

Effet des hautes températures de l'incendie de Notre-Dame de Paris sur les caractéristiques mécaniques et thermiques d'un calcaire lutétien représentatif

Colin GUENSER¹, Stéphane CORN², Marie SALGUES², Nathalie DOMÈDE¹, Pierre MORENON^{1,3}

¹LMDC, INSA/UPS Génie Civil, 135 Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse cedex 04 France.

²LMGC, IMT Mines Ales, Univ Montpellier, CNRS, Ales, France

³Toulouse Tech Transfer, 18 route de Narbonne, CS 24246, 31432 Toulouse Cedex 04, France

RÉSUMÉ Les résultats présentés dans cet article illustrent le comportement mécanique et thermique d'un calcaire lutétien (pierre de St-Maximin) représentatif du calcaire de la cathédrale Notre-Dame de Paris. L'effet des hautes températures de l'incendie sur les caractéristiques mécaniques et thermiques du calcaire après refroidissement est évalué. Des mesures mécaniques dynamiques par analyse modale impulsionnelle et par propagation des ondes ultra-sons sont réalisées et comparées à des mesures mécaniques quasi-statiques de compression uni-axiale et de flexion trois points. L'évolution des paramètres (module d'élasticité, coefficient de Poisson, résistance en compression et en traction, conductivité thermique) est estimée sur une plage de température allant de 20 °C à 800 °C grâce à la comparaison et à la complémentation réciproque des mesures dynamiques non destructives et des mesures quasi-statiques destructives.

Mots-clés maçonnerie, pierre, comportement thermo-mécanique, destructif, non destructif

I. INTRODUCTION

Jusqu'au XIXe siècle, la maçonnerie constituait le moyen privilégié de bâtir les édifices. En France, le patrimoine bâti historique est ainsi le plus souvent constitué de pierres et de mortier. L'importance culturelle, religieuse ou administrative de ces ouvrages peut amener à s'interroger sur les capacités de réhabilitation des suites d'un incendie. L'incendie qu'a subi la cathédrale Notre-Dame de Paris (NDP) en 2019 rend cette question particulièrement d'actualité. L'étude présentée ici s'inscrit dans le cadre du projet de recherche ANR DEMMEFI dont l'objectif global est d'élaborer une méthode d'évaluation du comportement structurel résiduel post-incendie des édifices en maçonnerie. Cette étude a pour but la caractérisation mécanique et thermique des pierres de la cathédrale NDP pour des températures allant de 20 °C à 800 °C, et l'évaluation de l'influence de ces températures sur les paramètres physiques et mécaniques de ces roches. Ces paramètres sont nécessaires pour alimenter les modèles numériques utilisés pour effectuer l'analyse structurale de la cathédrale NDP en vue du diagnostic post-incendie.

Des travaux précédents ont déjà étudié les relations entre mesures mécaniques destructives et non destructives sur un grand nombre de pierres calcaires non chauffées (Parent et al., 2015) ainsi que l'effet des hautes températures sur les roches (Homand-Etienne and Houpert, 1984; Martinho

and Dionísio, 2020; Vigroux, 2020). Certaines caractéristiques mécaniques et thermiques (conductivité, module, résistance à la compression et à la traction) du calcaire lutécien à température ambiante et haute température existent (Vigroux, 2020) mais ne sont pas suffisantes et le comportement de l'interface pierre-mortier en température n'est pas connu. Notons que la mesure de paramètres élastiques comme le module d'Young via des méthodes dynamiques donne des résultats généralement supérieurs aux méthodes classiques de détermination de ce paramètre avec l'essai de compression quasi-statique uniaxiale (Brotons et al., 2014; Eissa and Kazi, 1988). Les résultats obtenus par ultra-sons peuvent être complétés par une autre méthode de mesure dynamique par analyse modale impulsionnelle (AMI) qui a déjà fait ses preuves pour l'estimation de l'endommagement de pierres calcaires (Fogue-Djombou et al., 2019). Une campagne expérimentale est donc entreprise pour remédier à ces manques.

Le classement aux Monuments Historiques historique de NDP interdit la réalisation de carottages en nombre suffisant pour réaliser cette étude ; il est seulement possible de réaliser des mesures non destructives in-situ. De ce fait, la caractérisation du comportement physique et mécanique des roches de NDP a été entreprise en laboratoire sur une roche calcaire similaire choisie au préalable, et présentée au premier paragraphe de cet article. La caractérisation a été effectuée au moyen d'essais dynamiques, statiques et thermiques suivant un protocole expérimental spécifique. Les mesures dynamiques non destructives permettront de suivre l'évolution des propriétés mécaniques dynamiques avant et après chauffage. Les paramètres mécaniques statiques sont déterminés par les essais destructifs. Une mesure de la conductivité thermique et de la porosité totale est réalisée sur les pierres à température ambiante et après chauffage.

II. MATERIAU ET PROTOCOLE EXPERIMENTAL

A. Matériaux

Le choix de la pierre est basé sur la recherche de la plus grande similitude possible avec les matériaux identifiés dans la structure de la cathédrale NDP. Parmi les faciès de calcaire lutécien identifiés sur le site (Dabat et al., 2021), c'est la pierre de Saint-Maximin Ferme fine qui a été sélectionnée notamment car elle provient d'une carrière toujours en activité. La qualité 'Ferme Fine' est sélectionnée pour la similitude de ses caractéristiques avec celles déterminées par le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH) sur les pierres tombées lors de l'incendie de NDP. Les mesures de masse volumique donnent une idée de la dispersion présente dans le lot d'échantillons : la moyenne est de 1757 kg/m^3 avec un coefficient de variation (CV) de 1.3 %. Les masses volumiques absolues mesurées au pycnomètre à $20 \text{ }^\circ\text{C}$ sont en moyenne de 2738 kg/m^3 avec un CV de 0,3 %. Les pierres, très poreuses, sont stockées en intérieur et sont considérées comme sèches (variation de masse inférieur à 0.1 % après étuvage de 24 h). Les échantillons de pierre sont sous le format de prismes de dimensions $b * h * L = 50 \text{ mm} * 50 \text{ mm} * 300 \text{ mm}$ et sous le format de cylindre de diamètre $\phi = 70 \text{ mm}$ et de hauteur $h = 140 \text{ mm}$.

B. Conditionnement des matériaux

D'une part, les prismes de pierre sont étudiés à température ambiante ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) puis sur une plage de température allant de $200 \text{ }^\circ\text{C}$ à $800 \text{ }^\circ\text{C}$, par pas de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ avec des méthodes dynamiques non

destructives (AMI et propagation des ultra-sons US). D'autre part, six prismes et six cylindres chauffés à 20 °C, 300 °C et 600 °C (températures d'intérêt choisies après analyse des premiers résultats dynamiques) sont caractérisés de manière non destructive et destructives (essais de flexion trois points et essais de compression uniaxiale). La vitesse de chauffe choisie est de 5°C/minute, et un palier de 5 heures est respecté à la température cible. D'après des essais de chauffe préliminaires et des simulations thermiques, ces paramètres permettent de réduire le gradient de température dans l'éprouvette et diminuent donc le risque d'endommagement provoqué par dilatation différentielle de la pierre. Le refroidissement est réalisé four éteint, garantissant également une vitesse de refroidissement inférieure à 5 °C/minute. L'évolution de la masse volumique est suivie et montre une perte de masse de seulement 3 % à 600 °C et de 9 % à 800 °C, ce qui indique le début du processus de décarbonatation.

C. Caractérisation mécanique par mesure de vitesse des ondes ultra-sonores

Les paramètres mécaniques sont estimés par deux méthodes dynamiques avant et après chauffage. La première, dite par ultra-sons (US), consiste à mesurer la vitesse des ondes ultra-sonores primaires V_p et secondaires V_s à l'aide d'un appareil Pundit PL-200. Le module de flexion dynamique et le coefficient de Poisson peuvent être estimés à l'aides des équations (1) et (2).

$$E_{dyn,us} = \rho \frac{V_p^2(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (1)$$

$$\nu_{dyn,us} = \frac{\frac{1}{2} - \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2}{1 - \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2} \quad (2)$$

D. Caractérisation mécanique par analyse modale impulsionnelle

La seconde méthode est par Analyse Modale Impulsionnelle (AMI). Les paramètres modaux (fréquences de résonance et amortissements) de différents modes de vibration sont mesurés durant la réponse vibratoire impulsionnelle de l'éprouvette soumise à un impact (chute libre d'une bille de plastique). La réponse vibratoire est mesurée à l'aide d'un accéléromètre, placé sur l'éprouvette et le spectre de réponse fréquentielle est obtenu par transformée de Fourier des accélérations temporelles. La Fonction de Réponse Fréquentielle (FRF) est calculée par le logiciel ModalView et permet d'obtenir les fréquences de résonance et les amortissements des pics de résonance considérés. Les éprouvettes sont posées sur un support en mousse permettant de modéliser des conditions d'appui libre-libre. Les fréquences de résonance du premier mode de flexion F_f et du premier mode de torsion F_t sont mesurées.

En considérant le matériau homogène et isotrope (hypothèse réaliste dans le cas de la pierre de Saint-Maximin), les paramètres mécaniques élastiques des échantillons peuvent être déterminés grâce aux expressions analytiques (3) et (4) des fréquences propres de flexion F_f et de torsion F_t d'une poutre libre. La valeur des coefficients de forme C_f et C_t est obtenue en réalisant une analyse modale numérique de l'échantillon avec le logiciel de calcul éléments finis Comsol. Ces coefficients sont calculés pour différentes valeurs de ν dans l'intervalle $]0 ; 0,5]$, avec $E = 12 \text{ GPa}$ et $\rho = 1760 \text{ kg/m}^3$. Deux géométries sont étudiées : 50 mm x 50 mm x 300 mm (dimensions idéales) et 49,4 mm x 49,1 mm x 299,7 mm (dimensions réelles moyennes). Les différents coefficients de

forme calculés sont présentés dans les graphes de la figure 1. Conformément aux formules analytiques, le coefficient C_f dépend du coefficient de Poisson et le coefficient C_t reste constant pour une géométrie donnée. On constate que la géométrie de l'éprouvette a un effet bien plus significatif sur les valeurs de C_f et de C_t . Dans le cadre de cette étude, C_t est pris égal à 2,347 et C_f est pris égal à 0,267, ce qui correspond à une valeur de ν de 0,25. L'erreur d'estimation de C_f est inférieure à 2% pour ν allant de 0,1 à 0,4. Une analyse similaire effectuée pour les échantillons cylindriques amène à prendre C_t égal à 12,719 et C_f égal à 4,689 pour cette géométrie.

$$F_f^2 = C_f(\nu, h, L) * \frac{E_{dyn,AMI}}{\rho} \quad (3)$$

$$F_t^2 = C_t(b, h, L) * \frac{G_{dyn,AMI}}{\rho} \quad (4)$$

où G est le coefficient de cisaillement, $G_{dyn,AMI} = \frac{E_{dyn,AMI}}{2(1 + \nu)}$

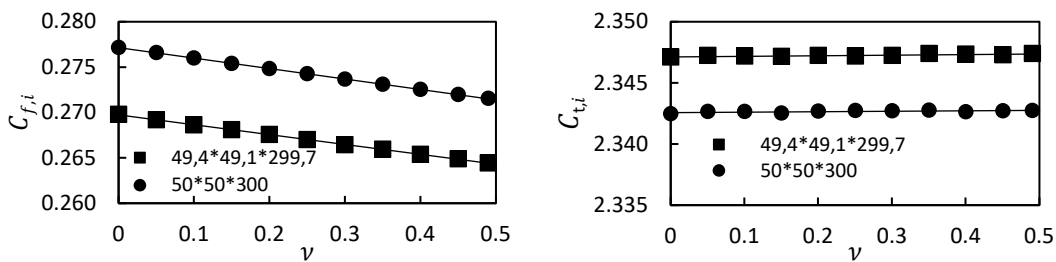


FIGURE 1. Coefficients de forme $C_{f,i}$ et $C_{t,i}$ des éprouvettes prismatiques selon ν

E. Caractérisation mécanique par essais destructifs

Les prismes sont utilisés pour des essais de flexion trois points dont le protocole est précisé par la norme NF EN 12372. L'entraxe des points d'appuis est de 250 mm et les rouleaux sont de diamètre 60 mm. L'essai de flexion trois points est contrôlé en déplacement à mi travée, à une vitesse de 0,1 mm/minute. La flèche est mesurée à l'aide d'un extensomètre laser MTS LX500 par mesure de la distance entre l'axe neutre du prisme et le bâti de la presse. Cette méthode a l'inconvénient de ne pas distinguer la flexion du matériau et son écrasement aux appuis. La valeur de l'effort maximal F_t est enregistrée pour pouvoir estimer la résistance en traction R_t par la formule (5) tirée de la norme. On entaille les éprouvettes en face inférieure à mi-portée, ce qui permet de mesurer le comportement adoucissant de la pierre. L'entaille effectuée a une profondeur de 8mm et une largeur de 2,7 mm.

$$R_t = \frac{3F_t L}{2 b h^2} \quad (5)$$

Les cylindres sont utilisés pour des essais de compression uniaxiale contrôlés en déplacement à la vitesse de 1mm/minute jusqu'à la rupture. Le plateau inférieur est rotulé. Les cylindres sont chacun instrumentés de deux jauges longitudinales et de deux jauges transversales en partie centrale et en alternance, grâce auxquelles le module d'élasticité E et le coefficient de Poisson ν sont calculés. La valeur de l'effort maximal F_c est enregistrée pour pouvoir estimer la résistance en compression R_c par la formule (6).

$$R_c = \frac{F_c}{\pi \frac{\phi^2}{4}} \quad (6)$$

F. Caractérisation thermique et porosité

Les deux morceaux de pierre issus des essais de flexion trois points sont réutilisés pour réaliser des essais de conductivité au fil chaud avec le conductivimètre Neotim FP2C. La puissance de la source de chaleur est de 0,7 W et la durée de mesure est d'au moins 90 secondes. La mesure obtenue est une conductivité λ en W/m²/K.

Des échantillons de pierre sont broyés afin de mesurer la masse volumique absolue de la pierre à 20 °C, 300 °C et 600 °C. Les poudres sont placées dans un pycnomètre à hélium Micromeritics AccuPyc 1330 mesurant la masse volumique absolue ρ_p . La porosité absolue peut être alors calculée à partir de sa masse volumique apparente ρ_{app} selon la formule (7). Trois mesures de masse volumique absolue sont réalisées par température sur chacun des trois échantillons de poudres.

$$n = \frac{\rho_p / \rho_{app} - 1}{\rho_p / \rho_{app}} \quad (7)$$

III. RESULTATS

Les résultats sont présentés tout d'abord pour la température de 20 °C (dite ambiante). Puis, l'évolution des paramètres élastiques E et ν obtenus de manière dynamique est décrite sur l'intervalle de 200 °C à 800 °C. Enfin, les paramètres élastiques et de rupture sont fournis pour les deux températures, à 300 °C et 600 °C. Les résultats sont présentés sous forme de moyenne sur une population d'échantillon, et le CV est indiqué sous forme de pourcentage ou bien de barre d'erreur.

A. Température ambiante

Les paramètres obtenus par les différentes méthodes de mesure appliquées aux prismes et aux cylindres sont présentés dans le tableau 1 et dans le tableau 2 respectivement. Les méthodes dynamiques donnent la possibilité de faire des mesures sur de plus grande populations, ce qui consolide les résultats, on observe cependant que les CV des méthodes statiques sont comparables.

TABLEAU 1. Caractéristiques des prismes à température ambiante

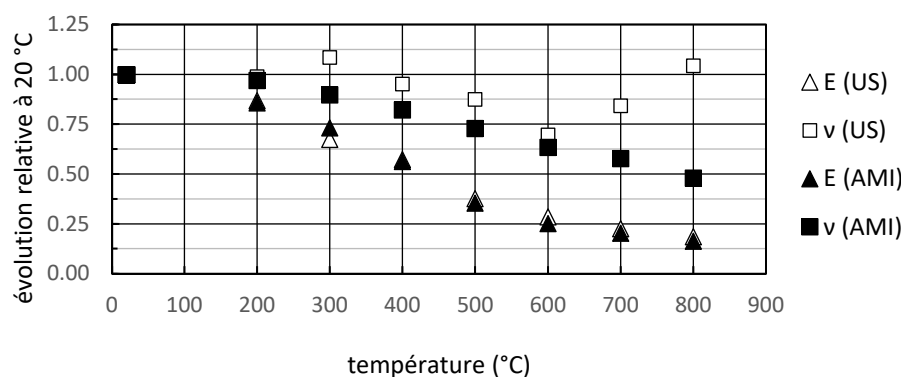
		AMI	US	Flexion trois points	Fil chaud
	Population	38	38	6	9
E	Moyenne (GPa)	12,99	11,68		
	CV	8 %	5 %		
ν	Moyenne	0,26	0,28		
	CV	10 %	4 %		
Rt	Moyenne (MPa)			2,43	
	CV			8 %	
λ	Moyenne (W/mK)				0,77
	CV				4 %

TABLEAU 2. Caractéristiques des cylindres à température ambiante

		AMI	US	Compression
	Population	30	30	6
E	Moyenne (GPa)	12,50	10,32	11,8
	CV	11 %	9 %	13 %
ν	Moyenne	0,22	0,29	0,27
	CV	11 %	4 %	15 %
R_c	Moyenne (MPa)			11,54
	CV			17 %

B. Températures allant de 300 °C à 800 °C

Sur la plage de température allant de 200 °C à 800 °C, seules les méthodes dynamiques ont été utilisées. De plus, un seul prisme a été étudié à chaque température considérée. Ces mesures doivent permettre de confirmer et éventuellement d'extrapoler les mesures approfondies faites à 300 °C et 600 °C. Les résultats sont présentés en évolution relative par rapport aux valeurs à 20 °C. Le module d'Young affiche une décroissance dès 200 °C relativement constante jusqu'à 600 °C, où la diminution se fait plus faible. Le coefficient de Poisson montre une évolution différente selon le mode de mesure : une pente constante est visible dès 200 °C par AMI tandis que l'évolution est beaucoup plus variable par US, avec des phases de croissances et de décroissances successives (figure 4).

**FIGURE 4.** Évolution des paramètres mécaniques élastiques pour des températures entre 20 °C et 800 °C

C. Températures de 300 °C et 600 °C

Des mesures approfondies sont réalisées aux températures de 300 °C et 600 °C, comprenant des essais non destructifs (AMI, US) suivis d'essais destructifs (flexion trois points, compression) et d'essais thermiques (fil chaud). Comme précédemment, les paramètres mécaniques obtenus sont présentés en évolution relative par rapport à la valeur à 20 °C. L'évolution du module d'Young est très similaire pour toutes les méthodes de mesures avec une diminution progressive quand la température augmente. Le même constat est fait pour le coefficient de Poisson mais dans une moindre mesure. Les mesures de ν_{US} sont par contre discordantes, car elles ne montrent qu'une très faible diminution (figures 5 et 6). La résistance en traction diminue également avec la température, et on mesure en compression un pic de résistance à 300 °C (figure 6). On rapporte également que la

diminution de la vitesse de propagation des ondes ultra sonores est identique pour les ondes primaires et secondaires à 3 % près.

Les masses volumiques absolues mesurées au pycnomètre augmentent de 0,3 % à 300 °C et de 0,4 % à 600 °C. Les coefficients de variation correspondants sont de 0,4 % et 1,2 % respectivement, ce qui amène à la conclusion que la masse volumique absolue n'est pas modifiée par une augmentation de la température, même élevée. La masse volumique apparente des échantillons diminue de manière légèrement plus significative, avec une diminution de 0,6 % à 300 °C et de 2,2 % à 600 °C.

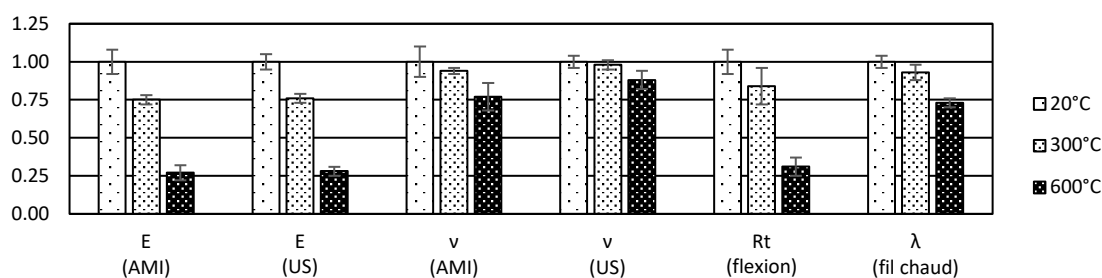


FIGURE 5. Évolution relative des caractéristiques des prismes à 300 °C et 600 °C

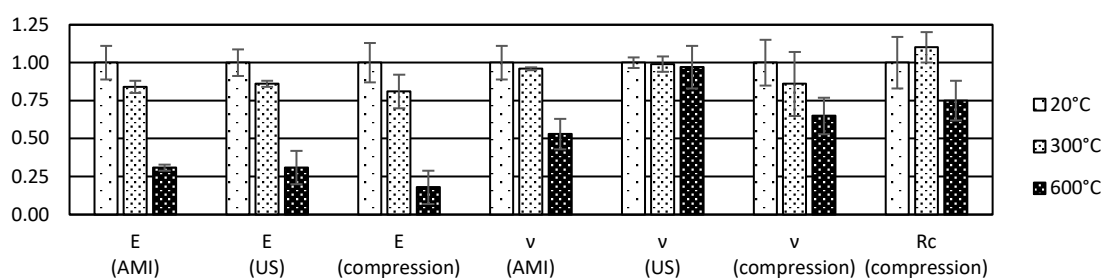


FIGURE 6. Évolution relative des caractéristiques mécaniques des cylindres à 300 °C et 600 °C

VI. ANALYSE ET DISCUSSION

Les résultats présentés permettent d'apprécier en valeur absolue les différents paramètres mécaniques (statiques et dynamiques) et thermiques de la pierre à température ambiante. Les évolutions relatives de ces paramètres en fonction de la température d'exposition sont ensuite établies, pour des températures allant de 200 °C à 800 °C. Ces évolutions sont cependant basées sur un faible nombre d'échantillons n'autorisant pas de faire d'étude statistique. Une étude approfondie aux températures de 300 °C et de 600 °C permet de valider ou d'infirmer les évolutions précédemment établies.

A. Mesures non destructives des paramètres mécaniques E et v

La méthode des US montre une différence dans l'estimation du module d'Young selon la géométrie d'échantillon étudiée. À 20 °C, les modules de Young obtenus sur les échantillons cylindriques sont inférieurs de 13 % à ceux obtenus sur les prismes. Cela confirme que la vitesse de propagation des

US dans un prisme dépend de sa géométrie, et plus précisément que la vitesse des ondes primaires (V_p) diminue avec l'éclatement de l'éprouvette (Boyle and Sproule, 1931; Field, 1931). Le manuel d'utilisation du Pundit PL-200 précise que cet effet est significatif quand la dimension latérale de l'éprouvette est inférieure à la longueur d'onde, qui est d'environ 52,7mm dans notre cas. La faiblesse des valeurs de V_p mesurées sur les prismes se répercute sur le calcul du module d'Young. La vitesse de propagation des ondes S (V_s) doit quant à elle être mesurée sur des échantillons d'une largeur supérieure à leur longueur. Les cylindres semblent ici plus adaptés que les prismes, mais une étude complémentaire sur l'influence de la forme et de la dimension sur la vitesse V_s pourrait être menée.

La méthode de mesure par AMI à 20 °C met également en lumière une légère influence de la géométrie de l'échantillon sur l'estimation du module d'Young, mais l'écart de 4 % dû à la forme de l'éprouvette est peu significatif face à la dispersion des résultats d'environ 10 %. Par ailleurs, l'AMI donne des modules de Young supérieurs à ceux obtenus par US. Il existe peu d'informations dans la littérature sur le rapport entre $E_{dyn,AMI}$ et $E_{dyn,US}$. La méthode des US est la plus largement utilisée pour déterminer les paramètres mécaniques, mais elle est rarement comparée à la méthode par AMI. Les résultats de notre étude semblent indiquer que le module d'Young obtenu par AMI est supérieur de 10 % à 20 % à celui obtenu par US, dépendamment de la géométrie étudiée. Il est possible que cette différence soit en partie imputable aux conditions géométriques des échantillons qui ne sont pas respectées.

En revanche, l'évolution du module d'Young avec la température est identique dans les deux méthodes de mesure, ce qui montre que l'effet de la température d'exposition sur ce paramètre est indépendant de la géométrie de l'échantillon et de la méthode de mesure.

En ce qui concerne les mesures du coefficient de Poisson, les résultats présentent une forte variabilité. La fissuration, invisible à l'œil nu, ne semble pas être responsable de cette variation. Les variations de ν_{US} visibles dans la figure 4 ne sont pas représentatives, comme le montre l'étude approfondie à 300 °C et 600 °C : la diminution mesurée est inférieure à 5 % dans la plupart des cas. Cela est dû au fait que les vitesses V_s et V_p évoluent de manière quasiment identique avec la hausse de température, ce qui a peu d'effet dans l'équation (2). D'un autre côté, l'évolution générale de ν_{AMI} dans la figure 4 est en accord avec l'étude à 300 °C et à 600 °C des figures 5 et 6, mais l'effet de la géométrie apparaît à 600 °C : la valeur résiduelle est de 77 % pour les prismes, contre 57 % pour les cylindres. L'évolution de ν est plus facilement mesurable par AMI que par US car les fréquences propres de flexion $F_{f,i}$ et de torsion $F_{t,i}$ n'évoluent pas tout à fait au même rythme, ce qui permet aux mesures par AMI de détecter la diminution de ν de manière plus fiable.

B. Comparaison des méthodes de mesures dynamiques et statiques des paramètres mécaniques

La tendance générale dans la littérature est d'obtenir des modules dynamiques supérieurs aux modules statiques. Les résultats par AMI de cette étude sont en accord avec cette tendance. Les mesures par US sont cependant en désaccord, montrant encore une fois l'importance de respecter les dimensions d'échantillon requises. Par ailleurs, la diminution du module d'Young avec la température est plus importante d'après les mesures statiques que dynamiques, confirmant ainsi que l'essai de compression uniaxiale est plus sensible à l'effet de la température (Martínez-Martínez et al., 2011). Les mesures dynamiques peuvent donc être utilisées pour connaître l'allure générale

de l'évolution du module d'Young et du coefficient de Poisson entre 20 °C et 800 °C, mais ceux-ci doivent être ajustés pour coïncider avec les mesures statiques effectuées à 20 °C, 300 °C et 600 °C. En utilisant les formules de corrélations proposées par (Brotons et al., 2014), le modules E_{stat} est estimé à 8,75 GPa, ce qui est largement inférieur aux 11.8 GPa mesurés en compression. Les formules de corrélations issues de la littérature sont donc difficilement applicables dans notre cas, même lorsqu'elles sont établies sur la base de matériaux semblables.

Les méthodes de mesure dynamiques permettent difficilement de déterminer les résistances en traction R_t et en compression R_c . D'ailleurs, on observe à 300 °C un pic de R_c correspondant à 110 % de la résistance à 20 °C, ce qui n'est aucunement détectable dans l'évolution purement décroissante des vitesses V_p et V_s . En revanche, cette observation correspond aux mesures rapportées par (Vigroux, 2020), qui montrent un pic d'environ 105 % à 400 °C. Ce croisement de données confirme que la vitesse de propagation des US ne peut pas être utilisée pour estimer la résistance en compression. Le coefficient de Poisson est très proche de celui fourni par Vigroux, ce qui permet de confirmer l'évolution de ν avec la température obtenue par essais statiques.

C. Mesures thermiques

Les mesures de conductivité thermique à température ambiante donnent une moyenne de 0,77W/mK, ce qui est inférieur à ce qui est rapporté par Vigroux avec 1,09 W/mK. L'évolution de ce paramètre avec la température est également discordante, puisque nous mesurons à 300 °C et 600 °C une perte de 7 % et de 27 % de la conductivité, tandis que Vigroux mesure une perte bien plus élevée de 25 % à 300 °C puis de 57 % à 600 °C. La méthode de mesure utilisée par Vigroux est celle du Hotdisk, qui est comparable à l'essai de fil chaud dans le principe. Cependant les essais de Vigroux ont été réalisés à chaud tandis que ceux réalisés dans cette étude ont été réalisés après refroidissement, ce qui peut expliquer la différence de résultats. Nous pouvons émettre l'hypothèse que la conductivité thermique de la roche ne dépend pas seulement de la température maximale atteinte mais également de la température à l'instant de la mesure.

V. CONCLUSION

Cette étude a abouti à la détermination de plusieurs paramètres mécaniques et thermiques de la pierre de Saint-Maximin Ferme Fine. Ces paramètres seront à terme utilisés lors des calculs d'analyse structurale de la cathédrale NDP en situation post-incendie.

Les paramètres mécaniques élastiques E et ν à température ambiante ont été estimés respectivement à 11,8 GPa et 0,27 par des essais de rupture en compression uni-axiale, et leur évolution en fonction de la température a été déterminée par des essais dynamiques d'AMI et d'US. L'étude a révélé que les formules de corrélation proposées dans la littérature entre paramètres statiques et dynamiques ne sont pas applicables dans notre cas pour déterminer la résistance en compression, avec une erreur de 25 % sur l'estimation du module d'élasticité. Les résistances en compression et en traction ont été mesurés à température ambiante (11,5 MPa et 2,4 MPa respectivement) ainsi que leurs résistances résiduelles à 300 °C et 600 °C. La cinétique de décroissance de ces paramètres avec la température est cohérente avec les données disponibles dans la littérature sur des pierres similaires.

Si la mesure de conductivité thermique de 0,77W/mK à température ambiante reste valable, son évolution en fonction de la température n'est pas représentative du comportement de la pierre à chaud mais après refroidissement, ce qui doit être complété en vue de l'utilisation d'un modèle numérique. La comparaison avec les données de Vigroux montre qu'il est nécessaire de compléter les résultats par des mesures à chaud.

REFERENCES

- Boyle, R.W., Sproule, D.O., 1931. Velocity of longitudinal vibration in solid rods (ultrasonic method) with special reference to the elasticity of ice. *Can. J. Res.* 5, 601–618. <https://doi.org/10.1139/cjr31-098>
- Brotons, V., Tomás, R., Ivorra, S., Grediaga, A., 2014. Relationship between static and dynamic elastic modulus of calcarenite heated at different temperatures: the San Julián's stone. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 73, 791–799. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-014-0583-y>
- Dabat, T., Mertz, J.-D., Leroux, L., Melinge, Y., 2021. Voûtes effondrées, murs bahuts et pignons, Caractérisation des carottes de pierre prélevées après l'incendie du 15 avril 2019 (No. 1R). Laboratoire de recherche des monuments historiques.
- Eissa, E.A., Kazi, A., 1988. Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 25, 479–482. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(88\)90987-4](https://doi.org/10.1016/0148-9062(88)90987-4)
- Field, Geo.S., 1931. Velocity of sound in cylindrical rods. *Can. J. Res.* 5, 619–624. <https://doi.org/10.1139/cjr31-099>
- Fogue-Djombou, Y.I., Corn, S., Clerc, L., Salze, D., Garcia-Diaz, E., 2019. Freeze-thaw resistance of limestone roofing tiles assessed through impulse vibration monitoring and finite element modeling in relation to their microstructure. *Constr. Build. Mater.* 205, 656–667. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.211>
- Homand-Etienne, F., Houpert, R., 1984. Comportement mécanique des roches en fonction de la température. *Rev. Fr. Géotechnique* 41–47. <https://www.geotechnique-journal.org/articles/geotech/abs/1984/03/geotech1984028p41/geotech1984028p41.html>
- Martínez-Martínez, J., Benavente, D., García-del-Cura, M.A., 2011. Spatial attenuation: The most sensitive ultrasonic parameter for detecting petrographic features and decay processes in carbonate rocks. *Eng. Geol.* 119, 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.02.002>
- Martinho, E., Dionísio, A., 2020. Assessment Techniques for Studying the Effects of Fire on Stone Materials: A Literature Review. *Int. J. Archit. Herit.* 14, 275–299. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1535008>
- Parent, T., Domède, N., Sellier, A., Mouatt, L., 2015. Mechanical characterization of limestone from sound velocity measurement. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 79, 149–156. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.08.009>
- Vigroux, M., 2020. Influence de la microstructure et de la minéralogie sur l'endommagement mécanique des pierres du patrimoine bâti sous l'effet de conditions environnementales sévères (Thèse de doctorat). CY Cergy Paris Université. <https://www.theses.fr/255267258>.