

Sur la rupture expérimentale des verres monolithiques pincés

J. COLAS^{a,b,c}, K. LEMPOELS^a, R. MOUTOU PITTI^{b,c}, G. GODI^{b,c}, JP. TAHAY^a

a. VIRY SA, Groupe FAYAT, 88214, Remiremont, France j.colas@hotmail.fr,
k.leempoels@viry.fayat.com, jean-pierre.tahay@viryfrance.com

b. Clermont Université, Université Blaise Pascal, Institut Pascal, UMR 6602, BP 10448, Clermont-Ferrand, France, rostand.moutou_pitti@univ-bpclermont.fr,
Gael.GODI@univ-bpclermont.fr

c. CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, F-63171, Aubière, France

Résumé :

Ce travail propose une étude paramétrique sur le dimensionnement des verres monolithiques pincés. Un modèle numérique est développé afin de déterminer les contraintes de rupture dans le vitrage au voisinage des pinces. Ce modèle repose sur une campagne d'essais effectués sur des plaques de verres pincés. Le modèle prend en compte les types de produit verrier, les caractéristiques des pinces et le comportement des intercalaires en EPDM entre les pinces et la plaque de verre. Les assemblages sont testés en flexion trois points en prenant en compte deux types de verre (trempé et recuit). Les essais de flexion sont menés jusqu'à la rupture totale de la structure verrière. La force appliquée ainsi que la flèche à la rupture sont relevées et comparées au modèle théorique. Le mode de fissuration du verre recuit est également analysé. Cette analyse met en évidence des phénomènes de rupture du verre monolithique différents selon les paramètres. Parallèlement, un phénomène de point dur est identifié et localisé en fonction des paramètres identifiés. Ce phénomène est comparé à la répartition des contraintes dans le produit verrier du modèle théorique. La corrélation entre le modèle numérique et les résultats expérimentaux montre des écarts variables en fonction du type de verre et de l'épaisseur expliqués en partie, par le comportement non-linéaire de l'intercalaire.

Abstract :

This paper deals with a parametric study about glass clamp design. A theoretical model is developed in order to determine stresses in glass around clamps. The model is established on bending tests on clamp glasses by changing parameters like glass (annealed glass and prestressed glass), clamps (dimension) and the behavior of rubber between glass and clamp. Results of bending tests are compared with theoretical models. A visual analysis of annealed glass is also established by changing studied parameters. This analysis shows different behaviors by changing clamp dimensions and type of rubber. The visual analysis also shows different location of stresses in glass depending on the parameters. Nevertheless the theoretical models results and the bending test results show important differences particularly due to the non-linear behavior of rubber in the clamp system.

Mots clefs : Verre pincé ; Rupture ; Flexion trois points ; Expérimentation

1 Introduction

Le verre est l'un des matériaux de construction les plus attrayants qui soit. L'éventail des produits disponibles tant dans la composition du verre que dans le type d'assemblage offre des possibilités architecturales uniques. Ces dernières décennies ont permis à ce matériau de devenir performant mécaniquement mais aussi thermiquement. Le verre offre la possibilité d'avoir des systèmes de fixations très variés. Les systèmes les plus courants sont les systèmes de fixation linéaires. Ce sont les fenêtres des habitations, ainsi que les systèmes parclovés des verrières et des façades rideaux [1].

Il existe cependant d'autres systèmes de fixations comme les fixations ponctuelles appelées VEA (vitrage extérieur attaché) [2]. On peut différencier deux types de systèmes de fixations ponctuelles : les fixations traversantes et les fixations pincées. Les fixations ponctuelles engendrent des verrières d'une grande finesse et d'une grande légèreté. Néanmoins ces systèmes génèrent des concentrations de contraintes importantes car les efforts s'appliquant sur le vitrage transitent par ces attaches. Dans la littérature, peu d'études s'intéressent à ce type de structure notamment lorsqu'il faut étudier le comportement local suite à la fissuration sous chargement complexe [3] avec des attaches spécifiques.

Le présent travail propose une méthode de dimensionnement paramétrique du verre pincé. L'étude repose sur la rupture du verre recuit et trempé monolithique [4] lorsque celui-ci est pincé. L'objectif étant de déterminer les contraintes dans le verre au voisinage des pinces par l'élaboration et la réalisation d'essais mécaniques de flexion 3 points. Les essais seront ensuite modélisés par le logiciel Robot Structural Analysis et comparés aux résultats expérimentaux.

2 Matériaux et méthode

2.1 Descriptif des matériaux

Le verre recuit et le verre trempé, de coefficient de Poisson $\nu = 0,2$ et de module d'Young $E = 70\ 000$ MPa, sont étudiés. La résistance caractéristique théorique à la flexion du verre trempé est de 120 MPa et celle du verre recuit est de 45 MPa [5]. Deux épaisseurs (8 mm et 12 mm) de vitrage monolithique ainsi que deux dimensions (50X80 mm et 50X40 mm) de pinces métalliques en acier S235 sont considérées. Les intercalaires en élastomères type EPDM sont situés entre la pince métallique et le vitrage afin d'éviter le contact verre/métal. Plusieurs duretés (50 SHORE A, 65 SHORE A et 80 SHORE A) d'élastomère sont testées.

2.2 Dispositif expérimental

Le système de chargement est constitué d'une presse d'essai universelle de type ZWICK 1484 dont la capacité de chargement est 200 kN. Sont rajoutés à ce système un capteur de force 10 kN et un capteur de déplacement placé au centre de l'éprouvette.

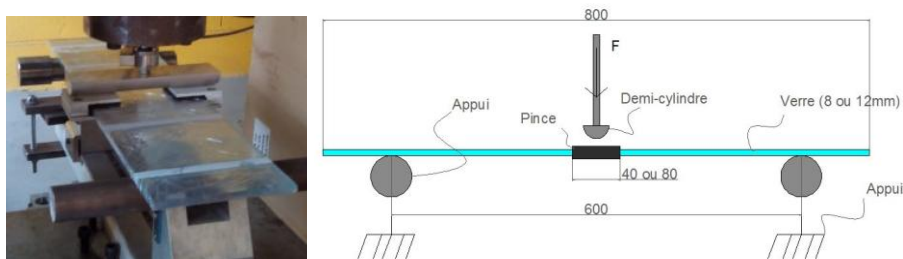


Figure 1 : dispositif expérimental de l'essai de flexion

La force et le déplacement sont mesurés et enregistrés en continu avec une fréquence d'acquisition de 50 Hz. La presse est pilotée en déplacement avec une vitesse de 5mm/min. Le dispositif expérimental est décrit par la figure 1 ci-dessous.

2.2 Protocole expérimental

L'éprouvette de verre est placée sur deux appuis cylindriques inférieurs. Deux pinces sont fixées au centre de l'éprouvette. La charge est transmise par un demi-cylindre fixé sur le vérin et s'applique sur les pinces. Les essais sont menés jusqu'à la rupture du vitrage. On enregistre la force appliquée par le vérin en fonction du déplacement du vérin. 4 paramètres dans le système d'attaches verre pincé sont étudiés. Ces paramètres sont : le type de verre, l'épaisseur du verre, la largeur des pinces et la dureté de l'intercalaire EPDM. Dix montages d'essais sont réalisés en fonction des 4 paramètres étudiés et 5 essais sont effectués par montage (tableau 1).

Tableau 11 : montages d'essai flexion 3 points avec pinces

	Epaisseur du verre (mm)	Largeur de la pince (mm)	Verre	Dureté Intercalaire EPDM
Montage 1	8	40	Verre recuit	65 shore
Montage 2	8	80	Verre recuit	65 shore
Montage 3	12	40	Verre recuit	65 shore
Montage 4	12	80	Verre recuit	65 shore
Montage 5	8	40	Verre trempé	65 shore
Montage 6	8	80	Verre trempé	65 shore
Montage 7	12	40	Verre trempé	65 shore
Montage 8	12	80	Verre trempé	65 shore
Montage 9	12	80	Verre recuit	80 shore
Montage 10	12	80	Verre recuit	50 shore

A ces montages d'essais sont rajoutés des essais de flexion 3 points sans les pinces afin d'obtenir une valeur de référence sans l'influence des pinces. Il y a donc quatre essais supplémentaires (un essai pour chaque type de vitrage).

3 Résultats expérimentaux

3.1 Essais sans pince

Les résultats expérimentaux des éprouvettes préliminaires de flexion trois points sans les pinces sont d'abord analysés. Ces essais sont résumés dans le tableau 2 accompagnés des résistances caractéristiques déduites selon la norme NF 1288-3 [6].

Tableau 22 : résultats des essais de flexion 3 points sans les pinces

	Force appliquée à la rupture (en KN)	Déplacement maximal (en mm)	Résistance caractéristique à la flexion selon la NF 1288 (MPa)
Verre recuit 8 mm	0,88	6,9	63,1
Verre recuit 12 mm	2,40	5,4	75,6
Verre trempé 8 mm	2,90	21,8	204,9
Verre trempé 12 mm	9,82	21,9	307,5

3.2 Essais avec pinces

- Analyse force-déplacement : afin de pouvoir comparer les résultats expérimentaux en fonction des montages d'essais, on utilise les valeurs caractéristiques calculées selon l'annexe D de l'Eurocode [7]. Les valeurs expérimentales tendent vers des valeurs similaires en fonction des paramètres étudiés. La principale cause est la dispersion du verre. Les résultats pourront néanmoins être comparés aux valeurs établies avec le logiciel ROBOT Structural Analysis dans la partie suivante.

- Analyse visuelle du profil de rupture du verre recuit : la figure 2 montre les profils de rupture observés du verre recuit 8 et 12 mm en fonction des paramètres (largeur de la pince et dureté de l'intercalaire EPDM).

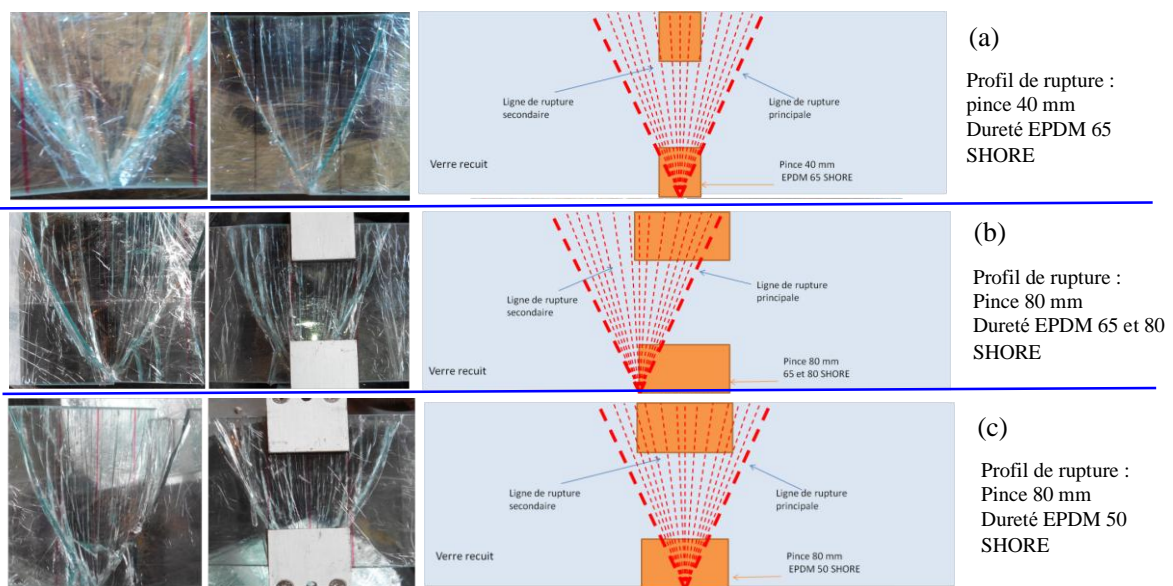


Figure 2 : profils de rupture du verre recuit en fonction des paramètres étudiés

Pour les pinces ayant une faible largeur la rupture se produit au centre de l'éprouvette, c'est-à-dire au centre de la pince avec un angle de fissuration de 60°. Pour les pinces ayant une largeur plus grande (ici 80 mm), la fissuration se produit sur le bord de l'une des pinces. Le système est encastré et la contrainte maximale se situe sur les bords des pinces. Un phénomène de point dur apparaît alors sur le bord extérieur de la pince. Pour une faible dureté de l'intercalaire EPDM (50 SHORE) et une largeur de pince de 80 mm, le mode de fissuration n'apparaît pas au niveau du bord de l'une des pinces mais au centre de l'éprouvette. L'analyse du profil de rupture des échantillons de verre permet de déterminer l'influence de certains paramètres sur le comportement mécanique du verre. En effet, la contrainte maximale dans le verre ne se situe pas au même endroit en fonction des dimensions des pinces et des propriétés physiques de l'intercalaire EPDM.

4 Validation numérique

4.1 Modèles numériques considérés

Ce paragraphe propose des modèles avec le logiciel ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS permettant de comparer les résultats numériques et expérimentaux en fonction des paramètres étudiés. La modélisation ROBOT repose sur le comportement du vitrage à l'intérieur de la pince. La création de la plaque avec un maillage particulier et celle d'appuis spécifiques dépendant de tous les paramètres qui ont permis de créer des modèles simples s'adaptant à tous types de pinces. Ainsi, le modèle « *modèle 1* » définit au niveau des pinces des appuis simples permettant le soulèvement. Ces appuis sont situés sur le contour de la pince. Les appuis simples au soulèvement sont situés à l'intérieur de la pince. Le modèle « *modèle 2* » définit au niveau des pinces des appuis simples élastiques auxquels on rajoute une constante de raideur sur toute la surface de la pince. Cette constante dépend de la forme et de la dureté des intercalaires EPDM et est déterminé de manière analytique [1].

4.2 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

Le tableau 4 ci-dessous récapitule les résultats obtenus par les essais et ceux issus des différentes modélisations numériques.

Tableau 4 : résultats des essais avec les modélisations

Montage	ESSAIS		Modèle 1		Modèle 2	
	Contrainte MPa	Déplacement mm	Contrainte MPa	Déplacement mm	Contrainte MPa	Déplacement mm
Montage 1						
Recuit 8 mm/Pince 40 mm/65 SHORE	64,0	7,2	94,4	5,9	63,56	7,0
Montage 2						
Recuit 8 mm/Pince 80 mm/65 SHORE	64,0	7,6	89,8	4,5	57,1	5,9
Montage 3						
Recuit 12 mm/Pince 40 mm/65 SHORE	76,0	5,0	87,2	4,0	63,8	4,7
Montage 4						
Recuit 12 mm/Pince 80 mm/65 SHORE	76,0	5,0	93,9	3,4	67,0	4,7
Montage 5						
Trempé 8 mm/Pince 40 mm/65 SHORE	210,0	21,0	268,6	16,9	177,0	19,3
Montage 6						
Trempé 8 mm/Pince 80 mm/65 SHORE	210,0	23,8	323,7	16,4	201,1	20,9
Montage 7						
Trempé 12 mm/Pince 40 mm/65 SHORE	310,0	19,6	350,5	16,2	255,0	18,7
Montage 8						
Trempé 12 mm/Pince 80 mm/65 SHORE	310,0	19,0	363,1	13,4	230,0	17,5
Montage 9						
Recuit 12 mm/Pince 40 mm/80 SHORE	75,0	6,5	88,2	4,3	61,2	4,4
Montage 10						
Recuit 12 mm/Pince 40 mm/50 SHORE	75,0	5,2	87,6	4,2	50,7	3,9

Le modèle 1 est sur-dimensionnant car les valeurs sont nettement supérieures aux résultats d'essais. Cela s'explique effectivement par le fait que ce modèle crée un encastrement et ne prend pas en compte l'intercalaire élastique EPDM. Néanmoins on remarque que plus le verre est résistant (verre trempé 12 mm par rapport au verre recuit 8 mm), plus les résultats du modèle se rapproche des résultats expérimentaux. Les modélisations du modèle 2 convergent pour les premiers montages, c'est le cas notamment du montage 1 avec une résistance caractéristique expérimentale de 64 MPa et une valeur de modélisation de 63,6 MPa. Les montages convergeant avec le modèle correspondent aux éprouvettes de verre recuit 8 mm. En revanche, pour les autres montages, les résultats divergent de manières significatives, en particulier lorsqu'il s'agit du verre trempé 12 mm. Ce modèle sous-dimensionne le système d'attache par pince. Une explication à ce phénomène est l'intercalaire EPDM. En effet, la constante de raideur calculée a une influence considérable sur le comportement du verre. De plus, lorsque le verre se déforme sous l'effet d'une charge, l'EPDM ne subit pas un écrasement uniforme mais un poinçonnement sur les bords de la pince.

4.3 Conclusion

L'analyse visuelle des profils de rupture avec les répartitions des contraintes des modèles conduit aux remarques suivantes : (i) le modèle 1 montre des contraintes maximales sur le contour de la pince quelque soit la taille de la pince ou la dureté de l'EPDM, ce qui ne valide pas les résultats expérimentaux. En revanche les contraintes maximales du modèle 2 concordent avec les résultats expérimentaux en ce qui concerne le profil de fissuration du verre. Les modes de fissuration observés lors des essais et la répartition des contraintes du modèle surface convergent. (ii) le modèle 2 est le plus cohérent quant au comportement mécanique du vitrage observé. Il permet en effet, de prendre en compte tous les paramètres étudiés à savoir la géométrie des pinces métalliques, leurs dimensions, les caractéristiques du vitrage et surtout les caractéristiques des intercalaires EPDM. Néanmoins, la comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats du modèle 2 montre des divergences en fonction du type de vitrage. L'interprétation de ces écarts pourrait provenir de la modélisation analytique de la constante de raideur de l'intercalaire EPDM par un ressort. Une modélisation plus fine par méthode des éléments finis (par exemple) de l'intercalaire EPDM permettrait d'obtenir des résultats plus rapprochés des valeurs expérimentales.

Références

- [1] J. Colas, Approche paramétrique du dimensionnement du verre pincé, Mémoire de Projet Recherche Développement, Clermont-Ferrand, Juin 2014
- [2] Cahier du CSTB 3574_V2, Vitrages extérieurs attachés (VEA) faisant l'objet d'un Avis Technique, Janvier 2012
- [3] M. Froling, K. Persson k., P.E Austrell, A reduced model for the design of glass structures subjected to dynamic impulse load. *Engineering Structures* 80 (2014) 53-60
- [4] H. Carre, Le verre trempé, un nouveau matériau de structure, Cahier du CSTB 3003, 1997
- [5] EN 13474, Glass in building – Determination of the strength of glass – Part 3: General calculation and determination of strength of glass by testing, 2009
- [6] NF EN 1288-3, Détermination de la résistance du verre à la flexion. Partie 3 : Essais avec éprouvettes supportées en deux points, 2000
- [7] Eurocode 0, Bases de calcul des structures, 2001.