
Apport des propriétés de transfert thermique sur la connaissance de l'état de dégradation de la pierre.

E. Ezzdine*– S.Yotte* –P. Malaurent* –D. Breysse*

** Université Bordeaux 1, Centre de recherche de Recherche et Développement des Géosciences Appliquées, avenue des facultés, domaine universitaire, 33405 Talence cedex*

r.ezzdine@cdga.u-bordeaux1.fr, s.yotte@cdga.u-bordeaux1.fr, p.malaurent@cdga.u-bordeaux1.fr, d.breysse@cdga.u-bordeaux1.fr,

RÉSUMÉ: Dans cet article on s'intéresse à l'étude expérimentale et numérique du comportement d'un bâtiment de la citadelle de Blaye. Une étude expérimentale est menée pour identifier les conditions environnementales auxquelles le bâtiment est soumis (température, humidité, vent). Une description du dispositif expérimental et des mesures réalisées est faite. L'étude théorique sert à déterminer la variation de la diffusivité thermique dans le mur pour donner une idée de son état d'altération. Le problème numérique consiste à résoudre l'équation de diffusion en régime transitoire.

ABSTRACT: In this article, we will describe the experimental and the theoretical study done to in order to have a better knowledge about the state of damage of a building of the Citadel of Blaye. The experimental study aims to identify the influent environmental conditions (temperature, humidity, wind) of the building. We will detail the experimental material and the measurements that we have done. The theoretical study will help us to determine the evolution of the thermal diffusivity of the material in order to give an indication of its damage. The numerical problem consists of the resolution of the equation of the heat diffusion in the case of unsteady state

MOTS CLÉS : pierre, environnement, dégradation, comportement thermique, diffusivité thermique.

KEYWORDS: stone, environment, degradation, thermal behaviour, thermal diffusivity.

1. Introduction

Comme tout matériau naturel, la pierre monumentale subit au fil du temps des mécanismes physico-chimiques générant des altérations. L'épiderme des monuments est détruite par des altérages (microclimat, pollution,...), la nature des altérations résultantes dépend des propriétés des matériaux, de leur morphologie, et de leur structure poreuse, etc. A terme, ces altérations affectent la structure portante et sa stabilité (ruptures, fissurations, ...).

Dans le cadre de l'étude d'une partie de la porte de Liverneuf (forteresse de Blaye sur la Gironde voir figure 1), on s'intéresse à la cinétique de dégradation de la pierre. L'enjeu est de quantifier l'endommagement actuel de la maçonnerie résultant principalement de la dissolution progressive de la calcite dans des conditions environnementales agressives (le bâtiment est situé sur la Gironde). Pour cela, une stratégie d'investigation est mise au point s'appuyant d'une part sur une étude expérimentale et d'autre part sur une étude numérique.



Figure 1. La porte de Liverneuf de la citadelle de Blaye.

L'étude expérimentale vise à évaluer l'état actuel de la pierre à l'aide des tests non destructifs (RADAR, scléromètre,...). Pour compléter cette approche, des mesures de températures et d'humidité sont effectuées à l'extérieur, à l'intérieur et dans le mur. Ces mesures sont utilisées pour identifier à la fois les conditions environnementales favorisant l'altération de la pierre (température, humidité, vent,...) et l'état de dégradation de la pierre moyennant le calcul des transferts thermiques dans l'enveloppe du bâtiment. On s'intéresse dans cet article surtout à ce dernier point, et à la méthodologie proposée pour atteindre ce but et que nous détaillons dans la suite. Nous exposons ensuite le dispositif expérimental et les mesures réalisés, et dans la dernière partie, nous montrons la méthode numérique adoptée pour résoudre l'équation de diffusion thermique et les résultats obtenus.

2. Méthodologie

Le but de cette étude est d'avoir un outil qui nous aide à identifier l'état de dégradation de la pierre. Pour cela, il nous faut un paramètre qui soit à la fois identifiable (ou calculable) à l'aide des mesures expérimentales et un indicateur de l'état actuel du matériau endommagé. Nous nous intéressons aux différents paramètres qui contrôlent le comportement thermique du matériau et plus précisément à sa diffusivité thermique.

En effet, le principal processus de dégradation de la pierre et du joint est un lent mécanisme de dissolution-précipitation de la calcite dû à son exposition à l'eau agressive, le vecteur principal de la contamination de l'environnement. La décalcification modifie au cours du temps la microstructure du matériau en augmentant le volume des vides, donc en réduisant sa diffusivité thermique lorsqu'il est sec (plus de cavités vides donc matériau plus isolant). La diffusivité peut être alors un indicateur de l'état de dégradation de la pierre, et elle peut de plus nous renseigner sur la profondeur de cette dégradation dans la pierre ou dans le mur en général.

D'autre part, il est possible de déterminer la diffusivité à l'aide de l'équation de diffusion thermique et en utilisant une méthode numérique appropriée pour la résoudre. Pour cela, il nous faut d'une part les mesures des températures de l'air et des surfaces à l'intérieur et à l'extérieur, pour expliquer ce qui se passe de part et d'autre du mur et donc pour avoir les conditions au limite pour notre modèle, et d'autre part celles de la température dans le mur pour surveiller les transferts thermiques dans le mur et donc la variation de la diffusivité en fonction de la profondeur. En raison de la faible épaisseur des murs de notre bâtiment (24 cm pour le mur nord-est, notre mur témoin), nous avons choisi de mesurer trois valeurs de température dans le mur pour avoir un suivi de son évolution.

3. Etude expérimentale.

3.1. Description des mesures et du matériel expérimental

Les mesures expérimentales visent à identifier à la fois les conditions environnementales dans lesquels le bâtiment se trouve et qui favorisent son altération dans le temps et les paramètres nécessaires pour résoudre le problème numérique expliqué au paragraphe précédent. Trois types de mesures sont alors

effectués: mesures météorologiques classiques, mesures thermiques, et mesures hydriques.

Les mesures météorologiques servent à identifier les différentes conditions microclimatiques (direction et vitesse du vent très près du mur, pression atmosphérique, humidité relative à l'extérieur du bâtiment). Ces paramètres sont mesurés par une mini station climatique type VAISALA.

Les mesures thermiques sont constituées de : la température de surface intérieure et extérieure du mur, la température extérieure et intérieure de l'air, ainsi que le flux thermique. De même, on mesure la température dans une pierre et dans un joint à trois profondeurs différentes. Les températures sont mesurées à l'aide de capteurs à résistance (Pt100) dont les caractéristiques sont données par le tableau.

Les mesures hydriques nous aideront à suivre l'évolution des flux hydriques dans le mur. On mesure l'humidité relative à l'intérieur du bâtiment à l'aide d'une sonde capacitive.

	Plage	Résolution	Précision
Température de surface	-52 à 60 °C	0,1 °C	±0,3 °C
Température dans le mur	-52 à 60 °C	0,01 °C	±0,03 °C

Tableau 1. Les caractéristiques des capteurs de température utilisés.

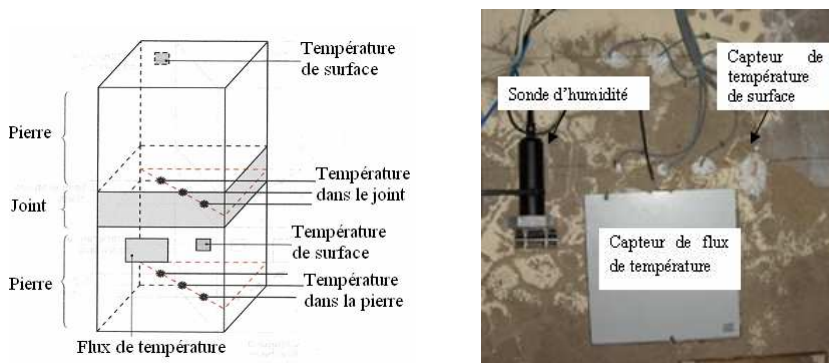


Figure 2. Dispositif expérimental

3.2. Les mesures

Les mesures de température doivent nous permettre d'évaluer les transferts thermiques dans le mur. Pour cela, nous devons avoir un bon suivi de l'évolution de

Apport des propriétés de transfert thermique sur la connaissance de l'état de dégradation de la pierre. 5

la température au cours de la journée, d'où le choix du pas de mesures de 10 minutes.

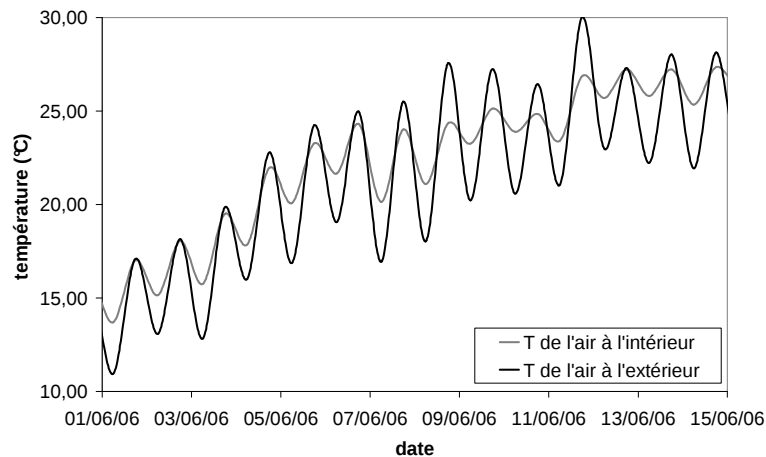


Figure 3. Variation des températures intérieure et extérieure (moyennes tous les 12h).

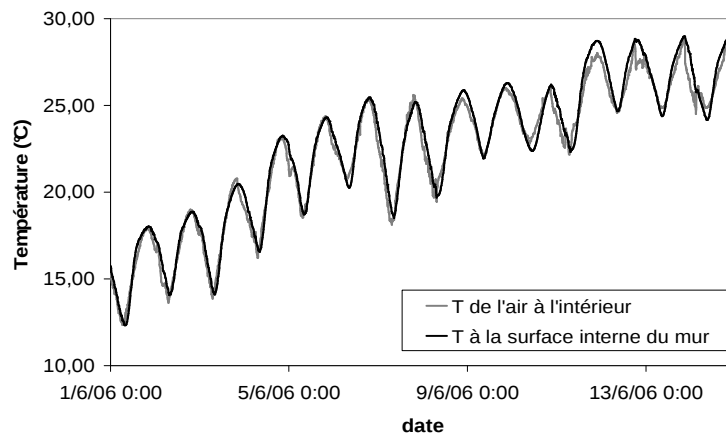


Figure 4. Variation de température à l'intérieur et à la surface interne du mur (tous les 10 min).

La température intérieure moyenne est voisine de celle de la température extérieure moyenne (Figure 3). Par contre, La température instantanée de l'air à l'intérieur est pratiquement égale à celle de la surface intérieure du mur témoin (Figure 4). En effet, L'intérieur du bâtiment étudié est un espace pratiquement clos : seuls deux petites ouvertures laissent passer des courants d'air. C'est essentiellement par ces ouvertures que les échanges thermiques avec l'extérieur se font. La

température dans ce volume a alors tendance à s'homogénéiser par rayonnement (comportement de corps noir) et par convection. C'est la température de l'air interne qui impose la température à la surface interne du mur.

3.3. Le profil de température dans le mur. Interprétation

La figure 5 montre l'évolution du profil de température dans le mur pour une journée représentative du mois de janvier et du mois de juillet 2006 constituée à partir des moyennes calculées pour les valeurs de température au même instant de la journée tout au long du mois. On remarque que :

- La variation de la température de la surface intérieure est faible tout au long de la journée. Elle ne dépasse pas les 1.2 °C.
- La variation de la température de la surface extérieure du mur est plus forte, elle peut atteindre en moyenne plus de 4 °C pour le mois de janvier et plus de 10 °C pour le mois de juillet.

Ceci montre que le mur est soumis à la superposition des deux flux de chaleur, l'un provenant de l'extérieur et qui expose la surface à des fortes évolutions journalières, et l'autre de l'intérieur où la température est peu évolutive.

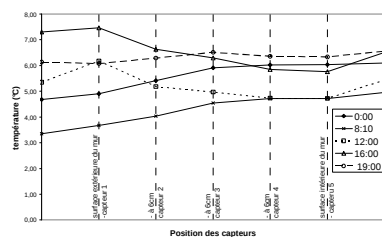


Figure 5a.

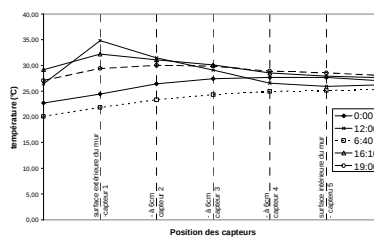


Figure 5b.

Figure 5. Profil de température dans le mur pour un jour représentatif du mois de janvier (5a) et du mois de juillet 2006 (5b).

Dans le mur, le profil de température est linéaire lorsque la température de la surface extérieure est proche de celle de la surface intérieure (courbe à 19:00). Par contre lorsque la différence entre ces deux températures devient plus accentuée, le gradient de température dans le mur devient plus élevé. Dans ce cas, le profil se déforme, présentant un maximum à la surface extérieure ou à la surface intérieure. Ce maximum se propage en s'atténuant du point le plus chaud vers le point le plus froid. La variation de la température dans le mur est liée à son inertie thermique qui dépend des constantes physiques du matériau et notamment de sa diffusivité notée a .

La forme du profil de répartition des températures dans le mur dépend de la diffusivité thermique à l'intérieur de la pierre. Pour le calcul thermique, on divise le mur en quatre couches supposées homogènes. Chaque couche correspond à l'espace compris entre deux capteurs thermiques consécutifs. Plus le matériau est poreux (donc plus dégradé), plus la diffusivité thermique est faible (matériau plus isolant) et plus la perte de température sera importante.

4. Etude théorique

4.1. Le problème numérique

Le but de l'étude numérique est d'identifier comment varie la diffusivité thermique de la pierre en fonction de sa profondeur dans le but de donner un indicateur sur son état d'altération. On se situe dans le cas d'un problème monodimensionnel de diffusion conductif en régime transitoire. L'équation de la chaleur décrit le comportement de la température $\theta(t,x)$ dans un matériau homogène :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$$

a étant la diffusivité thermique du matériau. On résout l'équation par une méthode de différences finies pour entre chaque intervalle de temps (le temps entre deux mesures consécutives). Le calcul se fait en plusieurs étapes. Une première étape pour déterminer la valeur de la température en supposant la diffusivité constante. A partir de ces valeurs et d'une façon itérative, on détermine la diffusivité de chaque couche de façon à minimiser l'écart entre les valeurs calculées et les valeurs expérimentales de la température.

5. Conditions aux limites et conditions initiales

Pour discrétiser le problème, on divise l'intervalle $[0, 24 \text{ cm}]$ en n intervalles de longueur Δx , et l'intervalle de $[T1, T2]$ en m intervalles de temps Δt , $T1$ et $T2$ étant les instants pour lesquels se font les enregistrements des mesures expérimentales. Les conditions aux limites sont de type Dirichlet : $\theta(x=0)=f(t)$ et $\theta(x=24 \text{ cm})=g(t)$, f et g décrivent l'évolution, supposée linéaire, de la température en fonction du temps. Les conditions initiales sont données par les mesures de température à l'instant $T1$ à $x=0$. Notons que le choix de Δx et Δt doit être fait de façon à vérifier toujours la condition de stabilité du calcul numérique :

$$\frac{(\Delta x)^2}{a \cdot \Delta t} > 2$$

5.1. Résultats

On montre dans la figure 6 les résultats obtenus par le calcul numérique des valeurs de la diffusivité thermique pendant le mois de juillet 2006. On remarque une variation journalière des valeurs de la diffusivité avec un décalage pour celles des deux couches extérieures avec un minimum entre 11h et midi. On peut penser que les deux facteurs influents sont la teneur en eau de la pierre et son altération. La diffusivité augmente avec la teneur en eau alors que le résultat montre une croissance de la diffusivité dans l'après midi alors que la pierre devrait sécher.

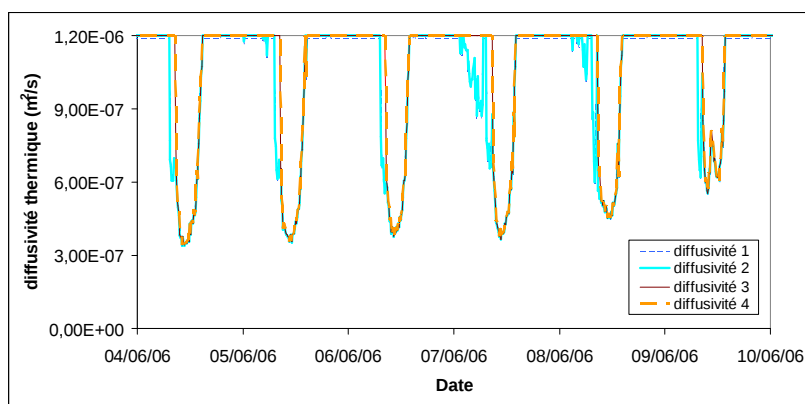


Figure 6. Valeurs calculées des différentes diffusivités : diffusivité 1 est celle de la couche extérieure, diffusivité 4 est celle de la couche intérieure.

6. Conclusion

Nous avons décrit dans cet article l'étude expérimentale réalisée sur la porte de Liverneuf de la citadelle de Blaye. A partir des mesures obtenues, on a montré comment la température évolue sur la surface et à l'intérieur de la pierre au cours de la journée. Une étude numérique est faite pour calculer les valeurs de la diffusivité thermique en fonction de la profondeur dans la pierre. Les résultats obtenus montrent une périodicité journalière de la diffusivité. Cette variation contredit les hypothèses posées au départ concernant ce paramètre. Par la suite, ce point là sera plus approfondi.

7. Bibliographie

Spiteri P., « Méthodes des différences finies pour les EDP d'évolution », *Techniques de l'ingénieur, Traité Sciences fondamentales*, vol.3, Réf AF 501.