

ANALYSE DE LA STABILITE D'UN MONUMENT HISTORIQUE DE TLEMCCEN «MOSQUÉE DE SIDI BELHASSAN» PAR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS

N. Boumechran
F. Nouali
I.G.C Université de Tlemcen

RÉSUMÉ

La ville de Tlemcen renferme un grand patrimoine de monuments historiques d'une grande valeur. L'âge avancé de ces édifices, plus de sept siècles a entraîné plusieurs types de dégradations. Son expertise doit passer par une analyse du matériau de construction et une étude de la portance globale. L'utilisation d'un calcul aux éléments finis apporte une aide considérable pour la compréhension du comportement exact de la mosquée. Celle-ci nous aidera aussi à situer les zones critiques de la bâtisse qui nécessitent un renforcement.

Les résultats de cette étude ont mis en évidence certaines fissures actives présentes dans certaines parties de la mosquée. Des traitements spécifiques et des solutions de confortement ont été ainsi élaborées pour la restauration globale.

MOTS CLÉS

Monument - stabilité - restauration - historique - méthode des éléments finis - maçonnerie.

1. Introduction

Selon les historiens contemporains nationaux et étrangers, Tlemcen reste la seule ville d'Algérie où l'on trouve des édifices dignes d'être comparés à ceux du Maroc et d'Espagne, réputés riches en vestiges historiques [1]. Ceci est dû au fait que la région a vu le passage durant les temps, de plusieurs dynasties. Les Idrissides, Almoravides, Zianides et Mérinides ont laissé l'empreinte de tout un raffinement artistique sur les principaux monuments de Tlemcen dont témoignent surtout la grande mosquée, la mosquée Sidi Boumèdiène, le site du Mechouar, la mosquée Sidi Belhassan, les ruines de Mansourah, etc. La région de Tlemcen renferme plus des trois quarts du patrimoine historique arabo-islamique du pays [2]. L'un des monuments historiques de Tlemcen les plus représentatifs et intéressants est celui de la mosquée de Sidi Belhassan. L'intérêt de cet édifice est multiple : position stratégique dans le centre-ville et grande richesse architecturale et décorative en ornements et stalactites. Cette mosquée est âgée de 701 ans. Les agressions du temps et du milieu environnant ont entraîné de sérieux problèmes sur la structure de la mosquée.

2. Historique et description de l'édifice

Les Zianides qui gouvernèrent le royaume de Tlemcen (696H/1296C) édifièrent, entre autres, les mosquées de Sidi Belhassan, d'Awlad Eliman, du Mechouar et Sidi Ibrahim. Nous leur devons également l'érection du minaret d'Agadir et des minarets des grandes mosquées d'Alger, Nedroma et Tlemcen. La mosquée de Sidi Belhassan fut bâtie en 696H/1296C sous le règne du roi Abou Saïd Othmane, fils aîné de Yaghmorassen. L'édifice porte le nom de Abou Elhassan Benyakhlef Etenessi, savant qui vécut sous le règne Abou Saïd Othmane. Il était un célèbre juriconsulte qui a professé avec éclat dans cette mosquée [3]. Cette mosquée ne conserva pas sa destination première et eut beaucoup à souffrir de ses affectations successives. Lors du colonialisme, elle servit de magasin à fourrage, puis d'école arabo-française, puis se transforma en musée de la ville jusqu'en 1995. La surface bâtie est relativement carrée : 10.25 m/9.80 m, soit une superficie de

100.45 m². C'est une construction à murs porteurs en maçonnerie de pierres. La hauteur de la mosquée est de 6.14 m. C'est une salle à trois nefs perpendiculaires au mur du mihrab et trois travées. A l'intérieur de la mosquée, huit colonnes en marbre soutiennent les arcs des nefs et la toiture. La toiture inaccessible est en bois de cèdre sculpté à six versants, revêtu de tuiles cylindriques en terre cuite. Dans la période coloniale, un élargissement de toutes les fenêtres de la salle de prière a été faite pour pouvoir augmenter l'éclairage naturel interne de la salle de prière en raison de sa nouvelle fonction de musée. Ces ouvertures sont relativement importantes par rapport à la surface des façades (10% - façade nord et 20% - façade est).

Le minaret de base 3.54m/3.52m, placé à l'angle sud-est de la mosquée, est de hauteur modeste (H=14.25 m). Il est constitué essentiellement de briques pleines en terre cuite avec des joints de mortier de pose d'une épaisseur variable de 2cm à 5cm. La tour, de base 137cm x 139cm, comporte un escalier tournant de 44 marches autour d'un noyau central plein en briques pleines.

Le mihrab de forme hexagonale, d'une largeur de 130cm et 150cm de profondeur, l'intérieur comporte une coupole à stalactites. Le cadre de mihrab est unique dans son genre. Des inscriptions calligraphiques religieuses, un registre horizontal, avec trois arcs festonnés, reposent sur de fines colonnettes. C'est l'un des plus beaux mihrabs des mosquées du Maghreb.

3. Description des matériaux de construction

La mosquée présente deux types de maçonneries : moellons et briques pleines. L'échantillonnage a été plus difficile pour le premier que pour le second et ceci est dû essentiellement à leur taille. Pour cela, un programme de reconnaissance de la brique pleine a été fait au laboratoire [4]. Par contre, pour la maçonnerie en moellons, une approximation a été faite à base de recherches bibliographiques.

3.1 Maçonnerie en moellons

Les murs porteurs de la salle de prière sont en maçonnerie de pierres gréseuses avec mortier de joint à base de chaux grasse. Parfois, les murs pré-

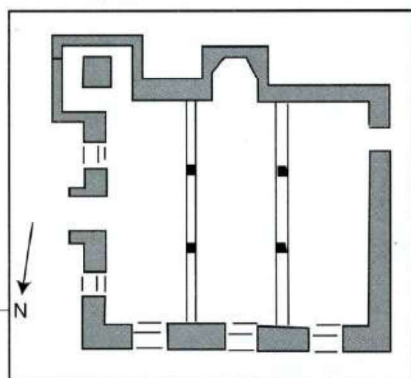


Figure 1 : Coupe horizontale de la mosquée

sentent des lits de briques pleines pour rattraper les niveaux de pose de pierres. Le taux de fatigue et de dissolution global ou local du liant du mortier a engendré l'apparition de quelques altérations. Celui-ci diminuera considérablement la rigidité du mur. Pour cela, on a réduit les valeurs des caractéristiques mécaniques. Leur estimation, pour le cas de la maçonnerie en moellons gréseux :

- Module d'élasticité : $E = 9.106 \text{ kN/m}^2$.
- Coefficient de poisson : $\nu = 0.2$.
- Densité : $d = 2.2$.

3.2 Maçonnerie en briques pleines

Des études expérimentales en laboratoire sur des échantillons de briques ont pu déterminer certaines caractéristiques physiques et mécaniques :

- Densité : $\gamma = 1.80 \text{ g/cm}^3$
- Teneur en eau résiduelle : $\omega_{\text{moy}} = 3.20\%$
- Porosité globale : $\eta_{\text{moy}} = 24\%$
- Absorption de l'eau : $c = 5.8$
- Résistance à la rupture : $\sigma_{\text{moy}} = 84.42 \text{ kg/cm}^2$

On remarque que cette brique est jugée légère, poreuse et très résistante en comparaison avec les briques contemporaines ou les briques actuelles [5]. La valeur moyenne de la résistance de la brique permet de déterminer d'une manière empirique le module d'élasticité de déformation par le module d'élasticité de déformation par la formule du Pr L. Onichtchik qui tient compte de la classe du mortier [6] :

- Module d'élasticité : $E = 1.107 \text{ kN/m}^2$
- Coefficient de poisson : $\nu = 0.15$
- Densité moyenne de la maçonnerie : $d = 1.90$

4. Étude de stabilité de la mosquée

Une étude précise de stabilité de la mosquée devrait prendre en compte les caractéristiques de la structure, tel que :

- les dimensions géométriques des éléments composant la mosquée tel que les murs et le minaret,
- la complexité géométrique de la mosquée présente une juxtaposition de murs épais, minaret, mihrab, colonnes, etc.
- les ouvertures (fenêtres et portes),

- la présence des éléments plaques (toitures),
- l'existence de plusieurs types de matériaux de construction qui composent l'édifice engendrant une variation spatiale des caractéristiques physiques et mécaniques,
- le chargement de calcul est celui du poids propre et la surcharge de neige normale sur la toiture. L'effet du vent n'a pas été considéré puisque l'édifice est protégé par un effet de masque des constructions avoisinantes.

Ces caractéristiques (géométriques, physiques et mécaniques) engendrent des variations de rigidité importantes en raison des hétérogénéités de maçonnerie et des brusques variations de sections des éléments constitutifs et qui rend impossible tout calcul correct par application des techniques usuelles de la résistance des matériaux. Seul le recours à la méthode des éléments finis permet d'aboutir à des résultats de calcul crédibles. L'application de cette méthode permet à la fois de saisir le fonctionnement d'ensemble de la structure et de déterminer les valeurs des contraintes existant dans les parties sensibles de l'édifice.

La présente étude a été réalisée à l'aide du programme de calcul par éléments finis SAP 90. Le modèle en éléments finis retenu présente 4338 nœuds, 8 barres, 220 éléments plaques et 2338 éléments prismatiques à 8 nœuds. Soit un système numérique à 12201 degrés de liberté. Les murs sont supposés encastres au niveau des fondations [4]. L'analyse de la distribution des contraintes a été prise suivant les axes principaux X, Y, et Z, vu que la descente de charges s'opère suivant l'axe OZ et les murs de la structure sont parallèles aux axes OX et OY.

Le choix des contraintes à analyser s'est posé sur les contraintes σ_{zz} , σ_{yy} et σ_{xx} puisque les repères global et local des différents éléments de la modélisation sont confondus. Ces contraintes vont être analysées successivement comme suit:

4.1. Contrainte σ_{zz}

Le graphique général de la distribution des contraintes verticales σ_{zz} (Figure 2) visualise assez clairement la façon dont travaille l'édifice suivant la direction z.

Les contraintes de compression les plus élevées se manifestent au pied du minaret, côté sud-est, et

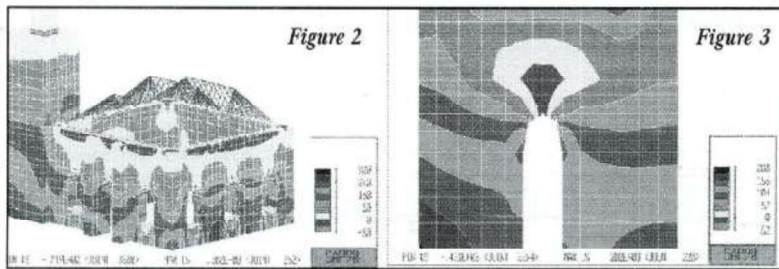
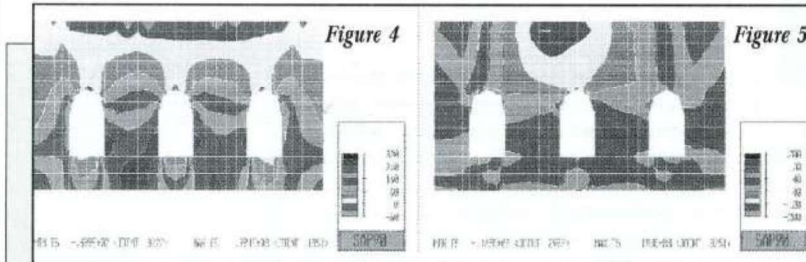


Figure 2 : Isovaleurs des contraintes verticales σ_{zz} sur les faces Nord et Est

Figure 3 : Isovaleurs des contraintes verticales σ_{zz} sur le mihrab

Figure 4 : Isovaleurs des contraintes verticales σ_{zz} sur la face Nord

Figure 5 : Isovaleurs des contraintes verticales σ_{xx} sur la face Nord



rieur vers l'extérieur). Ceci est dû aux poussées très importantes de la toiture sur le mur. Vu que ce mur n'est pas raidi par un minaret ou un mihrab, ces contraintes sont relativement importantes.

5. Synthèse

L'étude par éléments finis de la mosquée et la modélisation retenue basée sur une loi de comportement élastique et linéaire a permis de cerner et de comprendre le fonctionnement global de l'édifice. Cette étude a montré que les murs ouest et sud étaient beaucoup plus rigides que ceux nord et est. Ceci s'explique par la présence du minaret et du mihrab, qui jouent un rôle de raidisseurs d'ensemble. La contrainte de compression maximale est très petite par rapport aux contraintes de rupture des matériaux de construction. Ceci est dû essentiellement au fait que la surface d'impact de la structure est très importante, car les murs porteurs de la mosquée sont très épais (e= 80 cm à 90 cm).

La plupart des fissures relevées sur site et soupçonnées être d'origine structurelle ont été prouvées par les calculs. Ce sont celles des zones tendues : fenêtres (surdimensionnées), portes, haut des murs et mihrab. Pour cela, elles seront prises en considération dans les travaux de restauration.

6. Conclusion

Une expertise profonde d'un tel monument passe obligatoirement par un diagnostic détaillé de la structure, des éléments composants et des matériaux constitutifs. L'une des étapes les plus importantes est celle de l'analyse de la stabilité de l'édifice. Pour cela, l'utilisation d'un modèle numérique en éléments finis est l'approche la plus conseillée pour comprendre son comportement. Généralement, les contraintes de compression sont assez faibles et n'engendrent pas de préjudices. Les contraintes de traction sont les plus à redouter puisque la résistance des matériaux rocheux ou de briques est généralement très faible. Une connaissance précise de la structure, son comportement et ses maux permettra à l'ingénieur de trouver les remèdes ou les solutions de restauration les plus efficaces et les plus adaptées ■

BIBLIOGRAPHIE

[1] Bourouiba R. «Apports de l'Algérie à l'architecture religieuse arabo-islamique», O.P.U 1986.
 [2] Collection Art et Culture, «l'architecture algérienne», S.N.E.D 1974.
 [3] Ben Ramdane Chaouech M. «Baqat essaoussan dans la définition de la civilisation de Tlemcen, capitale du royaume Zianide», O.P.U 1995.
 [4] Nouali F. «Expertise d'un monument historique de Tlemcen : La mosquée de Sidi Bel Hassan», P.F.E. Ingénieur d'état en Génie Civil, Université de Tlemcen, 1997.
 [5] Boumechra N. «Site historique du Mechouar : Analyse des structures, consolidation et réparation», Rapport d'expertise et de restauration, Bureau d'études B.T.M. Tlemcen, 1996.
 [6] Baikov V. et Stronguine S. «Calcul des structures», Éditions Mir, Moscou, 1984.

sont de l'ordre de 3.08 bars, car, c'est la partie la plus lourde, vue la hauteur du minaret (H=14.25m). On note que cette contrainte reste admissible ($\sigma < \sigma_e = 84.4$ bars) concernant la brique pleine et le mortier de chaux, tandis que les contraintes de traction les plus élevées se rencontrent en haut des murs vers l'extérieur, de l'ordre de 0.72 bars. Ceci est dû à la poussée des toitures (Figure 4). Par ailleurs, ces contraintes accumulées sur le haut des murs engendrent des contraintes de traction sur le seuil des fenêtres, ainsi que sur la clé des ouvertures, dues d'une part à l'effet du poids propre et d'autre part aux contraintes concentrées emmenées par la toiture. Les contraintes de traction, qui sont les plus dangereuses pour la maçonnerie, se trouvent essentiellement au niveau de :

- en haut des clés des fenêtres et de la porte d'entrée ;
- en bas des fenêtres ;
- en haut des murs de la mosquée (face extérieure) ;
- au niveau de la clé du mihrab où la contrainte de traction atteint 0.43 bars. Cette concentration de contraintes a engendré une fissure active et profonde, relevée au même endroit (Figure 5).

4.2. Contraintes σ_{yy}

Quant aux contraintes latérales σ_{yy} définies au niveau des murs est et ouest, elles présentent une discontinuité du comportement. On remarque que la face est est appuyée sur le minaret d'un côté et relativement libre de l'autre. A cet effet, on a une concentration des contraintes de traction sur la partie nord-est du mur de l'intérieur de la mosquée.

4.3. Contrainte σ_{xx}

Les contraintes σ_{xx} , au niveau du mur nord, atteignent 1.93 bars en compression et 1.63 bars en traction (Figure 5). Ces contraintes maximales se trouvent au milieu du mur de part et d'autre (de l'inté-