
La carbonatation des bétons aux fortes additions calcaires.

Falih Rafie Moro^{1*} - Fouad Ghomari¹ - Mohamed Amine Boukli Hacène¹ - Omar Taleb¹ - Ahmed Loukili² - Emmanuel Rosière²

¹ Université Abou Bakr Belkaid, Laboratoire eau et ouvrages dans leur environnement, BP 230, Chetouane, Tlemcen, Algérie,

² Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique – UMR CNRS 6183, Ecole Centrale de Nantes, 1 rue de la Noé, BP 92101, F-44321 Nantes cedex 3

* E-mail : morofalih@hotmail.com

RESUME : La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel qui concerne tous les bétons. Une de ses principales conséquences est de favoriser la corrosion des armatures en les dépassivant. Ce phénomène mérite donc d'être examiné afin de mieux comprendre les pathologies souvent rencontrés dans les ouvrages en béton réduisant ainsi leur durabilité. Toutefois, le principal objectif de notre travail est de traiter à l'aide de l'approche performantielle le mécanisme de la carbonatation. A ce titre, nous nous sommes particulièrement intéressés à quantifier au laboratoire, l'influence de l'ajout des fillers calcaires sur la carbonatation des bétons ordinaires en utilisant un essai de carbonatation accéléré (enceinte de carbonatation). Les résultats de ce programme expérimental, présentent aussi l'évolution de la profondeur carbonatée des corps d'épreuve à 2 jours. En parallèle, des échantillons 16x32cm sont réalisés afin d'évaluer la résistance conventionnelle des bétons formulés.

ABSTRACT: Carbonation is a natural aging phenomenon concerning all concrete. One of its main consequences is to promote the corrosion of reinforcement. This phenomenon deserves therefore to be examined to better understand deterioration often encountered in concrete structures thereby reducing durability. However, the main objective of our work is to deal with the performance-based specifications to the mechanism of carbonation. As such, we are particularly interested in quantifying the influence of the addition of limestone on carbonation of ordinary concrete in the laboratory, using (pregnant with carbonation) accelerated carbonation test. The results of this experimental program, also present the evolution of the carbonate depth of specimens in 2 days. In parallel, of the 16x32cm samples are carried out to evaluate the conventional strength of formulated concrete.

Mots clés : Approche performantielle, Carbonatation, Durabilité, Résistance, Fillers.

Keywords: Performance-based specifications, carbonation, durability, strength, limestone

1. Introduction

Dans le béton armé et précontraint, l'association de l'acier avec le béton forme un couple bien assorti, au regard des performances offertes tant du point de vue du comportement mécanique que de la durabilité. Le béton ou le mortier qui protège physiquement et chimiquement l'acier des effets de la corrosion assure la durabilité des ouvrages. L'hydratation du ciment produit une solution interstitielle basique de pH élevé qui confère une stabilité permanente aux armatures noyées dans le béton.

Cependant, depuis une trentaine d'années environ, un certain nombre de constructions en béton armé laissent apparaître des dégradations plus ou moins prononcées limitant leur durée de vie. C'est en fait, l'évolution de la phase aqueuse interstitielle dont le pH diminue à la suite de la transformation des composés hydratés du ciment et qui n'offre plus de protection à l'acier. Il s'agit principalement de la réaction de carbonatation à partir du CO₂ contenu dans l'air qui est impliqué dans ce processus.

En effet, un béton moyen conservé en atmosphère ordinaire à environ 65% d'humidité relative, peut donner les valeurs moyennes suivantes :

- 5 mm de carbonatation après un an,
- 10 mm de carbonatation après quatre ans,
- 25 mm de carbonatation après 25 ans.

Suivant les ouvrages et après 25 ans, la profondeur carbonatée varierait entre 10 mm et 10 cm.

Ce phénomène de vieillissement naturel du béton qu'est la carbonatation résulte de la diffusion du CO₂ contenu dans l'air (à un taux de 0,03% à 0,05% en volume) dans les pores du béton, et les réactions consécutives de dissolution/précipitation avec les hydrates, notamment de la portlandite Ca(OH)₂, qui joue un rôle de tampon sur le pH, entraînent la consommation de bases alcalines présentes dans la solution interstitielle des bétons, aboutissant à une consommation du pH qui passe d'une valeur de 13 à une valeur inférieure à 9, ce qui engendre la dépassivation des aciers et par conséquent la corrosion est entamée. Les désordres associés correspondent alors, pour l'essentiel, à des fissures et à des épaufrures (dégradation du béton d'enrobage) consécutives aux gonflements provoqués par la formation d'oxydes et hydroxydes de fer sur les armatures. Ces dernières peuvent alors montrer des réductions de section importantes ou, au stade ultime, des ruptures ayant des conséquences graves sur la capacité portante des éléments de structure.

L'application de l'approche performantielle à la durabilité des bétons passe par la détermination précise des conditions d'exposition et des mécanismes de dégradation. Le contexte normatif sur la composition des bétons a pendant longtemps fondé la garantie de la durabilité sur une obligation de moyens : c'est l'approche performantielle prescriptive. Elle impose, pour chaque classe d'exposition, des valeurs limites en termes de rapport E/C maximal, de quantité de ciment C minimal, de résistance minimale et de quantité d'additions prises en compte maximale. Des compositions de bétons issues de cette approche pouvaient ne pas être en phase avec les objectifs de la durabilité.

Vint ensuite l'approche performantielle prédictive fondée sur les indicateurs de durabilité. Une telle approche a été développée dans le cadre d'un groupe de travail de l'AFGC. Celle-ci est basée sur des propriétés fondamentales du matériau, les indicateurs de durabilité et sur la spécification de critères performantiels adéquats relativement à ces indicateurs. Elle fait également intervenir des modèles prédictifs. L'objectif est de concevoir des bétons susceptibles de protéger les ouvrages en béton armé contre une dégradation donnée.

Depuis l'entrée en vigueur de la norme EN 206-1, des progrès ont été intégrés à travers l'approche performantielle de la formulation des bétons, qui elle est fondée sur une obligation de résultats : c'est le concept de performance équivalente du béton.

Selon ce principe, il doit être prouvé que le béton à qualifier a une équivalence de performance avec celle d'un béton de référence, en particulier pour ce qui est de son comportement vis-à-vis des agressions de l'environnement et sa durabilité, conformément aux exigences pour la classe d'exposition concernée.

Pour appliquer ce principe, il convient donc de justifier d'une part de méthodes basées sur des essais approuvés et vérifiés représentatifs des conditions réelles, et contenant des critères de performance approuvés (Annexe J de la norme EN 206-1) pour les essais performantiels, et d'autre part de choix pertinents pour les bétons de référence.

C'est sur ce concept d'équivalence de performance que notre travail est basé, et dans le cadre de la démarche comparative proposée, nous avons choisi un béton ordinaire, référencié (BO1) issu d'une composition optimisé (Boukli Hacène et al. (Avr. 2009, Oct. 2009) et Boukli Hacène (2010)).

Notre travail consiste donc à aller dans le sens des écobétons, traiter le mécanisme de la carbonatation, à l'aide de l'approche performantielle, par la confection d'un béton avec ajouts de fillers calcaires.

2. Matériaux utilisés

2.1. Ciment

Le ciment utilisé est le CEM II/A 32,5 qui répond à la norme Algérienne NA 44 de la société des ciments de Béni-Saf relevant de la Wilaya de Ain-Témouchent.

2.2. Granulats

Les granulats utilisés proviennent de la carrière Djebel Abiod de Sidi Abdelli, Tlemcen, appartenant à l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG). Les granulats

calcaires concassés sont commercialisés suivant les classes granulaires suivantes : sable 0/3, gravillons de classes 3/8, 8/16 et 16/25.

2.3. *Fillers calcaires*

Les fillers calcaires proviennent aussi de la carrière de Djebel Abiod de Sidi Abdelli. La roche est de nature calcaire dolomitique.

Les fillers calcaires présentent une densité absolue = 2,64 t/m³

3. Programme expérimental

Dans le cadre écologique, il est opportun d'aller vers la formulation des éco-bétons. A ce titre notre objectif est de voir l'influence des bétons fortement dosés en additions minérales, notamment les fillers calcaires, sur la carbonatation du mélange.

Notre programme expérimental consisterait à substituer des quantités de ciment par des proportions de fillers de 30% à 72% (notés de BO2 à BO5) i.e. d'aller au delà de la teneur maximale exigée par la norme EN 206-1.

Le rapport granulats/sable (G/S) optimisé est égal à 1,68.

Les résultats obtenus ont été comparés avec le BO1 qui est d'ailleurs de même composition, mais constitue uniquement de ciment (Taux de filler =0).

Les bétons obtenus ont été soumis, d'une part, à l'essai performantiel choisi pour la démonstration de l'équivalence de performances – l'essai de carbonatation accéléré, mis en œuvre selon la norme NF P18-458. D'autre part, afin d'étudier l'influence de la porosité et des propriétés de transfert sur les performances de bétons exposés à la carbonatation, des mesures de porosité accessible à l'eau sont effectuées sur les matériaux sains.

3.1. *Composition des bétons étudiés:*

Selon l'approche prescriptive, les bétons ainsi formulés ne sont pas conformes, car ils devraient satisfaire les 3 conditions suivantes :

$$\text{Liant } \text{éq} \geq 266 \text{ kg /m}^3 \quad (1.1)$$

$$\frac{E_{eff}}{\text{Liant } \text{éq}} \leq 0,60 \quad (1.2)$$

$$\frac{A}{A+C} \leq 0,25 \quad (1.3)$$

Le liant équivalent est défini, selon le concept du coefficient k ((NF EN 206-1, § 5.2.5.2.1), comme suit :

$$\text{Liant équivalent} = C + k A \quad (1.4)$$

Où :

C : est la quantité de ciment, de type CEM I 42,5 N, CEM I 42,5 R, CEM I 52,5 N, CEM I 52,5 R (en kg/m³);

A : est la quantité d'addition prise en compte dans le liant équivalent, et ne doit pas dépasser la valeur maximale définie par le rapport A/(A+C) pour chaque type d'addition (soit 0,25 pour le cas des fillers calcaire) ; si une plus grande quantité d'addition est utilisée, elle ne doit pas être prise en compte ni pour le calcul de l'eau efficace/liant équivalent ($E_{\text{eff}}/\text{Liant équivalent}$) ni pour le dosage minimal en liant équivalent.

La valeur minimale du liant équivalent (1.4) est de 266 kg/m³ (Tableau NA.F.1 de l'annexe NA.F de la norme NF EN 206-1)

E_{eff} : Eau efficace, qui résulte de la différence entre la quantité d'eau totale contenue dans le béton frais et la quantité d'eau absorbable par les granulats.

k : facteur prenant en compte l'activité d'une addition, soit 0,25 pour les fillers calcaires.

Etant donné que nous avons utilisé un ciment CEM II/A 32.5, le coefficient k devient nul. (tableau NA.3 du coefficient k, norme NF EN 206-1), donc la formule (1.4) devient

$$\text{Liant équivalent} = C \quad (1.5)$$

Les formulations des bétons étudiés sont consignées dans le tableau n° 1. Il est clair que les valeurs limites des teneurs minimales en Liant équivalent et de rapports Eau efficace/Liant équivalent n'ont pas été respectées, ceci dans le but d'étudier la variabilité des performances pour des bétons relevant de la même classe d'exposition.

Les quantités des différents constituants ont été ramenées au **volume de béton constant**.

Tableau 1. Composition des cinq formulations de béton.

Formulation	BO1	BO2	BO3	BO4	BO5
G 16/25 (kg/m ³)	533	518	498	480	463
G 8/16 (kg/m ³)	432	420	404	389	375

G 3/8 (kg/m ³)	144	140	135	130	125
Sable 0/3 (kg/m ³)	660	642	617	594	573
Ciment (kg/m ³)	350	306	262	220	182
Filler calcaire (kg/m ³)	0	136	262	378	486
Eau efficace	175	170	164	158	152
Liant équiv. (C + kA)*	350	306	262	220	182
E _{eff} / Liant équivalent	0.5	0.556	0.625	0.72	0.83
A / (A+C)	0	0.307	0.500	0.632	0.727
Volume de pâte (L) **	297	324	350	374	397

* k = 0 (dans notre cas)

** Défini comme la somme des volumes des éléments fins et de l'eau efficace.

3.2. Procédé expérimental

Pour chaque composition de béton, des éprouvettes cylindriques 16 x 32 cm² et prismatiques 7, 7, 28 cm³ ont été fabriquées. Le démoulage est effectué après 24 et les éprouvettes sont ensuite immergées totalement sous l'eau à la température de 20° C pour une cure de 28 jours.

Les éprouvettes cylindriques servent pour les essais de résistance, tandis que les prismatiques sont utilisées pour les essais de carbonatation. Ces dernières ont été recouvertes d'une feuille d'aluminium adhésive sur les deux faces 7x7 cm² (comme indiqué sur la figure 3) afin d'orienter le sens de la carbonatation, puis placées dans l'enceinte de carbonatation de l'école centrale de Nantes (figure 4).



Figure 3. *Éprouvettes prismatiques carbonatation recouvertes d'une feuille d'aluminium adhésive.*



Figure 4. *Enceinte de*

Le principe de cet essai est de simuler au laboratoire, dans une enceinte hermétique, le phénomène de carbonatation accéléré des échantillons de béton dans un milieu où le taux de CO₂ est élevé (50%) avec la possibilité de contrôler le taux de d'humidité relative (HR) entre 60 et 80 %. En effet, de très nombreuses études ont montré qu'un échantillon en équilibre avec une humidité relative comprise entre 50 et 70% présentait un développement optimal de la carbonatation. (*G. Verbeck, 1958, Wierig, 1984, Saeki et al., 1991*)

Cependant, la préparation ou le pré conditionnement des corps d'épreuve est une étape importante dans le cadre de cet essai ; c'est-à-dire le séchage jusqu'à masse constante des éprouvettes et leur saturation à l'eau, car cela permet de mettre au même niveau la teneur en eau et le taux de saturation des pores de chaque éprouvette pour laquelle l'évolution des profondeurs de carbonatation est fortement liée. Il consiste donc en un séchage de 14 jours à T=45°C avec une montée et une descente en température progressives et une humidité relative imposée constante de 65% ± 5%.

A l'issue de ce pré conditionnement, l'essai de carbonatation accéléré est contrôlé en température et en humidité pour des échéances de 2, 7, 14 et 28 jours. Dans cet article, nous allons présenter les résultats relatifs à la carbonatation accélérée des échantillons ayant séjourné dans l'enceinte pendant 2 jours seulement.

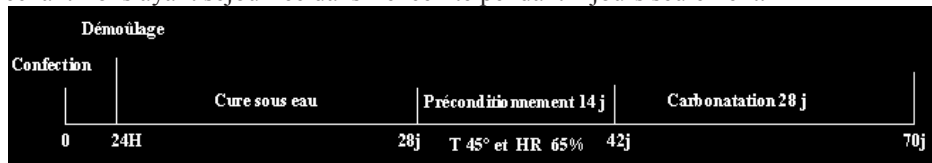


Figure 5. Protocole de l'essai de carbonatation accéléré.

A la sortie de l'enceinte de carbonatation, les éprouvettes de béton sont fendues et de la phénolphtaléine est pulvérisée sur chaque face fracturée. Cet indicateur coloré permet de déterminer, suite aux changements de couleur, la zone de béton carbonatée et la zone saine. En effet, une zone dont le pH est supérieur à 10 (un pH d'environ 12 caractérise le béton sain) se colore en violet/mauve, tandis qu'une zone caractérisée par un pH inférieur ne se colore pas (le béton carbonaté se caractérise par un pH de 9).

Les points de mesure du front de carbonatation sont choisis de manière à éviter les effets de bord et les interfaces pâte/granulats. Pour ces essais, 5 points sont pris sur la hauteur de l'éprouvette (figure 6).



Figure 6. Section d'éprouvette 7x7x28 cm³. Mise en évidence du front de carbonatation par la phénolphthaléine et principe de la mesure de l'épaisseur du béton carbonaté.

La porosité accessible à l'eau est mesurée selon le mode opératoire AFPC-AFREM [AFP97], sur des échantillons issus d'éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm³, après 90 jours de conservation.

4. RESULTATS EXPÉRIMENTAUX ET DISCUSSION

4.1. Résistances

Les résultats présentés par la figure 7 sont les moyennes des résultats de trois essais de compression sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm surfacées au soufre. L'écart type varie entre 0,07 et 2.98 MPa.

Les classes de résistances minimales pour les classes XC3-XC4 sont C25/30. Les valeurs des résistances diminuent avec l'augmentation de la teneur en filler tout en restant supérieures à la valeur de résistance minimale. En revanche au-delà des 50% d'ajout, la résistance à la compression chute de manière considérable (plus du 1/3 de la valeur du BO1).

La forte charge minérale composée de fines présente en grande quantité dans le béton (> masse du ciment), contribue d'une part à une demande en eau élevée et ne participe pas d'autre part, (pour l'échéance de 28 jours) à la naissance de composés hydratés offrant ainsi, plus de résistance mécanique au béton.

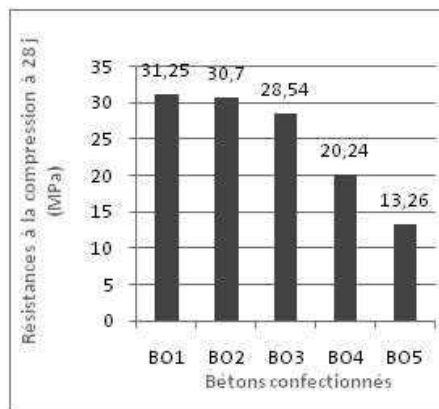


Figure 7. Résistance conventionnelle à la compression

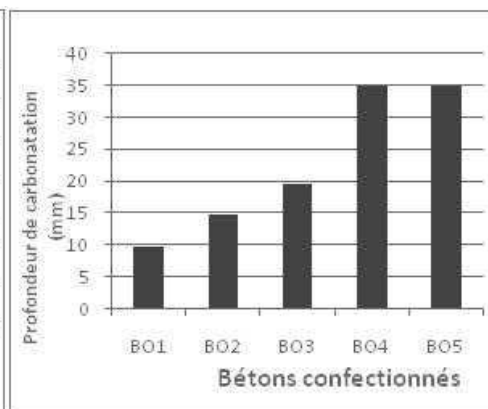


Figure 8. Profondeur de carbonatation à 2 jours

4.2. Essai de carbonatation accéléré

Les mesures ont été réalisées sur des éprouvettes prismatiques de section 7x7x28 cm³.

Les résultats illustrés par la figure 8, représentent les valeurs des profondeurs de carbonatation à 2 jours.

Il s'agit de la moyenne prise sur les valeurs des quatre côtés de l'échantillon. L'écart type, varie de 1.5 à 3.5 mm

Après deux jours de présence des échantillons dans l'enceinte, les fronts de carbonatation mesurés sont considérés comme importants ; même pour le béton sans ajouts BO1. En effet, la valeur de la carbonatation va du simple au double avec 50% de substitution de ciment par les fillers. En revanche, au-delà des 50%, les sections des échantillons à 63% et 72% d'ajout sont entièrement carbonatées. Ces résultats montrent que plus le dosage en ciment diminue, par conséquent sa résistance et plus grande est la profondeur de carbonatation.

Le taux important des fines a donc une influence directe sur la carbonatation. Nos résultats rejoignent ceux de A Katz et al (2006) qui a trouvé que l'effet de la carbonatation s'accélère d'une façon significative lorsque les additions sont très fines.

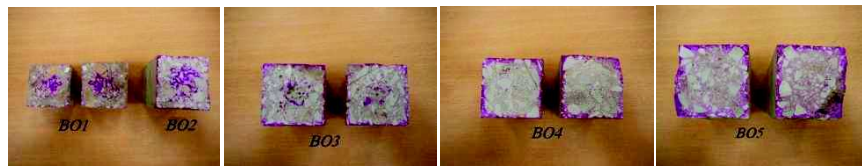


Figure 9. Carbonatation accélérée à 2 jours sur les bétons BO1, BO2, BO3, BO4 et BO5.

De plus, toutes choses égales par ailleurs, la profondeur de carbonatation augmente quand E/L croît (voir figure 10). En effet, plus ce rapport est élevé et plus la quantité d'eau libre susceptible d'être évaporée est grande. Cette eau, en partant, laisse des vides qui favorisent, d'une part le mouvement de l'eau libre situé plus profondément dans le matériau et, d'autre part, la pénétration et la diffusion du gaz carbonique.

On notera aussi l'influence du volume de la pâte sur la carbonatation : Ainsi, ce volume qui est défini comme étant la somme de l'eau efficace E_{eff} + Volume des éléments fins, est souvent le siège des réactions chimiques de dégradation. Il pourrait être un paramètre important du point de vue de la durabilité. En plus, la porosité du béton dépend de la porosité et du volume de la pâte comme définie par l'équation (1.6) (E. Rozière et al, 2009):

$$\text{Porosité béton} = \text{Porosité pâte} \times \text{Volume de pâte} \quad (1.6)$$

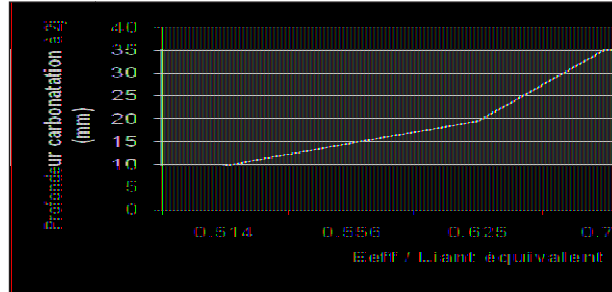


Figure 10. Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction du rapport E/L

De ce fait l'augmentation du volume de pâte a un impact très important sur la porosité de notre béton conduisant ainsi une carbonatation plus accélérée. Nous présentons ci-après les taux de porosité accessible à l'eau, résultant des essais sur des bétons sains.

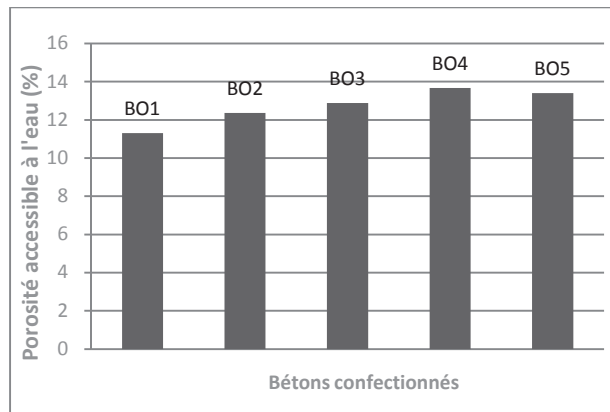


Figure 11. Porosité accessible à l'eau

Conclusion

La carbonatation des ouvrages en béton armé est un phénomène qui agit sur le pH du béton laissant les armatures dans un milieu corrosif. Nous avons utilisé un essai de simulation accéléré en vue d'étudier au laboratoire le phénomène de la carbonatation. Cette étude relative aux bétons à forte charge minérale, nous a permis de tirer les enseignements suivants :

- La substitution du ciment portland dans le béton par l'ajout de quantités importantes de fillers calcaires engendre une perte importante de sa résistance mécanique,

- Après deux jours d'exposition des échantillons de béton à 50% de CO₂, la méthode colorimétrique utilisée pour révéler la profondeur de carbonatation a montré que l'augmentation du taux d'ajout en fillers induit un accroissement du front de carbonatation. Au-delà des 50% d'ajout, les échantillons de section 7X7 cm² ont été complètement carbonatés.
- Les résultats des essais de carbonatation ont montré que le rapport E/L a une incidence directe sur le taux de carbonatation.

Remerciements :

Nos remerciements vont au projet de coopération Franco-Algérien Tassili (10MDU811) dont le financement nous a permis de réaliser ce travail de recherche.

Références Bibliographiques:

AFPC-AFREM ; Compte-rendu des journées techniques (1997) ; Durabilité des bétons, Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, 11 et 12 décembre, Toulouse, pp. 121-158.

Baroghel-Bouny V. et col., (2004) ; Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages, Association Française de Génie Civil, Juillet, 2004.

BOUKLI HACENE S.M.A., (2010); Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen, Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Algérie, Janvier, p. 194.

BOUKLI HACENE S.M.A., GHOMARI F., KHELIDJ A. (2009); Compressive Strengths of Concrete Formulated with Algerian Local Materials, Jordan Journal of Civil Engineering, Volume 3, No. 2, April, pp.103-117

BOUKLI HACENE S.M.A., GHOMARI F., SCHOEFS F. et KHELIDJ A. (2009); Etude expérimentale et statistique de l'influence de l'affaissement et de l'air occlus sur la résistance à la compression des bétons, Lebanese Science Journal, Volume 10, No. 2, Octobre, pp.81-100.

KATZ Amnon, Baum Hadassa 2006; Effect of high levels of fines content on concrete properties
ACI Materials journal, November – December 2006

ROZIERE E. (2007) ; Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle, Thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes, France, Novembre,

Norme NF EN 206-1, (2004) ; Béton – Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité, AFNOR, France.

ROZIERE E., LOUKILI A., CUSSIG F. (2009); A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonatation, Construction and Building Materials 23 (2009) 190 – 199.