
Evolution des résistances des mortiers aux hautes températures

Effet de la nature du sable

Benouis Abdelhalim^{1*}, Bechiri Farouk²

¹*Chef d'équipe Matériaux, Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique LGCH, (24000) Université de Guelma.*

²*Doctorant, Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique LGCH, (24000) Université de Guelma.*

* benouis_h@yahoo.fr

RESUME. L'élévation de la température altère la résistance mécanique du béton et des mortiers du fait des désordres résultants d'une part, de la dilatation thermique, et d'autre part, de la transformation physique et chimique des granulats.

La prévision de ce comportement aux hautes températures implique donc la connaissance de l'évolution des variations des propriétés mécaniques. Cette étude s'intéresse à l'évolution des résistances résiduelles, en traction et en compression de cinq mortiers avec des sables de différentes natures. Il s'agit de trois sables calcaires issus de carrières différentes (SC1, SC2 et SC3), un sable siliceux de mer (SM) et un sable normalisé SN.

Six éprouvettes de chaque mortier ont été chauffées pour chaque température cible, 200°C; 400°C et 600°C. L'élévation de la température a été de 2°C/mn.

Les mortiers à base de sable siliceux de mer (MSM) donnent les résistances les plus faibles pour tous les paliers de température. Les résistances des mortiers normaux sont aussi inférieures à celles des mortiers de sables calcaires. Ces derniers présentent des résistances proches. Le mortier MSC3 présente, à 200°C, la chute de la résistance la plus importante (32%). A 400°C ; la chute de la résistance continue, à l'exception de celle des mortiers MSC3 et MSN, où on remarque un regain de la résistance par rapport à celle à 200°C. Tous les mortiers ont présenté un regain de la résistance à 600°C comparativement à celles à 400°C (à l'exception du mortier normal MSN). La température seuil de perte des résistances se situait donc entre 400°C et 600°C pour les mortiers MSC1, MSC2, MSM et entre 200°C et 400°C pour les mortiers MSC3 et MSN. Ce dernier a présenté une augmentation de résistance jusqu'à 400°C puis une légère baisse. Ce regain de résistance pourrait s'expliquer par l'accélération, à haute température, de l'hydratation de ces mortiers mal hydratés

Les résultats des résistances à la compression semblent confirmer les tests en traction. La plus importante chute de résistance en compression est celle du mortier MSC3 (comme pour la traction), elle est de 43% à 200°C. Les mêmes remarques

peuvent être avancées pour l'évolution des résistances à la compression aux autres températures. Après une chute des résistances, on observe un regain à 600°C. Cependant, la résistance du mortier normal continue sa chute à 600°C. On remarque quelques différences dans l'évolution des résistances en compression et celles en traction. Ce qui laisse suggérer qu'il existe d'autres paramètres qui n'affectent pas cette évolution de la même manière.

ABSTRACT. High temperatures deteriorate mechanical strength of concretes and the mortars caused by dilation and physical and chemicals transformations aggregates. The behavior at high temperatures implies to know mechanical properties variations.

This study is interested to evaluate residual strengths, in traction and compression of five mortars with different sands. Three calcarious sands from different careers (SC1, SC2 and SC3), a siliceous sand (SM) and a normal sand (SN).

Six samples of each mortar were heated to reach a temperature of 200°C, 400°C and 600°C with a velocity of 2°C/mn.

The mortars with siliceous sand of sea (MSM) give the lowest strengths for all temperatures.

Strengths of normal mortar are also lower than those of calcarious sand mortars, these mortars have similar strengths.

Mortar MSC3 presents, at 200°C, the most significant decrease of strength (32%).

At 400°C; strengths continues to decrease, except for mortars MSC3 and MSN, where we notice a strength increase compared at 200°C.

All mortars presented an increase of strength resistance at 600°C compared to those at 400°C (except for normal mortar MSN).

Temperature of strength decrease was thus between 400°C and 600°C for mortars MSC1, MSC2, MSM and between 200°C and 400°C for mortars MSC3 and MSN.

This last presented an increase of strength to 400°C then a less decrease.

This increase of strength could be explained by hydration acceleration, at high temperature, of these badly hydrated mortars.

Compressive tests seem confirmed traction tests. Mortar MSC3 has most decrease of compressive strength (same in traction), it is 43% at 200°C. Same remarks can be advanced for compressive strengths at the other temperatures. After a decrease of strengths resistances, we observe a increase at 600°C However, the normal mortar strength continues its decrease at 600°C

We notice some differences in the strength evolution between compression and traction.

What lets suggest that there are other parameters which do not affect this evolution differently.

MOTS-CLES : Mortier, résistances, sable, hautes températures, résiduelles.

KEYORDS : Mortar, strength, sand, high temperatures, residual.

1. Introduction

L'élévation de la température altère la résistance mécanique du béton et des mortiers du fait des désordres résultants d'une part, de la dilatation thermique, et d'autre part, de la transformation physique et chimique des granulats par un changement de la structure des minéraux (Gaweska, 2004). La prévision du comportement aux hautes températures implique donc la connaissance de l'évolution des variations des propriétés mécaniques. Cette étude s'articule sur la comparaison de l'évolution des résistances résiduelles, en traction et en compression de cinq mortiers avec des sables de différentes natures. Il s'agit de trois sables calcaires issus de carrières différentes, un sable siliceux de mer et un sable normalisé.

2. Sables

Les sables qui ont servi lors de cette étude ont été référenciés comme indiqué dans le tableau 1.

Sable	Nature	Provenance
SC1	Calcaire	Carrière 1
SC2	Calcaire	Carrière 2
SC3	Calcaire	Carrière 3
SM	Siliceuse	Littoral (mer)
SN	Siliceuse	Normalisé

Tableau 1. Dénomination des sables

2.1. Caractéristiques physiques des sables

Les caractéristiques des différents sables, déterminées selon les normes en vigueur (NF EN 1097-3, 1998), sont indiquées dans le tableau suivant :

Caractéristiques		Sable				
		SC1	SC2	SC3	SM	SN
Masse volumique apparente (g/cm ³)		1.53	1.56	1.54	1.54	1.71
Masse volumique absolue (g/c m ³)		2.63	2.57	2.7	2.70	2.63
Equivalent de sable	E.S.V (%)	74	72	76	93	94
	E.S (%)	73	70	74	92	93
Teneur en eau (%)		0.22	0.23	0.27	0.33	-

Tableau 2..Caractéristiques physiques des sables

Les résultats indiquent que ce sont des sables propres à faible pourcentage de fines argileuses (NF EN 933-8, 1999) et conviennent parfaitement pour les bétons et mortiers de haute qualité.

2.1. Analyse granulométrique des sables

On regroupe les résultats de l'analyse granulométrique (NF EN 933-1, 2006) des cinq sables dans le même tableau 3.

Diamètre des mailles (mm)	Tamisât (%)				
	SC1	SC2	SC3	SM	SN
5	100	100	100	100	100
4	98,66	98	98,25	100	100
2	65,5	63,5	62,75	99,95	99,85
1	41,75	37,25	39,25	99,25	65,33
0,5	25,5	22,25	26,25	90,25	29,63
0,25	15,5	11,75	18,75	5,25	22,97
0,125	4,5	5	12,25	0,5	5,55
0,063	0,25	0,5	8	0,25	3,93
< 0,063	0	0	0	0	0

Tableau 3. Analyse granulométrique des sables

Le module de finesse est un facteur très important, qui nous permet de juger de la grosseur du sable, La propreté des sables est évalué par l'équivalent de sable (EN-933-8, 1999).

SABLE	SC1	SC2	SC3	SM	SN
M_f (%)	2,80 %	2,95 %	2,86 %	1,41 %	2,52 %
ESV	74	72	76	93	94
ES	73	70	74	92	93

Tableau 4. Module de finesse des sables

Pour les sables de carrières et le sable normalisé, le module de finesse est supérieur à 2.5 % ; ce qui caractérise les sables gros. Les modules de finesse des sables de carrière sont proches (2.85 en moyenne). Ils se trouvent dans le fuseau utilisé lors d'une recherche de résistances élevées. Ces sables (carrières) permettent aussi d'obtenir une ouvrabilité satisfaisante (M_f est compris entre 2.2 % et 2.8 %).

Le module de finesse du sable de mer (littoral) est inférieur à 2.2 % et a une majorité d'éléments fins et très fins ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau et par conséquent conduit à une faible résistance. Le sable normalisé est plus fin que les sables de carrière.

3. Confection des mortiers

Les différents mortiers ont tous la même composition, celle d'un mortier normal. Le ciment utilisé est un ciment CEM II-A classe 42,5. La dénomination des différents mortiers est en relation avec le sable utilisé, soit donc les mortiers MSC1, MSC2, MSC3, MSM et MSN.

Constituants	Ciment	Sable	Eau
Quantité (g)	450	1350	225

Tableau 5. *composition des mortiers*

Les éprouvettes (4x4x16 cm) confectionnées à partir de ces mortiers ont séjournées dans l'eau, après leur démoulage, 27 jours. Six éprouvettes de chaque mortier ont été chauffées pour chaque température cible, **200°C; 400°C et 600°C**. L'élévation de la température a été de 2°C/mn. Après refroidissement à l'air libre, les éprouvettes ont été conservées dans l'eau 24 h avant les essais. Les photos suivantes montrent le dispositif de chauffage (four) des éprouvettes et leurs états après échauffement.



Figure 1. *Dispositif de chauffage des éprouvettes*

3. Résultats et interprétations

3.1. Etats des éprouvettes

Les éprouvettes des différents mortiers ont gardé leur aspect initial après leur chauffage, on n'a noté aucun effritement. Les photos des figures suivantes montrent l'état des éprouvettes à leur sortie du four après leur chauffage à 400°C et 600°C.

On remarque par contre un changement de la couleur dû essentiellement à la présence de certains composés à base de fer (Neville, 2000). En effet, (Yuzer et *al.*, 2007) indiquent que les changements de couleur des mortiers peuvent nous renseigner sur l'effet des températures élevées sur les propriétés mécaniques pendant un feu. Les évolutions de la masse, des résistances en traction et en compression avec l'élévation de la température sont prospectées dans la suite de cette étude.



(a) Mortier MSM

(b) Mortiers MSC1 et MSM

Figure 2. Etats des éprouvettes à 400°C



Figure 3. Etats des éprouvettes à 600°C

3.2. Pertes de masse

Les résultats des pertes de masse sont résumés dans le tableau suivant :

Température (°C)	Perte de masse (%)				
	MSC1	MSC2	MSC3	MSM	MSN
200	5,83	3,41	2,91	6,50	3,23
400	9,45	10,25	10,00	9,66	9,17
600	10,92	10,91	11,23	11,38	10,65

Tableau 5. Perte de masse des différents mortiers

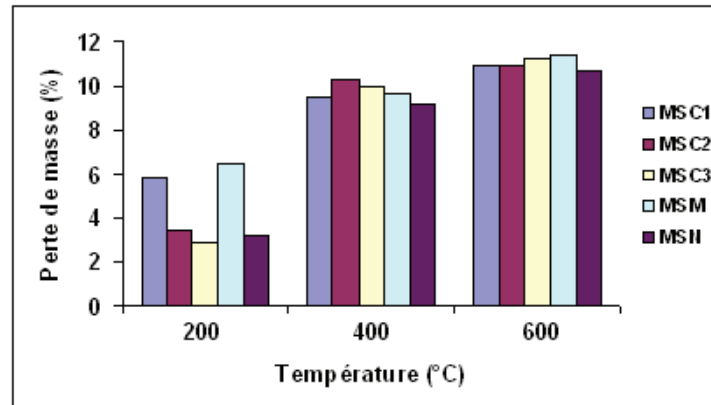


Figure 4. Perte de masse des mortiers

Le mortier MSC3 présente la perte la plus faible à 200°C, ce qui implique que la quantité d'eau liée aux grains est plus importante que dans les autres cas ainsi que la quantité d'eau nécessaire à la réaction. Le départ de l'eau libre et celle physiquement absorbée se situe à 105°C comme le souligne (Feraille, 2000). Les granulométries des trois sables calcaires sont presque identiques (tab. 3), cependant la fraction des grains inférieure à 0,125 mm est deux fois plus importante pour le sable SC3 par rapport aux sables SC1 et SC2.

Aux températures 400°C et 600°C, les pertes de masse des différents mortiers sont voisines. Entre 400 et 600 °c ; la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se décompose en chaux libre et il est noté la formation d'un réseau des microfissures connectées. La transformation du quartz α , présent dans les granulats, en quartz β est à 570°C (Robert et al. 2008) et se situe autour de la dernière température.

La variation de la perte de masse des mortiers entre 200°C et 400°C est plus considérable qu'entre 400°C et 600°C. Au delà de 200°C et jusqu'à 400°C, la porosité totale croit progressivement et le réseau poreux interconnecté devient plus grossier comme le note Khalifa (Khalifa et al., 1998).

L'effet de la nature du sable n'est visible qu'à la première température (200°C). Une perte de l'eau libre à 200°C, une perte de l'eau chimiquement liée entre 200 et 400°C et une perte liée aux dégradations des granulats entre 400 et 600°C.

3.3. Evolution de la résistance à la traction

Les résistances résiduelles en traction sont mentionnées dans le tableau 6 et la figure 5 donne les résistances relatives en traction.

Température (°C)	Résistances à la traction (MPa)				
	TYPES DE MORTIERS				
	MSC1	MSC2	MSC3	MSM	MSN
20	7.72	5.23	6.73	4.36	4.31
200	6,53	5,28	4,56	3,31	4,52
400	5,33	5,12	5,66	2,57	4,75
600	6,34	5,46	6,58	3,09	4,28

Tableau 6. Résistances résiduelles à la traction des mortiers

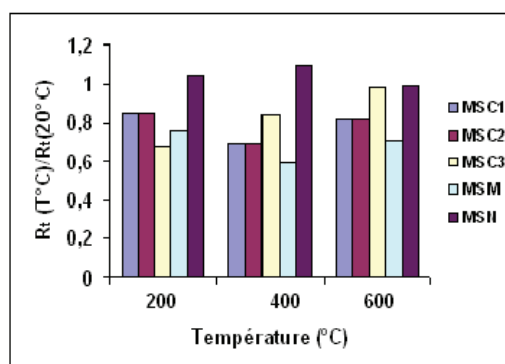


Figure 5. Résistances relatives en traction

Les mortiers à base de sable siliceux de mer (MSM) donnent les résistances les plus faibles et ceci pour tous les paliers de température (tab 6). Les résistances des mortiers normaux sont aussi inférieures à celles des mortiers de sables calcaires. Ces derniers présentent des résistances proches. Le mortier MSC3 présente, à 200°C, la chute de la résistance la plus importante (32%). Ce même mortier a été sujet à la perte de masse la plus importante. Même le séchage à 105°C utilisé habituellement pour faire partir l'eau libre du matériau, provoque la déshydratation du gel CSH contenu dans la pâte de ciment et donc le début de sa détérioration à des températures relativement faibles (Castellotea, 2004). Cette déshydratation intervient à plusieurs niveaux puisqu'elle est consommatrice d'énergie (Alarcon-Ruiz, 2003). A 400°C ; la chute de la résistance continue, à l'exception de celle des mortiers MSC3 et MSN, ou on remarque un regain de la résistance par rapport à celle à 200°C. Tous les mortiers ont présenté un regain de la résistance à 600°C comparativement à celles à 400°C (à l'exception du mortier normal MSN). La température seuil de perte des résistances se situait donc entre 400°C et 600°C pour les mortiers MSC1, MSC2, MSM et entre 200°C et 400°C pour les mortiers MSC3 et MSN. Ce dernier a présenté une augmentation de résistance jusqu'à 400°C puis une légère baisse. Ce regain de résistance pourrait s'expliquer par l'accélération, à haute température, de l'hydratation de ces mortiers mal hydratés.

3.4. Evolution de la résistance en compression

La figure représente les résistances relatives résiduelles en compression des différents mortiers pour chaque palier de température.

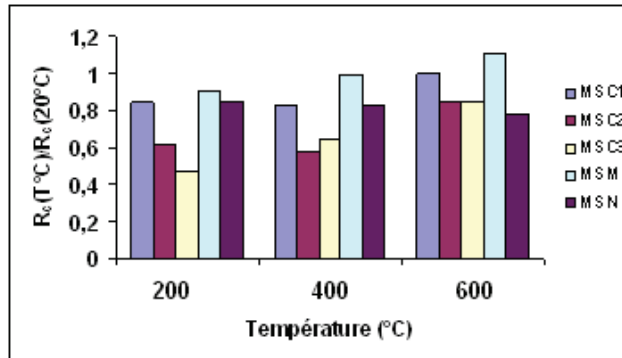


Figure 6. Evolution des résistances relatives en compression

Les résultats des résistances à la compression confirment les tests en traction. L'importante chute de résistance en compression est celle du mortier MSC3 (comme pour la traction), elle est de 43% à 200°C. Les mêmes remarques peuvent être avancées pour l'évolution des résistances à la compression aux autres températures. La majorité des granulats est généralement stable jusqu' à 600°C. Par contre, les granulats non siliceux peuvent subir des transformations chimiques et des réactions de décomposition à des températures inférieures à 600°C.

Après une chute des résistances, on observe un regain à 600°C de tous les mortiers. A l'exception du mortier normal. Ce gain de résistance est dû à une rigidification de la matrice et à l'accélération de l'hydratation (Noumowé, 1994) (Pimienta, 2001).

On remarque quelques différences dans l'évolution des résistances en compression et celles en traction aux hautes températures. Ce qui laisse suggérer qu'il existe d'autres paramètres qui n'affectent pas cette évolution de la même manière.

4. Conclusion

L'élévation de la température entraîne une déshydratation des composés hydratés de la pâte de ciment durcie. On a une formation d'eau libre dans les réseaux poreux du matériau susceptible de s'évaporer et donc de générer une perte de masse pour un échantillon donné. L'effet de la nature du sable sur la perte de masse n'a été visible qu'à la première température (200°C), car l'évaporation se produit à une température voisine de 100°C. Cette déshydratation provoque des modifications microstructurales qui influent sur les résistances mécaniques. On a pu noter qu'à 200°C, les valeurs des résistances en traction sont plus faibles que celles à la

température ambiante, à l'exception de celles des mortiers MSC2 et MSN, où on remarque un faible gain. En compression, tous les mortiers ont présenté une chute de la résistance (10% à 38%). Les mortiers à base de sable calcaires (sables concassés de carrières) subissent donc les chutes les plus importantes. A 400°C ; la chute des résistances continue, on note toutefois un regain de la résistance par rapport à celle à 200°C pour les mortiers MSC3 et MSN en traction et le mortier MSM en compression. Tous les mortiers ont presque présenté une augmentation de la résistance à 600°C comparativement à celle à 400°C. Cela pourrait s'expliquer par une rigidification de la matrice et l'accélération de l'hydratation.

5. Bibliographie

- Alarcon-Ruiz L., Analyse de l'évolution des propriétés microstructurales des bétons lors d'une élévation de la température, thèse de doctorat, ENPC Paris, 20034.
- Castellotea M. et al., «Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction», *Cement and Concrete Research*, Vol.34, p.1633–1644, 2004.
- Feraille – Fresnet A., Le rôle de l'eau dans le comportement à haute température des bétons, thèse de doctorat, ENPC Paris, 2000.
- Gaweska I., Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques-, thèse de doctorat, ENPC Paris, 2004.
- Khalifa P. et Tsimbroska M., «Comportement des BHP à hautes températures : état de la question et résultats expérimentaux», *Cahiers du CSTB*, Vol. 394, n°3078, 1998.
- NF EN 1097-3, *Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3 : méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire*, AFNOR, 1998.
- NF EN 933-8, *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8 : évaluation des fines - Équivalent de sable*, AFNOR, 1999.
- NF EN 933-1, *Essais pour déterminer les propriétés géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage*, AFNOR, 2006.
- Neville A., *Propriétés des bétons*, Paris, Eyrolles, 2000.
- Noumoe A. et al., «Effects of high temperature on high performance concrete (70°C-600°C) – strength and porosity, *Third CANMET/ACI Int. Conf.*, 24-28 mai 1994, Nice.
- Pimienta P. «Evolution des caractéristiques des BHP soumis à des températures élevées : Résistances en compression et modules d'élasticité», *Cahiers du CSTB*, Vol. 421, n°3352, 2001.
- Robert F. et al., *La durabilité des bétons face aux incendies*, Presses de l'ENPC, 2008.
- Yuzer et al., «Effects of elevated temperatures on properties of concrete», *Fire Safety Journal*, Vol. 42, n°8, 2007, p. 516-522.