

CARACTERISATION DES BETONS D'ENROBAGE POUR LES BETONS DE PREFABRICATION SOUMIS A LA CARBONATATION

B. K. BEN AMMAR, M. MELLAS, B. MEZGHICHE

Laboratoire de Recherche en Génie Civil, Université de Biskra, BP145 Biskra, 07000, Algérie
babkdeba_fr@yahoo.fr

RESUME

La maîtrise et l'optimisation de la durabilité des structures et des produits en béton, qu'ils soient structurels ou architecturaux, constituent un enjeu majeur pour toute la profession.

C'est pourquoi la durabilité occupe de nos jours une position déterminante dans le nouveau contexte normatif européen sur le béton et qui exige un contrôle efficace de tous les facteurs susceptibles d'affecter son comportement dans le temps. L'expérience montre que les facteurs d'influence les plus importants en matière de durabilité et qui doivent donc faire l'objet d'un contrôle suivi, sont la composition du béton (teneur en ciment et rapport eau-ciment), l'enrobage des armatures, la compacité du béton et la protection du béton frais en cours de durcissement.

Cette étude expérimentale avait pour objectif, la caractérisation de la porosité ouverte du béton en utilisant l'essai d'absorption capillaire des bétons sains et étuvés qui sont soumis à la carbonatation accélérée et d'établir les liens existants entre la porosité ouverte caractérisée par l'absorption initiale et la résistance à la compression. Pour se faire, six types de bétons à base de deux ciments (CEM I 42.5 et CEM II/B 42.5) ont été testés, le rapport E/C varie de 0.4 à 0.6 et l'influence de la carbonatation a été étudiée.

Les résultats obtenus montrent que la carbonatation est bénéfique pour le béton seul du moment qu'elle réduit sa porosité et mettre en évidence les effets du rapport eau/ciment sur la porosité ouverte et enfin on peut déduire les relations théoriques qui relie la résistance à la compression à 28 jours et l'absorption initiale des bétons.

MOTS CLES: Béton étuvé, Carbonatation, Absorption initiale, Porosité ouverte, Résistance à la compression, Rapport eau/ciment.

ABSTRACT

Mastering and optimizing the durability of structures and concrete products, whether structural or architectural, is a major challenge for the entire profession.

That is why sustainability is nowadays a determining factor in the new European normative context on concrete and requires effective control of all factors likely to affect its behavior over time. Experience shows that the most important sustainability factors that need to be monitored are the composition of the concrete (cement content and water-cement ratio), the coating of the reinforcement, and the compactness of the concrete and the protection of the fresh concrete during hardening.

The aim of this experimental study was to characterize the open porosity of the concrete by using the capillary absorption test of the ordinary and steamed concretes subjected to accelerated carbonation and to establish the links between the open porosity characterized by initial absorption and compressive strength. To achieve this, six types of concretes based on two cements (CEMI 42.5 and CEM II/B 42.5) were tested, the W/C ratio varies from 0.4 to 0.6 and the influence of carbonation has been studied.

The results obtained show that carbonation is beneficial for concrete alone as long as it reduces its porosity and shows the effects of the water/cement ratio on the open porosity and finally we can deduce the theoretical relationships between the compressive strength at 28 days and the initial absorption of the concretes.

KEYWORDS: Steamed Concrete, Carbonation, Initial Absorption, Open Porosity, Compressive Strength, Water/cement ratio.

1 INTRODUCTION

Un béton est d'autant plus durable qu'il résiste à la pénétration des agents extérieurs. Cette capacité à la durabilité peut se traduire par des facteurs relatifs aux propriétés de transfert ou aux attaques d'agents extérieurs.

La durabilité est relative aux paramètres de composition du béton et elle dépend plus particulièrement de la nature chimique du liant, de la compacité du squelette, et de la minéralogie des granulats.

Dans ce travail, certains paramètres relatifs à la durabilité seront étudiés qui donnent des informations sur la porosité du matériau et sur la ténacité aux attaques des agents extérieurs.

La préfabrication d'éléments en béton se présente actuellement comme, une branche d'activité indispensable au secteur de la construction moderne grâce à une optimisation des coûts, à une réduction des délais et à une gamme de solutions variées. Ainsi, en 2005, la production de béton relative à la préfabrication représente 30 millions de tonnes sur 145 millions de tonnes au total soit plus de 20% selon Unicem 2007 et Fib 2007[1].

Younsi et al. [2] Indiquent que depuis peu, l'approche «performantielle» permet d'envisager la formulation des bétons avec pour critère la durabilité. Il s'agit d'évaluer les performances du matériau vis-à-vis des agressions susceptibles de dégrader les structures en béton armé d'après Rozière et al. [3]. Une telle approche nécessite des outils efficaces de caractérisation des propriétés de transfert du matériau afférentes à la durabilité.

L'une des principales agressions du béton est la diffusion dans son réseau poreux du CO₂ de l'air ambiant qui provoque une carbonatation de sa matrice cimentaire. A long terme, la baisse de pH engendrée peut provoquer une corrosion des armatures et modification de la distribution des tailles des pores en réduisant la porosité de sa matrice cimentaire selon M.Thiery [4].

Le mécanisme fondamental par lequel le dioxyde de carbone atmosphérique réagit avec les composants du ciment hydraté et détruit son alcalinité est bien compris selon Jung, Y.B [5]. Les propriétés de transport affectent la durabilité du béton car elles contrôlent l'approvisionnement en espèces agressives, telles que les chlorures, sur le site de détérioration.

Pour évaluer le potentiel de carbonatation d'un béton en laboratoire, on réalise des essais accélérés qui consistent à soumettre des échantillons à des concentrations en CO₂ bien supérieures à la concentration «naturelle» de l'air, généralement après un prétraitement thermique visant un conditionnement hydrique. Il n'y a ce jour aucun protocole unique. Une norme européenne est certes en cours de préparation, mais sa construction demeure difficile, en particulier par l'absence de consensus sur la concentration en CO₂ à utiliser pour accélérer la carbonatation.

De même, il n'existe pas de consensus sur le pré conditionnement. Avant l'essai accéléré, en vue d'une

teneur hydrique visée, les échantillons sont passés à l'étuve à une température et pour une durée qui varient bien souvent d'un laboratoire à l'autre. L'objectif de ce prétraitement est de dé-saturer en partie le réseau poreux pour accélérer la diffusion du CO₂, le coefficient de diffusion d'un gaz dans un milieu poreux étant fortement dépendant du degré de saturation en eau de ce milieu.

On doit étudier est quantifier l'influence de la carbonatation sur les mécanismes de transfert et les caractéristiques microstructurales des bétons. En effet, il s'agit de mettre en évidence expérimentalement, les effets de la carbonatation sur la perméabilité aux liquides, sur la porosité et sur les résistances mécaniques, en plus d'essayer d'améliorer la compréhension du phénomène de carbonatation et de prendre en compte les spécificités de l'industrie du béton, en particulier en intégrant l'influence du traitement thermique sur les indicateurs de durabilité.

La distribution de la taille des pores est fortement modifiée par la carbonatation indiquent Houst [6], Houst et Witmann [7], Miragliotta [8]. Mais en plus d'une réduction globale de l'espace poreux autour du mode poreux principal interhydrates (entre 10 et 100 nm), la carbonatation peut créer une macroporosité entre 100 et 200 nm cité par M.Thiery [4].

La réduction de porosité liée à la carbonatation entraîne corrélativement une augmentation de résistance mécanique. La calcite qui s'est formée consolide la microstructure. Il est en effet bien connu que le carbonate de calcium est un excellent liant. La résistance à la compression et à la flexion de bétons à base de ciment CEM I conservés dans une atmosphère de dioxyde de carbone peut augmenter de 30% par rapport aux mêmes bétons conservés en atmosphère exempte de CO₂ d'après Lea [9]. L'augmentation de résistance est d'autant plus marquée que le rapport E/C du matériau est bas dit Young et al. [10].

D'autre part l'absorption d'eau est un phénomène physique représentatif du comportement hydrique du béton durci. C'est une propriété de transfert du matériau poreux qui caractérise son aptitude à absorber et à transporter un liquide mouillant par capillarité. Sa mesure est un outil de caractérisation macroscopique de son réseau poreux. C'est un paramètre important vis à vis de la durabilité des bétons, car un grand nombre d'agressions telles que l'attaque par les sulfates, l'alcali-réaction, le gel-dégel, peuvent être minimisées si l'absorption d'eau du béton est faible. Deux paramètres ont été retenus pour qualifier le processus d'absorption d'eau sont l'absorption initiale, représentative de la dimension des gros capillaires et l'absorptivité représentative du volume des capillaires fins.

Cette technique permet de quantifier notamment la porosité «totale» ouverte d'un matériau, c'est-à-dire celle accessible depuis la surface du solide et les espaces existants entre les particules constitutives et la distribution des tailles des pores incluses dans le domaine de mesure de l'appareil.

L'absorption d'eau dans un milieu poreux est induite par le phénomène d'absorption capillaire au travers de la macroporosité ouverte, porosité dite «capillaire». Selon la

recommandation AFPC [11], va mettre en évidence l'évolution de l'absorption d'eau sur les mêmes mélanges.

A la lumière de ce qui a été évoqué précédemment, on recherche la caractérisation de la porosité ouverte de la zone du béton d'enrobage de ces bétons étuves mis en carbonatation en utilisant l'essai d'absorption capillaire et d'établir les liens existants entre l'absorption initiale et la résistance à la compression des bétons.

2 METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

On présente les matériaux utilisés, les méthodes d'essai, les compositions des bétons, la préparation des échantillons et les tests effectués.

2.1 Matériaux

2.1.1 Ciments

Deux ciments du même clinker sont utilisés: un ciment portland (CEM I) classe 42.5 MPa et un ciment portland composé (CEM II/B) classe 42.5 MPa avec 35% de fillers calcaires. Le clinker est de l'usine de ciment de M'sila. Les compositions chimiques et minéralogiques des ciments utilisés sont données aux tableaux 1 et 2. La composition minéralogique des ciments potentiels est calculée selon la formule empirique de Bogue [26]. Les propriétés physiques des ciments sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 01: Compositions chimiques des ciments

Ciment	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
CEM I 42.5	21.36	4.98	3.63	65.86	2.06
CEM II/B 42.5	17.49	4.51	3.02	62.78	2.15

Ciment	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	LOI
CEM I 42.5	0.93	0.08	0.77	0.02	2.48
CEM II/B 42.5	2.38	0.05	0.64	0.02	8.10

Tableau 02: Compositions minéralogiques des ciments (%)

Type de ciment	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
CEM I 42.5	61.54	14.83	7.04	11.05
CEM II/B 42.5	55.41	13.65	2.25	14.83

Tableau 03: Propriétés physiques des ciments (%)

Type de ciment	CEM I 42.5	CEM II/B 42.5
Densité apparente (kg/m ³)	1130	1030
Densité absolue (kg/m ³)	3100	3060
Finesse (cm ² /g)	3917	3242

2.1.2 Eau

L'eau utilisé est l'eau potable, distribuée par le réseau du service publique de la ville de Biskra qui ne contient que

peu de sulfate, et ayant une température de $20 \pm 2^\circ$. Sa qualité et ses caractéristiques sont conformes aux exigences de la norme NFP 18-404.

2.1.3 Sable

Le sable utilisé (0/5 mm) est de la région de Biskra (rivière Oued-Djedi). Densité apparente = 1697 kg/m^3 , densité spécifique = 2600 kg/m^3 , module de finesse = 2,82 (sable convient pour une maniabilité satisfaisante et présente un risque limité à la ségrégation), son équivalent de sable = 80.10 (sable argileux de propreté acceptable pour les bétons de qualité courante). La courbe granulométrique du sable est donnée dans la figure 1.

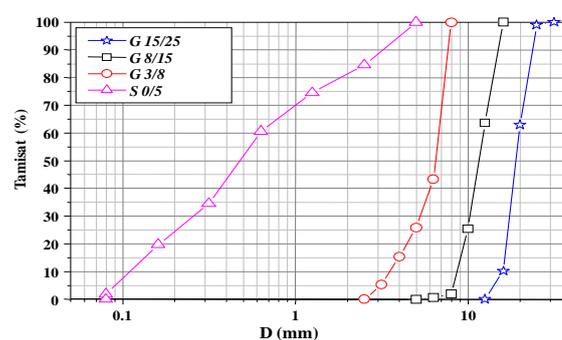


Figure 01: Courbe granulométrique de la pierre concassée

2.1.4 Pierre concassée

Les fractions de pierres concassées qui sont utilisées (3/8, 8/15 et 15/25 mm), de la carrière d'Ain-Touta (Batna). La densité apparente = 1340 kg/m^3 , densité spécifique = 2610 kg/m^3 et le coefficient de Los Angeles = 20% (roche dure). Les courbes de graviers sont présentées dans la figure 1.

2.2 Méthodes d'essais et compositions des bétons

Un programme expérimental a été réalisé pour étudier en parallèle l'effet du rapport eau/ciment (0.4, 0.5 et 0.6), l'influence du type de ciment et des méthodes d'étuvage (durcissement à l'eau, le durcissement à l'air, l'étuvage à 45°C) sur l'effet de la carbonatation accélérée puis l'absorption capillaire de ces bétons qui sont des indicateurs de durabilité.

L'optimisation de la formulation du béton basé sur plusieurs critères qui sont souvent un compromis entre: la maniabilité, la résistance, la durabilité et l'économie. L'obtention des caractéristiques requises pour le béton passe impérativement par l'adoption de sa formulation aux exigences appropriées à l'ouvrage et à son environnement. On a choisi la méthode de **B. Scramtaiv** dont la maniabilité est telle que l'affaissement au cône est de 7 cm. Les compositions des bétons sont présentées dans le tableau 4.

Tableau 04: Compositions des bétons (kg/m³)

Béton	Eau (l)	Ciment (kg)	Sable (0/5)	Gravier			E/C
				3/8	8/15	15/25	
B1 : CEM I 42.5	190	475.00	533				0.4
	190	380.00	613				0.5
	190	316.66	666				0.6
B2 : CEM II 42.5	200	500.00	490	143	126	909	0.4
	200	400.00	575				0.5
	200	333.33	640				0.6

Nous avons confectionné des bétons à partir de six formulations différentes de rapports E/C variant de 0.4 à 0.6, des éprouvettes cubiques (10×10×10) cm³ ont été confectionnées :

1. Une série d'éprouvettes : confectionnées, moulées et conservées au laboratoire mise dans l'enceinte d'étuvage à 45 °C et H.R. > 80% pour être retirées dans 8 heures et laissées 3 jours à l'air libre.
2. Une série d'éprouvettes mises dans l'eau pour une maturation de 28 jours.
3. Une série d'éprouvettes mises à l'air libre (28 jours) (H.R. = 65% ± 5%).

Ensuite on prépare les éprouvettes pour l'essai de carbonatation.

2.3 Essai de carbonatation accélérée en laboratoire

Les essais de carbonatation ont été conduits selon deux protocoles différents en vue de comparer leurs résultats respectifs et analyser la pertinence de l'essai accéléré.

Le principe de l'essai de carbonatation accélérée est qu'après une durée de 28 jours de conservation, consiste à soumettre des échantillons de bétons une fois l'équilibre des échantillons atteint dans l'enceinte climatique à une forte teneur en dioxyde de carbone (50 % CO₂ et 50 % d'air) et à une humidité relative d'environ 66 % dans une enceinte de carbonatation que nous avons mise en place durant cette étude. 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 carbonatation, la température est de 20 ± 2°C à l'intérieur de l'enceinte (figure 2).

Ensuite les échantillons de bétons sont retirés de l'enceinte et pesés. A partir du fendage des éprouvettes, la profondeur de carbonatation est mesurée sur des fractures fraîches à l'aide d'un indicateur coloré de pH.



Figure 02 : Éprouvettes (10×10×10) cm³ dans l'enceinte de carbonatation en conditions accélérées

2.3.1 Détection de la profondeur de carbonatation par la phénolphthaléine

Pour évaluer la profondeur de carbonatation, nous avons utilisé principalement le test à la phénolphthaléine. Il consiste à pulvériser une solution de phénolphthaléine (1% dans l'éthanol) sur une fracture fraîche réalisée perpendiculairement à la surface soumise à la carbonatation par essai de fendage selon les recommandations A.F.G.C [12] et A.F.R.E.M [13], comme le montre la figure 3.



Figure 03: Test à la phénolphthaléine et mesure du front de carbonatation

Après quelques minutes, la profondeur de carbonatation est mesurée, pour chaque face, selon le mode opératoire d'AFPC-AFREM [11] et [13]. L'épaisseur carbonatée se caractérise par le changement de couleur de l'indicateur qui vire au rose foncé dans la zone non carbonatée et incolore dans la zone carbonatée.

L'épaisseur de la couche carbonatée x est régie par l'équation (1) en fonction du temps t et de A constante empirique prenant en compte la composition du béton et les conditions d'exposition selon (Parrott L. J., 1993) [14].

$$x = A \sqrt{t} \quad (1)$$

Nous avons regroupé tous les résultats des tests à la phénolphthaléine et de la mesure des fronts de carbonatation des différents bétons à différentes échéances dans la figure 4.



Figure 04 : Mise en évidence des fronts de carbonatation visualisés suite à la pulvérisation à la phénophtaléine des 03 types de bétons (étuvage, air, eau) en carbonatation accélérée

2.4 Absorption initiale d'eau des bétons après carbonatation accélérée

La série expérimentale qui va suivre, réalisée selon la recommandation (AFPC) [11], va mettre en évidence l'évolution de l'absorption d'eau sur les mêmes mélanges.

L'absorption d'eau dans un milieu poreux est induite par le phénomène d'absorption capillaire au travers de la macroporosité ouverte, porosité dite « capillaire ».

2.4.1 La détermination du coefficient d'absorption d'eau initiale

Dans le but d'étudier l'absorption d'eau initiale des bétons après carbonatation, Nous avons adopté un essai généralement appliqué à des terres cuites et des pierres calcaires conformément à la norme NF P10-502 (AFNOR) [15]. Chaque série comprend trois échantillons cubiques de 10 cm de côté. Une face d'about de l'échantillon est placée au contact d'une nappe d'eau à 1 cm de profondeur et la quantité d'eau absorbée est évaluée en mesurant la variation de masse de l'échantillon (figure 5). La seule précaution à prendre consiste à éliminer la pellicule d'eau retenue à la face inférieure de l'échantillon, avant chaque pesée, à l'aide d'un papier absorbant suivant l'étude de Castel [16]. La quantité d'eau absorbée au bout d'une heure par unité de surface est retenue comme grandeur représentative selon Hall [17], Schonlin et al. [18], Parrott L. J. [14], Balayssac et al. [19], Lucija Hanzic et al. [20] et M. Rabehi et al. [21] de volume des plus gros capillaires présents dans la zone de peau, ces capillaires étant les plus efficaces. Les faces latérales sont imperméabilisées à l'aide d'un film plastique (un ruban plastique adhésive) qui force l'eau à adopter un cheminement uniaxial et éviter l'évaporation par ces mêmes faces. Mezghiche [22] a déterminé que la masse d'eau absorbée est déterminée par des pesées successives des éprouvettes. Les essais sont réalisés dans les conditions de laboratoire ($T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $\text{HR} = 45 \pm 10 \%$).

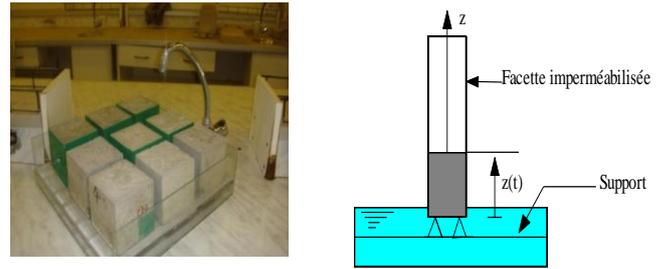


Figure 05 : Echantillons de différents bétons soumis à l'essai d'absorption capillaire et le dispositif expérimental (AFNOR) [15]

Le coefficient d'absorption d'eau initial paraît être un bon indicateur de la durabilité du béton, puisqu'il caractérise les plus gros capillaires d'après Parrott L. J. [14], Balayssac et al. [19], Lucija Hanzic et al. [20] et M. Rabehi et al. [21]. Ce coefficient d'absorption d'eau initial après un temps de succion d'une heure sera noté A_{bi} ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1/2}$). Les coefficients d'absorption d'eaux initiales obtenues pour la totalité des échantillons sont résumés dans le tableau 5.

Tableau 05 : Coefficients d'absorption d'eaux initiales A_{bi} obtenus pour la totalité des échantillons

Type Béton	Béton étuvé	Béton non étuvé	Béton durci à l'eau
A40	0.76	0.94	0.32
A50	0.87	1.06	0.37
A60	1.09	1.31	0.54
B40	0.85	1.02	0.45
B50	0.95	1.15	0.52
B60	1.22	1.42	0.72

3 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

3.1 Influence du rapport E/C et du type de ciment sur la profondeur de carbonatation accélérée

Les figures 6 (1) et 6 (2) présentent les résultats de variation de la profondeur de carbonatation à l'âge de 28 jours des différents bétons, en fonction du rapport E/C qui est une fonction croissante du rapport E/C. Autrement dit le rapport E/C croît avec la profondeur de carbonatation.

Ce profondeur est maximale pour les bétons ordinaires non étuvés pour un rapport eau/ciment de 0.6 de qui a un effet remarquable sur les cinétiques de carbonatation en réduisant environ le double des profondeurs de carbonatation atteintes dans le cas de la conservation «eau» et ceci pour les 02 types de ciments et les bétons de la conservation « Eau » sont plus résistants à la carbonatation accélérée que ceux exposés directement à l'air libre après démoulage. En effet, contrairement à une conservation à l'air libre, une maturation sous eau favorise l'hydratation et conduit ainsi à des bétons moins poreux et ayant plus de

produits carbonatés donc plus résistants à la carbonatation d'après Atis [27]; Fattuhi [28]; Loo et al., [29] et Sickert [30].

La vitesse de carbonatation est censée augmenter en augmentant le rapport eau/liant dit par Sulapha *et al.* [31]; Song *et al.* [32], en diminuant le dosage en liant d'après Duval [33]. Cependant, aucune corrélation n'est observée en comparant les profondeurs de carbonatation accélérée des bétons étudiés à leurs rapports eau/liant et à leurs quantités de liant (figures 6 (1) et 6 (2)).

A titre d'exemple la diminution du rapport E/C de 0.6 à 0.5 pour un béton B2 (à base du ciment CEM II/B 42.5) soumis à une cure de 28 jours diminue la profondeur de carbonatation d'environ 23.80 %. Cette diminution est de l'ordre de 18.80 % ceci en diminuant le rapport E/C de 0.5 à 0.4.

De plus, on remarque clairement une diminution de la profondeur de carbonatation pour le béton B2 (cure de 28 jours) de l'ordre de 10 % par rapport au béton B1 (cure de 28 jours) d'après Haque [23]. Ceci signifie que la profondeur carbonatée dépend du dosage en clinker, les résultats obtenus de la carbonatation accélérée à 28 jours pour les différents modes de conservations, sont illustrés sur les figures 6 (1) et 6 (2).

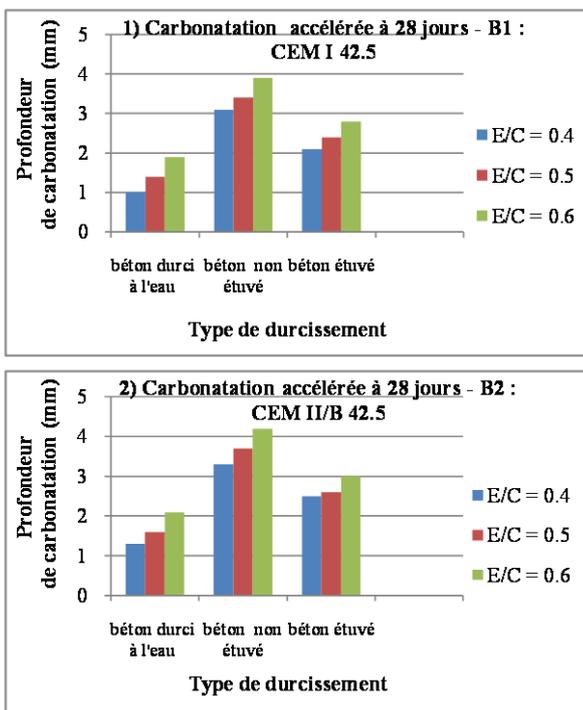


Figure 06 (1) et 06 (2): Evolution de la profondeur de carbonatation accélérée avec le temps pour différents type de durcissement et de rapport E/C

3.2 Influence du rapport E/C et type de ciment sur l'absorption initiale des bétons

La figure 7 rassemble les résultats de la cinétique d'absorption exprimée en terme de masse d'eau absorbée

par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps des différents types de bétons. Ces résultats mettent en évidence que l'absorption initiale (pendant une heure) est une fonction croissante du rapport E/C. Autrement dit, plus le rapport eau/ciment augmente, plus le taux d'absorption initiale augmente. A titre d'exemple la diminution du rapport E/C de 0.6 à 0.5 pour un béton à base du ciment CEM II/B 42.5 soumis à une cure de 28 jours diminue le taux d'absorption d'eau d'environ 11.73 %. Cette diminution est de l'ordre de 21.70 % en diminuant le rapport E/C de 0.5 à 0.4. De plus, on remarque clairement une diminution de taux d'absorption pour le béton B2 (cure 28 jours) d'ordre 8.07 % par rapport au béton B1 (cure 28 jours). Ceci signifie que la qualité du béton est la première condition d'une bonne durabilité. Puisque les CEM II/B 42.5 aux calcaires produisent un peu les mêmes hydrates que les CEM I /42.5, l'important pour la qualité d'un béton n'est pas la quantité de ciment en soi, mais plutôt la quantité d'hydrates.

De plus l'expérience nous a montré que la carbonatation conduit à un colmatage de la microstructure qui rend le béton moins perméable aux agents agressifs. La figure 7 montre l'absorption initiale des bétons subits à la carbonatation pendant 28 jours pour les 02 types de ciments.

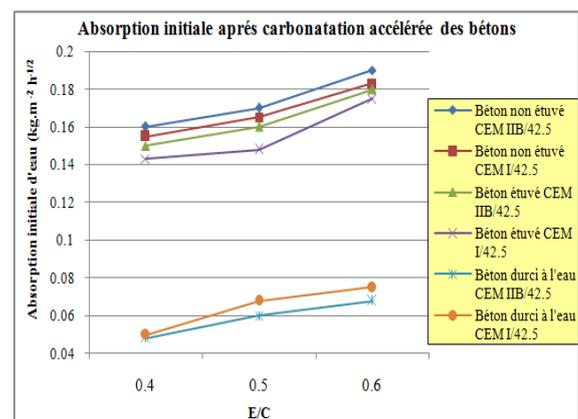


Figure 07 : Effet du rapport E/C et type du ciment sur l'absorption initiale des bétons pour les différents ages

3.3 Résistance à la compression

La résistance à la compression est exprimée par le pouvoir du béton à résister à la destruction sous l'action des contraintes dues à la charge de compression. Après séchage en étuve à 105°C jusqu'à masse constante. Un état sec selon la recommandation de Rilem [24] est tel que l'erreur relative entre deux pesées séparées de 24 heures après séchage à 105°C n'excède pas 1 %. Dans cette partie, il s'agit des essais de compression sur des éprouvettes cubiques de (10×10×10) cm³, chaque série comprend trois échantillons selon Mezghiche [22].

3.3.1 Influence de la carbonatation sur la résistance à la compression à 2 mois

Les éprouvettes sont conservées dans l'ambiance du laboratoire après la durée de cure. Les résultats de cet essai sont rassemblés dans la figure 8 ci-dessous qui présente l'effet de la carbonatation sur la variation de la résistance de compression en fonction du rapport E/C pour les différents bétons étudiés.

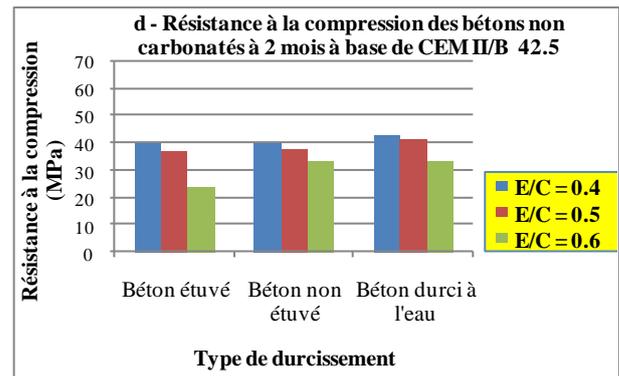
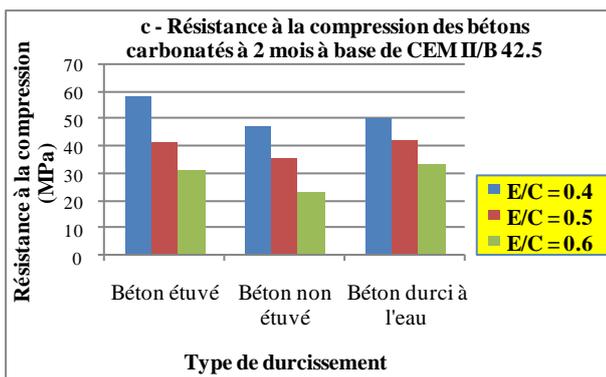
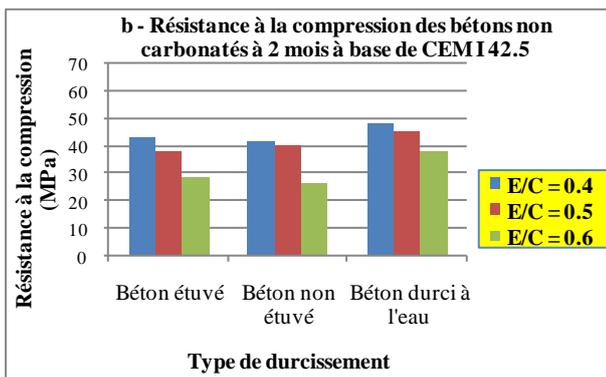
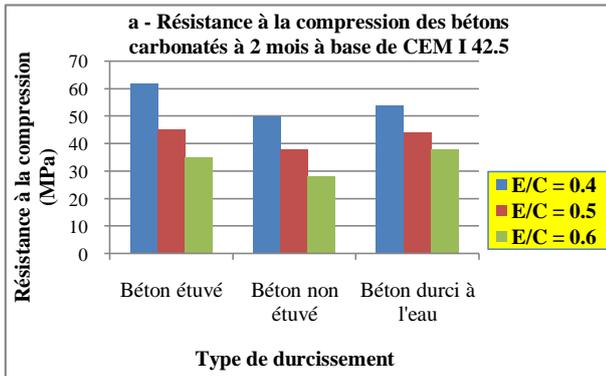


Figure 08 (a, b, c et d) : L'effet de la carbonatation sur la variation de la résistance à la compression en fonction du rapport E/C pour les différents bétons élaborés

On remarque d'après les figures 8-a et 8-c pour les deux types de ciment que la carbonatation a permis d'accroître la résistance mécanique des bétons après 2 mois de carbonatation, ceci est expliqué par l'effet de la calcite CaCO_3 qui a tendance à augmenter la compacité du béton en raison du colmatage des pores dans la zone du béton de peau d'après MIRAGLIOTTA [8]. La tendance générale de diminution des profondeurs de carbonatation accélérée des bétons étudiés avec l'augmentation de leurs résistances en compression à 28 jours est en accord avec la littérature de Nischer [34] et (Parrott, 1987) [35], notamment dans le cas de la cure « Eau » (Figure 8 (a, b, c et d)).

A titre d'exemple pour le béton :

- B1 étuvé non (carbonaté), une augmentation d'environ 44 % par rapport au B1 étuvé (carbonaté) avec E/C = 0.4, une augmentation d'environ 15 % avec E/C = 0.5 et de 25 % pour E/C = 0.6.

Une comparaison entre les différents bétons, sains et carbonatés est illustrée sur la figure 8 (a, b, c et d).

Nous observons à partir de la figure que les distributions des pores à l'état sain et à l'état carbonaté sont proches et ont presque les mêmes allures avec un léger déplacement vers les plus gros pores pour le cas carbonaté. Cette absence de différence est due à la très faible carbonatation du béton B1 et à E/C = 0,40.

4 CONCLUSIONS

La distribution en taille de pores des bétons carbonatés est très serrée pour le faible rapport E/C : 0.4 et il s'élargit pour les rapports E/C : 0.5 et 0.6.

Les mesures de porosité des bétons carbonatés indiquent que la carbonatation affecte principalement les pores de petites dimensions. La réduction de cette porosité traduit l'occupation des interstices par les cristaux de carbonate de calcium formés durant la carbonatation. Elle est due au fait que les volumes de ces cristaux de calcite excèdent ceux des hydrates à partir desquels ils se forment et par conséquent, occasionnent une diminution de la porosité. La

porosité concernée correspond au mode poral principal, c'est-à-dire à la porosité inter-hydrates.

Ce dernier se déplace vers les plus gros diamètres, ce qui signifie que la carbonatation ouvre cette porosité, certainement par dissolution de la portlandite initialement présente dans cette porosité.

Par contre, les pores dont les diamètres varient entre 3 nm et 23 nm tendent à augmenter au cours de la carbonatation accélérée, ce qui signifie que dans la partie la plus fine du mode principal, la précipitation de la calcite génère une porosité beaucoup plus fine.

Ainsi, la carbonatation se traduit à la fois par une baisse de la porosité inter-hydrates, son décalage vers les plus gros pores et l'augmentation de la porosité la plus fine.

La carbonatation du béton est une des causes de dégradation des ouvrages en béton armé dans la mesure où elle conduit à la dépassivation des armatures pour les bétons armés et à leur oxydation, la caractérisation des effets néfastes de la carbonatation sur la microstructure et les propriétés de transfert du béton, constitue une étape clé pour l'étude de sa durabilité.

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 Ngala et Page [25] qui ont trouvés que l'effet de la carbonatation s'accélère d'une façon significative lorsque les additions sont très fines.

De plus, toutes choses égales par ailleurs, la profondeur de carbonatation augmente quand E/C croît. 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.

Quantifier l'influence de la carbonatation sur la perméabilité et la porosité sur des bétons de différentes résistances et caractéristiques microstructurales. Ceci implique d'une part de mesurer ces paramètres sur éprouvettes carbonatées et non carbonatées et d'autre part d'exploiter les résultats pour mener une analyse approfondie de la relation entre la carbonatation et les paramètres de transfert et de microstructure.

Tous les résultats recueillis lors de cette étude sont utiles, d'une part, à mieux caractériser la carbonatation comme une cause d'altération physico-chimique et d'autre part avoir une idée sur l'amélioration des propriétés microstructurales et de transfert du béton vis-à-vis de la durabilité et la durée de vie des ouvrages.

REFERENCES

- [1] <http://www.unicem.fr> : Site internet de l'UNICEM, 2007.
- [2] Younsi A., Turcry Ph., Rozière E., Aït-Mokhtar A., Loukili A., "Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content", *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, n°10, 2011, p. 993-1000.
- [3] Rozière E., Loukili A., Cussigh F., "A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonation", *Construction and Building Materials*, vol. 23, 2009, p. 190-199.
- [4] M.Thiery « Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires. Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurelles et hydriques ». Thèse de doctorat, Paris. LCPC 2005.
- [5] Jung, Y.B.; Yang, K.H. Mixture-Proportioning Model for Low-CO₂ Concrete Considering the Type and Addition Level of Supplementary Cementitious Materials. *J. Korea Concr. Inst.* 2015, 27, 427–434.
- [6] HOUST F.Y. "Influence of microstructure and water on the diffusion of CO₂ and O₂ through cement paste". In MALHOTRA V.M., editeur: 2nd CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, 1991, 141-159, Montreal.
- [7] HOUST F.Y. ET WITTMANN F.H., "Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO₂ and O₂ through hydrated cement paste". *Cement and Concrete Research*, 1994, 24: 1165-1176.
- [8] MIRAGLIOTTA R., "Modélisation des processus physico - chimiques de la carbonatation des bétons préfabriqués - Prise en comptes des effets de paroi", Thèse de l'Université de la Rochelle, 2000.
- [9] F.M. LEA (1970), "The Chemistry of Cement and Concrete" Edwqrq Arnold.
- [10] YOUNG J.F., BERGER R.L. et BREESE J. "Accelerated curing of compacted calcium silicate mortars on exposure to CO₂" *Journal of the American Cerami Society*, 1974, 57: 384 - 397.
- [11] AFPC « Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité » Compte rendu des journées techniques AFPC-AFREM, Durabilité des bétons, 1997.
- [12] A.F.G.C. Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages, maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction. Bagneux: édition A.F.G.C., juillet 2004.
- [13] AFREM, Essai de carbonatation accélérée, Mesure de l'épaisseur de béton carbonaté, Mode opératoire recommandé par l'AFREM. Compte rendu des journées techniques AFPC-AFREM «Durabilité des bétons», 11 et 12 Décembre 1997, Toulouse, pp : 153158. 1997.
- [14] Parrott L.J., A review of carbonation in reinforced concrete, *Cement and concrete Association*, Ed, Slough, 1993.
- [15] AFNOR, P 18-407. Béton –Essai de traction par

- flexion trois points, Paris, 1990
- [16] Castel A. Arliguie G. Chaussadent T. et Baroghel-Bouny V., « La microfissuration superficielle a-t-elle une influence sur la profondeur de carbonatation des bétons ». Revue Française de Génie Civil, vol. 5(2-3), p. 231-248. 2001.
- [17] C. Hall, "Water sorptivity of mortars and concretes: a review," Magazine of Concrete Research, vol. 41, no. 147, pp. 51-61, 1989. View at Google Scholar · View at Scopus.
- [18] Schonlin K. and Hilsdorf H.K., the Potential Durability of Concrete. In Preceedings of the European Ready Mixed Concrete Organisation Congress ERMCO 89, Fabeko, Norway. 1989.
- [19] Balayssac J.P. Détriché Ch. H. and Grandet J., « Intérêt de l'essai d'absorption d'eau pour la caractérisation du béton d'enrobage ». Materials and Structures, vol. 26(158), p. 226-230. 1993.
- [20] Lucija Hanzic, Ladislav Kosec and Ivan Anzel., «Capillary absorption in concrete and the Lucas Washburn equation».Cement & Concrete Composites ,p. 84-91.2010.
- [21] M. Rabehi, S. Guettala et B. Mezghiche., «La porosité ouverte du béton d'enrobage : Corrélation entre la résistance à la compression et l'absorption initiale». European Journal of Environmental and Civil Engineering - Taylor & Francis vol. 16(6), p.730-743. 2012.
- [22] Mezghiche B. Laboratory testing of construction materials. Publication Universitaire Biskra, Algérie 2005. 120.
- [23] Haque, M.N. and Al-Khaiat, H.. "Carbonation of Concrete Structures in Hot Dry Coastal Regimes". Cement and Concrete Composites, 19 (1997) 123-129.
- [24] Rilem Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials: CPC 11.1 Absorption of water by concrete by immersion, 1982; CPC 11.2. Absorption of water by concrete by capillarity, 1982. Edited by RILEM, p. 618. 1994.
- [25] NGALA V.T. et PAGE C.L., "Effects of carbonatation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes", Cement and Concrete Research, 1997, 27 : 995-1007.
- [26] Bogue RH. The chemistry of Portland cement. 2d ed. New York: Reinhold Publishing Corp.; 1955.
- [27] [Atis, 2003] C.D. Atis, Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash, Construction and Building Materials, 17 (3), 2003, 147-152.
- [28] [Fattuhi, 1988] N.I. Fattuhi, Concrete carbonation as influenced by curing regime, Cement and Concrete Research, 18 (3), 1988, 426-430.
- [29] [Loo et al., 1994] Y.H. Loo, M.S. Chin, C.T. Tam, K.C.G. Ong, A carbonation prediction model for accelerated carbonation testing of concrete, Magazine of Concrete Research, 46 (168), 1994, 191-200.
- [30] [Sickert, 1997] G. Sickert, Extended modelling for the advance of carbonation in concrete, Betonwerk und Fertigteil-Technik, 63 (12), 1997, 74-88.
- [31] [Sulapha et al., 2003] P. Sulapha, S.F. Wong, T.H. Wee, S. Swaddiwudhipong, Carbonation of Concrete Containing Mineral admixtures, Journal of Materials in Civil Engineering, 15 (2), 2003, 134-143.
- [32] [Song et al., 2006] H.W. Song, S.J. Kwon, K.J. Byun, C.K. Park, Predicting carbonation in early-aged cracked concrete, Cement and Concrete Research, 36 (5), 2006, 979-989.
- [33] [Duval, 1992] R. Duval, La durabilité des armatures et du béton d'enrobage, dans La durabilité des bétons, Collection de l'ATHIL, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1992, 492 p.
- [34] [Nischer, 1986] P. Nischer, The quality of the concrete texture, Betonwerk und FertigteilTechnik, 52 (6), 1986, 363-368.
- [35] [Parrott, 1987] L.J. Parrott, A review of carbonation in reinforced concrete, British Cement Association, 1987, 126 p.