
Utilisation de la colorimétrie pour le diagnostic post-incendie de pierres calcaires. Application au château de Chambord

Sarah Janvier-Badosa¹, Kévin Beck², Xavier Brunetaud³, Akos Török⁴, Muzahim Al-Mukhtar⁵

¹Univ. Orléans, INSA-CVL, PRISME - EA4229, 8 rue Léonard de Vinci, F-45072, Orléans, France : sarah.janvier@univ-orleans.fr

²Univ. Orléans, INSA-CVL, PRISME - EA4229, 8 rue Léonard de Vinci, F-45072, Orléans, France : kevin.beck@univ-orleans.fr

³Univ. Orléans, INSA-CVL, PRISME - EA4229, 8 rue Léonard de Vinci, F-45072, Orléans, France : xavier.brunetaud@univ-orleans.fr

⁴Budapest University of Technology and Economics, Department of Construction Materials and Engineering Geology, Budapest, Hungary : torokakos@mail.bme.hu

⁵Univ. Orléans, INSA-CVL, PRISME - EA4229, 8 rue Léonard de Vinci, F-45072, Orléans, France : muzahim.al-mukhtar@univ-orleans.fr

RÉSUMÉ. Durant un incendie, les matériaux du patrimoine bâti sont soumis à de fortes montées en température, entraînant des modifications irréversibles de leurs propriétés mécaniques et esthétiques. Dans cet article, une méthodologie in situ est proposée afin d'évaluer l'état de dégradation des pierres soumises à un incendie, en utilisant leur changement de couleur. La colorimétrie est une méthode non-destructive et indirecte pour le diagnostic post-incendie. Le principe de la méthode est de comparer la couleur de la pierre d'un monument ayant subi un incendie avec le même matériau soumis à des élévations en température au laboratoire, et pour lequel la relation entre la couleur et les propriétés mécaniques a pu être établie. Cette étude a été menée sur du tuffeau, un calcaire largement utilisé dans les édifices de la vallée de la Loire. Des essais en laboratoire ont été effectués sur des échantillons de tuffeau chauffés à des températures allant de 100 °C à 900 °C. Les mesures colorimétriques ont été couplées à des mesures de vitesse du son. La validation de cette méthode de diagnostic par colorimétrie a été réalisée sur des pierres endommagées par le feu lors d'un incendie survenu au château de Chambord.

ABSTRACT. Building materials are subjected to high temperatures during fires and this can cause changes in their structural and aesthetic properties. In this paper, an in situ methodology is proposed to assess the state of degradation of stone materials subjected to fire by using their colour changes. Colorimetry is a non-destructive and indirect method for post-fire diagnosis. The principle of the method is to compare the colour of the stone of a monument having undergone a fire and the same material subjected to high temperatures in the laboratory for which the relationship between colour and mechanical properties can be established. The present study was conducted on tuffeau, a limestone used in the Loire Valley. Laboratory tests were performed on stone samples heated at different temperatures, from 100°C to 900°C. Colorimetry measurement was coupled with P-wave velocity measurements. The validation of the colorimetric method of diagnosis was made on stones in a part of the castle of Chambord damaged by fire.

MOTS-CLÉS : Colorimétrie, Analyse non-destructive, Diagnostic post-incendie, Pierre calcaire, Hautes températures.

KEY WORDS: Colorimetry, Non-destructive testing, Post-fire diagnosis, Limestone, High temperatures

1. Introduction

Lors d'un incendie dans un monument historique, les matériaux de construction subissent des dommages variables. Certains sont complètement détruits et doivent être remplacés, d'autres ont subi de profondes transformations, qui peuvent avoir ou non un impact sur la durabilité du monument à plus ou moins long terme. L'éventualité de leur remplacement devra alors être étudiée avec soin. Certaines pierres peuvent paraître visuellement en bon état, mais leurs propriétés ont été significativement altérées, d'autres peuvent présenter des modifications chromatiques, et donc esthétiques, très importantes, sans que leur durabilité soit affectée. De plus, la mission du conservateur-restaurateur, est de préserver l'authenticité de l'édifice, en limitant les opérations de restauration à leur strict minimum, dans la mesure où la pérennité de l'édifice et la sécurité des visiteurs sont préservées [CHA 64]. Il est donc intéressant de pouvoir bénéficier d'une méthode de diagnostic in situ, non destructive, permettant de caractériser le niveau d'endommagement des pierres encore en œuvre, afin d'identifier celles qui devront être remplacées en priorité.

La plupart des études sur la durabilité des matériaux de construction face à l'incendie concernent le béton œuvre [SAV 05] [CRE 13]. Certaines études s'intéressent aux modifications des propriétés des pierres en fonction de l'élévation de température [HAJ 04] [TOR 05] [FRA 13] [OZG 13], mais ce sont des études menées en laboratoire, qui nécessitent des prélèvements afin de caractériser l'endommagement. Aucune étude ne s'intéresse à des méthodes de diagnostic non destructif et in situ. Une des modifications principales du matériau témoignant d'une élévation en température, est le changement de couleur. La colorimétrie, habituellement utilisée pour d'autres problématiques de conservation-restauration du patrimoine bâti [DUR 95] [CAR 10] [RIV 11] est donc apparue comme une méthode possiblement intéressante pour réaliser ce diagnostic. Cette démarche a aussi été testée dans le cas du béton [CAR 13]. L'article présenté ici se propose d'évaluer le potentiel de l'utilisation de la colorimétrie, ses avantages et ses limites, à la fois en laboratoire et sur site, comme outil de diagnostic post-incendie in-situ simple et fiable.

L'étude a été menée sur une pierre fréquemment utilisée dans la vallée de la Loire : le tuffeau. La méthode consiste donc à mesurer la teinte de la pierre soumise à une exposition à de fortes températures en laboratoire et de corrélérer ces changements de teintes avec la modification des propriétés mécaniques par la mesure de la vitesse du son, méthode de contrôle non-destructif couramment utilisé témoignant de l'endommagement du matériau. Une fois la « courbe d'étalonnage colorimétrique » réalisée au préalable en laboratoire, des mesures de colorimétrie ont été faites sur un monument incendié construit en tuffeau, un des combles du donjon du château de Chambord, afin de vérifier s'il est possible de déterminer leur état d'altération.

2. Matériel et méthodes

2.1. La pierre étudiée : le Tuffeau

La pierre de construction principale du château de Chambord est le tuffeau. Cette pierre calcaire est utilisée dans la construction de nombreux monuments historiques du Val de Loire. C'est un calcaire siliceux blanc à beige clair, à grains fins, formé au Turonien Moyen (Crétacé Supérieur), il y a environ 90 millions d'années. C'est une pierre tendre et légère. En effet, elle a une densité apparente de 1,3 avec une porosité totale d'environ 45% et une gamme de taille de pores très étendue (diamètre d'accès aux pores de 0,003 μm à 20 μm [DES 97] [RAU 01] [BEC 03]. Pour cette étude, du tuffeau blanc a été utilisé, provenant de la carrière souterraine d'Usseau.

Les principales caractéristiques du tuffeau blanc sont données dans le tableau 1. Les principales phases cristallines sont la calcite CaCO_3 et la silice SiO_2 , qui cristallise sous deux formes, le quartz et l'opale cristobalite-tridymite. Le tuffeau blanc contient également de petites quantités de micas et de minéraux argileux (biotite, muscovite, smectite et glauconite). La glauconite est une argile verte qui entraîne une coloration gris-vert de la pierre lorsque celle-ci est humide. La taille et la forme des grains constitutifs de la pierre sont variées. De gros grains de quartz, de glauconite, de calcite sparitique ou de micas sont juxtaposés avec différents types de grains fins comme la calcite micritique et les spérules d'opale cristobalite-tridymite, dont le diamètre régulier est autour de 10 μm [BEC 03].

Tableau 1. Principales propriétés du tuffeau.

Composition minéralogique	Densité réelle (g/cm ³)	Densité apparente (g/cm ³)	Porosité (%)	Vitesse du son (m/s)
Calcite : \cong 50%, Quartz : \cong 10%, Opale CT : \cong 30%, Minéraux argileux & Mica : \cong 10%	2.5 \pm 0.1	1.3 \pm 0.2	45 \pm 5	1640 \pm 78

2.2. Le protocole de chauffe

Les pierres ont été soumises à un protocole d'exposition à de hautes températures selon neuf températures différentes : 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C, 800°C, et 900°C. La température de 100°C est estimée comme étant l'état de référence, car l'échantillon est considéré comme sec sans que la température ne dégrade le matériau. La montée en température se fait dans un four Carbolite ELF 11/6B, avec une vitesse de chauffe de 2°C/min et un palier de 3h quand la température maximale est atteinte. Les échantillons sont ensuite placés dans une pièce à température ambiante afin de refroidir naturellement et lentement. Quatre échantillons cubiques (50x50x50 cm) ont été préparés pour chaque température. Les conditions de test ne reflètent pas la réalité du processus de chauffe qui a lieu lors d'un incendie où la montée en température peut être grande. La rampe de montée en température est faible afin d'éviter de superposer des effets de chocs thermiques sur le matériau. En revanche, cette méthodologie permet de comparer les modifications de couleur et de propriétés qui ont lieu dans la pierre de manière homogène à chacune des températures appliquées. Tous les détails de la procédure en laboratoire sont présentés dans l'article [BEC 15].

3. Résultats et discussions

3.1. Les changements de couleur : observations et mesures colorimétriques

Les mesures colorimétriques ont été effectuées par spectrométrie d'absorption en réflexion diffuse. Après une analyse d'une surface de référence de blanc (oxyde de magnésium), la calibration de la longueur d'onde a été réalisée avec un échantillon d'oxyde d'erbium. Le résultat de l'analyse des échantillons de pierre est un spectre d'absorption, situé dans le domaine visible. À ce spectre correspondent les coordonnées chromatiques utilisées dans cet article : la coordonnée a* repose sur l'axe rouge-vert, les valeurs positives représentant la composante rouge et les valeurs négatives la composante verte en passant par le gris pour les valeurs proches de zéro. La coordonnée b* repose de la même manière sur l'axe jaune-bleu. Enfin, la coordonnée L* indique la clarté, comprise entre 0 (noir) et 100 (blanc) [BEC 15]. Cinq mesures ont été effectuées sur chaque échantillon, c'est-à-dire 20 mesures pour chaque température. Les points de mesure ont été choisis au hasard sur la surface des échantillons. La moyenne et l'écart-type des coordonnées des vingt points ont été utilisés pour illustrer les résultats présentés dans le présent document. Les couleurs des échantillons après exposition à des températures différentes sont présentées visuellement et qualitativement sur la figure 1, et quantitativement par des mesures colorimétriques dans le tableau 2.

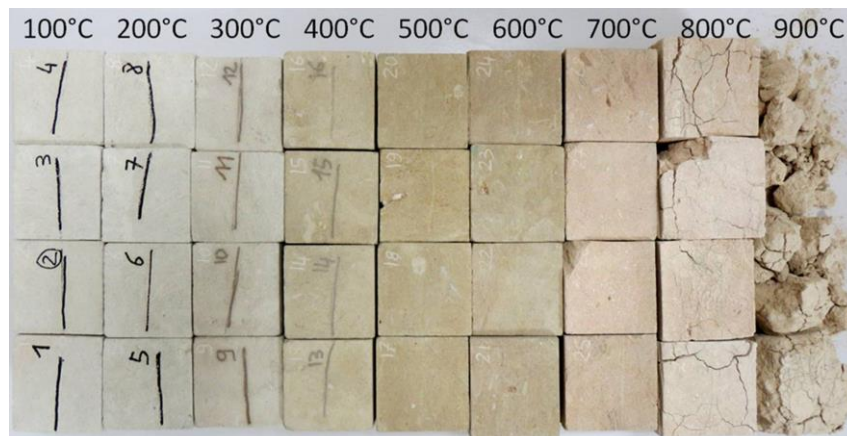


Figure 1. Couleur des échantillons après exposition à différentes températures.

Tableau 2. Résultats des mesures colorimétriques (coordonnées L^* , a^* , b^*) sur le tuffeau après exposition à différentes températures du protocole de chauffe.

	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C	900°C
L*	86.5 ±1.3	85.3 ±1.7	83.0 ±1.3	78.8 ±3.0	72.9 ±1.3	71.2 ±1.59	75.3 ±2.4	80.3 ±3.1	84.2 ±2.2
a*	-1.0 ±0.2	-1.1 ±0.2	-0.1 ±0.2	1.3 ±0.4	2.2 ±0.3	2.2 ±0.3	2.9 ±0.5	3.2 ±0.5	-0.3 ±0.4
b*	7.9 ±0.9	9.0 ±0.5	10.4 ±0.5	12.7 ±1.0	16.3 ±0.7	15.2 ±0.6	14.0 ±1.0	12.8 ±1.0	14.4 ±1.1

On observe un changement progressif de la couleur de la pierre avec la température, notamment un changement significatif de couleur à partir de 400°C, lié à un brunissement global de la pierre. La coordonnée a^* augmente progressivement vers le rouge jusqu'à 800°C, et diminue fortement à 900°C. La coordonnée L^* diminue progressivement jusqu'à 600°C (brunissement), puis augmente à partir de 700°C (éclaircissement). Ce brunissement progressif a été suivi d'un changement brusque autour de 700°C, où la pierre est devenue plus rose et plus claire (Figure 1). Ce changement de couleur peut être expliqué par la transformation des grains de glauconite avec la température. Ils sont responsables de la couleur légèrement verdâtre typique du tuffeau. À partir de 400°C, les grains verts de glauconite deviennent orange, puis complètement brun à 900°C [TOR 05]. Autour de 700°C-800°C, la calcite commence à se décomposer en chaux, de couleur blanche, et la couleur rose devient alors dominante sur les échantillons. Une fois que toute la calcite est convertie en chaux vive, la pierre devient très sensible à l'humidité, et la réaction d'hydratation de la chaux vive provoque une fissuration importante de la pierre en quelques jours.

3.2. Les modifications de vitesse du son

Les mesures de la vitesse du son ont été effectuées à température ambiante au laboratoire, sur les mêmes échantillons avant et après le protocole de chauffe pour chaque température maximale (Figure 2). Ces mesures mettent en évidence les dommages subis par l'échantillon et notamment une perte des propriétés mécaniques.

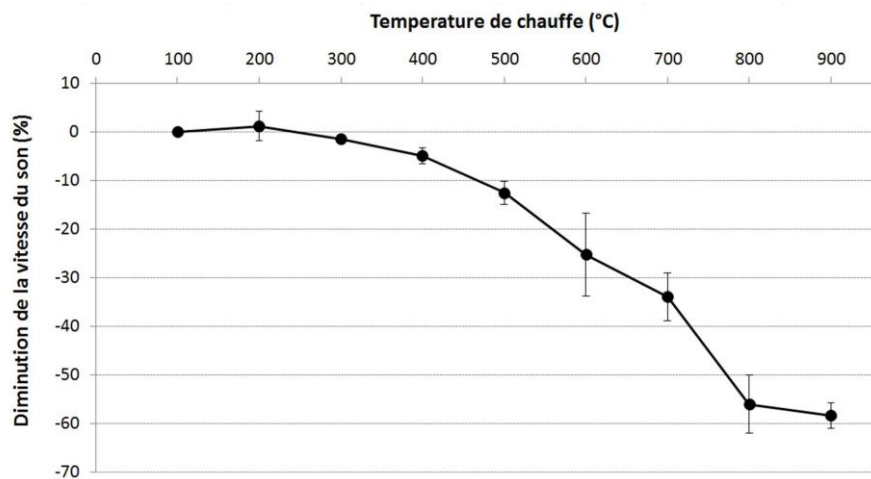


Figure 2. Modifications de la vitesse du son dans les échantillons de tuffeau en fonction de la température maximale appliquée.

Avant que les échantillons ne soient chauffés, les mesures de vitesse du son étaient cohérentes d'un échantillon à l'autre, avec une valeur d'environ 1640 m/s. Jusqu'à 300°C, la vitesse du son dans les échantillons ayant été chauffés est similaire à celle des échantillons de référence. Les mesures colorimétriques ont également été comparables jusqu'à 300°C. En revanche, à partir de 400°C, la vitesse du son diminue progressivement avec la température, montrant une dégradation progressive des propriétés élastiques du matériau avec une perte d'environ 60% à 800°C en raison de l'apparition de micro-fissures. À partir de 400°C, les données

colorimétriques ont également changé avec la température, puisque l'on observe une augmentation progressive de la coordonnée a^* et une diminution progressive de la coordonnée L^* , provoquant le brunissement et l'assombrissement de la pierre. À partir de 800°C, le lien entre la vitesse du son et les mesures colorimétriques est complètement inversé en raison de la réaction de décarbonatation de la calcite qui a conduit à un éclaircissement de la teinte et une dégradation visible et importante de la pierre.

Au cours du diagnostic d'un monument, si une pierre de tuffeau ne semble pas avoir subi de changements de couleur après un incendie, on peut penser que la température de surface n'a pas dépassé 300°C, et donc que la pierre n'a pas besoin d'être remplacée. En effet, les résultats des tests menés en laboratoire ont montré que les changements de couleurs, ainsi que des modifications de propriétés mécaniques, semblent négligeables jusqu'à 300°C. À l'inverse, les pierres ayant subi un chauffage à plus de 800°C seront irrémédiablement endommagées et devront donc être remplacées. Pour le tuffeau, c'est justement à des températures comprises entre 300°C et 800°C, que le diagnostic non-destructif est le plus intéressant et important pour définir une stratégie de restauration. L'estimation du degré d'altération d'une pierre après un incendie serait possible en utilisant la colorimétrie comme test non-destructif pour le diagnostic post-incendie, car les résultats sont bien corrélés à la diminution de la vitesse du son, symptomatique d'un endommagement de la pierre. Cependant, cette technique nécessite à la fois de connaître la couleur initiale de la pierre, et l'évolution de sa couleur avec la température.

4. Validation *in situ* de la méthodologie

Le château de Chambord, construit par François I^{er} au début du XVI^{ème} siècle, est le plus vaste des châteaux de la Loire, en France. Le grand domaine qui l'entoure est un parc de 5525 hectares fermé par 32 kilomètres de murs prévus dès l'origine de la construction du château. À l'intérieur de ce domaine se trouvent également les dépendances du château et les habitations du seul village de France qui appartient entièrement à l'Etat. Le château a été construit le long du Cosson, affluent indirect de la Loire, canalisé aux alentours du château.

Le château de Chambord est constitué d'un donjon de plan carré de 44 mètres de côté, cantonné de quatre tours rondes de 20 mètres de diamètre. Dans la continuité de la construction du donjon, une des façades est prolongée de deux ailes latérales qui se rejoignent ensuite pour former une enceinte (large de 135 mètres sur 85 en extérieur), elle aussi cantonnée de quatre tours rondes. Les tours sont orientées selon les quatre points cardinaux. Le donjon et les parties au Nord sont élevés sur trois niveaux, alors que les murs d'enceinte et les deux tours au Sud et à l'Est sont aujourd'hui limités à un seul niveau, parfois divisé en entresols.

La tour Sud du donjon, dite tour Henri V, et le canton attenant, ont subi un important incendie le 6 juillet 1945 qui a ravagé entièrement la charpente et la toiture. Après l'incendie, il ne restait que les cheminées et les murs en pierre. Durant les travaux de restauration, une grande partie des matériaux a été remplacée. Les charpentes ont été refaites en bois et en béton armé. La toiture a été reconstruite et l'essentiel des pierres a été remplacées. Mais il existe encore des pierres ayant subi cet incendie et qui sont encore en place sur le monument.

Les mesures ont été réalisées sur un mur intérieur dans les combles du canton attenant à la tour Henri V, où certaines pierres présentent un aspect rosâtre (Figure 3). Les mesures colorimétriques ont été effectuées sur une pierre présentant une cassure révélant ainsi l'intérieur de la pierre. Visuellement, on constate clairement une coloration rosâtre au niveau de la surface extérieure de la pierre (zone 2), et cette couleur reste globalement uniforme sur environ un centimètre de profondeur. Dans la partie interne de la pierre (zone 1), la couleur est blanchâtre et ressemble à la couleur normale de la pierre.



Figure 3. Zones soumises aux mesures colorimétriques, sur des pierres en tuffeau dans les combles incendiés du château de Chambord.

Le tableau 3 présente les valeurs des coordonnées L*, a* et b*, correspondantes aux mesures colorimétriques réalisées sur les zones 1 et 2. Ces valeurs représentent la moyenne et l'écart-type calculés sur un minimum de cinq mesures.

Tableau 3. Résultats des mesures de colorimétrie in situ.

	Zone 1 (partie interne)	Zone 2 (partie externe)
L*	78.7 ±2.7	76.6 ±2.2
a*	-0.4 ±0.3	3.3 ±0.6
b*	15.2 ±1.1	15.6 ±0.8

La clarté L* est à peu près la même (environ 77) pour les deux zones, mais la partie externe (zone 2) est légèrement plus foncée que la partie interne (zone 1) de cette pierre. La coordonnée a* est celle qui est la plus affectée entre la partie interne (environ -0,4) et la partie externe (environ 3,3), mettant en évidence l'aspect rosâtre de surface (figure 3). La coordonnée b*, est similaire entre les zones 1 et 2. En comparant les mesures de couleur faites *in situ* et celles faites en laboratoire, nous pouvons confirmer que c'est la coordonnée a* qui est la plus pertinente pour révéler la température atteinte lors d'un incendie dans le cas du tuffeau. À partir de ces mesures, nous estimons que cette pierre sur site, endommagée par le feu, a connu une montée en température allant jusqu'à 700°C, pour atteindre cette couleur rosâtre et une coordonnée a* proche de 3. À cette température, la vitesse du son devrait avoir diminué de près de 30%, montrant une détérioration des propriétés mécaniques de la pierre.

Des observations complémentaires par microscopie optique ont été réalisées pour confirmer le diagnostic colorimétrique de la température présumée atteinte (Figure 4). Deux échantillons ont été prélevés dans la zone 1 et zone 2 du château de Chambord, dans la partie endommagée par le feu (Figure 3). La zone 1 a été considérée comme saine et a été comparée à des échantillons de référence chauffés à 100°C au laboratoire. La zone 2 a été considérée comme ayant été chauffé à 700°C pendant l'incendie, et a été comparée aux échantillons chauffés à la même température en laboratoire. Les grains de glauconite sont un marqueur intéressant à observer dans le cas du tuffeau, car ils sont responsables du changement de couleur progressif du tuffeau à partir de 400°C [TOR 05]. Verts à 100°C, ils sont rouge-orangés à 700°C (Figure 4). Cependant, entre la zone 1 et zone 2, la couleur de la glauconite n'a pas changé et est encore verte dans la zone 2, qui était censé être chauffé à 700°C. Cela remet en question l'hypothèse d'une température de chauffe de 700°C et indique que ces pierres n'ont pas été chauffées à une température supérieure à 400°C lors de cet incendie, et que leurs propriétés n'ont pas été trop modifiées. L'origine de la couleur rose sur la surface de la pierre jusqu'à une profondeur d'un centimètre est cependant inconnue. Plusieurs hypothèses qui devront être contrôlées à leur tour peuvent être proposées : la consolidation ou le nettoyage par des traitements de surface, l'activité biologique (algues, lichens), des traces de colle, de peinture ou d'autres polluants. Les archives historiques consultées, du XIX^e au XX^e siècle, ne permettent malheureusement pas de fournir des réponses supplémentaires.

La colorimétrie, qui est non-destructive et facile à mettre en œuvre, est donc un outil intéressant pour diagnostiquer la dégradation d'un bâtiment après un incendie. Mais cette méthode ne suffit pas, car elle peut être biaisée par des restaurations ou des traitements, appliqués en surface, entraînant le changement de couleur de la pierre. Il est donc important pour l'expert qui réalise le diagnostic post-incendie, de croiser les données et les méthodes d'analyse.

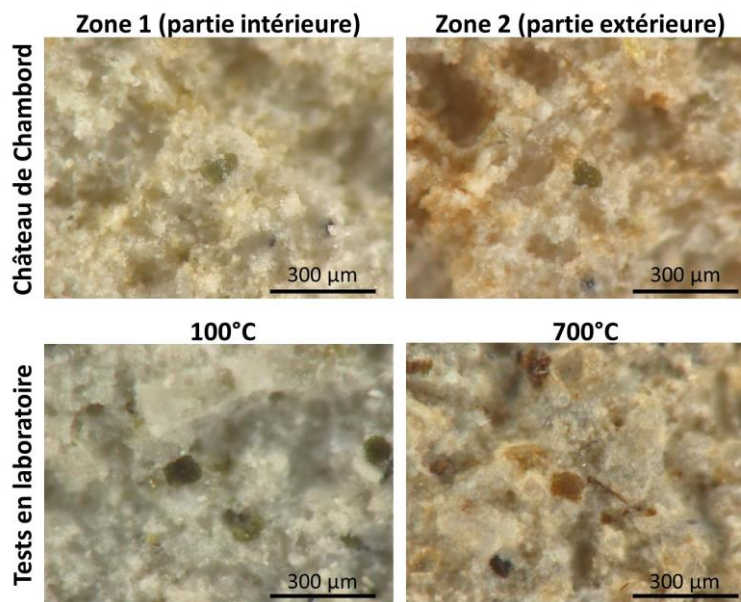


Figure 4. Photographies au microscope optique (x300) montrant la couleur de la glauconite contenue dans l'échantillon de tuffeau du château de Chambord (zones 1 et 2), en comparaison des échantillons de tuffeau exposés aux tests de montées en température à 100 et 700°C.

5. Conclusion

Une courbe de référence de la variation de la couleur de la pierre de tuffeau en fonction de la température de chauffe a été établie à partir des mesures colorimétriques réalisées sur des échantillons de tuffeau soumis à des températures allant de 100°C à 900°C. Des mesures de vitesse du son ont également été réalisées sur chaque échantillon, avant et après le protocole de chauffe, pour mesurer le pourcentage de diminution des propriétés mécaniques de la pierre, et caractériser ainsi de manière non-destructive les dommages subis lors de la chauffe. Cette mesure, facile à mettre en place sur des échantillons en laboratoire, est plus difficile à mettre en place et à interpréter sur site. Les résultats des mesures colorimétriques étant mises en lien avec ceux des mesures de vitesse du son, la colorimétrie paraît donc être une bonne méthode non-destructive potentielle de diagnostic post-incendie de l'endommagement d'une pierre directement sur site.

Afin de valider cette méthode, un diagnostic post-incendie a été réalisé *in situ* par des mesures colorimétriques sur des pierres de tuffeau du château de Chambord ayant été incendiées, comparées à celles obtenues au laboratoire. Il a été démontré dans ce travail que la coordonnée a^* semble être la plus pertinente pour évaluer la température de chauffe d'une pierre. En négligeant l'impact de la suie, des fumées et d'un éventuel post-traitement, l'observation de la couleur de la surface avec une mesure quantitative par spectrocolorimétrie pourrait être utile pour le diagnostic non-destructif de l'état de conservation des pierres après une soumission à des températures élevées typiques d'un incendie. Néanmoins, ces mesures colorimétriques ne sont pas toujours suffisantes, et doivent être complétées par d'autres méthodes d'analyses, pour caractériser les propriétés texturales et minéralogiques de la pierre saine et altérée (DRX, MEB, microscopie optique, porosimétrie par intrusion de mercure...).

Pour que le diagnostic *in situ* soit juste, il est nécessaire que la courbe colorimétrique de référence ait été réalisée sur des échantillons dont les propriétés sont les plus proches possibles du matériau incendié. De plus, la généralisation de ce protocole de diagnostic à différents édifices, nécessite la réalisation d'une courbe de référence adaptée à chaque site et matériaux concernés.

6. Bibliographie

[BEC 03] BECK K., AL-MUKHTAR M., ROZENBAUM O., RAUTUREAU M., « Characterization, water transfer properties and deterioration in tuffeau: building material in the Loire Valley-France », *Building and Environment*, n°38, 2003, p. 1151-1162.

- [BEC 15] BECK, K., JANVIER-BADOSA, S., BRUNETAUD, X., TÖRÖK, A., AL-MUKHTAR, A., « Non-destructive diagnosis by colorimetry of building stone subjected to high temperatures », *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, publication en ligne 28 mai 2015 (doi:10.1080/19648189.2015.1035804).
- [CAR 10] CARMONA-QUIROGA, P.M., MARTINEZ-RAMIREZ, S., SANCHEZ DE ROJAS, M.I., BLANCO-VARELA, M.T., « Surface Water Repellent-mediated Change in Lime Mortar Colour and Gloss », *Construction and Building Materials*, n°24, 2010, p. 2188-2193.
- [CAR 13] CARRÉ H., HAGER I., PERLOT C., « Contribution to the development of colorimetry as a method for the assessment of fire-damaged concrete », *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, DOI: 10.1080/19648189.2014.883336.
- [CHA 64] CHARTE DE VENISE, « Charte internationale sur la conservation et la restauration des monuments et des sites », *Ile Congrès international des architectes et des techniciens des monuments historiques*, Venise, 1964.
- [CRE 13] CREE, D., GREEN, M., NOUMOWÉ, A., « Residual Strength of Concrete Containing Recycled Materials After Exposure to Fire: A Review », *Construction and Building Materials*, n°45, 2013, p. 208-223.
- [DES 97] DESSANDIER D., ANTONELLI F., RASPLUS L., « Relationships between mineralogy and porous medium of the crai tuffeau », *Bulletin de la Soc. Géologique de France*, n°186/6, 1997, p. 741-749.
- [DUR 95] DURAN-SUAREZ, J., GARCIA-BELTRAN, A., RODRÍGUEZ-GORDILLO, J., « Colorimetric Cataloguing of Stone Materials (biocalcarenite) and Evaluation of the Chromatic Effects of Different Restoring Agents », *Science of The Total Environment*, n°167, 1995, p. 171-180.
- [FRA 13] FRANZONI, E., SASSONI, E., SCHERER, G.W., NAIDU, S., « Artificial Weathering of Stone by Heating », *Journal of Cultural Heritage*, n°14, 2013, p. 85-93.
- [HAJ 04] HAJPAL M., TORÖK A., « Mineralogical and Colour Changes of Quartz Sandstones by Heat », *Environmental Geology*, n°46, 2004, p.311–322.
- [OZG 13] OZGUVEN A., OZCELIK Y., « Investigation of Some Property Changes of Natural Building Stones Exposed to Fire and High Heat », *Construction and Building Materials*, n°38, 2013, p. 813–821.
- [RAU 01] RAUTUREAU M., *Tendre comme la pierre. Monuments en tuffeau*, Ouvrage collectif sous la direction de Michel Rautureau, Conseil régional du Centre & Université d'Orléans, 2001.
- [RIV 11] RIVAS, T., MATIAS, J.M., TABOADA, J., ORDÓÑEZ, C., « Functional Experiment Design for the Analysis of Colour Changes in Granite Using New $L^* a^* B^*$ Functional Colour Coordinates », *Journal of Computational and Applied Mathematics*, n°235, 2011, p. 4701-4716.
- [SAV 05] SAVVA, A., MANITA, P., SIDERIS, K.K., « Influence of Elevated Temperatures on the Mechanical Properties of Blended Cement Concretes Prepared with Limestone and Siliceous Aggregates », *Cement and Concrete Composites*, n°27, 2005, p. 239-248.
- [TOR 05] TÖRÖK, Á., HAJPAL, M., « Effect of Temperature Changes on the Mineralogy and Physical Properties of Sandstones. A Laboratory Study », *Journal of Restoration of Buildings and Monuments*, vol. 11, n°4, 2005, p. 211-218.