

METHODE D'HOMOGENEISATION NUMERIQUE DU MATERIAU MAÇONNERIE APPLIQUEE AU DIAGNOSTIC POST-INCENDIE DE NOTRE-DAME DE PARIS

Guenser C.¹, Morenon P.^{1,2}, Domede N.¹, Corn S.³, Salgues M.³,

¹ LMDC, Université de Toulouse, INSA/UPS Génie Civil, 135 Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse cedex 04, France, guenser@insa-toulouse.fr, domede@insa-toulouse.fr

² Toulouse Tech Transfer, 118 route de Narbonne, CS 24246, 31432 Toulouse Cedex 04, France, morenon@insa-toulouse.fr

³ LMGC, IMT Mines Ales, Univ Montpellier, CNRS, Ales, France, stephane.corn@mines-ales.fr, marie.salgues@mines-ales.fr

RESUME Les incendies constituent une menace majeure pour les structures en maçonnerie, en particulier pour les monuments historiques tels que Notre-Dame de Paris. L'évaluation de leur stabilité structurelle post-incendie demeure un défi important, en raison de la forte dégradation thermique des pierres et mortiers ainsi que des interactions non linéaires complexes au sein de la maçonnerie. Cette étude propose une méthodologie d'homogénéisation entièrement numérique pour caractériser le comportement thermomécanique de la maçonnerie soumise au feu. Des modèles hétérogènes détaillés, basés sur la méthode des éléments finis (MEF) et une approche hybride MEF/MED, ont été utilisés comme référence afin de calibrer une loi homogénéisée équivalente par analyse inverse. Ce modèle a ensuite été appliqué à une simulation à l'échelle d'une travée de voûte de Notre-Dame, exposée à un feu inspiré de la norme ISO 834-1. Les résultats restituent les principaux mécanismes de dégradation observés in situ, tout en mettant en évidence les limites actuelles et les perspectives d'amélioration des méthodes de diagnostic post-incendie.

Mots-clefs Incendie, Modélisation, Thermomécanique, Homogénéisation, Notre-Dame de Paris

I. INTRODUCTION

Les incendies représentent une menace majeure pour les structures en maçonnerie, en particulier les bâtiments historiques. La stabilité post-incendie est cruciale, à la fois pour la sécurité immédiate et pour la restauration (Kincaid, 2021). Pourtant, l'évaluation de la capacité portante résiduelle demeure complexe, notamment pour des édifices anciens tels que Notre-Dame de Paris (Parent et al., 2023). L'exposition à de hautes températures modifie profondément les propriétés thermomécaniques des matériaux constitutifs, affectant la stabilité et l'aptitude au service des murs (Biró et al., 2019; Hajpál, 2010; Pires et al., 2024). Comprendre les mécanismes de dégradation

thermique et les interactions entre contraintes mécaniques et thermiques est indispensable pour évaluer la sécurité des ouvrages endommagés.

De nombreux travaux concernent la résistance au feu des voiles en béton, tant sur le plan expérimental que numérique. La revue de Almeshal et al. (Almeshal et al., 2022) en propose une synthèse, en mettant en évidence les phénomènes critiques tels que la flèche thermique, l'écaillage et la fissuration (Chen et al., 2024; Liu et al., 2018; Lottman, 2017; Ryu et al., 2020; Zheng and Zhuang, 2011). Ces recherches ont conduit au développement de modèles numériques avancés, intégrant des couplages thermo-hydro-mécaniques complets.

À l'inverse, peu d'études portent sur la maçonnerie exposée au feu, malgré la diversité des matériaux (briques, blocs de béton, pierres naturelles) (Ali et al., 2023; Leal et al., 2024; Oliveira et al., 2021; Pham et al., 2022). Les simulations numériques restent peu répandues, notamment sur la perte de capacité portante et les modes de rupture des ouvrages. Quelques travaux récents mobilisent des approches micro et macro-échelle (Fantilli and Burello, 2022; Gajjar et al., 2023; Nguyen and Meftah, 2014; Prakash et al., 2020), mais les mécanismes de dégradation associés aux sollicitations thermomécaniques demeurent insuffisamment décrits.

Dans ce contexte, les travaux présentés dans cette étude introduisent une méthode innovante d'homogénéisation numérique, spécifiquement adaptée à la maçonnerie en situation d'incendie. Cette méthode permet de prendre en compte de manière précise les comportements mécaniques du matériau maçonnerie, dans les domaines linéaires et non linéaires, ainsi que les effets thermiques liés à la dégradation des matériaux et à leur dilatation thermique. L'approche repose sur un modèle hybride (Ferrante et al., 2022) combinant la méthode des éléments finis (MEF) avec le modèle ENDO3D (Cast3M), et la méthode des éléments discrets (MED) avec le modèle FCZM (LMGC90), offrant ainsi une modélisation fine des comportements des matériaux constitutifs de la maçonnerie ainsi que des interactions entre eux. Les outils numériques mentionnés sont présentés et illustrés dans la Figure 1.

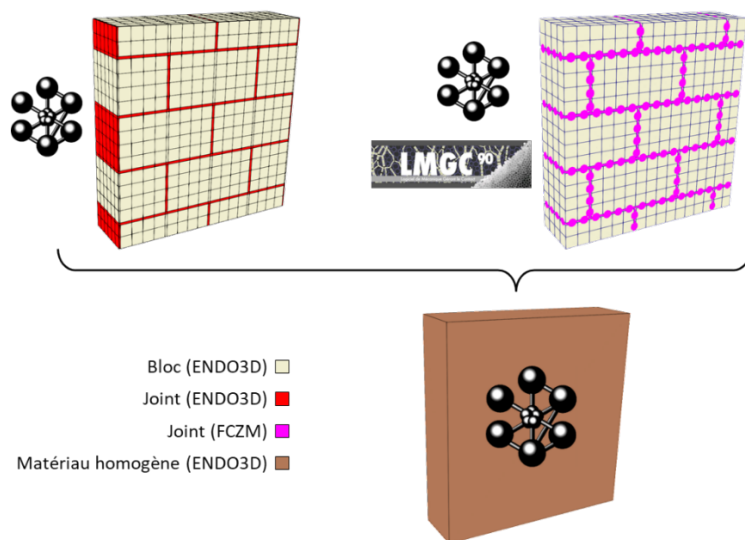


FIGURE 1. Description des outils utilisés dans le processus d'homogénéisation : MEF (ENDO3D, code CAST3M), MED (FCZM, code LMGC90), et hybride MEF/MED.

II. MÉTHODOLOGIE

A. Outils numériques

La démarche numérique adoptée dans cette étude repose sur deux approches complémentaires : la méthode des éléments finis (MEF) et une approche hybride couplant éléments finis et éléments discrets (MEF/MED).

Le modèle MEF mobilise le modèle mécanique ENDO3D (Sellier, 2018), implémenté dans le logiciel CAST3M. Ce modèle a été développé pour représenter la réponse élasto-plastique anisotrope des géomatériaux, intégrant l'endommagement en traction et en compression à l'aide de trois critères de Rankine et d'un critère de Drucker-Prager. Les comportements thermomécaniques des matériaux sont définis à partir de lois de réduction dépendant de la température, appliquées au module d'Young E , à la résistance en compression σ_c et à la résistance en traction σ_t , tels que présentées dans la Figure 2 (pierre et mortier). Ces lois suivent la fonction développée dans l'équation 1, et leurs paramètres sont présentés dans le tableau 1. Ils ont été choisis pour reproduire au mieux les résultats expérimentaux issus d'essais réalisés spécifiquement pour cette étude (Guenser et al., 2024).

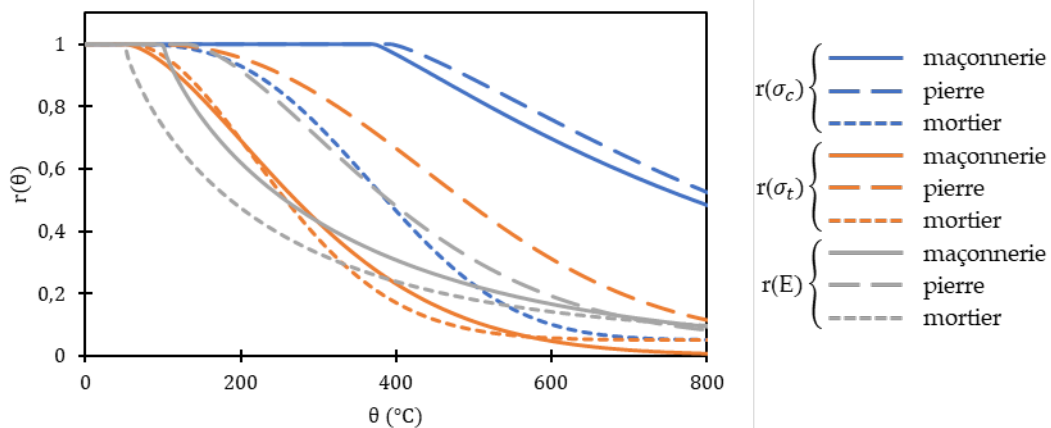


Figure 2 : Lois de réduction des paramètres mécaniques du modèle en fonction de la température.

$$r(\theta) = p + (1 - p) \exp\left(-\left(\frac{\theta - \theta_{th}}{\theta_k - \theta_{th}}\right)^m\right) \quad \text{Eq.1}$$

TABLEAU 1. Paramètres des lois de réduction en fonction de la température

	Paramètres de $r(\sigma_c)$				Paramètres de $r(\sigma_t)$				Paramètres de $r(E)$			
	θ_{th}	θ_k	m	p	θ_{th}	θ_k	m	p	θ_{th}	θ_k	m	p
Pierre	388	932	1,27	0,05	82	544	2,23	0,05	130	443	1,57	0,05
Mortier	50	1000	0,93	0,05	56	291	1,91	0,05	50	244	0,82	0,05
Maçonnerie	372	899	1,13	0,05	50	326	1,63	0,0	50	331	1,17	0,02

En complément, l'approche hybride MEF/MED est utilisée pour mieux représenter les mécanismes de rupture localisés, tels que la fissuration des joints, le glissement ou la séparation des blocs. Les blocs suivent la loi ENDO3D, tandis que les interfaces sont régies par un modèle de zone cohésive frictionnel (FCZM). Les paramètres de ce modèle sont issus d'essais expérimentaux dédiés

(Boukham, 2025). Cette approche est par ailleurs validée pour des maçonneries soumises à des sollicitations sismiques ou thermiques (Boukham et al., 2024; Ferrante et al., 2023).

B. Méthode d'homogénéisation

Une méthodologie d'homogénéisation entièrement numérique a été développée afin de caractériser le comportement thermomécanique de la maçonnerie de pierre en conditions d'incendie. Cette approche permet de dépasser les limites des méthodes analytiques classiques, complexes à mettre en œuvre dans le domaine non linéaire et encore peu explorées lorsqu'il s'agit des effets du chargement thermique sur les propriétés mécaniques.

Le principe repose sur la simulation numérique de Volumes Élémentaires Représentatifs (VER) de maçonnerie soumis à différents chargements mécaniques. Une géométrie de VER est définie sur la base des recommandations de la norme NF EN 1052-1 (CEN, 1999). Le cas de la sollicitation uniaxiale perpendiculaire aux joints horizontaux est ici considéré, et modélisée avec le modèle MEF (Figure 3 a). Le cas du cisaillement est également considéré, et est modélisé à l'aide de l'approche hybride MEF/MED (Figure 3 b). La réponse mécanique des VER hétérogènes est utilisée comme référence pour calibrer, par une procédure d'analyse inverse, un VER homogénéisé équivalent. L'objectif est de définir un jeu de paramètres permettant au VER homogénéisé de reproduire fidèlement la réponse non linéaire du matériau composite initial, que ce soit en compression, en traction ou en cisaillement.

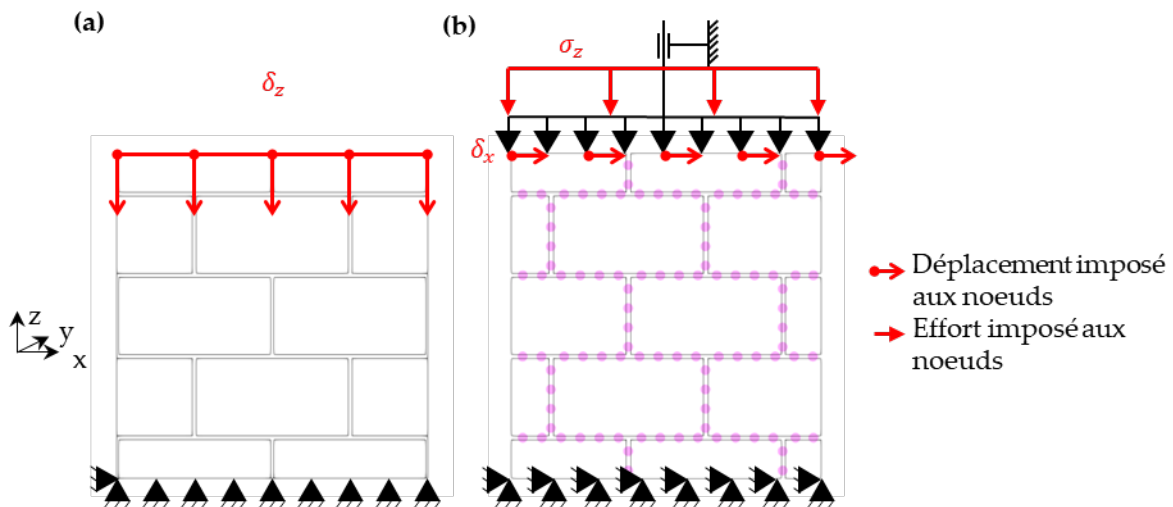


FIGURE 3 : Vues de face des VER, avec les conditions aux limites en noir et les sollicitations appliquées en rouge.

La procédure d'analyse inverse (Figure 4) suit une boucle d'optimisation aux moindres carrés visant à minimiser l'écart entre les réponses hétérogène et homogénéisée. Les paramètres identifiés incluent les caractéristiques mécaniques usuelles (résistances en compression et traction, module d'Young, coefficient de Poisson) ainsi que des paramètres pilotant l'évolution de l'endommagement mécanique et thermique dans le modèle ENDO3D : part d'endommagement pré-pic, déformation caractéristique post-pic, énergie de fissuration, coefficient de confinement, lois de réduction dépendant de la température. Lors de la première itération, en l'absence d'indications préalables sur les paramètres homogénéisés, les propriétés mécaniques des pierres ont été utilisées comme valeurs initiales. Les lois de réductions obtenues par le processus d'homogénéisation sont

présentées dans la Figure 2 ci-dessus, permettant d'observer la participation prépondérante du mortier au niveau de la résistance en traction et celle de la pierre au niveau de la résistance en compression.

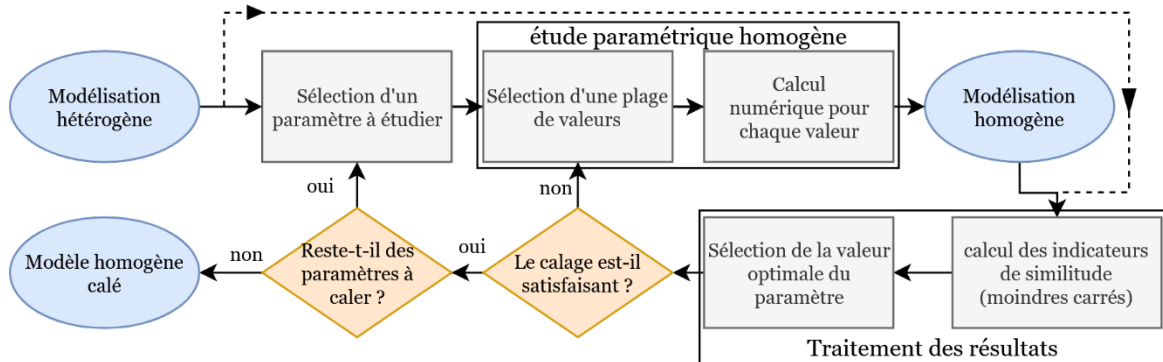


FIGURE 4 : Organigramme général de la méthode de calage par analyse inverse

III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

A. Lois homogénéisées

La procédure d'homogénéisation a permis d'identifier des lois constitutives équivalentes pour la maçonnerie, en comparant les réponses des modèles détaillés (MEF et MEF/MED) avec celles du modèle homogène calibré.

Sous sollicitations uniaxiales, le modèle MEF sans chauffage a fourni les propriétés élastiques et de rupture du matériau composite. Les courbes contraintes-déformations moyennées sur le VER (FIGURE 5) montrent un bon accord entre la réponse hétérogène et la loi homogénéisée issue de l'analyse inverse, en traction comme en compression. Ces résultats confirment la capacité du modèle homogène à restituer le comportement de la maçonnerie, avec les paramètres récapitulés dans le Tableau 2.

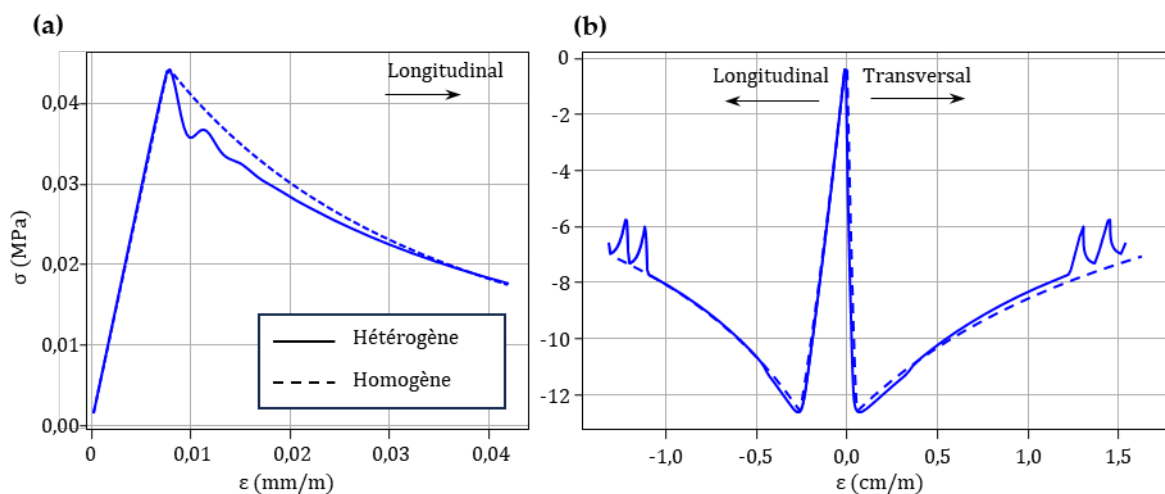


FIGURE 5 : Comparaison des courbes σ - ϵ obtenues avec les modèles homogène et hétérogène en sollicitation (a) de traction et (b) de compression.

TABLEAU 2 : Récapitulatif des paramètres homogènes de la maçonnerie

Paramètre	Bloc	Joint	Modèle homogène
Module de Young (MPa)	12200	4190	6100
Coefficient de Poisson	0,26	0,18	0,26
Résistance en traction (MPa)	1,75	0,1	0,1
Déformation au pic en traction (m/m)	2,05E-04	1,00E-04	7,88E-06
Énergie de fissuration (MJ/m)	950	100	154,66
Résistance en compression (MPa)	7,4	2,18	7,4
Déformation au pic en compression (m/m)	1,27E-03	1,20E-03	6,35E-04
Coefficient de dilatance	0,7	0,2	0,7
Coefficient de Drucker-Prager	0,7	0,8	0,7
Déformation caractéristique post-pic (m/m)	2,00E-02	6,00E-03	2,70E-02
Part d'endommagement pré-pic	0,135	0,7	0,135

En cisaillement, la comparaison entre le modèle homogène et le modèle MEF/MED (FIGURE 6) révèle une limite importante. Alors que le modèle hétérogène développe un plateau de frottement caractéristique du cisaillement, le modèle homogénéisé reproduit un mode de fonctionnement compressif en développant de la compression dans la diagonale. La contrainte augmente ainsi jusqu'au point noté *C*, correspondant à la rupture en compression de ladite diagonale. Ce résultat souligne la limite de la modélisation des structures maçonnées avec le modèle ENDO3D, qui ne permet pas de reproduire le comportement uniaxial et le cisaillement de manière simultanée. Ceci met en évidence le besoin de développement supplémentaire du modèle pour obtenir un critère parvenant à modéliser une faible résistance en tension, une résistance en compression élevée, et un comportement en cisaillement relativement faible.

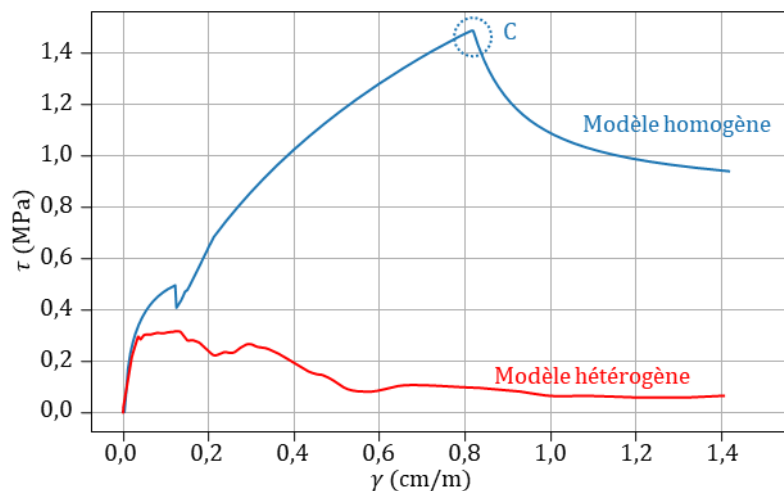


FIGURE 6 : Essai de cisaillement pour $\sigma_z = 0,3 \text{ MPa}$. Comparaison de la courbe de comportement du modèle hétérogène avec celle du modèle homogène.

B. Application à Notre-Dame de Paris

Afin d'évaluer la capacité du modèle homogène à reproduire les phénomènes observés lorsqu'un ouvrage maçonné est exposé à l'incendie, une simulation numérique a été réalisée sur une travée

de la cathédrale Notre-Dame de Paris. L'objectif principal de cette étude est la construction d'un jumeau numérique homogénéisé de l'ouvrage et de lui appliquer des sollicitations thermiques de type incendie et refroidissement sur l'extrados des voûtes.

Le modèle a été élaboré à partir d'un maillage par éléments tétraédriques (Figure 7 a). Contrairement à un modèle hétérogène, la maille ne représente pas l'appareillage réel de la maçonnerie mais restitue un matériau continu, suivant la loi de comportement homogénéisé identifiée précédemment. Des éléments cubiques ont toutefois été utilisés dans la zone des voûtes, afin de mieux capturer les gradients thermiques liés à l'exposition au feu. Les conditions aux limites mécaniques reposent sur l'exploitation des plans de symétrie de la travée (Figure 7 b), permettant de réduire le domaine de calcul tout en conservant la représentativité mécanique. Les sollicitations thermiques consistent en une température imposée suivant la courbe normalisée ISO 834 appliquée sur l'extrados de la voûte, tandis que l'intrados est maintenu à 20 °C (Figure 7 c).

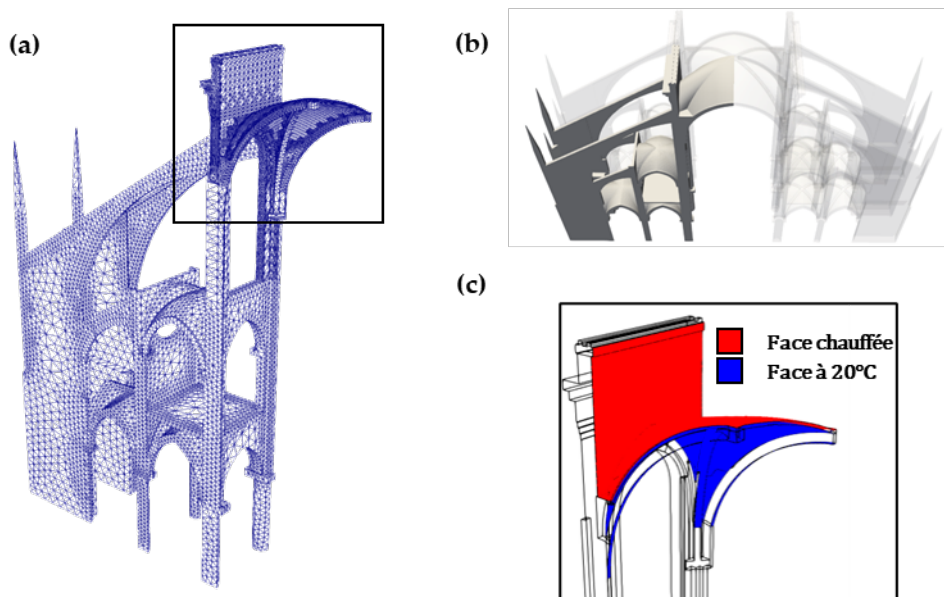


FIGURE 7 : Maillage et conditions limites utilisés pour la simulation de la cathédrale Notre-Dame de Paris.

Parmi les résultats obtenus à l'aide du jumeau numérique dans sa situation post-incendie, les déplacements observés de la voûte sont tracés dans la Figure 8. Ces déplacements révèlent une tendance marquée de la voûte sexpartite à adopter une configuration en « X », cohérente avec les observations effectuées in situ après le sinistre par (Fantin, 2020). Néanmoins, les ordres de grandeur numériques restent inférieurs à ceux relevés sur l'ouvrage.

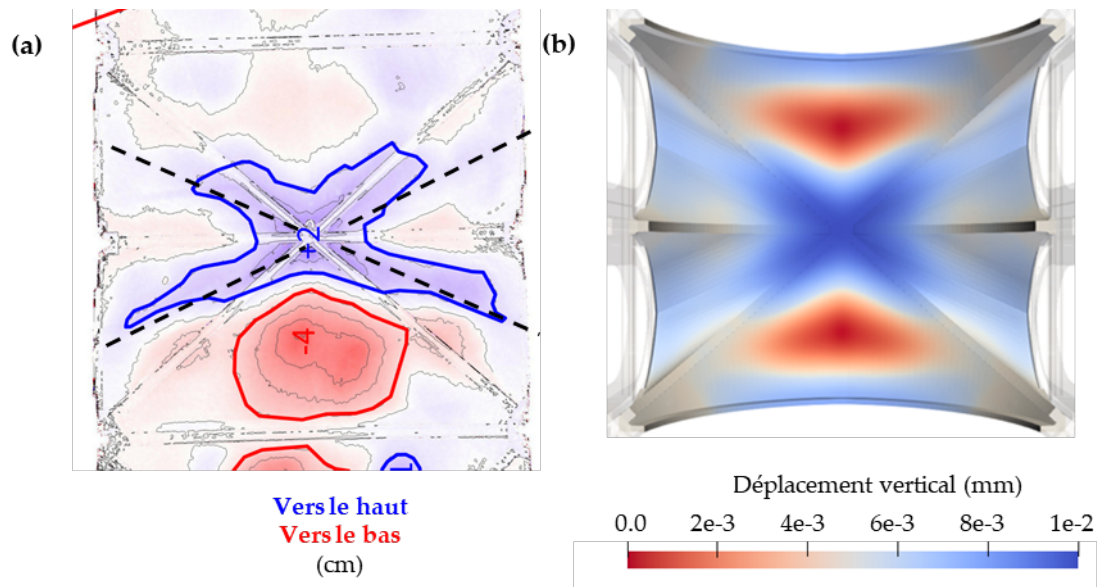


FIGURE 8 : Déplacement verticaux résiduels de la voûte sexpartite après refroidissement, (a) observations réelles d'après (Fantin, 2020) et (b) prédiction numérique.

L'analyse des schémas de fissuration fournit également des informations essentielles. En intrados (FIGURE 9 a), les fissures simulées convergent vers les nervures de la voûte à environ mi-hauteur, en accord avec les relevés réalisés sur site (fissures notées en vert et en rouge lors de la campagne de diagnostic). En extrados (FIGURE 9 b), une délamination généralisée observée sur l'ouvrage est reproduite par le modèle sous la forme d'une fissuration diffuse couvrant l'ensemble de la surface chauffée. Cette fissuration apparaît toutefois sensible au type d'éléments finis : les zones modélisées en tétraèdres montrent un endommagement très hétérogène, tandis que les maillages en éléments cubiques permettent une restitution plus régulière.

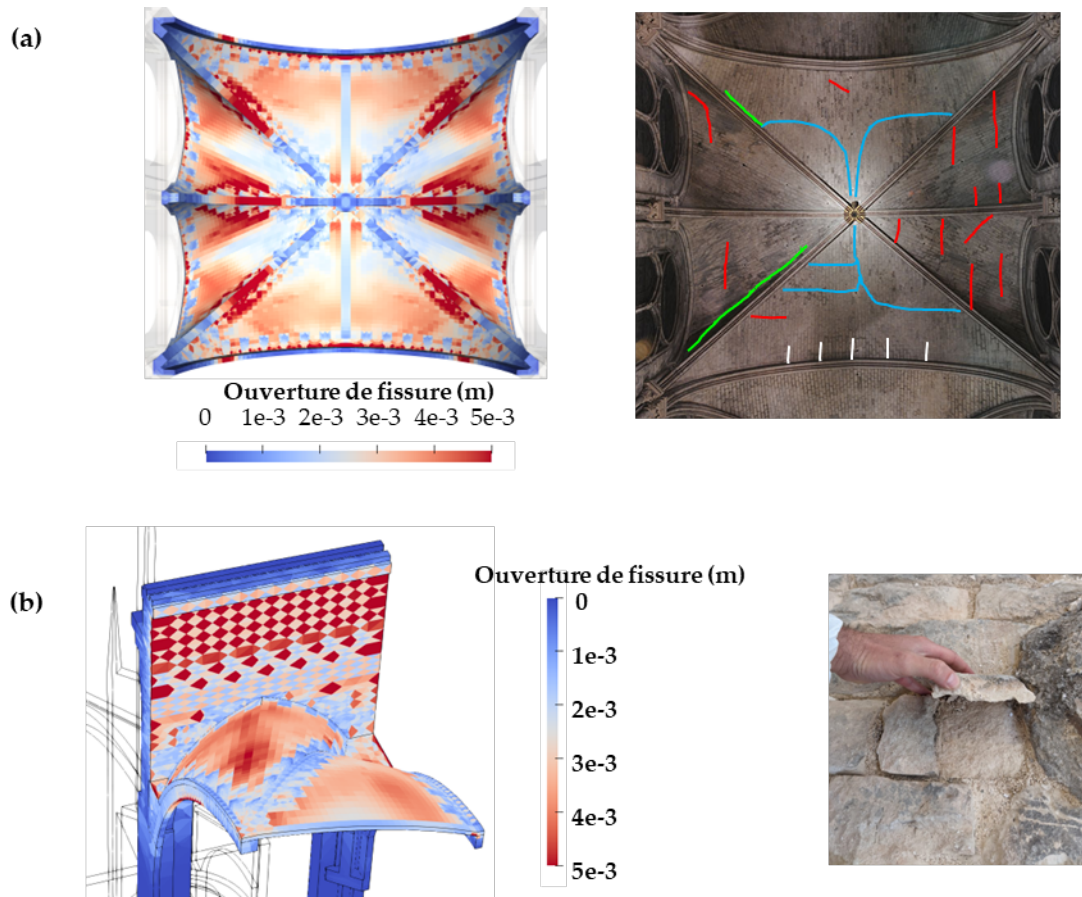


FIGURE 9 : Fissuration (a) de l'intrados de la voûte après refroidissement, et (b) de l'extrados. Comparaison avec des relevés de fissuration effectués in-situ le 15/12/2021.

Ces résultats confirment la pertinence du modèle homogénéisé pour reproduire les mécanismes principaux de dégradation post-incendie, tout en soulignant certaines limites numériques liées à la sensibilité au maillage et à l'écart sur les amplitudes de déplacement.

IV. CONCLUSION

Les travaux présentés dans cet article proposent une méthodologie innovante d'homogénéisation numérique appliquée à la maçonnerie en conditions d'incendie, avec une application spécifique à la cathédrale Notre-Dame de Paris. L'approche développée combine des modèles hétérogènes détaillés (MEF et MEF/MED) et une loi homogénéisée calibrée par analyse inverse, permettant de représenter les comportements thermomécaniques du matériau maçonnerie dans le domaine non linéaire.

Les résultats obtenus sur volumes élémentaires représentatifs ont montré que le modèle homogénéisé reproduit fidèlement les réponses mécaniques en traction et en compression, confirmant sa capacité à représenter les comportements généraux de la maçonnerie. En revanche, certaines limites apparaissent en cisaillement, où le modèle homogénéisé ne parvient pas encore à capturer le plateau de frottement caractéristique mis en évidence par les simulations hétérogènes. Ces résultats soulignent la nécessité de développer des critères de rupture spécifiques pour intégrer

plus finement les mécanismes d'endommagement liés au cisaillement et aux interactions pierre-mortier.

L'application de la méthodologie à une travée de Notre-Dame de Paris constitue une première mise à l'épreuve du modèle, visant la construction d'un jumeau numérique de l'ouvrage dans sa configuration post-incendie. Les résultats de la simulation confirment la pertinence du modèle homogénéisé pour reproduire les phénomènes principaux observés sur site : déplacements résiduels en configuration de type « X » pour les voûtes, convergence des fissures à l'intrados vers les nervures, et délamination généralisée de l'extrados. Toutefois, certaines différences subsistent entre le modèle et les observations, en particulier sur l'amplitude des déplacements, sous-estimée par le calcul. La dilatation thermique de l'extrados de la voûte joue un rôle moteur majeur dans le mécanisme de déplacement de la voûte. En conséquence, une délamination trop précoce de l'extrados aurait pour effet d'annuler ce mécanisme. L'amélioration de ce point, notamment en étudiant l'effet de la résistance en traction homogénéisée sur la délamination, constitue une piste de recherche importante pour améliorer le modèle vers une meilleure représentation des déplacements de la voûte.

Ces résultats ouvrent des perspectives importantes pour la modélisation numérique des ouvrages maçonnés soumis à l'incendie. Dans un premier temps, l'amélioration des lois constitutives homogénéisées, notamment en cisaillement, permettra d'accroître la robustesse du modèle dans les cas où le cisaillement prédomine. À terme, le développement de jumeaux numériques complets d'édifices historiques constitue un outil prometteur pour l'évaluation structurale post-incendie, offrant un support scientifique solide aux opérations de conservation et de restauration des ouvrages maçonnés.

REFERENCES

- Ali, M.A.A., Oliveira, R.L.G., Pereira, J.M., Rodrigues, J.P., Lourenço, P.B., Ulrich Marschall, H., Sayet, T., Gasser, A., Blond, E., 2023. Experimental characterization of the nonlinear thermomechanical behaviour of refractory masonry with dry joints. *Constr. Build. Mater.* 364, 129960. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129960>
- Almeshal, I., Abu Bakar, B.H., Tayeh, B.A., 2022. Behaviour of Reinforced Concrete Walls Under Fire: A Review. *Fire Technol.* 58, 2589–2639. <https://doi.org/10.1007/s10694-022-01240-3>
- Biró, A., Hlavička, V., Lublőy, E., 2019. Effect of fire-related temperatures on natural stones. *Constr. Build. Mater.* 212, 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.333>
- Boukham, A., 2025. Optimized use of FEM and DEM for post-fire structural assessment of Historical Monuments (PhD thesis). Université de Bordeaux, Bordeaux, France.
- Boukham, A., Venzal, V., Parent, T., Morel, S., Dubois, F., Solbes, B., 2024. 3D hybrid modeling approach combining the finite and discrete element methods: Validation based on masonry shear wall tests. *Int. J. Solids Struct.* 289, 112638. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2023.112638>
- CEN, 1999. NF EN 1052-1 Méthodes d'essai de la maçonnerie : Détermination de la résistance à la compression.
- Chen, J., Ji, Y., Xu, Y., Wang, G., Hu, K., 2024. Experimental investigation of behavior of reinforced high-strength concrete walls under standard fire. *J. Build. Eng.* 87, 109052. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109052>
- Fantilli, A.P., Burello, N.S., 2022. Masonry arches and vaults under fire. *J. Build. Eng.* 56, 104740. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104740>
- Fantin, M., 2020. Observations sur la géométrie des voûtes avant/après l'incendie. Bestrema.

- Ferrante, A., Dubois, F., Morenon, P., 2023. Seismic assessment of masonry vaults by means of an advanced hybrid FEM-DEM modeling strategy. *Procedia Struct. Integr.* 44, 1236–1243. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.159>
- Ferrante, A., Dubois, F., Morenon, P., 2022. A new hybrid FEM-DEM approach for more realistic evaluation of masonry structures, in: *Academic Journal of Civil Engineering*. Presented at the Rencontres universitaires du génie civil, AUGC, IMT Nord Europe, Villeneuve d'Ascq, pp. 190–193. <https://doi.org/10.26168/AJCE.40.1.47>
- Gajjar, P.N., Ali, M.A.A., Sayet, T., Gasser, A., Blond, E., Pereira, J.M., Lourenço, P.B., 2023. Numerical study on the nonlinear thermomechanical behaviour of refractory masonry with dry joints. *Eng. Struct.* 291, 116468. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116468>
- Guenser, C., Corn, S., Salgues, M., Morenon, P., Domede, N., 2024. Effect of high temperatures on the mechanical and thermal properties of Notre-Dame de Paris Lutetian limestone. *Mater. Struct.* 57, 81. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02354-6>
- Hajpál, M., 2010. Fire Damaged Stone Structures in Historical Monuments. *Laboratory Analyses of Changes in Natural Stones by Heat Effect*. CIB Publ. 164.
- Kincaid, S., 2021. Practical Challenges in Mitigating the Aftermath of Fire in Historic Buildings. *Hist. Environ. Policy Pract.* 12, 77–96. <https://doi.org/10.1080/17567505.2020.1852660>
- Leal, D.F., Munaiar Neto, J., Maluk, C., 2024. Thermal behavior of dry-cast concrete blocks masonry walls at elevated temperatures. *J. Build. Eng.* 89, 109133. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109133>
- Liu, J.-C., Tan, K.H., Yao, Y., 2018. A new perspective on nature of fire-induced spalling in concrete. *Constr. Build. Mater.* 184, 581–590. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.204>
- Lottman, B., 2017. The spalling mechanism of fire exposed concrete (Thèse de doctorat). Delft University of Technology. <https://doi.org/10.4233/UID:5B78D71B-708F-405F-B3B3-CA664B141CE0>
- Nguyen, T.-D., Meftah, F., 2014. Behavior of hollow clay brick masonry walls during fire. Part 2: 3D finite element modeling and spalling assessment. *Fire Saf. J.* 66, 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.08.017>
- Oliveira, R.G., Rodrigues, J.P.C., Miguel Pereira, J., Lourenço, P.B., Lopes, R.F.R., 2021. Experimental and numerical analysis on the structural fire behaviour of three-cell hollowed concrete masonry walls. *Eng. Struct.* 228, 111439. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111439>
- Parent, T., Brocato, M., Colas, A.-S., Domede, N., Dubois, F., Garnier, D., Gros, A., Mindeguia, J.-C., Morel, S., Morenon, P., Nougayrede, P., Taforel, P., 2023. A multi-model structural analysis of the vaults of Notre-Dame de Paris Cathedral after the 2019 fire and a proposal for a hybrid model merging continuum and discrete approaches. *J. Cult. Herit.* <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.05.009>
- Pham, D.T., Donval, E., Pinoteau, N., Pimienta, P., Pallix, D., 2022. Test of loaded and unloaded natural stone masonry walls exposed to fire. *Mater. Struct.* 55, 229. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-02058-9>
- Pires, V., Sitzia, F., Lisci, C., Cordeiro, L., 2024. Evaluating building stones: Physical-mechanical changes from high-temperature fire and water cooling. *Heliyon* 10. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36108>
- Prakash, P.R., Azenha, M., Pereira, J.M., Lourenço, P.B., 2020. Finite element based micro modelling of masonry walls subjected to fire exposure: Framework validation and structural implications. *Eng. Struct.* 213, 110545. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110545>
- Ryu, E., Kim, H., Chun, Y., Yeo, I., Shin, Y., 2020. Effect of heated areas on thermal response and structural behavior of reinforced concrete walls exposed to fire. *Eng. Struct.* 207, 110165. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110165>
- Sellier, A., 2018. *Anisotropic Damage and Visco-Elasto-Plasticity Applied to Multiphasic Materials (Research report)*. LMDC ; Université de Toulouse III - Paul Sabatier ; INSA de Toulouse, Toulouse.
- Zheng, Y.Q., Zhuang, J.P., 2011. Analysis on Fire Resistance of Reinforced Concrete Wall. *Adv. Mater. Res.* 243–249, 797–800. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.243-249.797>