
Évaluation de la température atteinte dans une structure en béton en utilisant la colorimétrie

H. Carré¹, C. Perlot¹, I. Hager²

¹ Université de Pau et des Pays de l'Adour, laboratoire SIAME mail : helene.carre@univ-pau.fr, celine.perlot@univ-pau.fr

² Ecole Polytechnique de Cracovie, Pologne, ihager@pk.edu.pl

RÉSUMÉ. L'objectif de cette étude est de développer une méthode d'analyse du béton post-incendie simple, économique et fiable. Nous utilisons la technique de la colorimétrie : l'analyse de l'évolution de la couleur du béton avec la température. Les images sont réalisées avec un scanner plat garantissant la reproductibilité des images par des conditions d'éclairages constantes. Le travail est mené sur deux mortiers et deux bétons. Ils sont chauffés lentement jusqu'à 800 °C et des images sont réalisées après chauffage à 20, 100, 200, 400, 600 et 800 °C. La décomposition TSV est utilisée. Une dalle contenant des inclusions des quatre matériaux étudiés est chauffée suivant une courbe ISO 834-1. Des images sont réalisées après refroidissement, traitées en utilisant la décomposition T, S, V et comparées avec les valeurs obtenues lors des chauffages lents.

ABSTRACT. The objective of this study is to develop a method of concrete assessment after fire, simple, cheap and reliable. The colourimetry method was used: analysis of concrete colour changes with temperature. The images were produced with a flatbed scanner ensuring the reproducibility of images by constant lighting conditions. The study was carried out on two mortars and two concretes. They are slowly heated up to 800 °C and images were taken at 20, 100, 200, 400, 600 and 800 °C. Decomposition HSI is used. A small slab containing inclusions of the four materials studied is heated according to ISO 834-1 curve. Images are produced after cooling and changing of various parameters H, S, I is studied and compared with the values obtained with slow heating.

MOTS-CLÉS : béton, haute température, colorimétrie, analyse post-incendie, traitement d'images.

KEY WORDS: concrete, high temperature, colourimetry, post-fire assessment, image processing.

1. Introduction

L'analyse de l'état d'une structure en béton ayant subi un incendie est particulièrement importante pour mener à bien les travaux de réhabilitation. Différentes techniques existent et conduisent soit à des mesures in-situ, soit à des mesures en laboratoire après prélèvement. Les principales techniques utilisées sur des carottes prélevées sur site sont : fréquence de résonance, ultrasons, analyse thermique différentielle, analyse thermogravimétrique, diffraction de rayons X, microscopie à balayage, thermoluminescence, analyse chimique ou pétrographique, colorimétrie.

La colorimétrie est une méthode indirecte utilisant le fait que le béton change de couleur quand il est chauffé. Cette variation résulte de l'évaporation progressive de l'eau de la pâte de ciment ainsi que les transformations chimiques des hydrates et des granulats. L'intensité du changement de couleur dans le béton chauffé dépend de la nature de la pâte de ciment, mais aussi de la composition minérale des granulats. Il est communément admis [SHO 01] qu'entre 300 et 600 °C, le béton prend une coloration rouge, blanc/gris entre 600 et 900 °C et couleur chamois entre 900 et 1000 °C. L'évolution de la couleur du cœur du béton dépend bien sûr de la pâte mais aussi de la nature des granulats.

Diverses techniques sont utilisées pour observer les changements dans le béton chauffé. Cela commence par une observation visuelle en utilisant le Munsell Book of Colour par exemple. On peut citer également les mesures réalisées par Faure et Hemond [LCP 05] avec un spectrophotomètre appliqué directement sur la surface du béton. La méthode utilisée par Short [SHO 01] consiste à observer les échantillons avec un microscope polarisant équipé d'un logiciel d'analyse d'image. Felicetti [FEL 11] a utilisé une caméra numérique ce qui nécessite d'assurer un éclairage constant et n'est pas facile à réaliser. De plus, une boîte à lumière doit être utilisée et l'équilibre des blancs doit être réalisé sur la caméra.

Nous cherchons à développer la technique de la colorimétrie avec des moyens simples et économiques. La méthode doit être rapide, peu onéreuse et assurer une bonne répétabilité. Ainsi, les images sont obtenues en utilisant un scanner plat, peu coûteux, qui garantit des conditions d'éclairage constantes [HAG 10, 13] [CAR 14]. L'objectif est de déterminer la température atteinte par le béton et donc son état. L'étude présente les résultats obtenus sur deux mortiers et un béton. Les photos sont réalisées grâce à un scanner plat. La décomposition TSV (teinte, saturation, valeur) est réalisée et analysée pour chaque image.

L'évolution de la couleur dans le béton est quasiment la même dans la pâte de ciment mais très différente dans les granulats en raison de leur nature chimique très variée. Ainsi, les matériaux étudiés sont d'une part un béton et deux mortiers de la même famille c'est-à-dire que les mortiers sont formulés à partir du béton, en enlevant les plus gros granulats. D'autre part, un béton très différent, à la fois par le ciment utilisé mais surtout par les granulats utilisés, calcaires pour le premier et laitiers de haut fourneau pour le deuxième.

L'étude va s'intéresser à l'évolution de la couleur de la pâte de ciment d'un côté et du béton de l'autre. En effet, l'objectif est de trouver des paramètres qui évoluent de façon monotone avec la température et similaire pour différents bétons.

2. Matériaux testés, chauffage et analyse paramétrique des images

1.1. Matériaux testés

Différents matériaux ont été testés: un mortier avec $D_{\max} = 1$ mm (MBO1-1), un mortier avec $D_{\max} = 4$ mm (MBO1) et un béton ordinaire (BO1). Les formulations des différents matériaux sont toutes déclinées de la formulation du béton BO1. Les proportions des mélanges sont données dans le tableau ci-dessous. Ils sont donnés pour BO1 pour un m^3 mais pas pour les autres matériaux afin de bien mettre en évidence leur déclinaison.

Tableau 1. Formulations des différents matériaux étudiés.

Composition	Unité	MBO1-1	MBO1	BO1
Gravier calcaire 10-20 mm	kg	-	-	374
Gravier calcaire 4-10 mm	kg	-	-	675
Sable siliceux 0-4 mm	kg		872	872
Fraction 0-1 mm du sable 0-4 mm	kg	584		
C = Ciment CEM II/A – V 42,5 R	kg	350	350	350
E = Eau	l	171	171	171
Superplastifiant	% C	0,7	0,7	0,8
E/C	-		0,5	

1.2. Chauffage lent

De petits échantillons (5 x 5 x 5 cm³ environ) ont été chauffés dans un four électrique à une vitesse de chauffage constante de 1 °C/min pour atteindre des températures cibles de 100, 200, 400, 600 et 800 °C. Lorsque la température de consigne est atteinte, elle est maintenue pendant une heure pour obtenir une température homogène dans l'échantillon. Ensuite, les échantillons sont refroidis dans le four avec une vitesse de refroidissement inférieure à 1 °C/min. À température ambiante, les images des surfaces sciées de l'échantillon ont été prises avec le scanner plat (cf. Figure 1). Les images ont été analysées dans l'espace des couleurs TSV pour chaque échantillon, pour les différentes températures. L'évolution des composantes de couleur avec la température est analysée. L'influence de la taille des images, la présence ou l'absence des granulats a également été étudiée. Une comparaison entre les différents matériaux: pâte de ciment, mortiers et bétons a également été réalisée.

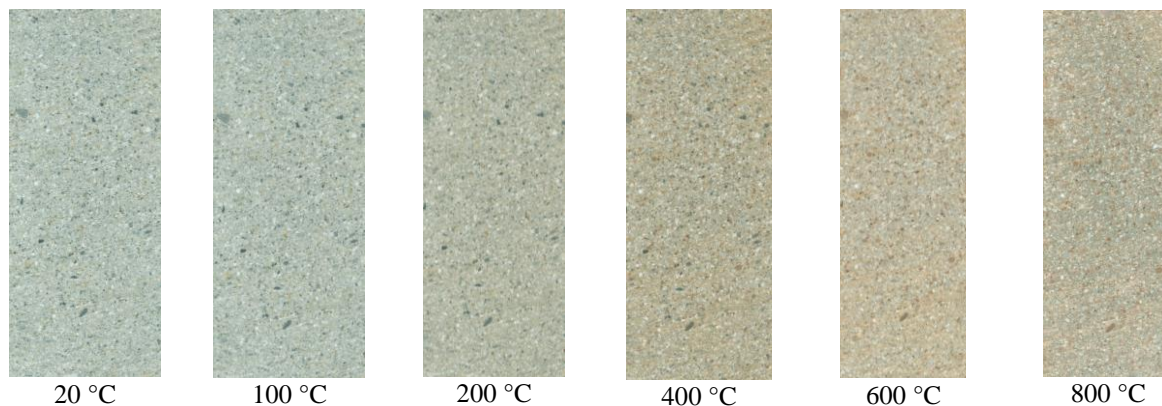


Figure 1. Images du MBO1-1 aux différentes températures.

1.3. Chauffage rapide

Une dalle de béton de 70 x 60 x 15 cm³ a été coulée dans laquelle, des éprouvettes cylindriques de 15 cm de hauteur des quatre matériaux analysés ont été insérées. La dalle a été soumise à un chauffage suivant la courbe ISO 834-1 pendant 2 heures (cf. Figures 2 et 3). Après refroidissement, les éprouvettes ont été extraites et rabotées afin de réaliser des images avec le scanner plat.



Figure 2. Sous-face de la dalle avec les différentes inclusions après refroidissement.

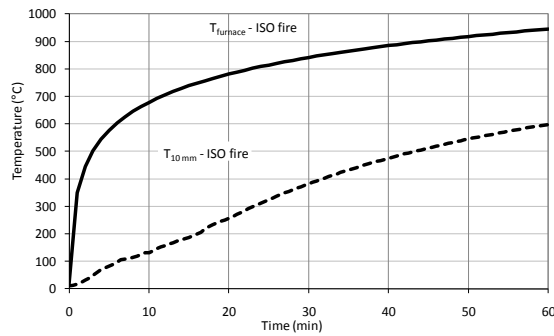


Figure 3. Evolution de la température dans le béton et dans le four en fonction du temps.

1.4. Etude paramétrique des images

Afin d'analyser la validité de l'analyse, plusieurs images ont été réalisées sur la même éprouvette de MBO1 en la rabotant progressivement. Les images sont distantes d'environ 5 mm. La gauche l'image correspond à la face exposée aux hautes températures (cf. Figure 4). Les éprouvettes ayant été chauffées uniformément sur leur surface exposée, les paramètres T, S et V sont évalués en moyenne (cf. Figures 4 à 6) dans une bande verticale de 50 à 400 pixels de hauteur. L'influence de la largeur de ces bandes est évaluée (cf. Figure 7).

Les Figures 4, 5 et 6 présentent l'évolution des composantes T, S, V pour les différentes images réalisées sur une éprouvette de MBO1. La taille des images 1 à 5 varie entre 2948 et 2984 pixels sur la largeur et entre 792 et 1792 pixels sur la hauteur. On observe une assez faible variabilité de l'évolution des composantes en fonction de la distance à la surface chauffée. L'image 6 correspond à une bande de 231 pixels de hauteur extraite de l'image 5. Les courbes mettent bien en évidence que cette largeur réduite est suffisante et donne des courbes représentatives du matériau.

De plus, la Figure 7 présente l'influence de la largeur des bandes sur lesquelles la valeur moyennée de la composante T. Elle met en évidence que le matériau étant relativement hétérogène, une largeur de bande importante, de l'ordre de 200 pixels est utilisable. Cette valeur est utilisée dans la suite de l'étude.

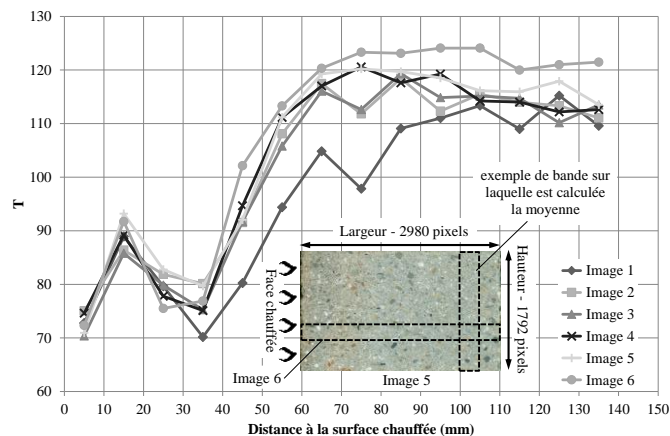


Figure 4. Evolution de T pour les différentes images de MBO1.

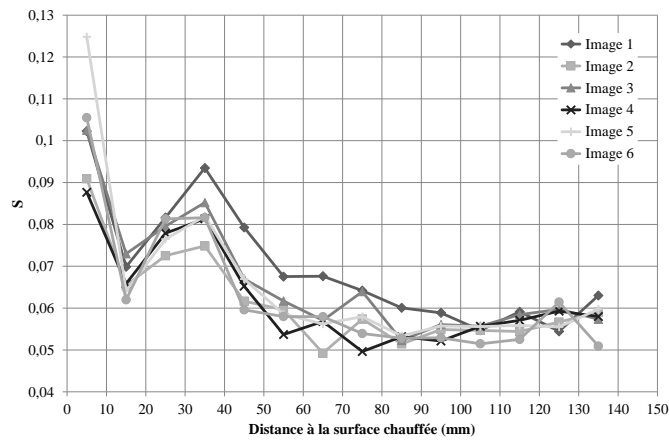


Figure 5. Evolution de S pour les différentes images de MBO1.

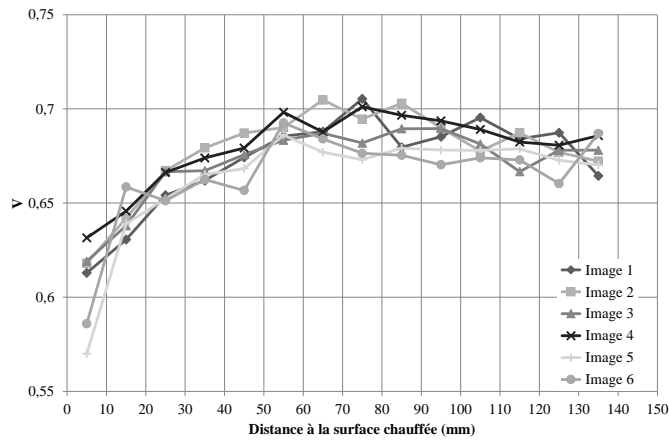


Figure 6. Evolution de V pour les différentes images de MBO1.

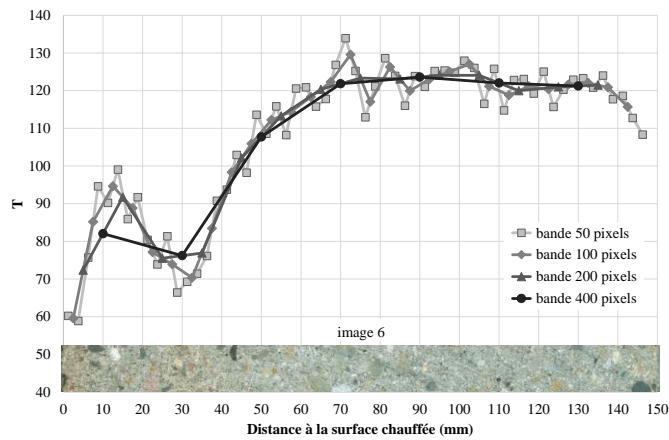


Figure 7. Evolution de T pour différentes largeurs de bandes pour MBO1.

3. Analyse des images réalisées sur les éprouvettes chauffées lentement

Les images des éprouvettes chauffées lentement ont été analysées avec la décomposition TSV. Les figures 8 à 10 présentent l'évolution des différents paramètres avec la température pour les trois matériaux étudiés MBO1-1, MBO1 et BO1. Il est à noter que les images sur le BO1 à 800 °C n'ont pas pu être réalisées en raison de la désagrégation complète de l'éprouvette. Cela est dû aux incompatibilités de déformations entre la pâte de ciment et les granulats et surtout à la décomposition du carbonate de calcium intervenant entre 600 et 700 °C. En effet, le gravier utilisé pour la fabrication du béton est calcaire.

Les figures 8, 9 et 10 mettent en évidence une très bonne concordance entre les résultats des deux mortiers. Une différence significative peut être observée avec les résultats du BO1. Cela peut être attribué à l'influence des plus gros granulats dont la couleur évolue assez différemment de celle de la pâte de ciment.

La figure 8 montre une évolution monotone de T avec la température, entre 20 et 400 °C puis T est pratiquement constant entre 400 et 600 °C pour les deux mortiers. La variation est significative au regard du domaine de variation de T et correspond à l'évolution de la teinte du vert (120) vers le rouge (0). La figure 9 montre une évolution monotone de S avec la température puis reste constant à partir de 400 °C. Cette évolution n'est pas très importante puisqu'elle est d'environ 0,05 alors que S varie entre 0 et 1. La différence d'évolution est nette entre les mortiers et le béton. Cela est dû à la modification différente avec la température de la couleur de la pâte de ciment et des gros granulats. L'évolution de V est visible sur la figure 10 ; elle est très faible avec la température.

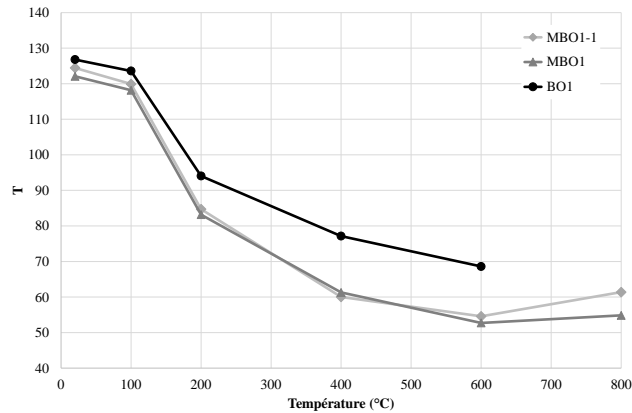


Figure 8. Evolution de T pour MBO1-1, MBO1 et BO1 en fonction de la température

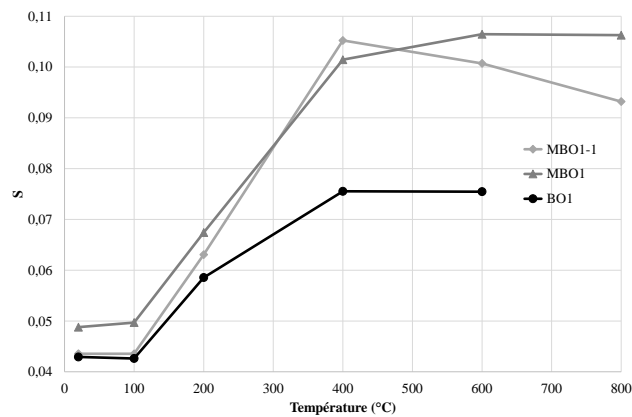


Figure 9. Evolution de S pour MBO1-1, MBO1 et BO1 en fonction de la température

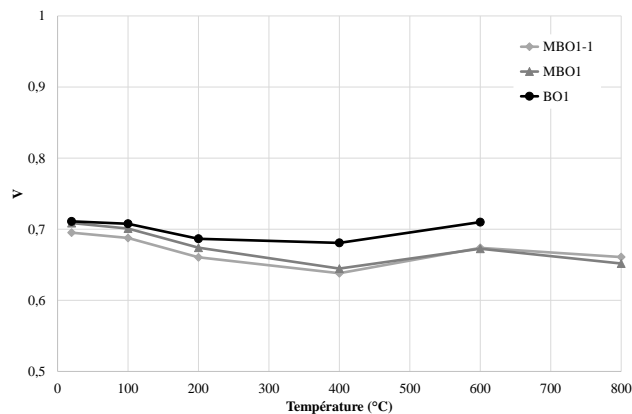


Figure 10. Evolution de V pour MBO1-1, MBO1 et BO1 en fonction de la température

4. Évaluation de la température atteinte lors du chauffage rapide

A partir des résultats obtenus sur les mortiers et béton lors du chauffage lent, l'évolution de T et de S peuvent permettre de chercher les zones ayant été chauffées au-delà de 400 °C et 250 °C. Ainsi, deux critères ont été choisis : $T < 60$ ce qui correspond à une température atteinte de 400 °C et $T < 75$ ce qui correspond à une température atteinte de 250 °C. Les figures 11 et 12 présentent des images des différents matériaux dans lesquelles les pixels ont été remplacés par du noir lorsque le critère était dépassé. Les figures présentent également l'évolution de la température maximale atteinte dans les trois matériaux au cours du chauffage.

On peut noter sur la Figure 8 que les critères $T < 60$ et $T < 75$ fonctionnent bien pour les mortiers mais pas pour le béton. Cela est dû au fait que la couleur des plus gros granulats évolue différemment de celle de la pâte de ciment. Ainsi, grâce à une analyse visuelle (cf. Figures 10 et 11) on peut s'affranchir de l'influence des plus gros granulats. En effet, on peut voir sur l'image du béton que les plus gros granulats ne satisfont pas les critères et gardent leur couleur d'origine (ils n'apparaissent pas en noir sur l'image modifiée). La séparation automatique (par analyse d'image) de la pâte de ciment et des granulats n'est pas toujours facile sur les images car, comme ici, les couleurs de la pâte de ciment et des plus gros granulats peuvent être très proches.

Le critère $T < 60$ permet assez bien de repérer les zones chauffées au-delà de 400 °C. On note cependant une bande qui ne satisfait pas le critère entre la surface chauffée et la limite à 400 °C. Cela montre une différence entre l'évolution de teinte lors de chauffage lent (cf. Figure 8) et lors d'un chauffage rapide (cf. Figure 11).

Le critère $T < 75$ ne permet pas de prédire correctement les zones chauffées au-delà de 250 °C. Cela est peut-être dû à la faible pertinence du critère mais peut aussi être lié à une mauvaise connaissance de la température atteinte lors du chauffage. En effet, la mesure par thermocouples dans les dalles n'est faite qu'au centre de celle-ci. De plus, le gradient thermique atteint est assez faible dans les zones ayant atteint 250 °C. Ainsi, la comparaison entre la prédiction et la température réellement atteinte devient difficile.

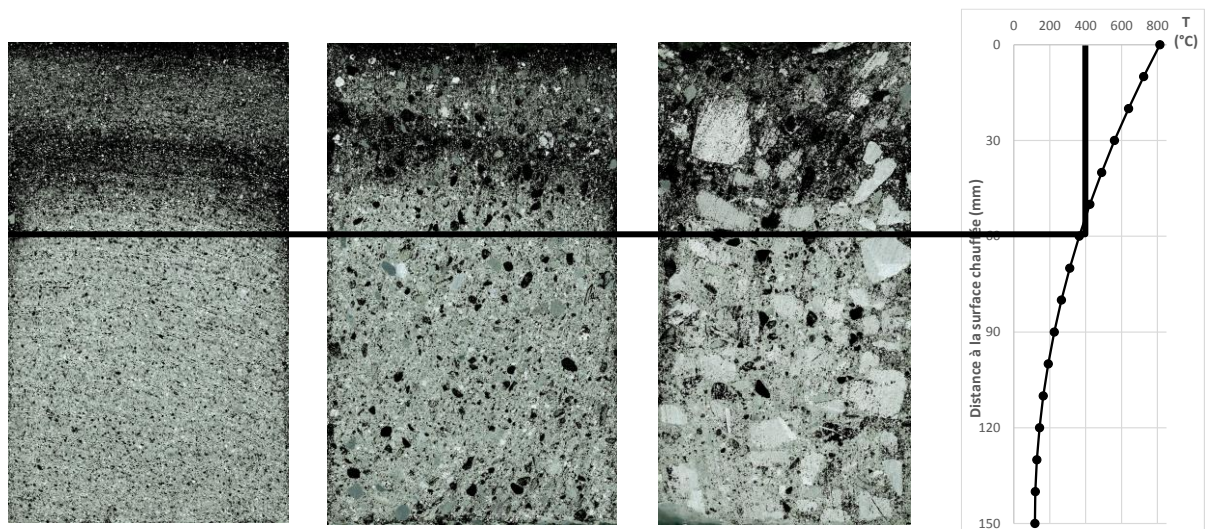


Figure 11. Images de MOBI-1 (gauche), MBO1 (centre) et BO1 (droite) modifiées par le critère $T < 60$ – à droite courbe de la température maximale atteinte dans pendant le chauffage

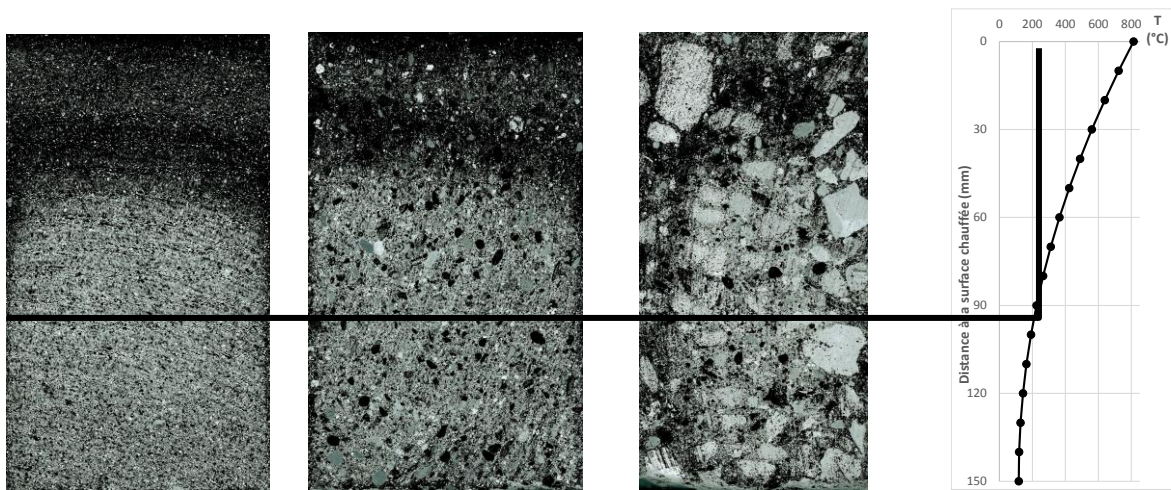


Figure 12. Images de MOBI-1 (gauche), MBOI (centre) et BOI (droite) modifiées par le critère $T < 75$ – à droite courbe de la température maximale atteinte dans pendant le chauffage

5. Conclusion

Ce travail sur deux mortiers et un béton a permis de mettre en évidence la cohérence de l'évolution des couleurs (avec une décomposition TSV) entre les deux mortiers et l'influence des plus gros granulats pour le béton. Ainsi, grâce à la décomposition TSV (teinte, saturation, valeur) des couleurs, l'évolution de la teinte semble être un paramètre objectif permettant de le relier à la température atteinte dans le béton. En effet, son évolution est monotone avec la température pour les deux mortiers.

La méthode de réalisation des images ayant été validées dans des études précédentes, une méthode d'analyse de ces dernières est proposée ici. La taille des images et la surface à prendre en compte pour évaluer l'évolution des paramètres pour obtenir des résultats représentatifs sont évaluées.

Enfin, deux critères sont proposés pour déterminer la surface ayant atteint 400 et 250 °C respectivement. Même si la tendance est bonne, l'évaluation n'est pas parfaite pour la limite à 250 °C. Cette évaluation est faite en considérant que l'évolution des couleurs est la même lors d'un chauffage lent et lors d'un chauffage rapide. Cela reste à valider et ne semble pas juste dans la bande se situant à proximité de la surface chauffée. Ainsi, cette zone est le lieu d'évaporation et de recondensation qui pourraient jouer un rôle sur l'évolution des couleurs et expliquer ce phénomène. Une méthode de calage des paramètres pourrait être nécessaire et fera partie des prochaines étapes de l'étude. De plus la mesure des températures a été faite au centre de la dalle et une mesure dans chaque éprouvette aurait pu donner des valeurs plus réalistes de la température atteinte dans chacune d'entre elles et donc une comparaison plus précise.

Ce travail a été mené sur des matériaux utilisant les mêmes matériaux (sable, ciment et gravier). La méthode doit être testée sur d'autres bétons ayant des compositions totalement différentes.

6. Bibliographie

- [SHO 01] Short NR, Purkiss JA, Guise SE (2001) Assessment of fire damaged concrete using colour image analysis. *Constr Buil Mater*, 15 pp. 9–15
- [LCP 05] LCPC N° 62 (2005) Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, p 114 (in french)
- [FEL 11] Felicetti R., Assessment Methods of Fire Damages in Concrete Tunnel Linings, *Fire Technology*, 2011
- [HAG10] Hager I. (2010) The application of RGB histogram analysis of colour images as a method of assessing the condition of concrete in structures after fire. In: *Proceedings of 6th international conference on structures in fire (SIF2010)*, June 2–4, 2010, Michigan, USA, pp 841–847
- [HAG13] Hager, I. (2013) Colour Change in Heated Concrete, *Fire Technology*, Volume 49, (DOI: 10.1007/s10694-012-0320-7)
- [CAR14] Carré H., Hager I and Perlot C. (2014) Contribution to the development of colorimetry as a method for the assessment of fire-damaged concrete, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Volume 18, Issue 10, pp. 1130-1144