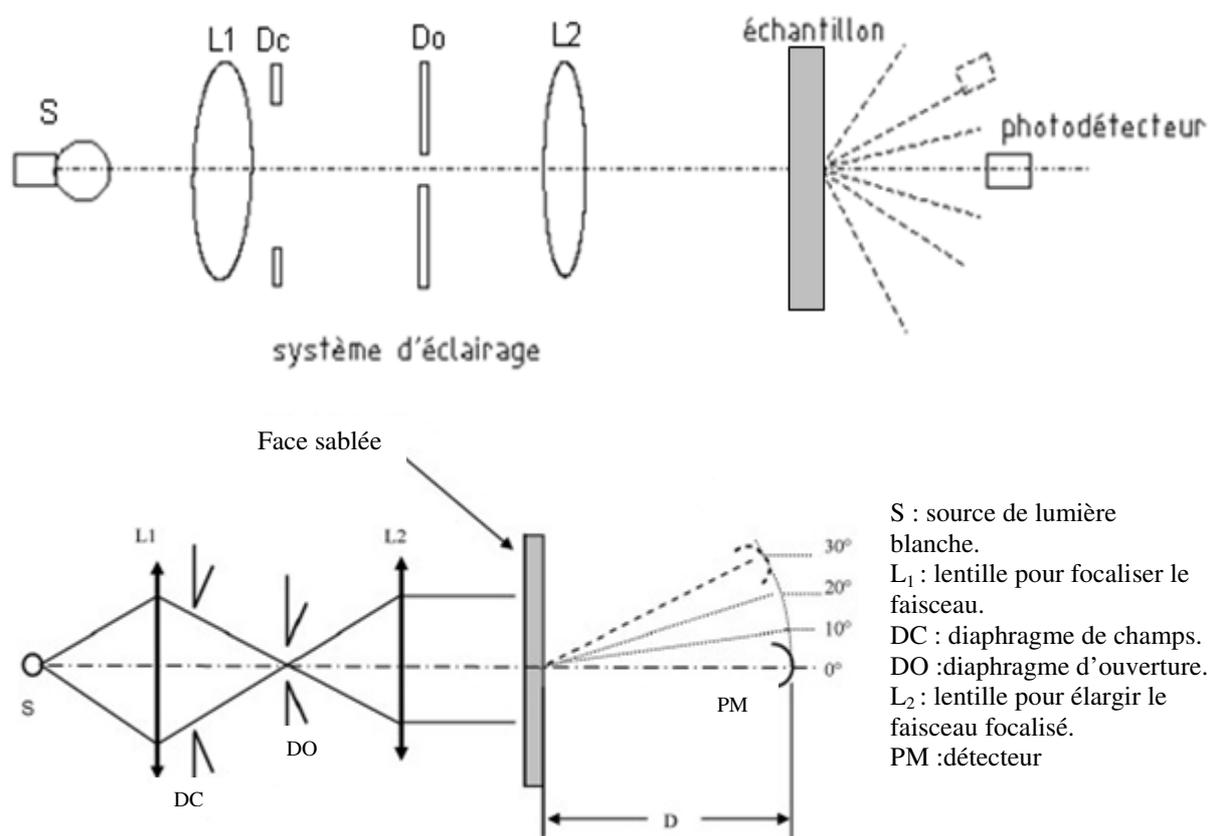


Figure 3.14 : Schéma du montage optique de mesure de la diffusion transmise de la lumière

Le système d'éclairage Köhler est constitué d'une lentille, un diaphragme de champs, un diaphragme d'ouverture et d'une deuxième lentille. Le système de détection est composé d'un photodétecteur relié à un nano-ampèremètre de type EVA (10 nA – 1 mA).

3.7.1 Fonctionnement du montage

La (S) source émet un faisceau de lumière blanche qui est focalisée par la lentille (L1). Le diaphragme de champ (DC) permet de fixer le diamètre du faisceau de sortie. Le diaphragme d'ouverture (DO) permet de contrôler l'intensité de la lumière incidente sur la surface de l'échantillon. Un faisceau parallèle (avec une énergie et un diamètre constants) est obtenue en utilisant la lentille (L2). Les rayons sortants sont orientés à leur tour sur l'échantillon (E) qui diffuse la lumière. Le photodétecteur (PM), placé à une distance D , permet de recueillir le rayonnement transmis. L'angle de diffusion varie de -30 à $+30^\circ$ avec un pas de 2° . Nous varions la distance entre l'échantillon et la détection D (50, 100 et 150 mm) ainsi que le diamètre du faisceau incident ($\Phi = 1,07, 2,26$ et $3,23$ mm). Pour l'incidence normale, nous mesurons l'intensité de lumière incidente I_i , l'intensité de lumière transmise I_{02} et l'intensité de lumière diffusée I_d figure 3.15.

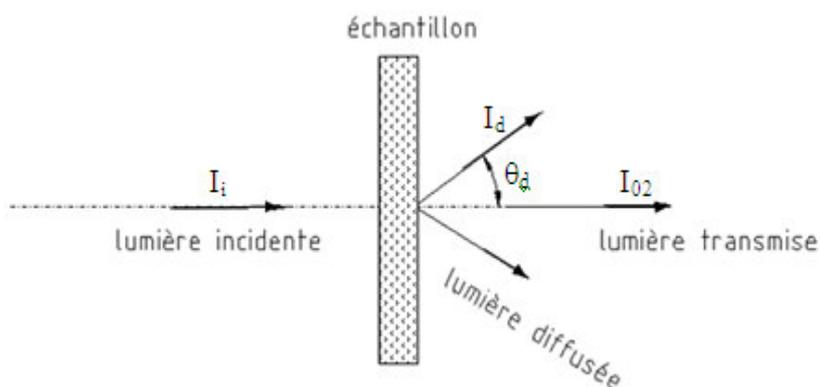


Figure 3.15 : Schéma illustrant l'angle de diffusion

3.7.2 La diffusion de la lumière transmise en incidence normale

Au début, nous déterminons la distribution de la lumière parasite (absence de l'éclairage). Nous trouvons que la lumière parasite n'influence pas les mesures. La figure 3.16 montre la distribution de la lumière incidente avec la lumière réfractée par l'échantillon non sablé.

Partie expérimentale

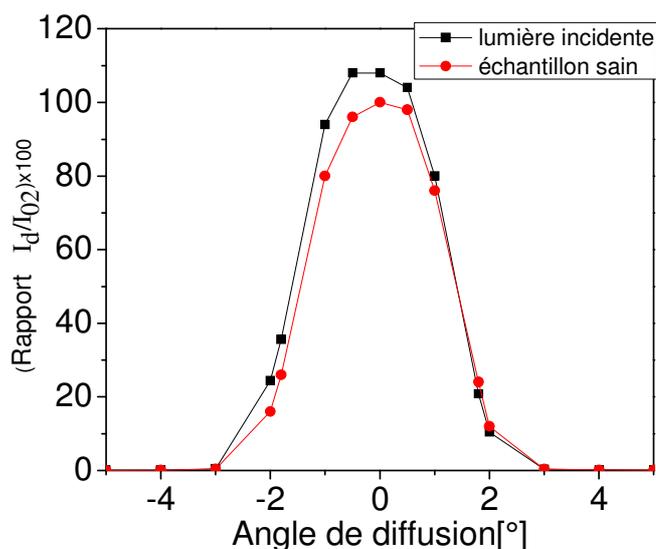


Figure 3.16 : La distribution de la lumière incidente et celle réfractée par l'échantillon sain

La différence entre le faisceau incident et la lumière réfractée par l'échantillon non-sablé correspond à la transmission optique du verre utilisé qui est de 93%.

La variation de la transmission de la lumière en fonction des angles de diffusion pour un échantillon en bon état et pour deux échantillons sablés avec 20 et 50g est présentée dans la figure 3.17.

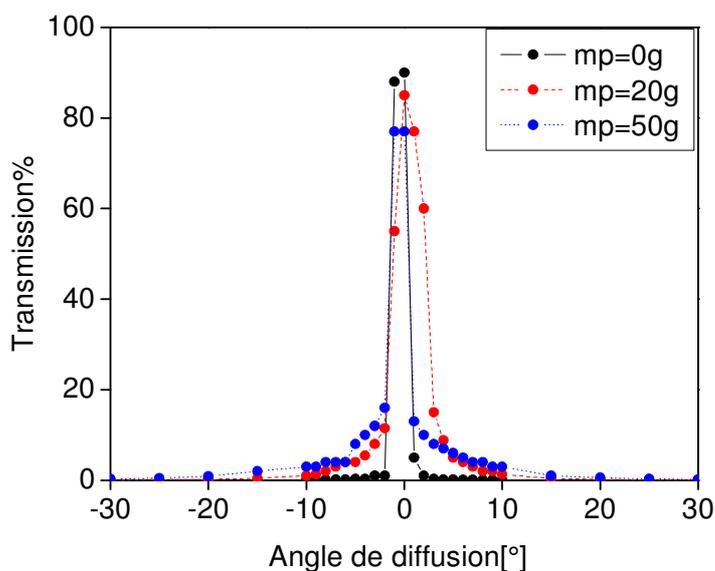


Figure 3.17 : Variation de transmission optique en fonction d'angle de diffusion pour trois échantillons ($D = 100$ mm et $\phi = 2,26$ mm) Adjouadi N. et al.(2007)

Les conditions utilisées pour les tests sont les suivants: le diamètre du faisceau incident est de 2,26mm et la distance échantillon-détecteur $D = 100\text{mm}$. Il est à noter que, pour l'échantillon non sablé, la perte de transmission est très faible et se fait essentiellement par la réflexion de lumière. La perte par diffusion est négligeable. Pour l'échantillon sablé avec 20g de sable, la transmission spéculaire chute de 91,6 à 87%, tandis que la transmission diffuse reste assez faible (13%).

La figure 3.18 montre les courbes de diffusion lorsque le diamètre du faisceau de lumière incidente est variée de 1,07 à 3,23mm ($D = 100\text{mm}$ et $M_p = 20\text{g}$). Nous observons que le maximum de transmission optique diminue à mesure que le diamètre du faisceau est réduit.

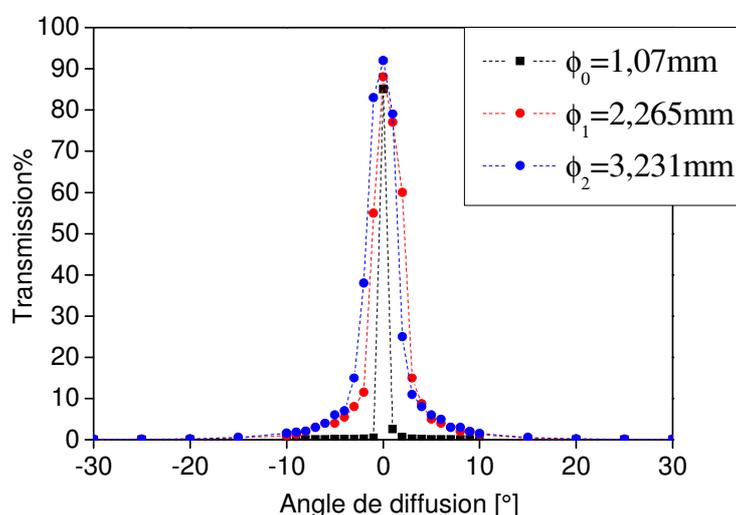


Figure 3.18 : Variation de la transmission optique en fonction des angles de diffusion pour différents diamètres du faisceau de lumière incident ($D = 100\text{ mm}$ et $M_p = 20\text{ g}$) Adjouadi N. et al.(2007)

Nous notons que le maximum de transmission optique diminue à mesure que le diamètre du faisceau est réduit. Les valeurs suivantes sont rapportées: 91,4% pour $\Phi = 3.23\text{mm}$, 89% pour $\Phi = 2,26\text{mm}$ et 86% pour $\Phi = 1.07\text{mm}$.

La figure (3.19) montre la distribution angulaire des différents états de surface en comparaison avec la distribution angulaire du faisceau incident.

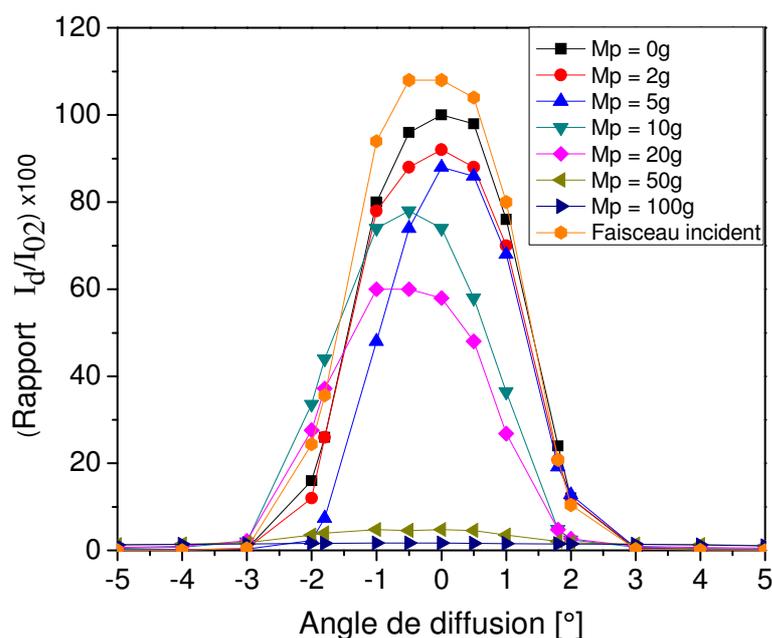


Figure 3.19 : Distribution angulaire pour tous les échantillons $\theta_i = 0^\circ$

A chaque fois que l'angle de diffusion augmente, des deux côtés de la direction normale, la diffusion diminue donc le rapport de l'intensité de lumière diffusée à l'intensité de lumière transmise (I_d/I_{02}) diminue. L'intensité de la lumière transmise est maximale dans la direction spéculaire à l'angle de diffusion égal à 0° . Au fur et à mesure que la masse de sable augmente (la surface s'endommage), la transmission diminue et la courbe s'aplatie. Cet aplatissement est très prononcé pour les échantillons très endommagés donc pour les échantillons sablés avec plus de 50g de sable.

Selon le journal (automotive glass news) de GEPVP 2002, l'indice de lumière perdue SLI qui permet de donner le flou du verre est défini par le standard allemand DIN 52298. Le SLI correspond au rayon de lumière pénétrant à l'angle de diffusion de $1,8^\circ$ à partir de l'axe optique multiplié par la transmission du pare brise.

Si nous prenons les mesures effectuées à l'angle de diffusion de $1,8^\circ$ figure 3.20a nous pouvons voir que l'intensité mesurée est inversement proportionnelle à la masse de sable projeté. Cela correspond à la variation de la transmission. Notre phénomène apparaît aux alentours de l'angle de diffusion de 3° où l'intensité augmente avec l'augmentation de la masse de sable projeté figure 3.20b.

Partie expérimentale

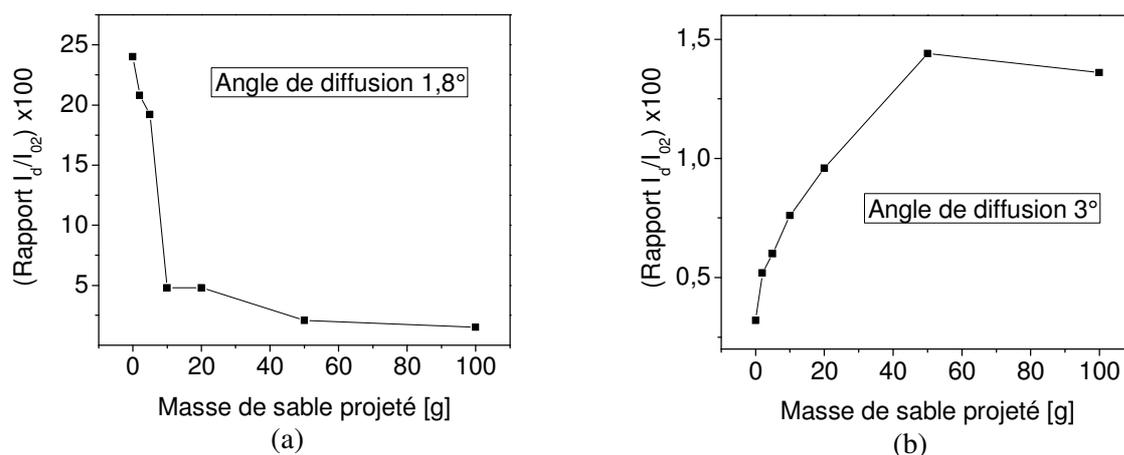


Figure 3.20 : Comparaison entre la distribution de l'intensité diffusée à l'angle de diffusion (a) 1,8° et (b) 3°

La diffusion de la lumière est présente dans l'intervalle [3° 90°]. Elle est plus considérable dans l'intervalle [3° 6°] au-delà de 6°, il y a atténuation des rayons diffusés selon la figure 3.21.

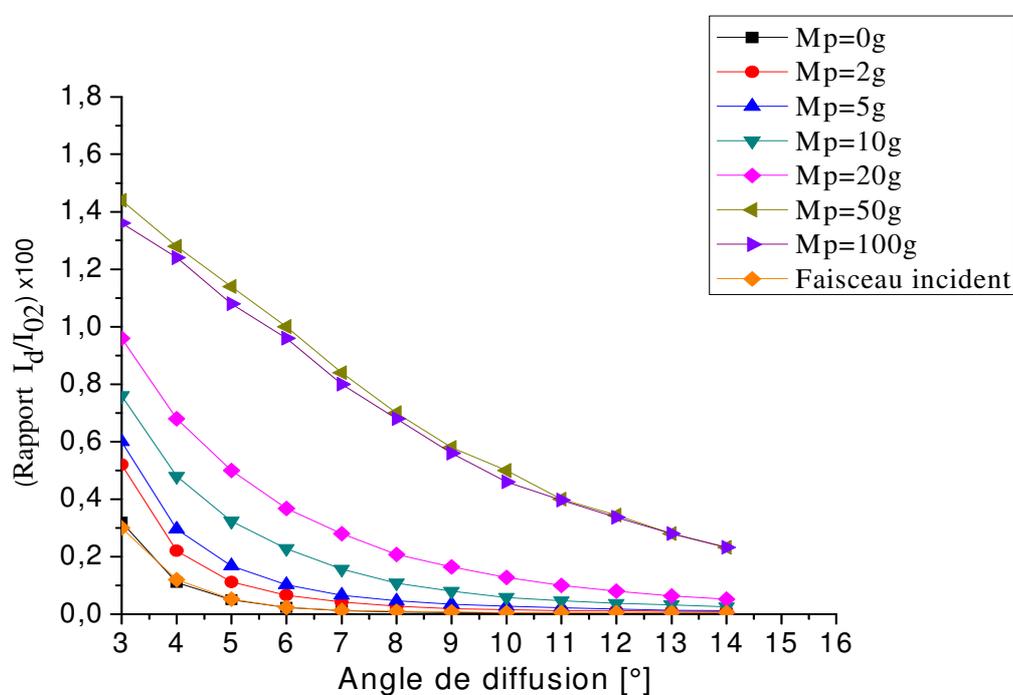


Figure 3.21 : Le rapport I_d/I_{02} en fonction d'angle de diffusion de [3° 14°] pour les différents échantillons sablés

Partie expérimentale

La figure 3.22 illustre les courbes ajustées des courbes du rapport I_d/I_{02} en fonction d'angle de diffusion pour l'incidence normale pour les différents échantillons.

Nous voyons que la distribution de l'intensité de lumière diffusée en fonction d'angle de diffusion suit la loi exponentielle avec un coefficient d'ajustement proche de 1. Ce coefficient qui varie de 0 à 1 indique le niveau de confiance du modèle d'ajustement. Lorsqu'il est proche de 1 le modèle choisi est le plus vrai. Pour l'échantillon sain et l'échantillon sablé avec 5g, les variations sont présentées dans une échelle linéaire. Par contre, celles des autres échantillons sont tracées sur une échelle semi-logarithmique. Les relations données par l'ajustement des courbes sont présentées sur le tableau 3.3.

Partie expérimentale

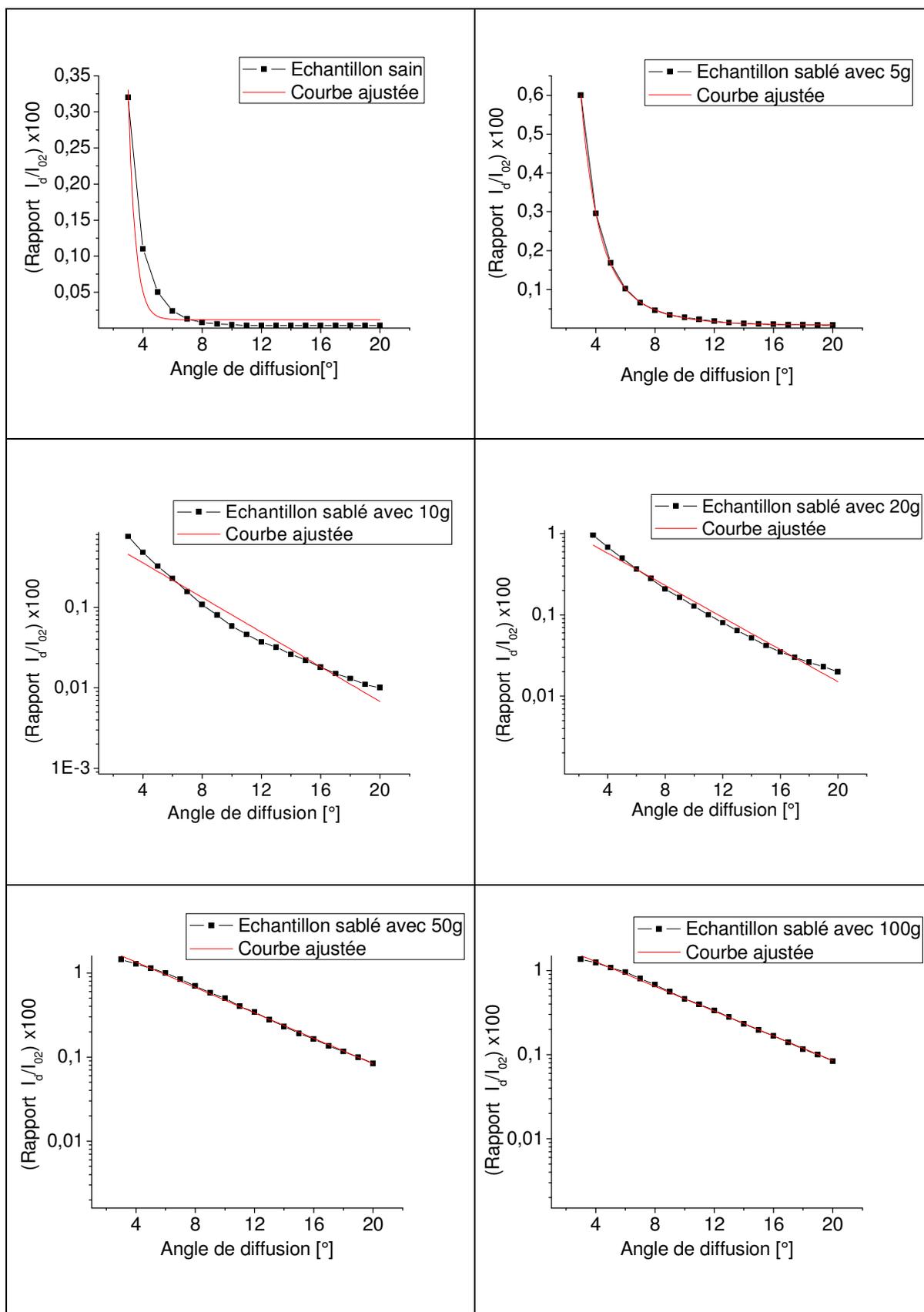


Figure 3.22 : Les courbes de diffusion avec les courbes ajustées pour différents échantillons

Le Tableau 3.3 illustre les équations obtenues par ajustement des courbes pour différents échantillons

Tableau 3.3 : les équations obtenues par ajustement des courbes pour différents échantillons

Echantillon	Equation	Coefficient d'ajustement
Echantillon sain	$\left(\frac{I_d}{I_{02}} \times 100\right) = -177,71 \left(1 - \exp\left(-\frac{\theta_d}{9,53 \cdot 10^{-4}}\right)\right) - 177,71 \left(1 - \exp\left(-\frac{\theta_d}{0,47}\right)\right) + 355,42$	0,92635
Echantillon sablé avec 5g	$\left(\frac{I_d}{I_{02}} \times 100\right) = 0,62 \exp\left(-\frac{\theta_d}{2,84}\right) + 7,68 \exp\left(-\frac{\theta_d}{0,99}\right) + 0,0078$	0,99992
Echantillon sablé avec 10g	$\log\left(\frac{I_d}{I_{02}} \times 100\right) = -0,107 \cdot \theta_d - 0,017$	0,96325
Echantillon sablé avec 20g	$\log\left(\frac{I_d}{I_{02}} \times 100\right) = -0,098 \cdot \theta_d + 0,15$	0,98371
Echantillon sablé avec 50g	$\log\left(\frac{I_d}{I_{02}} \times 100\right) = -0,07 \cdot \theta_d + 0,43$	0,99794
Echantillon sablé avec 100g	$\log\left(\frac{I_d}{I_{02}} \times 100\right) = -0,07 \cdot \theta_d + 0,40$	0,99837

Nous remarquons que les variations de l'intensité de lumière diffusée pour les différents échantillons sablés avec différentes masse de sable suivent une loi exponentielle avec différents facteurs.

3.7.3 La diffusion de la lumière transmise en incidence oblique

Pour l'incidence oblique ($\theta_i \neq 0^\circ$), l'échantillon est incliné avec des angles allant de 10° et 45° par rapport à la direction d'incidence de la lumière figure 3.24.

Partie expérimentale

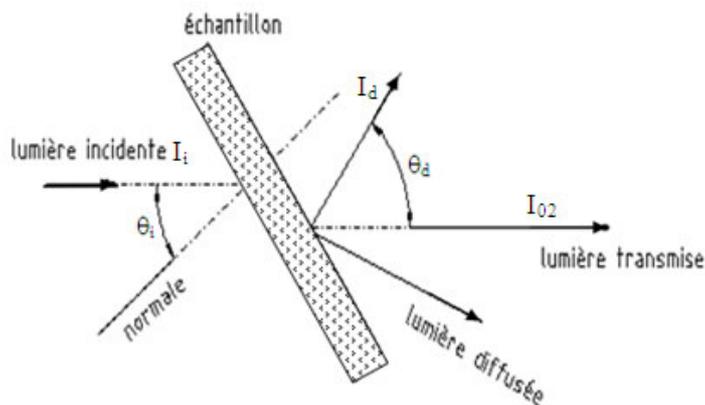


Figure 3.24 : Schéma montrant les angles d'incidence et de réfraction

Le graphe de la figure 3.25 représente la distribution angulaire de l'intensité de lumière diffusée pour différents échantillons sablés et pour les angles d'incidence 15° , 20° , 30° et 45° .

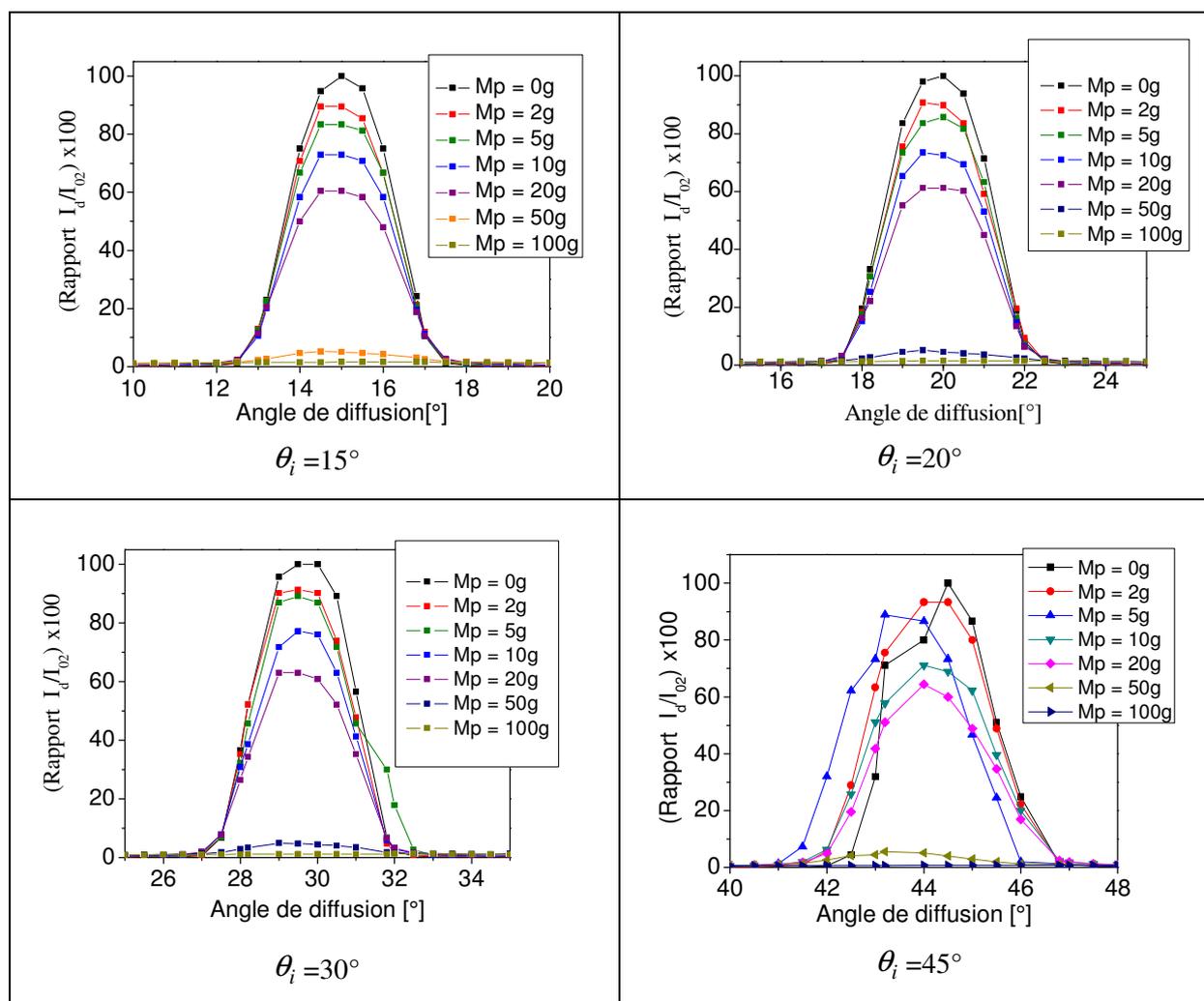


Figure 3.25 : Distribution angulaire pour tous les échantillons pour différents angles d'incidence

Pour tous les angles d'incidence, nous observons que la transmission est maximale dans la direction spéculaire. Au fur et à mesure que l'angle de diffusion augmente, le rapport I_d/I_{02} diminue de part et d'autre de la direction spéculaire. L'angle d'inclinaison n'influence pas la tendance des courbes.

3.8 La diffusion de la lumière en réflexion

Pour déterminer la distribution angulaire de la lumière diffusée en réflexion par les différents échantillons, nous avons prévu le montage optique dont le schéma est montré par la figure 3.26.

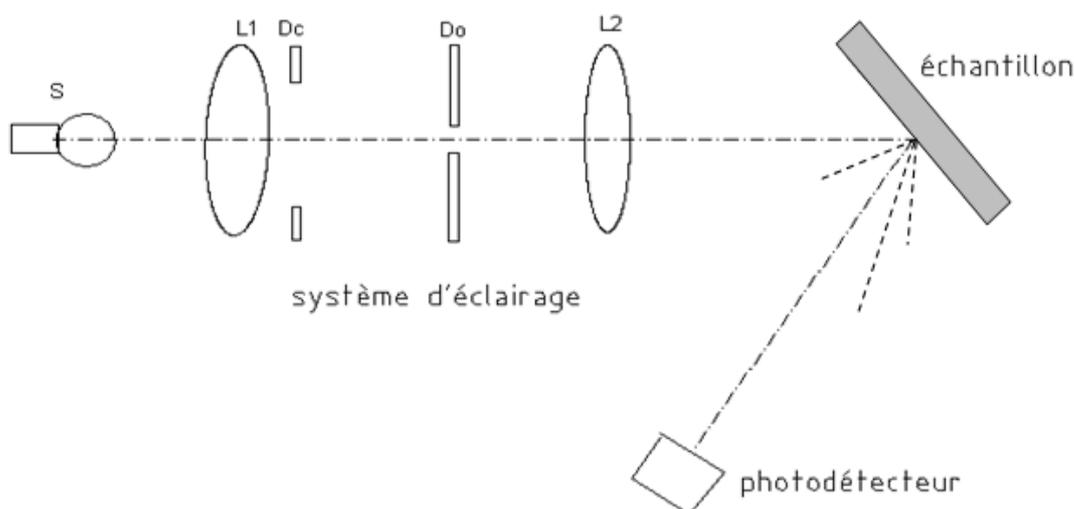


Figure 3.26 : Schéma du montage optique de mesure de la lumière diffusée en réflexion

Le montage est le même que celui de la mesure de lumière diffusée en transmission de la figure 3.14. Il est constitué essentiellement :

- source de lumière blanche à Xénon;
- d'un système d'éclairage Köhler constitué de lentille, diaphragme de champs, diaphragme d'ouverture et d'une deuxième lentille ;
- d'un système de détection composé d'un photodétecteur et d'un nano-ampèremètre.

La source (S) de lumière blanche à Xénon émet des faisceaux lumineux. Le système d'éclairage Köhler rend les faisceaux parallèles. On peut contrôler la dimension du faisceau à l'aide du diaphragme d'ouverture (DO). On contrôle l'intensité avec le diaphragme de champs (DC). A la sortie de la deuxième lentille (L2) dont le foyer se confond avec celui de la première lentille (L1), on obtient un faisceau parallèle et homogène. Ce faisceau tombe sur l'échantillon posé sur le porte-échantillon. Devant l'échantillon, se positionne le phototransistor à la distance de 50mm.

L'échantillon est dévié d'un angle d'incidence θ_i avec la normale à la surface. Nous avons pris des angles d'incidence allant de 15° à 45° . Pour la détection, nous n'avons pas pu effectuer des mesure sur une plage égale à π parce que pour les positions proches de la direction d'incidence, le détecteur va se positionner dans la trajectoire de la lumière figure 3.27.

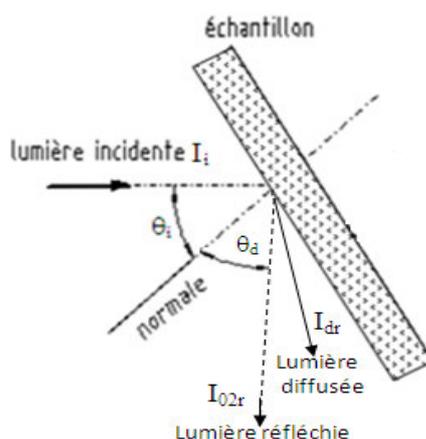


Figure 3.27 : Schéma des angles de mesure en réflexion

La figure 3.28 représente la lumière diffusée en réflexion en fonction d'angle de diffusion pour les angles d'incidence 15° , 20° , 30° et 45° .

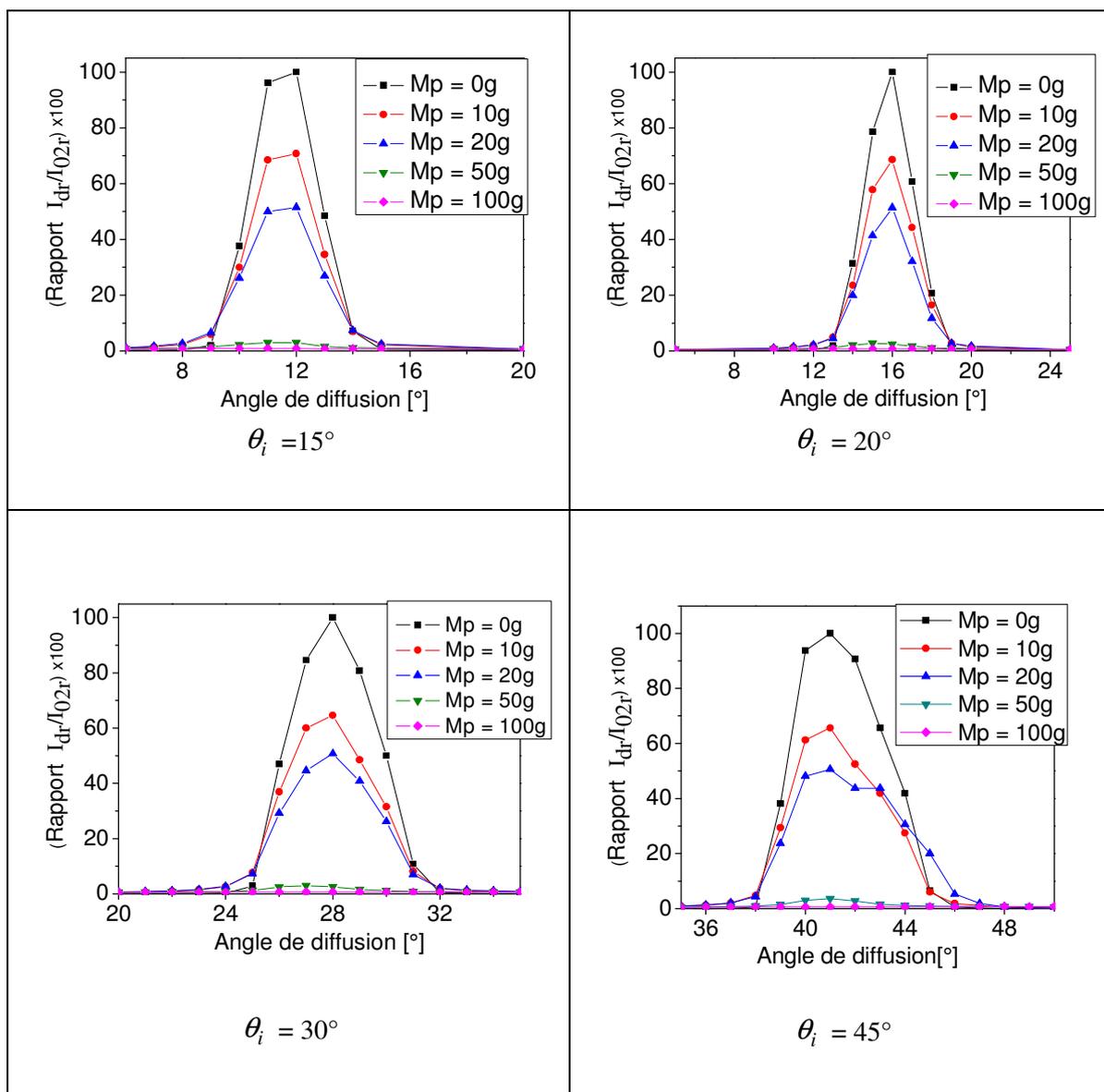


Figure 3.28 : Courbe de réflexion à l'angle d'incidence θ_i

L'intensité de lumière réfléchi diminue et les courbes s'aplatissent à chaque fois que la masse croît. Elle est en augmentation en fonction de la masse projetée. L'angle d'incidence n'influence pas la tendance de ces courbes.

3.9 Détermination de la limite de visibilité

Pour une bonne conduite d'un véhicule, il faut avoir une bonne visibilité à travers le pare-brise. Dans cette partie, nous allons déterminer une limite de visibilité acceptable pour un pare-brise sablé. Nous avons effectué, dans les points précédents, des mesures suivant un seul plan. Cette fois, nous allons faire des mesures dans l'espace en utilisant une détection surfacique. Les Paramètres variables sont les suivantes: le diamètre du faisceau incident et l'angle d'incidence.

3.9.1 La détection surfacique de la lumière diffusée en transmission

Dans cette partie, on remplace le photodétecteur du montage de la figure 3.14 de la détection ponctuelle de l'intensité de lumière diffusée par une caméra CCD, de type IVC TRIS-TAR-2, liée à un micro ordinateur. Cette caméra est placée dans la direction d'incidence de la lumière figure 3.29.

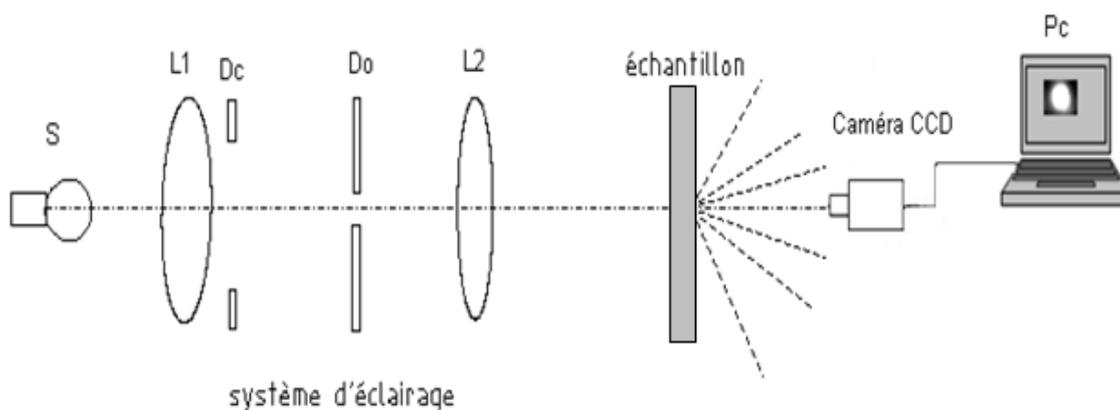


Figure 3.29 : Schéma du montage optique pour la détection surfacique en transmission

Pour l'incidence normale, nous posons l'échantillon sur le porte-échantillon. La caméra étant derrière, nous captions l'image du faisceau lumineux qui traverse les différents échantillons. Ces images seront analysées par des logiciels de traitement d'image.

Nous allons déterminer le profil selon une ligne horizontale qui passe au milieu de l'image. Nous déterminons aussi le profil des images en trois (3) dimensions et l'histogramme de chacune d'elles.

Partie expérimentale

La figure 3.30 montre les profils d'intensités pour différents échantillons sablés à l'incidence normale. Ils sont obtenus en suivant la ligne médiane de l'image recueillie. Ils se traduisent par la variation de l'intensité lumineuse en fonction de la largeur de l'échantillon. L'évolution de la diminution de la tâche du faisceau est observée. Lorsque la surface est endommagée, la lumière transmise diminue et tend à disparaître.

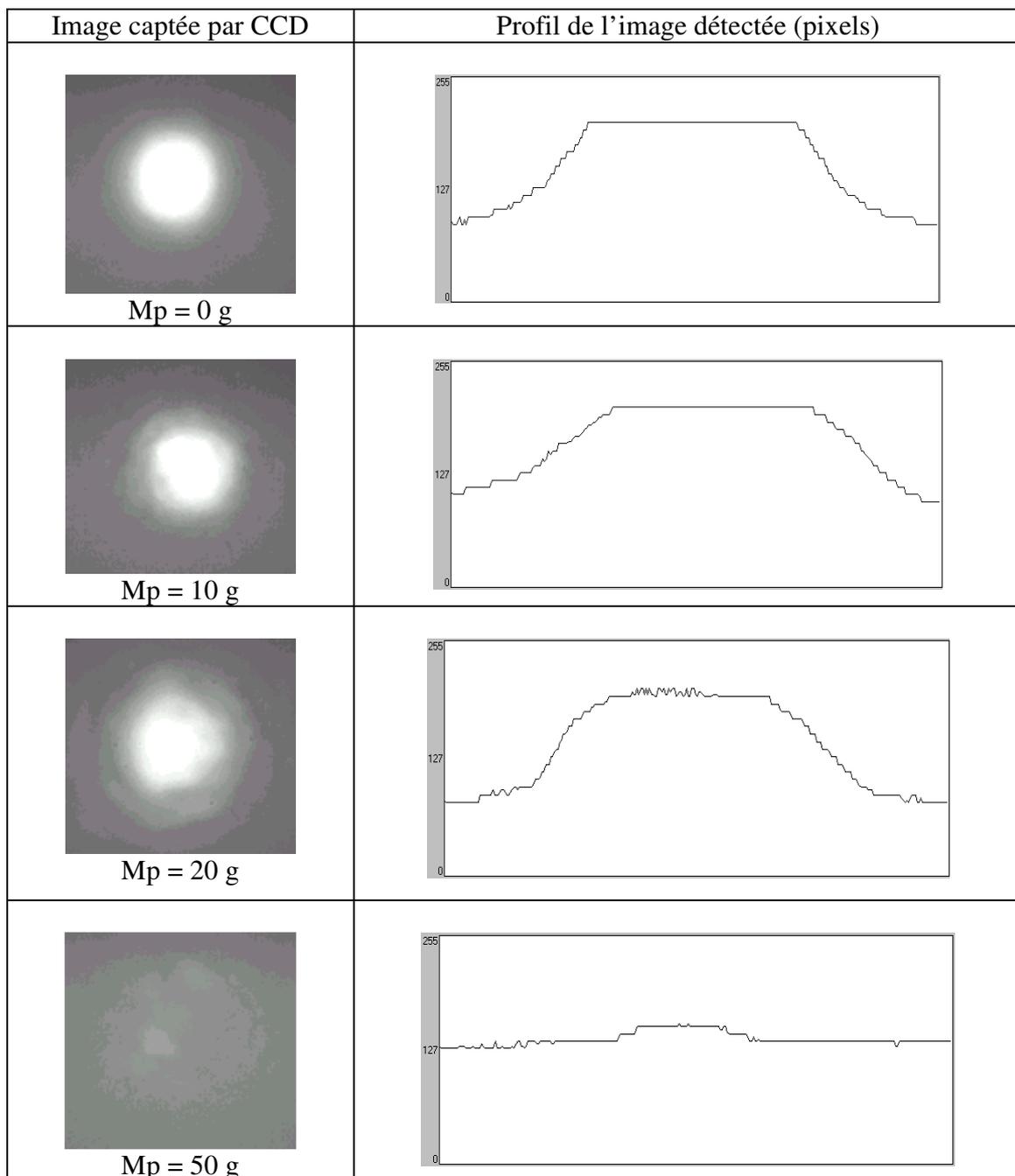


Figure 3.30 : Profils d'intensités pour différents échantillons sablés à l'incidence normale Adjouadi N. et al.(2007)

Partie expérimentale

La tâche obtenue sur l'état initiale est clairement représentée et le contour est bien défini. Les deux côtés du profil de transmission sont symétriques. Le profil de transmission présente un état de saturation "plateau" en raison de la grande intensité de la lumière transmise. Pour les Etats endommagés, l'intensité lumineuse transmise diminue progressivement et le contour devient de plus en plus indéterminé et le profil enregistré devient asymétrique. L'échantillon érodé avec 100g de sable donne une image floue et les profils de transmission disparaissent complètement. Nous pouvons noter que le profil d'amplitude est fortement réduit.

La figure 3.31 représente les histogrammes des images du faisceau lumineux à travers les différents échantillons sablés avec leurs rugosités. A partir de l'histogramme, pour le faisceau incident et l'échantillon sain, nous voyons que le niveau de gris le plus bas domine. A partir de l'échantillon sablé avec 10g de sable jusqu'à celui sablé avec 100g, le niveau de gris devient de plus en plus élevé. Cette distribution du nombre de pixels en fonction du niveau de gris prend une forme gaussienne.

Partie expérimentale

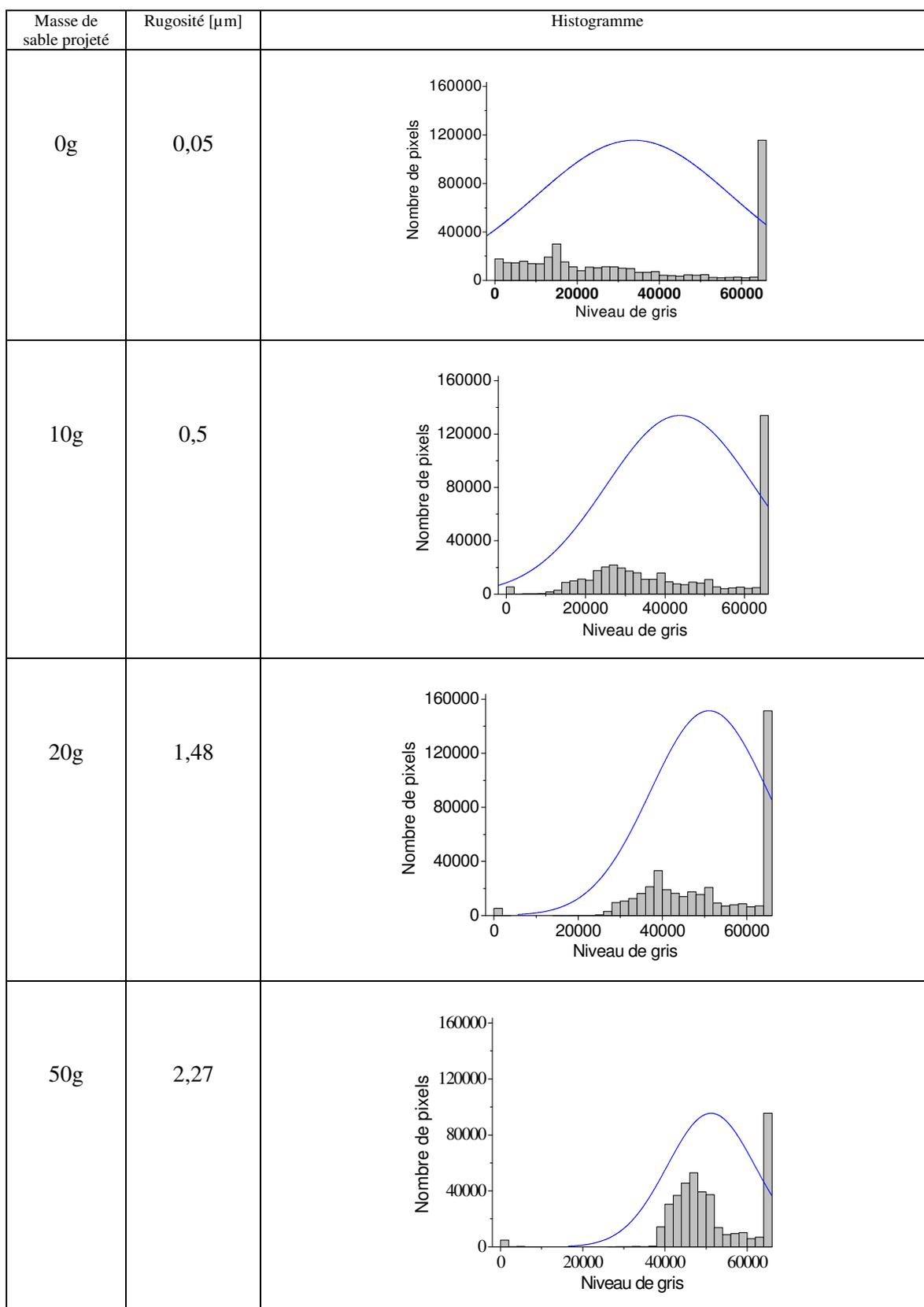


Figure 3.31 : Histogramme des images des différents échantillons pour incidence normale

Partie expérimentale

Les images recueillies par la caméra et les profils correspondants obtenues à partir d'un échantillon érodé avec 20g de sable sont présentés dans la figure 3.32.

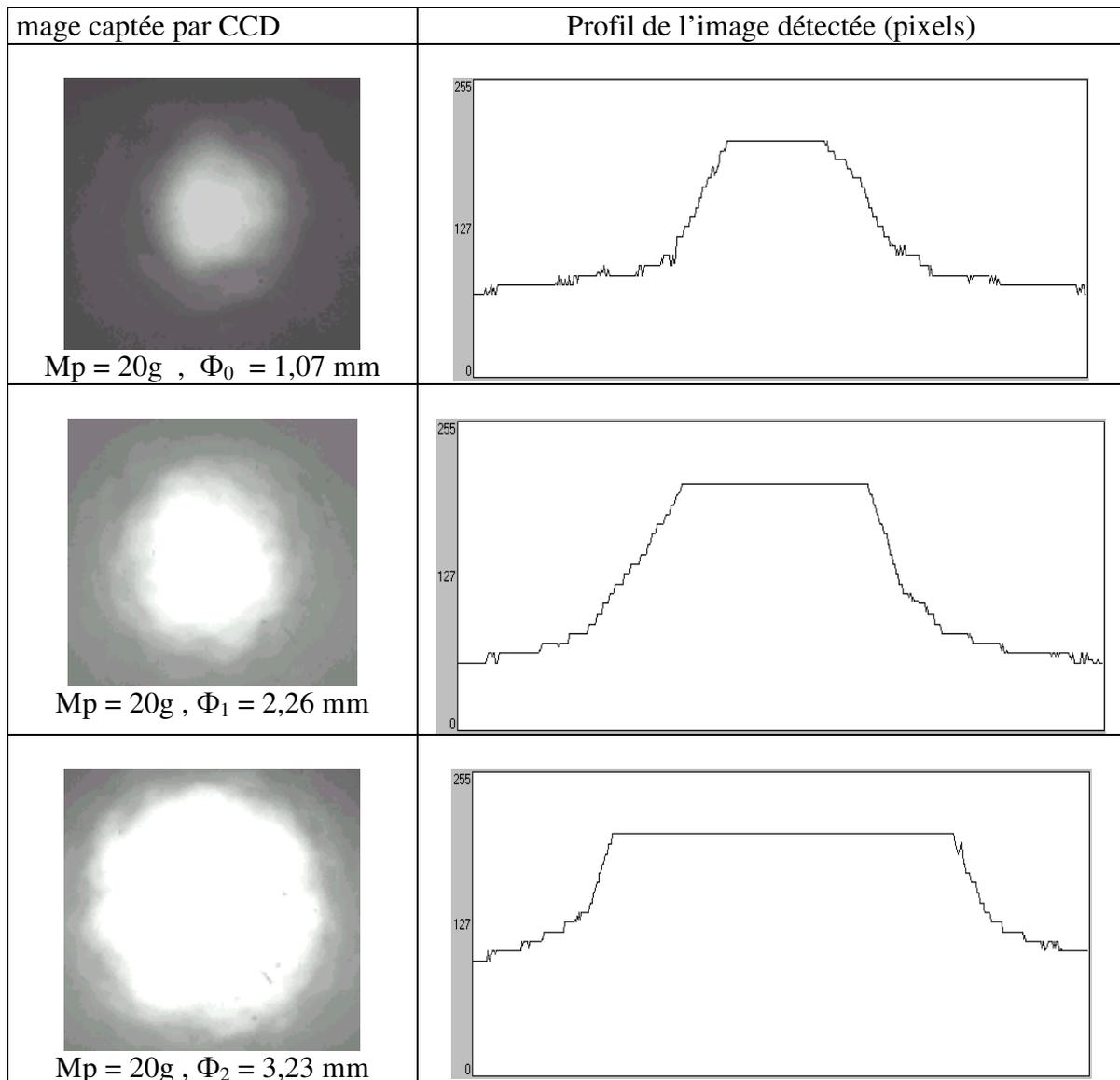


Figure 3.32 : Images et profils du faisceau de lumière blanche transmis pour deux masses projetées (20g, 50g), $D = 100$ mm et 3 diamètres du faisceau incident (Φ_0 , Φ_1 , Φ_2) Adjouadi N. et al.(2007)

Comme le diamètre du faisceau augmente, la tâche du faisceau devient progressivement intense et le plateau de saturation devient plus grand. Il est évident que pour une puissance de lumière donnée, l'énergie augmente avec le diamètre augmente.

Partie expérimentale

La figure 3.33 représente les images du faisceau lumineux à travers quelques échantillons sablés comparés à celui qui passe par l'échantillon à l'état initial et leurs profils en trois (3) dimensions pour un angle d'incidence de 10° .

Les profils en trois dimensions concordent bien avec les images captées par la caméra CCD. Ils sont sous forme d'un cône coupé au niveau de saturation. Nous remarquons aussi que le niveau de saturation reste élevé jusqu'à la masse de sable de 20g. Pour l'échantillon sablé avec 50g, le niveau de saturation chute et les autres pixels deviennent plus éclairés. Pour l'échantillon sablé avec 100g, le niveau de saturation disparaît totalement et tous les pixels de l'image sont éclairés avec la même intensité. Ce qui veut dire que l'éclairage est relativement uniforme.

Partie expérimentale

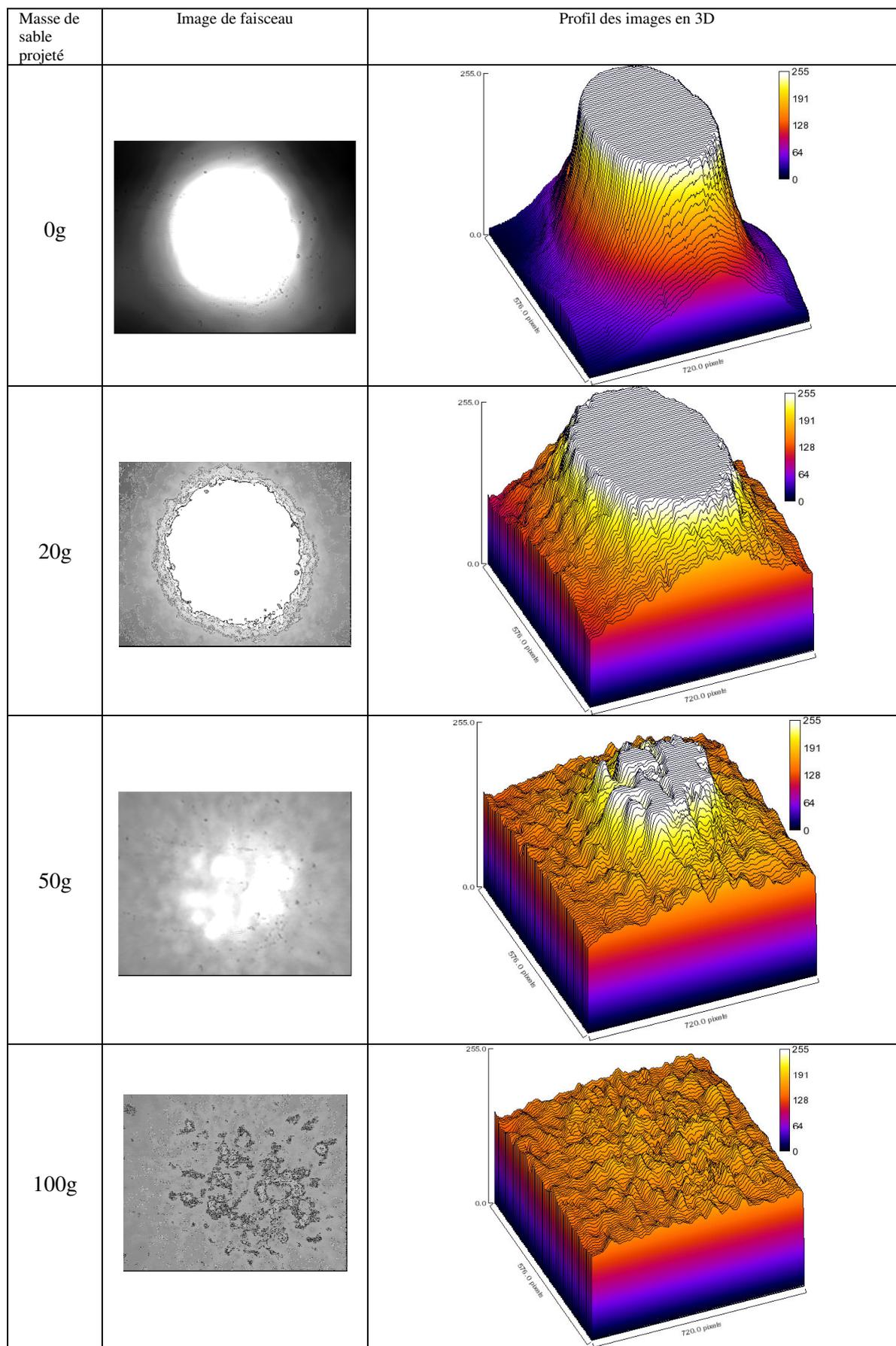


Figure 3.33 : Profils d'intensités pour différents échantillons sablés à l'angle d'incidence 10°

Partie expérimentale

La figure 3.34 montre les histogrammes des images du faisceau de lumière à travers des échantillons sablés avec différentes masses de sable pour un angle d'incidence de 10° .

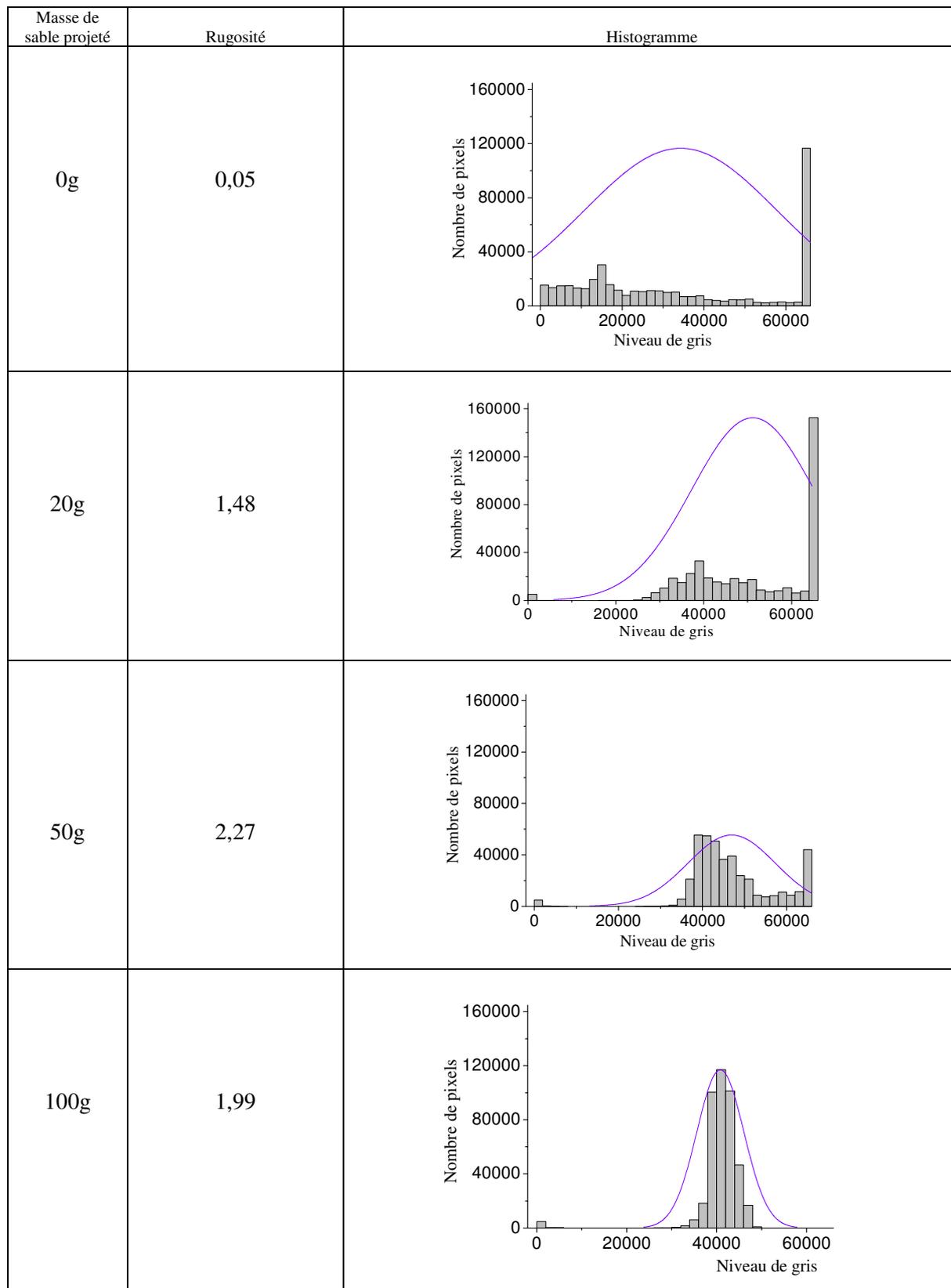


Figure 3.34 : Histogramme des images des différents échantillons pour incidence de 10°

D'après ces histogrammes, nous voyons qu'il y'a un grand nombre de classe pour l'échantillon non-sablé. Ce nombre de classe diminue à chaque fois que la masse de sable augmente. Le niveau de gris le plus élevé est de 66000 qui correspond à un fort éclairage. Le nombre de pixels possédants ce niveau de gris est très élevé pour l'échantillon sain, les échantillons sablés avec la masse de 10g et de 20g de sable. Pour l'échantillon sablé avec 50g de sable, le nombre de pixels qui possèdent ce niveau de gris diminue. Pour l'échantillon sablé avec 100g de sable, ce niveau va disparaître.

La figure 3.35 représente les Profils en trois dimensions des images du faisceau à travers l'échantillon sablé avec 20g de sable pour différents angles d'incidence.

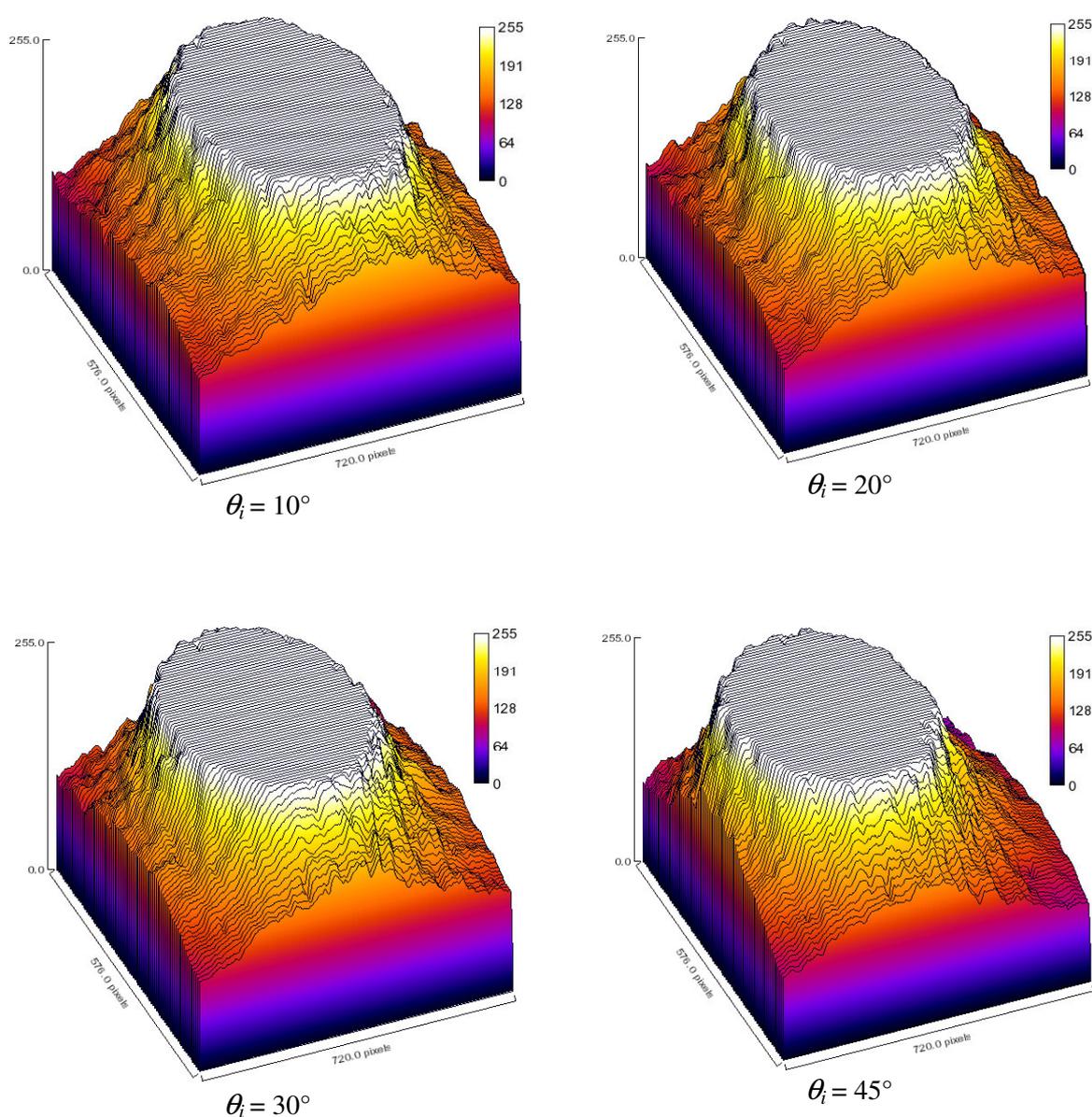


Figure 3.35 : Profils en trois dimensions des images du faisceau à travers l'échantillon sablé avec 20g de sable pour différents angles d'incidence

Partie expérimentale

D'après les profils, nous ne voyons pas l'influence de l'angle d'incidence sur les profils. Pour l'angle d'incidence de 45° , nous observons un petit décalage qui montre les pixels qui sont un peu loin de la région centrale (zone de saturation).

La figure 3.36 illustre les histogrammes des images du faisceau de lumière à travers l'échantillon sablé avec 20g de sable pour différents angles d'incidence.

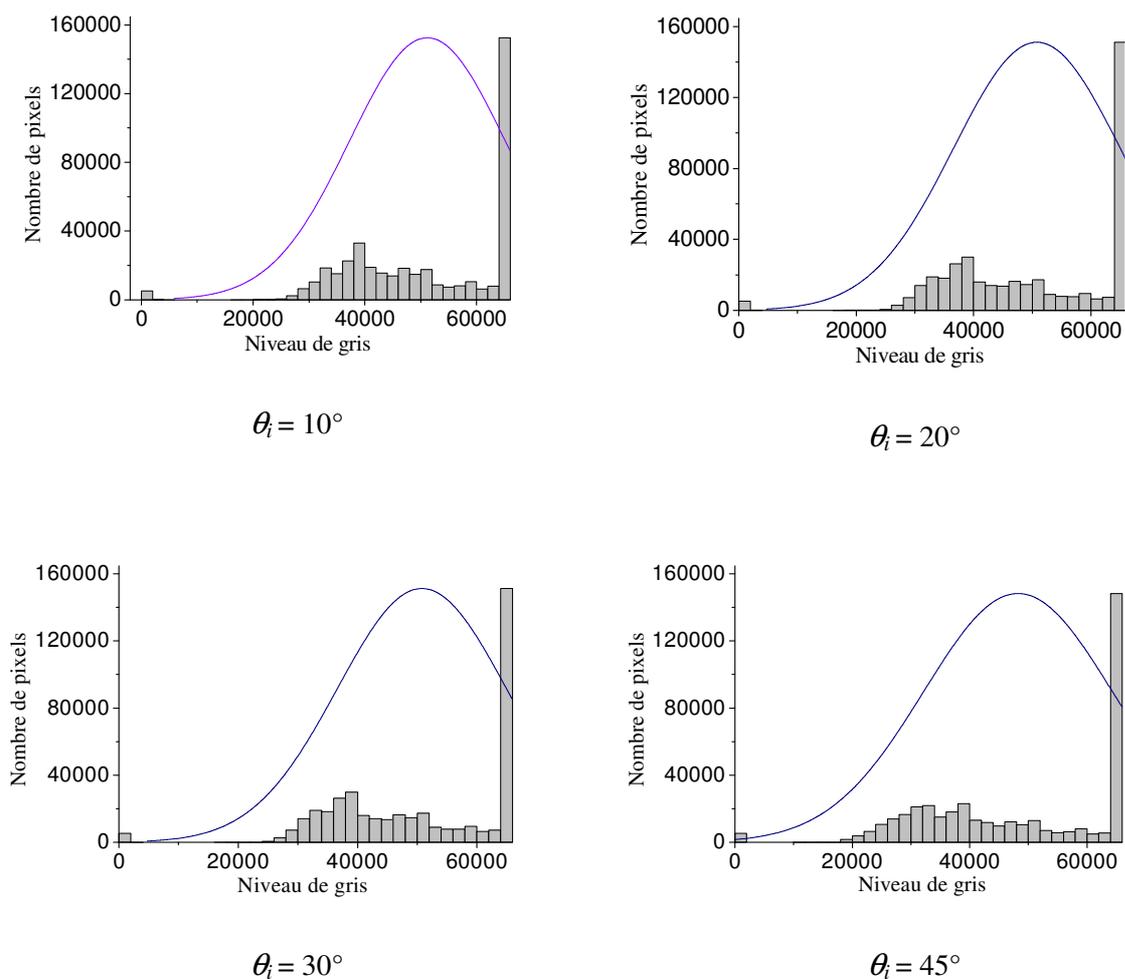


Figure 3.36 : Histogrammes des images du faisceau de lumière à travers l'échantillon sablé avec 20g de sable pour différents angles d'incidence

Ces histogrammes ne montrent aucune différence entre eux, sauf la présence de quelques niveaux de gris bas qui apparaissent pour l'angle d'incidence de 45° avec de nombre de pixels très petits. Cela est dû à la lumière parasite dans cette direction.

3.9.2 La détection surfacique de la lumière diffusée en réflexion

Le schéma du montage optique pour la détection surfacique en réflexion est montré par la figure 3.37. Dans cette partie, nous remplaçons le photodétecteur du montage de la détection ponctuelle de l'intensité de lumière diffusée de la figure 3.30 par une caméra CCD liée à un micro ordinateur.

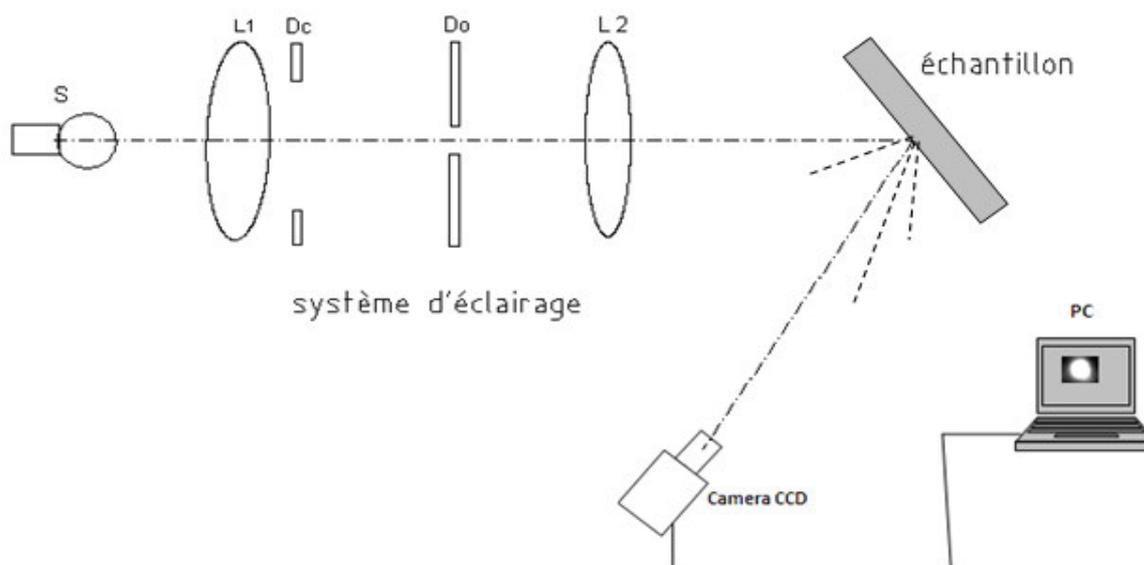


Figure 3. 37 : Schéma du montage optique pour la détection surfacique en réflexion

Nous posons l'échantillon sur le porte-échantillon. La caméra étant devant l'échantillon. Nous captions l'image du faisceau lumineux qui est réfléchi par les différents échantillons. Nous déterminons les profils des images recueillies en trois dimensions et leurs histogrammes.

La figure 3.38 représente les images et leurs profils d'intensité de la lumière diffusée en réflexion à l'angle d'incidence 20° . Sur l'image des faisceaux, nous remarquons la superposition de deux images du faisceau. Cela est dû à la contribution de la deuxième face de l'échantillon à la réflexion. Il y'a une région centrale, zone commune des deux faisceaux. L'intensité de cette zone est intense pour l'échantillon sain. Au fur et à mesure que la masse de sable projeté augmente l'intensité de cette zone diminue et les deux cercles s'éloignent l'un de l'autre, cela est dû à la perte de lumière par diffusion.

Partie expérimentale

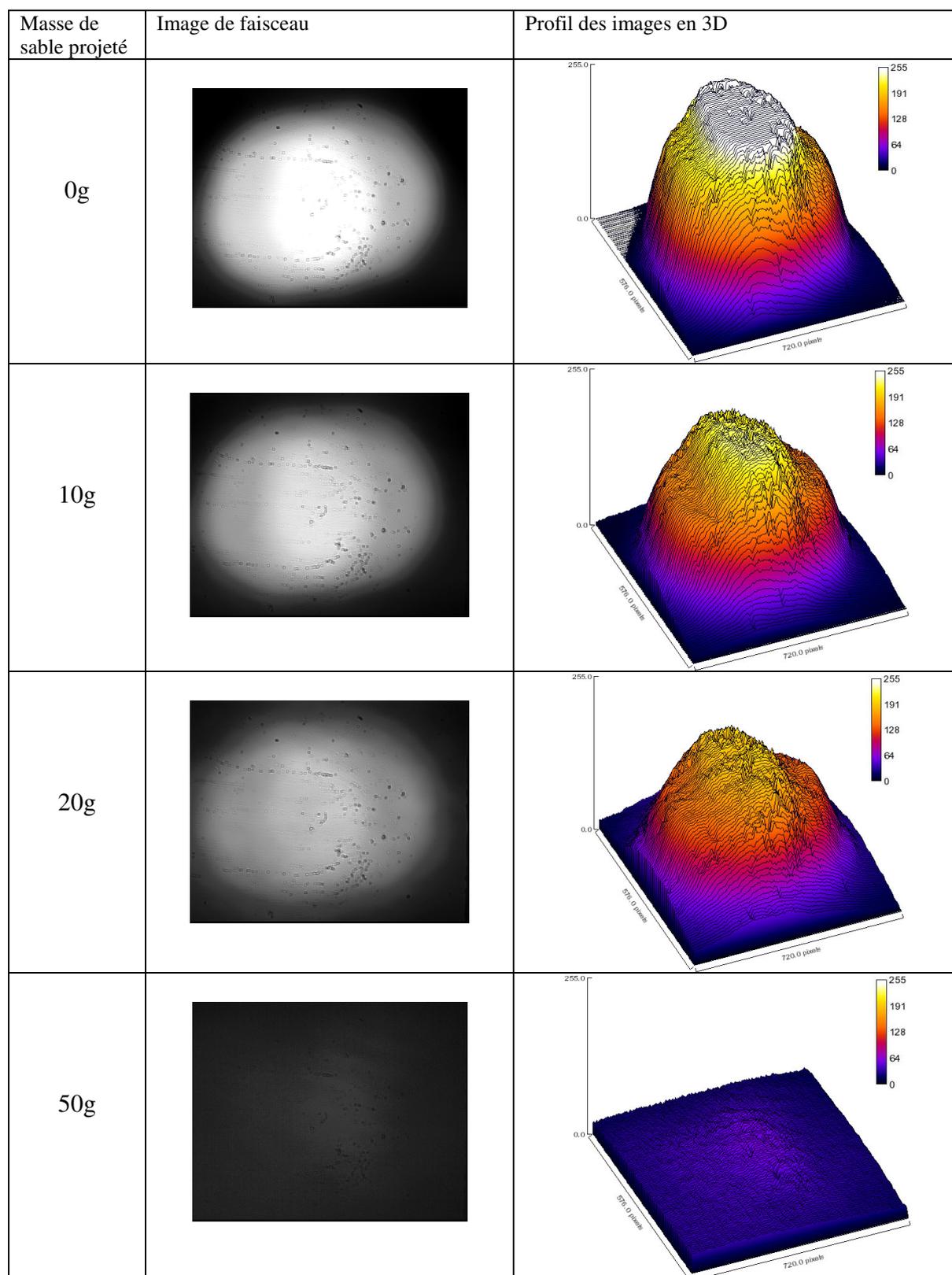


Figure 3.38 : Le profil d'intensité de la lumière diffusée en réflexion à l'angle d'incidence 20°

Partie expérimentale

La figure 3.39 montre les histogrammes des images de la lumière diffusée en réflexion à l'angle d'incidence 20° .

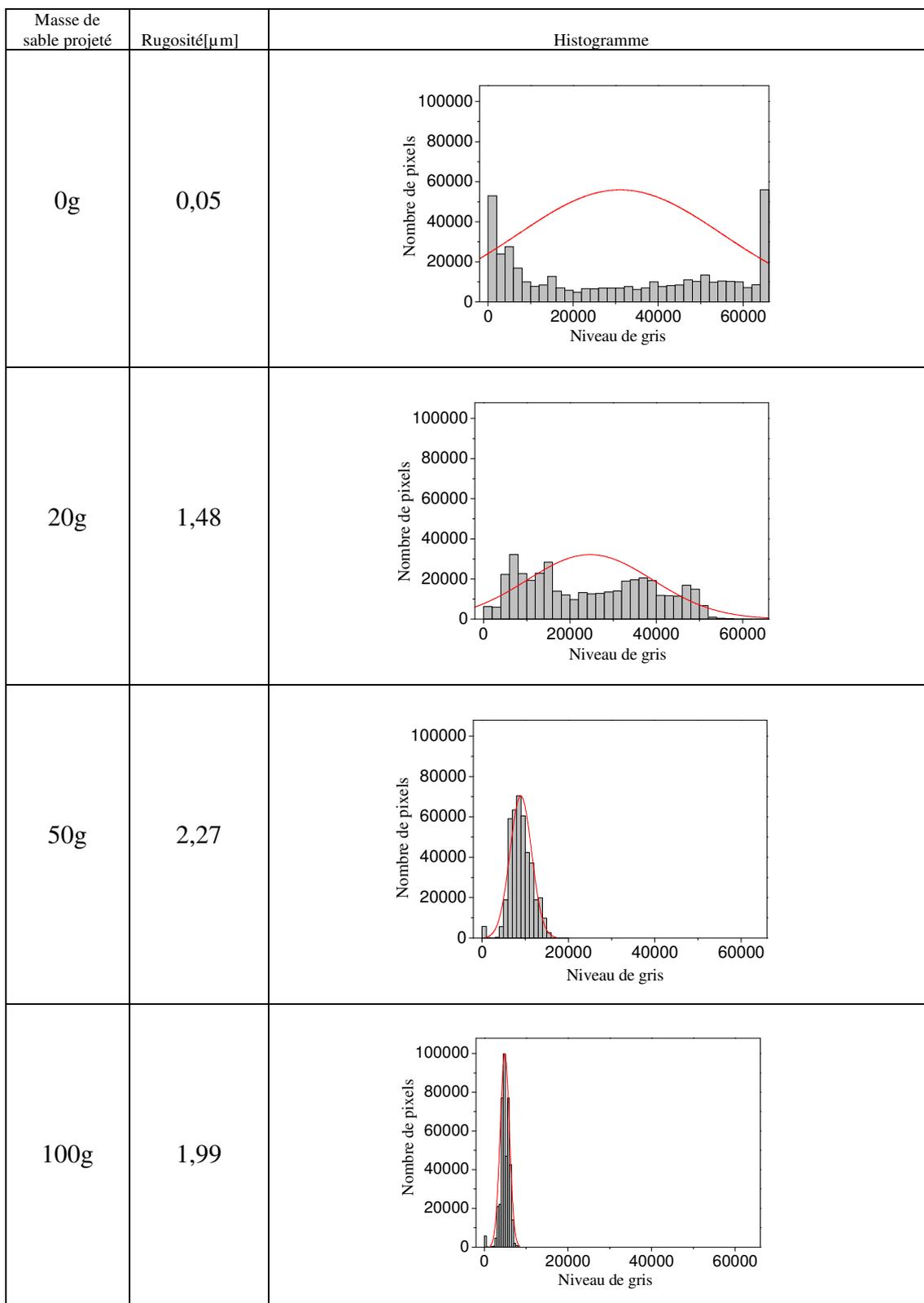


Figure 3.39 : Histogramme des images de la lumière diffusée en réflexion à l'angle d'incidence 20°

Partie expérimentale

Pour l'échantillon sain, nous observons qu'il y a autant de pixels intenses que ceux qui sont obscures. Le nombre de classes diminue au fur et à mesure que la masse de sable augmente jusqu'à ce qu'elles se situent dans les niveaux les plus bas de gris.

La figure 3.40 montre les profils en trois dimensions des images du faisceau de lumière réfléchi par l'échantillon sablé avec 20g de sable pour différents angles d'incidence

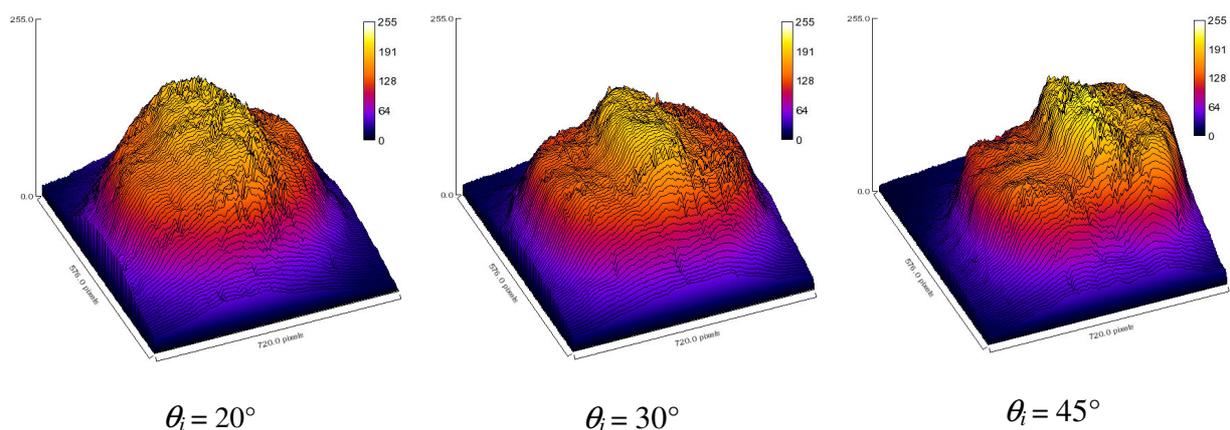


Figure 3.40 : Profils en trois dimensions des images du faisceau de lumière réfléchi par l'échantillon sablé avec 20g de sable pour différents angles d'incidence

Les histogrammes ne présentent pas de grandes différences, ce qui veut dire que l'angle d'incidence n'influence pas sur les profils des images sauf pour l'angle d'incidence de 45° , où il y'a une différence d'intensité entre les deux cercles.

La figure 3.41 représente l'historgramme des images du faisceau de lumière réfléchi par l'échantillon sablé avec 20 g de sable pour différents angles d'incidence

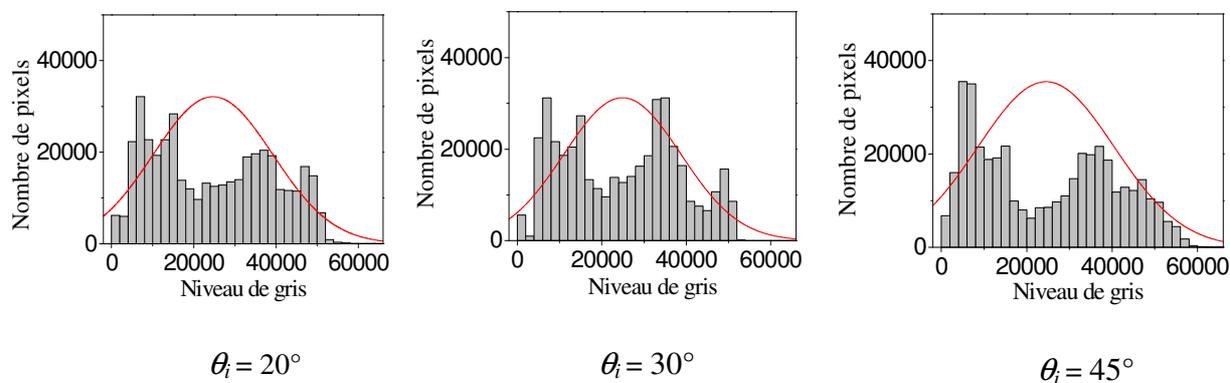


Figure 3. 41 : Histogrammes des images du faisceau de lumière réfléchi par l'échantillon sablé avec 20g de sable pour différents angles d'incidence

Nous notons qu'il n'y'a pas de grandes différences entre les histogrammes des trois angles sauf quelques niveaux qui apparaissent et d'autres disparaissent. Cela est dû à la direction de prise d'images.

3.9.3 Détermination de la limite du flou

Afin d'estimer une limite de visibilité comme étant un test de validité des échantillons érodés avec des différentes masses de sable, un caractère H avec dimensions 1cm × 1,2cm est utilisé comme un objet à observer. Ce caractère est placé à 1cm en dessous de l'échantillon. Des photographies pour différents états d'endommagement de surface sont prises figure 3.42.

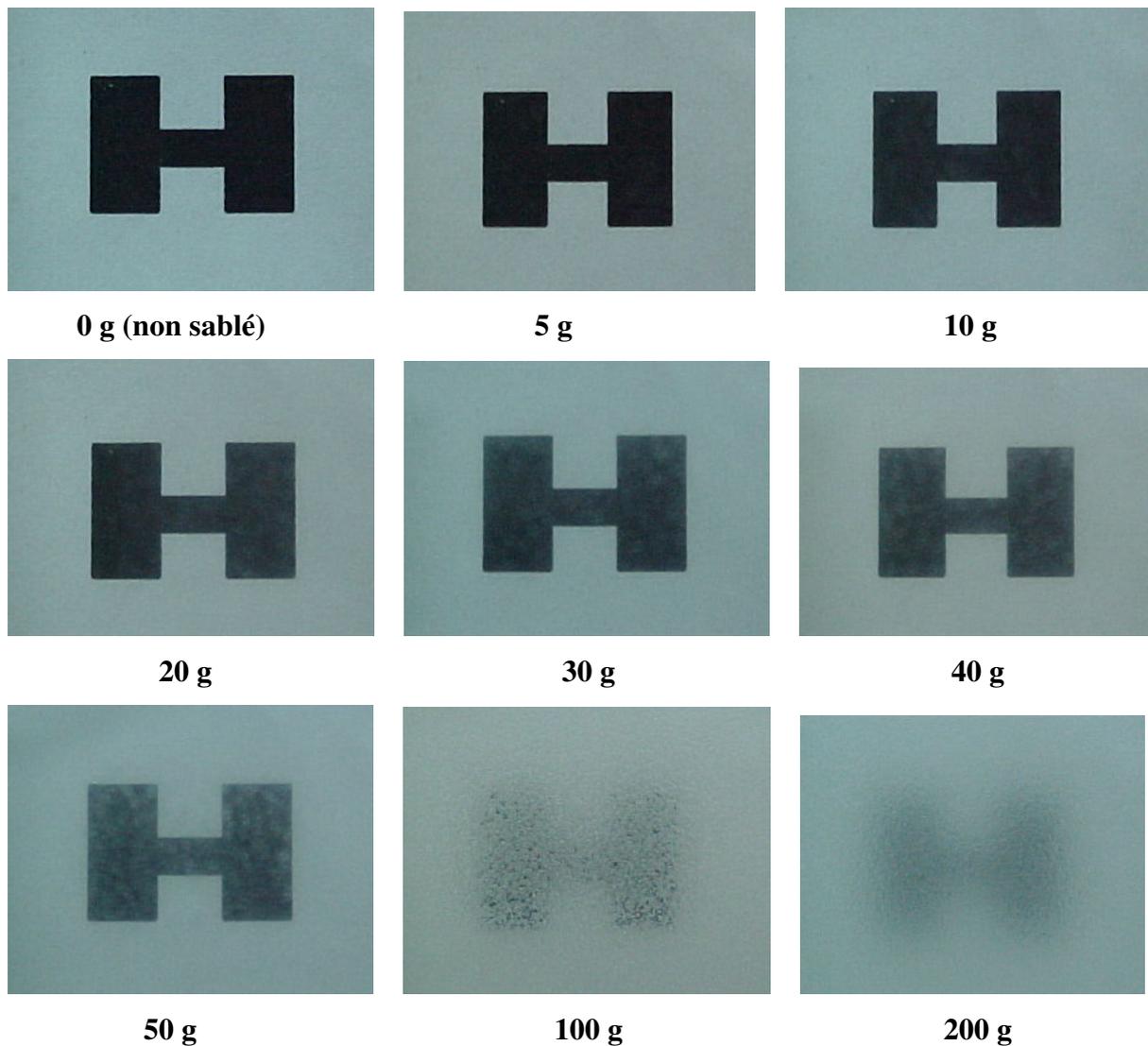


Figure 3.42 : Caractère H vu à travers des échantillons sablés avec différentes masse Adjouadi N. et al.(2007)

Il peut être remarqué que pour l'état initial (sans sablage), le caractère H apparaît très clair. De plus en plus la surface de verre est endommagée, ce caractère devient de plus en plus flou.

Nous savons que les contrôleurs techniques de véhicules trouvent quelques difficultés pour le contrôle de la qualité du pare-brise endommagé dans les régions de Sahara.

Le problème exposé est que ce contrôle n'est pas effectué à vue d'œil nu ce qui rend difficile de juger si un pare-brise endommagé par des particules de sable est toujours valable pour l'utilisation ou non. Pour répondre à cette question nous définissons une limite de la visibilité. La variation de la transmission optique en fonction de la rugosité est établie figure 3.43.

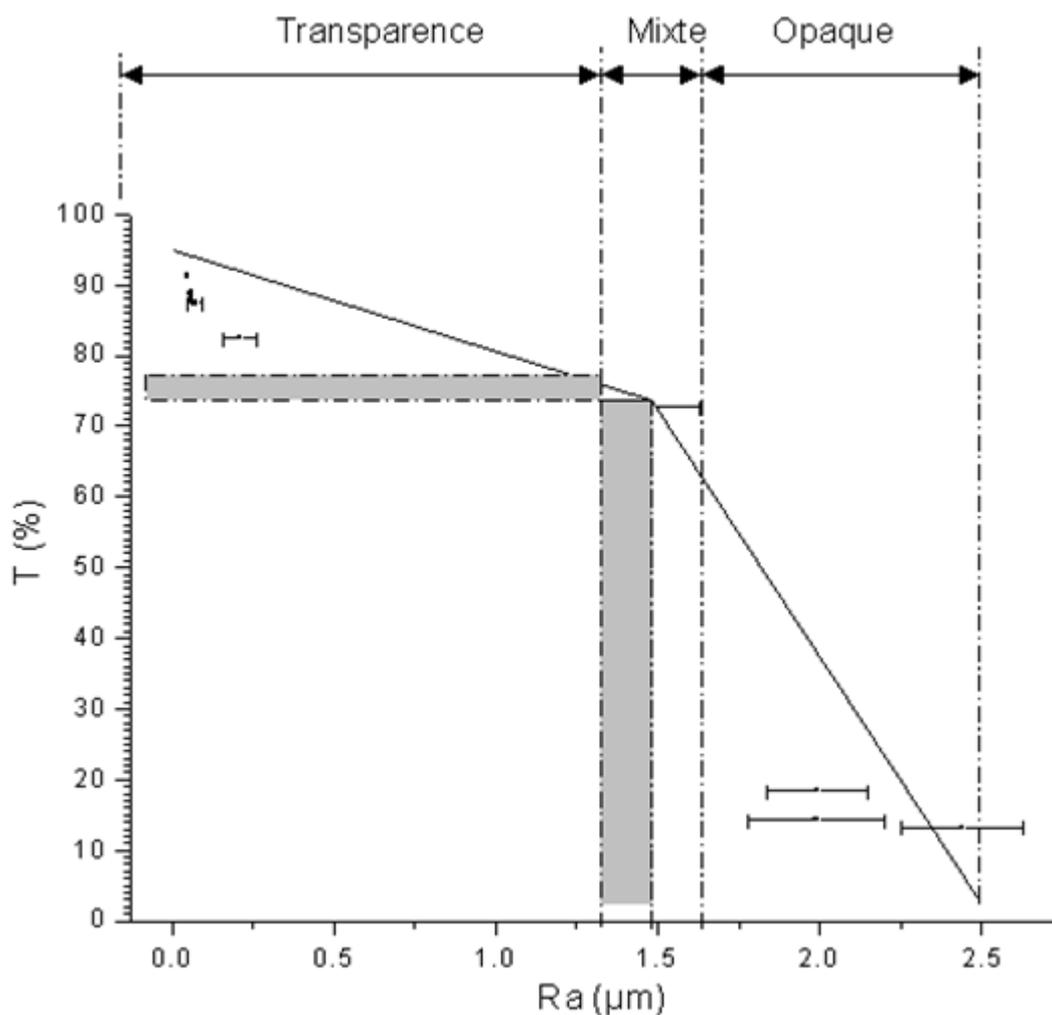


Figure 3.43 : Variation de la transmission en fonction de la rugosité Adjouadi N. et al. (2007)

La courbe de la transmission en fonction de la rugosité dévoile une diminution linéaire avec un point d'inflexion qui apparaît. Nous remarquons aussi que les écarts-types de R_a augmentent à chaque fois que la masse de sable projeté augmente. Ils ont tendance à se stabiliser au-delà d'environ $2\mu\text{m}$. Evaluation de ces déviations standards est probablement liée à l'augmentation du nombre de défauts créés et à l'interconnexion des fissures latérales générées par les impacts répétés de sable.

Seuls les écarts-types des valeurs de rugosité sont montrées car l'erreur de mesure de rugosité est relativement plus importante que celle de la transmission. Selon la figure 3.49, un point d'inflexion est situé à environ $T = 73\%$ et $R_a = 1,5\mu\text{m}$. Ce point sépare deux domaines distincts: un domaine correspondant à une lente diminution de la transmission ($T\%$) pour des rugosités inférieures à $1,5\mu\text{m}$, et un second champ correspond à une forte diminution de la transmission ($T\%$) pour des rugosités supérieures à $1,5\mu\text{m}$. Deux domaines optiques peuvent être donc définis :

- Un champ de transparence (1ère branche) où la transmission optique est assez élevée et la rugosité est plutôt faible.
- Un deuxième champ flou (2ème branche) où la transmission optique est assez faible et la rugosité est élevée.

Toutefois, la définition d'une limite de visibilité de ces deux champs optiques n'est pas claire. Nous pouvons admettre qu'il ya un champ mixte. Les limites de ce domaine mixte peuvent être définies par les valeurs des écarts type de la rugosité correspondant au point d'inflexion ($R_a = 1,5 \pm 0,22\mu\text{m}$). Afin de permettre aux services techniques de contrôler en toute sécurité les pare brises endommagés, la valeur de rugosité inférieure ($R_a = 1,5 - 0,22 = 1,28\mu\text{m}$) peut être proposé comme une "valeur limite". Dans les conditions de l'essai, cette valeur correspond à une limite de transmission optique de l'ordre de 73% .

Le point d'inflexion situé à $T = 73\%$ est concordant avec les données de la littérature. En effet, Savaète (2003) a rapporté qu'aux Etats-Unis et au Japon, la transmission de la lumière minimale autorisée pour le pare-brise est de 70% , alors qu'en Europe, elle est de 75% .

3.10 Conclusion

Dans ce travail, nous avons étudié la diffusion de lumière par des surfaces de verre érodées par sablage. Nous remarquons clairement que la densité des défauts générés par les impacts de sable augmente à mesure qu'augmente la masse de sable projeté.

Partie expérimentale

La transmission (T%) du verre diminue en fonction de la masse de sable projeté. Elle diminue en fonction de la rugosité. Pour les directions d'incidence obliques, la tendance des courbes est la même que pour l'incidence normale sauf que les valeurs de transmission correspondantes se voient en diminution. La transmission chute rapidement jusqu'à la masse de 50g, au-delà, la transmission devient constante. Cette constance est la conséquence du phénomène de saturation de l'érosion. Le phénomène de diffusion est plus clair aux alentours de l'angle de diffusion de 3° . Par contre, les mesures effectuées à l'angle de diffusion de $1,8^\circ$ correspondent à la variation de la transmission. L'intensité de lumière diffusée suit une loi exponentielle. L'angle d'inclinaison n'influence pas les mesures pour la détection surfacique. Afin de permettre aux services techniques de contrôler en toute sécurité les pare brises endommagés, la valeur de rugosité inférieure ($R_a = 1,28\mu\text{m}$) peut être proposé comme une "valeur limite".

Dans les conditions de l'essai, cette valeur correspond à une limite de transmission optique de l'ordre de 73%. Le point d'inflexion situé à $T = 73\%$ est concordant avec les données de la littérature. En effet, Savaëte (2003) a rapporté qu'aux Etats-Unis et au Japon, la transmission de la lumière minimale autorisée pour le pare-brise est de 70%, alors qu'en Europe, elle est de 75%.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail de thèse, nous avons traité la diffusion de la lumière par un verre érodé par projection de particules de sable provenant de la région de Ouargla. Ceci dans le but de déterminer l'effet de la diffusion de la lumière par les différents états de surfaces des pare-brises sur la visibilité des conducteurs de véhicules.

Dans le premier chapitre, nous avons donné un petit historique du verre. C'est sa transparence qui lui donne son importance pour les vitrages dans le domaine de bâtiment et des véhicules. Le plus important des vitrages automobile c'est bien le pare brise. Il joue un rôle primordial dans la conduite en ce qui concerne la visibilité. Or, il est très exposé à des agents de l'environnement qui l'endommagent. L'endommagement par des particules de sable est simulé à impact de l'indentation. La dureté et la ténacité sont les propriétés des verres qui déterminent l'érosion et le mécanisme.

Le verre des pare-brises est endommagé par les particules de sable qui rend la conduite des véhicules difficile. Ce désagrément est dû à la diffusion de la lumière qui arrive sur le pare brise par les parties endommagées.

Le second chapitre concerne la diffusion de la lumière par des surfaces rugueuses. Nous faisons un passage sur les deux théories qui expliquent la diffusion des ondes électromagnétiques par des particules. La diffusion de la lumière par des surfaces rugueuses a été expliquée par la théorie la plus utilisée qui est l'approximation de Kirchhoff. Mais, la diffusion de lumière est plus étudiée d'une façon expérimentale. Les quelques montages qui aident à l'étude sont cités. La majorité des travaux sur la diffusion visent à déterminer les rugosités des surfaces.

Dans ce travail, nous avons étudié la diffusion de lumière par des surfaces de verre érodées par sablage. Nous remarquons clairement que la densité des défauts générés par les impacts de sable augmente à mesure qu'augmente la masse de sable projeté. La transmission (T%) du verre diminue en fonction de la masse de sable projeté. Elle diminue d'une façon non proportionnelle avec la rugosité.

Pour les directions d'incidences obliques, la tendance des courbes est la même que pour l'incidence normale sauf que les valeurs de transmission correspondantes se voient en

Conclusion générale

diminution. La transmission chute rapidement jusqu'à la masse de 50g, au-delà, elle devient constante. Cette constance est la conséquence du phénomène de saturation de l'érosion.

Le phénomène de diffusion est plus clair aux alentours de l'angle de diffusion de 3° . Par contre, les mesures effectuées à l'angle de diffusion de $1,8^\circ$ correspondent à la variation de la transmission. L'intensité de lumière diffusée suit une loi exponentielle en fonction d'angle de diffusion et l'angle d'inclinaison n'influence pas les mesures pour la détection surfacique.

Afin de permettre aux services techniques de contrôler en toute sécurité les pare brises endommagés, la valeur de rugosité inférieure ($R_a = 1,28\mu\text{m}$) peut être proposé comme une "valeur limite". Dans les conditions de l'essai, cette valeur correspond à une limite de transmission optique de l'ordre de 73%. Le point d'inflexion situé à $T = 73\%$ est concordant avec les données de la littérature. En effet, Savaète (2003) a rapporté récemment qu'aux Etats-Unis et au Japon, la transmission de la lumière minimale autorisée pour le pare-brise est de 70%, alors qu'en Europe, il est de 75%.

Bibliographie

A. Hermann, A. Kaemling, F. Ach, C. Fischer, W. Viöl, " Utilisation of scattered light for excimer laser beam monitoring", *Laser Phys, lett 2 N° 9*, (2005), pp459-469

A. Sentenac, j-j Greffet, "Mean-field theory of light scattering by one-dimensional rough surfaces", *j. Opt.Soc.Am. A/ Vol.15, N°2*, (1998), pp528-532.

A. Timmermann, "Direct measurement of windscreen surface wear and the consequences for road safety", paper presented at the vision in vehicles, Nottingham, United kingdom,(1985),

A.D. Salman, D.A. Gorham, A. Verba, "A study of solid particle failure under normal and oblique impact", *Wear 186-187*, (1995), pp92-98.

A.J. Burnett, S.R. Desilva, A.R. Reed. "Comparisons between "sand blast" and "centripetal effect accelerator" type erosion testers", *Wear 186-184*, (1995), pp168-178.

Adrian C. Wright, Robert A. Hulme, David I. Grimley, Roger N. Sinclair, Steve W. Martin, David L. Price, Frank L. Galeener, "The structure of some simple amorphous network solid revisited", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 129, (1991), pp213-232.

Ali Bedidi, Bernad Cervelle, "Dffusion de la lumière par des particules minérales",*Cah. Orstom, sér.Pédol.vol XXVIII, n°1*, (1993), pp 7-14.

B. Savaete, "Vitrage Automobile ", *Verre*, 9(5), (2003), pp36-48

C. Bidault, "Conditions de réception, pare brise frontal", Saint-Gobain, Sully N°CR TI95/010 (2004), pp1-17.

C. Bousbaa, "Effet des traitements sur l'érosion du verre érodé par impact de sable ", thèse de doctorat, UFAS, Sétif, Juin 2004.

Bibliographie

Chabane Bousbaa, Abderrahim Madjoubi, Mohamed Hamidouche, Nourredine Bouaouadja, " Effect of annealing and chemical strengthening on soda lime glass erosion wear by sand blasting", journal of the European Ceramic Society, 23, (2003), pp 331-343

D.W. Wheeler, R.J.K. Wood, "Solid particle erosion of diamond coatings under non-normal impact angles ", Wear 250, (2001), pp795-801.

Doremus Robert H., "Glass science", John Wiley and sons Inc, Second edition, A Wiley Interscience publication, Singapour, (1996).

E. Le Bourhis, D. Metary, "Indentation of glass as a function of temperature ", Journal of Non-Crystalline Solids 272 (2000), pp34-38.

E.R. Hoffman, "A review of vehicle design to reduce accidents", Australian Departement of Transport, Report NR/7, Camberra, Australian Gouvernement Publication Service, (1973).

Egon Marx, Brigitte Leridon, T.R. Lettieri, J.-F. Song, T.V. Vorburger, "Autocorrelation functions from optical scattering for one-dimensionally rough surfaces", Applied Optics vol. 32, N°1, (1993), pp67-75.

Evgenij Zubko, Karri Muinonen, Yuriy Shkuratov, Gorden Videen, Timo Nousiainen, "Scattering of light by roughened Gaussian random particles", journal of quantitative spectroscopy and radiative transfer, 106, (2007), pp604-615.

G. Bruhat, "Optique", 6^{eme} edition révisée par A.Kastler, réimpression complete par P.Bouchareine, Masson, Paris, 1965 (1992).

G. Labeyrie, D. Delande, C.A. Müller, C. Miniatura, R. Kaiser, "Multiple scattering of light in a resonant medium", Optics Communications, 243, (2004), pp157-164.

G.H. Jilbert, J.E. Field, "Synergistic effects of rain and sand erosion", Wear 243, (2000), pp6-17.

G.R. Jafari, S.M. Mahdavi, A. Iraj Zad, P. Kaghazchi, "Characterization of etched glass surface by wave scattering", Surface and interface analysis, 37, (2005), pp641-645.

Bibliographie

Georges Richardet, "Structure et propriétés des métaux ", Dunod , Paris, 2^{ème} édition, 1970 , 264p

GEPVP, "Haze, studies carried out in Sweden ", Automotive Glass News, n°1, 2002, pp1-4

Glaströsch, "Le verre et ses application ,pour des constructions judicieuses et une utilisation compétente du verre", Glas trösch AG,Bützberg, 4^e édition , 2013, 380p.

Griffith Lee V., "Material properties and fracture mechanics in relation to ceramic machining", (1993), pp1-16.

H. Derkum, "Effects of stray light on perception", Sprechsaal, 124 (10), (1991), pp679-685.

Haiming Wang, "Light scattering method characterizing optical surfaces", optical Engineering, vol32, n°11, (1993), pp2904-2910.

Haley E. Redmond, Kathy D. Dial, Jonathan E. Thompson, "Light scattering and absorption by windblown dust: Theory, measurement, and recent data", Aeolian Research 2 (2010), pp5-26.

Harry L. Task et LouisV Genco, "Method for measuring Haze in transparencies", United States Patent,U.S.Ser. N°4.623.258, (1986), pp1-11.

J. Schumann, M. Flannagan, M.Sivak, et E.Traube, "Daytime veiling glare and driver visual performance: influence of windshield rake angle and dashboard reflectance", Journal of safety research, 28 (3), (1997), pp133-146.

J.,C. Le Bosse, G. Hansali, J. Lopez, T. Mathia, "Characterisation of surface roughness by laser light scattering: specularly scattered intensity measurement", Wear 209, (1997), pp328-337.

J.J. Kim, S.K. Park, "Solid particle erosion of AISI 403 stainless steel", Journal of Materials science letters 17(1998), pp1503-1506.

Bibliographie

J.M. Elson, J.M. Bennett, "Vector scattering theory", optical engineering vol 18,(1979), pp116-124.

J.R. Treat, "A study of precrash factors involved in traffic accidents", The HSI research Review, 10(6) and 11(1), May- August (1985), pp 9-13.

James Barton, Claude Guillemet, " Le verre Science et technologie", EDP Sciences, France, 2005,440p.

Janez Krč, Franc Smole, Marko Topič, "Analysis of light scattering in amorphous Si:H solar cells by a one-dimensional semi-coherent optical model", prog. Photovolt: res.appl.11 (2003), pp15-26.

Jérôme Caron, Jacques Lafait, Christine Andraud, "Scalar Kirchhoff's model for light scattering from dielectric random rough surfaces", Optics Communications, 207, (2002), pp17-28.

John Bradshaw, "Windscreens:never seen until damaged", Physics World, August 1997, pp39-43.

John C. Stover, "Roughness characterization of smooth machined surfaces by light scattering", Applied optics, Vol.14 (8), (1975), pp1796-1802.

K. Haugen, O. K. Vernvold, A. Ronald, R. Sandberg, "Sand erosion of wear resistant materials: erosion in choke valves", Wear 186-187, (1995), pp179-188.

Lamy B., "Effect of brittleness index and sliding speed on the morphology of surface scratching in abrasive or erosive processes", Tribology International, Vol.17 n°1 (1984), pp35-38.

M. Allen, "Windscreen dirt and surface damage effects", Australian road research, 6, (1974), pp7-19.

M. Buijs, J.M.M. Pasmans, "Erosion of glass by alumina particles: transitions and exponents", Wear 184, (1995), pp 61-65.

Bibliographie

M. Chmielarz, C. Groetzer , O. Haase, "Vision-impairing wear of windshields", papier présenté à la 11^e conférence internationale technique sur la sécurité de véhicules expérimentale, WashingtonDC, (1987).

M.A. Verspui, P.J Slikkerveer, G.J.E. Skerka, I. Oamen, G. De With, "Validation of the erosion map for spherical particle impacts on glass", *Wear* 215, (1998), pp77-82.

M.F. Ruiz Gale, E.N. Hogert, N.G. Gaggiolo, "Apparent and real roughness", *Optics and Lasers in Engineering* 45 (2007), pp947-952.

Michael Bass, Eric W. Van Stryland, David R. Williams, William L. Wolfe. "HandBook of Optics fundamentals, techniques and design", McGraw-hill. Inc, 2^e édition, volume I, (1995).

Michel Dupeux, "Aide mémoire, Science des matériaux", Dunod, (2004), 336p.

N.M. Barkoula, J. Karger-Kocsis, "Review processes and influencing parameters of the solid particle erosion of polymers and their composites", *Journal of materials science* 37, (2002), pp3807-3820.

Nicola Pronk, Brian Fildes, Michael Regan, Michael Lenné, Niklas Truedsson, Ted Olsson, "Windscreen and safety: a review", Monash university Accident Resear report N° 183,(2006), pp1-61.

Nora Adjouadi, Naamane Laouar, Chabane Bousbaa, Nourredine Bouaouadja, Gilbert Fantozzi, "Study of light scattering on a soda lime glass eroded by sandblasting", *Journal of the European Ceramic Society* 27 (2007), pp3221-3229.

Olive Gilles, "Chimie des matériaux", Ecole industrielle et commerciale de la ville de Namur, 3^{ème} édition, (2005), 132p.

Osche G.R, "optical detection for laser applications", Wiley, (2002), pp159-182.

Bibliographie

P. Chevalier, A.B. Vannes, "Effect on a sheet surface of an erosive particle jet upon impact", *Wear* 184(1995), pp87-91.

P.C.P. Bouten, H.F. Scholten, C. Pourreux, "The strength of glass sheets perforated by erosion", *Wear* 233-235 (1999), pp515-522.

P.H. Shipway, I.M. Hutchings, "The role of particle properties in the erosion of brittle materials", *Wear* 193(1996), pp105-113.

P.J. Slikkerveer, P.C.P. Bouten, F.H. in't Veld, H. Scholten, "Erosion and damage by sharp particles", *Wear* 217, (1998), pp237-250.

Paul Green, William T. Burgess, "Windshield damage and driving safety", final report juin, The university of Michigan, (1981), 73p
pp 9-13.

R.J.K. Wood, D.W. Wheeler, "Design and performance of a higher velocity air-sandjet impingement erosion facility", *Wear* 220, (1998), pp95-112.

R.P. Edwin, "Light scattering as a technique for measuring the roughness of optical surfaces", *journal of physics E: scientific instruments* vol. 6 (1973), pp55-58.

Richard J. Anton, Ghatu Subhash, "Dynamic Vickers indentation of brittle materials", *Wear* 239, (2000), pp27-35.

Rolf Apetz, Michel P.B. van Bruggen, "transparent Alumina : A light-scattering Model", *J.Am.Ceram.Soc.*, 86(3), (2003), pp480-486.

Rosolen Romain, Mayer Jean-Marie, Viola Alberto, Berranger Patrick, Grenat Jean, Villaume Thierry, Colas Michel, Ghiran Gilles, "Préconisation pour la réparation des vitrages automobiles", Sécurité et réparation automobile, Document du centre technique de l'assurance, Paris, (2005), pp1-9.

Bibliographie

S. Dériano, A. Jarry, T. Rouxel, J-C. Sanglebœuf, S. Hampshire, "The indentation fracture toughness (K_C) and its parameters: the case of silica-sick glass", *Journal of Non-Crystalline Solids* 344(2004), pp44-50.

S. Iwasaki et T. Mukai, "Simulation for light scattering by rough surface based on Kirchhoff's diffraction theory", *Adv. Space Rec.*, Vol.23, N°7,(1999), pp1213-1216.

S. Lathabai, M. Ottmüller, I. Fernandez, "Solid particle erosion behaviour of thermal sprayed ceramic, metallic and polymer coating", *Wear* 221, (1998), pp 93-108.

Serge Paidassi, Jacques Ernoult, Michel Brun, Pierre Monge-Cadet, Yves Pauleau, Guy Farges, "Matériau multicouche pour revêtement Anti-érosion et Anti-abrasion ", office Européen des Brevets, wo93/08316 (29.04.1993 Gazette 1993/11).

Sreeram Srinivasan, R.O. Scattergood, "On lateral cracks in glass", *Journal of materials science* 22, (1987), pp3463-3469.

Stover John C., "Optical scattering, measurement and analysis", Mc Graw-Hill, Inc, (1990), pp1-8.

T.V. Vorburger, L.X. Cao, C.H.W. Giauque, J. Raja, D.E. Gilsinn, L. Fullana, "Optical scattering from rough surfaces experiment theory", *Proceedings VII internationals*, (1988), pp308-316

Tansel Karabacak, Yiping Zhao, Matthew Stowe, Bill Quayle, Gwo-Ching Wang, Ton-Ming Lu, "Large-angle in-plane light scattering from rough surfaces", *Applied Optics*, vol.39, n°25, (2000), pp4658-4668.

V.Ya Mendeleyev, "Scattering from unidirectional ground surfaces in the specular direction ", *Optics communications* 268 (2006), pp7-14.

Wang Nai-Ning, Zhang Hong-Jian, Yu Xian-Huang, "A versatile Fraunhofer diffraction and Mie scattering based laser particle sizer", *Advanced Powder Technol.*, vol.3, N°1,(1992), pp7-14.

Bibliographie

www.cmog.org, "A pressing solution: shaped glass", publié en octobre 2011, consulté en 2014.

www.yeld.com , "The 5 types of windshield damage", publié August (2013), consulté en 2014.

Y. Ballout, J.A. Mathis, J.E. Talia. "Solid particle erosion mechanism in glass", *Wear* 196, (1996), pp263-269.

Y.I. Oka, H. Ohnogi, T. Hosokawa, M. Matsumura, "The impact angle dependence of damage caused by solid particle impact", *Wear* 203-204, (1997), pp573-579.

Y-M. Chiang, D.P. Birnie III, W.D. Kingery, "Physical ceramics", John wiley & sons, new York, (1997), 522p.

Yongsong Xie, Bharate Bhushan, "Effects of particle size polishing pad and contact pressure in free abrasive polishing", *Wear* 200, (1996), pp281-295

Zarzyky J., "Le verre et l'état vitreux", Editions Masson, Paris(1982), 390p.

Zheng Zhenrong, Zhou Jino, Gu Peifu, "Roughness characterization of well-polished surfaces by measurements of light scattering distribution", *Optica Applicata*, Vol. XL, N° 4, (2010), pp811-818.

Abstract

In southern Algeria, the sandstorm can cause significant damage for surfaces of brittle materials such as glass. The latter is used in building construction, automotive, manufacturing plates of protection for solar panels and other uses of everyday in life.

When the sand particles arrive at the glass surface with a high speed, the material is extracted. By repeating this operation, the surface will be damaged. When light passes through this surface, it will be scattered.

Our work focuses on the study of light scattered by these damaged surfaces. we prepare samples by projection of different amounts of sand on squarish glass using a device called a blower. The study of the scattered light is carried out by using an optical arrangement which constitutes by an illumination system and a detection system.

We studied the dependence of the intensity of scattered light transmission and reflection as a function of angle of incidence and of the scattering angle, and the limit of visibility is determined.

The results show that scattered light is important for large amounts of sand, for short distances of detections and small scattering angles.

ملخص

إن الجنوب الجزائري يتميز بالعواصف الرملية على مدار السنة ، التي تتسبب في أضرار كبيرة بالنسبة للزجاج المستعمل في السيارات و بدرجة أقل بالنسبة للزجاج المستعمل في البناءات و صفائح الألواح الشمسية. لأن الزجاج عند تعرضه للصدم بحبيبات الرمل تحدث به نقور و خدوش التي تؤثر على وظائفه الضوئية و خصائصه الميكانيكية.

إن السرعة العالية لحبيبات الرمل تترك تشققات عمودية عميقة و أخرى أفقية سطحية و عند تقاطعها مع بعضهما البعض تنتزع المادة على شكل حراشف و عندما يمر الضوء بهذا السطح المشوه فإنه ينتشر في كل الاتجاهات.

إن العمل المنجز من خلال هذه الأطروحة حاولنا أن نركز فيه على انتشار الضوء حول النقور و التشوهات التي تتركها حبيبات الرمل عند اصطدامها بسطح الزجاج، كما قمنا بعمل مخبري يحاكي ما يجري في الواقع باستعمال منفاخ هوائي ينقل حبيبات الرمل عبر أنبوب مصمم بطريقة تسمح لنا بالتحكم في سرعة حبيبات الرمل و انتشارها . و بعد ذلك يتم رش العينات الزجاجية حسب ظروف مضبوطة (سرعة الصدم، زاوية الصدم، المسافة بين الأنبوب و العينات، تدفق الحبيبات...).

لقد أردنا من خلال هذه الدراسة العلمية، تقديم خدمة للسانقين بالجنوب الجزائري ، بإيجاد الحد الأدنى للرؤية من خلال قياس شدة الضوء المنتشر بالانكسار و بالانعكاس.