

EFFET DES CONDITIONS EXPERIMENTALES SUR L'ASPECT STATISTIQUE DE LA RESISTANCE MECANIQUE DU VERRE

Zahra MALOU^{1,2}

1- Unité de Recherche Matériaux Emergents (URME), université Ferhat ABBAS Sétif 1, Algérie

2- Institut d'Optique et Mécanique de Précision, université Ferhat ABBAS Sétif 1, Algérie

E-mail: zmalou@univ-setif.dz

RESUME

Dans ce travail, nous avons étudié l'influence de la taille de l'échantillon, la vitesse d'essai et le milieu environnant sur la résistance mécanique d'un verre plat silicosodocalcique.

Nous avons réalisé des essais sur quatre séries d'échantillons qui diffèrent par leurs dimensions. Nous avons fait varier la vitesse de sollicitation comme suit: 50 mm/min, 0.5 mm/min et 0.005 mm/min et le milieu environnant en utilisant différents pH (essais sous air et dans l'eau distillée).

La population caractéristique de défauts pour chaque échantillon est modélisée à l'aide d'une loi probabiliste de WEIBULL. Le critère de rupture choisi est que l'activation d'un défaut correspond à la rupture de l'ensemble de la structure (hypothèse du maillon le plus faible).

Les résultats trouvés ont montré que: i) Lorsque la vitesse de chargement diminue, les contraintes à la rupture diminuent aussi, ii) Les échantillons ayant des grandes surfaces résistent moins à la sollicitation, iii) Le taux élevé de l'humidité est néfaste puisqu'il fait diminuer la résistance à la rupture, en favorisant la propagation sous critique (sous corrosion) des fissures, iv) La loi de WEIBULL aide à mieux comprendre la distribution des valeurs des contraintes à la rupture du verre. Les paramètres de WEIBULL (m , σ_0) varient avec la variation de la vitesse d'essai et de la surface sous sollicitation.

Mots clés: Verre, fissure, propagation, contrainte, dispersion, Loi de WEIBULL

1- INTRODUCTION

La résistance des verres industriels est beaucoup plus faible par rapport à sa valeur théorique. La raison en est les microfissures superficielles, engendrées par la manipulation et le contact. La taille et la distribution des défauts superficiels déterminent en grande partie la résistance mécanique des objets verriers. Lorsqu'on réalise des essais de rupture sur un même lot d'éprouvettes, on observe une dispersion des résultats. Cette dernière dépend de la taille et de la densité des défauts initiateurs de la rupture [1]. Par une analyse statistique, une corrélation linéaire entre les paramètres d'endommagement et la taille du défaut le plus critique a été proposée [2]. Il est donc nécessaire de rechercher des méthodes susceptibles de dégager des lois statistiques à partir d'un nombre relativement faible d'informations expérimentales [3].

Le modèle statistique de Weibull semble être le mieux approprié pour l'étude de l'aspect probabiliste de la rupture des matériaux fragiles [4]. Ce modèle repose sur le concept du lien le plus vulnérable appelé « maillon de chaîne le plus faible ». Il considère la structure du matériau comme une chaîne dont la contrainte est

contrôlée par celle du maillon le plus faible, équivalent au défaut critique ayant la plus grande taille. Ce modèle s'avère très commode pour l'étude statistique de la rupture des matériaux fragiles [1] [5].

L'équation de la probabilité cumulée de rupture proposée par Weibull a la forme suivante :

$$P = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

σ : La contrainte appliquée.

σ_0 : La contrainte pour laquelle la probabilité de rupture est de 0,63 pour un volume unité. C'est une contrainte de normalisation sans signification physique.

m : (module de Weibull): représente l'homogénéité de la répartition des défauts. Plus m est élevé, moins la résistance à la rupture dépend du volume sollicité. En linéarisant l'équation (1), on aboutit à la relation suivante:

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1-p} \right) = m \ln \sigma - m \ln \sigma_0 \quad (2)$$

La probabilité de survie (P_s) est définie par:

$$P_s = 1 - p$$

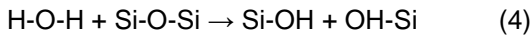
Pour une distribution de Weibull unimodale, les paramètres m et σ_0 sont déterminés graphiquement à partir des tracés expérimentaux de l'équation (1).

Les résultats des mesures sont classés par ordre croissant. La probabilité (P_i) correspondant à la contrainte située au rang (i), est calculée à l'aide de plusieurs estimateurs. Ces derniers conduisent à des paramètres statistiques peu sensibles au nombre de mesures. Le plus recommandé est de la forme [5]:

$$P_s = 1 - \frac{i}{N + 1} \quad (3)$$

N : représente le nombre des valeurs mesurées.

Les fissures superficielles du verre sont influencées par l'atmosphère (surtout l'humidité) [6]. Beaucoup d'expériences faites ont prouvé que l'humidité attaque le verre suivant la réaction (4) et le rend moins durable.



Dans ce travail nous avons étudié l'influence de la taille de l'échantillon, la vitesse d'essai et le milieu environnant sur la résistance en flexion d'un verre silicosodocalcique ordinaire.

2- PROCEDURE EXPERIMENTALE

Le verre utilisé est un verre à vitre de type silico-sodo-calcique fabriqué localement (Algérie), d'épaisseur 3mm, sa composition chimique moyenne contient 72,2% SiO_2 , 15 % Na_2O , 6,7% CaO , 4% MgO , 1,9 % Al_2O_3 et 0,2 % d'impuretés. Les échantillons ont été coupés à partir d'une même plaque. Les surfaces coupées ont été rodées et chanfreinées. Nous avons utilisé un Hygromètre pour mesurer le taux d'humidité de l'environnement de travail. Nous avons utilisé l'essai de flexion trois points sur une machine d'essais mécanique de type ZWICK ROWELL. Les tests ont été conduits dans différents environnements et conditions de chargement. L'épaisseur de l'échantillon est fixe alors que la largeur et la longueur ont été variées de telle sorte que la surface entre appuis sollicitée varie comme suit: 8000 mm², 4500 mm², 2000 mm² et 500 mm². Les vitesses de sollicitation ont été variées comme suit: 50 mm/min, 0.5 mm/min et 0.005 mm/min.

La mesure de la force à la rupture F_r permet de remonter à la contrainte à la rupture σ_f en flexion trois points exprimée en (MPa), à l'aide de l'équation (5):

$$\sigma_f = \frac{3.F_r.L}{2.B.W^2} \quad (5)$$

Où : F_r est la charge mesurée en Newton

L est la distance entre appuis (mm), B est la largeur de l'éprouvette (mm), W est l'épaisseur de l'éprouvette (mm).

2- RESULTATS ET DISCUSSION

Nous notons dès le départ, que les droites de Weibull tracées pour toutes les conditions de sollicitation sont à une seule pente. Par conséquent, ce constat démontre que tout les défauts superficiels de ce verre sont de la même famille, c'est-à-dire des défauts naturels.

2.1- Effet de la vitesse de sollicitation

La figure 1 montre l'influence de la vitesse de chargement sur la résistance mécanique du verre. Nous avons tracé les courbes de la variation de la probabilité de survie (P_s) en fonction de la contrainte appliquée pour les différentes vitesses de sollicitations.

Les courbes de probabilité de survie en fonction de la contrainte appliquée sont décalées vers les faibles contraintes lorsque la vitesse de chargement est très petite. Le paramètre vitesse de chargement est directement lié à l'effet de l'aspect environnemental à travers le facteur temps. Lorsque la vitesse de sollicitation est lente, les phénomènes chimiques ont plus de temps pour avoir lieu.

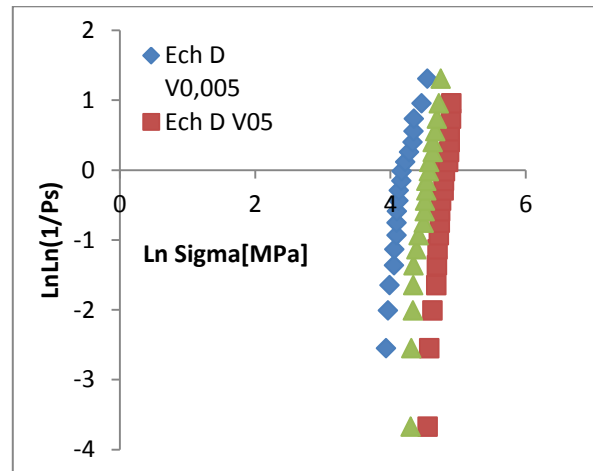


Figure 1 : Variation de la probabilité de survie en fonction de la contrainte à la rupture mesurée sous air pour différentes vitesses de chargement

2.2-Effet de l'humidité

Le taux d'humidité mesuré lors de nos essais sous air est compris entre 70 à 80%. Le pH de l'eau distillée; utilisée pour les essais en milieu humide, est entre 7.1 et 7.3. Afin de mieux comprendre l'effet de l'humidité sur la résistance

mécanique (propagation sous critique des fissures), nous avons tracés la probabilité de survie en fonction de la contrainte à la rupture dans les deux milieux (air, eau), et la variation de la résistance mécanique en fonction de la surface sollicitée sous tension pour les trois différentes vitesses.

A la même vitesse de sollicitation (0.005mm/min) la plus faible, les contraintes à la rupture dans l'eau sont plus faibles que celles trouvées sous air, l'effet des molécules d'eau sur le réseau vitreux est plus accentué (figures 2).

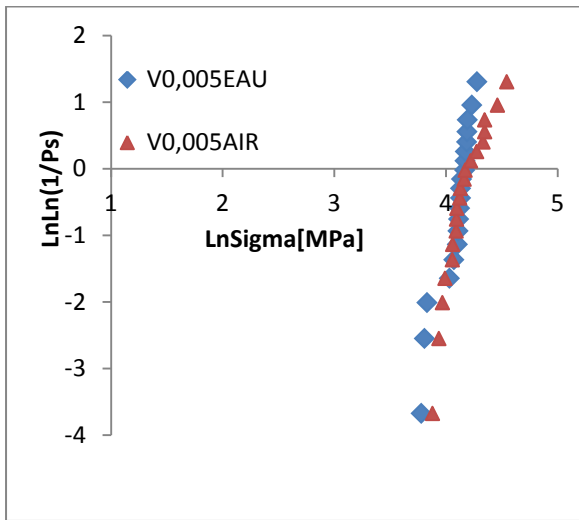


Figure 2: Variation de la probabilité de survie en fonction de la contrainte à la rupture mesurée dans l'eau et sous air

Pour une vitesse de chargement élevée (50 mm/min), le temps n'est pas suffisant pour l'apport de l'effet chimique de l'eau sur la rupture des liaisons silicium-oxygène, ce qui conduit à des résistances à la rupture plus importantes. Pour les vitesses moyennes (0.5 mm/min), le matériau répond normalement à la sollicitation mécanique. Par contre, pour une sollicitation à très faible vitesse (0.005mm/min), la propagation de fissures se fait en milieu « corrosif », le phénomène essentiel qui se produit est la propagation sous critique (sous corrosion) par combinaison de la contrainte mécanique et de la rupture des ponts Si-O par H₂O (attaque chimique des liaisons) (figures 3).

2.3- Effet de la taille

Plus la surface de l'éprouvette sollicitée est grande, plus il est probable de rencontrer un défaut critique pouvant initier une rupture brutale. Pour illustrer cet aspect, nous avons tracé (figure 4) les courbes de la variation des probabilités de survie en fonction de la contrainte appliquée pour les différentes tailles (8000 mm²,

4500 mm², 2000 mm² et 500 mm²), sollicitées dans les mêmes conditions (vitesse et environnement).

Un grand échantillon présente une probabilité supérieure à celle d'un échantillon de faible taille de contenir un gros défaut. Du point de vue volume, même nous notons le même constat. En général, un échantillon volumineux se rompt pour une contrainte plus faible qu'un échantillon plus petit.

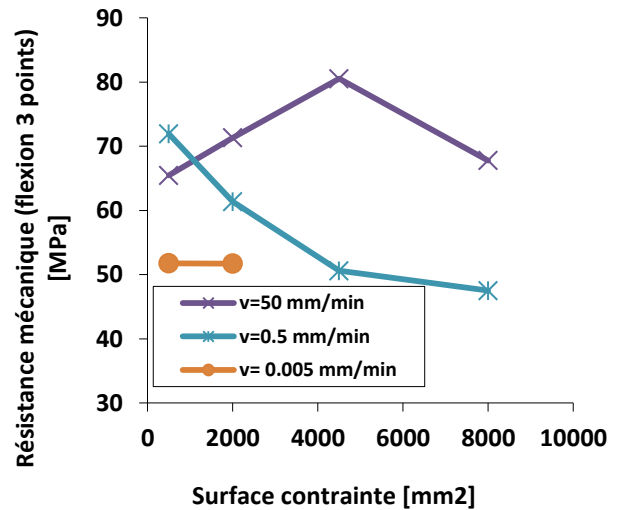


Figure 3: Variation de la probabilité de survie en fonction de la contrainte à la rupture mesurée sous air pour différentes tailles des échantillons V=0.5mm/min

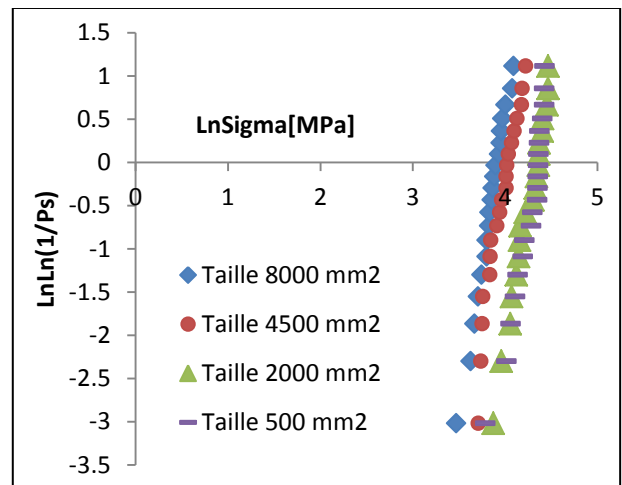


Figure 4: Variation de la contrainte à la rupture en fonction de la surface contrainte en tension (S=LxB) pour différentes vitesses de chargement.

2.4- Fractographies descriptives de la rupture des éprouvettes sollicités sous air

La figure 5 montre deux échantillons rompus dans différentes conditions. La fragmentation multiple sur la première photo est provoquée par les nombreuses bifurcations des fissures. La vitesse de chargement élevée (50 mm/min) a fait que le chargement est un essai presque dynamique (choc). Cette sollicitation à grande vitesse permet l'activation rapide des microfissures superficielles.

La fragmentation simple (deuxième photo) est produite lorsque la vitesse de chargement est moyenne ou relativement faible (0.5 mm/min et 0.005 mm/min). Propagation lente activant de ce fait un nombre réduit de fissures.

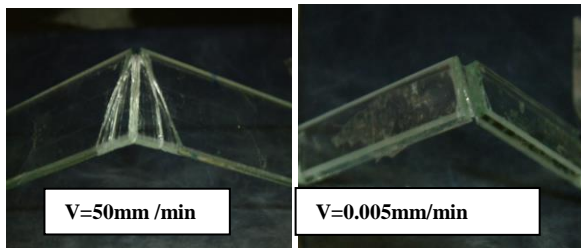


Figure 5: Mode de rupture des échantillons

2.5- Identification des paramètres de WEIBULL

Le module de WEIBULL (m) est un indicateur de la dispersion. Plus il est faible, plus cette dispersion est importante. La vitesse de sollicitation la plus faible présente la dispersion la plus importante, puisque l'effet chimique l'emporte sur l'action mécanique. Les paramètres de Weibull m et σ_0 déterminés selon les différentes conditions de sollicitation sont rassemblés dans le tableau 1.

Tableau 1: Valeurs du module de WEIBULL et des contraintes de normalisation calculée pour les différentes vitesses de sollicitations

Vitesse mm /min	m	σ_0 [MPa]
0.005	6.63	70.10
0.5	10.88	103.54
50	8.27	97.51

BIBLIOGRQPHIE

- [1] S.S. Jurgen S. S., C. Nils, R. Jurgen, Reliability of Alumina Ceramics. 2: Effect of Processing, J. European. Ceram. Soc., Vol.17, pp. 727-733 (1997)
- [2] LAMON J. La rupture des céramiques, Revue de Métallurgie, (1995),
- [3] A. Pollard. C. Rivoire, Fiabilité et statistiques prévisionnelles, Méthode de Weibull, Edition Eyrolles, 140 p(1971).
- [4]- J. Barton, C. Guillemet, Le verre science et technologie, Editions EDP science, p.440 (2005)
- [5] M.A. Madjoubi, C. Bousbaa, M. Hamidouche, N. Bouaouadja, Weibull Statistical Analysis of the mechanical Strength of a Glass eroded by sand blasting, J. Eur. Ceram. Soc., Vol. 19, pp. 2957-2962 (1999)
- [6] S.W. Freiman, S.M. Wiederhorn, J. Mecholsky, Environmentally enhanced fracture of glass: A historical perspective, J. Am. Ceram. Soc., 92 [7] 1371-1382 (2009)