

Comportement au feu des murs de maçonnerie en pierre naturelle

Elodie DONVAL

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Marne-la-Vallée, France / Laboratoire Navier (Ecole des Ponts, UGE, CNRS), Marne-la-Vallée, France – En partenariat avec le Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction (CTMNC), Paris, France

RESUME. La présente contribution propose et développe une méthode d'évaluation au feu des murs de maçonnerie en pierre naturelle, à visée applicative pour l'ingénieur. En particulier, on s'intéresse ici à l'effet de la dégradation des matériaux causée par l'élévation de la température, qui est évalué par une méthode *d'homogénéisation en Calcul à la Rupture* (ou Analyse Limite). Dans un premier temps, la résolution semi-analytique d'un problème auxiliaire sur la cellule de base permet de déterminer le critère de résistance macroscopique du mur de maçonnerie, en intégrant la dégradation locale, due au feu, des propriétés de résistance de la pierre et du mortier. Dans un second temps, la charge extrême du mur modélisé par une plaque est évaluée par le Calcul à la Rupture. Les résultats obtenus sont ensuite comparés aux résultats d'un essai de résistance au feu à l'échelle 1 sur un mur de maçonnerie en pierre naturelle.

Mots-clefs Maçonnerie, Pierre naturelle, Feu, Homogénéisation, Calcul à la Rupture.

I. INTRODUCTION

La pierre naturelle, matériau bas carbone, est de plus en plus employée dans la construction neuve. Cependant, il n'existe pas de recommandations pour le calcul au feu des bâtiments en pierre naturelle dans les textes normatifs comme l'Eurocode 6, ce qui rend son utilisation chère et complexe. Cette contribution propose et développe une méthode d'évaluation de la stabilité au feu des murs de maçonnerie en pierre naturelle, à visée applicative pour l'ingénieur, schématisée sur la figure 1. Cette méthode s'intéresse, de manière découplée, aux deux principaux effets du feu sur le mur identifiés expérimentalement par (Pham et al., 2022) : l'apparition d'une courbure thermique causée par le développement d'un gradient thermique dans l'épaisseur du mur d'une part, et la dégradation des matériaux due à l'élévation de température d'autre part.

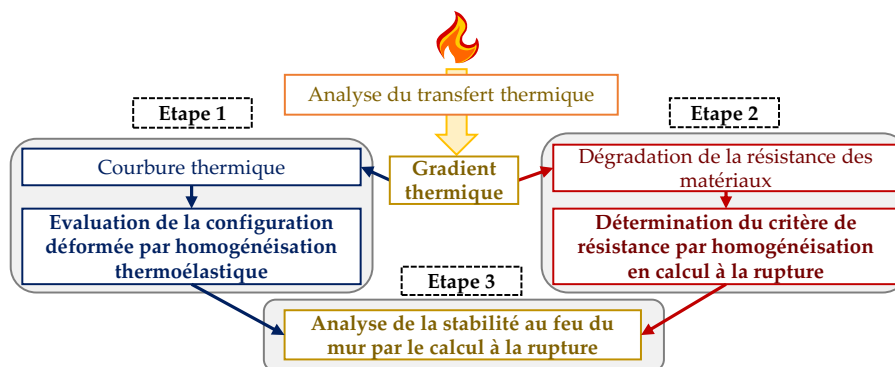


FIGURE 1. Méthode proposée.

La courbure thermique, qui crée des moments additionnels dus à l'excentrement des charges verticales initialement présentes, peut être évaluée par *homogénéisation thermoélastique*, comme proposé dans (Donval et al., 2022a). L'effet de la dégradation de la résistance des matériaux, quant à lui, peut être évalué à l'échelle de l'assemblage bloc-mortier, en se basant sur une méthode d'*homogénéisation en Calcul à la Rupture* (ou Analyse Limite) (Salençon, 1983 ; de Buhan et al., 2017). Finalement, il est possible de déterminer la résistance au feu du mur, modélisé par une plaque dans sa configuration déformée par le feu par le Calcul à la Rupture. Le caractère direct, ne nécessitant pas de connaître la loi de comportement du matériau, de l'approche Calcul à la Rupture, et l'homogénéisation périodique permettent un calcul rapide et adapté à l'ingénieur.

Cet article propose une première application de la méthode décrite ci-dessus, en détaillant, dans un premier temps, la résolution du problème auxiliaire permettant la détermination du critère de résistance de la maçonnerie exposée au feu (Etape 2), puis dans un second temps, la détermination de la charge extrême du mur homogénéisé (Etape 3), la contribution de la courbure thermique (Etape 1) à la stabilité étant dans un premier temps négligée. Les résultats obtenus sont comparés à l'essai de résistance au feu d'un mur de maçonnerie en pierre calcaire de Saint-Vaast et mortier de chaux hydraulique naturelle NHL 3,5 présenté dans (Donval et al., 2022b).

II. DETERMINATION DE LA RESISTANCE DE L'ASSEMBLAGE PAR HOMOGENEISATION EN CALCUL A LA RUPTURE

On considère ici un mur de maçonnerie en pierres naturelles appareillées en panneresse, constituant un milieu périodique dans le plan médian du mur. Les propriétés d'un mur homogène équivalent à ce mur, hétérogène à la fois du fait de sa constitution par assemblage de pierre et de mortier, et du fait de la dégradation des matériaux en fonction de la température, peuvent être déterminées en résolvant un problème « auxiliaire », sur une cellule de base représentée sur la figure 2.

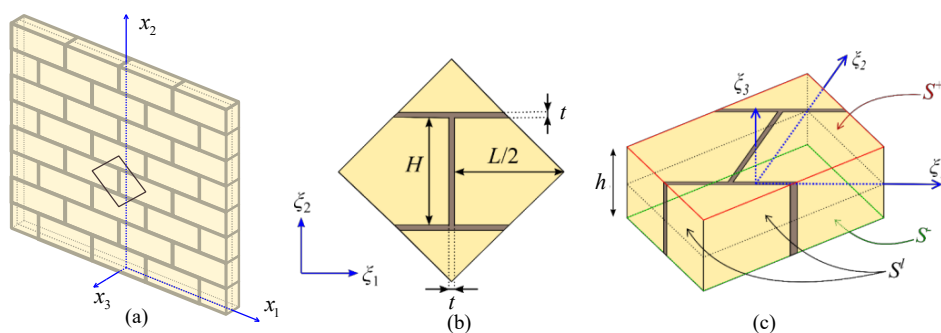


FIGURE 2. Cellule de base considérée.

A. Position du problème auxiliaire

La cellule de base est soumise au mode de chargement suivant : les forces de volumes sont considérées nulles, ses faces inférieure et supérieure (S^+ et S^- sur la figure 2) sont libres de

contraintes, et le vecteur contrainte est antipériodique sur ses faces latérales S^l . Du point de vue cinématique, la vitesse virtuelle sur les surfaces latérales S^l de la cellule de base vaut (Sab, 2003):

$$\underline{u} = \underline{D} \cdot \underline{\xi} - \xi_3 \underline{\chi} + \frac{1}{2} (\underline{\xi} \cdot \underline{\chi} \cdot \underline{\xi}) e_3 + \underline{u}^{per}(\underline{\xi}) \tag{1}$$

où \underline{D} désigne le tenseur des taux de déformations macroscopiques, $\underline{\chi}$ le tenseur des taux de courbures macroscopiques, et $\underline{u}^{per}(\underline{\xi})$ la fluctuation périodique de la vitesse. On peut montrer que ces paramètres cinématiques sont en dualité avec le tenseur des efforts membranaires \underline{N} et le tenseur des moments fléchissants \underline{M} .

Localement, la pierre et le mortier sont supposés obéir à un critère de Mohr-Coulomb, de cohésion c^b pour le bloc (resp. c^m pour le mortier) et d'angle de frottement interne φ^b pour le bloc (resp. φ^m pour le mortier). Le domaine de résistance du matériau homogène équivalent à la maçonnerie est alors l'ensemble G^{hom} des chargements $(\underline{N}, \underline{M})$ tel qu'il soit possible de mettre en évidence sur la cellule de base un champ de contraintes $\underline{\sigma}$ statiquement admissible (i.e. à l'équilibre) avec le chargement $(\underline{N}, \underline{M})$ et vérifiant, en tout point, le critère local de Mohr-Coulomb. Le domaine G^{hom} est un ensemble convexe, que l'on peut également définir de manière duale par sa fonction d'appui $\Pi(\underline{D}, \underline{\chi})$:

$$\Pi(\underline{D}, \underline{\chi}) = \sup \left\{ \underline{N} : \underline{D} + \underline{M} : \underline{\chi} ; (\underline{N}, \underline{M}) \in G^{hom} \right\} \tag{2}$$

L'objectif de la mise en œuvre de l'approche cinématique sur le problème auxiliaire est alors de déterminer un majorant de la fonction d'appui de ce domaine, aboutissant à une approche par l'extérieur du domaine G^{hom} .

B. Mise en œuvre de l'approche cinématique du Calcul à la Rupture pour le problème auxiliaire.

L'approche cinématique consiste en la minimisation, sur un sous-ensemble de l'ensemble des champs de vitesse \underline{U} cinématiquement admissibles avec le chargement $(\underline{D}, \underline{\chi})$ (i.e. vérifiant l'équation (1)), de la puissance résistante maximale, définie par :

$$P_{mm}(\underline{U}) = \int_V \pi(\underline{d}(\underline{\xi}), \underline{\xi}) dV \geq |S| \Pi(\underline{D}, \underline{\chi}) \tag{3}$$

où on a noté $\underline{d} = (\underline{\nabla} \underline{u} + {}^T \underline{\nabla} \underline{u}) / 2$ le taux de déformation, S la surface de la cellule de base et V son volume. $\pi(\underline{d}(\underline{\xi}), \underline{\xi})$ est la fonction d'appui du critère de Mohr-Coulomb, qui dépend du taux de déformation local et du critère local, et dont l'expression est donnée par (Salençon, 1983). L'approche présentée dans cette contribution étend l'approche analytique déjà présentée dans (Donval et al., 2023) au cas de sollicitations hors-plan. Le principe de cette approche est de minimiser la puissance résistante maximale en explorant deux familles de mécanismes de rupture virtuels, et donc de champs de vitesse virtuelle, qui sont bien cinématiquement admissibles avec un chargement $(\underline{D}, \underline{\chi})$:

- Un mécanisme de blocs, qui étend le mécanisme proposé par (Sab, 2003) au cas où la cohésion varie en fonction de l'épaisseur. La fonction d'appui du domaine de résistance obtenu avec ce mécanisme est notée $\Pi^{blocs}(\underline{D}, \underline{\chi})$.
- Un mécanisme « homogène par plans », qui se présente comme une extension du mécanisme « homogène » présenté dans (Donval et al., 2023). Le taux de déformation considéré, de la forme $\underline{d} = \underline{D} - \xi_3 \underline{\chi}$, permet de prendre en compte les effets hors-plan et d'obtenir une borne de type « Voigt » de la résistance. La fonction d'appui du domaine de résistance obtenue avec ce mécanisme est notée $\Pi^{iso}(\underline{D}, \underline{\chi})$.

Les deux mécanismes sont étudiés indépendamment et permettent d'obtenir deux approches par l'extérieur du domaine de résistance macroscopique. Leur intersection constitue également une approche par l'extérieur du domaine de résistance G^{hom} , sa fonction d'appui peut s'écrire :

$$\Pi(\underline{D}, \underline{\chi}) = \min_{\underline{D}^1, \underline{D}^2, \underline{\chi}^1, \underline{\chi}^2} \Pi^{blocs}(\underline{D}^1, \underline{\chi}^1) + \Pi^{iso}(\underline{D}^2, \underline{\chi}^2) \quad s.c. \quad \underline{D} = \underline{D}^1 + \underline{D}^2 \quad \text{et} \quad \underline{\chi} = \underline{\chi}^1 + \underline{\chi}^2 \quad (4)$$

Plus de détails sur l'expression de ces fonctions d'appui, ainsi que sur la façon de les obtenir, peuvent être retrouvés dans (Donval et al., 2023).

C. Un premier exemple à température ambiante

Pour ce premier exemple, on reprend la géométrie du mur décrit dans (Donval et al., 2022b) : les blocs ont une longueur $L = 720$ mm, une hauteur $H = 360$ mm, une épaisseur $h = 200$ mm et sont reliés par des joints d'épaisseur $t = 10$ mm. Ils sont composés de calcaire de Saint-Vaast, dont on supposera que l'angle de frottement interne vaut 30° et, en sachant que la résistance en compression vaut 5,3 MPa, la cohésion sera prise égale à $c^b = 1,53$ MPa. Les blocs sont liés par un mortier de chaux hydraulique naturelle NHL3,5, dont la résistance à la compression valait 0,5 MPa le jour de l'essai. En faisant l'hypothèse que l'angle de frottement interne vaut 25° (Pelà et al., 2017), la cohésion est donc égale à $c^j = 0,2$ MPa.

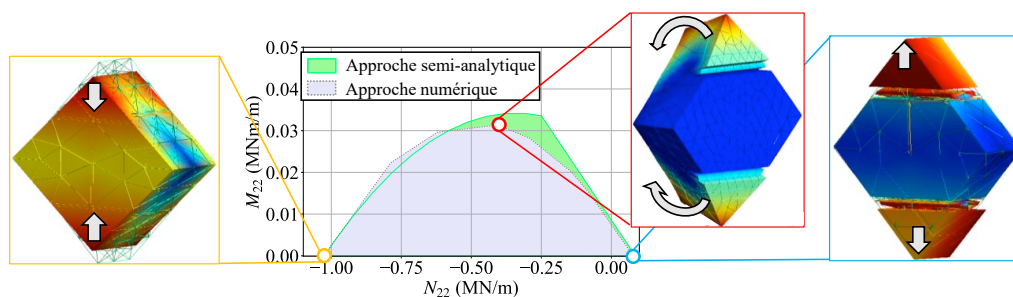


FIGURE 3. Coupe des domaines de résistance obtenus par les approches semi-analytique et numérique par un plan (N_{22}, M_{22}) , toutes autres sollicitations nulles.

La figure 3 donne, à titre indicatif, le domaine de résistance de la maçonnerie correspondante dans le plan (N_{22}, M_{22}) , qui correspond à une flexion composée dans la direction verticale ξ_2 , ainsi que quelques mécanismes de rupture obtenus numériquement. Le domaine de résistance obtenu par l'approche semi-analytique est également comparé au domaine de résistance obtenu par la mise en œuvre numérique de l'approche cinématique par éléments finis en Calcul à la Rupture.

D. Prise en compte de la dégradation des propriétés des matériaux

Dans le cadre du Calcul à la Rupture, les contraintes thermiques, qui sont des efforts auto-équilibrés (c'est-à-dire équilibrant un chargement mécanique nul), n'impactent pas la charge extrême de la structure (voir par exemple de Buhan, 2007). Le seul effet du feu sur la résistance de l'assemblage réside donc dans la dégradation des propriétés de résistance des matériaux constitutifs avec l'augmentation de température. La fonction d'appui calculée dans le paragraphe précédent considère que les propriétés de résistance sont homogènes selon la coordonnée transversale du mur ξ_3 . Elle peut être modifiée pour prendre en compte la dégradation de ces propriétés dans la détermination du critère de résistance.

Nous considérerons donc que la cohésion des matériaux évolue en fonction de la température, l'angle de frottement interne étant maintenu constant. Pour un temps d'exposition au feu donné, le profil de cohésion peut donc être déduit du profil de température. Ce profil de température peut être obtenu par un calcul thermique ou expérimentalement. Ici, nous avons choisi d'utiliser les profils mesurés expérimentalement lors de l'essai de (Donval et al., 2022b) en raison du manque de données sur l'évolution des propriétés thermiques du calcaire de Saint-Vaast avec la température et des phénomènes hygrothermiques observés lors de l'essai. La figure 4(a) donne les profils de température mesurés pendant l'essai, la figure 4(b) donne une évolution de la cohésion des matériaux en fonction de la température. Pour cette dernière figure, la résistance à température ambiante correspond aux essais de caractérisation effectués sur le calcaire de Saint-Vaast et le mortier composant le mur. Le coefficient de dégradation de la cohésion en fonction de la température (qui, à angle de frottement interne constant, est équivalent au facteur de réduction de la résistance en compression $R_c(T)/R_c(20\text{ °C})$) provient, pour la pierre, des données de (Vigroux et al., 2021) sur le calcaire de Saint-Maximin, et pour le mortier, des données de (Pachta et al., 2018).

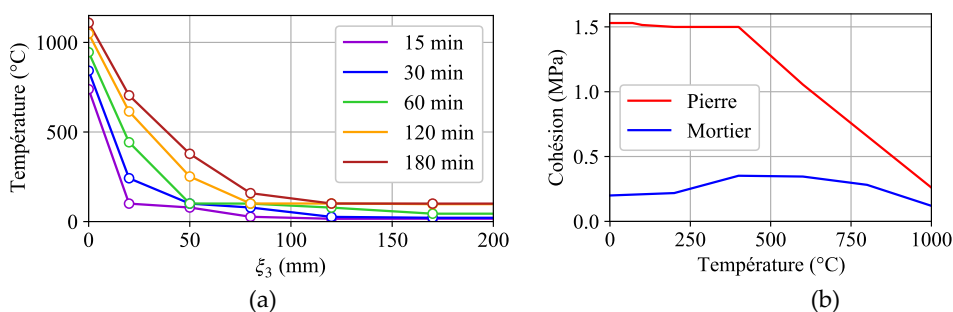


FIGURE 4. (a) Champ de température pour différents temps d'exposition au feu et (b) dégradation de la cohésion des matériaux en fonction de la température.

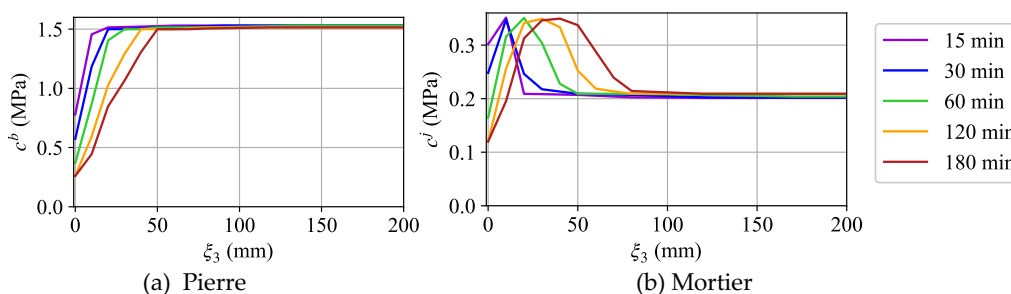


FIGURE 5. Cohésion en fonction de la coordonnée dans l'épaisseur pour différents temps d'exposition au feu, (a) pour la pierre et (b) pour le mortier

On note que le mortier devient plus résistant lorsqu'il est exposé à des températures comprises entre 200 et 800 °C. La figure 5 représente la cohésion de la pierre (a) et du mortier (b) en fonction de la coordonnée dans l'épaisseur du mur pour différents temps d'exposition au feu.

Des coupes du domaine de résistance du mur pour différents temps d'exposition au feu sont données sur la figure 6. Le domaine de résistance, qui était initialement symétrique par rapport à l'axe des abscisses, n'est plus symétrique du fait de la dégradation des propriétés d'un seul côté du mur. Cette dégradation entraîne principalement une perte de résistance en flexion et en compression, tandis que la résistance à la traction est peu affectée.

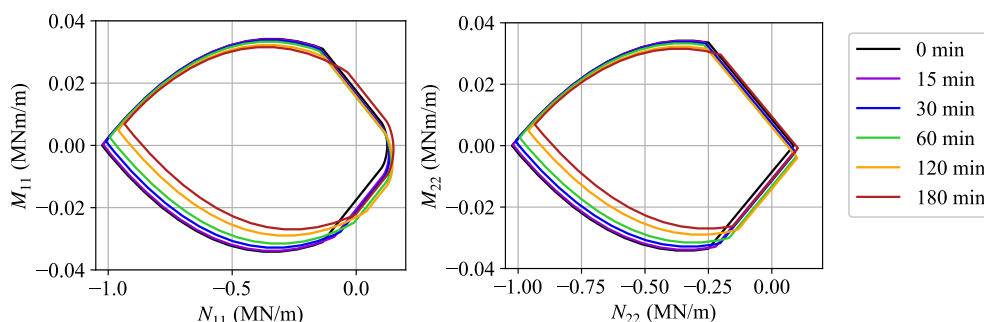


FIGURE 6. Evolution du domaine de résistance du mur pour différentes sollicitations et différents temps d'exposition au feu.

III. EVALUATION DE LA STABILITE AU FEU DU MUR PAR UNE APPROCHE CINEMATIQUE NUMERIQUE DU CALCUL A LA RUPTURE

A. Principe de l'approche cinématique numérique

Une fois que le domaine de résistance du matériau homogène équivalent à la maçonnerie dégradée par le feu est déterminé, il devient possible d'évaluer la résistance d'un mur, modélisé par une plaque homogène dont les propriétés de résistances vérifient le critère approché par la fonction d'appui de l'équation (4). Pour ce faire, on peut s'appuyer sur la mise en œuvre numérique de l'approche cinématique du Calcul à la Rupture.

La discrétisation par éléments finis est identique à celle proposée par (Bleyer et al., 2015) pour des plaques épaisses. L'apport de notre contribution réside ici dans le critère utilisé, qui est le critère de la maçonnerie déterminé dans la partie précédente. Ce critère présente l'avantage majeur de pouvoir se mettre sous la forme d'un problème d'optimisation dite « conique », pour laquelle il existe aujourd'hui des solveurs très performants. La fonction d'appui déterminée dans la partie précédente peut donc être évaluée, sans approximation, en tout point du maillage.

B. Application : comparaison à un essai de résistance au feu sur un mur de maçonnerie en pierre naturelle

Compte tenu de la faible déformée hors-plan (7 mm pour un mur de 200 mm d'épaisseur), celle-ci a été négligée en première approche dans la comparaison. Le mur est donc modélisé par une

plaque plane. Les conditions aux limites sont données sur la figure 7 (a). La plaque est encastree sur son bord inferieur. Ses deux bords lateraux sont libres d'efforts. Un chargement vertical $-pe_2$ est applique sur le bord superieur, qui est bloque en translation dans la direction transversale e_3 , mais libre dans la direction horizontale dans le plan du mur e_1 .

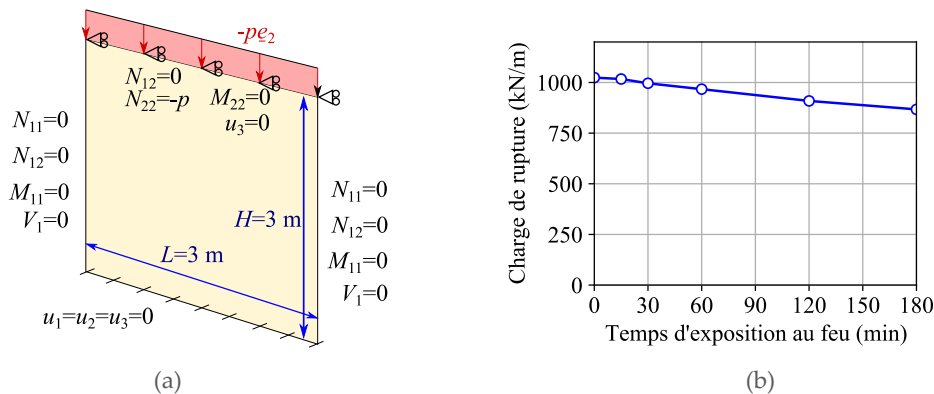


FIGURE 7. (a) Conditions aux limites du problème correspondant à l'essai ; (b) Evolution de la charge extrême en fonction du temps d'exposition au feu.

La figure 7(b) donne l'évolution du majorant de la charge extrême ainsi calculé en fonction du temps d'exposition au feu. On note qu'entre un mur exposé au feu pendant 3h, et un mur non-exposé au feu, l'approche cinématique du Calcul à la Rupture montre que la réduction de résistance est de 16 %. Le calcul d'un tel majorant de la charge extrême prend environ 2 min sur un ordinateur portable équipé d'un processeur Intel i5 10th gen. et de 16 Go de RAM.

Pour 180 min d'exposition au feu, l'approche cinématique du Calcul à la Rupture donne une évaluation de la charge extrême égale à 861 kN/m. Comparé à la charge de rupture expérimentale (250 kN/m), la méthode proposée surestime donc la résistance du mur d'un facteur 3,4. Au-delà du fait qu'il s'agisse d'une approche par l'extérieur, qui fournit un majorant de la charge extrême, cette surestimation importante est liée à plusieurs facteurs :

- *Détermination des paramètres d'entrée du modèle* : La détermination de la résistance en compression sur un essai normalisé (pour lequel la pierre et le mortier ont un élancement de 1) tend à surestimer la résistance en compression uniaxiale. Des essais sont prévus sur des échantillons d'élancement plus grand afin d'avoir une meilleure estimation de cette grandeur. Par ailleurs, le Saint-Vaast, plus poreux et moins résistant que le Saint-Maximin, se détériore peut-être davantage lorsqu'il est exposé au feu.

- *Incertitudes expérimentales sur le positionnement du mur* : le dispositif expérimental admet une incertitude de positionnement de 1 à 2 cm du cadre de chargement, et on peut évaluer l'incertitude de positionnement des blocs par rapport au plan médian du mur à $\pm 4\text{ mm}$. L'excentrement potentiel dû à ces incertitudes, qui apporte un moment fléchissant additionnel à appliquer en tête de mur, pourrait être pris en compte à l'aide du modèle proposé dans le calcul de la charge extrême.

- *Non prise en compte de l'excentrement de la charge dû à la courbure thermique* : par souci de simplification du problème, nous avons supposé que le mur était plan. En pratique, la courbure

thermique crée une flèche de 7 mm. Sa prise en compte, qui nécessite le développement d'un modèle d'éléments finis de coques, pourrait conduire à abaisser le facteur de stabilité.

- *Fragilité des matériaux* : le Calcul à la Rupture se base sur l'hypothèse d'un caractère ductile du matériau, ce qui est loin d'être le cas de la pierre et des joints. Dans la pratique de l'ingénieur, il serait donc nécessaire de définir un coefficient de sécurité associé à cette fragilité, pour pouvoir mettre en œuvre la méthode proposée.

V. REMARQUES FINALES

La méthode proposée dans cette contribution propose une première approche du dimensionnement au feu des murs de maçonnerie en pierre naturelle. Elle combine les avantages de l'homogénéisation et du Calcul à la Rupture : les calculs sont très rapides et parfaitement adaptés à une approche de type ingénieur. Bien que la méthode proposée ne permette pas encore une évaluation suffisamment précise de la charge de rupture d'un mur de maçonnerie en pierre naturelle exposé au feu, de nombreuses pistes d'amélioration restent à envisager. Celles-ci incluent la prise en compte de la configuration déformée par le feu par homogénéisation thermoélastique, de manière analogue à (Bleyer et al., 2017), l'utilisation d'un critère de Mohr-Coulomb tronqué en traction, qui reproduit mieux le comportement local des matériaux, ainsi que la réalisation d'une approche statique du Calcul à la Rupture pour compléter l'approche cinématique proposée ici.

REFERENCES

- Bleyer, J., Pham, D.T., de Buhan, P., 2017. Numerical Yield Design Analysis of High-Rise Reinforced Concrete Walls in Fire Conditions. Springer, Cham.
- Bleyer, J., Van Le, C., de Buhan, P., 2015. Locking-free discontinuous finite elements for the upper bound yield design of thick plates. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 103, 894–913.
- de Buhan, P., 2007. Plasticité et calcul à la rupture. Presses des Ponts.
- Donval, E., Pham, D.T., Hassen, G., de Buhan, P., Pallix, D., 2022a. A numerical homogenization method for the determination of the thermal bowing of a masonry wall exposed to fire: Application to natural stone masonry. *Engineering Structures* 266, 114541.
- Donval, E., Pham, D.T., Hassen, G., de Buhan, P., Pallix, D., 2022b. Essai de résistance au feu d'un mur de maçonnerie en pierre naturelle. *Academic Journal of Civil Engineering* 203–206.
- Donval, E., Pham, D.T., Hassen, G., De Buhan, P., Vigroux, M., 2023. 3D analytical and numerical upper-bound homogenization approaches to the in-plane strength domain of a running-bond masonry wall. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 3537.
- Pachta, V., Triantafyllaki, S., Stefanidou, M., 2018. Performance of lime-based mortars at elevated temperatures. *Construction and Building Materials* 189, 576–584.
- Pelà, L., Kasioumi, K., Roca, P., 2017. Experimental evaluation of the shear strength of aerial lime mortar brickwork by standard tests on triplets and non-standard tests on core samples. *Engineering Structures* 136, 441–453.
- Pham, D.T., Donval, E., Pinoteau, N., Pimienta, P., Pallix, D., 2022. Test of loaded and unloaded natural stone masonry walls exposed to fire. *Materials and Structures* 55, 229.
- Sab, K., 2003. Yield design of thin periodic plates by a homogenization technique and an application to masonry walls. *Comptes Rendus Mécanique* 331, 641–646.

- Salençon, J., 1983. Calcul à la rupture et analyse limite. Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, Paris.
- Vigroux, M., Eslami, J., Beaucour, A.-L., Bourgès, A., Noumowé, A., 2021. High temperature behaviour of various natural building stones. *Construction and Building Materials* 272, 121629.