

Douai, France
03-04 juillet 2014

CONTRIBUTION AU DEVELOPPEMENT DE LA COLORIMETRIE POUR L'ANALYSE POST-INCENDIE DES STRUCTURES EN BETON

H. Carré^A, I. Hager^B, C. Perlot^A

A Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur appliquées à la Mécanique et au génie Électrique (SIAME),
Université de Pau et des Pays de L'Adour, France

B Université technologique de Cracovie, Institut des matériaux et des structures du bâtiment,
Cracovie, Pologne

RÉSUMÉ : Cette étude présente une nouvelle méthode utilisant la colorimétrie pour l'analyse post-incendie des structures en béton. Les changements de couleur du béton avec la température sont reliés aux transformations chimiques de la pâte de ciment et des granulats. Deux bétons sont étudiés : un béton ordinaire (OC) et un béton à hautes performances (HPC). La principale différence entre les deux bétons est leur rapport Eau/Ciment. Ils sont fabriqués avec le même ciment et les mêmes granulats de rivière de nature pétrographique variée. Des petits échantillons sont chauffés jusqu'à différentes températures cibles : 100, 200... 1000 °C. Après chaque refroidissement, une image est prise avec un scanner plat. Deux décompositions des couleurs de l'image sont utilisées : RVB (rouge, vert, bleu) et TLS (teinte, luminance, saturation) pour analyser l'évolution de la couleur du béton avec la température. Deux critères sont proposés pour la prédiction de la température maximale atteinte. L'histogramme du bleu s'élargit à sa base quand la température augmente. Le critère 1 correspond à cette largeur. Le critère 2 est associé à l'apparition de couleurs claires entre 800 et 900 °C. Le critère 3 est la teinte moyenne (dans l'espace des couleurs TLS). Il diminue significativement avec la température. Cela correspond au rougissement du béton avec la température en raison de l'oxydation des minéraux contenant du fer.

Afin de valider l'utilisation de ces critères pour l'analyse post-incendie des structures en béton, des petits blocs de béton ont été chauffés. Ils ont été placés à la place de la porte du four, ce qui induit un gradient thermique dans leur épaisseur. Des images ont été réalisées après refroidissement et les trois critères ont été appliqués pour analyser la couleur du béton.

1. INTRODUCTION

L'analyse de l'état d'une structure en béton endommagée par un incendie est particulièrement importante pour mener à bien les travaux de réhabilitation. Différentes techniques existent et correspondent soit à des essais in-situ, soit en laboratoire sur des échantillons carottés dans le béton endommagé (LCPC, 2005). Les principales techniques d'essais en laboratoire sont : la fréquence de résonance, la vitesse des ultrasons, l'analyse thermique différentielle, l'analyse thermogravimétrique, la microscopie électronique à balayage, la thermoluminescence, l'analyse chimique et pétrographique, la colorimétrie, etc.

La colorimétrie est une méthode indirecte fondée sur le fait que la couleur du béton change quand il est chauffé. Ce changement de couleur est dû à une évaporation progressive de l'eau de la pâte de ciment ainsi qu'au processus de déshydratation des hydrates. Le changement de l'intensité de la couleur du béton chauffé dépend de la nature de la pâte de ciment mais aussi de la composition minéralogique des granulats. Il est communément accepté (Short et al., 2001) que le béton rougit entre 300 et 600 °C, devient gris/blanc entre 600 et 900 °C et chamois entre 900 et 1000 °C.

L'observation de la couleur de béton chauffé permet une estimation approximative de la température atteinte par l'élément lors d'un incendie. Plusieurs auteurs ont mis au point différentes techniques pour

décrire plus précisément les changements de couleur : Short et al. (2001), Felicetti (2004), Colombo et Felicetti (2007), Faure et Hémond (2005), Luo et Lin (2007), Annerel et Taerwe (2009), Hager (2010), Annerel et Taerwe (2011) et Hager (2013 b).

L'une des premières tentatives pour mesurer et quantifier le changement de couleur du béton à différentes températures a été réalisée par Court et al. (2001). Le procédé employé par Short et al. (2001) consistait à observer les échantillons avec un microscope polarisant équipé d'un logiciel d'analyse d'image. Cette technique était de loin supérieure à l'évaluation visuelle subjective de la variation de couleur précédemment utilisée pour évaluer l'influence du chauffage. Dans cette étude, l'espace des couleurs TLS (teinte, luminance et saturation) a été utilisé. En outre, ils ont analysé séparément chaque composant de l'espace de couleur HSI et ont montré que la teinte est le paramètre qui varie le plus significativement avec la température.

Dans les travaux de Felicetti (2004), et plus tard Colombo et Felicetti (2007), un appareil photographique numérique à faible coût a été utilisé pour prendre des photographies d'échantillons de béton. Cette procédure nécessite un éclairage constant, ce qui n'est pas facile à obtenir. Une boîte à lumière doit être utilisée et une compensation doit être faite pour l'équilibre des blancs. Une des conclusions des auteurs est que, en raison du chauffage, une évolution des couleurs vers le jaune et le rouge se produit. L'hétérogénéité inhérente à la matière a été reconnue comme un problème important à résoudre. La présence de granulats distribués de façon aléatoire affecte la dispersion des résultats présentés dans l'espace des couleurs.

Diverses techniques pour l'observation des changements de couleur du béton chauffé ont été utilisées dans les travaux de recherche : l'observation visuelle avec l'utilisation du « Munsell Book of Colour » (Yuzer et al., 2004), le microscope polarisant (Short et al., 2001), un appareil photo numérique (Felicetti, 2004), (Luo et al., 2007) et un spectrophotomètre. Les avantages de cette dernière solution ont été décrits par Faure et Hémond (LCPC, 2005) et Annerel et Taerwe (2009). Ils ont pris des mesures avec un spectrophotomètre directement sur la surface du béton. Cependant, dans cette méthode, l'analyse de la couleur est effectuée sur une petite surface qui correspond soit à du mortier, soit à un grain de gravier. L'altération de la couleur des graviers concassés (mis en poudre avant le chauffage) a été étudiée avec cette méthode par Annerel et Taerwe (2009). L'espace de couleur CIE Lab a été utilisé et l'écart entre les jaune et bleu a été analysée.

Récemment, il a été proposé d'utiliser un scanner plat pour produire des images d'échantillons de béton chauffés afin de garantir des conditions d'éclairage constant (Hager, 2010). Le changement de couleur des pâtes de ciment, des mortiers et bétons chauffés, en utilisant l'espace de couleur RVB et les histogrammes normalisés de distribution des composantes rouge, verte et bleue a été analysé (Hager, 2013). La distribution des histogrammes du rouge, du vert et du bleu ainsi que deux paramètres, la valeur maximale de l'histogramme et l'intensité correspondant à la valeur maximale évoluent avec la température de chauffage et peuvent être utilisés pour estimer la température à laquelle le béton a été exposé au cours de l'incendie.

Vers la même époque, Annerel et Taerwe (2011) ont présenté les résultats de leurs recherches où les couleurs des bétons chauffés ont été déterminées. En outre, la comparaison entre deux espaces colorimétriques HSI et de CIE Lab et deux méthodes de mesure de couleur (spectrophotomètre et scanner plat calibré) ont été soigneusement étudiés.

Le principal objectif de l'étude présentée ici est de déterminer des paramètres fiables qui permettraient d'évaluer la température atteinte par le béton pendant le chauffage. Ces paramètres scalaires ont été développées à partir de la décomposition RVB (rouge, vert, bleu) et TLS (teinte, luminance, saturation).

Cette étude présente l'observation de l'altération de la couleur d'un béton ordinaire (OC) et d'un béton à hautes performances (HPC). Les photos ont été prises avec un scanner plat peu coûteux. L'évolution des rouges, verts et bleus ainsi que des composants TLS avec la température a été étudiée et les paramètres de l'analyse colorimétrique pour prédire la température maximale atteinte par le béton lors d'un incendie ont été proposés.

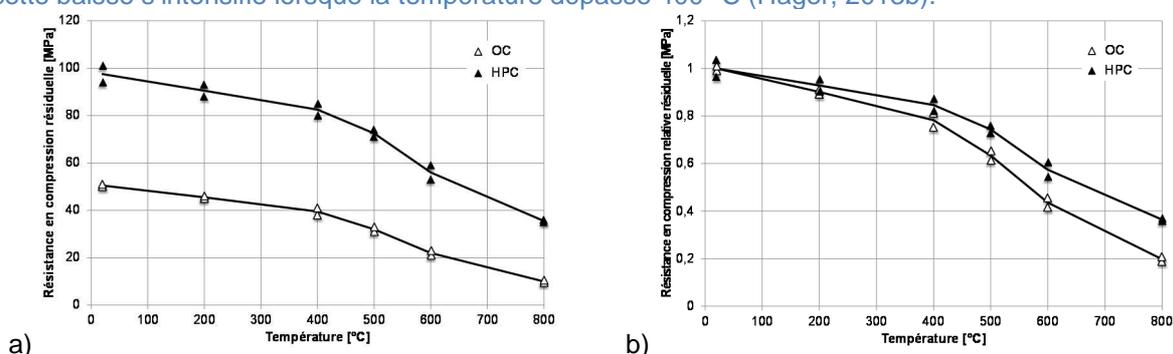
2. MATERIAUX ETUDIÉS

Les bétons étudiés ont été fabriqués en utilisant les matériaux suivants : ciment Portland CEM II 42,5 R, un sable siliceux de rivière 0/2 mm, des granulats de rivière 2/8 mm et 8/16 mm, un plastifiant et un superplastifiant. Les graviers de rivière contiennent un mélange de différents types de roches : grès, granites, dolomites et granulats siliceux. Les compositions des bétons étudiés sont présentées dans le tableau 1 La principale différence entre ces deux compositions de béton est le rapport eau/ciment : 0,6 pour le béton ordinaire (OC) et 0,6 pour le béton à hautes performances (HPC). Les résistances en compression à 28 jours sont de 50 MPa pour l'OC et 100 MPa pour le HPC.

Tableau 1. Composition des bétons étudiés.

Composition	Unité	OC	HPC
gravier 8 - 16 mm	kg/m ³	550	
gravier 2 - 8 mm	kg/m ³	660	
sable 0 - 2 mm	kg/m ³	623	
ciment CEM II/A - V 42,5 R	kg/m ³	322	478
eau	l/m ³	193	129
E/C	-	0,6	0,3

Des échantillons cubiques de 150 mm de côté, coulés dans des moules en plastique, ont été utilisés pour déterminer la résistance en compression. Les échantillons ont été laissés dans les moules munis d'un couvercle afin de limiter l'évaporation, pendant les premières 24 heures après le coulage. Après démoulage, les échantillons ont été conservés dans de l'eau à 20 °C pendant 7 jours, puis dans l'air pendant au moins 83 jours. Ces échantillons ont été chauffés jusqu'aux températures de consigne 200, 400, 600, 800 et 1000 °C dans un four électrique de laboratoire à une vitesse de chauffage de 0,5 °C/min. Cette vitesse de chauffage relativement faible a été choisie en suivant les recommandations de la RILEM (RILEM, 1995). Après avoir atteint la température cible, les échantillons ont été maintenus à cette température pendant 3 heures, de façon à obtenir une température homogène dans l'ensemble de la section transversale de l'échantillon. Les échantillons ont été refroidis à l'intérieur du four. Deux échantillons de chaque matériau ont été testés pour chaque température cible. Deux échantillons non chauffés ont également été testés en compression afin de servir de référence. Les figures 1 et 2 montrent l'évolution de la résistance en compression résiduelle et de la résistance en compression résiduelle relative avec la température. L'évolution de la résistance avec la température résulte, en particulier, de l'évaporation de l'eau, de la déshydratation des gels CSH, de la décomposition des aluminates de calcium hydratés et sulfoaluminates de calcium hydratés. Avec l'augmentation de la température, des modifications physico-chimiques des granulats ont également lieu. La résistance du béton diminue progressivement en raison de ces changements et cette baisse s'intensifie lorsque la température dépasse 400 °C (Hager, 2013b).



3. PROCEDURES D'ESSAI

3.1. Réalisation des images

Un scanner plat a été utilisé afin de garantir des conditions d'éclairage constantes quand les images des échantillons chauffés et refroidis sont réalisées. Aucun appareillage ou logiciel coûteux n'est nécessaire pour réaliser ces analyses. Les images ont été réalisées avec une résolution de 500 ppi. Des essais préliminaires ont été réalisés pour fixer cette résolution. Les résultats obtenus avec cette résolution sont très proches des résultats obtenus avec des images réalisées avec une plus grande résolution (1000 ppi). Les images sont ensuite exportées avec le format TIFF dans des logiciels d'analyse d'image : Scion Image, v. 4.0.3, Scion Corporation ©, USA, Fiji or Gimp. Les images sont ensuite décomposées entre trois composantes : rouge, vert et bleu. Les histogrammes de chaque composante sont tracés en comptant le nombre de pixels pour chaque intensité. De plus, l'espace des couleurs TLS (teinte, luminance, saturation) est également utilisé dont les composantes TLS peuvent être déterminées en fonction des composantes RVB.

3.2. Petits échantillons chauffés lentement

Deux échantillons cubiques (15 x 15 x 15 cm), l'un d'OC et l'autre de HPC, sont sciés conformément à la figure 2 afin d'obtenir 4 échantillons prismatiques (5 x 5 x 15 cm) dont l'évolution de la couleur sera analysée. Tous les essais sont réalisés après au moins 90 jours après leur coulage.

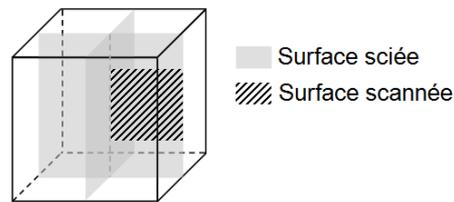


Figure 2. Schéma de découpe des échantillons cubiques et localisation de la surface scannée

Les échantillons ont été chauffés dans un four électrique avec une vitesse de chauffage constante de 1 °C/min pour atteindre les températures suivantes : 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 et 1000 °C. Lorsque la température cible est atteinte, elle est maintenue pendant une heure pour obtenir une température homogène dans les échantillons. Ensuite, les échantillons sont refroidis dans le four à une vitesse inférieure à 1 °C/min. Les images des surfaces sciées ont été prises avec un scanner plat à température ambiante.

L'observation des changements de couleur a été réalisée pour les surfaces de béton sciées (granulats visibles). Les images montrent que, pendant le chauffage, la pâte de ciment et les granulats changent souvent de couleur de façon significative en présentant des couleurs rouges ou roses plus intenses. La figure 3 montre quelques exemples d'images des bétons OC et HPC à différentes températures. La taille réelle des images est de 75 x 75 mm². Pour réduire la variabilité des images, les mêmes échantillons subissent tous les cycles de chauffage et de refroidissement.

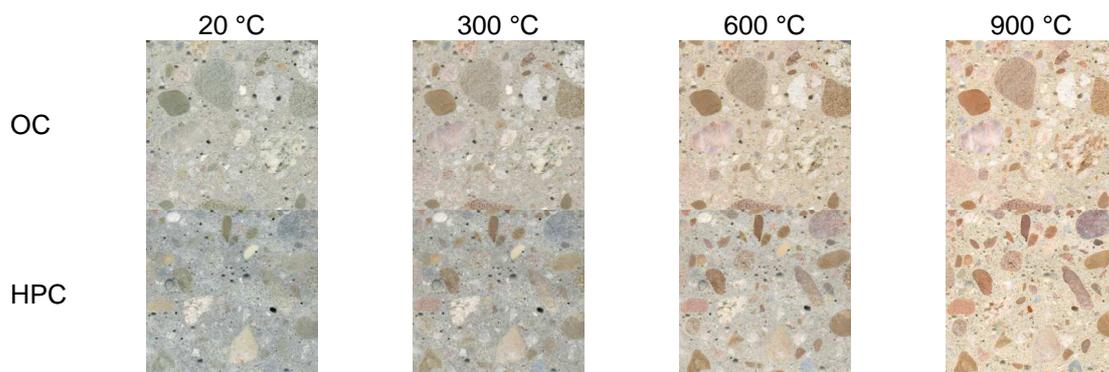


Figure 3. Images d'OC et HPC à différentes températures

3.3. Échantillons chauffés rapidement, avec gradient thermique

Des petits blocs de béton (30 x 30 x 15 cm) ont été chauffés alors qu'ils étaient positionnés à la place de la porte du four de laboratoire Nabertherm (voir la figure 4) : les échantillons sont soumis à un flux thermique unidirectionnel lorsqu'ils sont chauffés de cette manière. Les conditions de chauffage permettent d'obtenir un gradient thermique dans l'épaisseur des petits blocs. Le gradient thermique induit une variation de couleur à l'intérieur de la section de l'élément en béton. Tous les tests ont été réalisés après au moins 90 jours de cure. Lors du coulage, des thermocouples de type K ont été noyés au centre des blocs à une profondeur de 1, 3, 5, 7, 9 et 11 cm de la surface chauffée. Cela a permis le suivi en continu de la température pendant le chauffage en utilisant un dispositif informatique d'acquisition LUMEL KD7. Les petits blocs ont été chauffés à la température maximale possible pour ce four. Le chauffage a été arrêté lorsque la température mesurée à la surface des blocs a atteint la valeur de 900 °C. Pendant l'essai, la température maximale mesurée à une profondeur de 1 cm a été de 685 °C pour OC et 770 °C pour HPC. La vitesse de chauffage a été de 25 °C/min pendant les dix premières minutes puis décroît et variait entre 1 et 4 °C/min entre la trentième minute et la fin du chauffage. Comme le montre la figure 5, lorsque la température atteint 100 °C, des plateaux de température sont visibles et sont dus à la vaporisation de l'eau et au caractère endothermique de cette réaction. La figure 6 montre les valeurs de température maximale qui ont été atteintes aux différentes profondeurs dans les blocs d'OC et HPC.

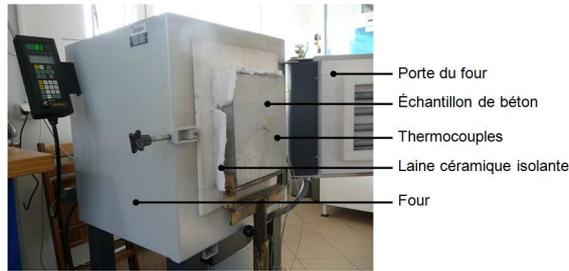


Figure 4. Vue du four électrique et de l'échantillon de béton positionné à la place de la porte du four.

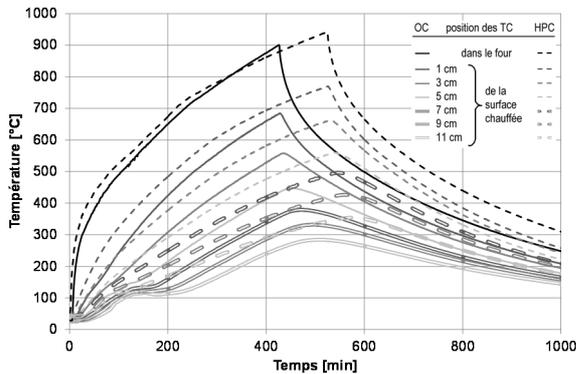


Figure 5. Évolution de la température mesurée par des thermocouples placés dans les échantillons de béton (OC et HPC) positionnés à la place de la porte du four.

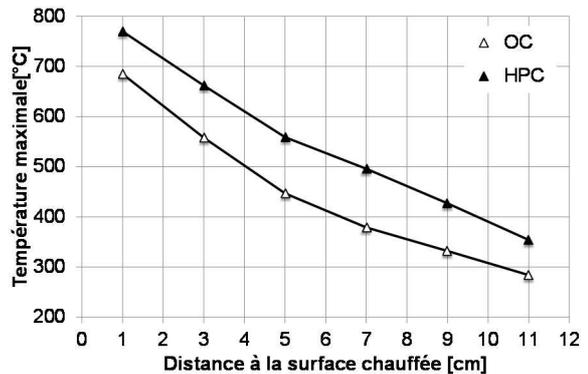


Figure 6. Évolution de la température maximale, dans l'épaisseur, mesurée par des thermocouples placés dans les échantillons de béton (OC et HPC) positionnés à la place de la porte du four.

4. ANALYSIS DES IMAGES DES PETITS ECHANTILLONS

Pour chaque image, deux décompositions de couleurs sont étudiés: RVB (rouge, vert, bleu) et TLS (teinte, luminosité, saturation). Pour chaque niveau de chaque composant, le nombre de pixels est compté, ce qui permet de tracer des histogrammes pour chaque composant. Ces histogrammes ont été normalisés en divisant la fréquence de chaque classe de couleur par le nombre total de pixels dans l'image.

4.1. Décomposition RVB

L'influence de la température sur les histogrammes a déjà été étudiée (Hager et al., 2013a). L'évolution de la valeur maximale de l'histogramme et l'intensité correspondante, avec la température, a été caractérisée. Les figures 7, 8 et 9 montrent des histogrammes de rouge, vert et bleu à 20, 200, 400, 600, 800 et 1000 °C. Ces résultats ont été obtenus à partir des échantillons prismatiques d'OC et de HPC. Cependant, les comparaisons entre les histogrammes des deux bétons ne sont pas triviales. L'élargissement de la base des histogrammes est notable, en particulier pour le bleu. Il correspond à l'apparition de nouvelles intensités de bleu avec la température. En outre, les histogrammes se décalent nettement vers les plus hautes intensités à partir de 800 °C, ce qui correspond à l'apparition de couleurs très claires.

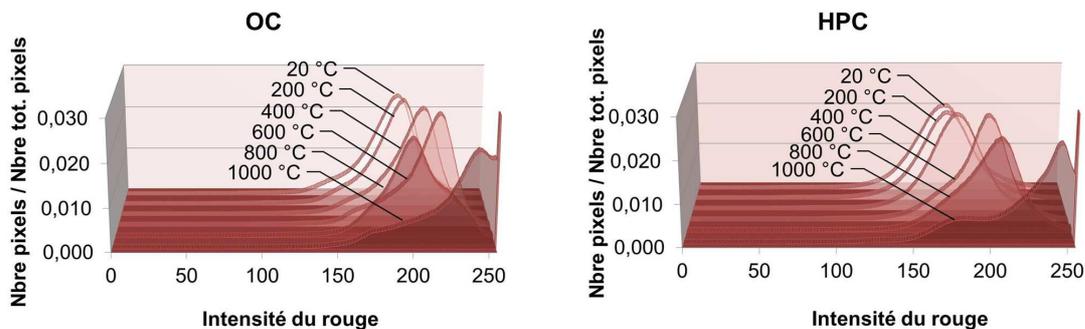


Figure 7. Histogrammes du rouge pour différentes températures.

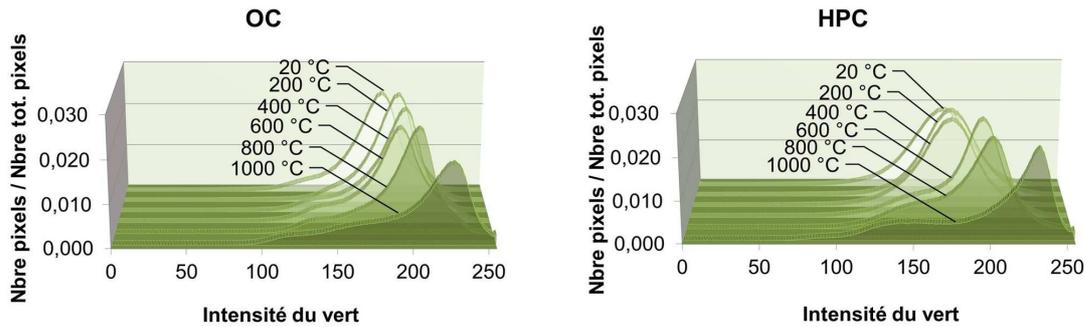


Figure 8. Histogrammes du vert pour différentes températures.

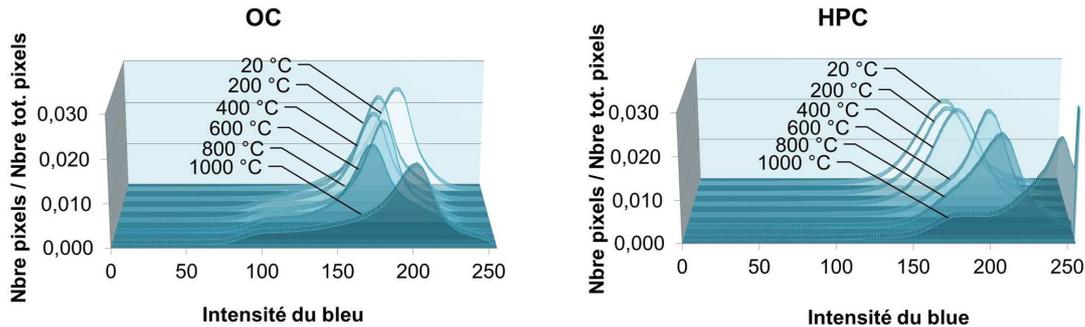


Figure 9. Histogrammes du bleu pour différentes températures.

4.2. Décomposition TLS

Une autre représentation fréquemment utilisée pour l'analyse d'images est la transformation TLS, où T définit la teinte, L la luminance et S la saturation (HSI en anglais). Elle permet de caractériser la couleur en coordonnées polaires, dans le plan à luminance constante après normalisation des composantes. Cette décomposition s'avère pertinente pour le traitement d'images puisque son interprétation s'apparente au mécanisme de perception des couleurs par l'œil humain (Hui et al., 2008). La décomposition TLS est reconnue comme offrant divers avantages pour l'analyse et le traitement d'images : les paramètres T et L sont insensibles aux variations de lumière et fiables d'un point de vue segmentation chromatique ; ils sont ainsi particulièrement adaptés à l'interprétation des images réelles.

Les paramètres T, L et S sont donc calculés d'après la décomposition RVB :

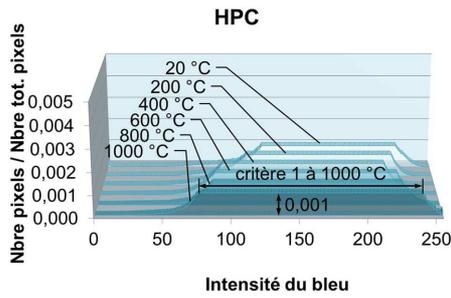
$$\text{If } R = G = B : H = 0 \quad \text{If } B \leq G : H = \theta = \arccos \frac{1}{2} \frac{(R - G) + (R - B)}{\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}} \quad \text{If } B > G : H = 360 - \theta$$

$$I = \frac{R + G + B}{3 \times 255} \quad \text{If } R = G = B = 0 : S = 0 \quad \text{If } \max(R, G, B) \neq 0 : S = 1 - \frac{\min(R, G, B)}{I}$$

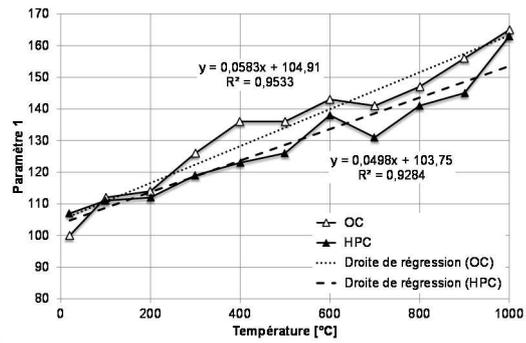
4.3 Proposition de critères

Cette étude a été menée afin de déterminer des critères d'analyse colorimétrique à la fois fiables et universels, qui permettront d'estimer la température maximale atteinte dans un matériau cimentaire. Parmi les paramètres testés, deux sont issus de la décomposition RVB et un de l'analyse TLS sont retenus.

Le premier paramètre correspond à la largeur de l'histogramme de distribution normé (i.e. le nombre de pixels divisé par le nombre de pixels total de l'image) d'intensité du bleu pour une valeur en ordonnées de 0,001. La figure 10 présente l'évolution de ce premier paramètre, nommé critère 1, avec la température d'exposition. Ces valeurs ont été calculées d'après l'analyse des images des petits échantillons. L'évolution de ce critère 1 avec la température est plus ou moins linéaire et semblable pour les deux types de béton, OC et HPC. L'équation de la droite de régression linéaire des valeurs mesurées est indiquée sur la figure 10. La sensibilité de ce critère est éprouvée sur les numérisations de petits blocs positionnés à la place de la porte du four.



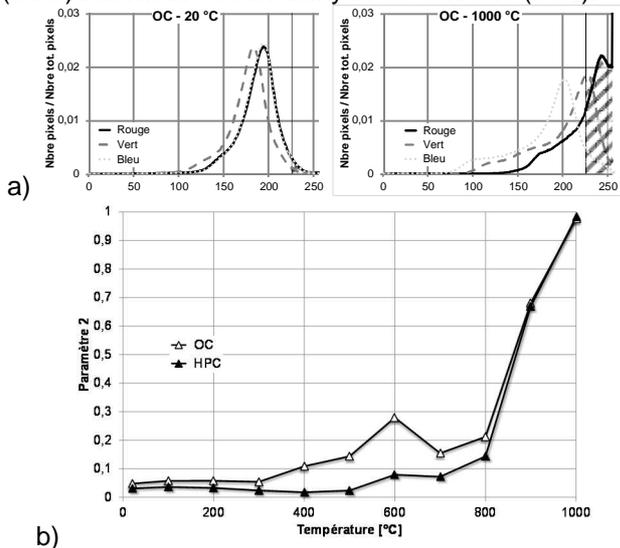
a)



b)

Figure 10. a) Histogrammes du bleu d'OC coupé à l'ordonnée 0,001 correspondant au paramètre 1
b) Évolution du paramètre 1 avec la température pour les petits échantillons d'OC et de HPC.

Le deuxième paramètre de colorimétrie, nommé critère 2, correspond à la somme normalisée de pixels pour les couleurs les plus claires, c'est à dire pour des intensités entre 225 et 255, des trois histogrammes (rouge, vert et bleu). Ce paramètre reste quasiment constant jusqu'à 800°C et augmente très faiblement pour des températures entre 900 et 1000°C. Il peut ainsi être utilisé pour localiser les zones du béton soumises à des températures au-delà de 800°C. Cette augmentation sensible de l'intensité - traduisant un éclaircissement - peut être attribuée à la variation de couleur liée à la décomposition au-delà de 700°C de la calcite (CaCO_3) de couleur vive en oxyde de calcium (CaO) blanchâtre et en dioxyde de carbone (CO_2).



a)

b)

Figure 11. a) Histogrammes du rouge, vert et bleu à 20 et 1000°C (valeur limite critère 2 = 225).
b) Evolution du critère 2 avec la température

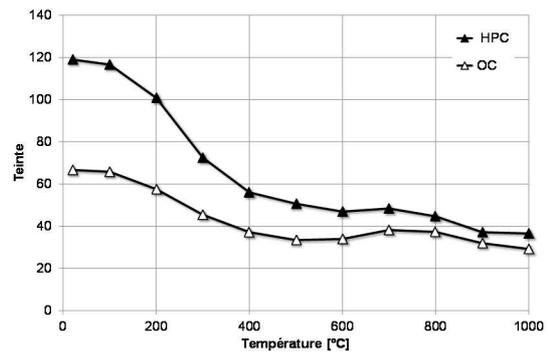


Figure 12. Évolution du critère 3 avec la température pour les petits échantillons d'OC et HPC.

Le troisième critère est issu de la décomposition TLS. On lui attribue la valeur moyenne de la teinte, T , paramètre le plus sensible à la variation de couleur induite par l'exposition en température. La figure 12 représente l'évolution du critère 3 avec la température dans les petits échantillons. Le critère 3 varie entre 65 et 30 pour le béton ordinaire, et 120 et 40 pour le béton à hautes performances. La valeur 120 correspondant au jaune et 0 au rouge, cette diminution du critère 3 traduit une évolution de la couleur vers le rouge. Ceci est relaté dans la littérature par Short (Short, 2001) et Hager (Hager, 2013a). ce rougissement est principalement attribuée à l'oxydation des minéraux riches en fer. Les granulats contenant des éléments ferreux (i.e. des minéraux de type limonite, hématite, jarosite ou goethite) subissent un changement de couleur marqué dès qu'ils sont chauffés au-delà de 250°C.

5. ANALYSE DES ÉCHANTILLONS CHAUFFÉS SOUS FORT GRADIENT THERMIQUE

Après chauffage, les deux petits blocs de béton ordinaire et de béton hautes performances ont été découpés (voir figure 13a) et quatre surfaces sciées ont été numérisées en images de plus de deux millions de pixels chacune. Dans la figure 13b, la variation de couleur selon le gradient thermique dans une image d'une éprouvette du OC est clairement visible : proche de la surface chauffée le

béton prend une coloration brunâtre suite au rougissement du matériau, alors que plus loin la teinte reste grise. Ces images numériques ont été divisées en bandes de 10 mm de hauteur et de 150 mm de long, parallèlement à la surface chauffée. Les histogrammes RVB de chaque bande ont été obtenus et normalisés selon la méthode de traitement d'images décrite précédemment, puis analysés selon les trois critères définis.

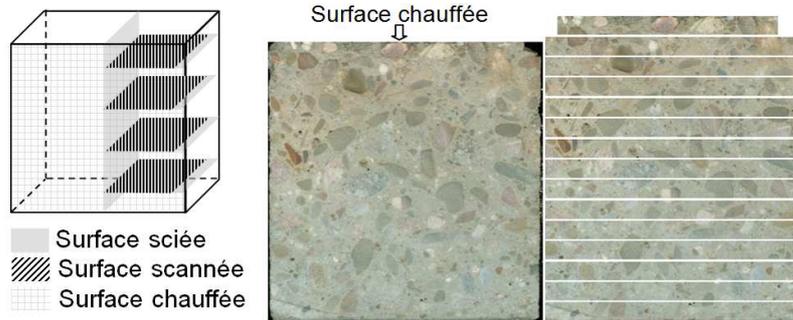


Figure 13. Procédure de découpe des blocs (à gauche), numérisation d'une surface d'OC et découpe de l'image en bandes (à droite).

5.1 Analysis with the RGB decomposition

Le critère 1 a été appliqué à chaque bande et pour chacune la température atteinte à été calculée en utilisant l'équation de la régression de la figure 10. La figure 14 superpose les courbes de température réelle atteinte dans le matériau (mesurée par des thermocouples) et prédite selon le critère 1, en fonction de la distance à la surface chauffée, et ce pour les deux bétons. Le critère 2 ne peut ici être appliqué puisque dans cet essai la température maximale atteinte à 1 cm de la surface des petits blocs est de 680°C pour le béton ordinaire et de 770°C pour le béton à hautes performances.

Pour le béton ordinaire, la prédiction de la température est relativement précise, que ce soit pour des distances proches ou éloignées de la surface chauffée. En revanche, les températures prédites dans le béton à hautes performances sont relativement éloignées de la réalité. Ceci peut être en partie lié à la taille insuffisante des images prises des petits blocs et à la variation du procédé de numérisation des blocs et des petits échantillons. En effet, ces derniers sont sciés, chauffés, refroidis puis numérisés alors que les blocs sont chauffés, refroidis avant d'être découpés et numérisés.

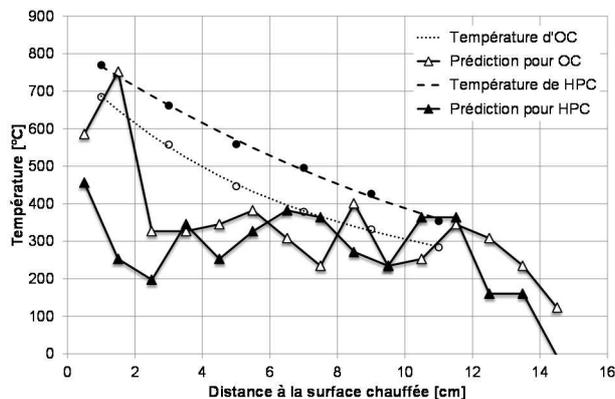


Figure 14. Critère 1 pour les blocs d'OC et HPC en fonction de la distance à la surface chauffée.

5.2 Analyse selon la décomposition TLS

Le critère 3 est évalué pour chaque bande. La figure 15 montre son évolution (valeur moyenne de la teinte) en fonction de la distance à la surface chauffée. Il est à noter que les courbes relatives aux images des différentes tranches sont très proches pour un même béton. Ces courbes suivent la même tendance que celles obtenues pour les petits échantillons (voir § 4.3), bien que leurs valeurs soient différentes. Ceci s'explique par le caractère transitoire du chauffage dans les blocs, alors que dans les petits échantillons le critère 3 est calculé dans un matériau où la température cible est atteinte et une fois que toutes les réactions chimiques qui s'effectuent à cette température se sont opérées.

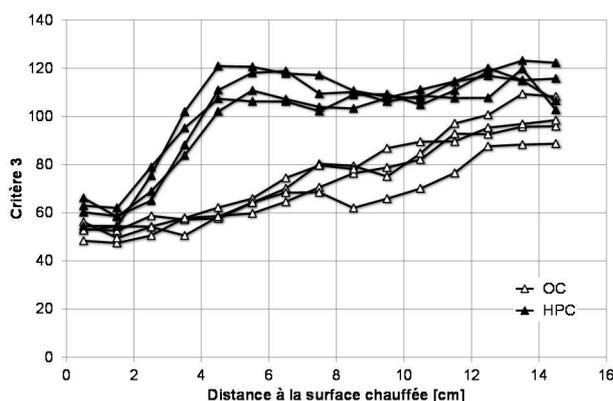


Figure 15. Critère 3 pour les blocs d'OC et HPC en fonction de la distance à la surface chauffée.

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Lors d'un incendie réel, les températures, dans une section de béton ne sont pas homogènes. Un gradient thermique est observé, la température des couches superficielles augmentant beaucoup plus rapidement que la température au cœur du béton. Le présent document présente une nouvelle méthode pour l'application de l'analyse de la couleur pour l'estimation de la température maximale à laquelle un béton a pu être exposé au cours d'un incendie. Le type et la composition minéralogique des granulats (siliceux, calcaires...) joue un rôle important dans le changement des couleurs du béton chauffé en raison de leur fraction volumique élevée, supérieure à 70 %. L'évaluation du changement de couleur du béton est une tâche complexe. Cette difficulté est principalement liée à l'hétérogénéité du béton et à la distribution irrégulière des granulats et de la pâte de ciment dans l'image.

L'évolution des rouges, verts et bleus ainsi que des composants TLS avec la température a été étudiée et des critères d'analyse colorimétrique pour la prédiction de la température maximale atteinte par le béton lors d'un incendie ont été proposés. Les images ont été réalisées avec un scanner plat. En l'absence d'étalonnage, l'évolution de la couleur du béton est étudiée entre 20 °C et une température élevée. Deux paramètres d'analyse colorimétrique ont été développés à partir des histogrammes RVB, et un troisième à partir de la décomposition TLS.

Le paramètre 1 correspond à la largeur de la base de l'histogramme du bleu. Il augmente significativement et de manière quasi-linéaire avec la température.

Une augmentation très importante du nombre de pixels ayant l'intensité du rouge, du vert ou du bleu supérieur à 225 entre 800 et 900 °C a pu être observée. Cette observation a été transformée en paramètre 2 et correspond à l'apparition de couleurs claires entre 800 et 900 °C.

Le troisième paramètre d'analyse colorimétrique correspond à la valeur moyenne de la teinte de l'image dans la décomposition TLS. Il a été trouvé que le paramètre 3 diminue significativement avec la température. Ceci correspond à la coloration rougeâtre qui apparaît avec l'augmentation de la température et correspond à des processus d'oxydation des minéraux contenant du fer.

L'analyse de la couleur a été réalisée sur un béton ordinaire (OC) et un béton à hautes performances (HPC) différant principalement par leur rapport eau/ciment. L'évolution de la couleur des bétons OC et HPC chauffés peut être décrite par l'évolution des paramètres 1, 2 et 3 mentionnés ci-dessus. Ces paramètres évoluent d'une manière similaire avec la température pour OC et HPC, mais sont décalés. Pour valider l'utilisation de ces paramètres d'analyse colorimétrique pour l'analyse post-feu du béton, de petits blocs de béton ont été chauffés sur une face et les images ont été analysées en utilisant des paramètres proposés. Les conditions de chauffage ont permis le développement d'un gradient thermique dans l'épaisseur des blocs. Celui-ci induit une variation de couleur à l'intérieur de la section de béton. L'analyse des images de la section transversale en utilisant des paramètres 1 et 3, ne permet pas d'obtenir une évaluation précise de la température du béton atteinte au cours du chauffage. Néanmoins, le paramètre 1 a bien les valeurs attendues au niveau de la surface chauffée et loin de la surface chauffée. Le paramètre 3 évolue comme prévu avec la distance à partir de la surface chauffée même si les valeurs ne sont pas celles attendues. D'autres recherches sont nécessaires afin d'évaluer l'influence de la durée de chauffage sur l'évolution de la couleur du béton. Comme la couleur du béton est liée aux réactions chimiques qui ont lieu au cours du chauffage, elle peut également être influencée par la durée de l'exposition à haute température. Cela expliquerait les écarts entre les valeurs obtenues entre les blocs de béton chauffés rapidement sur une face et les petits échantillons chauffés lentement.

Le paramètre 2 permet de trouver les zones de béton dans lesquelles la température a dépassé 800 ou 900 °C. Ce paramètre d'analyse colorimétrique, qui correspond à la somme des pixels correspondant aux couleurs qui ont l'intensité du rouge ou du vert ou du bleu supérieure à 225, augmente brusquement entre 800 °C et 90 °C.

D'autres travaux doivent être menés afin d'affiner les paramètres d'analyse colorimétrique. L'étude de bétons à base de granulats de différentes natures permettra de valider les paramètres de l'analyse colorimétrique pour d'autres compositions minérales de granulats. On s'attend à ce que le changement de couleur dans du béton contenant des additifs minéraux (par exemple des fumées de silice) puisse être différentes également. L'analyse des images en séparant la pâte de ciment et les granulats est en cours.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été soutenue par la bourse du centre de recherche national polonais N N506 045 040.

RÉFÉRENCES

- Annerel, E. et Taerwe L. (2009) Revealing the temperature history in concrete after fire exposure by microscopic analysis, *Cement and Concrete Research*, 39:1239-1249.
- Colombo, M. et Felicetti, R. (2007) New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures, *Fire Safety Journal*, 42:461-472
- Felicetti, R. (2004) Digital camera colorimetry for the assessment of fire-damaged concrete, *Workshop: Fire Design of Concrete Structures: What now? What next?*, Milan, p. 211–220.
- 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, *6th international conference on structures in fire*, Chicago, Michigan, USA, 841-847.
- Colour change in heated concrete
- Hager, I. (2013) Colour change in heated concrete, *Fire Technology*, 49.
- Hager, I. (2013a) Colour Change in Heated Concrete, *Fire Technology*, Volume 49, (DOI: 10.1007/s10694-012-0320-7).
- Hager, I. (2013b) Behaviour of cement concrete at high temperature, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences - Technical Sciences*, 61 n°1:145-154.
- Hui, Z., Qi, L. et Huajun, F. (2008) Multi-focus color image fusion in the HSI space using the sum-modified-laplacian and a coarse edge map, *Image and Vision Computing*, 26:1285-1295.
- LCPC N° 62 (2005) Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie. Publication du *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, Paris, France, p. 114 (in french).
- Luo, H.L. et Lin D.F. (2007) Study the surface colour sewage sludge mortar at high temperature, *Construction and Building Materials*, 21:90-97.
- RILEM TC (1995) Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, Recommendations, Part 3: Compressive strength for service and accident conditions, *Materials and Structures*, 28 : 410-414.
- Short, N.R., Purkiss, J.A. et Guise, S.E. (2001) Assessment of fire damaged concrete using colour image analysis, *Construction and Building Materials*, 15:9-15.