## ETUDE DES POSSIBILITES D'AMELIORATION DE LA TRANSMISSION OPTIQUE D'UN VERRE SODOCALCIQUE ERODE PAR SABLAGE

N. Bouaouadja, M. Madjoubi, M. Kolli, C. Bousbaa, M. Hamidouche

Laboratoire des Matériaux Non Métalliques,

Institut d'Optique et de Mécanique de Précision

Université Ferhat Abbas, Sétif 19000 – Algérie

E-mail: n.bouaouadja@yahoo.fr

## Résumé:

L'objectif de ce travail consiste à améliorer la transmission optique (TO) d'un verre de pare-brise soumis à un sablage. Pour cela, nous avons tenté une voie préventive et deux voies correctives :

- Au début, nous avons appliqué un recuit, une trempe thermique et une trempe chimique par échange ionique), avant de procéder aux opérations de sablage. L'influence de ces traitements sur le taux d'érosion E, montre que la trempe thermique donne la meilleure résistance à l'érosion.
- Par la suite, nous avons déposé sur la surface érodée, des couches minces de matière transparente (résines, colles, polymères). Les résultats montrent que le PVB et le PES présentent la meilleure transparence. La TO du verre passe de 91,6% (état initial) à 27% (état sablé). Après revêtement par PVB et PES, TO s'améliore nettement et atteint respectivement 87% et 81%.
- Enfin, nous avons tenté de réduire la rugosité de surface. Pour cela, les échantillons sablés sont soumis à une attaque chimique par une solution d'acide fluorhydrique à 3% pour différentes durées. Les résultats obtenus montrent qu'après 8H d'attaque, TO augmente jusqu'à 47%, mais reste insuffisante.

Mots clés: Couche mince, Transmission optique, Trempe, Sablage, Verre sodocalcique.

## 1. INTRODUCTION

Il est bien connu que dans le Sahara, les vents de sable ont une grande influence sur l'environnement. problèmes Les désertification, de transport de poussières sahariennes dans plusieurs régions du monde, les déplacements des dunes, l'ensablement des routes, des maisons, des oasis, les maladies ophtalmiques et pulmonaires,... sont des conséquences notoires. Dans la vie courante des citoyens, cette influence des vents de sable se traduit entre autres, par une dégradation superficielle d'un grand nombre d'objets en particulier ceux élaborés en matériaux fragiles tels que les céramiques et les verres. Dans le cas de l'érosion des verres par exemple, les impacts des particules de sur la surface provoquent un endommagement plus ou moins sévère selon les conditions environnementales [1, 2]. Généralement, il se produit une formation de microfissures superficielles, similaires à celles

induites par indentation Vickers. Dans les cas les plus sévères (grandes vitesses, particules anguleuses et position frontale du vent), il se des cratères. produit soit désintégration des particules elles-mêmes. La formation de ces défauts affecte directement la transmission optique par diffusion de la lumière incidente [3]. L'étendue et la profondeur de ces dommages dépendent de la forme, de la nature et de la vitesse des particules incidentes. Dans leur étude. Ruff Wiederhorn [4] ont indiqué que l'érosion des matériaux fragiles comme les verres, est influencée par plusieurs facteurs tels que: les propriétés des particules érodentes (taille, forme, densité, dureté et ténacité); les propriétés de la cible (dureté, ténacité et état de surface) et les conditions d'essai (vitesse d'impact, angle d'impact, masse projetée, température, ...). Ainsi, plusieurs travaux ont mis en corrélation la transmission optique, la rugosité et la diffusion de la lumière suite à l'endommagement de la surface [3, 5, 6].

Dans un travail antérieur [7], nous avons simulé dans le laboratoire, l'influence des vents de sable sur un verre sodocalcique destiné à la fabrication des pare-brise de véhicules. Nous avons, en particulier, observé que la transmission optique chute fortement lorsqu'on accroit la masse de sable projetée. Ceci est très néfaste pour la fonction d'un pare-brise. Ainsi, la lumière diffusée éblouit les conducteurs de véhicules en particulier la nuit, au lever et au coucher du soleil. Néanmoins, pour diminuer cette forte sensibilité du verre aux endommagements de surface tel que l'écaillage, il est possible de procéder à des traitements de renforcement mécanique du verre contre l'érosion [8]. En effet, ces traitements (trempes thermique et chimique) permettent d'accroire fortement les contraintes de compression en surface. Il est également possible de déposer des couches minces transparentes en vue de remplir les creux en surface et de restituer une surface presque saine [9]. Enfin, on peut réaliser une attaque chimique par l'acide fluorhydrique HF connu pour son efficacité sur le verre [10, 11]. Cette dernière permet de réduire les différences de niveau entre les creux et les crêtes des surfaces érodées.

Il est évident que la résistance mécanique pour un état trempé thermiquement ou chimiquement augmente fortement puisque pour rompre le verre, il faudra d'abord vaincre ces contraintes de compression en surface. En même temps, cet état de compression produit une certaine immunité vis-à-vis de la propagation sous critique des défauts de surface tant que les contraintes appliquées restent inférieures aux contraintes compression. La déposition de couches minces transparentes sur la surface d'un verre érodé peut se réaliser soit par étalement d'une solution contenant des polymères, soit par voie sol-gel tel que le dépôt de SnO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>,..., soit par pulvérisation [12].

Dans ce présent travail, nous présentons une étude qui consiste à améliorer la transmission optique d'un verre érodé par sablage en adoptant les trois voies : renforcement du verre par traitement, déposition d'une couche mince transparente et réduction des défauts de surface par une attaque chimique à l'acide HF.

## 2. PROCEDURE EXPERIMENTALE

Nous avons utilisé un verre sodo-calcique destiné à la fabrication des pare-brise de véhicules. Les échantillons de dimensions (40 x40 mm²) ont été préparés à partir d'une plaque de verre d'épaisseur 2,2 mm. La composition chimique moyenne et quelques caractéristiques physiques sont données dans les tableaux 1 et 2 suivants [5].

Tableau 1 : Composition chimique moyenne du verre sodocalcique utilisé.

Oxydes	SiO <sub>2</sub>	Na₂O	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Masse (%)	72,85	12,42	8,15	4,09	1,27
Oxydes	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO₃	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaO
Masse (%)	0,47	0,47	0,15	0,09	0,007

Tableau 2 : Quelques propriétés physiques du verre utilisé

Propriétés	Valeurs
Transmission optique (T <sub>o</sub> )	91,6%
Dureté (HV)	5,37 GPa
Module d'élasticité (E)	72 GPa
Coefficient de Poisson (u)	0,22
Température de transition (Tg)	560°C
Indice de réfraction	1,52

Le sable utilisé provient des dunes de la région de Ouargla en Algérie. L'analyse minéralogique des particules de sable montre qu'il est composé essentiellement des minéraux suivants : quartz, tourmaline, limonite, gypse et d'autres oxydes. La majorité des particules de sable apparaissent sous une forme irrégulière : grossièrement arrondie, souvent allongées, mais avec parfois des angles vifs. Dans un travail antérieur [13], nous avons déterminé l'indice d'allongement I des particules de ce sable. Cet indice I (I = L/I) est défini comme étant le rapport de la plus grande dimension (L) par la plus petite dimension (I) mesurée dans le sens perpendiculaire. Nous avons constaté qu'environ 20% des particules sont arrondies (I ≈ 1), alors que 70% de ces particules ont un indice compris entre 1,1 et 1,5. La distribution granulométrique du sable utilisé montre qu'il s'agit d'un sable fin et mono-dispersé avec une taille presque homogène centrée dans l'intervalle (200-300 µm). La taille moyenne des particules comprises entre 200 et 250 µm représente 70% des particules mesurées.

Les échantillons sont érodés avec différentes masses de sable dans le but d'obtenir différents états de surface. Durant les essais de sablage, la vitesse de flux d'air est fixée constante et égale à 18 m/s (environ 65 Km/h), ce qui correspond à une vitesse moyenne habituelle des vents de sable sévissant dans la région de Ouargla. Les échantillons sont placés perpendiculairement par rapport au flux de sable (angle d'impact α = 90°). En nous inspirant des travaux antérieurs, nous avons choisi les conditions d'essais suivantes :

- la distance buse-échantillon est de 50 mm.
- le diamètre du tube est de 25 mm,
- le débit de sable est maintenu constant durant tous les essais (35 g/min).
- les masses de sable projetée  $M_p$  = 10, 20, 50, 100, 150 et 200 g

Nous avons utilisé un dispositif souffleur de sable de type horizontal (figure 1). Il est essentiellement composé d'un ventilateur qui permet de créer un courant d'air, d'une trémie de sable munie d'un régulateur de débit, d'un tube canaliseur de flux et d'un porte-échantillon orientable entre 0 et 90°. La figure 2 montre une vue générale d'un échantillon de verre présentant une zone érodée avec 200 g de sable (zone claire) et d'une vue de détail des zones sablées.

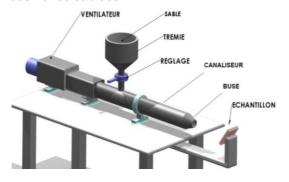


Fig. 1 : Schéma du dispositif expérimental de sablage utilisé.

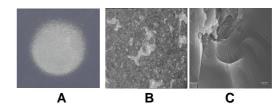


Fig. 2 : Vue de face d'un échantillon de verre érodé avec 200 g de sable:

- A- Vue générale (tache blanche),
- B- Vue de détail (x160) montrant des zones érodées,
- C- Vue du fond d'un cratère (x10.000).

#### 3. RESULTATS ET DISCUSSION

## 3.1. VOIE PREVENTIVE (TRAITEMENTS):

Sachant que le verre est un matériau très fragile, le moindre défaut de surface mis sous contrainte mécanique provoque la rupture. Ces défauts de surface peuvent provenir soit lors de l'élaboration, soit durant la manipulation et l'utilisation, soit suite à un phénomène d'abrasion ou d'érosion. Pour renforcer mécaniquement le verre, il existe deux traitements : la trempe thermique et le trempe chimique. L'objectif de ce renforcement par trempe est de créer des contraintes internes de compression localisées au voisinage de la surface. Ces contraintes permettent de freiner ou de retarder la propagation des défauts au sein du volume même sous l'effet de sollicitations mécaniques externes.

La trempe thermique est bien connue des industriels du verre float. Le principe consiste à chauffer le verre légèrement au dessus de la température de transition et à le refroidir rapidement par un jet symétrique comprimé. Ainsi l'effet du sous refroidissement, la surface est rapidement refroidie, alors que le cœur encore chaud accommode la contraction de la surface. Toute contrainte interne se trouve ainsi relaxée. Ensuite, lorsque le cœur se refroidit à son tour, il se contracte en mettant la surface en compression.

La trempe chimique, comme son nom l'indique, consiste à changer la nature chimique de la surface du verre, généralement par un échange ionique entre les ions sodium du verre et les ions potassium d'un bain de nitrate de potassium porté à l'état de fusion. Après refroidissement, les ions de potassium

de taille plus grande que celle du sodium, provoquent un état de compression dans les couches superficielles du verre.

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé trois traitements :

- un traitement de recuit qui a servi à utiliser le verre comme échantillon de référence (exempt de contraintes mécaniques),
- un traitement de trempe thermique et un traitement de trempe chimique pour le renforcement mécanique

Le recuit a été réalisé à 565℃ durant une heure. La résistance mécanique en flexion biaxiale enregistrée est de 83 MPa. La trempe thermique à été réalisées à 570℃ et la résistance mécanique obtenue est de 181 MPa. La trempe chimique, réalisée à 460℃ dans un bain de KNO₃ pendant 5 heures, a donnée une résistance nettement plus importante de l'ordre de 340 MPa.

Les échantillons ainsi traités ont été soumis à des opérations de sablage avec différentes masses variant jusqu'à 200g. La détermination du taux d'érosion (E) a permis de suivre son évolution en fonction des masses de sable projetées Mp (figure 6).

 $E = \Delta m/Mp$ 

Δm : perte de masse de l'échantillon érodé

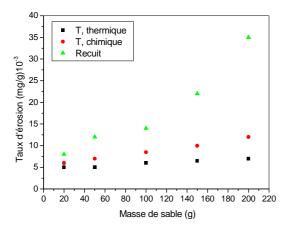


Fig. 6 : Variation du taux d'érosion en fonction des masses de sable pour les états traités du verre.

On constate d'après la figure que le verre recuit présente la plus faible résistance à

l'érosion, alors que les verres trempés résistent nettement mieux. Cependant la trempe thermique du verre donne la meilleure résistance à l'érosion. Ainsi pour une masse de sable projeté de 200g :

- E = 7,5.10<sup>-3</sup> mg/g (état trempé thermiquement),
- E = 12.10<sup>-3</sup> mg/g (état trempé chimiquement)
- E = 35.10<sup>-3</sup> mg/g (état recuit).

Pour quantifier le renforcement mécanique apporté par les traitements de trempe, nous avons effectué des essais d'indentation Vickers sur les différents verres traités en utilisant une charge P = 5 N. Notons que la fissuration radiale, dans le cas d'un verre sodocalcique à l'état brut, apparait dès la charge 0,8 N. On constate d'après la figure 7 que l'empreinte correspondant à l'état trempé thermiquement comporte une petite empreinte bien définie et une fissuration radiale très limitée. L'échantillon traité chimiquement montre une empreinte légèrement plus grande et une fissuration assez développée. On également de petites observe écailles détachées (zone sombre) et une écaille relativement grande non encore détachée. Dans le cas de l'échantillon recuit, l'empreinte est male définie et elle est accompagnée d'un écaillage assez net et assez important. On l'état trempé peut conclure donc que thermiquement présente la meilleure résistance à l'érosion.

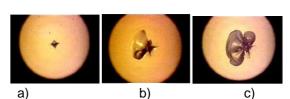


Fig. 7 : Micrographies montrant des empreintes d'indentation Vickers dans le cas des trois états traités du verre (x120).

- a) Trempé thermiquement,
- b) Trempé chimiquement,
- c) Recuit

# 3.2. VOIE CORRECTIVE (DEPOSITION DES COUCHES TRANSPARENTES)

Pour corriger les défauts causés par les impacts des particules de sable sur la surface du verre, notre choix est porté, entre autres,

sur deux matériaux organiques en raison de leur transparence, de leur faible densité et de leur prix de revient modéré: Le polyvinyle de Butyral (PVB) et une résine polyester (PES). Le PVB est une feuille intercalaire adhésive très performante utilisée notamment dans les applications où une bonne résistance au choc mécanique est exigée (collage des feuilles de verre des pare-brise des véhicules, vitrage multicouches dans le bâtiment,...). Le PES se présente sous forme d'une résine liquide transparente. Après séchage, elle durcit et garde sa transparence.

La déposition de la couche de PVB consiste à dissoudre une feuille de 5 g dans 10 ml d'un solvant de diméthylformamide. Par la suite, on plonge l'échantillon érodé dans la solution en utilisant une vitesse de descente et de montée constante de 2 mm/min. Une fois que l'échantillon est revêtu, on l'expose à un séchage dans une étuve portée à 65°C pendant 01 heure. La procédure adoptée pour la déposition du PES consiste à ajouter 0,5% de durcisseur et à plonger les échantillons dans la solution liquide selon la procédure décrite pour le PVB (immersion à vitesse constante, suivie de séchage).

La viscosité des deux solutions est choisie de manière à ce que l'épaisseur de la couche déposée soit comprise entre 40 et 50 µm. Cette épaisseur est jugée suffisante pour corriger les défauts de sablage (rugosité totale « Rt » de l'ordre de 16 µm) et garder une surépaisseur « e » qui permet éventuellement d'amortir le choc des particules incidentes de sable (figure 8).

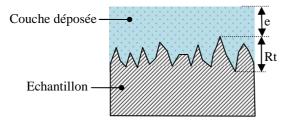


Fig. 8 : Illustration du verre érodé et de la couche polymère déposée.

La fig. 9 montre la variation de la transmission optique en fonction de la masse de sable projetée pour un verre à l'état sablé et un verre à l'état sablé et revêtu d'une couche de PVB et de PES. On note d'une manière générale que les courbes chutent lorsque la masse de sable augmente. Cependant, on

observe que la transmission optique du verre sablé chute fortement jusqu'à 150 g et elle tend par la suite vers un palier. On note qu'elle atteint 27% pour 200 g de sable projeté. Par contre pour l'état sablé et revêtu par une couche de PVB et de PES, la chute est très faible et les deux courbes restent très proches et presque parallèles. A titre indicatif, on mentionne par exemple pour Mp = 200 g. To ≈ 87% pour la couche de PVB et To ≈ 81% pour la couche de PES. Cette bonne amélioration de la transmission optique s'explique par le fait que les solutions suffisamment fluides au début permettent de remplir les vides des défauts générés par les impacts des particules de sable et elles gardent une bonne transparence après séchage.

Pour l'état sablé, la perte de transmission optique se fait par réflexion pour les faibles masses projetées car la surface érodée n'est pas suffisamment endommagée. Par contre pour les masses plus grandes, la perte se fait essentiellement par diffusion à partir des défauts surfaciques [9].

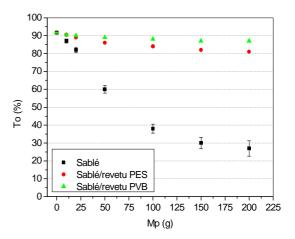


Fig. 9 : Variation de la transmission optique en fonction de la masse de sable projetée pour l'état sablé, et sablé et revêtu de couches PVB et PES.

Sur la figure suivante, nous présentons une photo d'un échantillon qui a été érodé avec une masse de 200 g de sable et dont une partie est revêtue d'une couche de PVB. Pour mettre en évidence l'effet de la couche sur la transmission optique, nous avons placé à un centimètre au dessous de l'échantillon, deux caractères H permettant de montrer la

différence de transparence : l'un, sous la partie sablée (à gauche) et l'autre sous la partie sablée et revêtue par du PVB (à droite).

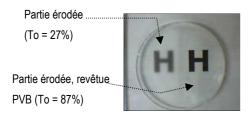


Fig. 10 : Photo d'un échantillon érodé avec une masse de 200 g de sable et dont une partie est revêtue d'une couche de PVB.

Pour tester la résistance à l'érosion des couches déposées, nous avons soumis les échantillons revêtus à une opération de sablage. La variation de la transmission optique en fonction de la masse de sable pour projetée les différents états verre (sablé S, sablé et revêtu S/R, et sablé revêtu et re-sablé S/R/S) est représentée dans la fig. 11. On observe que les échantillons sablés, revêtus d'une couche de PVB et PES sablés présentent une transmission intermédiaire entre l'état sablé et l'état sablé et revêtu. On enregistre des valeurs comprises entre 50 et 60% pour une masse Mp = 200 g.

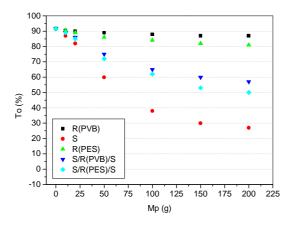


Fig. 11: Variation de la transmission optique en fonction de la masse de sable projetée pour l'état sablé, sablé et revêtu de couches PVB et PES, sablé revêtu et re-sablé.

Les micrographies de la fig. 12 présentent l'aspect de la couche de PVB déposée sur un verre érodé avec une masse de sable de 200 g. La vue générale montre que la surface

sablée comporte des défauts répartis de manière homogène sur toute la surface. Les points sombres correspondent aux zones fortement endommagées par les impacts des particules de sable. La vue détaillée montre un défaut typique sur la couche du PVB. On observe que l'impact a déchiré la couche de polymère et a formé un écaillage sur la couche superficielle du verre.

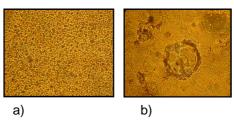


Fig. 12 : Micrographies montrant l'aspect de la couche de PVB érodée avec une masse de 200a.

a) vue générale (x10), b) défaut typique (x80).

## 3.3. Voie corrective (attaque chimique)

Dans cette étape, nous avons soumis les échantillons érodés avec 200g de sable à un traitement de surface à l'acide fluorhydrique HF. Les durées d'attaque sont variables de quelques minutes jusqu'à 8 heures. L'analyse des surfaces attaquées montrent que les défauts prennent une morphologie cellulaire à partir d'une durée de 5 heures (fig. 13).

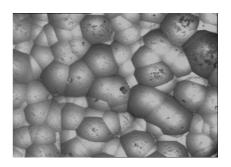


Fig. 13 : Morphologie de la surface d'un verre érodé et soumis à une attaque chimique par l'acide HF pendant 8H (x100).

Pour expliquer ce phénomène, nous avons indentés des échantillons bruts (non sablés) avec différentes charges (0 à 30 N) dans le but de simuler les défauts de sablage. Par la suite, nous avons immergé ces échantillons dans une solution d'acide fluorhydrique (à 3%) pour différentes durées d'attaque. Nous avons

déterminé la variation de la transmission optique en fonction des durées d'attaque par l'acide HF (fig. 14). On observe qu'au début de l'attaque et durant les premières minutes, il se produit une chute très nette de la transmission optique qui atteint un minimum de 9,5%. Cette chute est probablement due à l'écaillage surtout dans les zones les plus sablées. Cet endommagement superficiel favorise diffusion de la lumière au niveau de la surface, ce qui altère la transmission optique. Après 20 min d'attaque, la transmission subit une augmentation forte jusqu'à 120 min et au-delà une augmentation faible et régulière. Après 8 heures d'attaque, elle atteint 46,5% et dépasse ainsi celle du verre sablé. L'augmentation de la transmission optique s'explique par le fait que l'acide HF attaque facilement les crêtes de la surface sablée et tend à réduire les différences de niveau entre les creux et les crêtes. Ainsi, la rugosité diminue et contribue de ce fait à améliorer la transmission optique.

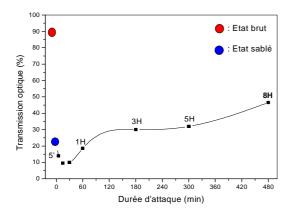


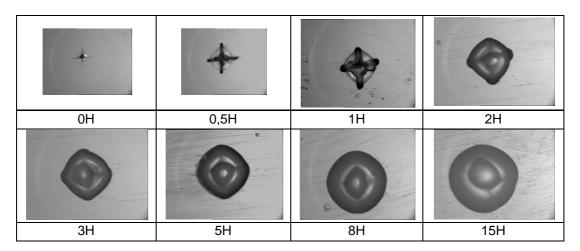
Fig. 14 : Variation de la transmission optique en fonction des durées d'attaque à l'acide HF.

Pour mettre en évidence les séquences de formation de la structure cellulaire, nous avons indenté plusieurs échantillons avec différentes charges (1, 2, 5, 10, 20, 30 N). Nous les avons soumis à l'attaque chimique par l'acide HF pour différentes durées allant jusqu'à 15 H. Dans le tableau suivant nous présentons, à titre indicatif, les micrographies réalisées en fonction des durées d'attaque pour une charge d'indentation de 10 N. D'après cette figure, on remarque qu'il y a des changements morphologiques très nets dès les premiers instants d'attaque :

- a) La première micrographie montre une empreinte d'indentation avec une formation limitée de fissures radiales et une petite écaille.
- b) Après 30 min, l'attaque se concentre au niveau des fissures radiales qui s'élargissent. Le contour des fissures latérales qui débouchent en surface commence à apparaitre.
- c) Après 1 H, les fissures radiales et l'empreinte continuent de s'élargir et de grandir. De même on observe un émoussement des bouts de fissures radiales. Le contour fermé des fissures latérales (écailles) devient assez net.
- d) A mesure que le temps d'attaque augmente, la taille des défauts continue d'augmenter. Le contour des fissures latérales continue toujours de s'élargir et devient plus régulier (2, 3 et 5h). Il est légèrement déformé au niveau des extrémités des fissures radiales. Ces dernières ont tendance à disparaître et les empreintes prennent la forme d'une tache qui a tendance à devenir presque circulaire.
- e) Après 8 et 15 H d'attaque chimique, on aboutit à la formation de deux cercles concentriques bien prononcés, conduisant à la forme d'une cellule.

En somme, on peut dire que la structure cellulaire due à l'attaque chimique a permis de réduire la rugosité de surface, d'accroitre la taille des défauts et à améliorer moyennement la transmission optique. Apparemment, les zones noircies ne favorisent pas convenablement le passage de la lumière incidente.

Tableau 3 : Micrographies montrant les séquences de formation de la structure cellulaire dans le cas d'un verre indenté et attaqué par une solution d'acide HF (x120).



### Conclusion

Dans le présent travail, nous avons étudié trois possibilités pour tenter d'améliorer la transmission optique d'un verre sodocalcique qui a été préalablement soumis à l'érosion par sablage. En fait, nous avons essayé d'améliorer la résistance du verre contre l'érosion. Pour cela, dans un premier temps nous avons traité les échantillons par une trempe thermique, une trempe chimique par échange ionique d'ions Na+/K+, et un recuit comme référence (exempt contraintes internes). Les résultats obtenus montrent que la trempe thermique présente la meilleure solution pour améliorer transmission optique du verre. La deuxième étape consiste à corriger les défauts de sablage par la déposition de deux couches minces transparentes (le butyrale de polyvinyle PVB et le polyester PES).

A partir des résultats expérimentaux obtenus, on peut conclure que dans le cas du verre sablé et revêtu, les deux couches déposées ont amélioré nettement la transmission optique. On note les valeurs de 87% et 81% respectivement pour la couche de PVB et de PES. Par ailleurs, le sablage du verre revêtu par les deux couches de PVB et de PES montre que la transmission optique chute aux environs de 50 à 60% et se place dans un état intermédiaire entre l'état brut sablé et l'état sable et revêtu. Cependant, il en ressort de cette étude que la transmission optique du verre revêtu par une couche de PVB est sensiblement meilleure que celle d'un verre

revêtu par une couche de PES. La troisième technique consiste à réduire la rugosité de surface du verre sablé par attaque chimique à l'acide fluorhydrique HF, dans le but d'améliorer l'état de surface et donc la transmission optique. Les résultats montrent qu'après 8H d'attaque, on aboutit à une structure cellulaire. Celle-ci a permis de réduire la rugosité de surface et à améliorer moyennement la transmission optique. Apparemment, les zones noircies ne favorisent pas convenablement le passage de la lumière incidente.

#### Références:

- [1] C. Bousbaa, N. Iferroudjene, S. Bouzid, M. Madjoubi and N. Bouaouadja, "Effects of durations of sandblasting on the properties of window glass". Glass Technol., 1998, 39(1), 24–26.
- [2] R. H. Telling, G. H. Gilbert and J. E. Field, "The erosion of aerospace materials by solid particle impact", Proc. SPIE, Int. Soc. Opt. Eng., 1997, 3060, 56–67.
- [3] K. H. Holtmann, G. H. Frischat and K. Ruppert, "Mechanism of defect creation on sheet glass by particle impact and its influence on stray light", Glastech. Ber. Glass. Sci. Technol., 1998, 71(8), 247–255.
- [4] A. W. Ruff, S. M. Wiederhorn, Treat. Mater. Sci. and Techn., 1979, 16: 69.
- [5] C. Bousbaa, M. A. Madjoubi, Z. Hamidouche, N. Bouaouadja, "Effect of sandblasting on soda lime glass

- properties", Engineering Journal of the university of Qatar, Vol. 16, 2003, pp. 125–138
- [6] S. Bouzid, N. Bouaouadja, "Effects of impact angles on glass surface eroded by sand blasting"
  - Journal of the European Ceramic Society, Vol. 20, N°4 (2000) pp. 481-488
- [7] N. Adjouadi, N. Laouar, C. Bousbaa, N. Bouaouadja, G. Fantozzi, "Study of light scattering on a soda lime glass eroded by sandblasting" J. Eur. Cer. Soc., 27, (2007), pp. 3221–3229
- [8] C. Bousbaa, A. Madjoubi, M. Hamidouche, N. Bouaouadja, "Effect of annealing and chemical strengthening on soda lime glass erosion wear by sand blasting", Jour. Eur. Cer. Soc., 23, 2003, pp. 331–343
- [9] N. Bouaouadja, "Some aspects of a glass eroded by sandblasting", Inter. Congress On Mechanics and Materials, ICMM06, Dpt OMP, 2006

- [10] M. Kolli, M. Hamidouche, N. Bouaouadja, G. Fantozzi, "HF Etching Effect on Sandblasted Soda-Lime Glass Properties", Journal of the European Ceramic Society, Vol. 29 (2009) pp. 2697–2704.
- [11] M. Kolli, M. Madjoubi, M. Hamidouche, N. Bouaouadja, G. Fantozzi, « Amélioration de la résistance mécanique et de la transmission optique d'un verre sablé par traitement chimique à l'acide fluorhydrique », Annales de Chimie Science des Matériaux, Vol. 35/2 (2010) pp. 129-136.
- [12] N. Bouaouadja, C. Bousbaa, T. Mahdaoui, H. Laouamri, M. A. Madjoubi, "Improvement of the optical transmission of an eroded soda lime glass by PVB and PES coatings", Physics Procedia, Vol 2 (2009) pp. 1351-1357
- [13] C. Bousbaa, M. Kolli, M. A. Madjoubi, Z. Malou, T. Mahdaoui, N. Bouaouadja, "Damage survey of a vehicle windshield exposed to sandblasting in Sahara", Physics Procedia, Vol 2 (2009) pp. 1141-1145