

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF -1-

THÈSE

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

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Option : Optique et Mécanique de Précision

Par

BENTERKI SMAIL

Thème

*Etude de la diffusion par réflexion de la lumière par un pare brise
d'automobile érodé par sablage*

Soutenue le 01.02.2015 devant le jury composé de

Président	K. AYADI	Professeur	Université F. A. Sétif -1
Rapporteur	N. LAOUAR	Maître de conférences	Université F. A. Sétif -1
Co-rapporteur	C. BOUSBAA	Professeur	Université F. A. Sétif -1
Examineurs	A. BOUZID	Professeur	Université De B.B.A
	Z. ROUABAH	Maître de conférences	Université De B.B.A
	A. HAMADOU	Maître de conférences	Université De B.B.A

Remerciements

Le travail accompli dans le cadre de cette thèse a été effectué au sein du laboratoire des matériaux non métalliques et du laboratoire d'optique appliquée, de l'institut d'optique et de mécanique de précision (Université Ferhat Abbas Sétif -1).

En premier lieu, je tiens à remercier sincèrement mes encadreurs, Dr. Naamane Laouar et Pr. Chaabane Bousbaa pour l'intérêt particulier qu'ils ont accordé à ce travail. Qu'ils trouvent ici ma profonde gratitude et ma reconnaissance d'avoir mis leurs compétences scientifiques et leurs expériences pour me permettre de concrétiser ce sujet d'actualité.

Je tiens à remercier vivement Pr. Khaled Ayadi d'avoir accepté de présider l'honorable jury de cette thèse.

Mes vifs remerciements sont adressés au Pr. Abdelrazek Bouzid, Dr. Zohir Rouabah et Dr. Abdelouahab Hamadou pour avoir accepté de faire partie du jury de cette thèse et d'examiner mon travail.

Je tiens à remercier de façon particulière, mon frère Pr. Djamel. Benterki pour ses encouragements et son soutien moral et l'Inspecteur M. Yahia. Bouguerra pour la correction précieuse de cette thèse.

Je tiens à remercier vivement Pr. Noureddine Bouaouadja et Pr. Mohamed.Abderahim Madjoubi pour leurs aides et leurs précieux conseils.

Mes remerciements vont également à tous les membres du laboratoire des matériaux non métalliques, à mes collègues enseignants de l'institut d'optique et de mécanique de précision et à mes collègues enseignants du département de l'enseignement de base en technologie.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin afin de réaliser ce travail.

Table des matières

Introduction générale	01
Chapitre 1 : Erosion du verre	
1.1. Introduction	03
1.2. Processus d'érosion par sablage	03
1.2.1. Taux d'érosion	03
1.2.2. La rugosité	04
1.2.3. Effet de la vitesse sur le taux d'érosion	05
1.2.4. Effet de la vitesse sur la rugosité	06
1.2.5. Effet de l'angle d'impact sur le taux d'érosion	06
1.2.6. Effet de l'angle d'impact sur la rugosité	08
1.2.7. Effet de la masse projetée sur le taux d'érosion	08
1.2.8. Effet de la masse projetée sur la rugosité	10
1.3. Principaux simulateurs d'érosion	10
Références	13
Chapitre 2 : Effet de l'érosion des pare brises sur la vision	
2.1. Introduction	15
2.2. Etat de surfaces des pare brise	15
2.2.1. L'endommagement des surfaces	15
2.2.2. La salissure	18
2.3. La luminance de voile	18
2.4. Les méthodes de mesures de la dégradation des pare brises	21
2.4.1. Technique de mesure par Hazemeter original	21

2.4.2. Technique de mesure par analyseur de la lumière diffusée	22
2.4.3. Technique de mesure par Hazemeter à diaphragme annulaire	23
Références	28

Chapitre 3 : La diffusion de la lumière

3.1. Introduction	30
3.2. Etat de surface	31
3.2.1. Critère de RAYLEIGH	31
3.2.2. Paramètres caractéristiques d'une surface	32
3.2.3 Profil de surface	32
A. Profil déterministe	33
A.1. Rugosité arithmétique moyenne	33
A.2. Rugosité quadratique moyenne	34
A.3. Pente de surface	34
B. Profil aléatoire	35
B.1. Fonction de distribution des hauteurs d'une surface	35
B.2. Fonction de densité spectrale de puissance PSD	36
B.3. Fonction d'autocorrélation	36
3.3. La diffusion de la lumière par des surfaces rugueuses	37
3.3.1. Modèle scalaire	38
3.3.1.1. Régime spéculaire	39
3.3.1.2. Régime de mesure de la pente	40
3.3.1.3. Instrumentation TIS	41
3.3.2. Modèle vectoriel	42
3.3.2.1. Régime de la limite de la surface lisse	44
3.3.2.2. Régime proche de la surface lisse	46
3.3.2.3. Instrumentation ARS	48

Références	50
------------------	----

Chapitre 4 : Partie expérimentale

4.1. Objectif du travail	52
4.2. Procédure expérimentale	52
4.2.1. Caractéristiques du sable utilisé	52
4.2.2. Caractéristiques du verre utilisé	53
4.2.3. Dispositif souffleur de sable utilisé	54
4.2.4. Conditions de sablage	55
4.2.5. Déroulement des essais et moyens utilisés	56
4.2.6. Procédure de mesure de la lumière diffusée	56
4.2.6.1. Montage optique expérimental	56
4.2.6.2. Conditions de mesure par la méthode ARS	57
4.3. Résultats et discussions	59
4.3.1. Effet de la masse projeté sur la rugosité, la transmission et la réflexion optique.....	59
4.3.1.1 Effet de la masse projeté sur la rugosité	59
4.3.1.2 Effet de la masse projeté sur la transmission optique	63
4.3.1.3 Effet de la masse projeté sur la réflexion optique	64
4.3.2. Effet de la masse projeté et l'angle d'illumination sur la diffusion de la lumière	65
4.3.2.1. Effet de la masse projeté sur la diffusion de la lumière	65
A - Par transmission	65
B - Par réflexion	69
4.3.2.2. Effet de l'angle d'illumination sur la diffusion de la lumière	71

A - Par transmission	71
B - Par réflexion	75
4.3.3. Caractérisation de la dégradation des surfaces sablées par l'indice de diffusion	
(SLI)	79
4.3.3.1 Effet de la masse projetée	79
4.3.3.2 Effet de l'angle d' illumination	83
4.3.4 Combinaison des deux paramètres	84
A - Transmission limite « T_{min} »	84
B - Valeur limite de l'indice de diffusion « SLI »	86
Références	91
Conclusion générale	94

Introduction générale

La vision joue un rôle primordial dans la conduite automobile, dans la mesure où elle permet d'acquérir des informations sur l'environnement routier. En effet, la visibilité des objets à travers des pare brises d'automobiles dépend essentiellement de la qualité de l'état de surface de la face externe, en particulier, de la qualité de surface de la vision critique. Malheureusement, cette dernière est parfois exposée à différentes agressions extérieures selon les conditions climatiques et environnementales de chaque région géographique (vent de sable, poussières et grêles...). Dans les régions Sahariennes, les vents de sable et la poussière affectent énormément la surface externe des pare-brises des véhicules. Cet inévitable phénomène provoque la diffusion d'une lumière parasite dans le champ de vision des conducteurs. Cette dernière nuit à la bonne vision des conducteurs de véhicules qui circulent particulièrement la nuit, la levée et le coucher du soleil. Les objets vus à travers les pare-brises dégradés deviennent partiellement ou parfois complètement flous. Ainsi, la vision à travers ces pare-brises endommagés constitue un facteur accidentel pour les conducteurs de véhicules. Dans ce contexte, Haase [1989] a rapporté que les véhicules qui circulent avec des pare-brises usés, constituent un danger pour la sécurité routière. De même, Kessler [1991] a indiqué qu'à cause de la diffusion par réflexion, les conducteurs perdent 15 % de la distance de perception lors d'un croisement pendant la nuit. Par ailleurs, plusieurs auteurs, Allen [1974], Derkum [1991], Owens [1992], Helmers [1988] ont indiqué que la dégradation de l'état de surface des pare brises provoque une perte très importante de la transmission optique des pare brises, ce qui induit une réduction énorme de la visibilité des conducteurs. Dans un travail très récent, Mefford et al [2003] ont rapporté dans leur étude qui porte sur l'effet de la diffusion et la réflexion sur la production de la lumière parasite durant le jour qu'environ 60% de la luminance de voile est attribuée à l'image réfléchie du tableau de bord et environ 40% est due à la lumière diffusée.

Généralement, la dégradation de la visibilité est liée à des facteurs conjoncturels, en particulier, à l'état de surface des pare brises et les conditions d'éclairage. D'après Malaise [1998], la position (angle d'incidence) et l'intensité de la source, le contraste de la cible et l'état de surface du pare brise sont les paramètres essentiels qui influencent la diffusion de la lumière. Owens et al [1992] considèrent que parmi les facteurs qui affectent la bonne visibilité durant la nuit sont : l'angle d'inclinaison, la diffusion de la lumière et le contraste de la cible. Quant à Köln [1989], il a rapporté que pour une inclinaison des pare brises supérieure à 50 degrés, un conducteur d'âge moyen conduisant la nuit met un retard de plus de 2,8 secondes

pour identifier un obstacle sur l'accotement. Dans le même contexte, Schumann et al [1997], ont rapporté dans leur étude qui porte sur l'effet de l'angle d'inclinaison des pare brises et la réflectance du tableau de bord que, le temps moyen de réaction et le pourcentage des réponses incorrectes ou manquées des conducteurs croissent avec l'angle d'inclinaison.

Actuellement, la question essentielle qui se pose est : à quel niveau de dégradation ou niveau de diffusion, les pare brises des véhicules doivent-ils être maintenus en service ou rejetés ? En d'autres termes, la transmission minimale ou la limite de la bonne vision (valeur limite de l'indice de diffusion), à quelle valeur limite de la rugosité de surface des pare brises endommagés correspond-elle? B. Savaète [2003] a rapporté que la transmission limite varie entre 70 et 75% alors que la norme DIN recommande la valeur 1.5 de l'indice de diffusion « SLI » qui limite la bonne vision. Cependant, la correspondance de ces valeurs limites recommandées à celle de la rugosité n'était pas indiquée.

L'objectif de ce travail consiste à étudier l'effet de l'érosion des surfaces sablées et l'angle d'illumination sur la diffusion de la lumière. De plus, la limite de la bonne vision, sera déterminée en termes de la rugosité limite et nous tentons d'établir une relation mathématique entre cette dernière et l'indice de diffusion.

La thèse est agencée en quatre chapitres organisés comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présentons le phénomène d'érosion du verre et les paramètres les plus pertinents.

Le second chapitre est consacré à l'érosion des pare brises des véhicules où on a mis en évidence les facteurs majeurs qui altèrent la perception visuelle des conducteurs. Par la suite, nous présentons les techniques modernes de mesure du degré de dégradation des pare brises.

Un rappel théorique sur l'état de surface et ses paramètres est proposé en début du troisième chapitre. Puis, le phénomène de diffusion de la lumière est abordé et les modèles mathématiques qui le décrivent sont détaillés.

Le quatrième chapitre est réservé à la partie expérimentale où nous avons exposé les moyens et les techniques utilisés, ainsi que les résultats obtenus et leurs interprétations.

Enfin, cette thèse est achevée par une conclusion générale qui regroupe la synthèse de nos résultats.

Chapitre 1 : Erosion du verre

1.1. Introduction

Il est bien connu que la surface joue un rôle très important dans pratiquement toutes les applications des verres (habitation, industrie, santé,...). La couche superficielle du verre gouverne en grande partie les propriétés optiques et mécaniques. Selon les conditions climatiques et environnementales est exposée à de différentes agressions extérieures de chaque région géographique (vent de sable, poussières, grêles...). L'altération de la couche superficielle des verres affecte essentiellement la transmission optique et la résistance mécanique. Un des processus d'endommagement du verre est l'érosion par sablage. Ce phénomène indésirable et inévitable est très fréquent dans le sud Algérien (Sahara) à cause des vents de sable dont la vitesse dépasse parfois 120 km/h. Ce type d'endommagement est considéré comme étant un endommagement à dégradation graduelle et cumulé de la surface par des petites particules.

1.2. Processus d'érosion par sablage

Le processus d'érosion par sablage est un phénomène surfacique associé à un enlèvement de matière causé par des impacts répétés. L'usure érosive des matériaux est affectée par :

- Les propriétés du matériau cible (dureté, ténacité)
- Les propriétés des particules projetées (dimensions, forme, densité, dureté et ténacité)
- Les conditions d'essais (vitesse des particules, angle d'impact et température d'essai)

Les deux premiers paramètres (propriétés du matériau cible et propriétés des particules projetées) ont été étudié avec détaille dans des travaux antérieur [Bous 04]. La raison pour laquelle, on va se limiter à l'étude de l'effet du dernier paramètre tout en mettant l'accent sur l'effet des paramètres pertinents tels que (la vitesse, la masse et l'angle d'impact des particules érodantes) sur le taux d'érosion et la rugosité de surface.

1.2.1. Taux d'érosion

Le taux d'érosion, E_r , est la quantité de matière enlevée, il est exprimé par la relation :

$$E_r = \Delta m / m_p$$

où

Δm : est la perte de masse de la cible.

m_p : est la masse des particules projetées.

Il a été montré que la perte de masse est évaluée en supposant que le taux d'érosion est proportionnel au cumule de la matière enlevée par chaque impact de particule.

1.2.2. La rugosité

La rugosité présente les défauts de l'état géométrique de surface du troisième et du quatrième ordre. Elle est considérée comme le paramètre le plus important qui caractérise l'enlèvement de matière. En général, Le paramètre statistique de surface le plus utilisé pour caractériser la rugosité est la hauteur quadratique moyenne *rms* (root-mean-square roughness), σ , notée parfois R_q . Elle est donnée par la relation suivante:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2} \quad (1)$$

avec :

Z_i : hauteurs de la surface des points du profil à partir du niveau moyen de la surface.

\bar{Z} : hauteur moyenne.

N : nombre de points discrets et équidistants, mesurés le long de la ligne moyenne du profil.

Remarque :

Parfois on exprime la rugosité par un autre paramètre connu par la rugosité arithmétique moyenne R_a donnée par:

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Z_i - \bar{Z}| \quad (2)$$

Les valeurs de R_a et R_q pour un profil de surface donné seront proches quand le profil ne contient pas de grandes déviations par rapport au niveau moyen de la surface. Cependant, s'il y a un nombre important de grandes saillies et de grands creux, les valeurs élevées de Z_i dominant les statistiques de la surface et R_q sera plus grande que R_a .

On constate qu'avec la même vitesse, la fissuration latérale est plus accentuée pour les particules anguleuses.

1.2.4. Effet de la vitesse sur la rugosité

La rugosité est un paramètre de caractérisation major de l'état de surface. Elle reflète impérativement le taux d'endommagement de la surface exposée à l'érosion. Cette dernière est largement affectée par la vitesse des particules érosives. La raison pour laquelle la plus part des études se concentrent sur son effet néfaste.

Selon Buijs et Pasmans [Buij 95], dont leur étude est portée sur l'effet de la vitesse de particules sur l'état de surface d'un verre silico-sodo-calsique érodé par des particules en alumine de taille moyenne $30\mu\text{m}$, montre que la rugosité croît régulièrement avec la vitesse des particules. La rugosité arithmétique moyenne (R_a) obtenue dans ce cas est de l'ordre de $2,5\ \mu\text{m}$. Alors que la rugosité totale (R_t) atteint $15\ \mu\text{m}$ pour la même vitesse et affecte essentiellement la résistance à la rupture (figure. 1).

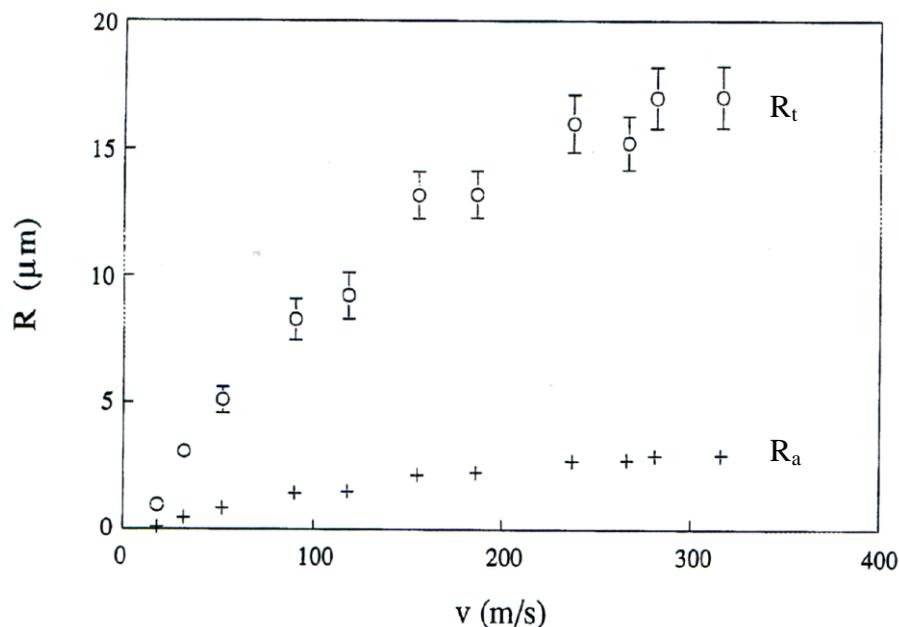


Figure. 1 : Effet de la vitesse des particules sur la rugosité [Buij 95]

1.2.5. Effet de l'angle d'impact sur le taux d'érosion

Dans le processus d'érosion, l'angle d'impact est un facteur pertinent qui définit le comportement d'un matériau vis-à-vis du type d'érosion. Si le maximum d'érosion est observé à 90° le matériau est fragile, par contre si le maximum d'érosion est observé à environ 30° le matériau est considéré comme ductile.

A titre d'exemple, Grearson et al [Grea 89] ont observé que le taux d'érosion pour un matériau céramique érodé par particule solide est maximal à 90°. Cette règle est confirmée par Ballout et al [Ball 96] dans le cas de l'érosion du verre érodé par des particules solides en alumine (Al_2O_3).

Oka [Oka 01] a montré que la longueur de la zone érodée dans la direction transversale est indépendante de l'angle d'impact, et elle croît dans la direction longitudinale avec la décroissance de ce dernier. La zone érodée a la forme d'une ellipse (figure. 2).

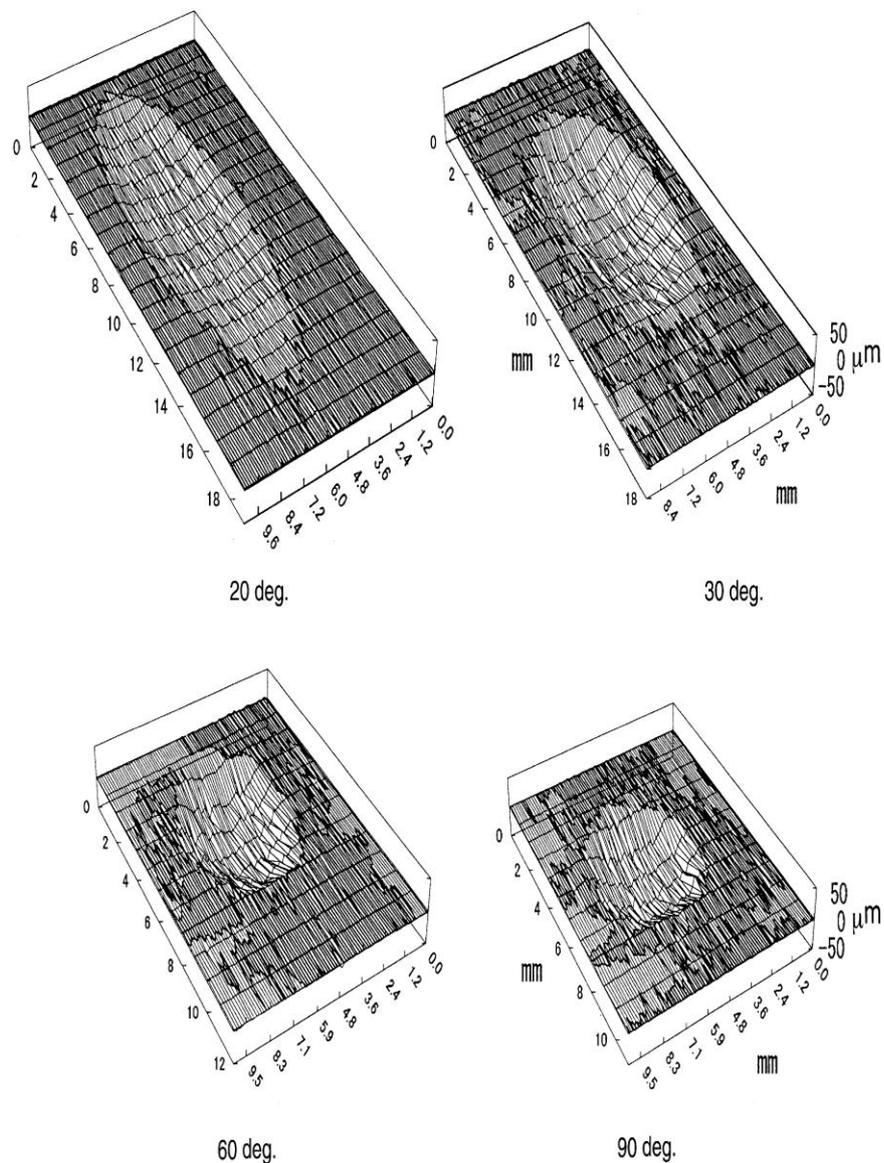


Figure. 2 : Effet de l'angle d'impact sur la forme de la zone érodée [Oka 01].

1.2.6. Effet de l'angle d'impact sur la rugosité

Concernant l'effet de l'angle d'impact des particules sur la rugosité de surface érodée, Bouzid et al [Bouz 00] ont montré que dans le cas de l'érosion du verre par des particules de sable, la rugosité est proportionnelle à l'angle d'impact et présente une valeur maximale sous une incidence normale des particules par rapport à la cible (figure. 3). Dans ce cas l'endommagement est plus important suite à l'énergie cinétique maximale que les particules acquièrent. Slikkerveer et al [Slik 00] ont rapporté dans leur travail expérimental, que l'arrachement d'un fragment de verre de 0.1 cm^3 nécessite une quantité d'énergie de 100 J. Cette énergie est l'équivalent de la projection de 20 g de particules érosives à une vitesse de 100 m/s. Cet exemple de laboratoire donne une idée sur l'endommagement des pare brises des véhicules qui s'exposent dans le Sahara à des tempêtes de sable dont la vitesse peut atteindre les 120 km/h.

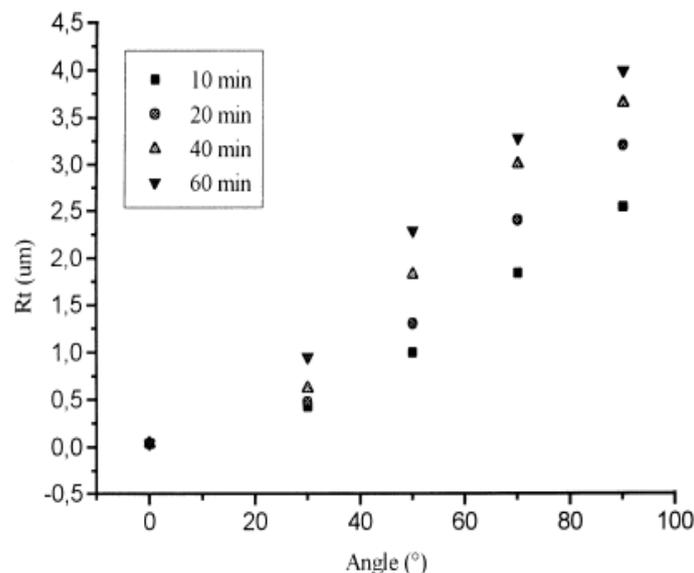


Figure. 3 : Effet de l'angle d'impact et le temps sur la rugosité totale [Bouz 00]

1.2.7. Effet de la masse projetée sur le taux d'érosion

La masse projetée joue également un rôle très important dans le processus d'érosion. Parfois on exprime ce paramètre par le temps d'exposition. Une étude faite par Mahdaoui [Mahd 07] sur l'effet de sablage sur l'érosion du verre sodo-calcique, montre que pour une masse projetée inférieure à 100 g, le taux d'érosion reste pratiquement très faible. Au-delà de cette

quantité, le taux d'érosion croît rapidement et les allures deviennent presque parallèles (figure. 4).

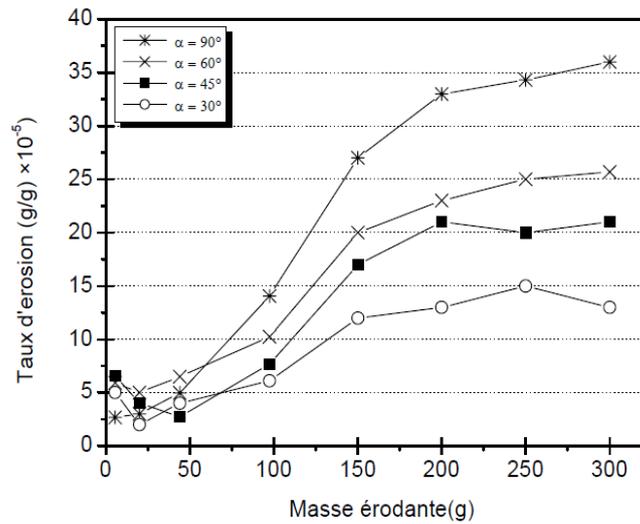


Figure. 4 : Effet de la masse projetée sur le taux d'érosion à différents angles d'impacts [Mahd 07]

Dans le même contexte, Bousbaa et al [Bous 03], ont rapporté que pour une quantité de sable projetée inférieure à 90 g, le taux d'érosion cumulé du verre trempé chimiquement reste pratiquement très faible en comparaison avec le verre dans son état brut et recuit. Au-delà de cette quantité, on atteint le stade de saturation et les traitements de renforcement apportés à la couche superficielle des échantillons n'ont aucun effet apparent sur le taux d'érosion (figure. 5).

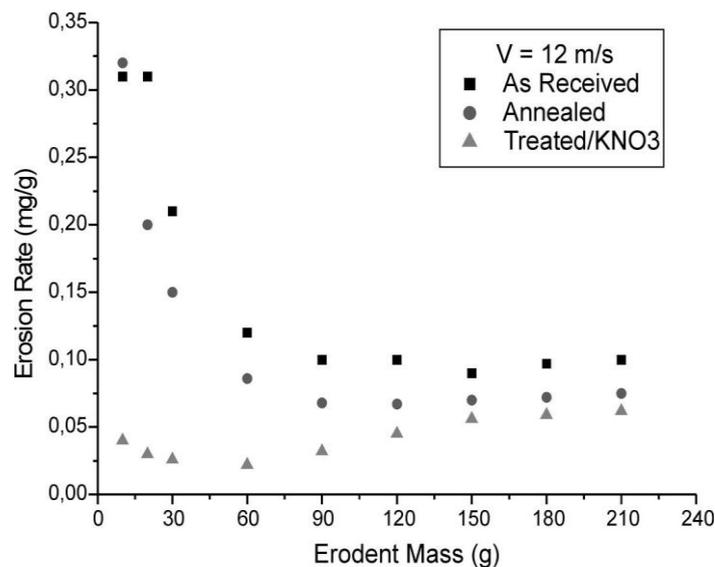


Figure. 5 : Effet de la masse projetée sur le taux d'érosion cumulé [Bous 03].

1.2.8. Effet de la masse projetée sur la rugosité

Comme on a déjà cité précédemment, la rugosité est un critère géométrique important dans la caractérisation de l'état d'endommagement des surfaces érodées. En outre, elle est largement affectée par plusieurs facteurs liés aux conditions d'érosion. Parmi lesquelles, on peut mentionner la quantité de masse des particules érodantes.

Adjouadi et al [Adjo 05], ont observé que la courbe de la rugosité augmente fortement jusqu'à $2.25 \mu\text{m}$ (la valeur du maximum de saturation) qui se manifeste pour une masse projetée de 50g. Quant à Bousbaa et al[Bous 03], la valeur du maximum de saturation est de $3.43 \mu\text{m}$ atteinte après sablage avec une masse des particules de 90g. La différence obtenue dans la valeur du maximum peut être attribuée aux choix des conditions des essais.

1.3. Principaux simulateurs d'érosion

Pour simuler l'érosion des matériaux par des particules solides, plusieurs simulateurs ont été conçus. Parmi lesquels on trouve des simulateurs d'érosion rotatifs, des simulateurs à accélération centripète et des simulateurs verticaux et horizontaux avec buse à air ou à gaz. Dans ce qui suit on va accentuer sur les simulateurs verticaux et horizontaux avec buse à air ou à gaz. Il s'agit des simulateurs qui sont exigés et recommandés par les normes DIN 50 332[DIN] et ASTM G76-89[ASTM]. En général, le mode opératoire de ce type de simulateurs consiste à projeter des particules érosives, injectées dans une buse à travers une trémie à débit variable et accéléré par un équipement souffleur de gaz ou d'air, sur un échantillon fixe. L'angle d'impact est obtenu par l'orientation de l'échantillon dans son plan normal à la direction de la buse par rapport à ce dernier et vis versa.

Selon les lois de la mécanique des fluides Ouziaux [Ouzi 78], un rapport de 25 à 80 fois, entre la longueur de la buse et son diamètre intérieur, est recommandé pour éviter les tourbillons dûs aux décollements et pour atteindre un écoulement stable du flux, notamment dans le cas où l'entrée de la buse présente un angle vif. La norme ASTM G76-89 exige un rapport de 25 fois, alors que la norme DIN 50 332 recommande une buse de longueur 120 mm avec un diamètre intérieur de 8 ou 18 mm. La surface intérieure de la buse doit être la plus lisse possible, pour favoriser l'écoulement dynamique de l'air ou gaz au voisinage des parois.

Parmi ces simulateurs, nous citons à titre d'exemple le banc d'érosion vertical réalisé par Divakar [Diva 05](figure. 6). Ce type de simulateur est mené d'une table rotative qui fixe l'angle de sablage. Les particules sont accélérées par un compresseur dans une buse verticale.

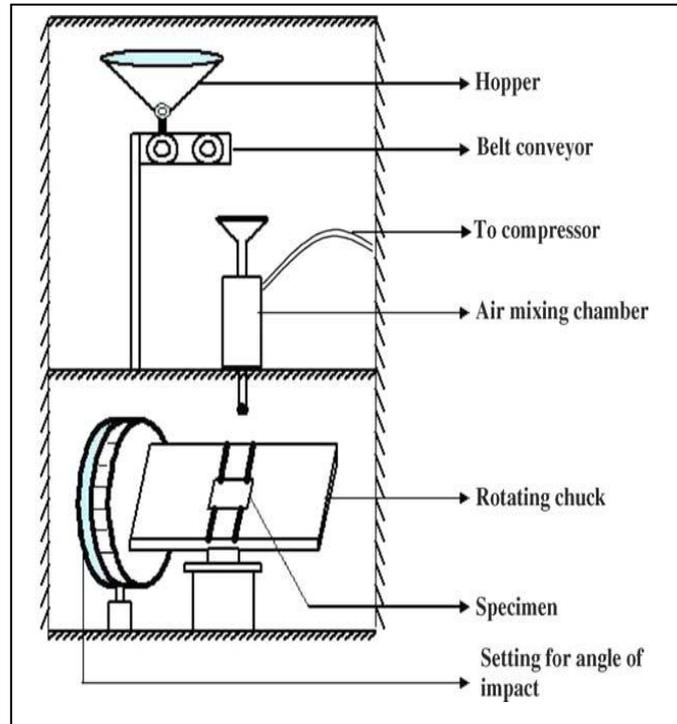


Figure. 6 : Simulateur vertical réalisé par Divakar [Diva 05].

Chevalier et Vannes [Chev 95], ont élaboré un banc d'essai à buse horizontale (figure. 7).

Ce banc d'essai présente les spécifications suivantes :

- Angles d'impacts compris entre 10° et 90° .
- Vitesses du jet de l'air varient entre 40 et 100 m/s.
- Diamètre du canal souffleur : de 6.5 à 10 mm.

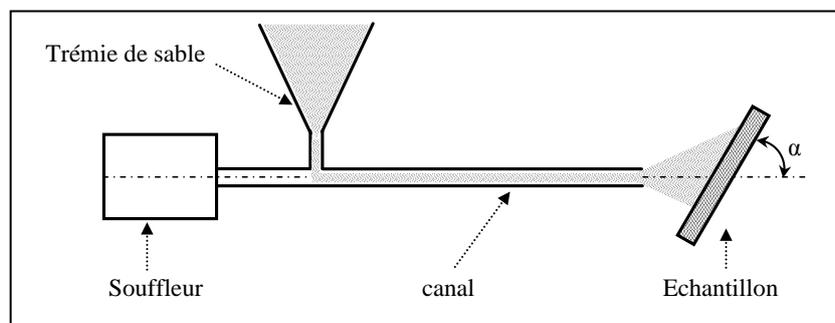


Figure. 7 : Simulateur Horizontal réalisé par Chevalier et Vannes [Chev 95].

Le simulateur à buse présente plusieurs avantages :

- C'est un dispositif simple à réaliser et à manipuler et facilement ajustable.
- La possibilité de centrer l'axe du jet avec le centre de l'échantillon.
- Le changement de la vitesse de l'air se fait par simple réglage.
- La possibilité d'alimenter le système régulièrement et continuellement en particules.
- La possibilité d'éroder des échantillons de grande surface.

Parmi les inconvénients major de ces simulateurs, on cite :

- La difficulté de mesurer la vitesse des particules de façon individuelle et d'une manière précise.
- La maîtrise de la trajectoire des particules érosives de petites tailles en cas des grandes vitesses.
- La rencontre des particules incidentes avec celles réfléchies, notamment pour les bancs verticaux, ce qui fausse partiellement la reproductibilité des essais.

Références

- [Adjo 07] N. Adjouadi, N. Laouar, C. Bousbaa, N. Bouaouadja and G. Fantozzi. Study of light scattering on a soda lime glass eroded by sandblasting. *J. Eur. Ceram. Soc.*, **27**, (2007), pp 3221–3230.
- [ASTM 92] ASTM G76-89. Standard practice for conducting erosion tests by solid particle impingement using gas jets. ASTM, Philadelphia, (1992).
- [Ball 96] Y. Ballout, J. A. Mathis and J. E. Talia. Solide particle erosion mechanism in glass. *Wear*, **196**, (1996), pp. 263-269.
- [Bous 03] C. Bousbaa, M. A. Madjoubi, Z. Hamidouche and N. Bouaouadja. Effects of annealing and chemical strengthening on soda lime glass erosion wear by sand blasting. *J. Eur. Ceram. Soc.* **23**, (2003), pp 331–43.
- [Bous 04] C. Bousbaa. Effet des traitements sur l'érosion du verre érodé par impact de sable. Thèse de doctorat d'état, Institut d'optique et mécanique de précision, (2004), pp 17.
- [Bouz 00] S. Bouzid and N. Bouaouadja. Effects of impact angles on glass surface eroded by sand blastin g. *J. Eur. Ceram. So.*, **20**, (2000), pp 481- 488.
- [Buij 95] M. Buijs. Erosion of glass by alumina particles: transitions and exponents. *Wear*, **184**, (1995), pp. 61-65.
- [Chev 95] R. Chevallier and A. B. Vannes. Effects on sheets surface of an erosive particle jet upon impact. *Wear*, **184**, (1995), pp 87-91.
- [DIN 84] DIN 50332. Strahlverschleißprüfung. DIN, Berlin. (1984).
- [Diva 05] M. Divakar, V. K. Agarwal, and S. N. Singh. Effect of the material surface hardness on the erosion of AISI316. *Wear*, **259**, (2005), pp 110-117.
- [Finn 67] I. Finnie, J. Wolak and Y. Kabel. Erosion of metals by solid particles. *J.Mater.Sci*, **2**, (1967), pp 682-700.
- [Grea 89] A. N. Grearson, J. Aucote and H. Engström. Wear of ceramics in grit blasting. *Brit. Ceram. Trans*, **88**, (1989), pp. 213-218.
- [Guld 80] M. E. Gulden. Effect of number of impacts on erosion of polycrystalline MgF₂ in the elastic-plastic response regime. *J. Amer. Cer. Soc.*, **63**, (1980), pp 121-126.
- [Mahd 07] T. Mahdaoui. Etude des défauts générés par impact de sable et leurs influences sur la lumière parasite : application aux pare-brise. Thèse de doctorat d'état, Institut d'optique et mécanique de précision, (2007), pp 31.

[Oka 01] Y.I. Oka, M. Nishimira, K. Nagahashi and M. Matsumura. Control and evaluation of particle impact conditions in a sand erosion test facility. *Wear*, **250**, (2001), pp 736-743.

[Ouzi 78] R. Ouziaux and J. Perrier. *Mécanique des fluides appliqué*. 3^{ème} édition, (1978), Paris,

[Slik 00] P. J. Slikkerveer, P. C. P Bouten and F. C. M de Haas. High quality mechanical etching of brittle materials by powder blasting. *Sensors and Actuators*, **85**, (2000), pp 296-303.

[Vers 98] M. A. Verspui. Modelling abrasive process of glass. Phd. Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, (1998).

[Wied 79] S. M. Wiederhorn and B. R. Lawn. Strength degradation of glass impacted with sharp particles: I, Annealed surfaces. *J. Amer. Cer. Soc*, **62**, (1979), pp. 66-70.

Chapitre 2 : Effet de l'érosion des pare brises sur la vision

2.1. Introduction

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 est d'origine visuelle. La dégradation de la visibilité est liée à des facteurs conjoncturels, en particulier, à l'état de surface des pare brises et aux conditions d'éclairage.

2.2. Etat de surfaces des pare brises

Généralement, la bonne vision du conducteur est liée directement à la qualité de l'état de surface des pare brises. En effet, la perception est altérée par tous facteurs qui affectent la surface. On s'intéresse particulièrement à l'endommagement et salissure de la surface.

2.2.1. L'endommagement

L'endommagement des pare brises se divise en deux catégories selon [Pron 06]:

-L'endommagement par des particules soudaines et aléatoires.

Généralement, ce type d'endommagement résulte d'un impact sous incidence discrète. Les défauts créés dans ce cas peuvent être immédiatement observés par l'œil nu. Jabbour [Jabb 99] a déclaré que les fissures produites sur le pare brise par des particules soudaines peuvent rendre la vision floue des conducteurs, particulièrement la nuit. Elles peuvent aussi atténuer l'attention des conducteurs selon leurs emplacements.

- L'endommagement graduelle ou usure.

Dans ce cas, la dégradation ou sablage des pare brises résulte d'une incidence cumulée des petites particules et des poussières. Cet endommagement se produit au cours du temps, et les défauts produits n'apparaissent pas immédiatement aux conducteurs. De plus, les essuies glaces peuvent endommager les surfaces extérieures des pare brises au cours du temps et ceci par rayures. La figure 1 illustre des exemples typiques de certaines formes de défauts observés sur un pare brise d'un véhicule.

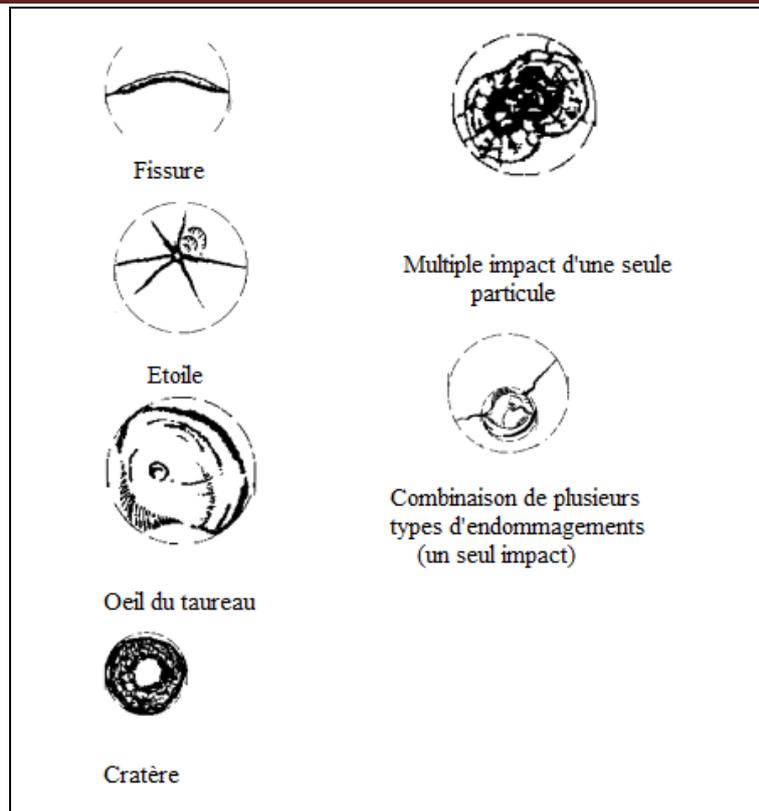


Figure. 1: Exemples de défauts observés sur un pare brise [Pron 06].

L'évolution de processus de chaque endommagement est influencée par certains facteurs tels que : la distance parcourue « le kilométrage », le climat et les conditions d'environnement. Dans ce contexte, Allen [Alle 69] et Timmermann [Timm 85a] ont rapporté que la dégradation des pare brise (dégradation produite par l'utilisation des essuies glace est incluse) augmente en fonction de la distance parcourue (figure. 2).

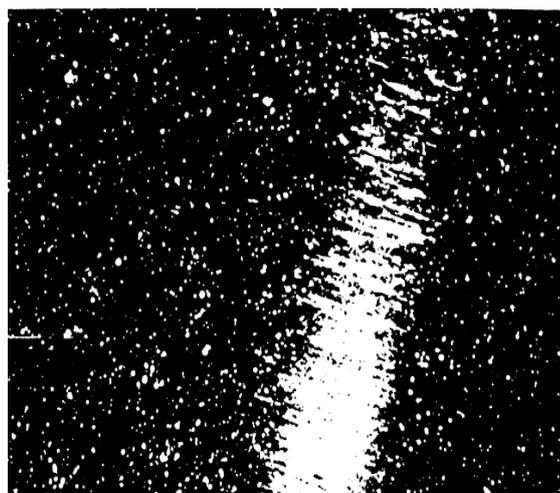


Figure. 2 : Dégradation de la surface d'un pare brise à 80000 km de circulation [Timm85a].

Derkum [Derk 91a] a conclu que la différence d'endommagement des pare brises examinés dans des différentes régions géographiques résulte probablement du changement climatique et des conditions d'environnement. Timmermann [Timm 85b] a également constaté que les véhicules qui sont habituellement stationnées à ciel ouvert, présentent des valeurs plus élevées de la lumière diffusées que celles stationnées aux garages.

Il faut bien noter que l'effet de l'endommagement localisé sur les différentes surfaces des pare brises se diffère d'une zone à une autre sur la vision du conducteur. On trouve la surface de la vision critique. Cette surface est de 220 mm de largeur et une hauteur limitée par l'arc des essuies glaces. Quant à la surface de la vision primaire, elle représente le reste de la demi partie du pare brise (figure. 3). Il est recommandé que la surface de la vision critique doit avoir le minimum de défauts (cratère, fissure, rayure,...). Alors que pour la surface de la vision primaire on tolère des défauts dont la taille des fissures est de l'ordre de 100 mm [Pron 06]. Selon Lundkvist et Helmers [Lund 93] la distance de détection d'un objet observé à travers un pare brise très dégradé peut être 15% inférieure par rapport à un pare brise neuf. De plus, si le conducteur présente un affaiblissement de 0.5 de l'acuité visuelle, la distance de détection peut être réduite de 15 à 20%. En conclusion, la combinaison d'un pare brise très utilisé avec un affaiblissement de l'acuité visuelle peut provoquer une perte de la distance de détection de plus de 20 mètres.

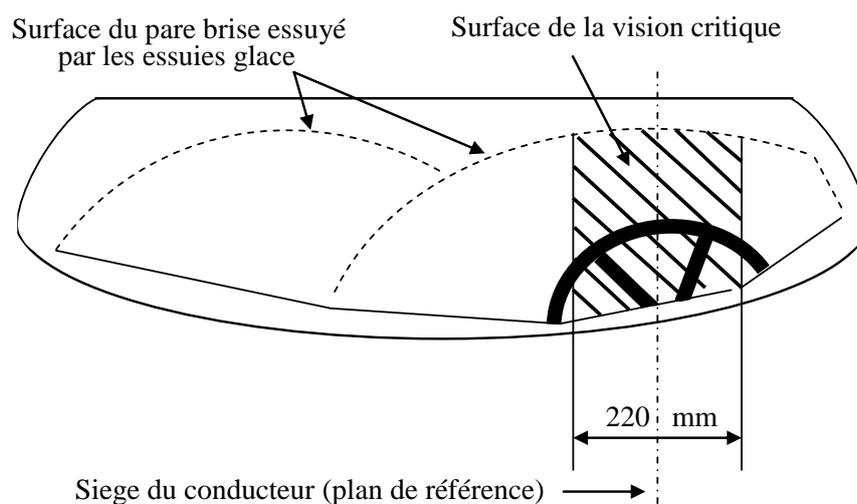


Figure. 3 : Surface de la vision critique pour un véhicule [Pron 06].

2.2.2. La salissure

La présence de la saleté sur chaque surface du pare brise peut aussi amplifier l'effet néfaste de la dégradation sur la vision. Dans un travail expérimental réalisé par Allen [Alle 74], il a conclu que l'effet de la salissure est relativement similaire à l'effet de l'endommagement par des petites particules sur la diffusion de la lumière. Kessler [Kess 91] a rapporté que la salissure et les défauts de surfaces peuvent générer la diffusion de la lumière. Dans le même contexte, Timmermann [Timm 85b] a suggéré que cette dernière peut être produite par la présence de la saleté ou de la graisse sur les pare brises. Il a indiqué également, que pour des différents types d'endommagement résultent des différents effets de la lumière diffusée. Par exemple, les petits fragments et les cratères tendent à diffuser la lumière avec un halo autour de la source de la lumière. Alors que les fissures et les rayures tendent à diffuser la lumière perpendiculaire à la surface endommagée et à associer un ou deux queues à la source de la lumière (figure. 4).



Figure. 4 : Illustration de différents types d'effet de la lumière diffusée[Bert 09]. a) Effet de halo

b) Effet de queue (lumière des phares) c) Effet de queue (lumière du jour)

2.3. La luminance de voile

La luminance de voile est une lumière éblouissante qui résulte de la lumière diffusée ou réfléchiée par le pare brise du véhicule vers les yeux d'un conducteur. Selon Phillips et Rutstein [Phil 65], elle est définie comme étant la sensation éblouissante d'une lumière relativement brillante qui produit le caractère désagréable ou l'inconfort pour le conducteur.

Pendant la nuit, la lumière diffusée est probablement le principal facteur contribuant à la production de cette luminance de voile. Elle se manifeste essentiellement en cas d'apparition

soudaine des sources secondaires lors d'un croisement de deux véhicules. Par contre durant le jour, la luminance de voile est produite au coucher et au lever du soleil. Comme elle peut avoir lieu à cause de l'image de la partie supérieure du tableau de bord vue par réflexion spéculaire dans le pare brise.

Holtmann et al [Holt 94] ont défini la lumière diffusée comme étant la quantité de la lumière transmise dans différentes directions par rapport à la direction principale de la lumière incidente, due à la présence des défauts de surface (figure. 5).

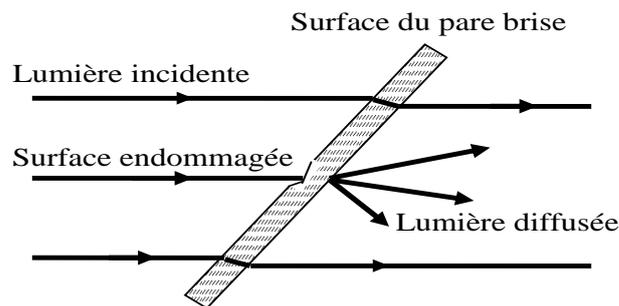


Figure. 5 : Diffusion de la lumière par une surface endommagée.

L'intensité de la lumière diffusée dépend essentiellement de celle de la source et de l'angle de diffusion. De plus, la lumière diffusée a un impact négatif sur la bonne vision et sur la perception des conducteurs de véhicules qui circulent la nuit, au lever et au coucher du soleil. Durant ces moments, la lumière diffusée par réflexion et par transmission est très importante. Kessler [Kess 91] a rapporté que durant le jour, l'œil est adapté à la lumière intense avec différentes longueurs d'onde, donc cette lumière est supportée par le conducteur. Bien que, durant la nuit la lumière émise par les phares d'un véhicule en opposition sera diffusée dans un large angle, d'où l'apparition d'une image floue dans le champ de vision du conducteur (figure. 6).

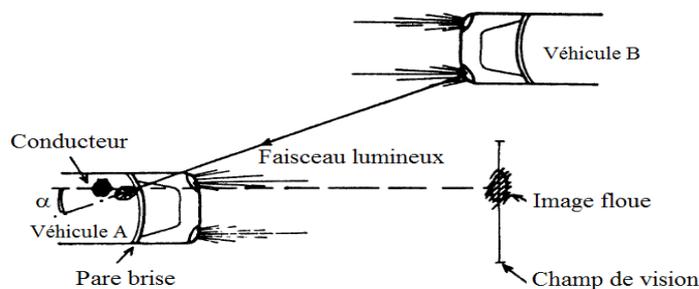


Figure. 6 : Apparition d'une image floue lors d'un croisement de deux véhicules durant la nuit.

Bertilsson et Svensson [Bert 09] ont rapporté que l'œil humain a besoin d'un certain temps d'adaptation variable selon qu'il s'agisse du passage de l'obscurité à la lumière ou de l'inverse. En effet, il fallait donc, environ 30 minutes pour une bonne adaptation à l'obscurité et seulement 30 secondes pour le passage de l'obscurité à la lumière. En réalité on devrait considérer que les courbes d'adaptation sont des exponentielles décroissantes avec une réponse rapide dès les premiers instants, mais une amélioration lente de la vision avec le temps. Ainsi, pour une adaptation parfaite à l'obscurité, des heures sont nécessaires, mais les premiers instants sont les plus importants (figure. 7). L'exemple type d'un problème courant lié à la conduite, en entrant dans un tunnel, où l'œil doit s'adapter très vite avec le contraste très fort entre la lumière du jour et l'obscurité du tunnel, ce qui réduit d'autant la distance de visibilité.

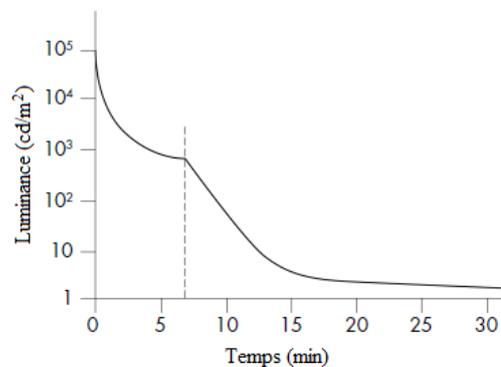


Figure. 7 : Courbe d'adaptation de l'œil[Bert 09].

Selon [Timm 85b], [Lund 93], [Kess 91] et [Allen 74] la lumière diffusée est influencée par la qualité de l'état de surface des pare brises, l'angle d'inclinaison et l'intensité de la lumière source. Rompe et Engel [Romp 84] ont étudié l'influence de la lumière diffusée par les pare brises sur la vision des conducteurs durant la nuit. Ils ont conclu qu'en moyenne, le pourcentage des réponses correctes décroissent avec l'augmentation du flou (de 91% réponses correctes avec un pare brise transparent à 73% avec 4.5% de flou).

Lundkvist et Helmers [Lund 88] ont rapporté que la lumière diffusée par un pare brise usé réduit les performances visuelles des conducteurs entre 9-25% et qu'une croissance linéaire existe entre le niveau de la lumière diffusée et la diminution de la distance de détection. De plus, leurs résultats sont prouvés par l'existence d'une relation linéaire entre la croissance du niveau de la lumière diffusée évaluée par l'indice de la lumière diffusée (SLI : Stray Light Index) et l'état de surface de pare brise (voir tableau ci-dessous).

Niveau de la lumière diffusée	Valeur de SLI	Etat de surface de pare brise
1	0.36	Nouveau
2	1.08	Peu usé
3	1.75	Usé
4	3.04	Très usé

Tableau 1 : Variations de SLI en fonction de l'état de surface de pare brise[Lund 88].

En effet, la qualité de l'état de surface des pare brises est considérée comme un facteur primordial influençant sur la diffusion de la lumière en comparaison avec l'angle d'inclinaison et l'intensité de la lumière source. Owens et al [Owen 92] ont rapporté que durant la nuit, l'angle d'inclinaison a un effet déterminant sur la visibilité des conducteurs, mais cet effet est relativement faible en comparaison à ce qui est produit par la diffusion de la lumière à partir d'un haut niveau d'usure et de salissure. Schumann et al [Schu 97] ont conclu de leur étude qui porte sur l'influence de l'angle d'inclinaison et la réflectance du tableau de bord sur la diffusion de la lumière que cette dernière croît avec les larges angles d'inclinaison (supérieurs à 60°). Dans ce cas, les conducteurs nécessitent plus de temps pour détecter les objets avec un bon contraste. L'effet négatif des grands angles d'inclinaison peut être compensé lorsque le tableau de bord présente une faible réflectance. Dans le même contexte, Mefford et al[Meff 03] ont trouvé qu'environ 60% de la luminance de voile est attribuée à l'image réfléchie du tableau de bord et environ 40% est due à la lumière diffusée dont 18% est attribuée à la saleté et le reste constitue les défauts permanents.

2.4. Les méthodes de mesures de la dégradation des pare brises

Parmi les méthodes de mesures de la dégradation des pare brises on cite celle qui exprime le degré de dégradation en terme de rapport de l'intensité de la lumière diffusée par l'intensité de la lumière incidente. Ce rapport est appelé coefficient de réduction de la luminance ou indice de diffusion de la lumière (SLI) et parfois le flou. Il est mesuré par plusieurs techniques :

a) Technique de mesure par Hazemeter original

Le principe consiste à calculer le pourcentage de flou, tout en se basant sur la lumière transmise et celle diffusée de la surface testée. L'élément principal qui réalise cette fonction (collection du flux total transmis et diffusé) est la sphère intégrante dont l'angle de rotation

n'excède pas 10 degrés (voir figure. 8). Le calcul du pourcentage de flou est donné par la relation suivante [Pron 06]:

$$Flou \% = \left(\frac{T_d}{T_t} \right) * 100 \quad (1)$$

avec : T_d : Lumière diffusée. et T_t : Lumière totale transmise.

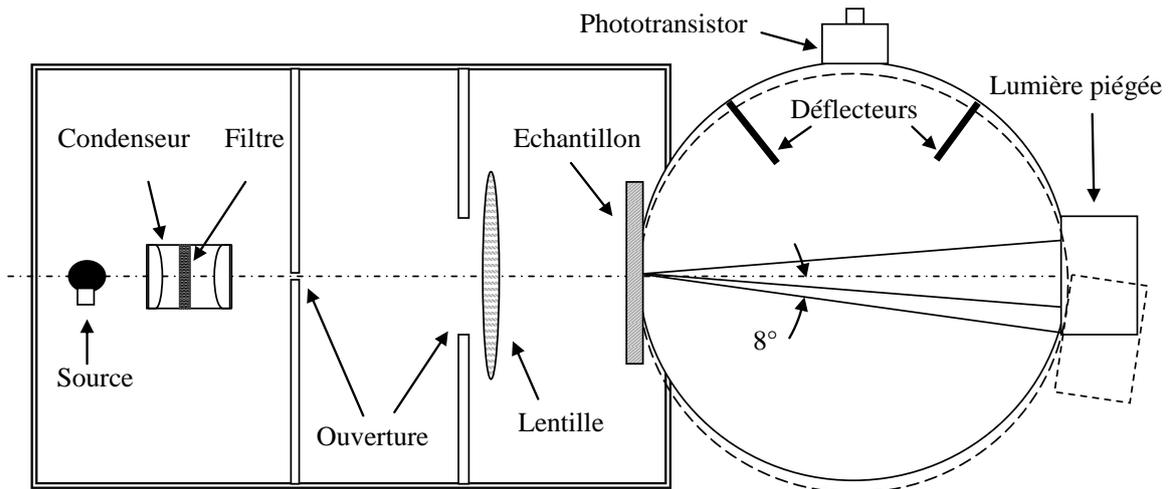


Figure. 8 : Schéma de principe du Hazemeter originale[Pron 06].

b) Technique de mesure par analyseur de la lumière diffusée

Cette technique est basée sur la mesure de la lumière diffusée dans un intervalle d'angle limité entre 1.5 et 2 degrés tout en utilisant le Hazemeter originale. Cette technique a été développée par Timmernann [Timm 85b] pour les raisons suivantes :

- Cet intervalle d'angle est conforme à la norme DIN 4646 pour la mesure du coefficient de réduction de la luminance.
- Pour un conducteur circulant la nuit, la lumière émise par un véhicule venant en sens inverse, à une distance de 60 m apparaîtra sous un angle d'environ 1,75 degré.
- L'intensité de la lumière diffusée est plus élevée pour des angles de diffusion inférieurs à 2 degrés.

Le principe de mesure de l'analyseur est illustré par la figure 9. Un faisceau parallèle de 3.5 cm de diamètre est émis sur la surface à analyser. La lumière transmise est focalisée par une

lentille de collimation. Deux détecteurs sont placés sur le plan focal dont le premier mesure la lumière transmise et le second capte la lumière diffusée (1.5 à 2 degrés).

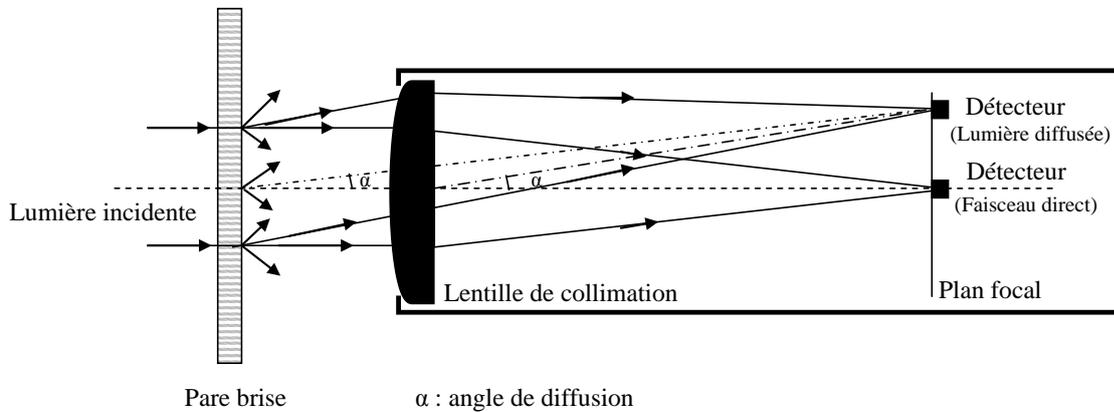


Figure. 9 : Analyseur de la lumière diffusée [Timm 85b]

Un exemple type d'information obtenue de diagramme de la lumière diffusée est illustré par la figure 10.

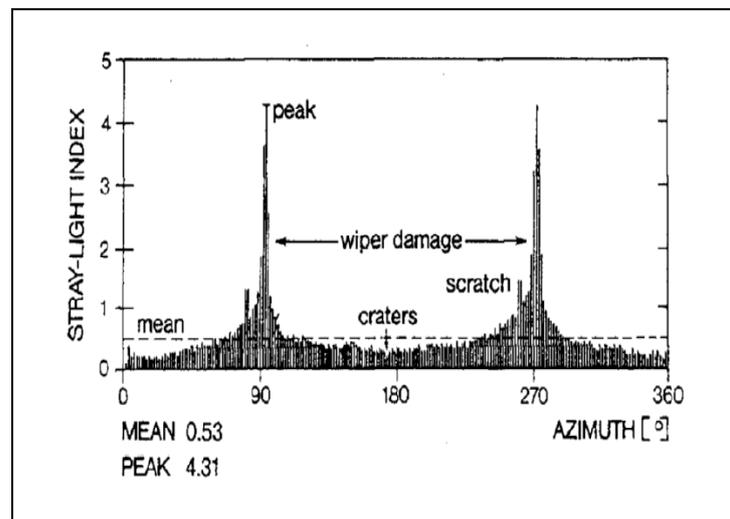


Figure. 10 : Diagramme de SLI pour un pare brise avec différents types de défauts [Timm 85b].

2.4.3. Technique de mesure par Hazemeter à diaphragme annulaire

Un autre Hazemeter a été développé pour la mesure de la lumière diffusée conformément à une autre norme DIN (German standard DIN 52298-1). Dans ce cas, la totalité de la lumière diffusée est enregistrée dans une surface entre l'angle 1.5 et 2 degrés. Pour faire cette tâche,

l'introduction d'un diaphragme annulaire dans l'arrangement optique de base de ce Hazemeter est nécessaire (figure. 11).

Ainsi, l'évaluation de SLI est donnée selon la formule mathématique suivante [**Pron 06**]:

$$SLI = 1/\Omega (Q_{1R}/Q_{1L} - Q_{0R}/Q_{0L}) \quad (2)$$

avec :

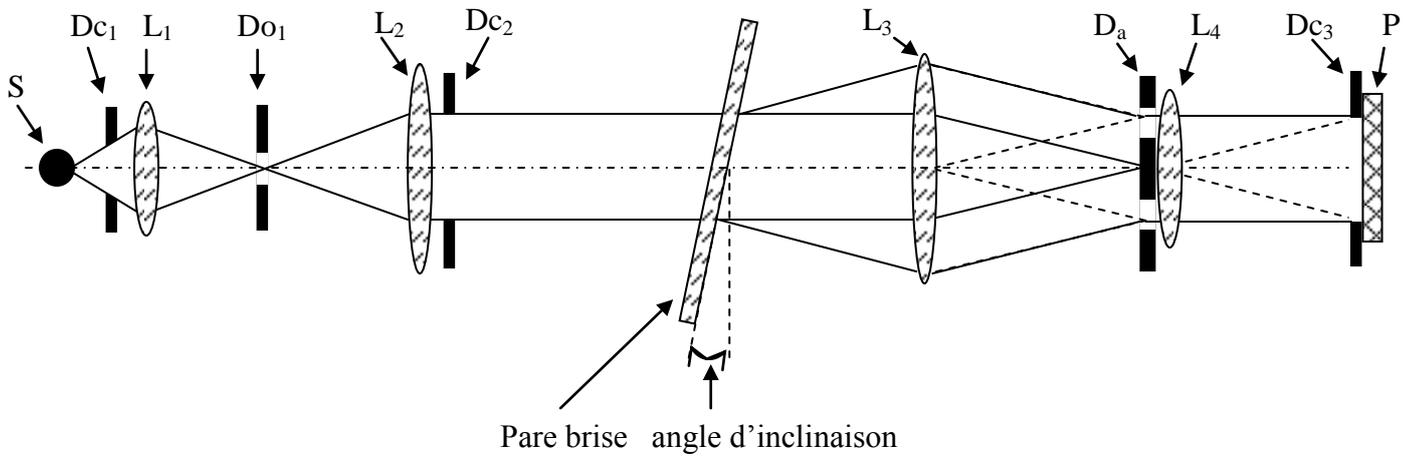
Ω : Angle solide de mesure.

Q_{0L} : Flux de la lumière transmise spéculairement sans le positionnement de l'échantillon en utilisant le diaphragme d'ouverture Do_2 .

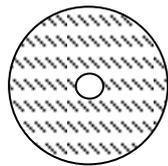
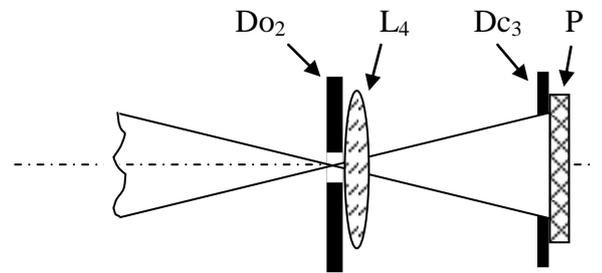
Q_{1L} : Flux de la lumière transmise spéculairement avec le positionnement de l'échantillon en utilisant le diaphragme d'ouverture Do_2 .

Q_{0R} : Flux de la lumière transmise diffusée sans le positionnement de l'échantillon en utilisant le diaphragme annulaire Da .

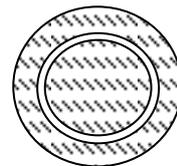
Q_{1R} : Flux de la lumière transmise diffusée avec le positionnement de l'échantillon en utilisant le diaphragme annulaire Da .



- | | |
|---------------------|---------------------------|
| S | : Source de la lumière |
| Dc _{1,2,3} | : Diaphragmes de champ |
| Do _{1,2} | : Diaphragmes d'ouverture |
| D _a | : Diaphragme annulaire |
| P | : Photo détecteur |



Do₂ : Diaphragme d'ouverture
(Mesure de la lumière directe)



D_a : Diaphragme annulaire
(Mesure de la lumière diffusée entre 1.5 et 2°)

Figure. 11: Hazemeter à diaphragme annulaire[Pron 06]

Un exemple de mesure de l'indice de diffusion est donné par la figure 12.

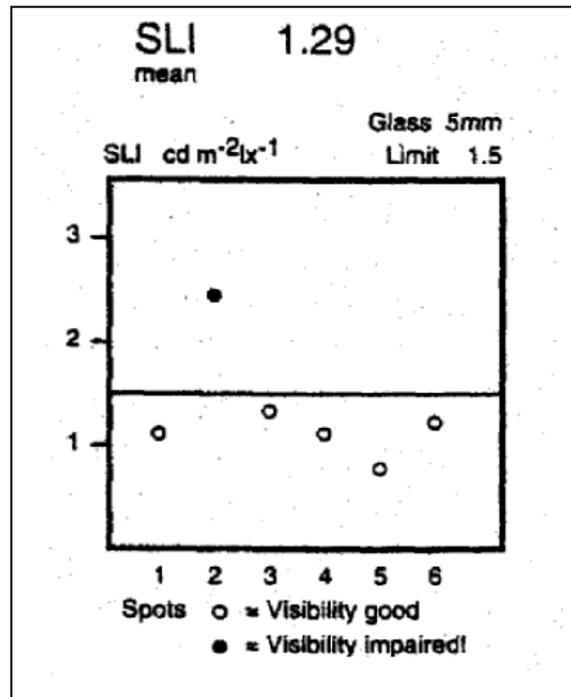


Figure. 12 : Valeurs de SLI pour différents points de pare brise [Pron 06].

On constate que la valeur 1.5 est la limite de la bonne vision. Dans une étude statistique Derkum [Derk 91b] a constaté que dans la ville de Cologne (Köln) en Allemagne, sur 896 véhicules seulement 2.4% présentent des valeurs supérieures à la valeur limite 1,5. Alors que dans la ville de Norway en U.S.A seulement 21.1% sur 218 véhicules ont des valeurs de SLI supérieures à 1,5. Les figures 13,14 et 15 montrent des différents diagrammes de mesure de SLI pour différents types d'endommagements de pare brise.

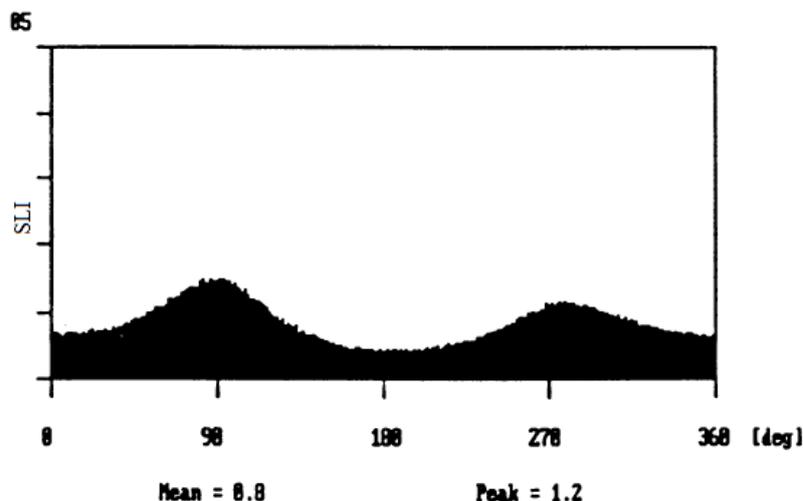


Figure. 13 : Diagramme de SLI pour un pare brise avec endommagement en cratères [Derk 91b].

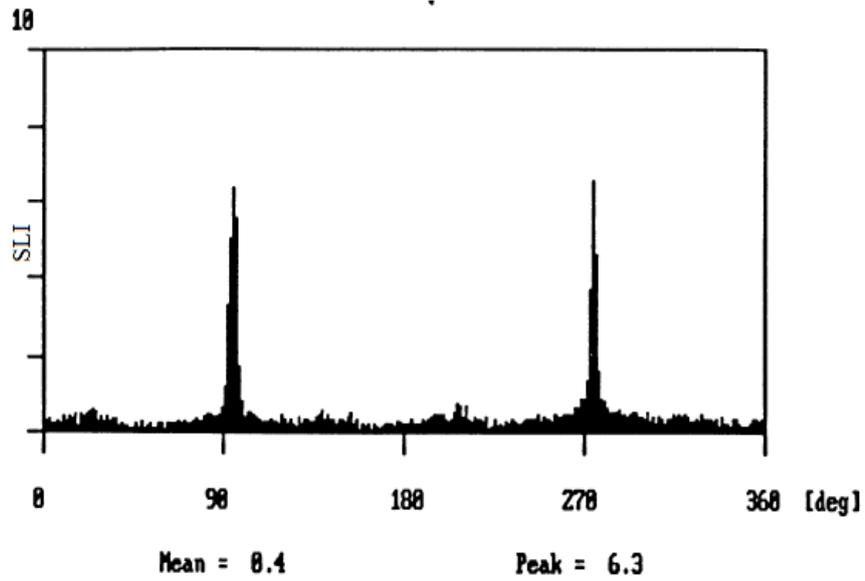


Figure. 14 : Diagramme de SLI pour un pare brise endommagé par les balais des essuies glaces [Derk 91b].

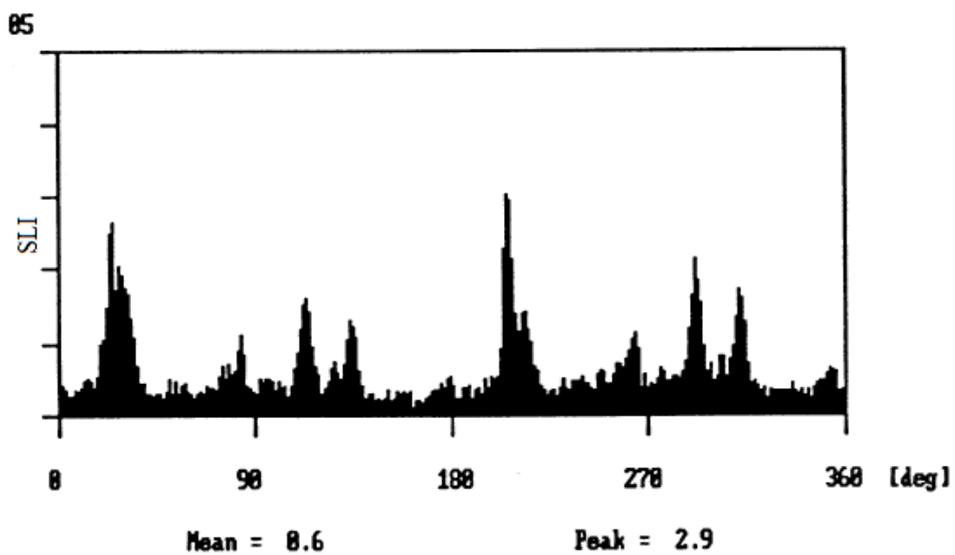


Figure. 15 : Diagramme de SLI pour un pare brise avec des rayures de différentes tailles est réparties aléatoirement [Derk 91b].

Références

[Alle 69] M. Allen. Automobile windscreen – Surface deterioration. American Journal of Optometry and Archives of American Academy of Optometry, **46**, (1969), pp 594-598.

[Alle 74] M. Allen. Windscreen dirt and surface damage effects. Australian Road Research, **6**, (1974), pp 7-19.

[Bert 09] E. Bertilsson and E. Svensson. Veiling glare in car windshields. Master's Thesis, Lulea University of Technology, (2009), pp 14.

[Derk 91a] H. Derkum. Effects of stray light on perception. Sprechsaal, **124**, (1991), pp 679-685.

[Derk 91b] H. Derkum. Stray light in windshields – measurement and effect. Paper presented at the vision in vehicles, (1991).

[Helm 88] G. Helmers and S. Lundkvist. Detection distances to obstacles on the road seen through windscreens in different states of wear. Rapport 339A, Linköping : Swedish Road and Traffic Research Institute, (1988).

[Holt 94] K. Holtmann, G. Frischat and K. Ruppert. Mechanism of defect creation on sheet glass by particle impact and its influence on stray light. Paper presented at the 68th Annual Meeting of the German Society of Glass Technology (DGG), Bad Salzdetfurth, Germany, (1994).

[Jabb 99] L. Jabbour. Windscreen standard hits the bullseye. The Australian Standard, **20**, (1999). pp 33.

[Kess 91] F. Kessler. Light diffusion characteristic and interferences in automobile windscreen. Paper presented at the Vision in Vehicles, IV, University of Leiden, The Netherlands, (1991), pp 27-29.

[Lund 93] S. Lundkvist and G. Helmers. Visibility distance to obstacles for drivers with a worn windscreen and / or impaired visual acuity. VTI Rapport 382, Linköping : Swedish Road and Traffic Research Institute, (1993).

[Meff 03] M. L. Mefford, M. J. Flannagan and G. Adachi. Daytime veiling luminance from windshields: effects of scattering and reflection. Rapport N°36, UMTRI, (2003).

[Owen 92] D. Owens, M. Sivak, G. Helmers, T. Sato, D. Battle and E. Traube. Effects of light transmittance and scatter by windshields on visual performance. Rapport N°37, UMTRI, (1992).

[Phil 65] Phillips and Rutstein. Glare - A study into glare recovery time with night driving spectacles. The British Journal of Physiological Optics, **22**, (1965), pp 7-19

[Pron 06] N. Pronk, B. Fildes, M. Regan, M. Lenné, N. Truedsson and T. Olsson. Windscreens and safety. A Review, Monash University, **183**, (2006), pp 04-07.

[Romp 84] K. Rompe and G. Engel. The influence of scattered light in windshields on driver's vision during night driving. SAE Technical paper series 840385, Cologne. (1984)

[Schu 97] J. Schumann, M. Flannagan, M. Sivak and E. Traube. Daytime veiling glare and driver visual performance: influence of windshield rake angle and dashboard reflectance. Journal of Safety Research, **28**, (1997), pp133-146.

[Timm 85a] A. Timmermann. An instrument to measure scattered light due to windshield wear. Paper presented at the Proceedings of the 10th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles. **46**, (1985), pp 594-598.

[Timm 85b] 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), pp 9-13.

Chapitre 3 : La diffusion de la lumière

3.1. Introduction

Les phénomènes de diffusion sont liés à l'interaction de la lumière avec une répartition aléatoire de surface engendrant des modifications dans la direction de propagation d'une partie du faisceau lumineux. La figure 1 illustre les phénomènes de diffusion induits par la poussière ambiante sur la propagation d'un faisceau laser. En l'absence de particules diffusantes dans l'atmosphère, le faisceau collimaté est constitué de rayons lumineux parallèles et aucune lumière n'est visible à travers une section latérale du faisceau. En revanche, la présence des particules diffusantes engendre la déviation d'une partie de la lumière qui devient dès lors visible sur la section latérale du faisceau.

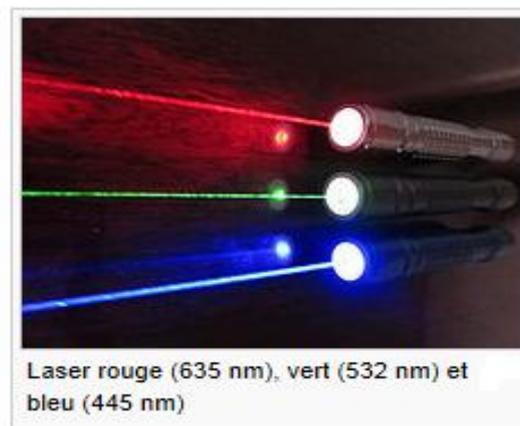


Figure. 1 : Phénomène de diffusion[Brun 05]

Le premier qui a étudié la diffusion est Rayleigh 1871, il a considéré le cas où la taille des particules est très petite devant la longueur d'onde de la lumière. Il a démontré que l'intensité de la lumière diffusée est inversement proportionnelle à la puissance quatre de la longueur d'onde. Cette relation a été utilisée pour expliquer la couleur bleue du ciel et le rouge du soleil au coucher. Plus tard, vers 1908, sous les mêmes conditions, Mie a développé une solution mathématique de la diffusion de la lumière par une sphère avec un rayon et indice de réfraction aléatoire. Dans le cas des particules plus larges que la longueur d'onde, la forme est aussi un facteur qui affecte le résultat du phénomène de diffusion. Vu la complexité de ce dernier dans ce cas, les calculs de Mie n'ont pas donné des solutions exactes à plusieurs situations pratiques. Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'étude de la diffusion de la lumière par des structures aléatoires des surfaces planes. On commence par des rappels sur l'état de

surface et les paramètres géométriques qui la caractérisent et on termine par les différents modèles théoriques qui expliquent le phénomène de diffusion.

3.2. Etat de surface

Rien n'est plus riche en information qu'une surface. Pour cela, l'étude de son état est très importante pour comprendre son comportement vis-à-vis de la propagation d'une onde électromagnétique. En général, la différence du comportement d'une surface polie (de dimensions suffisamment larges) et celle rugueuse, est le fait que la surface polie reflète la lumière incidente spéculairement or la surface rugueuse la diffuse dans différentes directions. Une surface peut être rugueuse pour certaines longueurs d'ondes et lisse pour d'autres. Elle est considéré aussi comme lisse ou rugueuse selon différents angles d'incidences [Beck 63]. Pour définir la nature d'une surface (lisse ou rugueuse), Rayleigh a suggéré un critère qui implique ces deux paramètres.

3.2.1. Critère de RAYLEIGH

Pour différencier la surface rugueuse de celle lisse, Rayleigh considère deux rayons lumineux 1 et 2 de longueur d'onde λ , incidents sous à un angle rasante γ sur une surface, présentant des irrégularités d'hauteur h (figure. 2). La différence de chemin optique, Δr , entre les deux rayons est donnée par la relation suivante :

$$\Delta r = 2h \sin \gamma \quad (1)$$

On déduit que la différence de phase, $\Delta\varphi$, est donnée par:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r = \frac{4\pi h}{\lambda} \sin \gamma \quad (2)$$

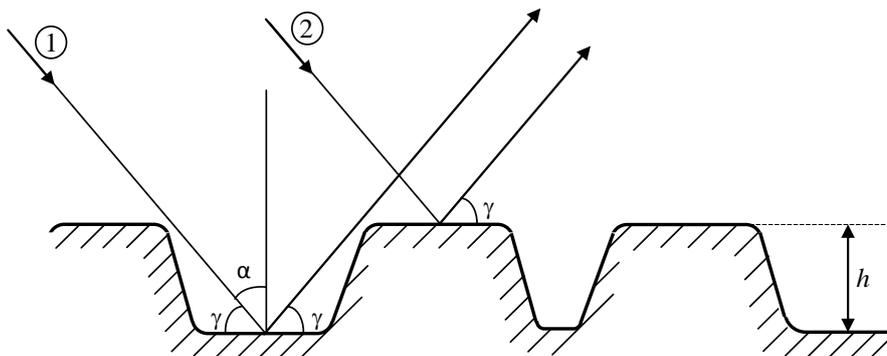


Figure. 2 : Schéma de principe du critère de Rayleigh

Si $\Delta\varphi = 0$, les deux rayons sont en phase, la surface réfléchit la lumière spéculairement comme c'est le cas d'une surface parfaitement lisse. Dans le cas où $\Delta\varphi = \pi$, les deux rayons sont en opposition de phase, la surface diffuse la lumière et donc elle est considérée rugueuse. En effet, on peut établir une valeur de différence de phase entre ces deux valeurs extrêmes pour limiter la bande « rugueuse » de celle « lisse ». Dans le cas particulier $\Delta\varphi = \pi/2$ on obtient ainsi par substitution de cette valeur dans l'équation(2) la relation habituellement connue comme « Critère de Rayleigh ». Par conséquent, une surface est considérée lisse pour :

$$h < \frac{\lambda}{8 \sin \gamma} \quad (3)$$

En d'autres termes une surface tend d'être effectivement lisse seulement si les deux conditions suivantes sont remplies :

$$\frac{h}{\lambda} \rightarrow 0 \quad \text{ou} \quad \gamma \rightarrow 0 \quad (4)$$

Pour d'autres valeurs de $\Delta\varphi$, à savoir $\pi/4$ et $\pi/8$ le facteur 8 dans (3) est remplacé par 16 ou 32.

Il est très clair que l'approche du Critère de Rayleigh est très simple et elle est basée tout simplement sur trois paramètres mesurables (h, γ, λ).

Si la surface est caractérisée par le paramètre statistique σ (la rugosité quadratique moyenne *rms* (root mean square)), le critère de Rayleigh qui définit la surface lisse prend la forme suivante [Beck 63]:

$$\frac{\sigma \cos\alpha}{\lambda} \rightarrow 0 \quad (5)$$

avec :

$$\alpha = (\pi/2) - \gamma$$

σ est la rugosité quadratique moyenne *rms* (root mean square) qui est équivalent à h

3.2.2. Paramètres caractéristiques d'une surface

3.2.3. Profil de surface

En général, les profils de surface se divisent en deux types : déterministe et aléatoire [Stov 95]. Les profils déterministes sont décrits par une expression mathématique (telle qu'une surface sinusoïdale). Dans ce type, les opérations mathématiques nécessaires sont plus faciles à manipuler. Malheureusement, à un certain niveau d'échelle (échelle nanométrique) toutes

les surfaces perdent leur nature déterministe. Les écarts de surface par rapport à la forme déterministe idéale définie la rugosité (figure. 3).

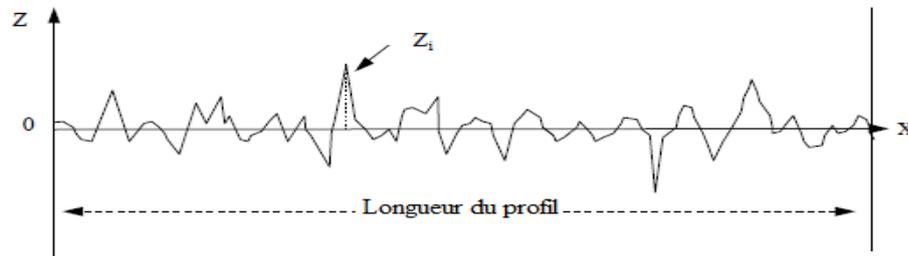


Figure. 3 : Représentation schématique d'une surface rugueuse (profil d'une surface).

A. Profil déterministe

Les paramètres de rugosité les plus couramment utilisés sont les plus facilement introduits en fonction d'une seule dimension de surface (ou profil) $z(x)$. la valeur moyenne de $z(x)$ sur la longueur d'évaluation L est notée \bar{z} et définie comme suit :

$$\bar{z} = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} z(x) dx \quad (6)$$

Si $z(x) = \bar{z}$ donc la surface est considérée parfaitement lisse.

A.1. Rugosité arithmétique moyenne

La rugosité arithmétique moyenne est définie en termes des écarts $|z(x)|$ de profil de la surface par rapport à la valeur moyenne \bar{z} , mesuré sur la longueur d'évaluation L . La rugosité arithmétique moyenne σ_a (parfois R_a) est exprimée sous la forme suivante [**Roth 99**]:

$$\sigma_a = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} |z(x) - \bar{z}| dx \quad (7)$$

Cette définition de la rugosité est devenue une norme dans l'industrie de la machine-outil, car elle est obtenue à partir des mesures par des instruments à stylet. Dagnall [**Dagn 80**] a souligné que σ_a est plus facile à obtenir à partir d'un profil que la rugosité quadratique moyenne *rms* (root mean square) par des techniques graphiques.

A.2. Rugosité quadratique moyenne

La rugosité quadratique moyenne *rms* (root mean square), σ , notée parfois R_q , est le plus important paramètre statistique de surface. Dans la caractérisation optique de l'état de surface, elle est obtenue directement par la mesure de la lumière diffusée. Ceci a été lancé vers 1954, par Davies, il a exploité la relation entre σ et la totalité de la lumière diffusée (TIS). La rugosité σ est également aussi définie en termes d'écart de hauteur de surface à partir de la valeur moyenne \bar{z} , elle est donnée par [Roth 99]:

$$\sigma = \left(\lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} (z(x) - \bar{z})^2 dx \right)^{1/2} \quad (8)$$

σ peut être calculée directement à partir de la fonction de densité spectrale de puissance.

Remarque :

Pour mieux caractériser la rugosité de surface, il est préférable d'ajouter le paramètre statistique (pente de surface, m) en parallèle avec les deux paramètres précédemment cités. On note que le comportement des deux profils de surfaces différentes (a) et (b) et qui présentent la même valeur de la rugosité (σ_a ou σ) est différent. La surface (b) apparaît la plus lisse que la surface (a) (figure 4).

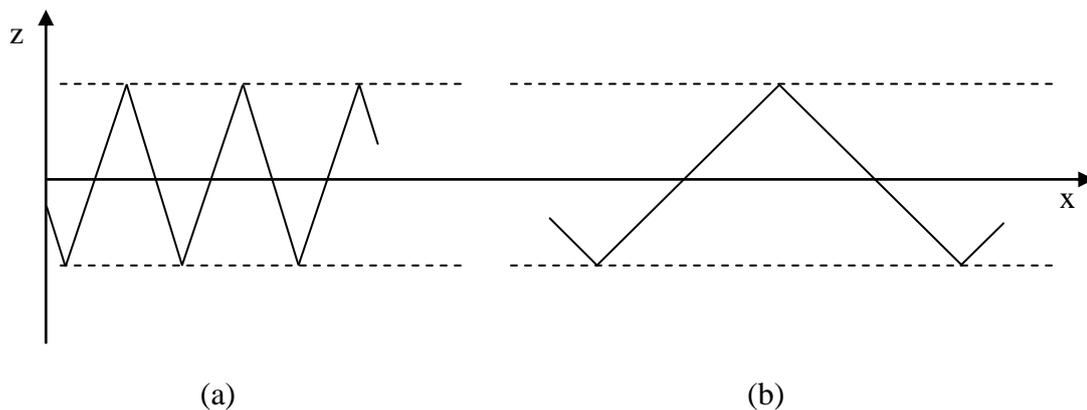


Figure. 4 : Profils de deux surfaces différentes.

A.3. Pente de surface

La pente de surface est définie comme étant la tangente à la surface en tout point de la surface (figure 5).

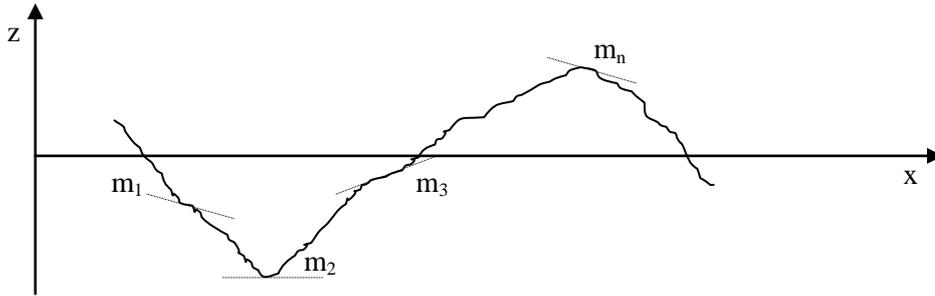


Figure. 5 : Pente quadratique moyenne d'un profil de surface [Raph 05]

Elle est exprimée sous la forme suivante [Stov 95]:

- Pour la moyenne arithmétique :

$$m_a = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_0^L \left| \frac{dz}{dx} - \bar{\dot{z}} \right| dx \quad (9)$$

- Pour la moyenne quadratique :

$$m = \left[\lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_0^L \left(\frac{dz}{dx} - \bar{\dot{z}} \right)^2 dx \right]^{1/2} \quad (10)$$

avec :

$$\bar{\dot{z}} = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_0^L \frac{dz}{dx} dx \quad (11)$$

L'écart quadratique moyen de surface, σ , et la pente, m , peuvent être combinés pour former un autre paramètre de surface dite, longueur transversale de la surface ou la longueur d'onde moyenne de surface « l ». Pour une surface sinusoïdale, elle est égale à :

$$l = 2\pi\sigma/m \quad (12)$$

B. Profil aléatoire

B.1. Fonction de distribution des hauteurs d'une surface

Pour les profils aléatoires, le profil $z(x)$ est remplacé par une fonction de distribution des hauteurs $p(z)$. La fonction de distribution la plus utilisée, est de forme gaussienne. Elle est donnée en termes de σ par [Stov 95]:

$$p(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2\sigma^2} \quad (13)$$

La valeur moyenne de z est donnée par la relation suivante :

$$\bar{z} = \int_{-\infty}^{\infty} z p(z) dz = 0 \quad (14)$$

Puisque $p(z)$ est pair, la moyenne d'une distribution gaussienne de la hauteur est égale à zéro. D'une manière similaire, la moyenne arithmétique et la rugosité quadratique moyenne peuvent être évaluées [Stov 95].

$$\sigma_a = \int_{-\infty}^{\infty} |z| p(z) dz \quad (15)$$

$$\sigma = \left[\int_{-\infty}^{\infty} z^2 p(z) dz \right]^{1/2} \quad (16)$$

On remarque que les trois dernières équations sont similaires à celles qui définissent les surfaces à profils déterministes.

B.2. Fonction de densité spectrale de puissance PSD

La fonction de densité spectrale de puissance PSD (Power Spectral Density) est définie comme étant le carré de la transformée de Fourier du profil d'origine, ou la transformée de Fourier de sa fonction d'autocorrélation [Toll 04].

Pour trouver la PSD, on doit exprimer $z(x)$ en termes de sa fréquence spatiale $f_x (Z(f_x))$. Ceci est alors obtenu par le passage de la transformée de Fourier de $z(x)$. Dans le cas des mesures pratiques $z(x)$ est définie sur une distance finie, L , et considérée égale à zéro ailleurs. D'où l'expression du PSD est évalué à partir de la transformée de Fourier du profil de la surface comme suit [Stov 95] :

$$PSD = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} |Z(f_x, L)|^2 \quad (17)$$

B.3. Fonction d'autocorrélation

La fonction d'autocorrélation est utilisée pour décrire le lien statistique existant entre les points $z(x)$. Elle est la moyenne du produit de deux copies du même profil de la surface où l'un est décalé par rapport à l'autre. Essentiellement, elle représente la moyenne de la

convolution d'une fonction avec elle-même. La quantité τ est le décalage latérale entre deux profils et parfois appelé glissement ou retard.

L'expression mathématique de la fonction d'autocorrélation est la suivante [Marx 90]:

$$C(\tau) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} z(x)z(x + \tau)dx \quad (18)$$

Pour un décalage nul la valeur de la fonction d'autocorrélation est maximale et elle est d'une importance fondamentale car elle est égale au carré de la rugosité quadratique moyenne du profil de surface $C(0) = \sigma^2$. La longueur d'autocorrélation l_c est la longueur du retard pour laquelle la fonction d'autocorrélation chute de 1/e de sa valeur maximale $C(0)$. Elle correspond approximativement à la taille moyenne des aspérités de la surface.

3.3. La diffusion de la lumière par des surfaces rugueuses

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction, le phénomène de diffusion peut être produit lors de l'interaction de la lumière avec une répartition aléatoire. Lorsqu'on envoie une onde lumineuse sur une surface parfaitement lisse et réfléchissante, on observe uniquement le rayon réfléchi spéculairement, conformément aux lois de l'optique géométrique. Plus une surface est rugueuse, et plus on observe de la lumière diffusée dans des directions autres que celles de la réflexion spéculaire : c'est la diffusion de la lumière. Les outils d'analyses théoriques des phénomènes de diffusion sont variables en fonction de la dimension de la taille des diffuseurs en comparaison de la longueur d'onde de la lumière utilisée. La figure 6 synthétise de manière schématique les différents régimes de la diffusion selon ce critère [Brun 05].

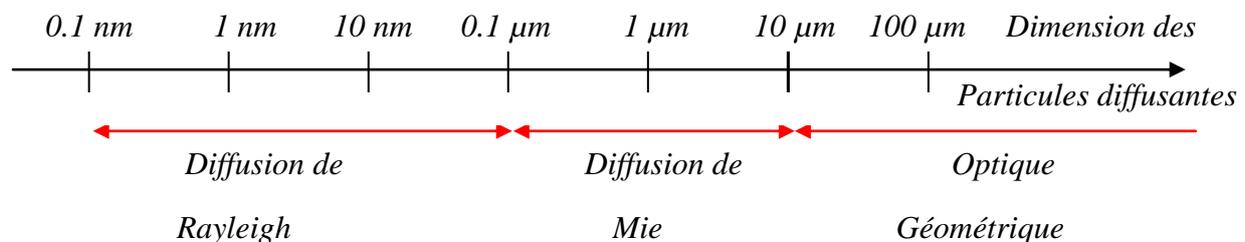


Figure. 6 : Classement des différents régimes de diffusion relatif aux grandeurs des ondes du spectre visible [Brun 05].

Si la taille des structures diffusantes est de grande dimension en regard de la longueur d'onde, la propagation de la lumière obéit aux lois conventionnelles de l'optique géométrique et il est alors possible de travailler sur la notion de rayons lumineux déviés par les lois de la réfraction. Lorsque la taille des particules diffusantes est comparable à la longueur d'onde, il est nécessaire de faire appel au formalisme de la diffraction pour interpréter les phénomènes de déviation de la lumière, c'est le régime de la diffusion de Mie. Enfin lorsque la dimension des diffuseurs est de taille très inférieure à la longueur d'onde, il convient d'adopter une analyse particulière pour interpréter la diffusion dans le régime de Rayleigh.

Dans les années récentes, la diffusion de la lumière a été largement exploitée pour la caractérisation de la rugosité superficielle et elle fait l'objet de plusieurs études théoriques et expérimentales [Marx 90] [Vorb 93] [Toll 04].

Pour calculer la rugosité, la diffusion doit être produite par les irrégularités de surface et non par la poussière. Il est donc nécessaire avant toute mesure de la diffusion, que la surface soit exempte de toute forme de particules. Généralement, la présence de la poussière sur la surface à analyser provoque une augmentation de l'intensité de la lumière diffusée (figure. 7).

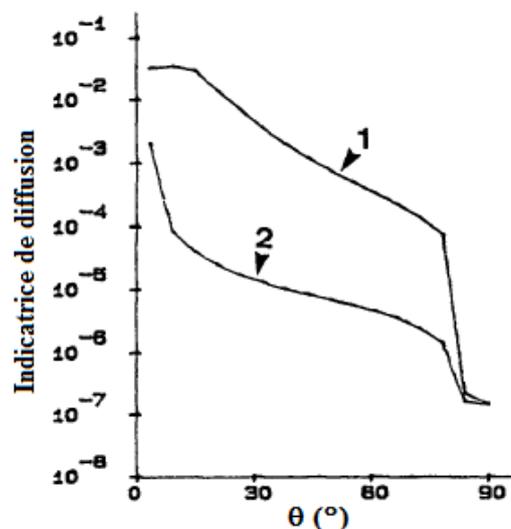


Figure. 7 : Effet du nettoyage sur la répartition spatiale de l'énergie (indicateur de diffusion):
(1) avant, (2) après [Amra].

Pour caractériser l'état de surface à partir des mesures de diffusion, il faut disposer d'un modèle théorique adéquat. Il s'agit de deux modèles (scalaire et vectoriel).

3.3.1. Modèle scalaire

Le modèle scalaire comporte deux régimes essentiels : régime spéculaire et régime de mesure de la pente.

3.3.1.1. Régime spéculaire

Ce modèle est largement utilisé et bien adapté dans la mesure de la rugosité quadratique moyenne des microirrégularités des surfaces à partir de la mesure de la totalité de la lumière diffusée. La normalisation de la lumière diffusée par rapport à la lumière réfléchi spéculairement, définit un rapport qui s'appelle TIS (Total Integrated Scatter). Si la rugosité de surface est faible en comparaison avec la longueur d'onde utilisée, et la fonction de distribution des hauteurs de surface est supposée gaussienne, le rapport de la lumière réfléchi spéculairement sur la totalité de la lumière diffusée à l'intérieur d'un hémisphère peut être décrit par une simple théorie scalaire qui est basée sur l'intégrale de diffraction de Kirchhoff. La relation qui gouverne ceci est [Elso 79a] :

$$P_{spec}/P_{tot} = \exp[-(4\pi\sigma\cos\alpha/\lambda)^2] \quad (19)$$

et

$$P_{tot} = P_{spec} + P_{diff} \quad (20)$$

avec :

P_{spec} : Le flux lumineux réfléchi spéculairement.

P_{diff} : Le flux lumineux total diffusé hors de la direction spéculaire.

Pour une surface très lisse, P_{spec} est approximativement égale à P_{tot} , et sa valeur n'est pas sensible au changement de la rugosité. Donc, il est préférable de mesurer P_{diff} qui est proportionnelle à la rugosité quadratique moyenne rms. Sachant que TIS est proportionnelle à P_{diff} , il convient que [Vorb 93][Benn 61]:

$$TIS = P_{diff}/P_{tot} \approx (4\pi\sigma\cos\alpha/\lambda)^2 \quad (21)$$

Cette approche est à la base de mesure de la rugosité des surfaces optiques dans la société Américaine pour le contrôle et la normalisation des matériaux. Il est clair, de l'équation (22), que la mesure précise du P_{spec} permet d'estimer la valeur de σ . En d'autres termes, l'obtention de σ est conditionnée par la possibilité de distinguer le faisceau spéculaire de celui diffusé. En effet, la limite estimée pour la validité de l'application de cette équation, est supposée que le rapport $\sigma/\lambda \approx 0.3$ [Vorb 93].

Lorsque l'équation (20) est appliquée et pour des mesures réalisées sous un angle d'incidence oblique égale à 54° , cette limite correspond à :

$$P_{spec} = 0.007 P_{tot} \quad (22)$$

De plus, il a été rapporté toujours par ces auteurs que l'intervalle de la quantité mesurable σ / λ peut être élargie si l'angle d'incidence augmente (tend vers une inclinaison rasante de la surface).

3.3.1.2. Régime de mesure de la pente

Lorsque la surface devient assez rugueuse, et que le faisceau spéculaire est assez faible pour qu'il soit mesurable et distingué du faisceau total diffusé, la méthode TIS se trouve dans son intervalle d'invalidité. La caractérisation de surface prend un autre chemin différent du régime spéculaire précédent TIS : c'est le régime de mesure des pentes de hauteurs de surface. Il a été suggéré que pour une rugosité $\sigma = 0.078 \mu\text{m}$ et $\sigma = 0.2 \mu\text{m}$, la fonction de distribution angulaire de la diffusion présente un pic spéculaire d'où la possibilité de mesure de σ par la méthode TIS, alors que pour la rugosité $\sigma = 0.32 \mu\text{m}$ la fonction de distribution angulaire de la diffusion est largement étalée de voir le pic spéculaire (figure. 8).

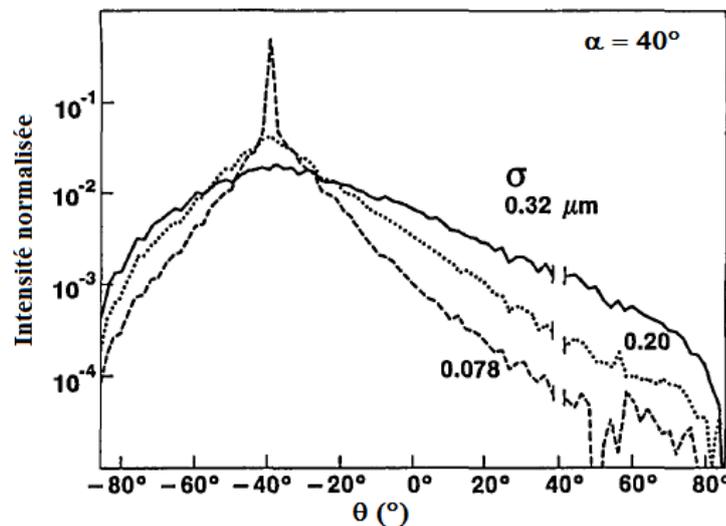


Figure. 8 : La distribution angulaire de la lumière diffusée normalisée pour trois échantillons en acier inoxydable avec différents états de surface ($\sigma = 0.078$, 0.20 , et 0.32 respectivement) [Vorb 93].

Dans ce cas, la largeur de ces distributions est un indicateur sur une caractéristique primaire qui est la pente de surface. Cette dernière est définie essentiellement par le rapport de la rugosité σ à la longueur d'autocorrélation l_c [Vorb 93].

Rakels [Rake 89] a montré que dans les conditions pour lequel le formalisme de Kirchhoff est valide, la largeur quadratique moyen ω de la distribution de la lumière diffusée dans le plan de Fourier est proportionnelle à la pente quadratique moyenne de la surface m :

$$\omega/f = 2m \quad (23)$$

avec :

f : distance focale de la lentille de Fourier.

La validité de cette équation a été testée expérimentalement par Rakels et al [Rake 89], et Cao et al [Cao 91].

Malheureusement, la théorie scalaire de la diffusion a moins réussi par rapport à la prédite correcte la diffusion angulaire. Ceci est relié au choix correct de la forme de la fonction d'autocorrélation. Dans ce contexte, Bennett [Benn 76] a rapporté que dans la plus part des cas, les mesures expérimentales indiquent que la fonction des surfaces réelles n'a pas la forme gaussienne.

De plus, avec la théorie scalaire de la diffusion, on obtient un seul paramètre représentatif de la rugosité de surface (la hauteur quadratique moyenne σ). Par conséquent, le profil de surface est mal caractérisé (peu d'information sur l'état de surface). En effet, la diffusion angulaire ne dépend pas seulement des hauteurs des aspérités de surface mais aussi de la longueur de corrélation l_c , et donc de la forme qui doit être supposée pour la fonction d'autocorrélation.

3.3.1.3. Instrumentation TIS

L'instrumentation pour la mesure de TIS se compose d'une source lumineuse, le plus souvent un laser He-Ne, des filtres pour réduire l'intensité de la lumière d'une manière contrôlée, un filtre spatial pour contrôler la taille du faisceau, un dispositif pour collecter la lumière diffusée et des détecteurs pour mesurer la lumière diffusée et la lumière réfléchie spéculairement. Un équipement électronique et informatique approprié pour mesurer le signal du détecteur, calculer l'intensité de la lumière diffusée et déterminer la rugosité de la surface.

La lumière diffusée peut être collectée en utilisant une sphère d'intégration ou un miroir hémisphérique (parfois appelée sphère de Coblenz) [Stov 95].

Une sphère d'intégration est une sphère percée d'un trou pour laisser la lumière entrer, un autre trou opposé où l'échantillon est monté ainsi qu'un troisième trou pour positionner le détecteur de mesure du flux diffusé (figure. 9).

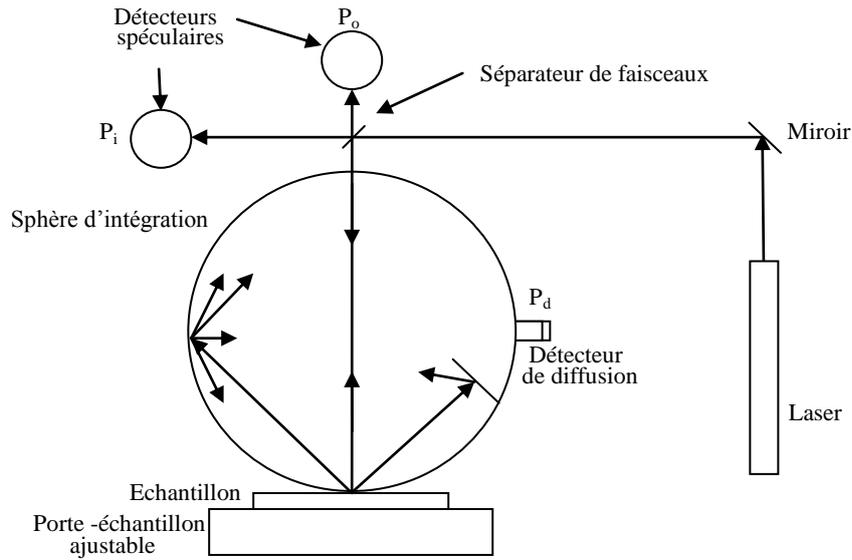


Figure. 9 : Principe de la sphère d'intégration [Stov 95]

Une alternative à la sphère d'intégration est la sphère de Coblentz cité ci-dessous. Le miroir hémisphérique est orienté de telle sorte que son centre soit à mi chemin entre la tache illuminé sur l'échantillon et le détecteur de faible dimension (figure. 10).

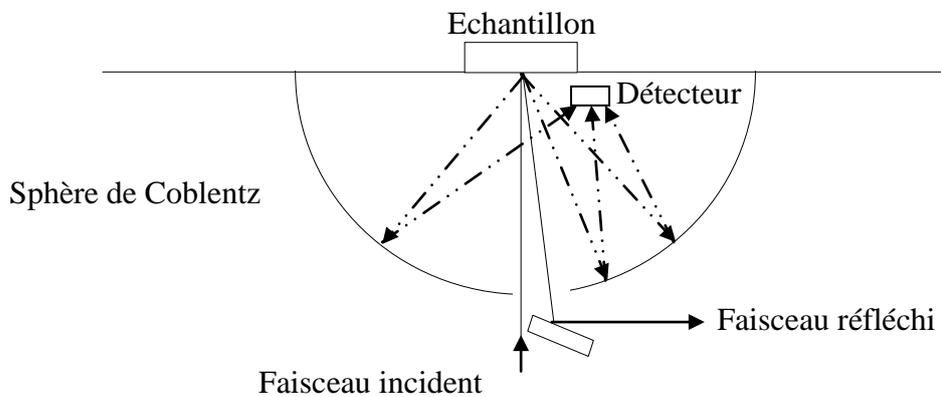


Figure. 10 : Principe de la sphère de Coblentz [Stov 95]

3.3.2. Modèle vectoriel

Le modèle vectoriel est basé sur la théorie vectorielle de la répartition angulaire de la lumière (ARS : Angle Resolved Scattering). Cette dernière permet de déterminer par une approximation du premier ordre la hauteur quadratique moyenne σ de la rugosité tant que les hauteurs des aspérités restent faibles devant la longueur d'onde incidente ($\sigma \ll \lambda$). Lorsqu'on

envoie une onde lumineuse sur une surface rugueuse, la distribution de la lumière diffusée peut être décrite par les théories de l'optique physique [Bass 79].

Pour une surface parfaitement conductrice et qui présente des irrégularités de surface avec des rayons de courbure assez large en comparaison avec la longueur d'onde (faible pente), la solution générale de l'intégral de Kirchhoff est particulièrement utilisée [Beck 63]. La figure 11 illustre les différentes notations pour les formules de l'ARS pour le cas où la surface est supposée lisse dans la direction de y.

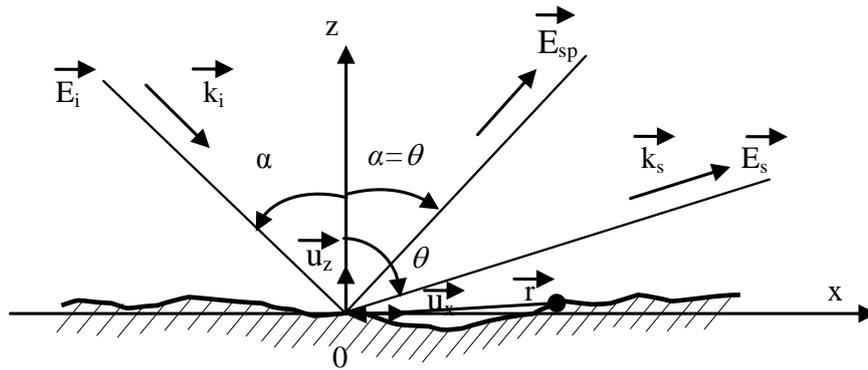


Figure. 11 : Notation de base de l'ARS

avec :

\vec{E}_i : Vecteur champ électrique incident

\vec{E}_s : Vecteur champ électrique diffusé.

\vec{k}_i : Vecteur d'onde de la lumière incidente.

\vec{k}_s : Vecteur d'onde de la lumière diffusée.

α : Angle d'incidence.

θ : Angle de diffusion.

\vec{r} : Vecteur de position du point considéré du $z(x)$.

L'expression du coefficient de diffusion (ou l'ARS) est exprimé par [Marx 90]:

$$\rho = \frac{E_s}{E_{sp}} = \frac{F(\alpha, \theta)}{2L} \int_{-L}^L e^{j\vec{v} \cdot \vec{r}} dx \quad (24)$$

avec :

$F(\alpha, \theta) \sec\alpha \frac{1 + \cos(\alpha + \theta)}{\cos\alpha + \cos\theta}$: Fonction trigonométrique de α et θ

$$\sec\alpha = 1/\cos\alpha$$

E_{sp} : champ diffusé dans la direction spéculaire ($\alpha = \theta$).

$$\vec{V} = \vec{k}_i - \vec{k}_s = -k[(\sin\theta - \sin\alpha)\vec{u}_x + (\cos\alpha + \cos\theta)\vec{u}_z] \text{ et } k = 2\pi/\lambda$$

$$\vec{r} = x\vec{u}_x + z(x)\vec{u}_z \quad \text{où } \vec{u}_x \text{ et } \vec{u}_z \text{ sont des vecteurs unitaires.}$$

On note que toutes les informations sur la rugosité de surface sont contenues dans la phase $\vec{V} \cdot \vec{r}$

De même le modèle vectoriel comporte deux régimes essentiels : régime de la limite de la surface lisse et régime proche de la surface lisse.

3.3.2.1. Régime de la limite de la surface lisse

Si la surface est très lisse en comparaison avec la longueur d'onde optique λ , ($z(x) \ll \lambda$), l'expression de $\exp(j\vec{V} \cdot \vec{r})$ sera [Vorb 93]:

$$\exp(j\vec{V} \cdot \vec{r}) = \exp(jV_x x) \exp[jV_z z(x)] \approx \exp(jV_x x) [1 + jV_z z(x)] \quad (25)$$

En outre, si on suppose aussi que l'incidence est normale à la surface, l'intensité de la distribution de la lumière diffusée (faisceau spéculaire exclu) sera réduite à [Chur 79] :

$$I(\theta) = \frac{F(\alpha, \theta)}{\lambda^4} \left| \int_0^L \exp(jV_x x) z(x) dx \right|^2 \quad (26)$$

Le terme à droite de l'équation (26) est étroitement relié à la *PSD* de la rugosité de surface qui est estimé par :

$$PSD(f_x) = \frac{1}{L} \left| \int_0^L \exp(-j2\pi f_x x) z(x) dx \right|^2 \quad (27)$$

Donc, la distribution de l'intensité de la lumière diffusée sera :

$$I(\theta) = \frac{F_1(\alpha, \theta)}{\lambda^4} PSD(f_x) \quad (28)$$

avec : $F_1(\alpha, \theta)$ est relié à $F(\alpha, \theta)$.

Si on prend l'exemple où le profil de la rugosité de surface est une fonction sinus dont l'expression est la suivante :

$$z(x) = A \sin\left(\frac{2\pi x}{f'}\right) \quad (29)$$

avec :

A : Amplitude.

f' : Longueur d'onde spatiale.

L'insertion de cette dernière expression dans l'équation 26 donne la distribution angulaire sous forme d'une série de pics discrète (figure. 12).

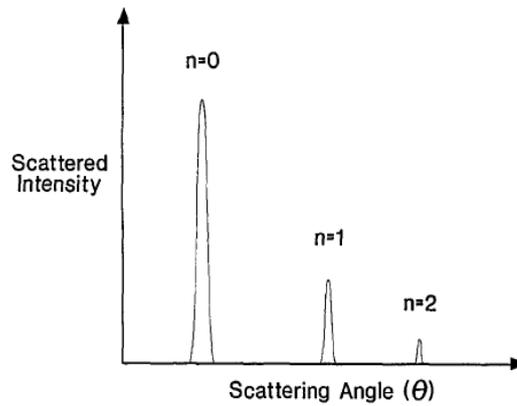


Figure. 12 : Portion de la distribution de la lumière diffusée d'une surface sinusoïdale avec $A < \lambda$ [Vorb 93].

La position de ces pics est donnée par l'équation de réseau :

$$\sin\alpha + \sin\theta = \pm \frac{n\lambda}{f'} \quad (30)$$

Selon Stover [Stov 75], l'intégrale relative du flux, liée à ces deux petits premiers pics, est approximativement donnée par l'expression suivante :

$$P_n \approx [J_n(2kA)/J_0(2kA)]^2 \approx P_0 [(kA)^n/n!]^2 \quad (31)$$

avec :

J_n : fonction de Bessel de premier genre.

P_0 : flux dans la direction spéculaire.

L'amplitude A représente en d'autres termes la hauteur des aspérités de surface. Dans la limite de ce régime ($A \ll \lambda$), seulement les pics (zéro et un) qui sont mesurables. Par conséquent, si l'amplitude A augmente le second pic devient significatif dans la distribution

angulaire mais qui n'est pas contenu dans la PSD du profil de surface. De ce fait, la limite de validité de cette approche nécessite que le second pic soit 5% du premier pic, ce qui implique que ($A \leq 0.07 \lambda$) d'où ($\sigma \leq 0.05 \lambda$).

3.3.2.2. Régime proche de la surface lisse

Si la surface est assez rugueuse par rapport à la limite du régime précédent, la distribution angulaire ne peut être directement utilisée pour obtenir la PSD. Cependant, Chandley [Chan 76] a rapporté que la distribution angulaire peut être transformée mathématiquement pour donner la fonction d'autocorrélation de la surface, qui est proportionnelle à la transformée de Fourier de la PSD. En effet, dans ce cas la relation qui permet de relier la rugosité d'une surface au flux qu'elle diffuse est [Zerr 98] :

$$\frac{dP_{ii}}{P_i d\Omega} = \frac{1}{4} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \frac{1}{\cos\alpha} |w_{ii}|^2 |s(\Delta\vec{k})|^2 \quad (32)$$

avec :

$\frac{dP_{ii}}{d\Omega}$: est le flux lumineux diffusé par unité d'angle solide.

P_i : est le flux incident

$|s(\Delta\vec{k})|^2$: Facteur caractérise la surface, représente la densité spectrale de puissance PSD (appelée également spectre de rugosité), exprimée dans l'espace réciproque, représente la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation des aspérités de surface [Elso 79b].

w_{ii} : Facteur optique, dépend de la permittivité diélectrique du matériau traité « ϵ », de la polarisation des rayonnements incident et diffusé et des angles d'incidence « α » et de diffusion « θ » a pour expression :

- En polarisation S ($\vec{E}_{i(s)} \perp (\vec{k}_i, (zz'))$) voir figure.13:

$$w_{ss} = \frac{4(\epsilon - 1)\cos\theta\cos\alpha}{(\cos\alpha + \sqrt{\epsilon - \sin^2\alpha})(\cos\theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta})}$$

- En polarisation P ($\vec{E}_{i(p)} \parallel (\vec{k}_i, (zz'))$) voir figure.13 :

$$w_{pp} = \frac{4(\epsilon - 1)\cos\theta\cos\alpha(\epsilon \sin\alpha\sin\theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2\alpha}\sqrt{\epsilon - \sin^2\theta})}{(\epsilon \cos\alpha + \sqrt{\epsilon - \sin^2\alpha})(\epsilon \cos\theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta})}$$

- Pour une lumière incidente non polarisée [Elso 79b]:

$$w_{ii} = \frac{1}{2}(w_{pp} + w_{ss})$$

$\Delta\vec{k} = \vec{k}_i - \vec{k}_s$: représente la différence entre les projections sur la surface, des vecteurs d'onde des rayonnements incident sous α et diffusé dans la direction θ .

A partir de l'enregistrement de la répartition angulaire de la lumière diffusée, et en utilisant la relation (33), on peut obtenir $|s(\Delta\vec{k})|^2$:

$$|s(\Delta\vec{k})|^2 = \frac{dP_{ii}}{P_i d\Omega} 4 \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^4 \frac{\cos\alpha}{|w_{ii}|^2} \quad (33)$$

Pour passer de $|s(\Delta\vec{k})|^2$ à sa transformée de Fourier inverse $C(x,y)$ (fonction d'autocorrélation), la plupart des auteurs modélisent cette dernière : soit par une fonction gaussienne, soit par une fonction exponentielle. D'autres auteurs utilisent une somme de deux gaussiennes, une somme de deux exponentielles ou même une combinaison des deux modèles[Zerr 98].

Si on admet que $C(x,y)$ est gaussienne, et qu'elle s'écrit sous la forme suivante :

$$C(x,y) = l_c^2 \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{\sigma^2}\right] \quad (34)$$

$|s(\Delta\vec{k})|^2$ s'écrit alors :

$$|s(\Delta\vec{k})|^2 = \frac{l_c^2 \sigma^2}{4\pi} \exp\left[-\frac{\sigma^2 \Delta k^2}{4}\right] \quad (35)$$

On prend le logarithme naturel de l'expression numérique correspondant à la relation (35) :

$$\ln|s(\Delta\vec{k})|^2 = -a\Delta k^2 + b \quad (36)$$

où

$$a = \frac{\sigma^2}{4} \quad \text{et} \quad b = \ln\left(\frac{l_c^2 \sigma^2}{4\pi}\right)$$

En général, la fonction d'autocorrélation n'est très bien approchée par une gaussienne que dans la région proche de l'origine, qui contient toutes les informations concernant l_c et σ . Il s'ensuit que seul la partie de sa transformée de Fourier éloignée de l'origine est gaussienne.

3.3.2.3. Instrumentation ARS

En contrepartie d'un formalisme théorique relativement complexe, la partie expérimentale est simple. Le principe de mesure de la diffusion est illustré par la figure 13 où sont représentés quelques paramètres (ou grandeurs) intervenant dans la théorie. Cette technique de mesure est basée sur la théorie vectorielle de la diffusion ARS. Les éléments essentiels de l'instrumentation ARS sont :

- Une source lumineuse (polarisé ou non).
- Des filtres spatiaux pour réduire l'intensité et régler le diamètre du faisceau lumineux
- Détecteur dont la position par rapport, à la normale à la surface détermine l'angle de diffusion et à la zone éclairée détermine l'angle solide de mesure.
- Equipements électronique et informatique pour mesurer le signal du détecteur et analyser les données.

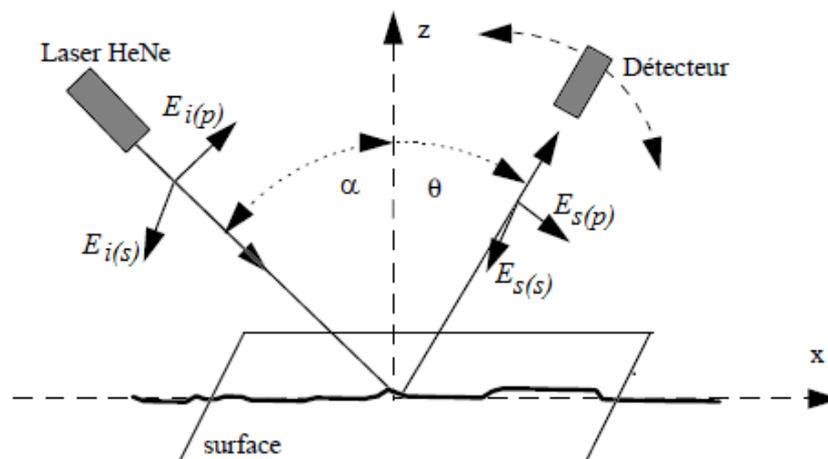


Figure. 13 : Schéma de principe d'un diffusomètre.

En concluant, les domaines de validité de ces deux types de base de la théorie de la diffusion (modèle scalaire et modèle vectoriel) utilisés pour la caractérisation de l'état de surface à partir des mesures de diffusion, peuvent être résumés par la figure ci-dessous. Selon [Vorb 88], les approches théoriques deviennent assez complexes et difficilement prédictives lorsque la grandeur de la rugosité sera comparable à la grandeur de la longueur d'onde.

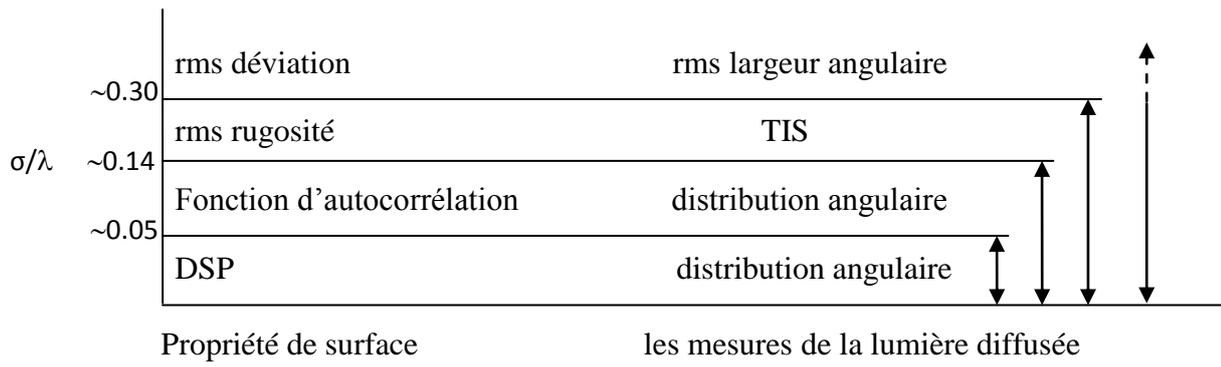


Figure. 14 : les différents régimes de la lumière diffusée en fonction du rapport σ/λ .

Références

- [Amra] C. Amra. Introduction à l'étude de la diffusion de la lumière par les rugosités des surfaces optiques. Ecole d'Eté, Système optiques, pp 485-498.
- [Bass 79] F. G. Bass and I. M. Fuks. Wave scattering from statistically rough surfaces. Pergamon press, London, (1979).
- [Benn 61] J. M. Bennett and J. O. Porteus. Relation between surface roughness and spéculaire reflectance at normale incidence. J.O.S.A. **51**, (1961), pp123-129.
- [Benn 76] J. M. Bennett. Appl. Opt . **15**, (1976), pp2705
- [Beck 63] P. Beckmann and A. Spizzichino. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces. Pergamon press. (1963) , New York.
- [Brun 05] G. Brun. Photoniques : revue des solutions optiques. Société Française d'Optique "SFO". 18, (2005), pp 47-52.
- [Cao 91] L. X. Cao, T. V. Vorburger, A. G. Lieberman and T. R. Lettieri. Light scattering measurement of the rms slopes of rough surfaces. Appl. Opt . **30**, (1991), pp 3221-3227
- [Chan 76] P. J. Chandley. Determination of the autocorrelation function of height on rough surface from coherent light scattering. Opt. Quantum Electron, **8**, (1976), pp329-333.
- [Chur 79] E. L. Church, H. A. Jenkinson and J. M. Zavada. Relationship between surface scattering and microtopographic features. Opt. Eng, **18**, (1979) , pp125-136
- [Dagn 80] H. Dagnall. Exploring surface texture. Rank Taylor Hobson, Leicester, England, (1980).
- [Davi 54] H. Davies. The reflection of electromagnetic waves from a rough surface. Proc. Inst. Elec. Engrs, 101, (1954), p209.
- [Elso 79a] J. M. Elson and J. M. Bennett. Vector scattering theory. Opt. Eng, **18**, (1979) ,pp116-124
- [Elso 79b] J. M. Elson and J. M. Bennett. Relation between the angular dependence of scattering and the statistical properties of optical surfaces. J. Opt. Soc. Am, **69**, (1979), pp31-47
- [Marx 90] E. Marx and T. V. Vorburger. Direct and inverse problems for light scattered by rough surfaces. Appl. Opt, **29**, (1990) , pp 3613-3626
- [Rake 89] J. H. Rakels. Recognized surface finish parameters obtained from diffraction patterns of rough surfaces, in surface measurement and characterization, Bennett, J. M. ed, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. **1009**, (1989), pp 119-125.

[Raph 05] B. Raphet. Etats de surface: caractérisation. Techniques de l'ingénieur, article R 1230, (2005).

[Roth 99] H. Rothe, D. Hüser, A. Kasper and T. Rinder. RInvestigations of smooth surfaces by measuring the BRDF with a stray light sensor in comparison with PSD curves evaluated from topography of large AFM scans. SPIE. **3619**, (1999), pp 111-121.

[Stov 75] J. C. Stover. Roughness characterization of smooth machined surfaces by light scattering. Appl. Opt, **14**, (1975), pp 1796-1802.

[Stov 95] J. C. Stover. Optical scattering measurement and analysis. SPIE Press, (1995).

[Toll 04] E. Tollens, S. Menecier, Y. Haidar, C. Zerrouki, M. Chassevent, F. de Fornel et J. J. Bonnet. Diffusion des rayonnements X et visibles ; microscopie en champ proche : utilisation comparée pour la caractérisation des surfaces. J. Phys. IV, **118**, (2004), pp 395-405.

[Vorb 93] T. V. Vorburger, E. Marx et T. R. Lettieri. Regimes of surface roughness measurable with light scattering. Appl. Opt, **32**, (1993), pp 3401-3408

[Vorb 88] T. V. Vorburger, L. X. Cao, C. H. W. Giauque, J. Raja, D. E. Gilsinn and L. Fullana. Optical scattering from rough surfaces: experiment and theory. Appl. Opt, **32**, (1988), pp 308-316.

[Zerr 98] C. Zerrouki, Fr. Miserey et P. Pinot. Répartition angulaire de la lumière diffusée par un échantillon poli du super-allige CoCr20WNi ; application à la détermination des paramètres statistiques caractérisant la rugosité superficielle. Eur. Phys. J. Appl, Phy, **1**, (1998), pp 253-259.

Chapitre 4 : Partie expérimentale

4.1. Objectif du travail

Dans les conditions réelles sahariennes, la vision à travers un pare-brise endommagé par vent de sable constitue un facteur accidentel, pour les conducteurs de véhicules. Ceci est provoqué par la perte de visibilité qui résulte de la diffusion dans toutes les directions de la lumière incidente. En effet, les objets vus à travers les pare-brises deviennent partiellement ou parfois complètement flous selon l'état de la surface. D'après Malaise [Mala 98] la lumière diffusée dépend de trois facteurs essentiels :

- L'angle et l'intensité de la lumière de la source.
- l'angle de diffusion.
- L'état de surface du pare brise.

L'objectif de notre étude expérimentale consiste à étudier l'effet de la masse projetée et de l'angle d'illumination (angle d'inclinaison des pare brises) sur la diffusion de la lumière. Pour cela, nous avons simulé dans le laboratoire l'effet des vents de sable sur les pare brises et nous avons utilisé une méthode basée sur la mesure vectorielle du rayonnement diffusé.

Par la suite nous avons complété cette étude par une caractérisation superficielle de la surface érodée, par le calcul de SLI. Ce dernier constitue un outil de contrôle moderne de la dégradation des états de surface. Enfin, on a terminé cette étude par la détermination d'une relation semi-empirique qui relie l'indice de diffusion « SLI » à la rugosité « Ra ». L'exploitation parallèle de cette relation semi-empirique et de la courbe $SLI = f(Mp)$, ainsi que la courbe $T=f(Mp,\alpha)$ représentative de la variation de la transmission en fonction de la masse projetée et de l'angle d'illumination, permettent de déterminer deux domaines essentiels (le transparent et le flou).

4.2. Procédure expérimentale

4.2.1. Caractéristiques du sable utilisé

Le sable utilisé comme érodant provient du Sahara algérien (région d'Ouargla). Il présente une granulométrie moyenne assez homogène et comprise entre 200 et 250 μm . La forme des particules est variable : sphérique en majorité et anguleuse en faible nombre (figure. 1).

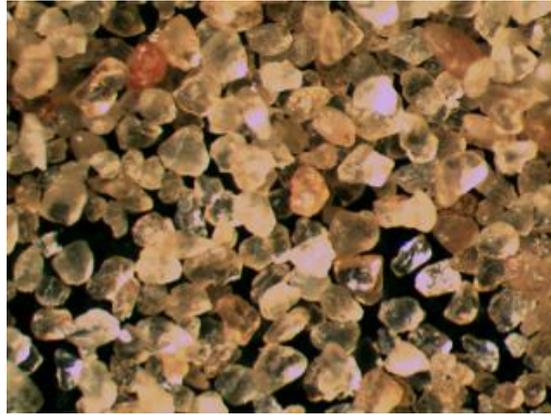


Figure. 1 : Morphologie des particules d'un échantillon de sable d'Ouargla (x2.5).

De plus, l'aspect coloré des particules de sable suggère que le sable en question est composé de plusieurs oxydes dont la composition chimique et minéralogique est donnée par les tableaux 1 et 2 [Boua 04].

Oxydes	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Masse (%)	72.88	0.80	24.00	0.43	1.84	0.05

Tableau.1. Composition chimique du sable utilisée

Minéraux	Quartz	Tourmaline	Ilménite	Limonite	gypse
----------	--------	------------	----------	----------	-------

Tableau.2. Composition minéralogique du sable utilisée

4.2.2. Caractéristiques du verre utilisé

Le verre utilisé est un verre float, silico-sodo-calcique d'usage courant d'épaisseur 3mm, fourni par une entreprise algérienne (AFRICAVER). Nous avons découpé des échantillons de forme carrée de dimensions 50 x 50 mm². La composition chimique moyenne et quelques propriétés physiques sont mentionnées dans les tableaux 3 et 4 [Madj 99].

Oxydes	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	Autres
Masse (%)	72.2	6.7	15.0	4.0	1.9	0.2

Tableau. 3. Composition chimique du verre utilisé

Propriétés	Valeurs
Densité ρ	2.52 g cm ⁻³
Dureté	4.5 GPa
Module de Young E	72 GPa
Coefficient de Poisson ν	0.22
Indice de réfraction	1.52
Transmission optique	91.5%

Tableau. 4. Quelques propriétés physiques du verre utilisé

4.2.3. Dispositif souffleur de Sable utilisé

Pour simuler l'influence des vents de sable sur l'état de surface des pare-brises, nous avons utilisé un dispositif souffleur de sable de type horizontal conçu et réalisé au niveau de notre laboratoire selon les recommandations des lois de la mécanique des fluides et de la norme ASTM G76-89. C'est un dispositif de sablage très simple à buse de longueur $L = 1$ m et de diamètre $\varphi_1 = 25$ mm, soit un rapport $L/\varphi_1 = 40$ (figure. 2).

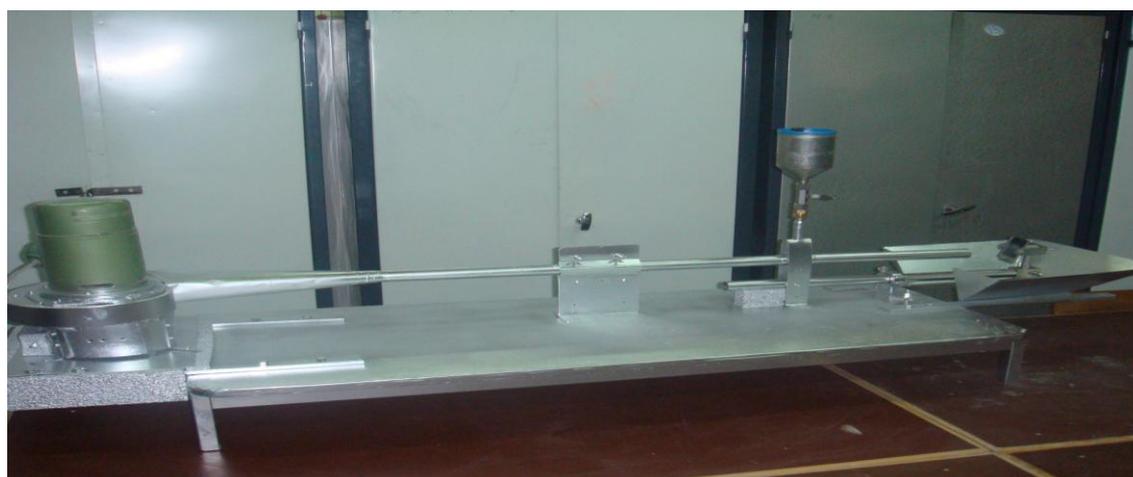


Figure. 2 : Dispositif souffleur de sable.

Le principe de fonctionnement de ce simulateur est illustré par la figure 3. Il consiste à projeter des particules de sable, dans une buse à travers une trémie à débit variable, sur un échantillon fixe. L'angle d'impact est obtenu par l'orientation de l'échantillon dans son plan normal à la direction de la buse.

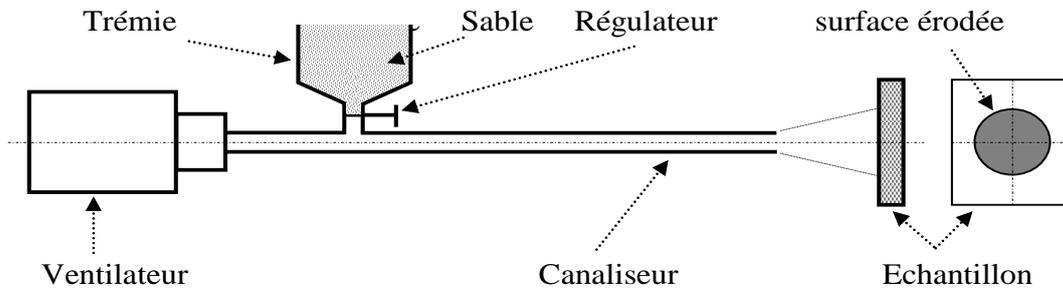


Figure. 3 : Schéma de principe du dispositif souffleur de sable.

Le sablage de type sec réalisé avec ce simulateur mène à avoir une simulation proche des conditions climatiques réelles qui sévissent au Sahara. Il s'agit essentiellement de la vitesse des particules de sable érodantes. Selon la station météorologique d'Ouargla, la vitesse moyenne enregistrée dans la région d'Ouargla est de l'ordre (55-65 Km/h) [Bouz 00]. De plus, durant ces cinq dernières années la plus grande vitesse enregistrée est de l'ordre de 100 Km/h. En effet, le dispositif que nous avons utilisé atteint cette limite.

4.2.4. Conditions de sablage

Durant nos essais de sablage nous avons prélevé les échantillons de la même feuille de verre et les sabler sur la même face pour assurer l'homogénéité de nos études. Les essais de sablage sont réalisés sous les conditions suivantes :

Paramètres fixes :

- Les tailles des grains de sable : $\approx (200 - 250) \mu\text{m}$
- La vitesse moyenne du flux d'air : 16 ms^{-1}
- L'angle d'impact : 90°
- La distance entre la sortie de la buse et l'échantillon : 50 mm
- Le débit de sablage est de 0.17 g s^{-1} , soit un flux de $0.34 \text{ Kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Paramètres variables:

- La masse projetée (M_p) varie de : (10 - 100) g

4.2.5. Déroulement des essais et moyens utilisés

Dans l'ordre d'éliminer toute impureté (poussière), les échantillons sablés subissent un nettoyage avec de l'acétone. Puis on fait une caractérisation qualitative par voie d'observation microscopique de la surface endommagée (image en deux dimensions) et par microscope à force atomique (image en trois dimensions). Le paramètre de la rugosité semble être un outil adéquat pour la quantification des défauts générés. Elle a été mesurée suivant une ligne dans la zone centrale de la surface du verre érodé à l'aide d'un rugosimètre « Mitutoyo SurfTest-4 » (figure. 4).



Figure. 4 : Rugosimètre « Mitutoyo SurfTest-4 ».

4.2.6. Procédure de mesure de la lumière diffusée

4.2.6.1. Montage optique expérimental

Le montage optique réalisé est illustré par la figure 5. Il est basé sur la méthode de mesure de la distribution angulaire du flux de la lumière diffusée (ARS : Angle Resolved Scattering). Le principe de ce dispositif expérimental consiste à éclairer un échantillon fixé dans un plan vertical d'un goniomètre, sous incidence variable ($\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, \text{ et } 60^\circ$). La lumière émise par une lampe à xénon S de puissance 350 W est collimatée par un système d'éclairage de type Koehler. Ce système est composé d'un condenseur C ($\phi=40\text{mm}$, $f=25\text{mm}$), d'une lentille convergente L ($\phi=55\text{mm}$, $f=150\text{mm}$) et de deux diaphragmes identiques DC et DO ($\phi=1-30\text{mm}$). Dont le premier joue le rôle d'un diaphragme de champ et le second d'un diaphragme d'ouverture. Le diamètre de faisceau de sortie qui éclaire l'échantillon est de

l'ordre de 3mm. Le faisceau transmis et réfléchi est capté par un phototransistor (T). Ce dernier est monté sur un bras mobile solidaire à la table tournante du goniomètre. Le phototransistor est placé à une distance de 50 mm de la surface à étudier. Il permet de transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique dont le courant est mesuré par un nano ampèremètre (type EVA, ampérage (10 nA ÷ 1 mA)). La position du phototransistor par rapport à la direction spéculaire détermine l'angle de diffusion θ . La surface détectrice définit l'angle solide $d\Omega \approx 1,97.10^{-3}sr$ à l'intérieur duquel est admise la lumière diffusée par l'échantillon. Le goniomètre est composé d'une table fixe graduée de 0° à 360° et d'une table mobile équipée d'un vernier gradué de 0° à 30° . La résolution de ce goniomètre est de $1'$. Dans cette étude, on a déterminé les variations de l'intensité normalisée de la lumière diffusée

$$\frac{I_d}{I_0} = f(\theta) \text{ avec variation de l'angle } \theta \text{ avec un pas de } 10'.$$

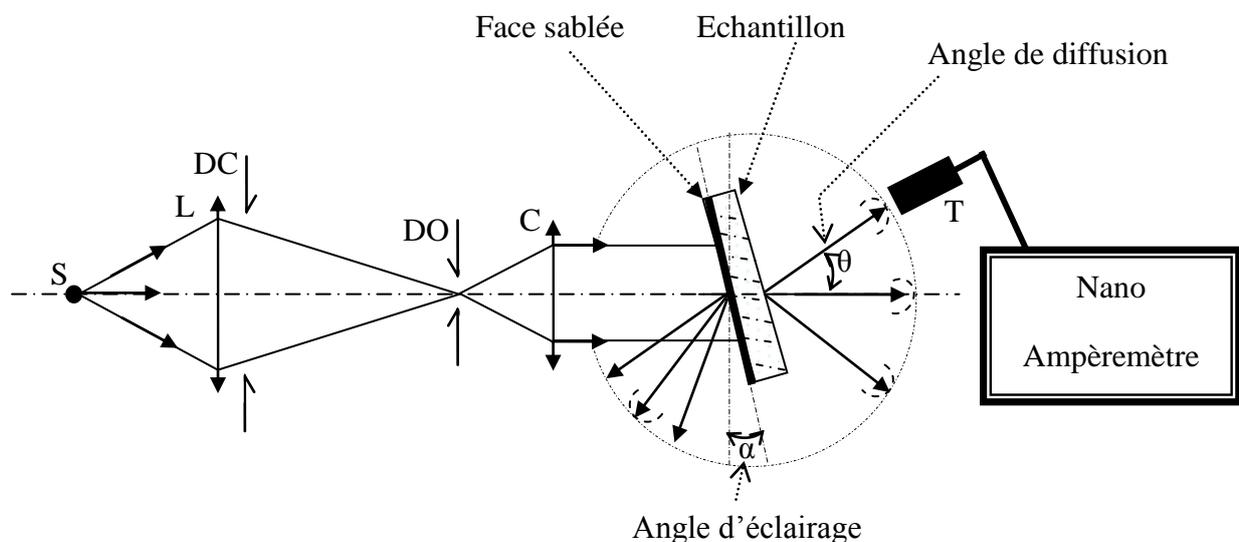


Figure. 5 : Schéma de principe du montage optique réalisé.

4.2.6.2. Conditions de mesure par la méthode ARS

Afin de mettre en évidence l'effet parallèle de l'état de surface (rugosité) et l'angle d'illumination (angle d'inclinaison des échantillons) sur :

-
- La diffusion de la lumière par transmission et par réflexion.
 - La distinction entre le domaine de transparence et celle du flou soit à partir de :
 - La transmission limite « T_{\min} »
 - La valeur limite de l'indice de diffusion « SLI »,

nous avons réalisé des mesures de la lumière diffusée sans présence de l'échantillon en verre, dans l'ordre de déterminer la diffusion intrinsèque du système de mesure et des mesures avec un échantillon non sablé (échantillon de référence).

4.3. Résultats et discussions

Le phénomène de diffusion est de caractère purement aléatoire et le domaine typique de la grandeur de la rugosité de surfaces sablées varie entre 0.1-2.5 μm qui est dans le même ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière naturelle. La recherche d'un modèle mathématique dans ce domaine est très compliquée [Vorb 88]. La raison pour laquelle, notre objectif consiste à mener une étude purement expérimentale. Pour cela, nous avons divisé cette étude en trois parties distinctes :

- Effet des paramètres de condition de sablage (masse projetée).
- Effet de l'angle d'illumination (angle d'inclinaison des pare brises).
- Combinaison des deux paramètres (masse projetée et angle d'inclinaison).

4.3.1. Effet de la masse projetée sur la rugosité, la transmission et la réflexion optique

4.3.1.1. Effet de la masse projetée sur la rugosité

La figure 6 présente la variation de la rugosité arithmétique en fonction de la masse projetée. La rugosité croît faiblement puis augmente fortement jusqu'à 2.5 μm . Au delà de $M_p = 50\text{g}$, la courbe tend vers un palier de saturation. En fait, la courbe comprend essentiellement trois stades. Dont l'évolution des défauts générés vis-à-vis de la masse projetée est différente. Ces stades se distinguent essentiellement par les différentes pentes de l'allure de la courbe caractérisant et se limitent par les points d'intersections de ces derniers.

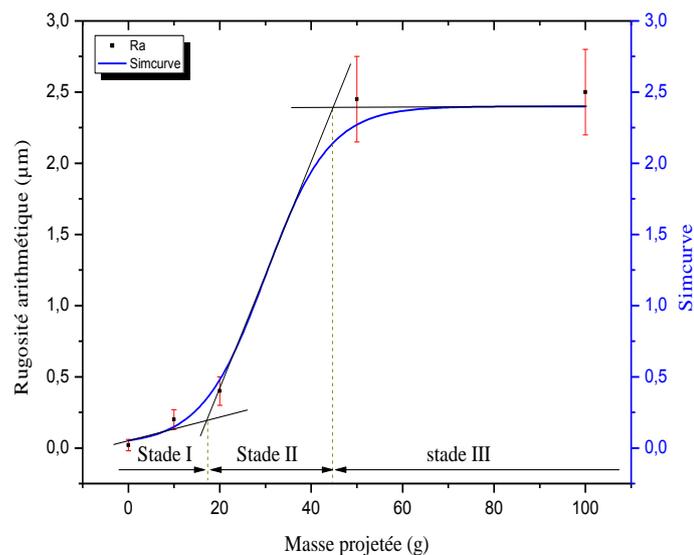


Figure. 6 : Variation de la rugosité arithmétique Ra en fonction de la masse projetée.

On constate qu'il s'agit de trois stades dont leur association définit et explique le mécanisme du processus d'érosion de verre.

Stade I : Ce stade est caractérisé par une faible pente. Cette dernière détermine la vitesse d'érosion qui est égale à $0.015\mu\text{m/s}$. La rugosité maximale obtenue dans ce cas est de l'ordre de $0.19\mu\text{m}$ qui correspond à une masse projetée d'environ $M_p \approx 17.2\text{g}$. Ce stade présente le début d'érosion qui se produit essentiellement par fissuration et effritement. Il est caractérisé par une faible perte de masse. Les défauts générés à ce stade sont illustrés par la micrographie de la figure 7. Ils sont présentés sous forme de micro-fragmentation, des fissures en particulier latérales et quelques écailles isolées distribuées aléatoirement sur toute la surface sablée. Les micro-fragmentations sont caractérisées par de très faibles profondeurs. Ceci est probablement dû à l'impact individuel par des particules très fines. Quant à les écailles observées, ils se résultent de l'interconnexion des fissures latérales qui se propagent parallèlement à la surface.

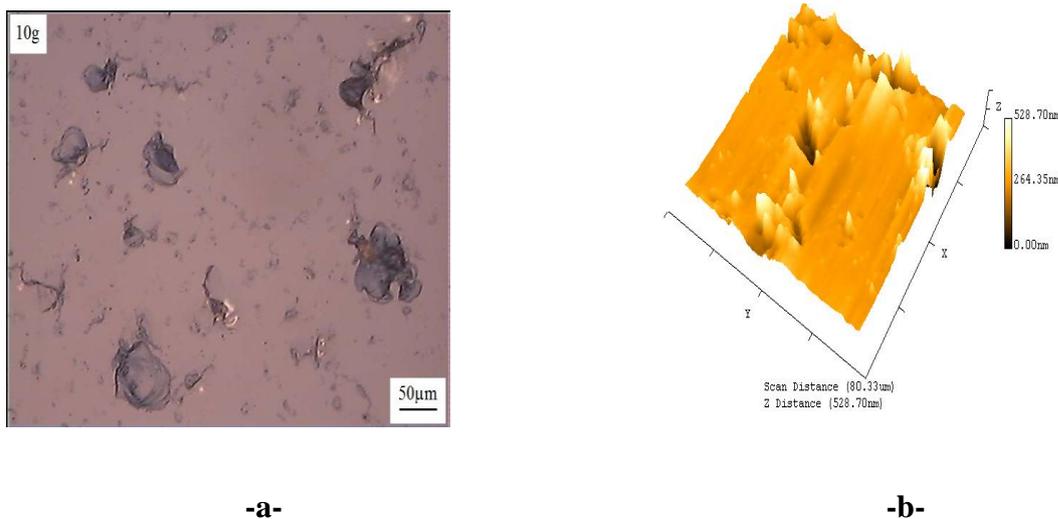


Figure. 7 : Micrographie des défauts générés au premier stade. a) par microscope optique, b) par microscopie à force atomique

Stade II : ce stade est caractérisé par une pente importante qui reflète l'activation du mécanisme d'érosion. La vitesse d'érosion est de l'ordre de $0.08\mu\text{m/s}$, soit un rapport d'activation d'environ 5.3 fois par rapport au premier stade. Ce stade correspond au début de la formation des cratères qui se développent par effritement et s'accompagnent d'écailles et de fragmentations (figure. 8). Ceci est dû essentiellement au début d'intersection entre les défauts et aux multiples impacts des particules. De plus, on remarque, l'augmentation rapide de la profondeur des défauts et le nombre de sites d'impacts. Le développement des défauts

généralisées se poursuivent avec la croissance de la masse projetée jusqu'à l'obtention de la saturation. Cet état est caractérisé par une rugosité maximale de l'ordre de $2.45\mu\text{m}$ qui correspond à une masse projetée d'environ 45g.

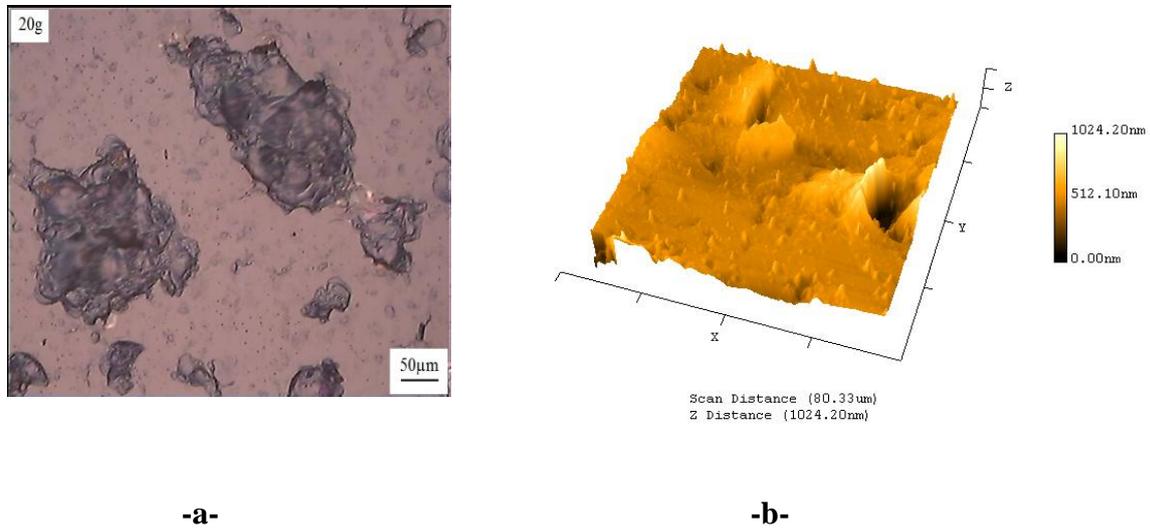


Figure. 8 : Micrographie des défauts générés au second stade. a) par microscope optique, b) par microscopie à force atomique.

Stade III : la pente horizontale qui caractérise ce stade indique que la vitesse d'érosion dans ce cas est pratiquement nulle. Dans ce cas la surface endommagée devient homogène. Ceci est confirmé par la micrographie de la figure 9. Cet état de forme s'explique par l'élimination des crêtes (égalisation du faciès) et création de nouvelles différences entre creux et crêtes au fur et à mesure qu'on sable les échantillons. Dans ce cas les valeurs de la rugosité tendent à se stabiliser autour de $2.45\mu\text{m}$, soit la rugosité maximale atteinte dans le stade précédent.

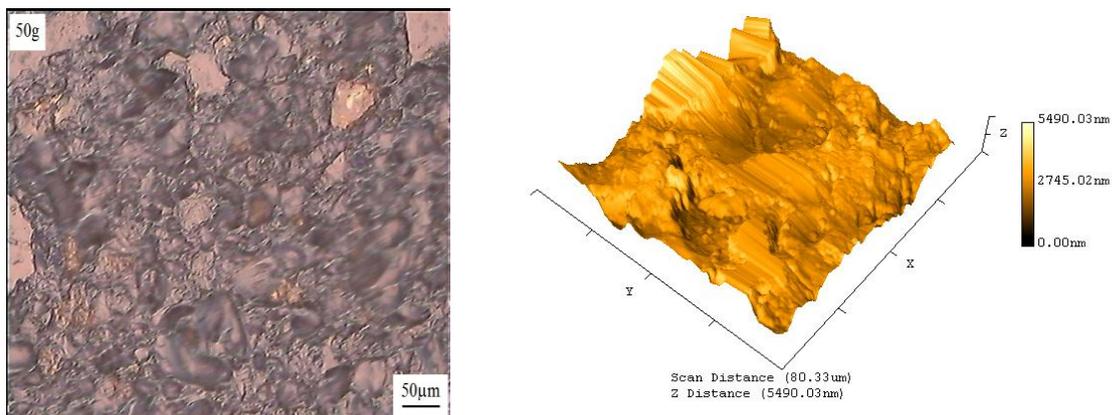


Figure. 9 : Micrographie des défauts générés au troisième stade. a) par microscope optique, b) par microscopie à force atomique

On constate que nos résultats cadrent bien avec ceux de la bibliographie. Les études antérieures [Adjo 07] montrent que l'allure de la rugosité augmente, passe par un maximum et prend ensuite une forme d'ondulation de faible amplitude autour d'un plateau qui correspond à l'état de saturation. Selon la bibliographie [Adjo 07, Bous 04], la valeur du maximum de saturation varie de 2.25 μm à 3.43 μm qui se manifeste pour un intervalle de masse projetée entre 50 et 90g. La différence obtenue dans la valeur du maximum peut être attribuée aux choix des conditions de travail dont les plus pertinents sont : la vitesse des particules du sablage et l'angle d'impact [Mahd 07].

Par conséquent, le phénomène d'érosion des surfaces par des particules du sable se manifeste essentiellement dans le premier et le second stade. Pour cela, nous tentons de modéliser ce dernier dans l'intervalle [0-50g], la quantité de sable projetée $M_p = 50\text{g}$ correspond au début de la saturation. Etant donné que le paramètre variable (masse projetée) est en dépendance du temps. C'est pourquoi, nous avons établi une relation empirique entre la rugosité et le temps. La figure 10 montre le tracé de la variation de la rugosité en fonction de temps carré.

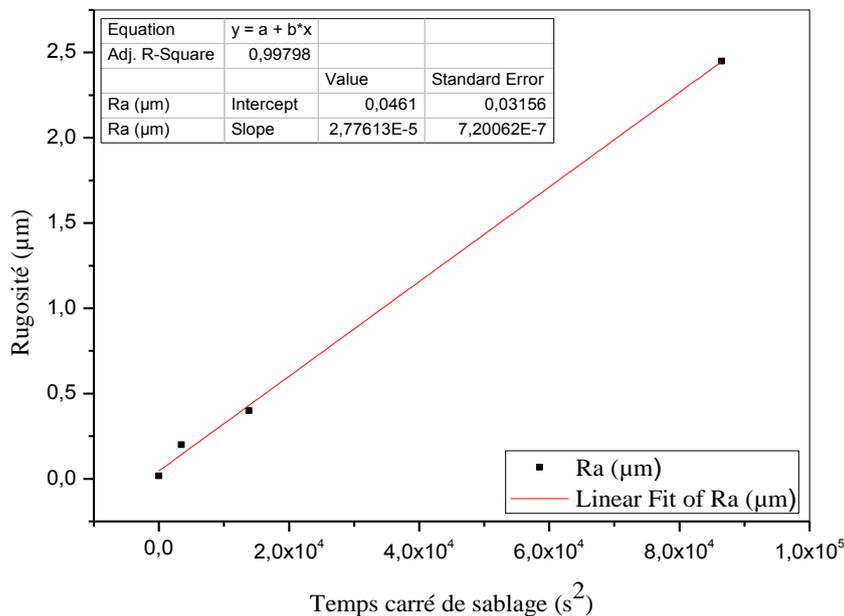


Figure. 10 : La courbe de corrélation de la variation de la de la rugosité en fonction de temps carré de sablage.

Le résultat obtenu montre qu'un alignement très net est réalisé entre le premier et le deuxième stade. Ceci est bien confirmé par la courbe de corrélation. La fonction gouvernante est une fonction linéaire dont l'expression est :

$$R_a = 2,8 \cdot 10^{-5} t^2 + 0.046 \quad (1)$$

avec :

$a = 2,8 \cdot 10^{-5} \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ (représente l'accélération de l'érosion).

$b = 0.046 \mu\text{m}$ (représente la rugosité de l'échantillon de référence).

4.3.1.2. Effet de la masse projetée sur la transmission optique

Pour qualifier la dégradation de l'état de surface des verres sablés, nous avons également déterminé la variation de la transmission optique en fonction de la masse projetée (figure. 11).

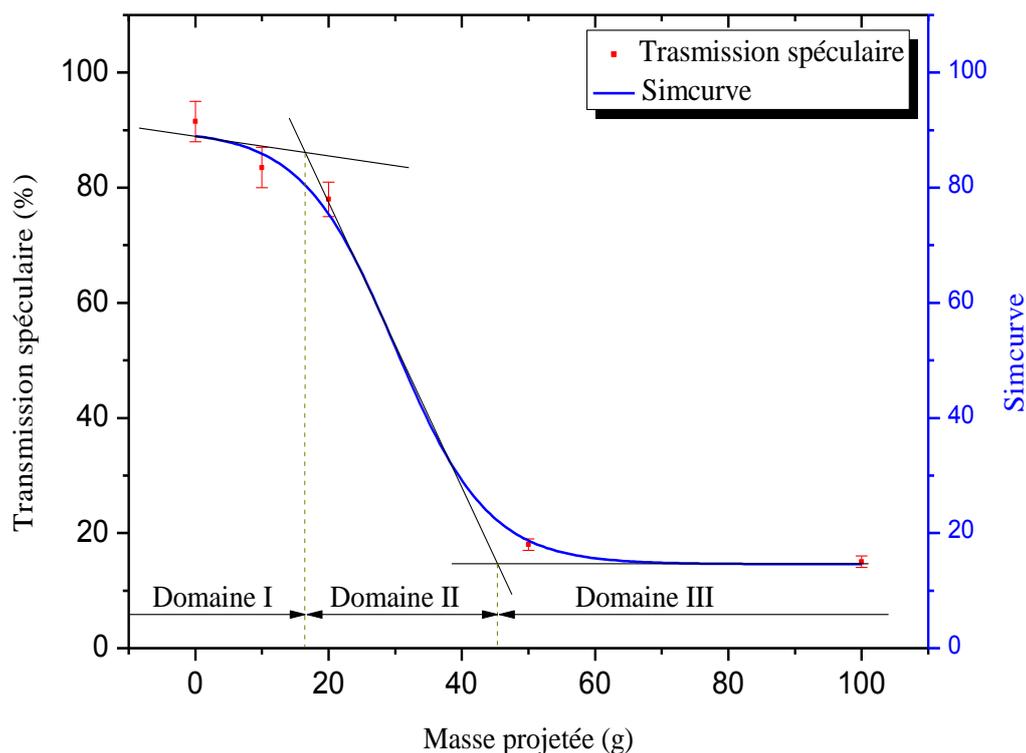


Figure. 11 : Variation de la transmission optique en fonction de la masse projetée pour une incidence normale.

L'allure de la courbe de la transmission optique est en bonne corrélation avec celle de la rugosité arithmétique, elle évolue en sens inverse. Au début, la transmission optique est caractérisée par une légère perte. Par la suite elle chute régulièrement pour atteindre une

valeur très faible de l'ordre de 18% qui correspond à une masse projetée minimale égale à 50g puis tend à se stabiliser au-delà. Ceci signifie qu'une fois la surface est totalement endommagée, la saturation de la qualité optique est atteinte. A ce stade, la projection de quantités supplémentaires de sable est inutile. La chute totale de transmission est de l'ordre de 76%. En effet, la perte de transmission se fait par réflexion pour les faibles masses projetées car la surface érodée n'est pas suffisamment endommagée. Alors que pour des masses plus grandes, la perte se fait essentiellement par diffusion suite à la dégradation importante de l'état de surface.

Comme on peut séparer, la courbe de la transmission optique en trois domaines (figure.11). Ces derniers sont le résultat inverse des stades précédemment trouvés. On constate, que le taux de la perte de la transmission dans chaque domaine reflète bien le taux de dégradation de l'état de surface des verres sablés. Les limites de ces domaines sont relativement en bon accords avec celles de la rugosité. On constate que la transmission minimale atteinte dans le premier et le second domaine est de l'ordre de 86% et 18% respectivement. L'intérêt essentiel qu'on peut tirer de ces limites est la possibilité de déterminer la limite entre le domaine transparent et celui du flou qui caractérise un pare brise érodé. En d'autres termes, c'est la limite de la bonne vision des conducteurs des véhicules qui fait l'objet de cette étude. Ceci n'est pas forcément lié seulement à l'étude de la perte de transmission mais aussi à l'effet de la diffusion de la lumière qui l'accompagne. La diffusion de la lumière est affectée par plusieurs paramètres dont les plus pertinents font l'intérêt de plusieurs auteurs ; ce sont : l'inclinaison et l'intensité de la source de la lumière et l'état de surface des pare brises.

4.3.1.3. Effet de la masse projetée sur la réflexion optique

La figure 12 représente la réflexion spéculaire de la lumière en fonction de la masse projetée pour un angle d'illumination ($\alpha = 60^\circ$) supérieur à l'angle de Brewster. Ceci pour la raison qu'au delà de cet angle, la réflexion spéculaire est maximale. On observe que l'allure de la réflexion est presque similaire à celle de la transmission, sauf que la courbe de la réflexion spéculaire présente une certaine linéarité apparente avant le palier de saturation. La chute de la réflexion est régulière et atteint la valeur minimale $R_s \approx 0.5\%$ à partir de $M_p=50g$ qui correspond à la saturation. Il est clair que la réflexion spéculaire est très faible en comparaison avec la transmission spéculaire. Ceci est lié sans doute à la principale caractéristique du verre qui est la transparence.

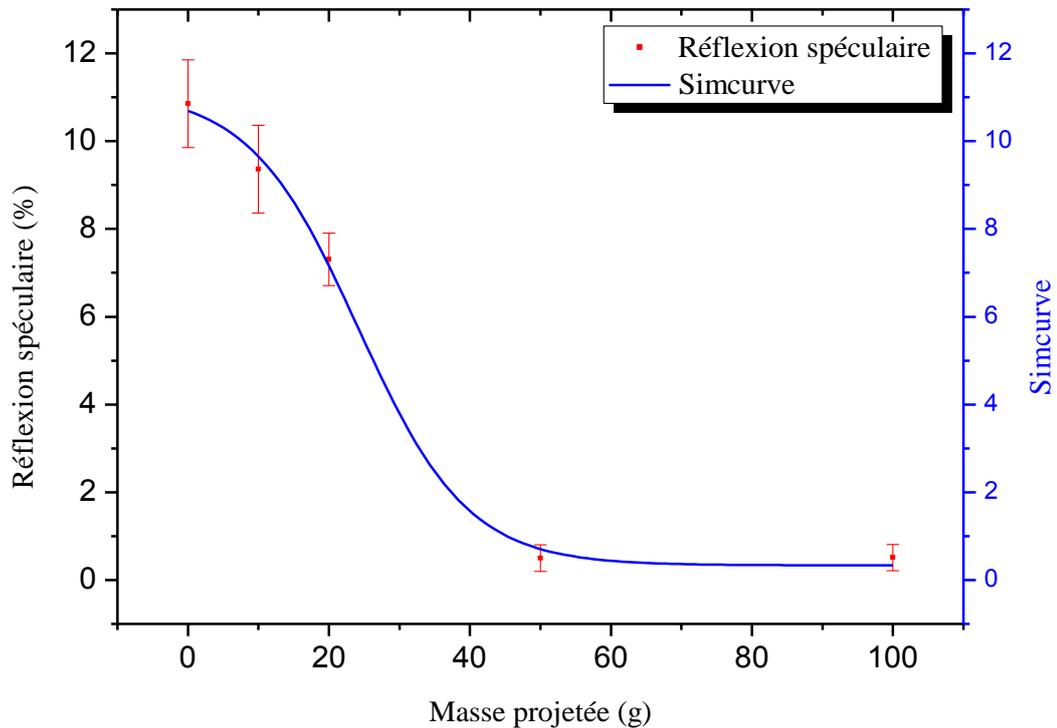


Figure. 12 : Variation de la réflexion spéculaire en fonction de la masse projetée pour $\alpha = 60^\circ$ [Bent 11].

4.3.2. Effet de la masse projetée et l'angle d'illumination sur la diffusion de la lumière

4.3.2.1. Effet de la masse projetée sur la diffusion de la lumière

A - Par transmission

La figure 13 représente la distribution de la transmission diffuse par des échantillons sablés et éclairés sous différents angles. On observe deux types de courbes : les courbes qui présentent un pic spéculaire important et d'autres un pic spéculaire négligeable.

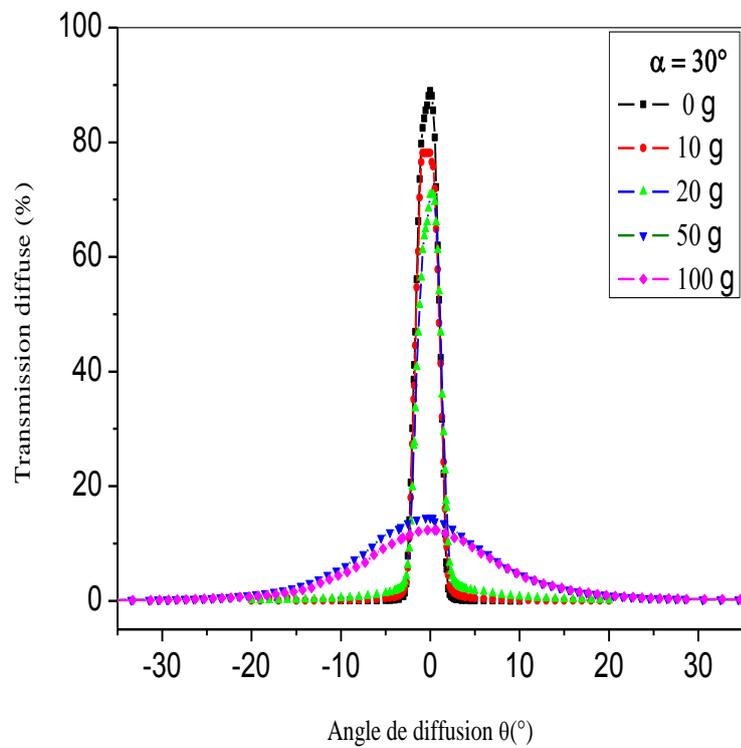
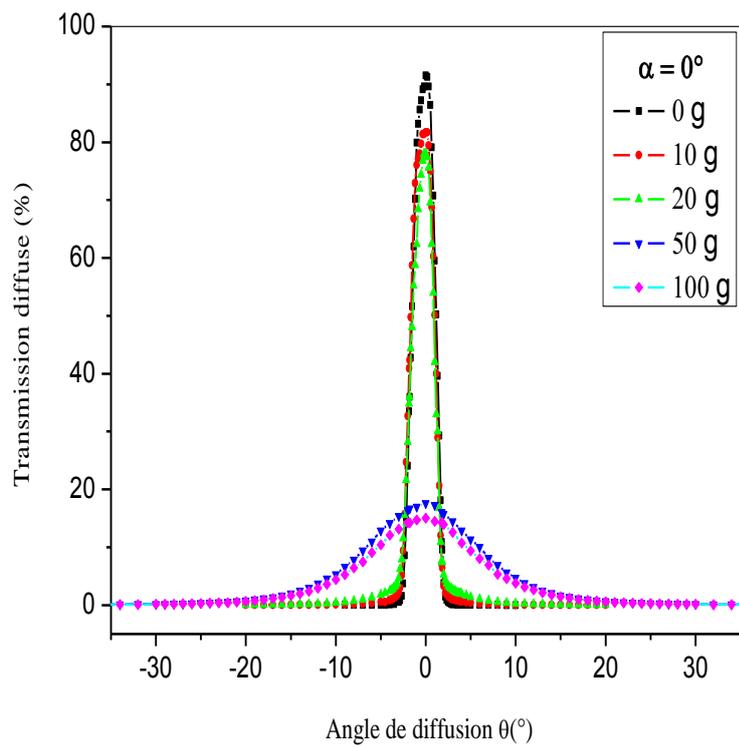
Les courbes présentant un pic spéculaire correspondent à des échantillons faiblement sablés (10 et 20g). Il s'agit des échantillons avec des états de surface faiblement dégradés. Ces derniers, correspondant aux défauts générés par érosion du premier stade qui est limité par une rugosité maximale de $0.4\mu\text{m}$. On constate que la majorité de l'énergie lumineuse incidente est concentrée dans la direction spéculaire. Elle présente une faible atténuation de

l'intensité et un faible élargissement des courbes par rapport à la courbe de l'échantillon de référence.

Dans le cas de l'incidence normale, la transmission spéculaire chute de 91.5% à 81.7 et 78%, soit une perte d'environ de 10 et 14%, pour une masse projetée de 10 et 20g respectivement. Nous avons constaté que la diffusion commence à se manifester à partir d'un angle de 2° (angle minimal de diffusion) et s'étale jusqu'à un angle d'environ 10°. Cet angle minimal est déterminé à partir de l'intersection des courbes de la transmission diffuse des verres sablés avec celle du verre de référence (sain). Selon Timmernann [Timm 85], cet angle minimal varie entre 1.5 et 2°, il est à l'origine de mesure de SLI. Quant à la norme américaine (standard D1003-61), la lumière diffusée est définie comme étant toute lumière déviée d'un angle supérieur de 2.5° par rapport à la direction de la lumière source incidente. On constate, de plus, que dans ce cas, la perte de la transmission est attribuée essentiellement à la perte par réflexion.

Par contre, dans le cas des verres fortement sablés (50 et 100 g), caractérisés par une rugosité relativement importante (2.45 et 2.50 μm) respectivement, on constate que les courbes de la transmission diffuse ne présentent pas de pic spéculaire et elles s'étalent dans un large angle de diffusion. Dans le cas d'incidence normale, l'élargissement à mi-hauteur augmente aux environs de 14° et la transmission spéculaire chute jusqu'à 18%. En effet, la perte de la transmission optique est supérieure à 80%. Ce résultat reflète bien la prédominance de la transmission diffuse par rapport à la transmission spéculaire.

De plus, on remarque qu'il y'a une grande similitude des courbes. Ceci est expliqué par la tendance de la rugosité vers un palier qui se traduit par la dégradation totale de l'état de surface des échantillons. Dans des travaux antérieurs et sous d'autres conditions, nous avons montré que pour des quantités de sable projeté supérieures à 50g, la rugosité augmente fortement jusqu'à 2.27 μm puis tend vers un palier (saturation)[Bent 07].



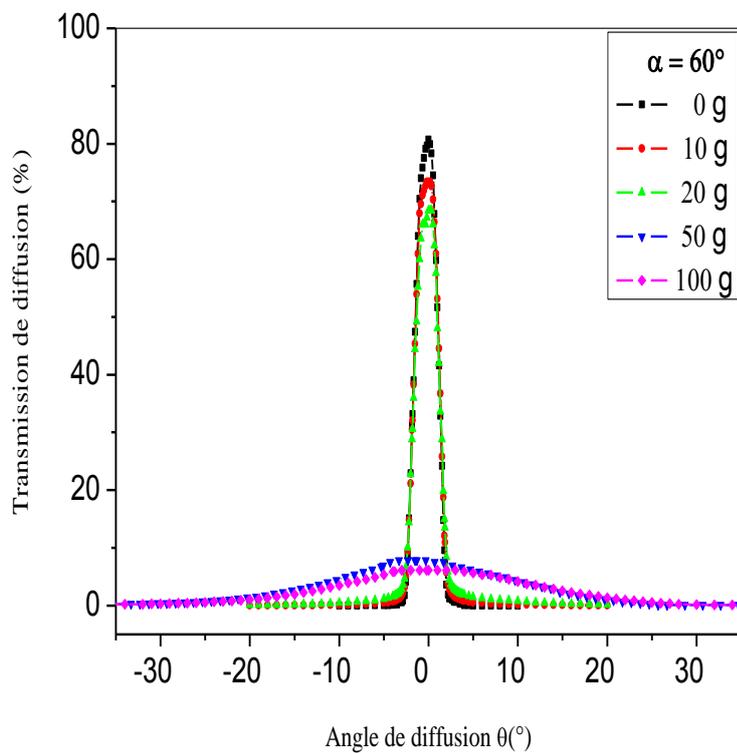
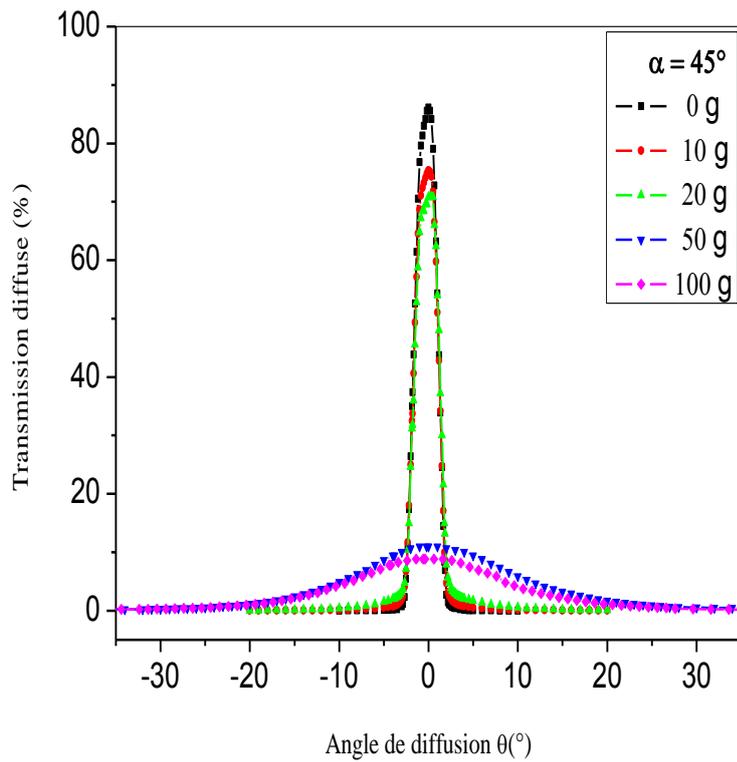


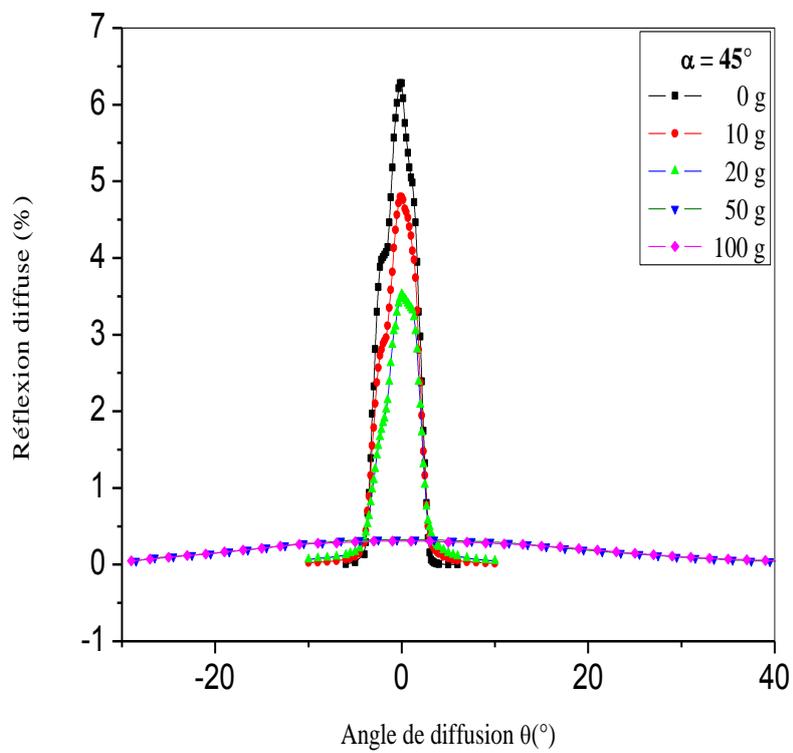
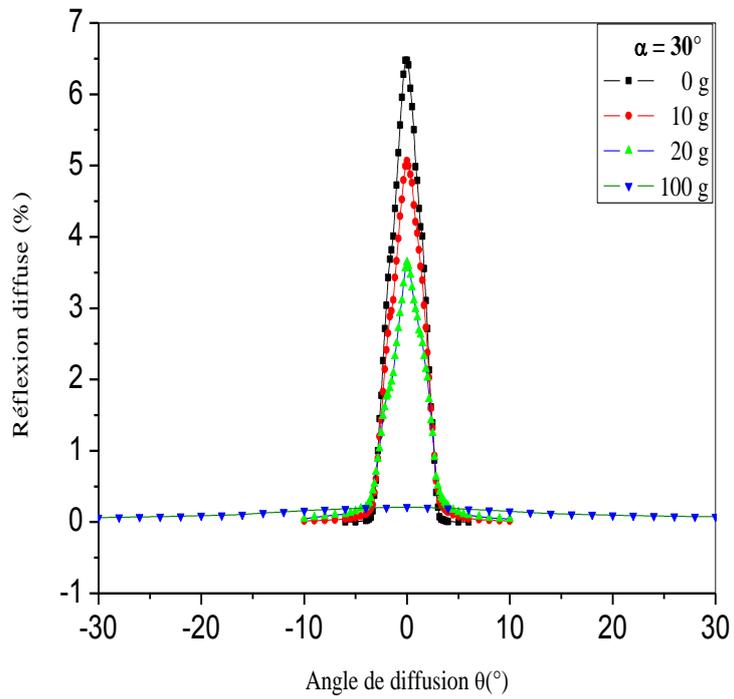
Figure. 13 : Courbes représentant la variation de la transmission diffuse en fonction de la masse projetée pour différents angles d'illuminations : 0, 30, 45 et 60°.

En effet, Marx et Vorburger [Marx 90] ont rapporté que pour un échantillon dont la rugosité quadratique moyenne est égale à $0.08 \mu\text{m}$, la courbe de distribution angulaire de la lumière diffusée présente un pic spéculaire important. Ce pic devient relativement faible pour un autre échantillon présentant une rugosité quadratique moyenne de $0.22 \mu\text{m}$. Par contre, pour le troisième cas de rugosité quadratique moyenne plus importante (0.37 et $0.48 \mu\text{m}$), aucun pic spéculaire n'a été observé.

Ainsi, plusieurs auteurs Derkum [Derk 91], Owens [Owen 92] et Helmers [Helm 88], ont indiqué que la dégradation de l'état de surface des pare brises provoque une perte très importante de la transmission optique des pare brises, ce qui induit une énorme réduction de la visibilité des conducteurs. Dans ce même contexte, Derkum [Derk 93] a rapporté dans son travail expérimental, qui porte sur l'effet des différents niveaux de la transmission des pare brises sur la perception des conducteurs, que la valeur exacte de la transmission, à partir de laquelle la vision des conducteurs devient floue, est comprise entre 60% et 70%.

B - Par réflexion

La figure 14 représente la distribution angulaire de la lumière diffusée par réflexion en fonction de la masse projetée pour différents angles d'illuminations. On remarque clairement que la masse projetée affecte la réflexion optique d'une manière similaire que celle dans le cas de la transmission optique. En effet, la réflexion spéculaire décroît régulièrement au fur et à mesure que la masse projetée augmente. Pour les faibles masses projetées 10 et 20g, la réflexion diffuse est très réduite et la réflexion spéculaire est dominante d'où la présence de pic spéculaire. Ceci, veut dire que la perte de la transmission optique se fait essentiellement par réflexion pour les états de surfaces faiblement dégradés qui correspondent aux faibles masses projetées. Pour les fortes masses projetées 50-100g, la totalité de la lumière réfléchie est diffusée dans un large angle de diffusion d'où la perte de la transmission optique qui se fait à la fois par transmission et par réflexion.



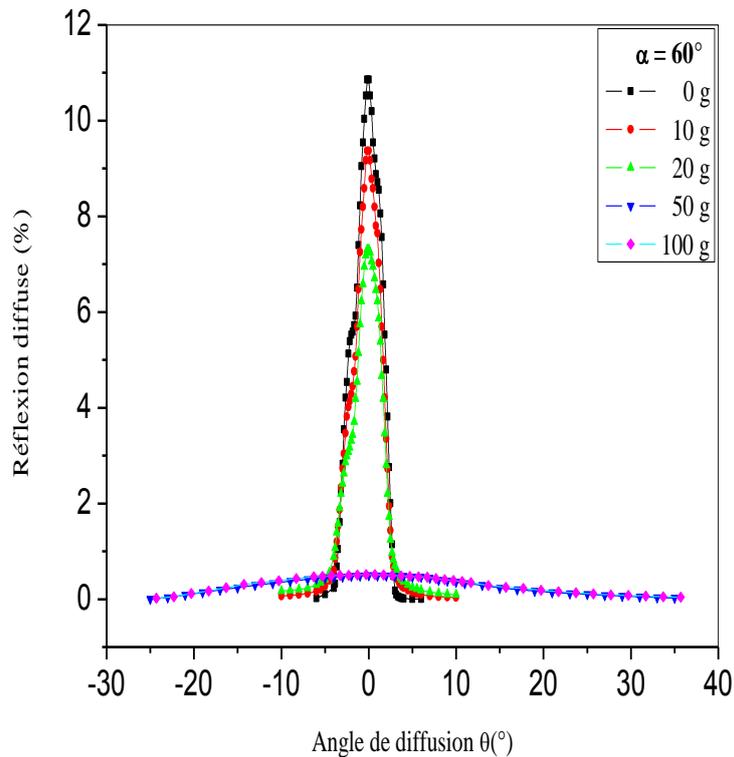
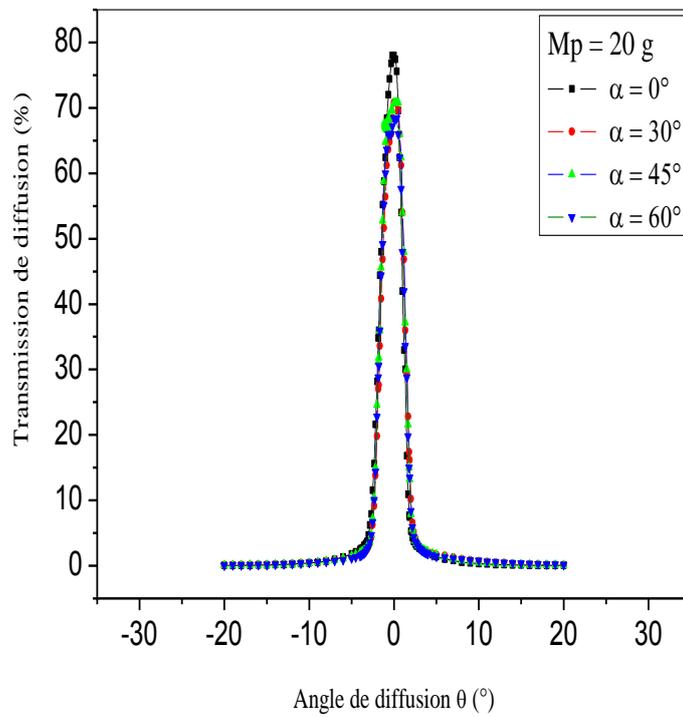
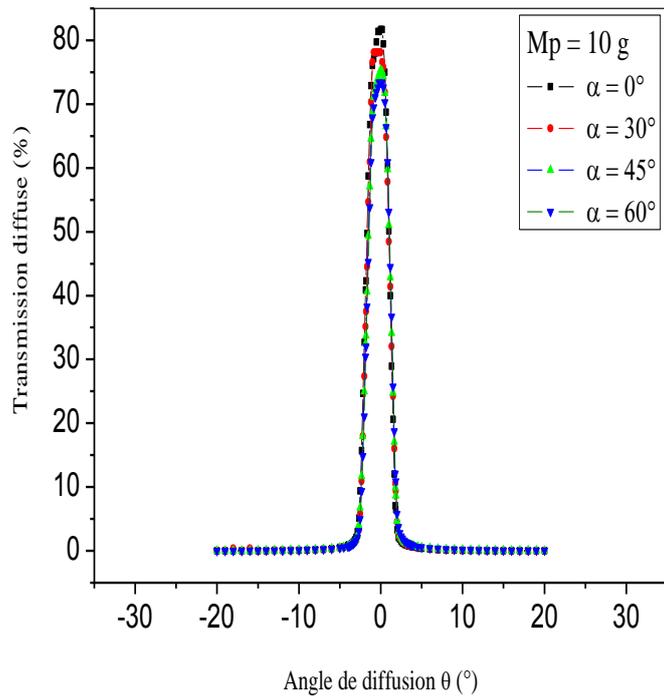


Figure. 14 : Courbes représentant la variation de la réflexion diffuse en fonction de la masse projetée pour différents angles d’illuminations : 30, 45 et 60°.

4.3.2.2. Effet de l’angle d’illumination sur la diffusion de la lumière

A - Par transmission

Parallèlement à l’influence de la masse projetée sur la diffusion de la lumière, l’angle d’illumination atténue la transmission optique et favorise la diffusion de la lumière. Dans ce travail, on a limité notre étude de l’effet d’angle d’illumination à une valeur maximale de 60°. Ceci en raison de la position des pare-brises de véhicules qui n’excède pas un angle de 60°. La figure 15 représente l’effet de l’angle d’éclairage sur la transmission diffuse de la lumière par des échantillons sablés. On constate que la variation de la diffusion de la lumière est proportionnelle à la variation de l’angle d’illumination.



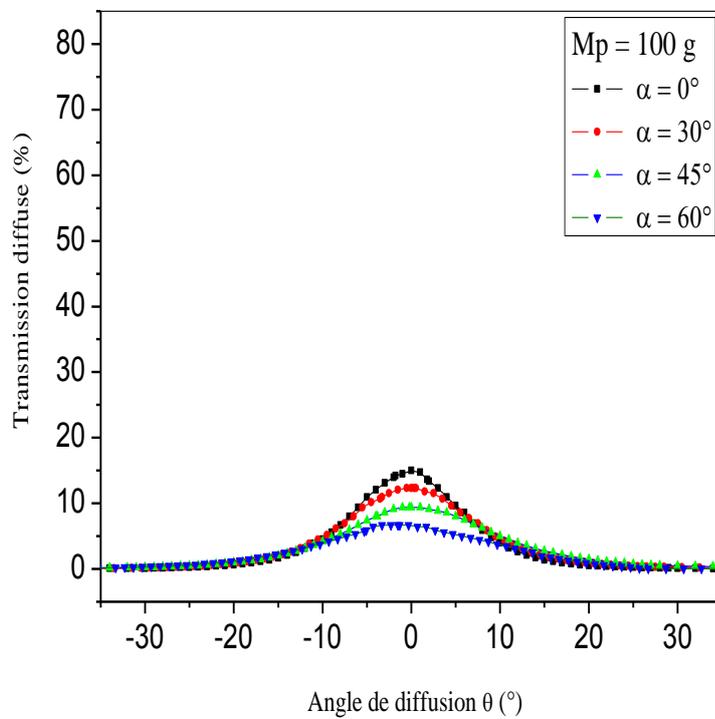
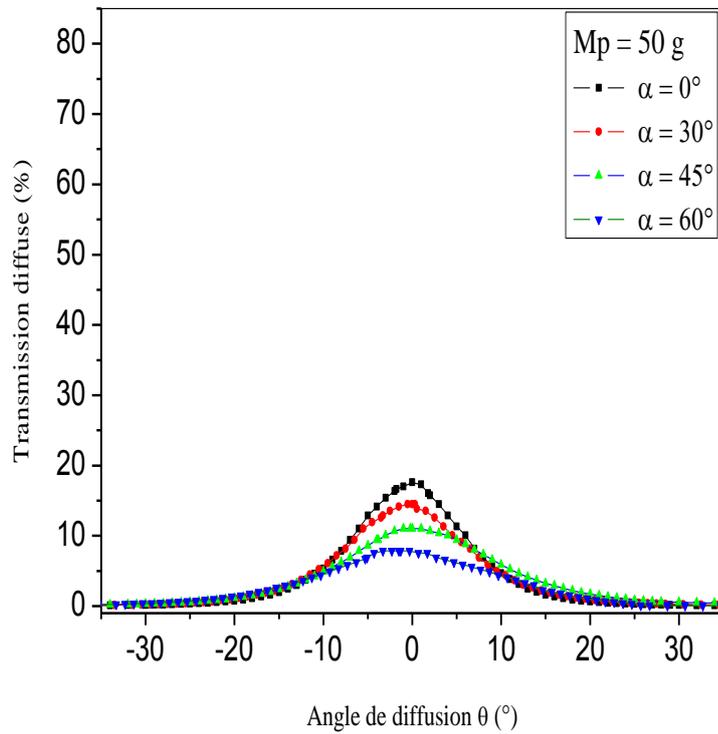


Figure. 15 : Répartition angulaire de la transmission diffuse en fonction de l'angle d'illumination pour des échantillons sablés par différentes masses projetées.

Pour des masses de sable projetées supérieur à 50g, les conditions d'illumination affectent largement la transmission diffuse notamment dans la fourchette (45-60°). À titre d'exemple, si on projette une quantité de particules de sable égale à 100g, on constate que l'amplitude de la lumière transmise dans la direction spéculaire chute régulièrement jusqu'à un taux de 18.4%, 41.96% et 58.82% respectivement pour un angle d'illumination 30°, 45° et 60°. En étudiant l'effet de l'état de surface d'un pare brise non teinté et un autre teinté en Or sur la transmission optique, Owens et al [Owen 92] ont rapporté que pour des angles d'inclinaison (compris entre 45° et 75°) la transmission optique varie de 0.86 à 0.43. De même Waetjen et al [Waet 92] ont conclu que la distance de détection des objets par les conducteurs décroît sévèrement pour des angles d'inclinaison des pare brises supérieur à 50°. Helmers et Lundkvist [Helm 88] ont confirmé que la réduction de la visibilité des objets est influencé par plusieurs facteurs tels que : la tinte, la saleté, l'état de surface et les larges angles d'inclinaison.

En effet, l'élargissement 'Wa' (angular spreading) donné par la figure 16 est un bon indice de la réduction de la transmission optique. A mi- hauteur, l'élargissement 'Wa' mesuré est de : 13.5° pour $\alpha=0^\circ$, 16° pour $\alpha=30^\circ$ et 24.8° pour $\alpha=60^\circ$.

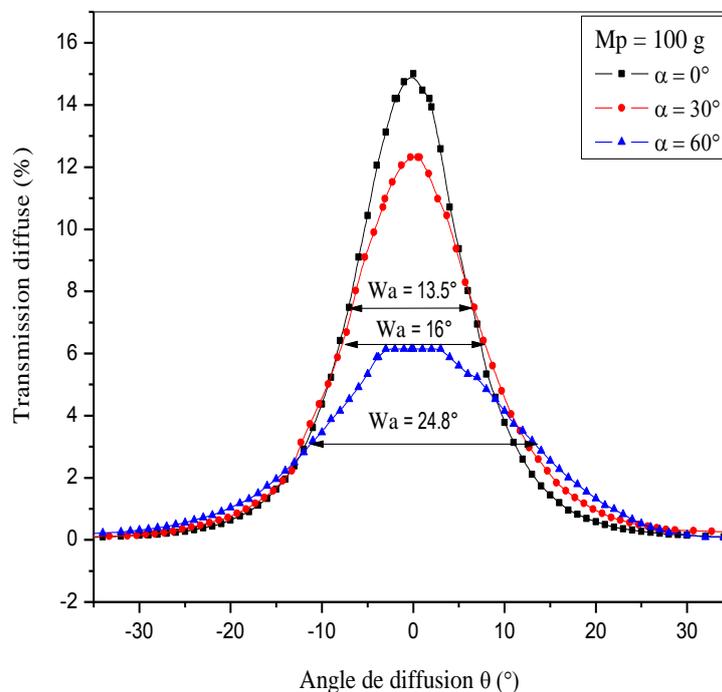


Figure. 16 : Variation de l'élargissement pour une masse projetée de 100g à différents angles d'illuminations.

La figure 17 illustre la variation de l'élargissement en fonction de la masse projetée pour différents angles d'illuminations. Cet élargissement évolue régulièrement en fonction de la masse projetée puis tend vers un palier à partir d'une masse projetée de 50g et ceci pour les différents angles d'illuminations. Pour des masses projetées supérieures à 50g, les résultats obtenus montrent un étalement qui dépasse 83% pour un angle d'illumination de 60°, tandis qu'il est de 44.52% pour un angle d'illumination de 45° et de moins de 21% pour des angles inférieurs à 30°.

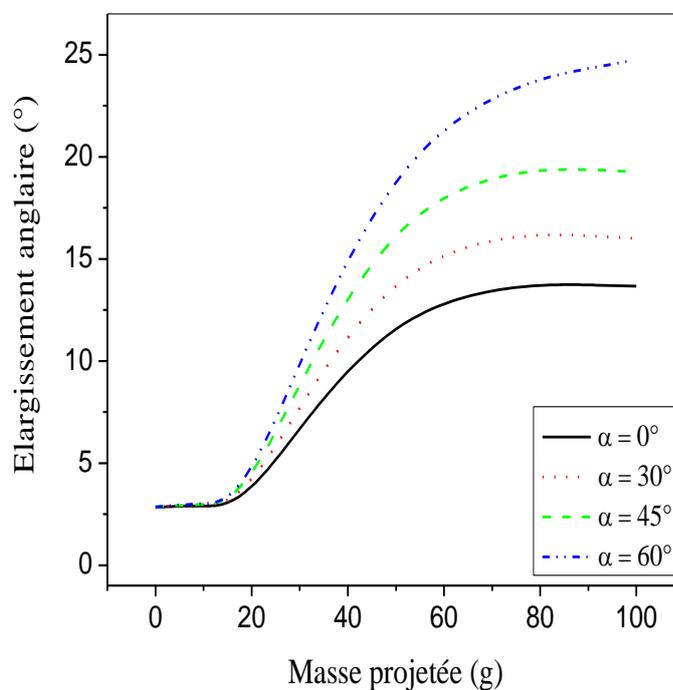


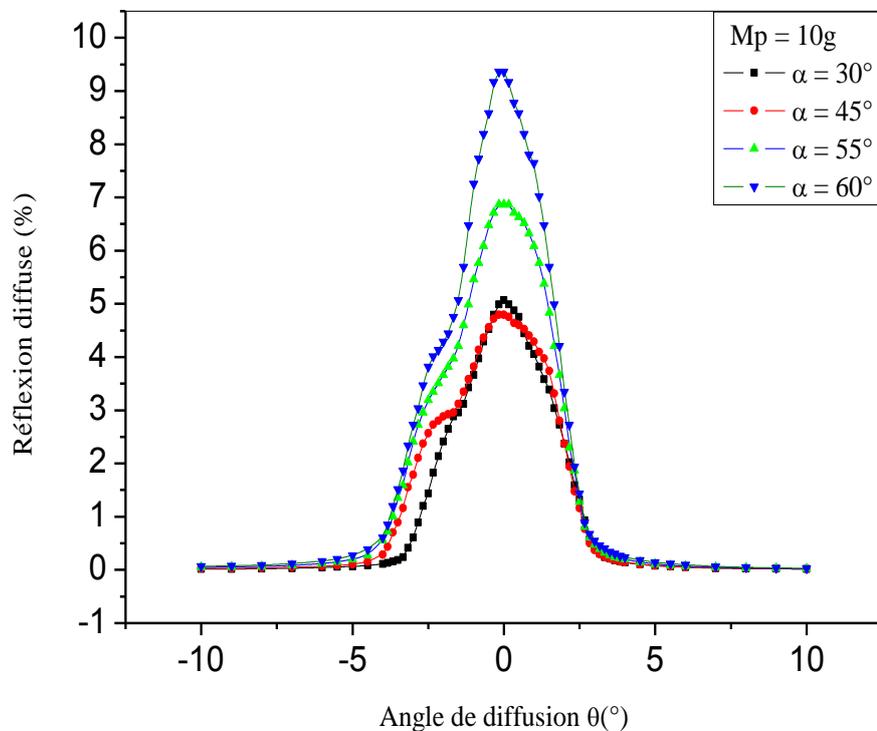
Figure. 17 : Variation de l'élargissement en fonction de la masse projetée pour différents angle d'illuminations.

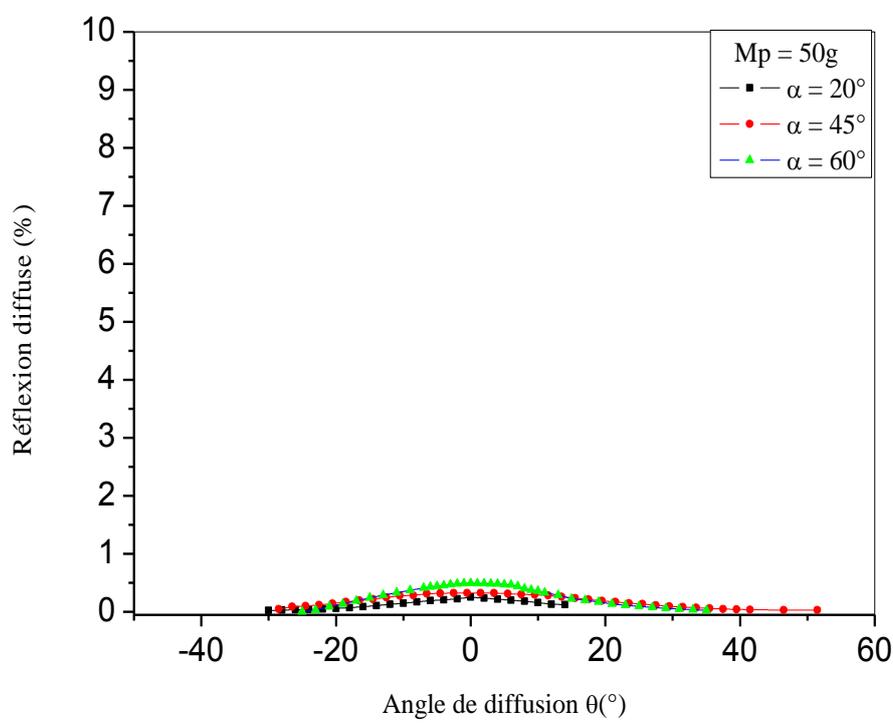
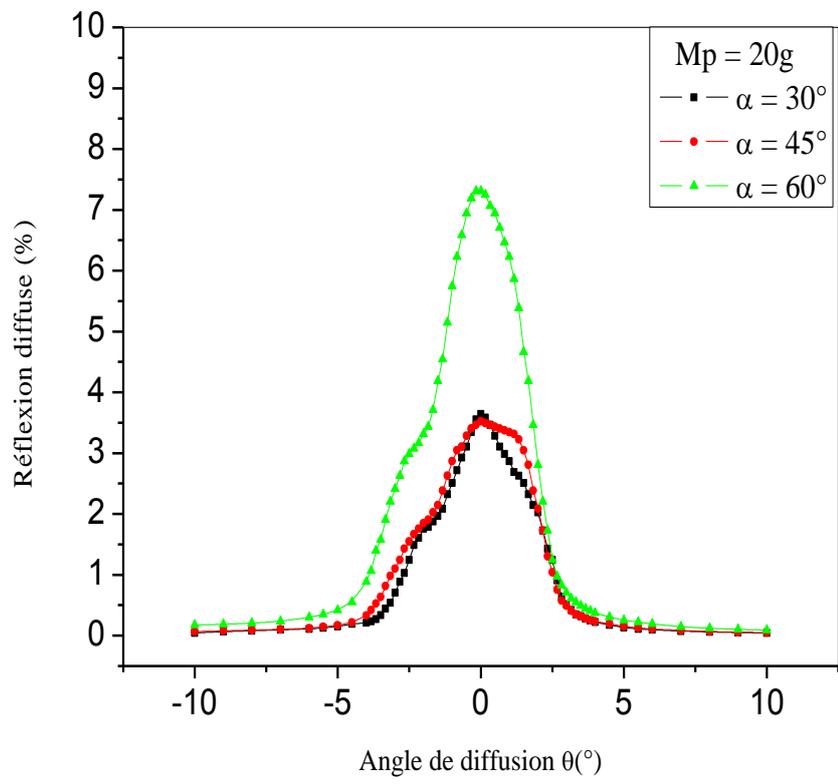
B - Par réflexion

La figure 18 représente l'effet de l'angle d'illumination sur la réflexion optique. On remarque que, pratiquement l'angle d'illumination n'a aucun effet sur la réflexion spéculaire tant qu'elle est inférieure à l'angle de Brewster (56.3°). Au delà de cet angle, la réflexion spéculaire devient très importante. Ce résultat est obtenu dans le cas des faibles masses projetées.

A partir de la figure ci dessous, on a obtenu pour le cas d'une masse projetée égale 10g que la réflexion spéculaire trouvée est de : 4.8% pour un angle d'illumination varié entre 30 et 45° et de 9.34% pour un angle de 60° ; soit une croissance moyenne de 90%. Ce comportement, est en concordance avec les résultats théoriques donnés par les lois de Fresnel.

En effet, la réflexion diffuse est très réduite et elle est inversement proportionnelle à la croissance de l'angle d'illumination. Ceci est prouvé par la faible ouverture des courbes. Pour une masse projetée de 20g l'élargissement obtenu est de 4° et 3.5° pour un angle d'illumination $\alpha = 30^\circ$ et 60° respectivement ; soit une décroissance de 12.5%. La bosse présentée dans le côté gauche des courbes est pratiquement liée à la double réflexion causée par la deuxième face de l'échantillon. De plus, on remarque que l'effet de l'angle d'illumination est très remarquable sur la diffusion de la lumière pour les grandes masses projetées ($M_p \geq 50g$). On constate que la totalité de la lumière réfléchi est diffusée dans des larges angles de diffusion. Par conséquent, la réflexion spéculaire (pic spéculaire) est négligeable et la majorité de l'énergie est dispersée dans tout l'espace.





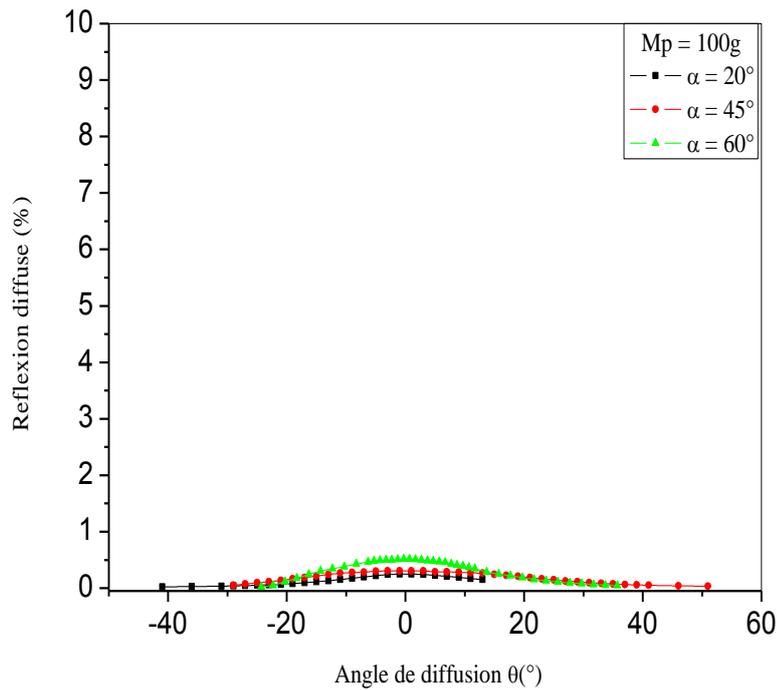
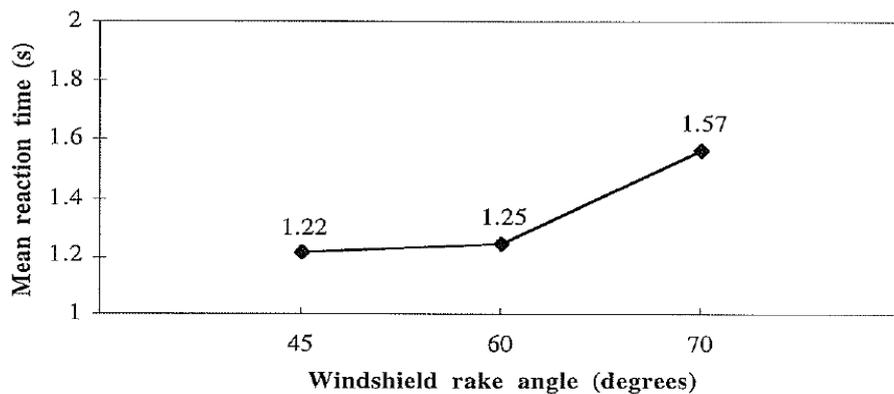


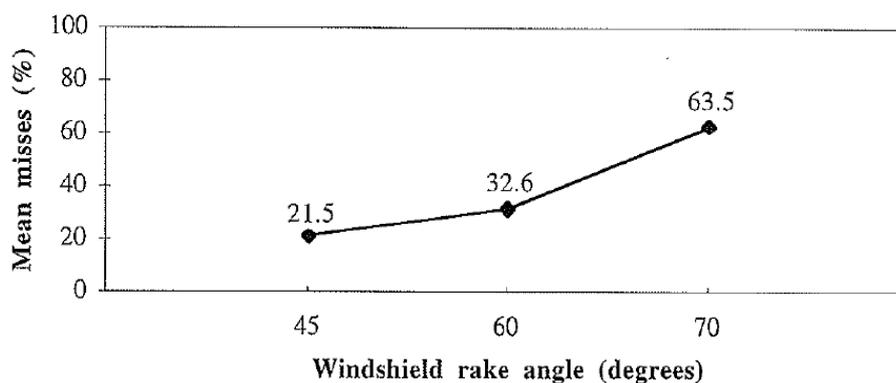
Figure. 18 : Répartition angulaire de la réflexion diffuse en fonction de l'angle d'illumination pour des échantillons sablés par différentes masses projetées.

Par ailleurs, nous avons trouvé que les courbes représentatives de la distribution angulaire de la lumière diffusée deviennent plus étroites (faible élargissement) au fur et à mesure que l'angle d'illumination augmente. Pour une masse projetée de 100g, l'élargissement Wa décroît de 45° à 31.5° pour un angle d'incidence de 45° et 60° respectivement; soit une chute de 30%.

Dans la figure 19, Schumann et al[Schu 97], ont montré que le temps moyen de réaction et le pourcentage des réponses incorrectes ou manquées des conducteurs croissent de manière modéré entre 45° et 60° , puis s'accélèrent au delà de 60° .



-a-



-b-

Figure. 19 : Effet de l'angle d'inclinaison des pare brises sur : a) le temps moyen de réaction, b) le pourcentage des réponses incorrectes ou manquées des conducteurs [Schu 97].

4.3.3. Caractérisation de la dégradation des surfaces sablées par l'indice de diffusion (SLI)

Actuellement, la mesure de la dégradation des pare brises repose essentiellement sur la mesure de l'indice de diffusion de la lumière (SLI : light scattering index). Cette technique s'applique pour évaluer l'état de surface des pare brises. Ce facteur est considéré comme critère de décision, pour maintenir les pare brises en service ou bien les remplacer. Selon la norme DIN 52298-1, la définition de l'indice de diffusion de la lumière SLI est équivalente à la fonction de distribution de la diffusion de la lumière transmise par la surface diffusante à un angle de diffusion égal à 1.8° , multiplié par le facteur de transmission propre de la surface diffusante en question. Ainsi, l'évaluation de SLI est donnée selon la relation mathématique citée à la section 2.4.3. L'unité de l'indice de diffusion « SLI » est le sr^{-1} et parfois, il est exprimé en $\text{cd m}^{-2} \text{lux}^{-1}$ [Pron 06]. On note que les deux unités sont identiques.

En pratique la mesure de la valeur limite de l'indice de diffusion (SLI) donne des informations sur l'état critique des pare brises dégradés. La raison pour laquelle on a cherché à trouver une relation mathématique qui relie l'indice de diffusion (SLI) à la dégradation des pare brises afin de faciliter au maximum le critère de décision.

4.3.3.1. Effet de la masse projetée

La figure 20 représente la variation de l'indice de diffusion (SLI) en fonction de la masse projetée pour différents angles d'illumination. On constate que les différentes courbes ont

pratiquement les mêmes allures d'où on va présenter la courbe moyenne de l'indice de diffusion.

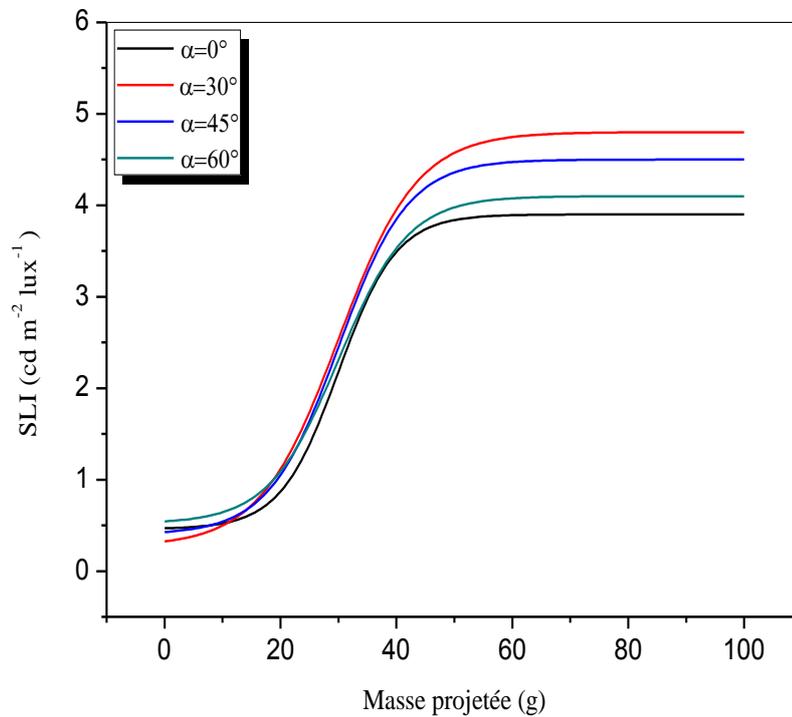


Fig. 20 : Le fit de l'indice de diffusion de la lumière (SLI) en fonction de la masse projetée pour différents angles d'illuminations.

La figure 21, présente la courbe moyenne de l'indice de diffusion en fonction de la masse projetée. Cette courbe montre une croissance régulière de l'indice de diffusion (SLI) puis il se termine par la tendance vers un plateau autour d'une valeur moyenne de 4.5 sr^{-1} , c'est la saturation qui se manifeste à partir d'une masse projetée égale à 50g. A titre de comparaison, on note que les mesures faites par Helmers [Helm 88], sur un pare brise sévèrement dégradé présente un SLI de $3.04 \text{ cd m}^{-2} \text{ lux}^{-1}$. Alors que les mesures de Timmermann [Timm 85], ont donné une valeur de SLI égale à $4.31 \text{ cd m}^{-2} \text{ lux}^{-1}$ pour des pare brises endommagés par frottement des essuies glaces. Dans les mêmes conditions Derkum [Derk 91], a trouvé une valeur de SLI égale à $6.3 \text{ cd m}^{-2} \text{ lux}^{-1}$.

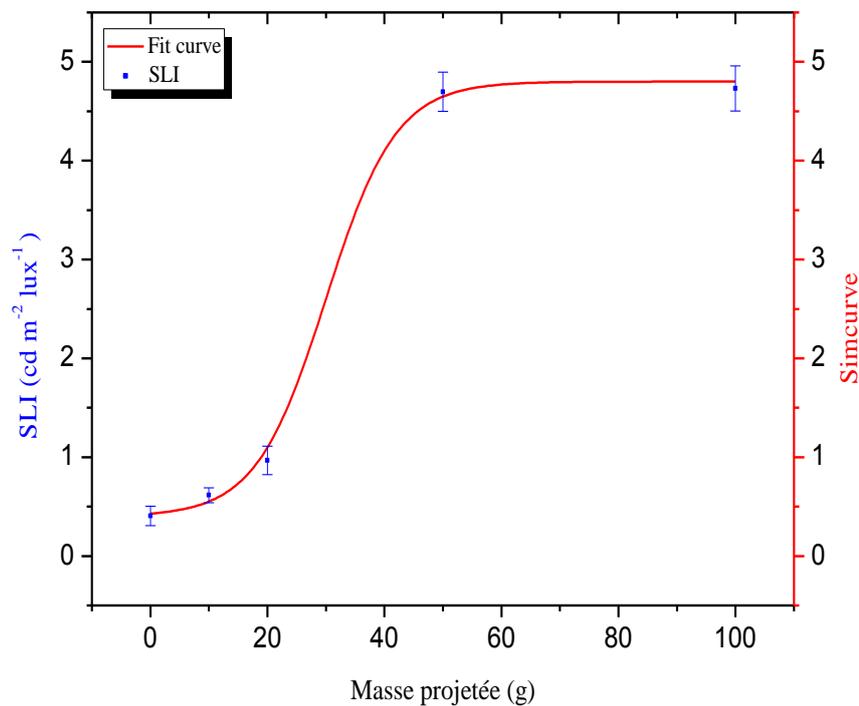


Figure. 21 : Variation de l'indice de diffusion de la lumière (SLI) en fonction de la masse projetée.

Dans la figure 22, nous présentons la courbe moyenne de l'indice de diffusion et la courbe de la rugosité en fonction de la masse projetée à la fois. Il est clair qu'une bonne corrélation existe entre ces deux courbes. En effet, Ceci nous a permis d'établir une relation semi-empirique entre l'indice de diffusion et la rugosité de surface sous la forme :

$$SLI = C Ra + C' \quad (2)$$

avec :

$C = 1.78$ (constante)

$C' = 0.3$ (indice de diffusion du système de mesure)

A partir de cette expression, la valeur limite de la rugosité maximale peut être facilement déterminée de la valeur limite de SLI. Cette relation est obtenue à partir de la courbe de corrélation donnée par la figure 23.

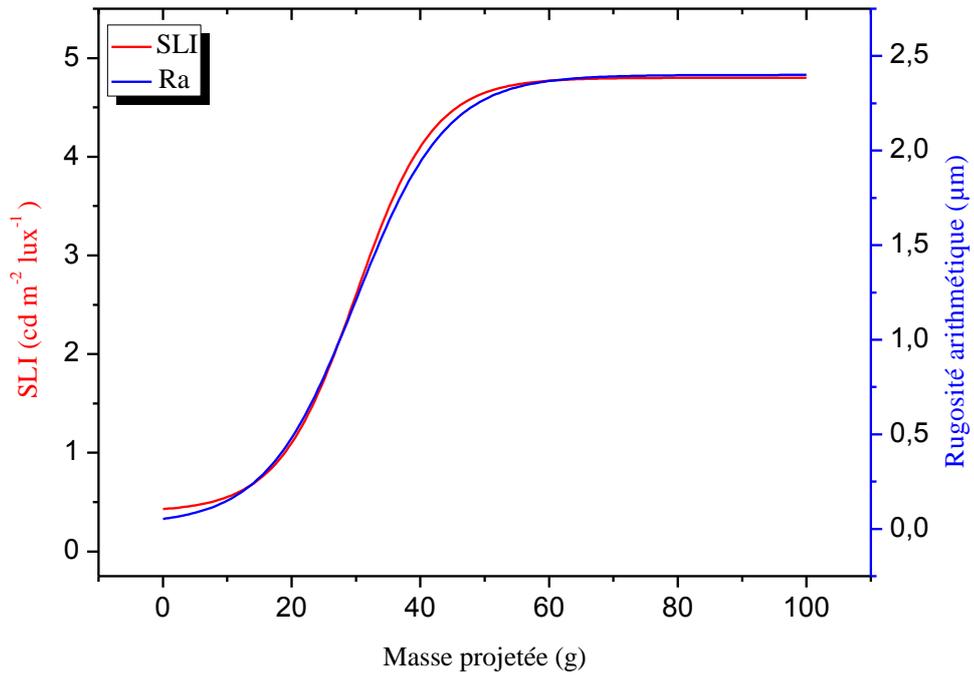


Figure. 22 : Variation de SLI et Ra en fonction de Mp.

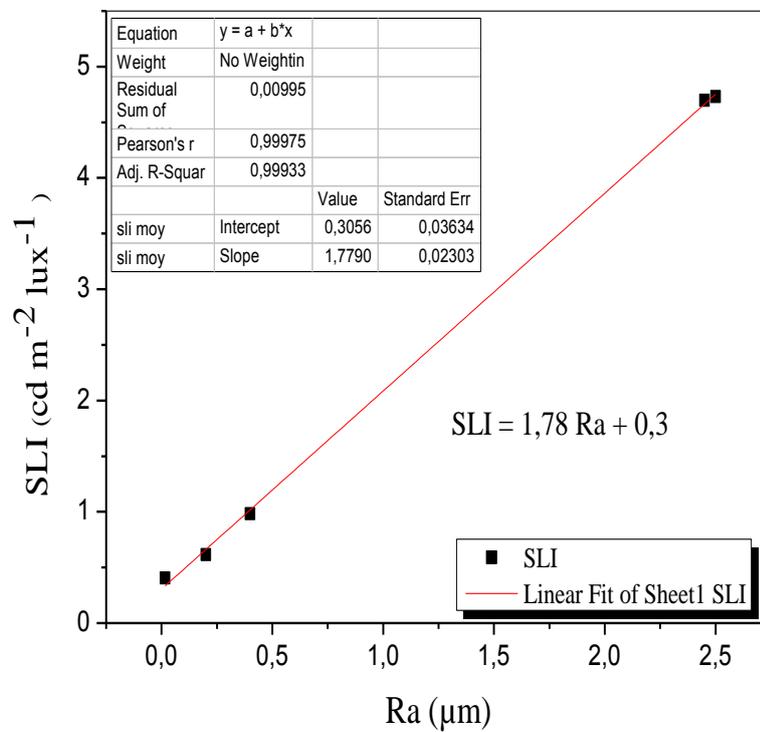


Fig. 23 : Le fit de SLI en fonction de Ra.

Dans la vie quotidienne, cette relation mathématique facilite largement le travail des experts des compagnies des assurances automobiles pour décider à propos le maintien ou le rejet des pare brises endommagés par l'érosion.

4.3.3.2. Effet de l'angle d'illumination

La figure 24 représente l'évolution de l'indice de diffusion en fonction de l'angle d'illumination à différentes masses de particules de sable projetées. On constate que l'indice de diffusion est relativement constant sur toute la gamme de mesure de l'angle d'illumination (α) et ceci à la limite des erreurs de mesure. A partir de cette figure, on peut en déduire que l'échantillon de référence et ceux érodés par des faibles masses présentent des valeurs de SLI inférieures à celles de la limite de la bonne vision qui est de 1.5. Ce qui correspond au domaine de la vision nette. Tandis que les échantillons érodés par de fortes masses présentent un domaine de la vision floue.

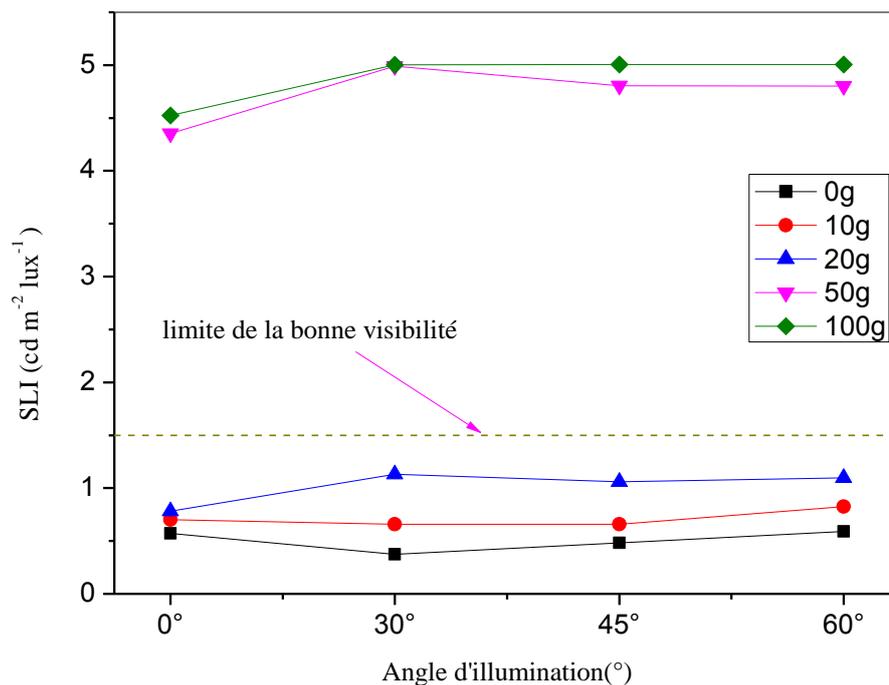


Figure. 24 : Variation de l'indice de diffusion en fonction de l'angle d'illumination pour différentes masses projetées

4.3.4. Combinaison des deux paramètres

La combinaison des deux paramètres étudiés délimite deux domaines. Il s'agit du domaine de la transparence et celui du flou. La distinction entre ces deux domaines peut se faire à partir de la transmission limite ou l'indice de diffusion limite

A- Transmission limite « T_{\min} »

La figure 25 montre les différents domaines en fonction de la masse projetée et de l'angle d'illumination. Il s'agit du domaine de transparence où la transmission spéculaire est prédominante et celui du flou qui correspond à une prédominance de la transmission diffuse. En dehors de ces deux domaines, nous avons défini le domaine mixte. Dans ce dernier, l'élargissement de ces deux domaines dépend des valeurs définies de la rugosité et de l'angle d'illumination en même temps.

Selon B. Savaète[Sava 03], la transmission minimale (T_{\min}) tolérée pour un pare brise est de 75% en Europe, alors qu'elle vaut 70% aux USA et au Japon. Quant à Derkum [Derk93], il a indiqué que la valeur exacte de la transmission minimale, à partir de laquelle la vision des conducteurs devient flou, est comprise entre 60% et 70%. Adjouadi et al [Adjo 07] ont rapporté que les verres érodés par sablage présentent une transmission minimale de 73%.

- **Détermination des limites des deux domaines**

Dans ce travail, on opte à déterminer les limites des deux domaines, en se référant à la valeur de la transmission limite obtenue par Adjouadi et al[Adjo 07].

Dans ce cas ($T_{\min} = 73\%$), on a trouvé les valeurs limites suivantes.

-Domaine de la transparence :

Les valeurs limites trouvées sont : $Ra_{\max} = 0,26\mu\text{m}$ et $\alpha_{\max} = 60^\circ$.

-Domaine du flou :

Les valeurs limites trouvées sont : ($Ra_{\min} = 0,59\mu\text{m}$) et α est indifférent $\alpha \geq 0^\circ$.

-Domaine mixte :

Ce domaine est défini par les limites suivantes :

$$0,26\mu\text{m} \leq Ra \leq 0,59\mu\text{m}$$

$$0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ.$$

Les valeurs extrêmes de la rugosité permettent de limiter les deux domaines de transparence et du flou. On note que dans le domaine mixte, on peut élargir les deux domaines par combinaison des deux paramètres à la fois. A titre d'exemple si on prend $M_p = 18.3g$ et $\alpha = 60^\circ$, on est dans le domaine du flou ($T = 67.46\%$) alors que pour la même masse projetée $M_p = 18.3g$ et avec $\alpha = 0^\circ$ le domaine correspondant est le domaine de la transparence $T=78.34\%$. Exemple.2, pour une valeur de l'angle d'illumination $\alpha = 45^\circ$ et avec $M_p=15.54g$ le domaine correspondant est le domaine de la transparence ($T=75.4\%$) alors que pour le même angle d'illumination ($\alpha = 45^\circ$) mais avec $M_p = 21.3g$, le domaine correspondant est le domaine du flou ($T=65.5\%$).

Conclusion : Pour une masse de particules de sable projetée fixe, et un angle d'illumination variable, Le domaine de la transparence et celui du flou changent.

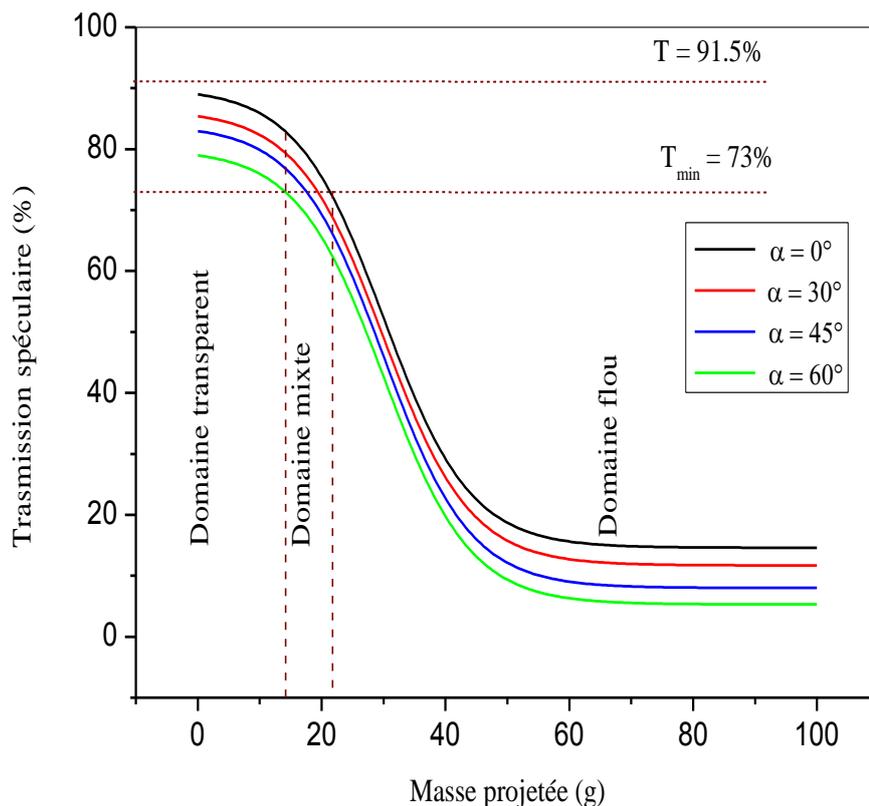


Fig. 25 : Détermination du domaine transparent, mixte et flou en fonction de la masse projetée et de l'angle d'illumination [Bent 12].

B - Valeur limite de l'indice de diffusion « SLI »

On peut déterminer le domaine de la bonne vision et celui du flou à partir du calcul de la valeur limite de l'indice de diffusion de la lumière SLI. Selon la Norme DIN 52298-1, la valeur minimale de SLI appliquée pour une bonne vision est de $1.5 \text{ cd m}^{-2} \text{ lux}^{-1}$. De la figure 24 précédente, on a constaté que l'angle d'illumination n'a aucun effet significatif sur le changement de l'indice de diffusion SLI. Par conséquent, la distinction entre ces deux domaines dépend seulement de la valeur limite de la masse projetée. Ainsi le domaine mixte obtenu est pratiquement négligeable.

- **Détermination des limites des deux domaines**

La valeur minimale de la masse des particules de sable projetée qui sépare le domaine de la bonne vision de celui du flou est de 23.56 grammes (figure. 26). Cette valeur limite donne une rugosité minimale de $0.68 \mu\text{m}$ (figure. 27).

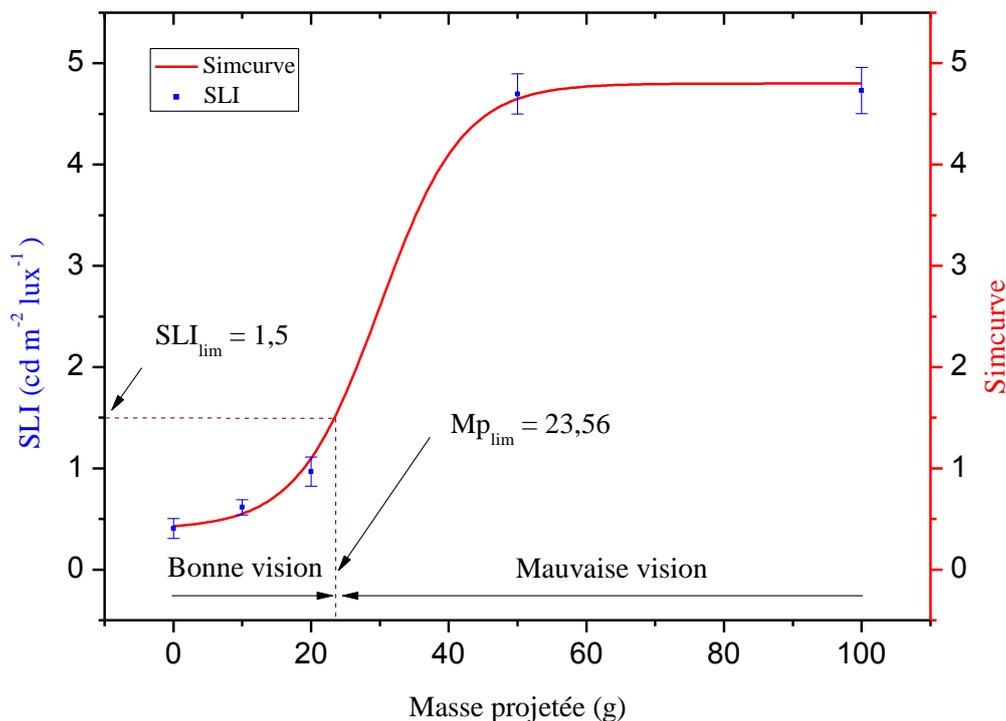


Figure .26 : Représentation des différents domaines de vision en fonction de l'indice de diffusion et de la masse projetée.

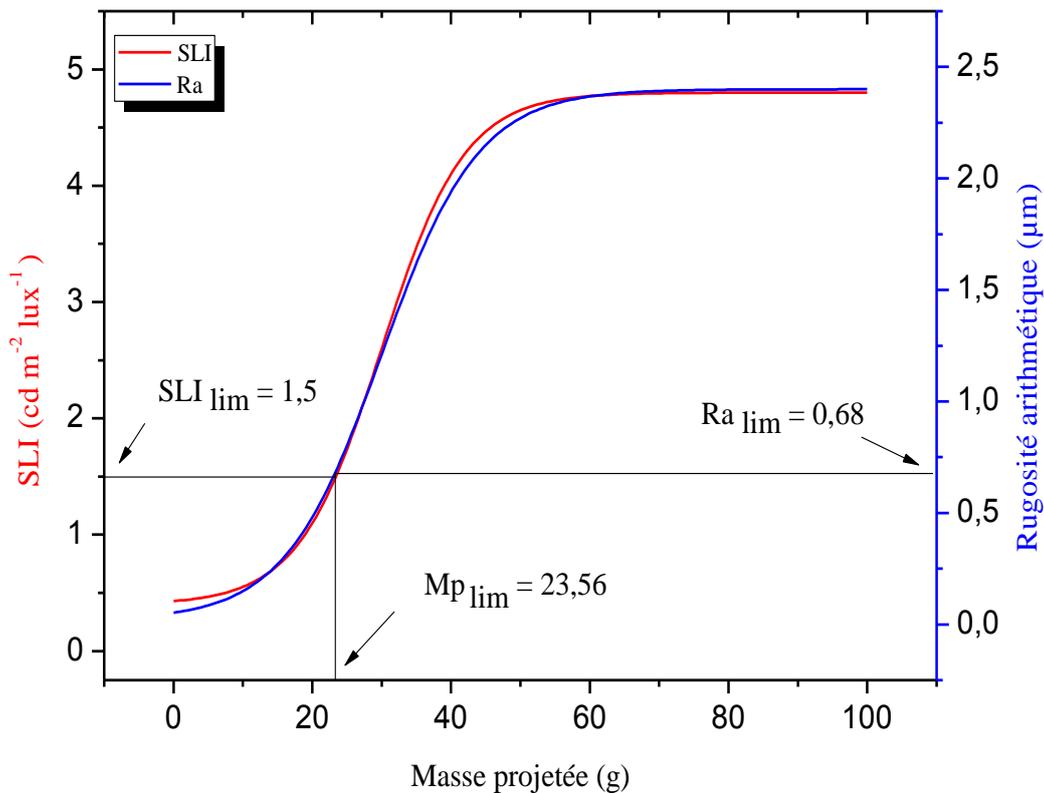


Figure .27 : Détermination graphique de la valeur limite de la rugosité à partir de la valeur limite de l'indice de diffusion ($SLI = 1.5 \text{ cd m}^{-2} \text{ lux}^{-1}$).

La valeur limite de la rugosité qui sépare les deux domaines est déterminée directement, en utilisant les relations semi-empiriques déjà établies précédemment. Il s'agit de la relation de Ra en fonction de Mp (ou temps de sablage) et de l'indice de diffusion en fonction de la rugosité Ra. Si on prend la valeur $1.5 \text{ cd m}^{-2} \text{ lux}^{-1}$ pour l'indice de diffusion tel qu'il est recommandé par la Norme DIN 52298-1 la limite qui sépare le domaine de la bonne vision de celui du flou correspond à une rugosité :

$$Ra_{\text{lim (semi-empirique)}} = 0.67 \text{ } \mu\text{m}$$

En se basant sur cette relation semi-empirique établie, nous avons essayé de déterminer la valeur minimale de l'indice de diffusion SLI relative à nos résultats des essais obtenus dans la première partie.

On rappelle que les limites des deux domaines obtenus dans la première partie correspondent aux limites supérieures car on a référé à $T_{\text{min}} = 73\%$ qui est relativement grande

en comparaison avec ce que B. Savaète[Sava 03] et Derkum [Derk93] ont rapporté. De plus, la largeur du domaine de transparence décroît (Ra_{lim} devient très faible) au fur et à mesure que l'angle d'illumination augmente. Par conséquent, la valeur limite de la rugosité qui correspond à un large domaine de transparence est donné pour une incidence normale ($\alpha = 0^\circ$), Soit $Ra_{lim} = 0.59\mu m$.

Dans ces conditions, la valeur limite de l'indice de diffusion SLI qui limite le domaine de la bonne vision de celle de la mauvaise vision vaut (figure. 28) :

- $SLI_{(graphique)} = 1.31 \text{ cd m}^{-2} \text{ lux}^{-1}$.
- $SLI_{lim (semi-empirique)} = 1.35 \text{ cd m}^{-2} \text{ lux}^{-1}$.

On constate que la valeur limite de l'indice de diffusion obtenue par voie graphique est presque identique à celle obtenue par voie semi-empirique. Elle est relativement inférieure à celle imposée par la Norme DIN, mais l'intervalle de la bonne vision reste toujours respecté puisqu'il est inclus dans ce qui est imposé par cette dernière. La faible différence marquée revient essentiellement aux choix de (T_{min}). Timmermann[Timm 85], a rapporté qu'après l'expérience de temps de réadaptation des conducteurs et celle de la distance de détection des objets à travers un pare-brise usé, les valeurs limites de l'indice de diffusion trouvés sont $1.1 \text{ cd m}^{-2} \text{ lux}^{-1}$ et $1.7 \text{ cd m}^{-2} \text{ lux}^{-1}$ respectivement.

En concluant, la valeur limite de l'indice de diffusion $SLI_{lim}=1.31 \text{ cd m}^{-2} \text{ lux}^{-1}$ qu'on a trouvée de nos essais est incluse dans l'intervalle [1.1-1.7] qui est rapporté par Timmermann et elle est adaptée à nos objectifs (type d'essais). La valeur de SLI obtenue dans notre cas représente la limite minimale. Quant à la limite maximale, elle peut se déduire d'une façon similaire (par voie semi-empirique et par voie pratique), tout en se référant dans ce cas à la borne minimale de T_{min} rapporté par B. Savaète (soit $T_{min} = 70\%$).

Sous cette condition précédente et pour une incidence normale ($\alpha=0^\circ$), la masse limite projetée est obtenue par interpolation à partir du graphe $T = f(Mp)$ (voir figure 29). A partir de cette valeur limite de la masse projetée ($Mp_{lim}=22.76g$) qui correspond à une rugosité ($Ra_{lim}=0.67\mu m$), la valeur limite de SLI est déduite semi-empiriquement et graphiquement. En effet, la valeur limite de SLI obtenue par les deux voix sera :

- $SLI_{lim (semi-empirique)} = 1.49 \text{ cd m}^{-2} \text{ lux}^{-1}$.
- $SLI_{(graphique)} = 1.44 \text{ cd m}^{-2} \text{ lux}^{-1}$ (voir figure 30).

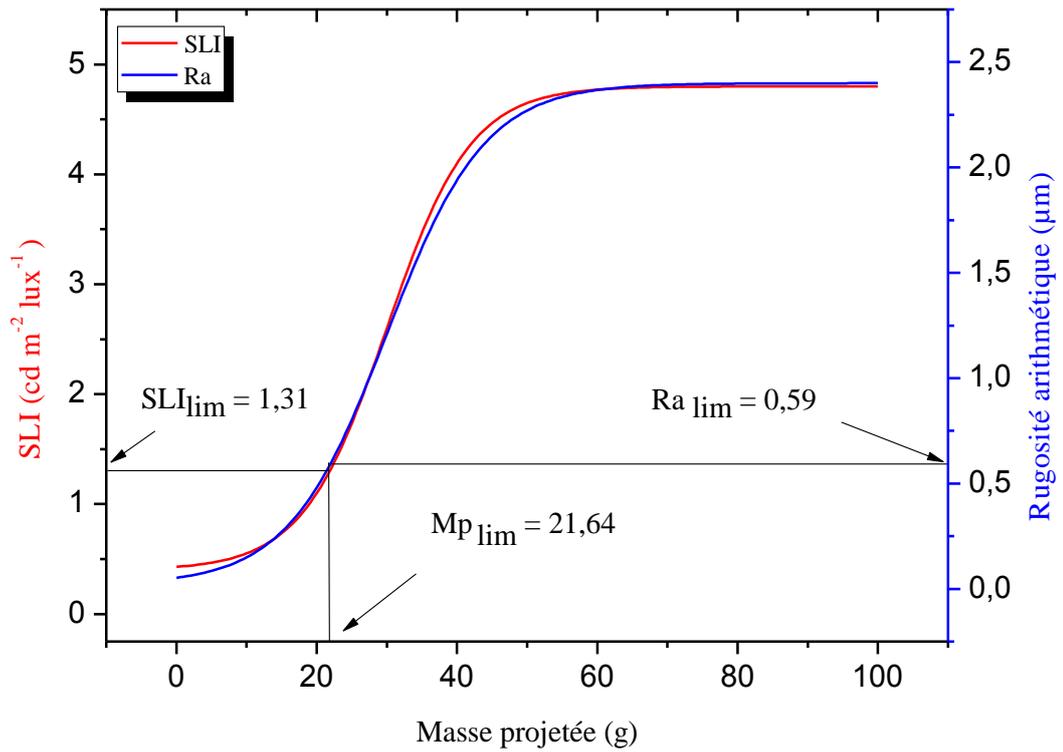


Figure .28 : Détermination graphique de la valeur limite SLI à partir de la rugosité limite ($Ra_{lim}=0.59\mu m$).

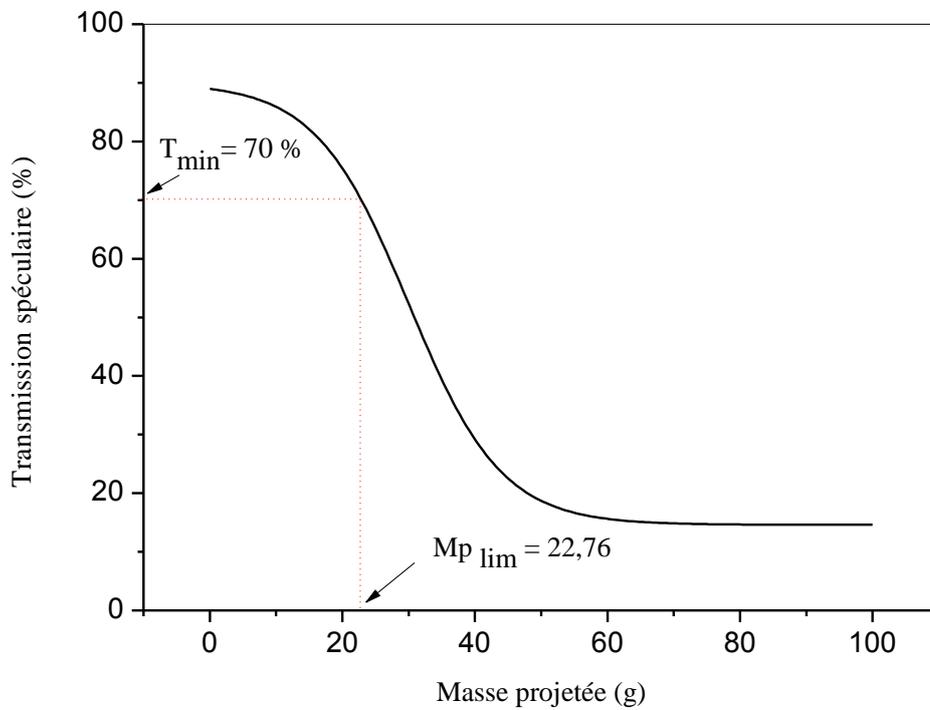


Figure .29 : Détermination graphique de la valeur limite de la masse projetée à partir de la transmission limite minimale ($T_{min}=70\%$).

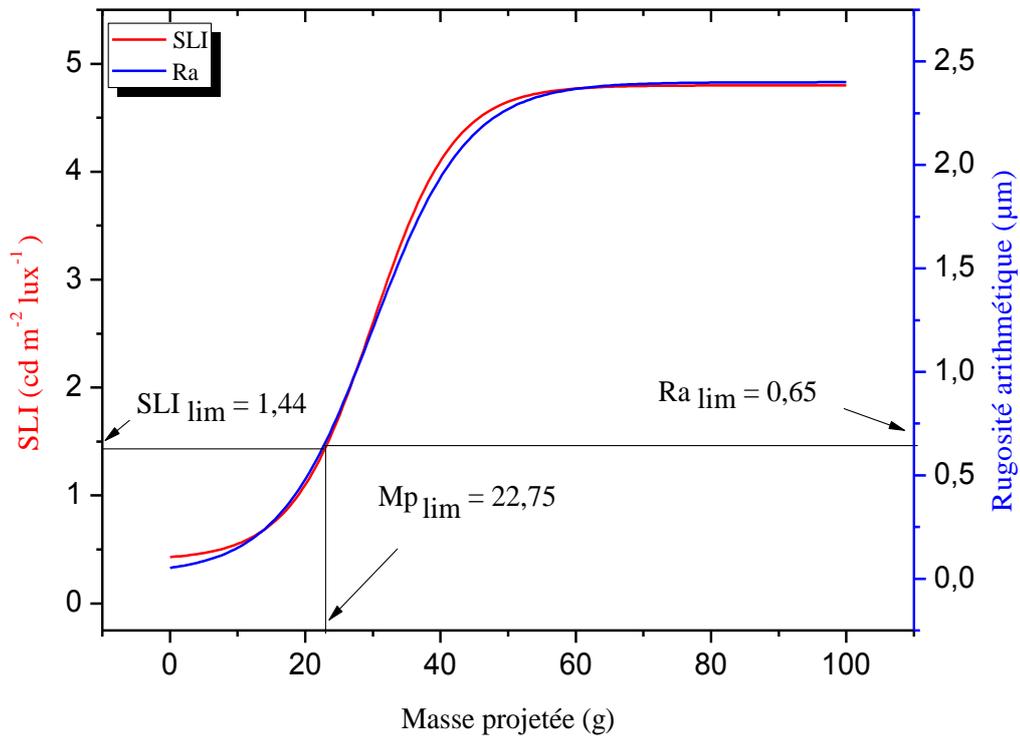


Figure .30 : Détermination graphique de la valeur limite SLI à partir de la masse projetée limite ($M_{p\lim}=22.75g$).

On constate clairement que les deux valeurs de l'indice de diffusion « SLI » sont assez identiques et qu'elles sont très proches de la valeur limite $1.5 \text{ cd m}^{-2} \text{ lux}^{-1}$ imposée par la norme DIN. De ceci, on peut conclure que nos résultats obtenus précédemment sont bien justifiés. Par ailleurs, la relation établie est assez correcte et reflète bien les résultats pratiques. Donc, on peut la considérer comme une relation de base pour un contrôle direct. Ceci est réalisé par l'évaluation de niveau de diffusion de la surface analysée, caractérisée par la valeur de l'indice de diffusion, qui reflète le taux de dégradation de la surface testée.

Références

- [Adjo 07] Adjouadi, N. Laouar, C. Bousbaa, N. Bouaouadja and G. Fantozzi. Study of light scattering on a soda lime glass eroded by sandblasting. *J. Eur. Ceram. Soc.*, **27**, (2007), pp 3221–3230.
- [Bent 07] S. Benterki, N. Laouar, C. Bousbaa et N. Bouaouadja. Diffusion de la lumière en transmission d'un verre sodo-calcique érodé par impacts de sable. Colloque international, Contrôle et mesure optique pour l'industrie, SFO, (2007), Arcachon France.
- [Bent 11] S. Benterki, N. Laouar, C. Bousbaa and N. Bouaouadja. Effect of illuminating angle and roughness on the angular scattering light. International Science and Technology Conference. (2011), Istanbul. Turkey.
- [Bent 12] S. Benterki, N. Laouar, C. Bousbaa, N. Bouras and N. Bouaouadja. Influence of the angle of illumination on light scattering by sandblasted soda–lime–silica glass. *Glass Technol.: Eur. J. Glass Sci. Technol. A*, **53**, (2012), pp 53–59.
- [Boua 04] A. Bouaziz, Etude des propriétés d'un verre sodo-calcique érodé avec du sable de Ouargla. Mémoire de Magister, Institut d'optique et mécanique de précision, (2004), pp 57.
- [Bous 98] C. Bousbaa, M. A. Madjoubi, M. Hamidouche and N. Bouaouadja. Effects of durations of sand blasting on the properties of windows glass. *Glass Technol.: Eur. J. Glass Sci. Technol.*, **39**, (1998), pp. 24-26
- [Bouz 00] S. Bouzid and N. Bouaouadja. Effects of impact angles on glass surface eroded by sand blastin g. *J. Eur. Ceram. So.*, **20**, (2000), pp 481- 488.
- [Bruh 92] Bruhat, G. (1992). *Optique*. Sixième édition Masson, Paris, pp 380-401
- [Derk 91] H. Derkum. Stray light in windshields – measurement and effect. Paper presented at the vision in vehicles, (1991).
- [Derk 93] H. Derkum. Effects of various transmission levels in windshields on perception. *Vision in vehicles IV*, Amsterdam:North-Holland, (1993), pp 63-68.
- [DIN 98] DIN 52298-1. (1998). Road vehicles - Measurement of scattered light of safety glazing materials for vehicle glazing - Part 1: Annular diaphragm method. German National Standard.

[Helm 88] G. Helmers and S. Lundkvist. Detection distances to obstacles on the road seen through windscreens in different states of wear. Rapport 339A, Linköping : Swedish Road and Traffic Research Institute, (1988).

[Madj 99] M. A. Madjoubi C. Bousbaa, M. Hamidouche and N. Bouaouadja. Weibull statistical analysis of the mechanical strength of a glass eroded by sand blasting. J. Eur. Ceram. Soc. 19, (1999), pp2957-2962.

[Mala 98] D. Malaise. Technical Measurement on Cars Windows to Ensure Visibility and Security. Institut Belge pour la Securite Routiere (ISBR), (1988).

[Mahd 07] T. Mahdaoui. Etude des défauts générés par impact de sable et leurs influence sur la lumière parasite :application aux pare-brise. Thèse de doctorat d'état, D.O.M.P, (2007), pp 85.

[Marx 90] E. Marx and T. V. Vorburger. Direct and inverse problems for light scattered by rough surfaces. Appl. Opt, 29, (1990), pp 3613-3626.

[Owen 92] D. Owens, M. Sivak, G. Helmers, T. Sato, D. Battle and E. Traube. Effects of light transmittance and scatter by windshields on visual performance. Rapport N°37, UMTRI, (1992).

[Pron 06] N. Pronk, B. Fildes, M. Regan, M. Lenné, N. Truedsson and T. Olsson. Windscreens and safety. A Review, Monash University, 183, (2006), pp 04-07.

[Sava 03] B. Savaète. Vitrage de l'automobile. Verre, 9, (2003), pp 36-47.

[Schu 97] J. Schumann, M. Flannagan, M. Sivak and E. Traube. Daytime veiling glare and driver visual performance: influence of windshield rake angle and dashboard reflectance. Journal of Safety Research, 28, (1997), pp133-146.

[Timm 85] 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), pp 9-13.

[Vorb 88] T. V. Vorburger, L. X. Cao, C. H. W. Giauque, J. Raja, D. E. Gilsinn and L. Fullana. Optical scattering from rough surfaces: experiment and theory. Appl. Opt, 32, (1988), pp 308-316

[Waet 92] R. Waetjen et al.. Influence of tint and tilt on recognition distance under mesopic conditions. *German Journal of Ophthalmology*, **1**, (1992), pp424-428.

Conclusion générale

Dans cette étude nous avons étudié l'influence de la masse projetée et de l'angle d'illumination d'un verre érodé par sablage sur la transmission et la réflexion diffuse de la lumière.

Dans un premier temps, nous avons étudié l'effet de chaque paramètre séparément. En ce qui concerne l'effet de l'état de surface nous avons constaté que la transmission et la réflexion spéculaire décroissent avec la croissance de la rugosité puis tendent vers un palier autour de 15% et 0.3% respectivement.

La saturation de la rugosité a eu lieu pour une masse de sable projetée de 50g. Ce qui correspond à une dégradation maximale de la surface ($R_a = 2.5\mu\text{m}$).

Pour les faibles masses projetées, la perte de la transmission se trouve autour de 12% , elle est attribuée essentiellement à la réflexion.

Pour les fortes masses projetées, la perte de la transmission est de 80%, elle se fait par transmission et par réflexion.

Réciproquement à la chute de la transmission et de la réflexion, la diffusion croit avec la croissance de la dégradation de l'état de surface.

Quant à l'effet de l'angle d'illumination, on a constaté une atténuation de la transmission spéculaire et un étalement progressif des courbes de diffusion au fur et à mesure que l'angle d'illumination augmente. On a trouvé que pour des masses projetées supérieures à 50g, la transmission spéculaire chute de 58.82% pour un angle $\alpha = 60^\circ$ et de 18.4% pour un angle α de 30° .

Dans un deuxième temps, nous avons combiné entre les deux paramètres l'état de surface et l'angle d'illumination pour délimiter le domaine de transparence et celui du flou. Ceci est réalisé tout en se basant sur la valeur de la transmission minimale qui est de 73% et la valeur limite de l'indice de diffusion ($SLI = 1.51.44 \text{ cd m}^{-2} \text{ lux}^{-1}$) imposée par la norme DIN.

Une relation semi-empirique qui relie l'indice de diffusion SLI à la rugosité R_a est établie. Cette dernière fait l'outil théorique de contrôle des résultats pratiques trouvés.

La limite supérieure du domaine de transparence est définie pour une rugosité $R_a = 0,67\mu\text{m}$ et une valeur limite de l'indice de diffusion égale à $1.44 \text{ cd m}^{-2} \text{ lux}^{-1}$.

On peut dire que la relation semi-empirique établie entre l'indice de diffusion de la lumière et la rugosité constitue un modèle semi-empirique qui aide à évaluer la limite de la bonne visibilité et celle du flou pour un pare brise endommagé par érosion ou par rayure des essuies glace.

En perspective, nous voulons étudier l'effet du paramètre ' taille des particules de sable' sur la rugosité, la transmission, la réflexion, la diffusion de la lumière et en particulier sur le changement de la valeur limite de la rugosité 'Ra' et de l'indice de diffusion 'SLI' qui sépare le domaine de la transparence et celle du flou. La procédure de sablage est en cours de réalisation sur une gamme de taille de grains allant de 0.1 μm au plus de 1.7mm, répartie sur cinq intervalles. Par ailleurs, nous souhaitons de faire une modélisation de la rugosité, la transmission, la réflexion et si possible la diffusion, sachant que les fonctions qui gouvernent ces deniers sont déjà déterminés.

Résumé

Il est bien connu que la vision des conducteurs de véhicules est influencée par la lumière diffusée causée par des pare brises endommagés. Ceci est particulièrement manifeste durant la nuit, le lever et le coucher du soleil. Cette lumière diffusée dépend de plusieurs facteurs tels que l'angle d'inclinaison, l'intensité de la source lumineuse et l'état de surface des pare brise. L'objectif de notre travail est d'étudier l'influence de l'angle d'illumination sur la diffusion par réflexion et par transmission de la lumière sur un verre silico sodo calcique érodé par sablage.

En premier lieu, on a étudié l'effet de l'angle d'illumination et la masse projetée indépendamment. Les résultats obtenus montrent que le nombre de défauts créés augmente avec l'augmentation de la masse projetée jusqu'à l'état de saturation qui est atteint à 50g dans les conditions de sablage choisies (taille des grains de sable et angle d'impact). Dans ce cas, la transmission et la réflexion spéculaire décroît régulièrement avec la masse de sable projetée et tend par la suite vers un palier situé vers 15% et 0.3% respectivement. Ainsi la perte de la transmission est de l'ordre de 80% et elle attribué essentiellement à la perte par réflexion et par diffusion. Quant à l'effet de l'angle d'illumination, le comportement de la transmission et de la réflexion est totalement différent. Nous avons constaté que l'angle d'illumination affecte énormément la transmission et favorise en parallèle la diffusion sur toute la gamme de mesure (0-60°) alors que son comportement vis à vis la réflexion est conditionné par l'angle de Brewster.

Dans un deuxième temps, nous avons combinés entre ces deux paramètres étudiés afin de définir la limite du domaine de la bonne vision et celle de la mauvaise vision tout en se référant aux valeurs limites de la transmission (T_{\min}) et de l'indice de diffusion (SLI_{\min}). Les résultats obtenus montrent que la limite de la bonne vision est donné par la valeur limite $1.44 \text{ cd m}^{-2} \text{ lux}^{-1}$ de SLI qui correspond à un état de dégradation caractérisé par une rugosité superficielle de l'ordre de $0.67\mu\text{m}$. Cette limite est suffisamment proche de la valeur $1.5 \text{ cd m}^{-2} \text{ lux}^{-1}$ recommandée par la norme DIN. Par ailleurs, cette dernière a été vérifiée par la relation semi-empirique établie entre l'indice de diffusion (SLI) et la rugosité (R_a).

Finalement, à la lumière des résultats obtenus et la relation établie, il semble bien que cette dernière constitue un modèle semi-empirique pour une évaluation directe de la limite de la bonne visibilité à travers les pare brises endommagés, en terme de la valeur critique de SLI lors d'un contrôle du taux de dégradation de la surface analysée.

Abstract

It is well known that vehicle drivers vision is influenced by scattered light caused by damaged windshields. This occurs particularly at night and during sunrise and sunset. This scattered light depends on various factors such as the inclination angle, the light intensity source and the windshields surface state. The objective of our work is to study the influence of the illumination angle on the light reflection and transmission scattered on a sandblasted soda–lime–silica glass.

First of all, the illumination angle and the projected sand mass effects on light scattering were studied independently. The results obtained show that the number of created defects increases with the projected sand mass until a saturation state is reached for a 50 g sand mass under the chosen sandblasting conditions (grain size and sandblasting incident angle). For this mass, both the specular reflection and transmission decrease and reach a constant value of 15% and 0.3% respectively. This corresponds to a transmission loss of about 80% that is caused essentially by the loss of reflection and scattering. Concerning the illumination angle effect, the transmission and reflection behavior is totally different. We have found that the illuminating angle greatly affects the transmission and promotes at

the same time scattering across the measurement range (0-60°). The reflection behavior is instead conditioned by the Brewster angle.

We then combined these two studied parameters to define the domain limits for a good or impaired vision while referring to the index scattering light SLI_{min} and the transmission T_{min} limits values. The results show that the good vision limit SLI value limit is $1.44 \text{ cd m}^{-2} \text{ lux}^{-1}$ corresponding to a degradation state characterized by a surface roughness of about $0.67\mu\text{m}$. This limit is very close to the DIN standard recommended value ($1.5 \text{ cd m}^{-2} \text{ lux}^{-1}$). Moreover, the obtained value was verified by a semi-empirical relationship established between the index scattering light (SLI) and the roughness (Ra).

Finally, in light of the obtained results and the established relationship, it seems that the developed semi-empirical model constitutes a practical direct evaluation for a good visibility through a damaged windscreen in terms of a SLI critical value during a windshield surface degradation control.