

Protection passive incendie des édifices religieux du patrimoine classé - Application au cas des cathédrales et intérêt d'une solution à base de plâtre

E. Huby¹, A. Rojo², D. Giovannacci³, S. Logel⁴, J-D. Mertz³, Y. Mélinge³

¹ Institut Jean Lamour UMR 7198 - Equipe "Matériaux pour le Génie Civil", Nancy - France

² IUT de Reims Châlons Charleville, Université de Reims Champagne Ardenne, Reims - France

³ LRMH, CRC – MNHN, CNRS, Ministère de la Culture – UAR 3224, Champs sur Marne - France

⁴ Laboratoire BPE, Dimbsthal – France

RESUME Suite au sinistre de la cathédrale Notre-Dame de Paris, la découverte d'une couche de protection à base de plâtre appliquée à l'extrados des voûtes a permis d'expliquer une certaine préservation des pierres calcaires maçonnées. L'ampleur de l'incendie montre, néanmoins, la fragilité de tels édifices et au-delà du grandiose des cérémonies d'inauguration pour célébrer un terme d'une opération exceptionnelle de restauration, les regards se tournent à présent vers les autres édifices construits selon un modèle assez semblable. Loin d'un « plus jamais ça », mais combattons au mieux pour limiter l'inévitable est plus que jamais une priorité. Pour ce type de problématique, les scénarios d'empêchement, de détection et d'intervention des professionnels du feu existent et sont globalement opérationnels pour la plupart des cathédrales. En matière de protection directe des édifices, lorsque les solutions existent, elles sont plutôt actives, tandis que les solutions passives, lorsqu'elles existent, consistent en une couche minérale à base de plâtre dihydraté. Quelle est l'intérêt d'un recours à une protection passive ? Quels sont les apports d'une couche de protection à base de plâtre ? Quelles sont les principales clefs du comportement d'une telle solution ? Quels sont les risques d'une telle solution de protection ? Dans cet article, nous tentons d'apporter des éléments de réponse en nous appuyant sur les travaux conduits au cours de la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris, en particulier sur des travaux de caractérisation du comportement de matériaux dédiés à la protection passive dans un contexte Thermique, Hygrique, Chimique et Mécanique (THCM) depuis l'échelle de la microstructure et jusqu'à la macrostructure.

Mots-clefs Incendie, protection passive, plâtre dihydraté, THCM, multi échelle

I. INTRODUCTION

Le 15 avril 2019 pendant près de 15h, la cathédrale Notre-Dame de Paris est en flamme, détruisant, entre autres, entièrement la couverture et la charpente. L'effondrement de la flèche a détruit la croisée du transept et des portions de voûtes de la nef et du transept nord. Pour envisager les phases de restauration, dès lors que le site est sécurisé, les constats d'état peuvent être conduits. Cet exemple de la cathédrale Notre-Dame est très représentatif de la sécurité incendie pour ce type d'édifice. Sur les voûtes (depuis la face extradados), les murs gouttereaux, les endommagements caractéristiques des pierres calcaires peuvent être détectés à leur surface et en profondeur au moyen de prélèvements. Les changements de couleur de la pierre et leurs transitions attestent de l'histoire des dommages (teinte rougeâtre de la rubéfaction, les teintes grises d'un témoin aux alentours de 500°C ou le blanchiment caractéristique de la décarbonatation lorsque les produits formés peuvent rester en place, ...). Ces constats d'état mettent également en lumière les endommagements tels que fissures et éclatements locaux. Sur certaines des voûtes de Notre-Dame, un constat important réside également dans la détection d'une couche minérale à base de plâtre plus ou moins altérée [1]. Celle-ci est au contact direct à l'extrados des pierres de la maçonnerie. L'épaisseur est pluri-centimétrique et décimétrique par endroits, notamment dans les reins de voûtes du chœur. La caractérisation de prélèvements, révèle une stratification qui témoigne de l'avancement de l'endommagement de cette couche de protection passive incendie. Au contact de la pierre, le gypse domine, tandis qu'à l'extrados de la couche de plâtre, les produits anhydres dominent. Entre ces deux extrêmes, une phase intermédiaire de décomposition thermochimique subsiste ; la bassanite.

L'existence de cette couche de protection que l'on doit à E. Viollet-le-Duc au cours de la phase de restauration au XIX^{ème} siècle a permis de protéger la maçonnerie au cours de l'incendie. A l'époque, un tel choix technique de la part de l'architecte rejoint peut-être les préconisations de protection édictées pour les constructions après le grand incendie de Londres du 2 au 5 septembre 1666. Si ce choix est judicieux vis-à-vis du risque incendie, car la couche de protection a, sans conteste, protégé une bonne partie de l'édifice contre l'élévation de la température, on ne peut occulter les risques de compatibilité entre minéraux dans le cas où de grosses quantités d'eau viennent solliciter la protection. En effet, la dissolution partielle du gypse ne peut être exclue, ainsi que les pathologies sulfatiques qui en découlent. L'interaction avec l'eau liquide en abondance peut survenir en service dans le cas d'un défaut important de couverture, pendant l'incendie au cours des phases d'extinction par les professionnels du feu et en condition post incendie pour une mise hors d'eau si un parapluie n'est pas déployé rapidement après le sinistre avant que la stratégie de restauration ne soit établie. Ces quelques clefs interrogent, bien sûr, de celle à retenir si une restauration à l'identique devait s'imposer.

Dans cet article, après avoir examiné quelques scénarii possibles en matière de protection passive, nous retenons le cas où une couche minérale à base de plâtre serait retenue comme solution technique de protection à appliquer sur la partie extradados des voûtes.

II. GENERALITES EN MATIERE DE PROTECTION PASSIVE

Dans le cas des édifices tels que les cathédrales, le feu prend dans la charpente et vient solliciter principalement l'extrados des voûtes. Lorsqu'une solution de protection existe, on distingue le compartimentage des combles comme c'est le cas de la basilique Sainte-Anne-d'Auray, l'application d'une couche de protection passive directement sur les voûtes sous la forme d'un enduit comme c'est le cas de la cathédrale Notre-Dame de Paris, la disposition de panneaux rigides à base de silicates de calcium sur une structure porteuse comme c'est le cas de la cathédrale d'Amiens. Dans le cas de la cathédrale d'Autun, une maçonnerie de blocs céramisés est revêtue d'un mortier à base de chaux et de tuileau. Sans que cela puisse être considéré comme un matériau de protection anti feu, cette couche de 70 mm d'épaisseur présente une certaine efficacité et est stable mécaniquement au cours de l'élévation de la température. Compte tenu du poids patrimonial, le recours à une solution de protection se matérialise par un enduit qui s'adapte à la forme des voûtes sans nuire à la lisibilité architecturale de celle-ci ; ce qui exclut les solutions préfabriquées collées, vissées, ... sur le support à protéger.

Une protection est fonction de son épaisseur et sa composition. Cette dernière confère un caractère protecteur basé sur l'isolation thermique ou en matérialisant de l'inertie thermique ou en exploitant un mécanisme thermo-chimique de changement de phases tel qu'un processus de déshydratation. A titre d'exemples, on distingue les laines minérales, les matériaux à base de silicates de calcium, les matériaux phosphomagnésiens, les produits à base de plâtre, pour les solutions déjà existantes et de coûts relativement modérés. Dans ce panel de solutions, nous excluons les systèmes intumescents par la chimie qu'ils impliquent en général et le degré coupe-feu qui les caractérise, sont peu compatibles avec les incendies considérés ici.

Bien évidemment les protections sont rarement purement isolantes ou qu'à chaleur latente et dans tous les cas, il convient de trouver les meilleurs compromis pour (i) mettre en œuvre la solution sur l'édifice, (ii) obtenir des performances mécaniques en service compatible avec une stabilité d'ensemble à l'échelle de l'édifice et (iii) un « bon degré coupe-feu » associé à une bonne stabilité mécanique sous chargement thermique sévère. Le cas des solutions à base de plâtre est un bon exemple d'une solution à la fois isolante, meilleure que la pierre, qui présente une chaleur spécifique massique qui confère à la solution de l'inertie et représente bien une solution dont le processus de déshydratation est l'avantage majeur malgré sa relative fragilité mécanique sous chargement thermique sévère.

III. MATERIAUX ET MOYENS EXPERIMENTAUX

Pour cette étude multi-critères et multi-échelles, nous avons limité nos travaux au cas des hémihydrates de sulfates de calcium de type β et, pour l'article, nous avons retenu l'hémihydrate naturel Ibérica de la société Extha. Les mélanges de plâtre et d'eau sont considérés pour différents taux de gâchage massique et au-delà d'une cure en condition climatisée pour stabiliser la masse en évaporant l'eau excédentaire non nécessaire à l'hydratation du réactif, les mélanges sont caractérisés depuis la micro échelle et jusqu'à la macro échelle. Pour cette dernière, les corps d'épreuve retenus sont des dalles de 550x550 mm² et d'épaisseur constantes chauffées sur une face au moyen du standard ISO 834. La disposition expérimentale est horizontale et les dalles sont

simplement posées pour fermer le four. La condition thermique est imposée sur la face inférieure et la chauffe est purement radiative [2, 3]. Une telle configuration d'essai est contraignante mécaniquement car la quantité de chaleur est imposée sur la face tendue des échantillons. Le recours à un tel scénario de chauffe pour la problématique de Notre Dame est aggravant et représente une approche sécuritaire.

IV. PROTECTION AU MOYEN D'UNE COUCHE DE PLÂTRE DI-HYDRATE

A. A l'état frais

En présence d'un plâtre β , la demande en eau représentée par le taux de gâchage massique (E/P) est comprise entre 0,57 et 1, même si la limite inférieure varie en fonction du fournisseur. Sur le plan rhéologique, à 0,57, la texture fluide exhibe un comportement d'un matériau pâteux très ferme (comportement quasi plastique), tandis qu'à 1, la texture est très liquide avec une large dominance d'un comportement visqueux. Pour une bonne ouvrabilité et pour faciliter le travail lors de la pose, le comportement rhéologique est de type viscoplastique dominant ; cela confère à l'enduit le maintien de l'épaisseur de la couche sous poids propre à sa consigne. A l'état frais et sous sollicitation en cisaillement simple [4], les mélanges en phase dormante sont bien représentés par le modèle d'Herschell-Bulkley. L'indice de structuration est constant ($n = 0,5$), tandis que le seuil plastique (τ_0) et la consistance (k) sont liés à la fraction volumique solide (ϕ) avec un bon ajustement, respectivement, avec le modèle Yodel, figure 1, et le modèle modifié de Krieger-Dougherty, figure 2. En fonction des besoins recherchés pour la mise en œuvre, les modèles permettent de calibrer la demande en eau. Dans tous les cas, il convient de contrôler la prise hydraulique de manière à couvrir des surfaces clés de l'édifice, typiquement en procédant au recouvrement par travée. Le recours à un retardateur de prise est nécessaire. Finalement, pour limiter le risque de percolation du mélange retenu dans le milieu poreux sous-jacent, l'application d'un voile tissé ou intissé minéral, animal ou végétal est indispensable. Un tel dispositif assure que la couche de protection est au contact du support sans y adhérer.

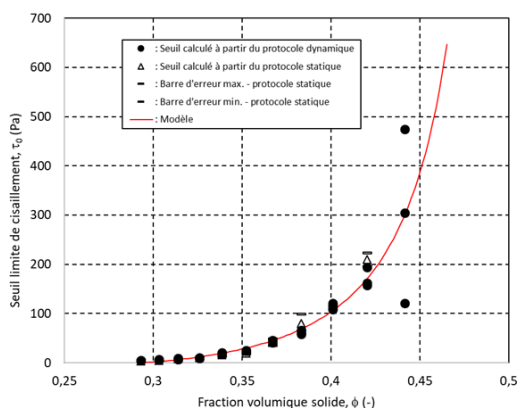


FIGURE 1. Mécanisme de structuration du seuil de cisaillement de mélanges eau-plâtre

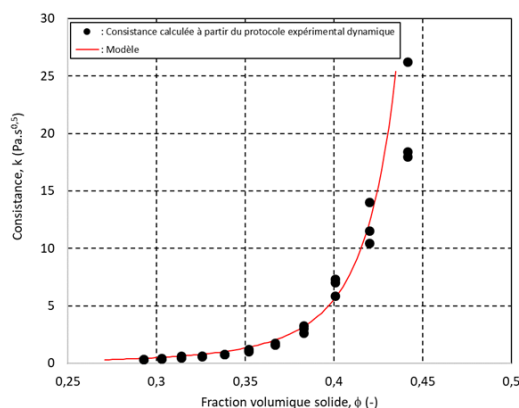


FIGURE 2. Mécanisme de structuration de la consistance de mélanges eau-plâtre

B. A l'état durci

A température ambiante, les propriétés physiques, mécaniques et d'isolation thermique sont liées fonctionnellement au rapport massique E/P. Même si un tel indicateur ne peut représenter la structure du milieu poreux, il demeure un paramètre simple qui caractérise les mélanges dès la mise en œuvre et retraduit bien les tendances de comportement. La littérature qui est consacrée à la description des propriétés des mélanges à l'état durci est conséquente et [2, 3] y consacre une bonne partie de leurs travaux.

V. COMPORTEMENT DE LA PROTECTION SOUS SOLlicitation THERMIQUE

A. A la micro échelle

Dans le domaine ouvrable d'un mélange eau-plâtre déjà énoncé, la décomposition d'un gypse de synthèse s'opère au travers de quatre changements de phase successifs, tableau 1 :

TABLEAU 1. Identification des processus de changements de phase du gypse et intégration de la décarbonatation d'environ 5% de calcite naturellement présente dans le gisement

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O} + 1,5\text{H}_2\text{O}$	Gypse \rightleftharpoons Bassanite	Equation (1)
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \gamma\text{-CaSO}_4 + 0,5\text{H}_2\text{O}$	Bassanite \rightleftharpoons AIII	Equation (2)
$\gamma\text{-CaSO}_4 \rightarrow \beta\text{-CaSO}_4$	AIII \rightarrow AII	Equation (3)
$\gamma\text{-CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{CaO}_2 + \text{CO}_2$		Equation (4)

Le principe de protection exploite la décomposition thermochimique couplée et endothermique qui conduit à la formation de l'anhydrite III, avec la perte de deux molécules d'eau de structure (Eq. 1, 2). Au-delà, une réaction exothermique se produit pour former une phase anhydre moins hydrophile (AII, Eq. 3). Enfin, les gisements de gypse naturel contiennent systématiquement une part de calcite à hauteur de 5% pour l'hémihydrate utilisé dans l'étude. La dernière décomposition thermochimique, endothermique, est représentée par la réaction de décarbonatation (Eq. 4). L'étude et la modélisation des cinétiques de décomposition sont réalisées en fonction de la température, de l'état chimique du composé considéré et du taux de chauffe [2, 3]. Une synthèse des cinétiques d'avancement de l'endommagement thermochimique est présentée sur la figure 3 en considérant des taux de chauffe compris entre 1 et 100°C/min [3]. L'influence de la température est bien représentée par la loi d'Arrhenius, tandis que le modèle de Sestak-Berggren représente bien l'effet de l'état chimique du composé. Quelques clés principales de l'évolution morphologique du système cristallin sont bien décrites dans [5].

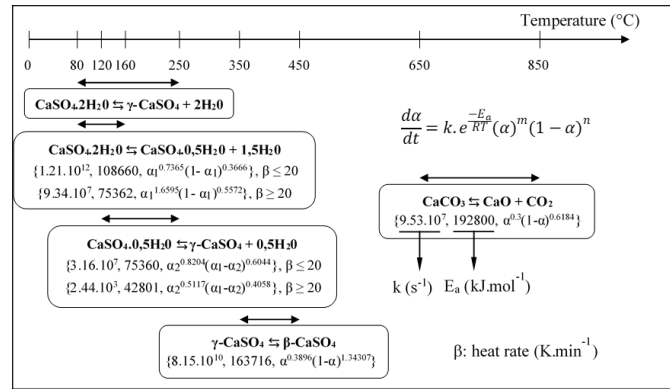


FIGURE 3. Cinétique de décomposition thermochimique des 4 composés principaux du gypse

B. A la méso échelle

A l'échelle d'un milieu poreux représentatif, la cinétique d'endommagement THCM, en condition iso-volume et quasi isotherme est bien décrite au travers de la porosité moyenne, figure 4, l'élasticité et la résistance ultime en compression, figure 5, et en traction [6, 7]. Ces travaux montrent qu'un modèle d'homogénéisation calé sur la cinétique de décomposition thermochimique permet une bonne description des propriétés moyennes. Les travaux inter-échelles montrent explicitement que l'endommagement du milieu poreux est conditionné par les cinétiques de changements de phases.

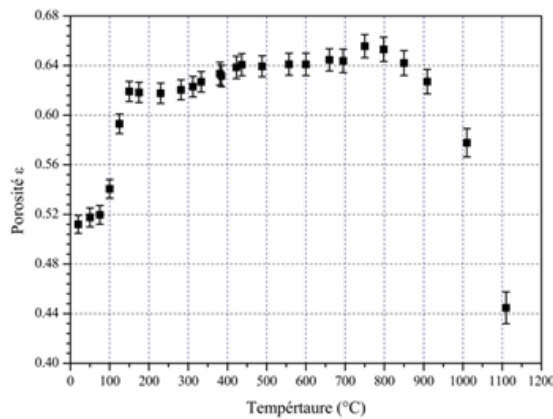


FIGURE 4. Evolution de la porosité de cylindres de plâtre pris (E/P = 0,65) soumis à une condition température isotherme et quasi-isotrope

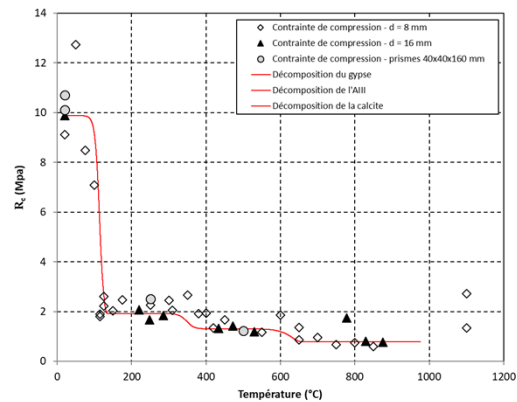


FIGURE 5. Evolution de la contrainte limite résiduelle en compression de cylindres de plâtre pris (E/P = 0,65) soumis à une condition température isotherme et quasi-isotrope

C. A la macro échelle – Résistance au feu

Le programme d'étude conduit dans un contexte THCM a pour objectif de mettre en évidence l'influence de l'épaisseur de la solution coupe-feu. Le degré coupe-feu est ici représenté (i) par la durée nécessaire pour déshydrater complètement l'épaisseur de la dalle et (ii) l'avancement de l'endommagement mécanique. Pour ce faire, le plan d'expérience implique des essais avec des dalles instrumentées de thermocouples disposés à différentes positions entre la face exposée et la

face non exposée, et des dalles non instrumentées de manière à prévenir contre un risque de promotion de rupture par la présence des thermocouples. Un tel protocole permet d'obtenir des faciès d'endommagement mécanique non biaisés. La condition de température imposée sur la face inférieure suit l'équation 5.

$$T = T_0 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) \quad (\text{Equation 5})$$

Avec T , la température imposée (°C), T_0 , la température du matériau au début de l'essai (°C) et t , le temps en min.

Ce standard représentatif d'un feu intérieur est très fortement non isotherme. Il impose un taux de chauffe supérieur à 200°C/min au début de l'essai qui se réduit ensuite au-delà d'une heure trente aux alentours de 10°C/min.

L'implantation des thermocouples permet de reconstituer le transfert thermique au sein de l'épaisseur et nous avons déjà montré dans des travaux antérieurs [2, 3, 7] que le banc d'essais utilisé simule un transfert thermique globalement 1D entre la face exposée et la face non exposée. Le transfert thermique exprimé dans un repère $T = f(t, z)$ est en bon accord avec les cartes de température 2D enregistrées à la face non exposée par imagerie infrarouge ($T = f(t, x, y, z = z_0)$). Ces deux techniques de mesures simultanées sont très complémentaires et permettent aisément d'identifier le terme de la déshydratation.

S'agissant de l'endommagement mécanique, tant que l'épaisseur des dalles reste faible, les conditions d'empêchement mécanique qu'imposent le test ne parviennent pas à s'opposer au taux de chauffe violent qu'impose le standard. Les gradients thermiques résultant conduisent à une fracturation traversante et en plusieurs morceaux. Dans ce type de configuration, la matrice minérale, au droit de la face exposée, subit dans un laps de temps court un champ de déformation dilatant (tant que l'eau de structure est présente) puis contractant en différentes étapes concomitantes avec la décomposition thermo-chimique. La déformation est de l'ordre de grandeur de 2,5% pour une température voisine de 600°C et 12% pour une température voisine de 1000°C. A l'inverse, dès lors que l'épaisseur de la dalle est importante, ce mode d'endommagement irrémédiable laisse place à un schéma d'endommagement par faïençage qui prend naissance à la face exposée par les gradients thermiques surfaciques, la rugosité de surface, la porosité de la surface, les polluants présents à la surface, ... La dimension caractéristique du motif, quand elle existe, reste en deçà de 13 mm. Il en résulte, à l'échelle des dalles étudiées, que la densité des motifs est importante. Au cours de l'essai, la combinaison du caractère contractant en condition libre du milieu poreux avec le transfert thermique permet d'expliquer l'ouverture des fissures et la propagation des pointes. La figure 6 illustre l'état fissuré d'une dalle après un essai et la position du fond des fissures. La concaténation des différentes données du plan d'expérience permet de proposer une cinétique moyenne de propagation du fond de fissure dans le contexte expérimental décrit, figure 7. Une telle cinétique peut être mise en regard de la durée de déshydratation que nous utilisons comme un indicateur « strict » de protection, figure 8. En effet, un tel point de vue implique que la température du support à protéger est voisine de 90°C. Dans un contexte normatif, le déclassement d'une solution de protection *via* un indicateur de

température correspond à un écart de température de 180°C (entre le début de l'essai et au moment du déclassement). Toutefois, une telle restriction combinée à l'état endommagé de la couche de protection est de nature à sécuriser l'indicateur du degré coupe-feu. En outre, la fragilité mécanique induite par l'état fissuré est dans le cas étudié de moindre importance puisque tant que la stabilité mécanique des voûtes n'est pas remise en cause, elle assure le maintien de la couche de protection en couverture à l'extrados des voûtes. Dans une logique d'une restauration à l'identique, les indicateurs mis en évidence jusqu'ici permettent le déploiement d'une solution technique de protection passive incendie.

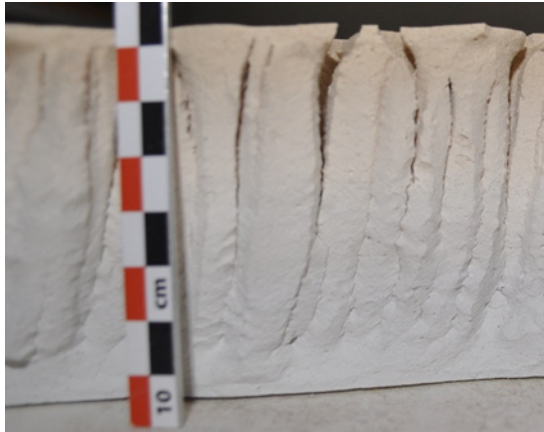


FIGURE 6. Illustration de la progression du faïencage depuis la face exposée. Cas d'une dalle de 80 mm d'épaisseur chauffée sur une face au moyen du standard ISO 834

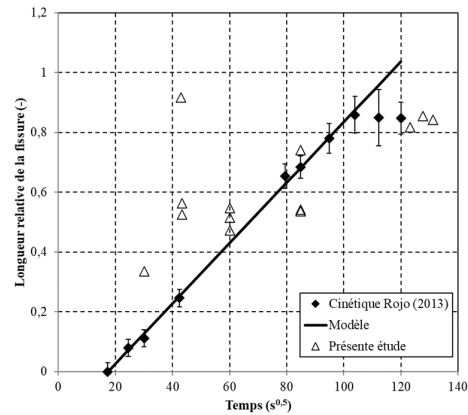


FIGURE 7. Cinétique de la longueur relative des fissures. Intégration de l'effet de l'épaisseur et du taux de gâchage

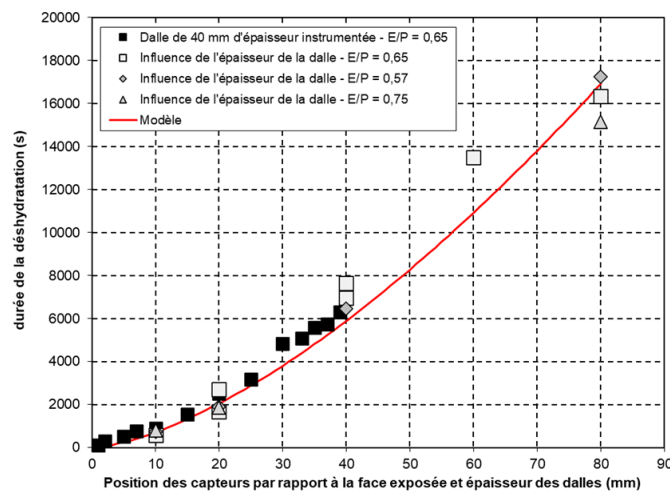


FIGURE 8. Evaluation de la durée de déshydratation de dalles de plâtre dihydraté chauffées sur une face au moyen du standard ISO834 en fonction de l'épaisseur de protection

VI. CONCLUSION

Les travaux présentés dans cet article montrent les contraintes et recommandations à intégrer dès lors qu'une protection passive incendie sur des voûtes d'édifices est projetée. Une telle décision prend tout son sens dans un contexte patrimonial dictée par une stratégie de restauration à l'identique. Les travaux présentés montrent que la fonction coupe feu est bien respectée et la durée de protection est bien reliée à l'épaisseur de la couche de protection. Face à un tel choix, il convient d'adapter l'ouvrabilité du produit frais pour matérialiser l'enduit selon l'épaisseur attendue en limitant la percolation des suspensions dans la maçonnerie et en limitant le risque d'adhésion de l'enduit. Une telle précaution permet de gérer les déformations antagonistes du gypse au cours des étapes de changements de phases et celles du calcaire qui compose les voûtes de la cathédrale Notre Dame. Le choix d'une fiabilisation du degré coupe-feu par un chargement thermique au moyen du standard ISO834 est probablement discutable, mais ce chargement thermique très fortement non isotherme, est très contraignant avec la configuration de test retenu. En effet, avec une telle configuration expérimentale le taux de chauffe au début de l'essai est supérieur à $200^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ce qui peut être assimilé à un choc thermique. En outre, les essais de résistance au feu sont menés sur des échantillons dont le rapport longueur caractéristique/épaisseur est important en imposant un "feu" par dessous. De telles conditions d'essais sont aggravantes pour le cas des voûtes de la cathédrale Notre Dame. Le plan d'expérience déployé permet de mettre en évidence les clés de « fonctionnement » de cette solution de protection passive incendie. Les travaux réalisés soulignent bien l'intérêt d'une approche multi-échelle depuis la microstructure et jusqu'à la macrostructure. La démarche montre l'impact majeur pour ce type de matrice minérale de la thermochimie dans le processus d'avancement de l'endommagement. Les travaux réalisés montrent, en outre, que la variation de la porosité induite par le mode de fabrication des dalles en modulant le taux de gâchage (E/P) a peu d'influence sur le degré de protection. En même temps et logiquement, la variation d'épaisseur des dalles est déterminante. En se basant sur le temps nécessaire pour déshydrater complètement les dalles, une relation [durée de protection ; épaisseur] est fiabilisée. L'approche développée tient compte de l'avancement de l'endommagement mécanique via la propagation du faïençage.

Les travaux menés pour ce projet montrent bien les points forts d'une telle protection, les points de vigilances à respecter comme la mise hors d'eau rapide en condition post incendie ainsi que la programmation du retrait de la couche de protection endommagée restante sur les voûtes.

Il y a lieu de terminer ce travail en distinguant sa représentativité au cas réel et outre le réalisme du feu retenu pour cette étude, on ne peut oublier que la protection est au contact du support minéral poreux à protéger, ce qui modifie le transfert thermique, mais surtout le transfert de masse. Pour ce dernier point, l'approche est probablement favorable car la diffusion du champ de vapeur vers l'interface protection-support devrait être contraint par rapport au cas testé en condition laboratoire. Comme le choix de l'indicateur de température "strict" retenu, cette condition est de nature à sécuriser l'action de la protection. Par ailleurs, les travaux déjà réalisés sur le risque de contamination du support par le transfert d'une solution ionique avec le transfert de masse semble négligeable [8]. Enfin, dans le cas de l'incendie de la cathédrale Notre Dame, la durée de l'incendie est de l'ordre d'une quinzaine d'heure. Dans une logique de restauration à l'identique, le choix d'une solution de protection à base de plâtre est le fruit de compromis ; qui s'inscrit dans un scénario plus global de la stratégie de protection de l'édifice. Le temps de protection offert par cette couche sacrificielle est dans tout les cas un gain pour protéger les

structures, les biens et surtout les personnes et les professionnels du feu dont l'intervention est indispensable dès lors que l'incendie est difficilement maîtrisable et se généralise.

VII. REFERENCES

- [1] J. Ducasse-Lapeyrusse, V. Verges-Belmin. (2020). Cathédrale Notre-Dame. Transept nord, croisée du transept. Identification et caractérisation des mortiers. *Rapport LRMH n°1K*.
- [2] K.S. Nguyen. (2009). Comportement thermo-chimique de matériaux minéraux : Application à la protection incendie. *Thèse de doctorat, Rennes, INSA*.
- [3] A. Rojo. (2013). Etude de la structuration et du comportement de matériaux à base de gypse sous condition incendie. *Thèse de doctorat, Rennes, INSA*.
- [4] J. Robin-Dupire. (2023). Étude des matériaux de comblement des lacunes en conservation-restauration d'artefacts muséaux en plâtre - Statuaire de la gypsothèque et collection des cadres du XIX^e siècle du musée du Louvre. *Thèse de doctorat, CY Cergy Paris Université*.
- [5] Y. Mélinge, K.S. Nguyen, C. Daiguebonne, O. Guillou, S. Freslon, C. Lanos. (2011). One Dimensional Time Study of the Dehydration of Plasterboards Under Standard Fire Condition (ISO 834): Thermo Chemical Analysis. *Journal of Fire Sciences, Volume 29 Issue 4, pp. 299 – 316*.
- [6] A. Rojo, Mélinge Y., Guillou O. (2013). Kinetics of internal structure evolution in gypsum board exposed to standard fire. *Journal of Fire Sciences, 31(5), pp 395-409*.
- [7] E. Huby, A. Rojo, D. Giovannacci, J-D. Mertz, S. Logel, Y. Mélinge. (2024). Etude de quelques propriétés d'une protection passive incendie à base de plâtre hydraté – De l'état liquide à l'état solide, pour une prédiction de l'endommagement en condition incendie - Chapitre III : Cinétique Thermique, Hydrique, Chimique et Mécanique (THCM) de mélanges de plâtre pris - Cathédrale Notre-Dame de Paris. *Rapport LRMH*.
- [8] E. Huby, J. Henin, D. Giovannacci, J-D. Mertz, Y. Mélinge. (2023). Risque de transfert sulfaté induit par déshydratation d'une protection passive à base de plâtre en condition type incendie, 41^{ème} rencontres annuelles de l'AUGC, 2023