

Préparation d'une campagne de caractérisation dynamique du temple d'Aphrodite (Ségeste, Sicile)

Arnaud Montabert¹, Aloys Nzoumbe-Ekeng¹, Klaus-Günter Hinzen²

¹ Université paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 91190, Gif-sur-Yvette, France. arnaud.montabert@ens-paris-saclay.fr

² Department of Geosciences, University of Cologne, Cologne, Germany. hinzen@uni-koeln.de

RESUME Le temple de Ségeste de style dorique fut probablement érigé avant 430 av. J.-C. à l'ouest de la Sicile, dans une région à sismicité modérée. Malgré de nombreux séismes historiques de magnitude modérée (autour de 5.5), le temple se dresse avec seulement de légers déplacements et interroge donc sur son comportement dynamique. Les paramètres modaux du temple (fréquences naturelles, déformées modales, et taux d'amortissement), peuvent être identifiés en mesurant la réponse de la structure sous vibration ambiante en divers position via l'Analyse Modale Opérationnelle. Dans cette situation, le déploiement de capteur est particulièrement délicat et doit être représentatif du comportement vibratoire. Cette étude propose un protocole pour identifier numériquement la position optimale des capteurs à partir de la conception d'un modèle numérique construit à partir d'un nuage de point, contraint par la réalité du terrain.

Mots-clefs Analyse Modale Opérationnelle, temple de Ségeste, Optimisation du placement de capteur, nuage de point, modèle aux éléments finis.

I. INTRODUCTION

A. Contexte historique autour de la construction du temple d'Aphrodite

La cité de Ségeste est fondée probablement au cours du Ve siècle av. J.-C., dans une Sicile subdivisée en plusieurs dizaines de puissances locales. Si la Sicile tient son nom du peuple des Sicules de culture grecque, chaque cité est issue d'un mélange de populations locales mais également issus de cultures méditerranéennes souvent en conflit. Ces cités-colonies disposent de soutiens logistiques au-delà des frontières de la Sicile, ce qui a des implications importantes sur l'architecture et le développement de l'urbanisme. A l'ouest de la Sicile, le peuple des Élymes, constitué de membres indigènes, de Sicanes, de Phocéens, ou d'Anatoliens ayant fuit la chute de Troie, vont installer deux villes: Éryx permettant la surveillance du stratégique canal de Sicile et Égeste (rebaptisé plus tard en Ségeste) leur assurant une disposition géographique protégée. Localisée dans la partie la plus pauvre de l'île, menacée par sa proximité avec Carthage, Égeste fut en plus régulièrement harcelée par la cité de Sélinonte et de Syracuse. La cité fera appel à Carthage, puis à Athènes pour se défendre de l'agression des autres cités siciliennes pour finalement être réduit à l'état de simple village vers le milieu du 4e siècle.

Ce passé rapidement synthétisé donne des indices pour comprendre la particularité architecturale de Ségeste et du temple d'Aphrodite. En effet, le temple de Ségeste est installé à l'extérieur de la cité contrairement aux usages de l'urbanisme grec antique. De plus, le temple, qui présente bien les éléments stylistiques empruntés à la culture grecque, ne présente que le péristyle, l'architecture étant ainsi inachevée. Par ailleurs plusieurs indices montrent un chantier brutalement arrêté comme en démontre la présence de bossages sur les blocs de base qui sont généralement supprimés après leur transport. Les colonnes ne sont pas cannelées. On note également l'absence des dalles de liaisons entre les bases des colonnes de façades Est et Ouest, l'absence de la *cella* (généralement bâtie avant le péristyle) et donc l'absence des poutres de butée entre la *cella* et l'*architrave* au dessus des *chapiteaux*. En outre, le temple n'a jamais été recouvert d'un toit. Pourtant, les colonnes ne se sont jamais effondrées plus de 2700 ans après leur éviction malgré une exposition à un aléa sismique modérée, ce qui lui a souvent conféré un statut de structure parasismique.

B. Contexte sismotectonique et sismique de l'ouest de la Sicile

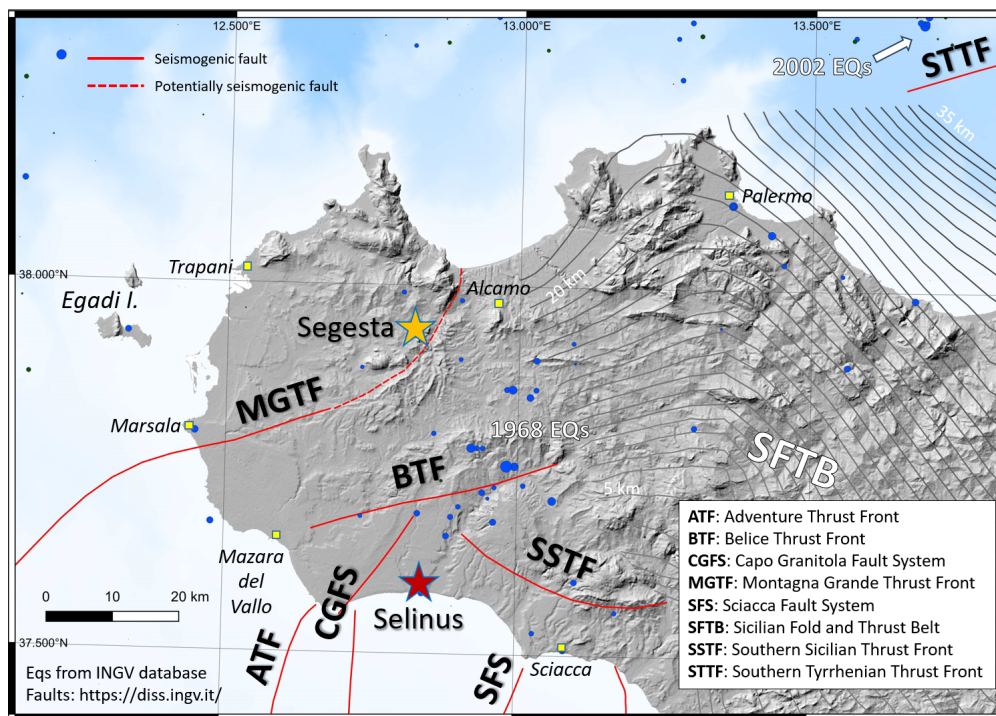


FIGURE 1. Contexte sismotectonique de l'ouest de la Sicile. Les failles principales sont représentées en rouge. Les répliques du séisme de Belice sont indiquées en bleu (source: <https://diss.ingv.it/>).

Le temple évolue dans un contexte tectonique particulier. Le nord de la Sicile fait partie de la ceinture orogénique de la Méditerranée centrale caractérisée par une activité tectonique importante (collision entre la plaque Afrique et Eurasiatique) et une sismicité moyenne à forte. La Sicile est ainsi découpée par de nombreuses failles qui ont généré de puissants séismes historiques dont une série de séismes au 5e siècle av. J.C. (Figure 1), puis en 1693, 1908 (le grand séisme de Messina, Mw 7.1-7.5), 1968 (Mw 6.5), 2002 (Mw 5.9), et 2018 (Mw 4.8). Cette sismicité importante est responsable de la destruction d'une grande partie des temples grecques de la région, en particulier ceux de Sélinonte.

C. Objectifs

La préservation du temple d'Aphrodite interroge sur ses propriétés dynamiques, et donc ses caractéristiques modales (fréquences naturelles, déformées modales, et taux d'amortissement). Ces caractéristiques peuvent être identifiées au moyen de l'Analyse Modale Opérationnelle (Brincker et al., 2000). Cette méthode consiste à mesurer la réponse de la structure au bruit ambiant. L'instrumentation est particulièrement délicate puisqu'il s'agit d'instrumenter le temple de manière non-invasive et non-destructive, dans le respect des chartes de l'ICOMOS. Les capteurs doivent donc simplement être posés sur la structure sans colle ni vissage. Il est de plus nécessaire d'accéder à la partie supérieure de la structure afin d'acquérir une amplitude maximale du mouvement. La première question de cette étude consiste donc (1) à identifier la position optimale des capteurs, afin d'avoir une résolution spatiale optimale dans la caractérisation de la base modale. Cette caractérisation repose sur la construction d'un modèle du temple suffisamment représentatif de son comportement modal. Simple en apparence, le temple de Ségeste présente quelques variations de ces propriétés géométriques interrogeant sur le degré de complexité requis nécessaire et justifiable. Ainsi la seconde question de cette étude (2) sera de quantifier l'impact de ces variations sur les caractéristiques modales cherchées et ainsi de comprendre si un effort de modélisation détaillé est justifié.

Pour ce faire, la géométrie du temple est tout d'abord caractérisée via l'acquisition d'un nuage de point suite à une campagne de caractérisation par laser scanner terrestre. Deux maillages sont ensuite proposés pour quantifier l'impact des variations géométriques identifiées sur les fréquences naturelles du temple. Une configuration de placement de capteurs est ensuite testée.

II. CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE DU TEMPLE DE SÉGESTE

Le temple d'Aphrodite est un temple dorique hexastyle. Il mesure un peu plus de soixante mètres de long et vingt-six mètres de large (Mertens et Tusa, 1984), et compte trente-six colonnes (six colonnes à l'avant et à l'arrière de la structure, en plus des quatorze colonnes de chaque côté). Des iconographies attestent de l'état du temple depuis au moins le 18^e siècle (Figure 2).



FIGURE 2. Représentation du temple d'Aphrodite d'après une estampe du 18^e siècle (source: Parc archéologique de Ségeste).

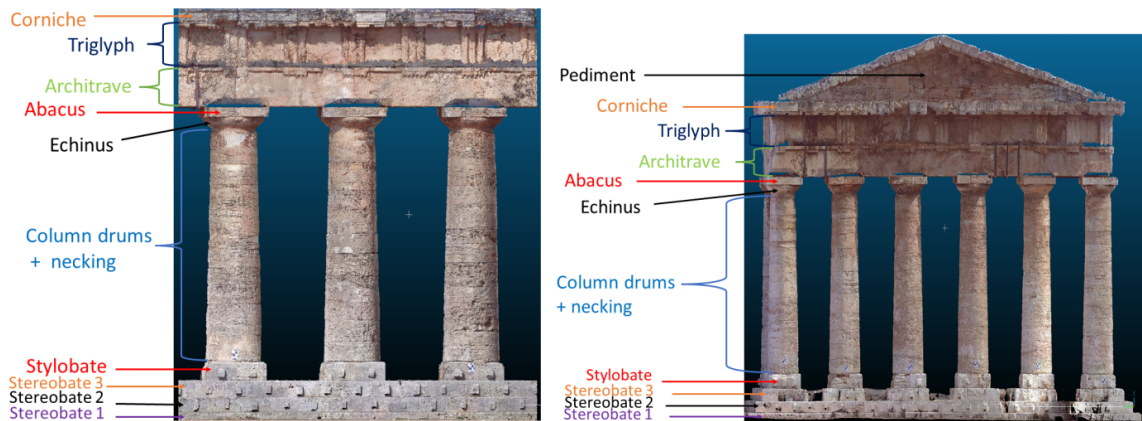


FIGURE 3. Description des éléments du temple de Ségeste pris en compte dans la création du modèle à partir des caractéristiques géométriques caractérisées avec le logiciel CloudCompare.

Une campagne de laser scanner a été menée autour du temple en utilisant 32 scans pour un total de 203.8 millions de points avec une précision de 4mm (Figure 3). Le nuage de points a permis de déduire les dimensions géométriques des divers éléments du temple. La distance entre les colonnes permet de distinguer deux groupes : les colonnes près des angles (les quatre colonnes aux angles et leur deux plus proches voisins respectifs) ont une distance inter colonne inférieure d'environ 4.16 m tandis que les colonnes disposées longitudinalement ont une distance entre les colonnes de 4.35m. Les caractéristiques géométriques des stéréobates, des colonnes, et des echinus du temple sont décrites dans les Tableaux 1 et 2. Les 36 stylobates ont une dimension de 2.18 m x 2.10 m x 0.65 m.

TABLEAU 1. Dimensions des trois stéréobates du temple de Ségeste

Désignation	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)
Stéréobate 1	61.19	26.26	0.35
Stéréobate 2	60.07	25.23	0.55
Stéréobate 3	59.06	24.22	0.59

TABLEAU 2. Dimensions des colonnes et des echinus du temple de Ségeste

Désignation	Rayon à la base (min. - max. en m)	Rayon au sommet (min. - max. en m)	Hauteur de la colonne (m)
Colonnes	[0.96, 0.98]	[0.76, 0.8]	8.50
Echinus	[0.76, 0.8]	1.11	0.46

III. DÉFINITION DU MAILLAGE

Le maillage support d'un modèle aux éléments finis a été généré sur le logiciel Cast3M de manière paramétrique afin de tester l'impact de la connaissance de la géométrie sur les paramètres modaux du temple. En effet, la caractérisation géométrique a montré de légères variations sur les dimensions des colonnes, et surtout une distance entre les colonnes différentes. Pour quantifier l'impact sur les caractéristiques modales, on propose de générer deux maillages: un maillage basé sur les caractéristiques identifiées élément par élément depuis le nuage de points telles que synthétisés dans les Tableaux 1 et 2 (modèle 1); un maillage construit à partir des valeurs moyennes de ces caractéristiques géométriques (modèle 2). Les éléments de la structure sont maillés selon l'ordre architectural des éléments du temple comme indiqué dans la Figure 4.

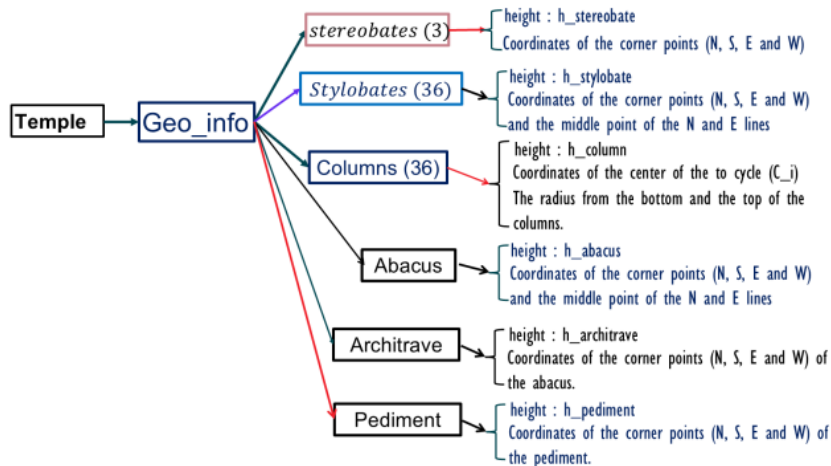


FIGURE 4. Méthodologie utilisée pour le maillage des éléments architecturaux du temple à partir du logiciel Cast3M.

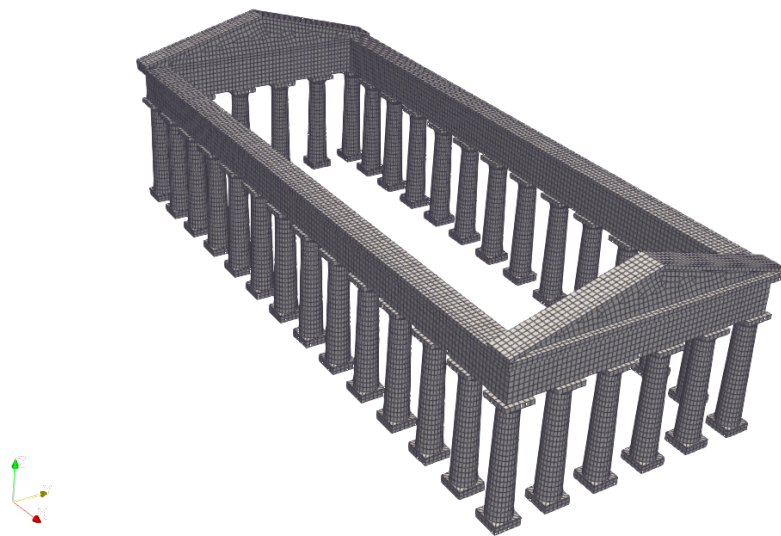


FIGURE 5. Maillage aux éléments finis du modèle 2 du temple de Ségeste.

IV. ANALYSE MODALE ET ÉVALUATION DE LA POSITION OPTIMALE DES CAPTEURS

Le temple est construit à base de calcaires travertins (Tohalino et al, 2023). Les caractéristiques du calcaire local ont donc été retenues avec un module de Young de 2.5 GPa, un coefficient de Poisson de 0.25 et une masse volumique de 2500 kg/m³ (Tohalino et al, 2023). La première phase de cette étude se limite à une évaluation des modes de la structure en résolvant le problème aux valeurs propres (Eq. 1) à partir du modèle aux éléments finis (Figure 5).

$$(\underline{K} - \omega_i^2 \underline{M}) \underline{\phi}_i = \underline{0} \quad (1)$$

Avec \underline{K} , \underline{M} , les matrices de rigidité et de masse de la structure, ω_i , et $\underline{\phi}_i$ les valeurs propres, et vecteurs propres du système (respectivement associées aux pulsations naturelles et déformées des modes). Un modèle élastique isotrope est alors considéré. La base des colonnes est considérée comme bloquée en première approximation. Les 12 premiers modes sont illustrés à la Figure 6.

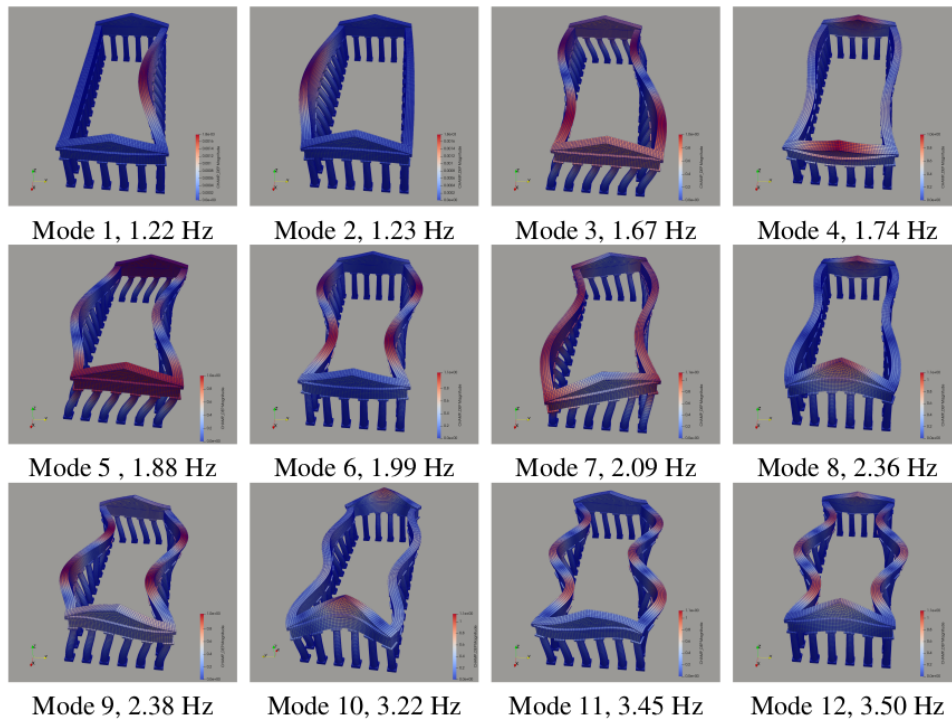


FIGURE 6. Évaluation des 12 premiers modes de vibrations du modèle 2 du temple d'Aphrodite

Certains éléments du temple ne sont malheureusement pas accessibles. Des zones présentent un risque de sécurité (au sommet de la structure), certains éléments sont trop endommagés, même pour supporter le poids d'un capteur (la figure 7 illustre l'état d'érosion avancée d'un des abacques). Seul le sommet de certains abacques (les abacques endommagés ne seront pas instrumentés pour des raisons de sécurité) sont à la fois accessibles, et présentent des dimensions suffisantes pour accueillir

un vélocimètre. Il faut donc s'assurer qu'ils permettent une résolution spatiale suffisante pour identifier les caractéristiques modales.



FIGURE 7. Érosion de la surface supérieure d'un abaque du temple d'Aphrodite (gauche). Proposition de placement de capteurs (en rouge) le long de colonnes, et au sommet de quelques abaques.

Les abacs non endommagés sont ainsi sélectionnés. Deux lignes verticales de capteurs ont été également prévues pour caractériser le comportement local des colonnes (Figure 7).

La pertinence de ces emplacements a été vérifiée par extraction des déplacements modaux aux emplacements virtuellement identifiés, et le calcul de la matrice autoMAC définie telle que :

$$AutoMAC_{ij} = \frac{|\underline{\phi}_i^t \underline{\phi}_j|^2}{(\underline{\phi}_i^t \underline{\phi}_i)(\underline{\phi}_j^t \underline{\phi}_j)} \quad (2)$$

Un autoMAC proche de 1 implique une forte correspondance des modes, et donc une difficulté à les distinguer. Au contraire, un autoMAC proche de 0 caractérise l'orthogonalité des modes, et donc une bonne capacité à les distinguer.

V. RÉSULTATS

A. Sensibilité des paramètres modaux aux variations géométriques du temple de Ségeste

La sensibilité des fréquences naturelles à la variation des dimensions géométriques entre les deux modèles a été quantifiée en calculant l'écart relatif entre les fréquences f_i venant des deux modèles (modèle 1 et modèle 2).

$$E_i = \frac{|f_{i,modèle 2} - f_{i,modèle 1}|}{f_{i,modèle 2}} \quad (3)$$

Le Tableau 3 montre un impact négligeable des variations de la géométrie des éléments du temple dans les plages de variations indiquées dans les Tableaux 1 et 2. En effet, on observe un écart inférieur à 0.01 Hz, largement noyé dans le bruit des mesures conduites en analyse modale opérationnelle. En effet, on observe dans la littérature des variations de fréquence pouvant aller jusqu'à 7% sous le simple effet de la température (Montabert et al., 2023). Le modèle simplifié 2 est donc utilisé pour mener les analyses de positions optimales de capteurs.

TABLEAU 3. Comparaison des fréquences naturelles obtenues entre le modèle 1 et le modèle 2

Mode	Fréquences du modèle 1 (Hz)	Fréquences du modèle 2 (Hz)	Erreur relative E (-)
Mode 1	1.23	1.22	8.13e-3
Mode 2	1.24	1.23	8.06e-3
Mode 3	1.66	1.67	6.02e-3
Mode 4	1.72	1.74	1.16e-3
Mode 5	1.86	1.88	1.07e-3
Mode 6	2.01	1.99	9.95e-3
Mode 7	2.10	2.09	4.76e-3
Mode 8	2.32	2.36	1.72e-3
Mode 9	2.39	2.38	4.18e-3
Mode 10	3.18	3.22	1.26e-3
Mode 11	3.47	3.45	5.76e-3
Mode 12	3.51	3.50	2.85e-3

B. Validation du protocole de positionnement des capteurs

Les déplacements modaux issues des déformées modales du modèle 2 (Figure 6) sont extraites aux points de mesure sélectionnés (points rouges illustrés à la Figure 7). La matrice des coefficients AutoMAC est calculée pour cette configuration et est illustrée à la Figure 8. Les valeurs de la matrice autoMAC (Figure 8) démontrent la capacité de la disposition virtuelle des capteurs à clairement identifier les 12 premiers modes du temple (valeurs hors diagonales largement inférieures à 0.5).

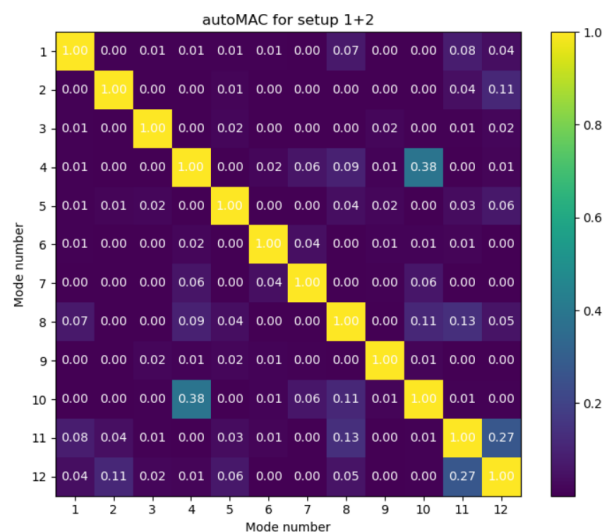


FIGURE 8. Matrice AutoMAC pour évaluer la distinction des 12 premiers modes de vibrations du temple de Ségeste à partir des déplacements modaux extraits aux noeuds candidats provisoirement identifiés.

CONCLUSIONS

Le temple de Ségeste se dresse inachevé sur le mont Barbaro depuis plus de 2700 ans dans une région à sismicité modérée. La préservation de son péristyle interroge sur ses caractéristiques modales. Cette étude propose une évaluation préliminaire de la position optimale des capteurs dans le souci de préparer une campagne d'analyse modale opérationnelle sous vibrations ambiantes. Cette étape nécessite la construction d'un modèle numérique qui représente de manière réaliste le comportement vibratoire du temple de Ségeste. Une caractérisation de la géométrie du temple a démontré la variation de certaines propriétés géométriques du temple, notamment la distance entre les colonnes, ou encore le rayon des colonnes, interrogeant ainsi sur l'impact de ces variations géométriques sur les paramètres modaux, et le choix final de la position des capteurs. Deux maillages ont été générés de manière paramétrique: un maillage prenant en compte ces variations géométriques (modèle 1), et un maillage construit à partir des valeurs moyennes des dimensions de chaque élément (modèle 2). Un écart inférieur à 0.01 Hz est observé et des déformées modales très proches démontrent l'insensibilité des modes à ces variations géométriques dans les gammes qui ont été observées. Ce type d'étude préliminaire en amont d'une campagne de vibration peut donc se restreindre à l'emploi d'un modèle simplifié construit à partir de la valeur moyenne des dimensions des éléments du temple.

Une stratégie de disposition de capteur a été proposée en utilisant le modèle géométrique simplifié du temple de Ségeste (modèle 2). Le calcul de l'AutoMAC a permis de démontrer qu'une disposition de capteurs au sommet des abacus non endommagés permettait de clairement distinguer les 12 premiers modes de vibrations du temple. Une campagne de vibration ambiante a donc été réalisée à la suite de cette étude préliminaire. L'identification modale, et la calibration du modèle numérique du temple feront l'objet d'un prochain travail de recherche.

REFERENCES

- Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P. "Output-only modal analysis by frequency domain decomposition", Proceedings of ISMA25, vol. 2. 2000.
- Lake B., E. et Schon, R. (2020). Archaeology of contemporary migrant journeys in western sicily. *Journal of Mediterranean Archaeology*, 32(2): 173–194.
- Luza Huillca, C. A., Jiménez Pacheco, H. G., Miranda Ramos, L. M., Delgado Sarmiento, P. K., Alvarez Tohalino, V. L., Terrones Diaz, H. E., & Vargas Jr, E. D. A. (2023). Characterization analyzes in the geomechanical behavior of travertine rock. *SN Applied Sciences*, 5(10), 267.
- Mertens, D., & Tusa, V. (1984). *Der Tempel von Segesta und die dorische Tempelbaukunst des griechischen Westens in klassischer Zeit.* von Zabern.
- Montabert, A., Giry, C., Limoge Schraen, C., Lépine, J., Choueiri, C., Mercerat, E. D., & Guéguen, P. (2023). An open database to evaluate the fundamental frequency of historical masonry towers through empirical and physics-based formulations. *Buildings*, 13(9), 2168.
- Hinzen, K.-G., Mora, P. (2023). Geometric measures of the Aphrodite temple at Segesta from laser scan model. *Personal communication*.