

Suivi de la fissuration d'une poutre bois par LIDAR

Sylvie YOTTE¹, Rémi TAUTOU¹, Jean Denis LANVIN², Ion Octavian POP¹

¹Univ. Limoges, GC2D, EA 3178, F-19300 Egletons, France.

²FCBA, Allée de Boutaut – BP 227, 33028 Bordeaux Cedex

RESUME L'objectif de ce travail est de tester l'utilisation du LIDAR pour voir si en suivi de structure cela pourrait être un outil de détection de dommage intéressant. Des essais de flexions 4 points ont été réalisés sur des poutres en bois (épicéa, peuplier et chêne) issues de récupération de manière à connaître leur potentiel en réemploi issues de récupération. L'exemple d'une poutre en chêne a été présenté. Des paliers de chargement ont été réalisés de façon à scanner avec un LIDAR une surface de la poutre. Le nuage de points obtenu subit d'abord une ACP pour redéfinir le repère de projection centré au centre de gravité. Le variogramme dans la direction de plus grande inertie est calculé et analysé puis les paramètres de rugosité R_q , R_{ku} , R_{sk} sont déterminés sur des fenêtres de différentes tailles déplacées sur l'image surfacique 3D. La technique mise en œuvre a permis de mettre en évidence une possible localisation d'un départ de fissure critique à partir de 750 daN.

Mots-clefs Bois, Flexion, LIDAR, Surface 3D, relief

INTRODUCTION

Le LIDAR ou la photogrammétrie sont des outils de plus en plus utilisés pour inspecter les ouvrages ou les bâtiments in-situ. Souvent, ces techniques remplacent certaines missions critiques (travail en hauteur, ...) de l'inspecteur, lequel à partir du nuage de points fait son rapport en analysant l'image 3D obtenue. L'utilisation de l'IA permet aussi de nettoyer le nuage de points pour faire disparaître la végétation éventuelle et identifier les fissures. Entre ces deux approches, il est possible d'analyser le nuage de points de façon traditionnelle en travaillant sur des indicateurs de rugosité ou de relief. L'étude présentée ici, s'intéresse aux possibilités qu'offrirait le LIDAR de suivre une poutre en bois in situ.

Al-Kheder et al en 2009 par exemple reconstitue une image 3D des châteaux situés en Jordanie en utilisant à la fois le scan laser et la photogrammétrie. L'intérêt est de restituer aussi la texture et l'information liée à la texture. Arias et al en 2005 construit une image 3D de la Basilique de l'Ascension en Galice à l'aide de la photogrammétrie et du scan laser. Ainsi les pathologies visibles à partir de la surface du monument ont pu être détectées. Biscarini et al en 2020 propose d'utiliser conjointement le radar sol, la photogrammétrie et la caméra infrarouge pour évaluer les dégradations d'un pont romain. Par photogrammétrie aérienne (drone équipé d'une caméra), une image 3D surfacique est d'abord construite en obtenant une bonne qualité y compris pour les points peu accessibles pour un piéton. Le radar permet de retrouver les dégradations situées dans le pont. L'information obtenue à l'aide de la caméra infrarouge peut être superposée à l'image 3D construite à l'aide du radar et de la photogrammétrie. Cela permet d'identifier les zones plus humides, donc pour ce qui est de la pierre, plus poreuses et donc plus susceptible de lixiviation. Acikgoz et al 2017, ont utilisé le scan laser pour identifier les pathologies liées le tassement différentiel pendant des travaux. Ils ont construit plusieurs nuages de points à différentes époques des travaux et ont pu comparer les nuages entre eux pour déterminer le déplacement vertical et les rotations des voutes. Cabaleiro et al (2017) utilisent le scan

laser pour déterminer les caractéristiques des fissures sur une poutre en bois. En particulier, sont déterminées la longueur, l'aire, la largeur maximale ou l'orientation. Par contre ils travaillent en projection sur une surface, ce qui fait que l'aspect volumique de la fissure n'est pas étudié. Cavalagli et al (2020) reconstruit l'image 3D surfacique d'un pont à l'aide de photogrammétrie aérienne (utilisation d'un drone). Par contre, en plus des coordonnées 3D des points, sont étudiées les couleurs, ce qui permet d'obtenir des informations supplémentaires sur l'endommagement du pont (en plus des vides représentant la perte de matière et les fissures). Le modèle est aussi utilisé pour réaliser une analyse par éléments finis, par simplification du nuage de points. La différence entre le nuage simplifié et le nuage brut est en moyenne inférieure à 5mm. Costa-Jover et al ont utilisé le scan laser pour comparer différentes voutes d'une cathédrale, supposées être identiques, leur comparaison issue de nuages de 624 millions de points souligne leurs différences. Gressin et al (2013) travaille sur l'ensemble des points issus de photogrammétrie pour identifier les lignes, les surfaces et les amas de points non structurés. A partir de là il peut comparer deux nuages de points ce qui apporte des informations sur l'évolution dans le temps d'une structure. Jalon et al (2021), proposent une méthode pour identifier le recul d'une surface dans le temps. Ils travaillent sur des surfaces de monuments historiques, constituées de différents reliefs et de différents matériaux avec des modes d'endommagement différents. Ils utilisent une démarche probabiliste pour identifier le dommage et son évolution. Napolatino et Glisic en 2019 utilisent la photogrammétrie pour mesurer la largeur de fissures sur des structures maçonnées. L'objectif est de trouver l'origine de ces fissures avec un modèle DEM. Pancani et Bigongiari (2020) construisent un modèle 3D surfacique d'une forteresse médiévale en combinant le scan laser et la photogrammétrie. Ils réalisent un diagnostic structurel des restes de cette forteresse à l'aide de cette image 3D. Riveiro et al en 2011 réalisent un modèle surfacique 3D issue de la photogrammétrie d'un pont en maçonnerie pour faire l'analyse structurale du pont. En 2016, Riveiro et al, réalise une segmentation du nuage de points dans le but d'identifier les différents éléments d'un pont en maçonnerie. Schueremans and Van Genechten (2009) le scan laser est utilisé pour obtenir un nuage de points afin d'avoir la forme exacte des voutes et pouvoir étudier correctement leur stabilité. Ech (2007) dans sa thèse a caractérisé les déformations obtenues sur des éprouvettes soumises en surface à des sollicitations cycliques. Cette caractérisation a été réalisée à partir d'un relevé du relief de leur surface à partir d'une machine à mesurer laser 3D. On ne trouve pas ou que peu de travaux LIDAR dans le domaine de l'expertise des structures en bois.

Dans un premier temps, une étude bibliographique situera le projet. Puis l'essai réalisé sur des poutres en bois sera décrit, les indicateurs utilisés présentés et les résultats obtenus restitués. Enfin une analyse finale de ces mêmes résultats sera réalisée à la suite.

ESSAIS RÉALISÉS

L'objectif est de pouvoir suivre des poutres en bois en place. Mais pour étudier la faisabilité, le travail a été réalisé sur des poutre en bois issues de récupérations de maisons anciennes et que l'on a testées sur un banc de flexion 4 points. Les résultats présentés ici ne concernent qu'une seule poutre. Les essais sont réalisés sur un banc d'essais hydraulique vertical piloté et asservi informatiquement, d'une capacité nominale de 250 kN par vérin (figure 1). Ces vérins synchronisés sont de classe 1, c'est à dire que la force est mesurée avec une précision de 1 % sur la mesure. Des paliers de chargement (tous les 250 daN) ont été effectués pour prendre les mesures LIDAR. Seuls les points situés dans un rectangle où est initiée la fissure sont analysés, afin d'identifier l'indicateur le plus pertinent. Le rectangle de sélection est le même pour toutes les images 3D obtenues pendant les essais sur une même poutre, quel que soit le niveau de chargement. C'est comme une fenêtre au travers de laquelle on observerait la poutre. La poutre se déforme pendant l'essai. Les coordonnées x isolées par la fenêtre sont à peu

près les mêmes pour toutes les images mais les coordonnées y (verticales) des points de la poutre ne sont pas les mêmes. En clair il y a un déplacement relatif vertical de la fenêtre par rapport à la poutre au cours de l'essai de flexion. C'est la conséquence du choix d'une fenêtre fixe pour l'analyse.



FIGURE 1. Montage de flexion 4 points (poutre chêne de 5m ; section 150x150 mm²)

TRAITEMENT DU NUAGE DE POINTS

Le nuage brut est constitué de l'ensemble des points acquis par le LIDAR. Un premier traitement sur le logiciel lié au Lidar CYCLONE® permet de ne garder que ce qui correspond à l'objet étudié.

La démarche globale de traitement est montrée dans la figure 2. Une ACP (Analyse en Composantes Principales) est d'abord réalisée, afin de rendre le traitement reproductible, indépendant de la méthode d'inspection (utilisation de cibles ou non, position du LIDAR, ou bien utilisation de la photogrammétrie). Elle permet de définir un repère centré au centre de gravité et dont les axes sont les axes de plus grande inertie du nuage. Une grille est superposée, afin de pouvoir faire un fenêtrage et calculer les indicateurs de rugosité sur chaque fenêtre et aussi de calculer le variogramme. Ce sont les paramètres habituels de rugosité (R_q , R_{sk} et R_{ku} voir tableau 1) qui sont déterminés.

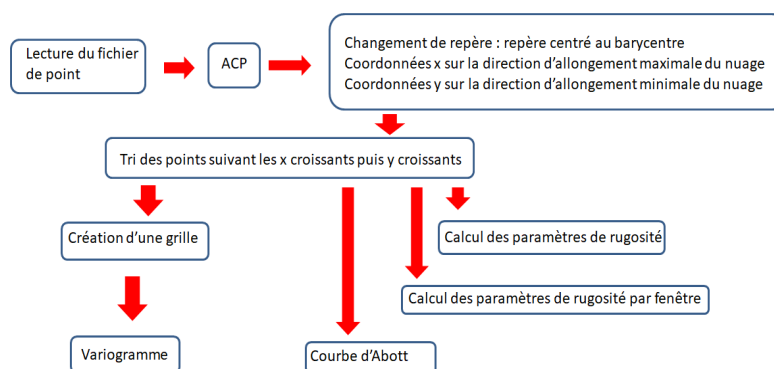


FIGURE 2. Traitement du nuage de points

A chaque sommet de la grille, le barycentre de la rugosité (relief) est établi en z. On définit ainsi des fenêtres de taille 5 fois celle de la grille jusqu'à la moitié de l'image. La fenêtre se déplace en x et y et pour chaque position, les paramètres de rugosité sont établis, et pour chaque taille de fenêtre on garde

la valeur maximale et la valeur minimale de chaque indicateur de rugosité. La variogramme, lui, permet de voir l'évolution de la structure dans l'espace du relief et ou de la rugosité.

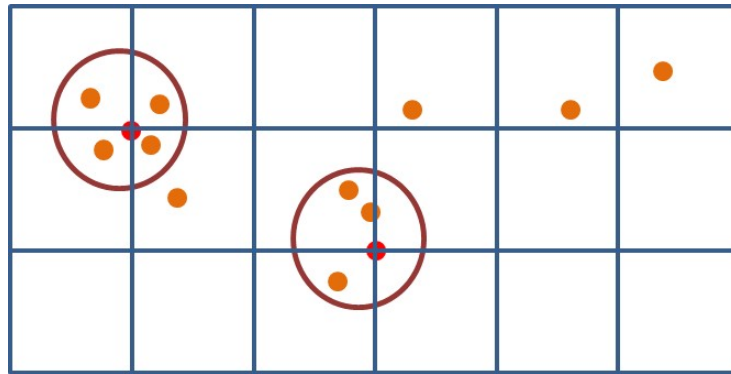


FIGURE 3. Superposition de la grille et détermination des valeurs de z à chaque sommet par le barycentre d'au plus 4 points les plus proches du sommet.

TABLEAU 1. Paramètres de rugosité

Moyenne	$R_a = \frac{1}{np} \sum_1^{np} z_i \quad (1)$
Ecart type	$R_q = \left(\frac{1}{np} \sum_1^{np} (z_i)^2 \right)^{1/2} \quad (2)$
Asymétrie	$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3 np} \sum_1^{np} (z_i)^3 \quad (3)$
Aplatissement	$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4 np} \sum_1^{np} (z_i)^4 \quad (4)$

RESULTATS : ACP (ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES)

Le premier paramètre qui évolue avec le chargement est la valeur propre correspondant à z de l'ACP (axe de plus faible inertie représentant le relief ou la rugosité). La figure 4 en présente la variation. Les 2 autres valeurs propres ne présentent pas de variation significative. La courbe montre une croissance de l'inertie dans cette direction. Cela peut être dû à un effet Poisson et aussi en fin d'essai à l'apparition de la fissure fatale. La rupture intervient pour 2250 daN.

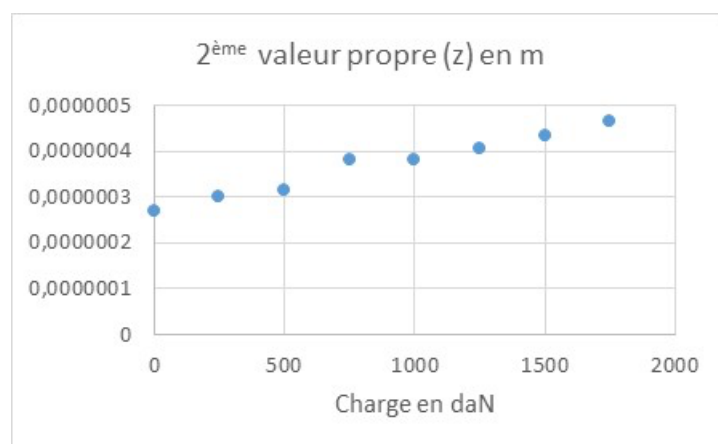


FIGURE 4. Variation de la valeur propre issue de l'ACP

RÉSULTATS : VARIOGRAMME

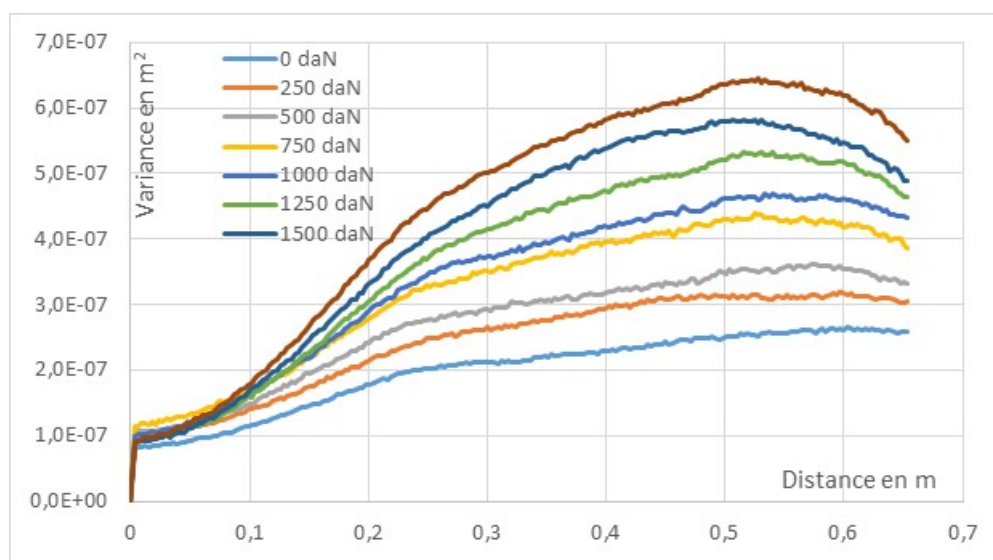


FIGURE 5. Variogrammes pour chaque chargement

Les variogrammes (figure 5), complètent cette vue d'ensemble. Ils ont été tracés pour chaque palier de chargement avec une grille de 3 mm. Pour chaque palier de chargement la figure présente le variogramme moyen dans la direction x (plus grande inertie).

On se contente d'un regard qualitatif sur les courbes. D'une façon générale, les courbes croissent régulièrement puis se stabilisent à peu près toutes. On n'observe pas réellement de palier à cette échelle (grille de 3 mm), la variance augmente avec la distance et avec la charge. Ce qui signifie que plus on charge plus la structure géographique de la rugosité (z) varie. On peut quand même observer 2 niveaux de structure : une première inférieure à 3mm qui correspond au début d'un premier palier, puis une seconde entre 30cm et 50cm (pour les chargements faibles) 40cm à 60 cm pour les chargements supérieurs à 750 daN. Le tableau 2 rend cela avec R_q : l'écart type global de la distribution de z croît avec le chargement. Les valeurs du tableau 2 ont été calculées avec les données issue de l'ACP, sans utiliser la grille.

TABLEAU 2. Valeurs moyennes des paramètres de rugosité sur la zone observée

Palier	0 daN	250 daN	500 daN	750 daN	1000 daN	1250 daN	1500 daN	1750 daN
Rq	3,8E-04	4,4E-04	4,3E-04	4,3E-04	4,6E-04	4,8E-04	5,0E-04	5,3E-04
Rsk	-1,4E+00	-1,4E+00	-1,5E+00	-1,6E+00	-1,6E+00	-1,5E+00	-1,4E+00	-1,2E+00
Rku	2,7E+00	2,7E+00	2,7E+00	3,2E+00	3,3E+00	2,8E+00	2,2E+00	1,9E+00

RÉSULTATS : PARAMETRES DE RUGOSITE

Les variations de rugosité minimale et maximale sont présentées sur les figures 6 (Rku), 7 (Rq) et 8 (Rsk). Une grille à mailles carrées de 3 mm a été utilisée et sur les figures sont mises en abscisse les tailles d’un côté de la fenêtre de calcul (carrée elle aussi). Le minimum (courbes a) correspond à la valeur minimale trouvée sur l’ensemble des fenêtres de même taille, et le maximum (courbes b) donne la valeur maximale trouvée sur le même ensemble. A cette échelle là (entre 15mm et 55 mm) le variogramme présente un plateau, c’est-à-dire que les fenêtres donnent des résultats indépendants.

A. Influence du chargement sur Rku

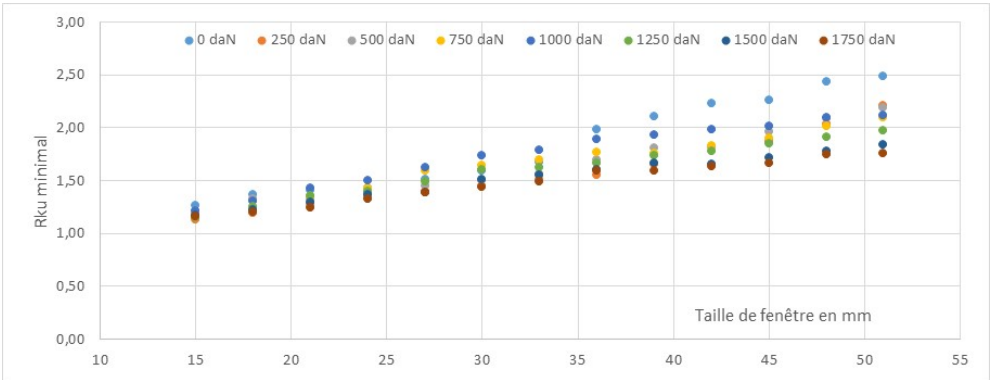


FIGURE 6a. Valeur minimale sur toutes les fenêtres de même taille de Rku

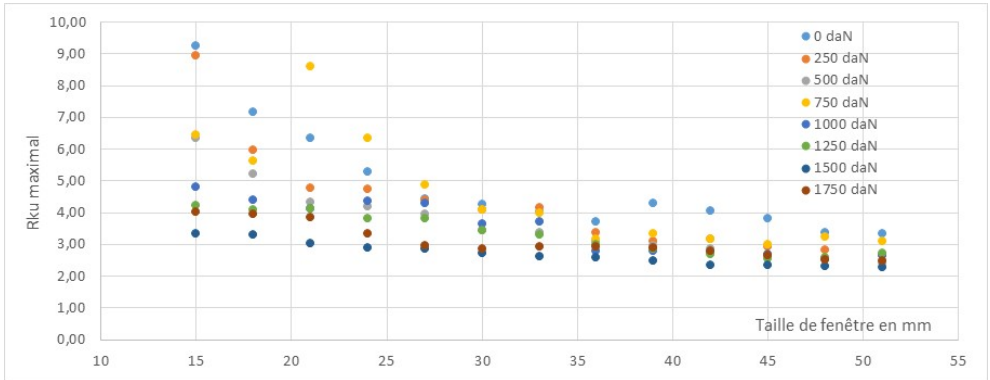


FIGURE 6b. Valeur maximale sur toutes les fenêtres de même taille de Rku

Rku (figure 6a et b) caractérise l'aplatissement de la distribution des altitudes z . Lorsque la charge augmente, la valeur minimale de Rku diminue quelle que soit la fenêtre d'observation. Le tableau 2 montre Rku augmentant avec la charge et diminuant par la suite. On ne retrouve pas cela pour les valeurs de Rku fenêtrée, y compris pour les grandes tailles de fenêtre. Mais le variogramme montre l'existence d'une structure plus grande de l'ordre de 40 cm. Cela explique pourquoi les valeurs ne semblent pas converger vers le Rku global quand la taille augmente.

B. Influence de la taille de la fenêtre sur Rku

La valeur minimale correspond à une fenêtre où la distribution des z est relativement constante. On peut donc toujours trouver une « petite » fenêtre (taille 15 à 20 mm) pour laquelle la répartition est aplatie quel que soit le chargement. Puis sur les fenêtres isolant plus de points, la distribution va tendre vers la distribution moyenne (autour de 2 pour le minimum et le maximum) sur la zone digitalisée par le LIDAR. Pour la fenêtre de taille 51 mm (figure 6a), la distribution est moins constante et présente sans doute un léger mode.

C. Influence du chargement sur Rq

Les figures 7a et b présentent les valeurs minimale et maximale de Rq obtenue pour chaque taille de fenêtre et chaque chargement.

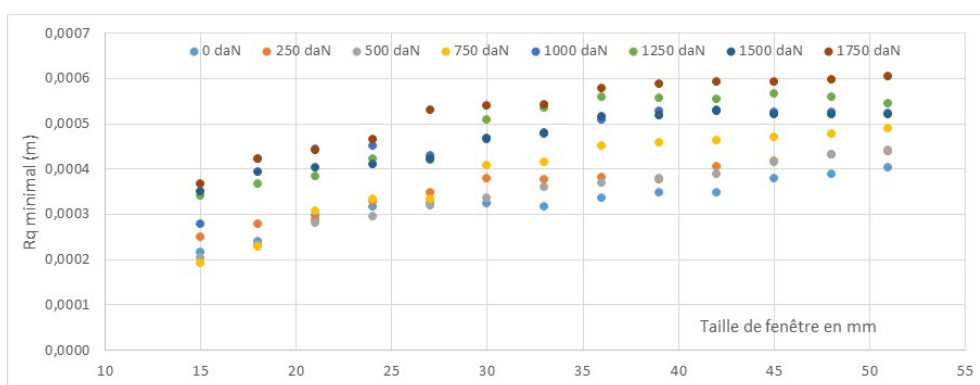


FIGURE 7a. Valeur minimale sur toutes les fenêtres de même taille de Rq

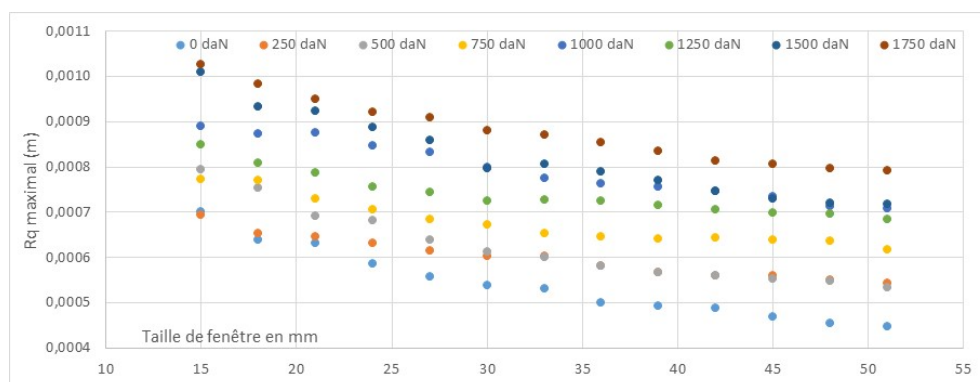


FIGURE 7b. Valeur maximale sur toutes les fenêtres de même taille de Rq

La valeur donnée dans le tableau 2 est croissante avec le chargement. Ce qui signifie que plus la poutre est contrainte plus le désordre induit se manifeste dans la distribution des z . Par contre sur les

figures 7 jusqu'à 1750 daN, on n'observe pas de discontinuité qui pourrait alerter sur l'apparition d'une fissure.

D. Influence de la taille de la fenêtre sur R_q

La valeur minimale trouvée de R_q va caractériser une fenêtre dans laquelle les valeurs de z ne vont pas trop varier. Avec la taille de fenêtre le minimum croît et le maximum décroît vers la moyenne qui devrait être celle du tableau 2. En effet pour 1750 daN le minimum converge au-delà de 0,0006 m et le maximum en deçà de 0,0008 m. Ce qui est au-dessus de la valeur donnée par le calcul direct de R_q sur les données. Pour les petites tailles de fenêtre (15 à 27 mm) R_q minimal est croissant donc plus la taille augmente plus la variabilité de z augmente. Cela signifie que jusqu'à 27 mm, on peut trouver au moins une zone de cette taille avec peu de variation de l'altitude (soit c'est inférieur à l'ordre de grandeur d'une zone défectueuse et la fenêtre est perdue au milieu du défaut soit c'est l'ordre de grandeur d'une zone sans défaut). Entre 33 mm et 51 mm, on observe une stabilisation de R_q à partir de 750 daN. Cela signifie qu'il existe une fenêtre de cette taille pour laquelle la variabilité n'augmente plus. On peut penser qu'on aurait localisation de la déformation ailleurs sur la poutre. R_q maximal continue lui de décroître très fortement pour 1500 daN et 1750 daN et un peu moins pour les autres niveaux de chargement. Cela peut être interprété comme une localisation qui prend suffisamment d'ampleur pour que, sur une fenêtre carrée de 51 mm de côté, il y ait peu de variation en z .

E. Influence du chargement sur R_{sk}

Les figures 8a et b présentent les valeurs minimale et maximale de R_{sk} obtenues pour chaque taille de fenêtre et chaque chargement. R_{sk} est le coefficient d'asymétrie. S'il est négatif, il y a un écart au-dessus de la ligne moyenne ($z=0$ en repère centré au centre de gravité). Il y a donc peu de z négatifs mais leur valeur absolue est grande et beaucoup de petites valeurs positives ce qui explique une moyenne nulle et un mode négatif strictement. Cela peut représenter des fissures, des stries ou bien une usure de la surface.

On observe globalement une augmentation (diminution en valeur absolue) du minimum de R_{sk} avec le chargement, ce qui fait plus penser à une représentation des fibres du bois, qui vont se tasser au cours de la flexion de la poutre. Il y a peu de différence entre les valeurs pour 1500 daN et pour 1750 daN.

La valeur maximale de R_{sk} diminue avec le chargement (augmente en valeur absolue) pour les fenêtres les plus petites. Par contre pour les fenêtres les plus grandes, R_{sk} augmente avec la charge. Cela peut indiquer un désordre initial (défauts de l'ordre de 15 mm à 27 mm) dans la surface qui disparaît au cours du chargement.

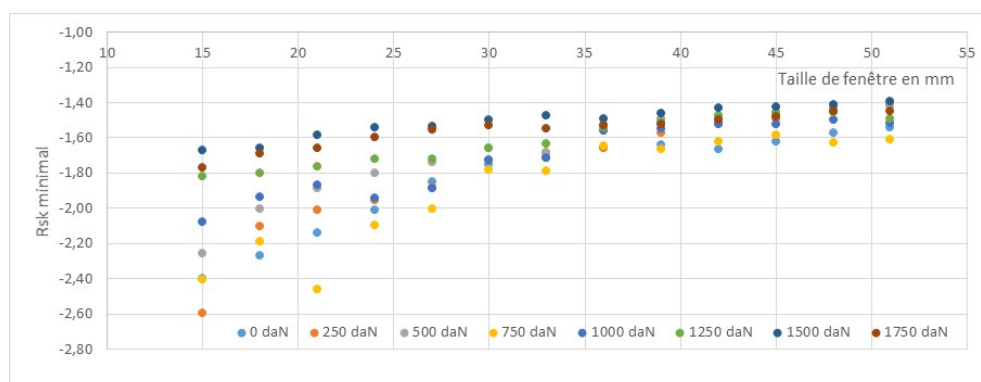


FIGURE 8a. Valeur minimale sur toutes les fenêtres de même taille de R_{sk}

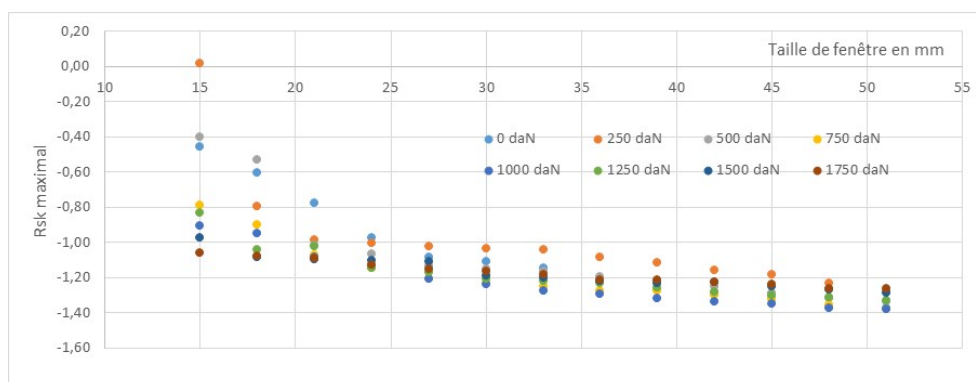


FIGURE 8b. Valeur maximale sur toutes les fenêtres de même taille de Rsk

F. Influence de la taille de la fenêtre sur Rsk

Globalement Rsk maximal décroît avec la taille de la fenêtre, tandis que Rsk minimal croît. Ces variations deviennent plus faibles après 1250 daN pour le minimum et 750 daN pour le maximum. Le minimum représente la valeur pour une fenêtre dans chaque taille où l'asymétrie est la plus forte et le maximum pour une fenêtre où elle est la plus faible. Dans tous les cas, comme la valeur est négative, il s'agit d'une situation où il y a une majorité de petits z positifs avec des pics négatifs importants. Si on augmente la taille des fenêtres, on va capturer plus de z positifs et moins de défaut (pics négatifs) ce qui augmente globalement les valeurs de Rsk, en particulier le minimum. Pour le maximum les petites tailles de fenêtre permettent d'exclure sur certaines d'entre elles de gros défauts (pic négatifs) et donc avoir peu d'asymétrie, mais quand la taille augmente la probabilité de capturer un défaut augmente et c'est la raison pour laquelle on a une décroissance du maximum ce qui révèle une augmentation de l'asymétrie.

CONCLUSION

Des essais de flexions 4 points ont été réalisés sur une poutre en bois (chêne) issue de récupération. Des paliers de chargement ont été réalisés de façon à scanner avec un LIDAR une surface de la poutre. On a pu mettre en évidence :

- L'existence d'une structure inférieure à 3mm, qui peut correspondre aux fibres du bois ;
- L'existence d'une seconde structure de taille variant avec le niveau de chargement, de l'ordre de 4cm pour les charges faibles à 50 cm pour les charges les plus élevées ;
- Une possible localisation de la déformation à partir de 750 daN (départ de fissure critique ?).

L'exploitation du nuage de points issu du LIDAR permet de mettre en évidence l'évolution de la surface d'une poutre au cours d'un essai de flexion. L'analyse pourrait être poussée plus loin identifier des seuils critiques indiquant la proximité de la rupture.

REFERENCES

Acikgoz, S., Soga, K., & Woodhams, J. (2017). Evaluation of the response of a vaulted masonry structure to differential settlements using point cloud data and limit analyses. *Construction and Building Materials*, 150, 916-931. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.075>

- Al-kheder, S., Al-shawabkeh, Y., & Haala, N. (2009). Developing a documentation system for desert palaces in Jordan using 3D laser scanning and digital photogrammetry. *Journal of Archaeological Science*, 36(2), 537-546. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.10.009>
- Arias, P., Herráez, J., Lorenzo, H., & Ordóñez, C. (2005). Control of structural problems in cultural heritage monuments using close-range photogrammetry and computer methods. *Computers & Structures*, 83(21), 1754-1766. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2005.02.018>
- Biscarini, C., Catapano, I., Cavalagli, N., Ludeno, G., Pepe, F. A., & Ubertini, F. (2020). UAV photogrammetry, infrared thermography and GPR for enhancing structural and material degradation evaluation of the Roman masonry bridge of Ponte Lucano in Italy. *NDT & E International*, 115, 102287. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102287>
- Cabaleiro, M., Lindenbergh, R., Gard, W. F., Arias, P., & van de Kuilen, J. W. G. (2017). Algorithm for automatic detection and analysis of cracks in timber beams from LiDAR data. *Construction and Building Materials*, 130, 41-53. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.032>
- Cavalagli, N., Giofrè, M., Grassi, S., Gusella, V., Pepi, C., & Volpi, G. M. (2020). On the accuracy of UAV photogrammetric survey for the evaluation of historic masonry structural damages. *Procedia Structural Integrity*, 29, 165-174. doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.153>
- Costa-Jover, A., Lluís i Ginovart, J., Coll-Pla, S., & López Piquer, M. (2019). Using the terrestrial laser scanner and simple methodologies for geometrically assessing complex masonry vaults. *Journal of Cultural Heritage*, 36, 247-254. doi: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.10.003>
- Ech, M. (2007). Durabilité de la surface de chaussée : influence de la nature du bitume sur la pérennité des couches de roulement. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux
- Jalón, M. L., Chiachío, J., Gil-Martín, L. M., & Hernández-Montes, E. (2021). Probabilistic identification of surface recession patterns in heritage buildings based on digital photogrammetry. *Journal of Building Engineering*, 34, 101922. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101922>
- Napolitano, R., & Glisic, B. (2019). Methodology for diagnosing crack patterns in masonry structures using photogrammetry and distinct element modeling. *Engineering Structures*, 181, 519-528. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.036>
- Pancani, G., & Bigongiari, M. (2020). Digital survey for the structural analysis of the Verruca fortress. *Procedia Structural Integrity*, 29, 149-156. doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.151>
- Riveiro, B., Caamaño, J. C., Arias, P., & Sanz, E. (2011). Photogrammetric 3D modelling and mechanical analysis of masonry arches: An approach based on a discontinuous model of voussoirs. *Automation in Construction*, 20(4), 380-388. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.11.008>
- Riveiro, B., DeJong, M. J., & Conde, B. (2016). Automated processing of large point clouds for structural health monitoring of masonry arch bridges. *Automation in Construction*, 72, 258-268. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.02.009>
- Schueremans, L., & Van Genechten, B. (2009). The use of 3D-laser scanning in assessing the safety of masonry vaults—A case study on the church of Saint-Jacobs. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(3), 329-335. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2008.06.009>

Remerciements

Les auteurs remercient la fondation FEREC pour son soutien financier en 2022-2023