

ETUDE EXPERIMENTALE ET STATISTIQUE DE L'INFLUENCE DE L'AFFAISSEMENT ET DE L'AIR OCCLUS SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BETONS

S.M.A. Boukli Hacene, F. Ghomari, F. Schoefs¹ et A. Khelidj²

Laboratoire EOLE, Département de Génie Civil, Faculté des Sciences de l'Ingénieur,
Université AbouBekr Belkaid, Tlemcen, B.P. 230 Chetouane, Tlemcen 13000, Algérie

¹ GeM (UMR CNRS 6183), Faculté des Sciences et des Techniques, Université de Nantes, 2,
rue de la Houssinière, B.P. 92208, 44322 Nantes Cedex 3, France

² GeM (UMR CNRS 6183), IUT de Saint-Nazaire, Université de Nantes, 58, rue Michel-
Ange, B.P. 420, 44606 Saint-Nazaire Cedex, France
boukli_ma@yahoo.fr

(Received 23 April 2009 - Accepted 12 October 2009)

RESUME

La formulation d'un béton correspond au processus de sélection des constituants et de leurs proportions pour fabriquer un matériau possédant certaines propriétés minimales précises, notamment en ce qui concerne la consistance, la résistance et la durabilité.

Les entreprises en Algérie, n'ont que des budgets relativement restreints à consacrer à la formulation des bétons. A cet effet, très peu d'études de recherche y sont consacrées, pour mettre l'accent sur les aspects liés à la composition des bétons en fonction de leurs emplois. On est parti de cet état de fait, en vue d'étudier -dans le cadre d'un programme de recherche agréé- l'influence du pourcentage de l'air occlus dans le béton sur sa consistance ainsi que l'influence de ces deux paramètres (affaissement et pourcentage d'air occlus) sur la résistance à la compression des bétons durcis. Cela constitue du point de vue de l'ingénieur la propriété la plus importante du matériau, si l'on exclut les indicateurs de durabilité (Mounanga et al., 2006).

Pour ce faire, un programme expérimental pour la confection de plus de 700 éprouvettes cylindriques de 16x32 cm a été planifié, en utilisant les matériaux locaux, à savoir: le ciment de Béni-Saf, ainsi que les granulats de l'Entreprise Nationale Algérienne des Granulats (E.N.G). Les bétons ont été formulés à l'aide de la méthode de Dreux-Gorisse. Deux cures ont été adoptées pour les éprouvettes confectionnées, cure à l'air libre ou immersion dans l'eau.

Ce travail présente les résultats d'études concernant d'une part, les propriétés du béton à l'état frais (consistance, air occlus) et d'autre part, la résistance à la compression à 28 jours du béton durci. L'ensemble des résultats expérimentaux obtenus a constitué une banque de données. Cette dernière a permis de comparer, à travers une analyse statistique, le modèle établi par Féret (Baron & Ollivier, 1996) et les résultats des essais.

Mots-clés: affaissement, air occlus, béton, compression, étude statistique, granulats concasés, matériaux locaux, résistance à la compression

ABSTRACT

Companies in Algeria have restricted budgets devoted to the formulation of concrete. Therefore, very few research studies are interested by the concrete composition in accordance to its purpose. Hence, this work is a part of an approved research program assigned to clarify the impact of certain parameters on the quality of concrete. This experimental program consists of more than 700 cylindrical specimens of 16x32 cm that were made using local materials. Excluding the durability indicators towards the concrete, the compressive strength is the most significant property to be considered (Mounanga et al., 2006). The obtained results concern consistency and content air properties of the concrete at fresh state and compressive strength of hardened concrete at 28 days. Thus, the influence of the air content percentage on the concrete consistency is studied. Moreover, the influence of these two parameters on the compressive strength of the hardened concrete is also presented. The experimental results obtained constitute a data bank, which allows comparing through a statistical analysis, the model established by Féret (Baron & Ollivier, 1996) and the results of the tests.

Key words: broken up particles, compression, concrete, air content, local materials, slump, statistical study, strength

INTRODUCTION

Le matériau béton est irremplaçable dans le domaine de la construction, pour des raisons économiques et techniques. Le compromis trouvé entre résistance mécanique, économie, esthétique et facilité de mise en œuvre, offre à ce matériau la première place dans la construction au niveau mondial. Au niveau régional et national le béton est le matériau de construction utilisé par excellence au sein de tous les chantiers, aussi bien dans les secteurs du bâtiment que ceux des travaux publics ; il n'a pas de substitut économique et performant qui possède les mêmes qualités. La résistance à la compression projette généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte du ciment hydraté. De plus, la résistance du béton est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et de l'établissement des spécifications de conformité (Neville, 1995).

Si le béton est un matériau purement local, ses propriétés le sont aussi et restent étroitement liées aux conditions locales (constituants, fabrication, mise en œuvre, conditions climatiques, etc...). Depuis longtemps en effet, la relation entre la composition du béton et sa résistance à la compression a intéressé les chercheurs. Néanmoins, aucune théorie fondamentale et universellement adoptée n'existe en la matière, au-delà de la notion commune de rapport eau/ciment. Abrams (1919) a été probablement le premier à montrer l'importance de ce paramètre dont dépend la résistance à la compression, tandis que, vingt ans auparavant, Féret (1892) prévoyait les résistances (en traction et en compression) en fonction de la concentration volumique du ciment dans la pâte. Cependant, bien que le rapport eau/ciment soit une notion de base dans la technologie du béton, il n'est pas suffisant pour une maîtrise complète de la résistance à la compression. D'autres paramètres sont nécessaires (Popovics, 1990 ; de Larrard & Tondat, 1993 ; Addis & Alexander, 1994 ; de Larrard & belloc, 1999) si l'objectif est de prévoir cette caractéristique avec une précision relative de quelques pour-cent. Il s'agit de propriétés dépendantes de conditions purement locales, telles

que les propriétés de ses constituants, ainsi que les propriétés à l'état frais (consistance, air occlus) (Ferkous *et al.*, 1999; Boukli Hacene & Ghomari, 2007).

La consistance mesurée lors de l'essai d'affaissement par le cône d'Abrams est probablement affectée par la teneur en eau ; elle a été décrite jusqu'à présent comme une propriété du béton frais. Cependant c'est aussi une propriété qui affecte la qualité du produit fini parce que le béton doit avoir une consistance suffisante pour pouvoir être serré et atteindre une masse volumique maximale, tout en utilisant une quantité d'énergie minimale dans la mise en place du matériau.

L'un des effets les plus importants aussi est certainement l'influence des vides provoqués par l'air occlus sur la résistance à la compression du béton. On sait que la résistance du béton est une fonction directe de sa compacité et les vides provoqués par l'air occlus affectent la résistance à la compression de la même manière que les vides de toute autre origine. La présence de 5 % de vide dans le béton peut réduire la résistance de plus de 30 % et même un pourcentage de vide de 2 % peut produire une perte de résistance de plus de 10 % (Glanville *et al.*, 1947), ce qui est en accord avec la loi de Féret qui relie la résistance à la quantité d'eau et d'air présente dans la pâte du ciment hydraté. Les vides à l'intérieur du béton sont soit des bulles d'air piégé lors du malaxage soit des espaces laissés lorsque l'excédent d'eau contenu dans le béton s'évapore. A un degré moindre, il peut aussi y avoir des vides créés par la montée d'eau lors du ressuage. Différents auteurs ont décrit le mécanisme de piégeage de l'air occlus (Powers, 1968). D'après l'équation de Féret, le volume d'air joue le même rôle que le volume d'eau, au regard de la résistance.

Cependant, très peu de travaux de recherche sont consacrés en Algérie pour mettre l'accent sur les aspects liés à la composition des bétons en fonction de leurs emplois. Le travail que nous entreprenons est essentiellement à caractère expérimental et s'inscrit dans le cadre d'une thématique de recherche qui a pour objectif principal d'une part, l'étude de la qualité des bétons issus de matériaux locaux, à savoir : le ciment de Béni-Saf ainsi que les granulats de l'Entreprise Nationale Algérienne des granulats (E.N.G) et d'autre part, la constitution d'une banque de données sur les matériaux, les constituants et les bétons de la région de Tlemcen (Algérie), en vue de combler un manque quasi-total d'informations sur les propriétés mécaniques des bétons de la région. On tente aussi de répondre en partie aux attentes des praticiens et de remédier au problème des mauvais bétons qui se pose encore dans cette région.

On est parti de cet état de fait, en vue d'étudier l'influence de la nature des constituants sur la qualité mécanique du mélange, en particulier, la résistance à la compression. Dans un important programme expérimental où plus de 700 éprouvettes cylindriques de 16x32 cm ont été confectionnées. En vue d'apprécier l'effet de plusieurs paramètres du composite qu'est le béton (quantité d'eau, quantité de ciment, rapport gravier/sable, teneur en air occlus) sur sa résistance à la compression, dix-huit mélanges ont été réalisés dans ce laboratoire avec les mêmes constituants.

Ce programme a permis de montrer d'une part, qu'un grand nombre de bétons mis au point ont atteint des valeurs de résistance largement supérieures à 25 MPa (valeur exigée par l'Organisme National Algérien de Contrôle Technique de la Construction (CTC)) et d'autre part, l'influence de l'affaissement affecté par la teneur en eau et le pourcentage d'air

occlus sur la résistance à la compression des différents mélanges. Tous les essais pratiqués dans le programme expérimental préconisé ont été réalisés selon les normes nationales et internationales reconnues dans le domaine (NA, AFNOR et ASTM).

RESULTATS DES ESSAIS DE CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

Ciment

Dans cette étude, un ciment à faible classe de résistance a été utilisé, il s'agit du CPJ CEM II/A 32.5 qui répond à la norme Algérienne NA 44, de la Société des Ciments de Béni-Saf appartenant à la wilaya de Ain-Temouchent, dont les caractéristiques sont présentées dans les Tableaux 1, 2 et 3. Les analyses concernant la composition chimique et la composition de Bogue minéralogique ont été réalisées au laboratoire de l'usine de fabrication du ciment tandis que celles concernant les caractéristiques physico – mécaniques ont été réalisées au sein de ce laboratoire.

TABLEAU 1

Composition Chimique du Ciment (%)

S ₂ O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CaO libre
28.48	4.19	3.77	56.26	0.89	1.54	0.57

TABLEAU 2

Composition de Bogue Minéralogique du Ciment (%)

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
55.06	21.01	5.57	12.45

TABLEAU 3

Caractéristiques Physico - Mécaniques du Ciment

M _v apparente (kg/m ³)	1088	
M _v absolue (Densitomètre le Chatelier) (kg/m ³)	2980	
M _v absolue (pycnomètre) (kg/m ³)	2986	
Consistance (%)	W=26.6 % soit 133 g	
Début de prise	2h52	
Résistance à la compression (MPa)	2 jours	17.80
	7 jours	33.80
	28 jours	48.70
Résistance en flexion (MPa)	2 jours	3.49
	7 jours	5.72
	28 jours	6.80

Les résultats des essais montrent que le ciment est conforme aux exigences de sa classe. Ce type de ciment n'est pas habituellement utilisé pour la fabrication de béton précontraint à cause de sa faible classe de résistance, par contre, il est bien adapté aux usages les plus courants du bâtiment.

Eau de gâchage

Pour la confection des différents bétons, l'eau potable a été utilisée, distribuée par le réseau du service public de la Daira de Chetouane appartenant à la ville de Tlemcen. L'analyse chimique de cette eau a été réalisée au laboratoire de l'Algérienne des eaux. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4. Ils répondent aux prescriptions de la norme XP P 18-303.

TABLEAU 4

Composition de l'Eau de Gâchage (mg/l)

Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	CO ₃	NO ₃	PH	T (°C)
74.4	49	40	5	95	170	300	42.3	7.5	17.1

Granulats

Les granulats utilisés proviennent de la carrière Djebel Abiod de Sidi Abdelli qui appartient à l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG). Ce choix est dicté par le fait que c'est une grande carrière qui approvisionne principalement la région. Les réserves sont suffisantes pour assurer l'alimentation d'un concasseur ayant une capacité annuelle de production de 500 000 tonnes pendant 87 ans environ. Ces granulats calcaires concassés sont commercialisés en tant que classes granulaires : sable 0/3 et gravillons de classes 3/8, 8/16, 16/25.

Pour pouvoir construire des ouvrages fiables, selon les normes et de haute efficacité technico-économique, il faut déterminer les caractéristiques intrinsèques des granulats, puisque ces derniers constituent le squelette du béton et plus de 70% de son volume et affectent donc fortement ses caractéristiques, à savoir les propriétés dimensionnelles, physico-chimiques et mécaniques. Les caractéristiques de ces granulats sont consignées dans le Tableau 5 et les résultats des analyses granulométriques sont représentés sur la Figure 1.

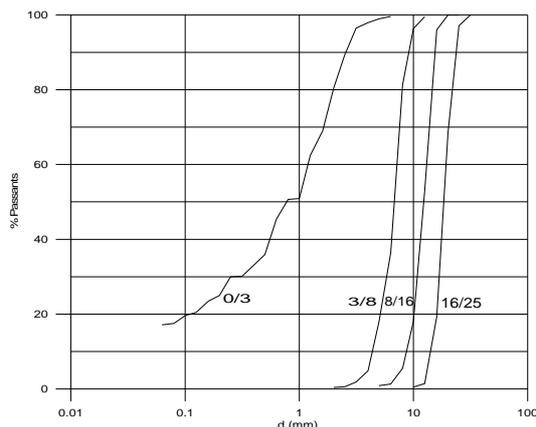


Figure 1. Courbes granulométriques des granulats Djebel Abiod.

TABLEAU 5

Identification des Propriétés des Granulats de Djebel Abiod (ENG)

Caractéristiques des granulats :	Classes granulaires			
	0/3	3/8	8/16	16/25
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1426	1355	1423	1374
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2500	2587	2587	2565
Equivalent de sable (%)	63.2	-	-	-
Foisonnement de sable (%)	$W_{opt} = 7$ lui correspond $\rho_{app} = 1130 \text{Kg/m}^3$			
Essai de propreté (impuretés) (%)	-	1.92	1.3	0.73
Coefficient d'aplatissement (%)	-	19	8	8
Module de finesse	2.95	-	-	-
Teneur en fines (%)	17	-	-	-
Essai Los Angeles (%)	-	$\frac{4/6.3}{27}$	$\frac{6.3/10}{31}$	$\frac{10/14}{31}$
Essai Micro deval (%)	-	$\frac{4/6.3}{15}$	$\frac{6.3/10}{11}$	$\frac{10/14}{8}$

La carrière Djebel Abiod produit un sable propre qui répond aux exigences de la norme NA 455. Dans le cadre de cette étude, il a été utilisé tel quel (Ministère algérien de l'habitat et de l'urbanisme, 2005). Aucun traitement (lavage) n'a été pratiqué pour la réalisation des formulations de bétons préconisés et ce malgré son module de finesse grossier ainsi que les légères discontinuités que présente la courbe granulométrique (Figure 1).

En revanche, les graviers présentent une propreté satisfaisante (< 3%), une forme favorable ($A < 30\%$) ainsi qu'une bonne résistance aux chocs et à l'usure, avec un coefficient $LA < 40\%$ et $MDE < 35\%$.

PLAN EXPERIMENTAL

Connaissant l'importance que revêt le dosage en ciment et le rapport E/C sur les caractéristiques du béton à l'état frais et à l'état durci, on a choisi de faire varier ces deux paramètres selon l'organigramme présenté en Figure 2, ce qui a conduit à la réalisation de 18 formulations de béton.

Aussi deux modes de maturation ont été utilisés; les éprouvettes cylindriques 16x32 cm ont été conservées après confection et démoulage soit à l'air libre soit en immersion totale dans l'eau (NA 426).

La reproductibilité de l'essai de compression est très difficile à obtenir, étant donné que les risques d'erreurs concernant cet essai sont multiples : il suffit souvent que l'une des

spécifications ne soit pas suivie au cours de l'essai, pour obtenir un résultat aberrant. On se concentre ici sur des essais réalisés avec rigueur et pour lesquels une étude statistique peut être conduite. C'est pourquoi on a étudié expérimentalement pour chaque paramètre vingt éprouvettes au lieu des trois conventionnelles. Chaque mesure de résistance est donc la valeur moyenne obtenue sur environ une vingtaine d'éprouvettes et ceci après avoir rejeté les quelques valeurs aberrantes en utilisant le test tabulé pour la loi normale (Lebart *et al.*, 1982).

Les bétons réalisés ont été confectionnés conformément aux normes en vigueur. Les matériaux préalablement séchés dans l'étuve à $110 \pm 5^\circ\text{C}$, sont introduits dans le malaxeur dans l'ordre suivant: graviers (16/25, 8/16, 3/8), ciment, sable et eau. Après un malaxage à sec de l'ordre de 1 minute, on ajoute l'eau de gâchage et on poursuit le malaxage pendant 2 minutes. La mise en place dans les moules a eu lieu, soit par vibration soit par piquage, en fonction des résultats de l'essai d'affaissement et conformément aux normes NF P 18-421, 422, 423.

Dans le cadre de cette étude on a choisi de considérer le rapport E/C constant et non pas l'ouvrabilité du béton. Toutefois, les sables concassés qui ont été utilisés contiennent 15 et 17% de particules inférieures à $80\ \mu\text{m}$, lesquelles augmentent de façon excessive le besoin en eau du béton. C'est la raison pour laquelle on a fait varier le rapport E/C de 0,5 à 0,75.

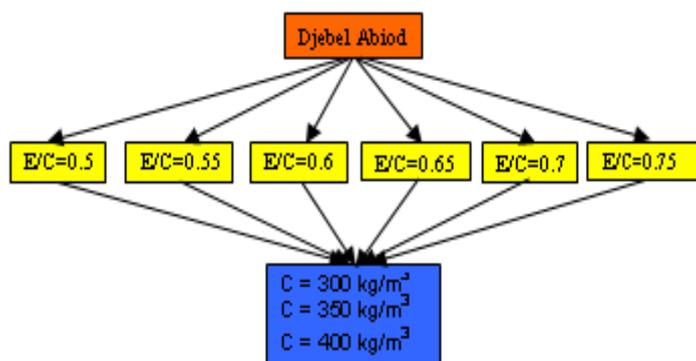


Figure 2. Organigramme du programme expérimental.

La campagne d'essais comprend deux parties : la première concerne l'optimisation du squelette granulaire des bétons. Les bétons sont formulés dans un premier temps par la méthode Dreux-Gorisse (Gorisse, 1978 ; Dreux & Festa, 1995 ; Dreux & Gorisse, 1983), puis optimisés en utilisant la méthode Baron-Lesage (Baron & Lesage, 1969 ; 1976 ; Lesage, 1974), qui consiste à déterminer le rapport gravillon/sable (G/S) optimum. Le rapport G/S optimum est celui qui donne, à pâte constante, l'affaissement le plus élevé. Dans la deuxième partie de la campagne d'essais, les bétons sont formulés sur la base des squelettes granulaires optimisés précédemment, en faisant varier le rapport E/C ainsi que le dosage en ciment. Parmi les propriétés étudiées, on ne présente que les résultats concernant les résistances à la compression à 28 jours, mesurés au laboratoire sur éprouvettes cylindriques normalisées conservées dans l'eau.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Le programme expérimental réalisé a pour ambition, l'étude et la mesure d'un nombre important de propriétés. Dans le cadre de cet article, on s'attachera à étudier l'influence du pourcentage de l'air occlus dans le béton sur sa consistance ainsi que l'influence de ces deux paramètres (affaissement et pourcentage d'air occlus) sur la résistance à la compression des bétons durcis, ce qui permettra d'avoir une vision sur les bétons de la région.

Optimisation des proportions du squelette granulaire

Le rapport G/S optimum a été déterminé pour le béton dont la composition est précisée dans le Tableau 6.

TABLEAU 6
Composition du Béton

Sable + Gravillons (kg/m^3)	Ciment (kg/m^3)	Eau (kg/m^3)
1731.1	350	210

Suivant la méthode Baron-Lesage, on a fabriqué plusieurs gâchées pour le béton présenté précédemment et le rapport G/S a été modulé de 1.4 à 2.0. La Figure 3 montre que le rapport optimum expérimental (pour lequel l'affaissement est maximal) est de 1.7.

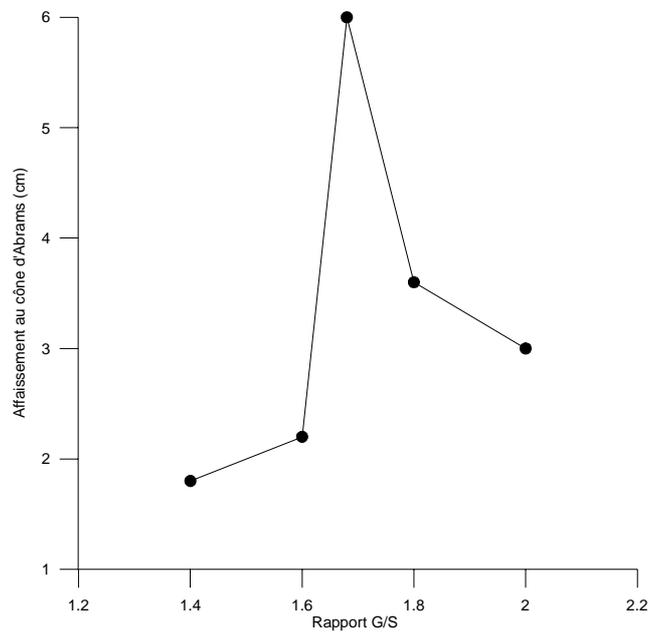


Figure 3. Optimisation du rapport G/S en fonction de l'affaissement.

Influence de l'affaissement sur la résistance à la compression des bétons et influence du pourcentage d'air occlus dans le béton sur l'affaissement

L'essai d'affaissement est le plus couramment employé pour caractériser le béton sur chantier. Il permet de mesurer la consistance d'un béton qui est une grandeur qui sert à caractériser l'aptitude à sa mise en œuvre. L'essai a été effectué conformément aux prescriptions de la norme NF P 18-451 à l'aide du cône d'Abrams.

Les essais de résistance à la compression effectués sur des éprouvettes préparées de façon normalisée, incluant un serrage conforme et une cure dans l'eau pendant une période de 28 jours, donnent des résultats représentant la qualité mécanique du béton. L'essai pour la détermination de la résistance à la compression des éprouvettes, est exécuté conformément aux prescriptions de la norme NF P 18-406.

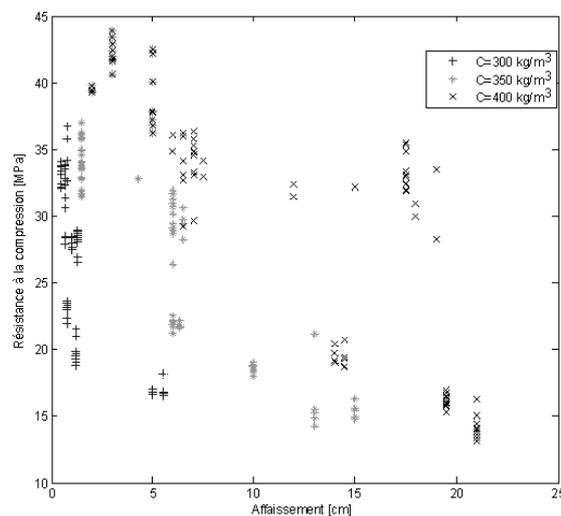


Figure 4. Evolution de la résistance à la compression à 28j de bétons conservés à l'eau pour différents dosages en ciment en fonction de l'affaissement.

La Figure 4 montre l'évolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de l'affaissement. On remarque une diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation de l'affaissement qui est due à l'influence du rapport E/C. Elle montre aussi que, pour un dosage en ciment de 300 kg/m^3 , une bonne partie des bétons réalisés ont une consistance ferme. Par contre pour un dosage de 350 kg/m^3 , la tendance est beaucoup plus plastique à très plastique. Enfin pour un dosage de 400 kg/m^3 , les bétons sont en général de consistance plastique à fluide.

La mise en place du béton conduit ce dernier à toujours renfermer une certaine quantité d'air, appelé air occlus. Ce volume dépend de l'énergie de serrage : plus l'énergie de serrage est importante, plus il sera possible de réduire la quantité d'air occlus.

L'essai a été effectué conformément aux prescriptions de la norme NF P 18-353 à l'aide de l'aéromètre à béton, il consiste à comprimer le mélange étudié et à mesurer la variation de volume résultant de l'application d'une pression déterminée.

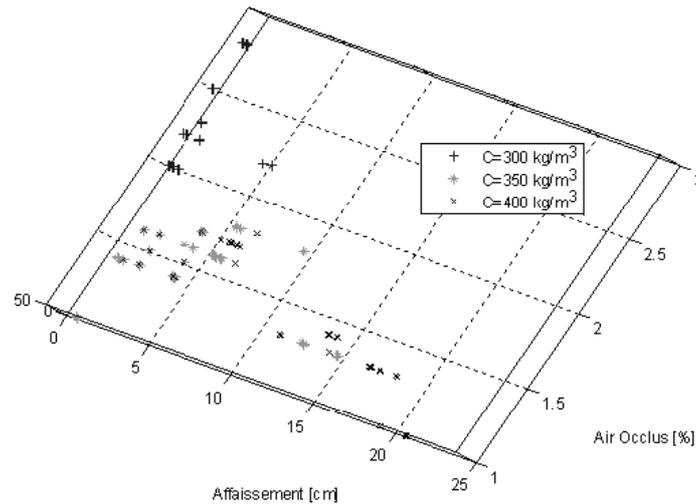


Figure 5. Influence du pourcentage d'air occlus sur l'affaissement.

La Figure 5 montre que le pourcentage d'air occlus décroît dans le mélange avec l'augmentation de l'affaissement qui est due à l'influence du rapport E/C, et plus particulièrement, lorsque la consistance passe de ferme à plastique, très plastique puis fluide.

Le pourcentage d'air occlus est important dans les bétons fermes et tend vers la valeur 1 % pour les bétons très plastiques à fluides. Pour l'affaissement maximum de 21 cm il correspond à un pourcentage d'air occlus mesuré de 1 %.

Pour les mélanges fermes, d'affaissement inférieur à 2 cm, les résultats de mesure de l'air occlus sont dispersés et par conséquent pas trop fiables : ceci est en concordance avec les travaux de de Larrard (2000).

Influence de l'air occlus sur la résistance à la compression des bétons

La quantité d'air occlus mesurée dans le cas de ces bétons varie entre 1 et 2.8 %. Si l'on réalise que 1 % d'air, occupant le même volume que dix litres d'eau, réduit pareillement la résistance à la compression, on conclut à l'évidence que l'air occlus dans un béton doit toujours être mesuré et pris en compte (Baron & Ollivier, 1996).

L'un des effets les plus importants est certainement l'influence des vides provoqués par l'air occlus sur la résistance à la compression du béton. On sait que la résistance du béton est une fonction directe de sa compacité et les vides provoqués par l'air occlus affectent la résistance à la compression de la même manière que les vides de toute autre origine. Les

Figures 6, 7, 8 et 9 présentent la relation entre la résistance à la compression et la teneur en air pour le cas où les vides sont dus aux conditions de malaxage et de mise en place.

La Figure 6 montre que, lorsque la teneur en air augmente, toutes choses égales par ailleurs, la résistance à la compression des bétons diminue pour les essais effectués sur les bétons de rapports E/C de 0.5, 0.55 et 0.6. Par contre, pour les rapports E/C de 0.65, 0.70 et 0.75, la résistance à la compression des mélanges augmente mais très peu, certainement en raison de la consistance très plastique à fluide de certains bétons dosés à 350 kg/m³ et 400 kg/m³ (Figure 4).

Pour un rapport E/C donné, les résistances à la compression ne semblent pas être affectées par le dosage en ciment (300 kg/m³, 350 kg/m³ et 400 kg/m³), ceci reste valable pour tous les rapports E/C examinés. Dans ces conditions un dosage de 300 kg/m³ reste suffisant et par conséquent économique.

Selon les normes en vigueur sur l'application des cures au béton et en considérant la classe faible du ciment utilisé, ce sont les rapports E/C de 0.5, 0.55 et 0.6 (Figure 6) qui offrent aux bétons les valeurs de résistances supérieures à 25 MPa (valeur exigée par l'Organisme National Algérien de Contrôle Technique de la Construction (CTC)) pour une cure à l'eau.

Il est donc très important d'utiliser une cure soit par protection du béton contre le séchage par exemple par une bâche, soit par vaporisation de l'eau au jeune âge lorsqu'on utilise des rapports E/C très faibles.

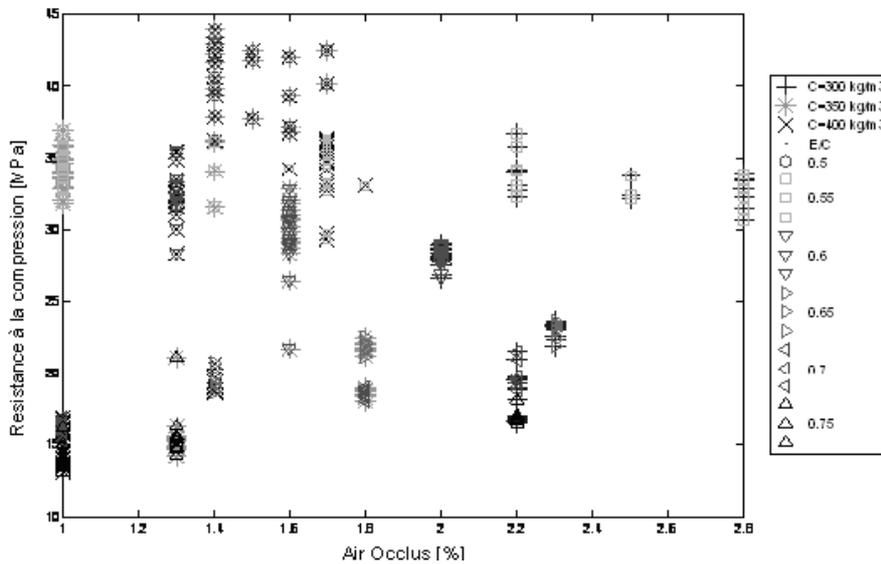


Figure 6. Evolution de la résistance à la compression à 28j de bétons conservés à l'eau pour différents dosages en ciment et différents rapports eau/ciment en fonction du pourcentage d'air occlus.

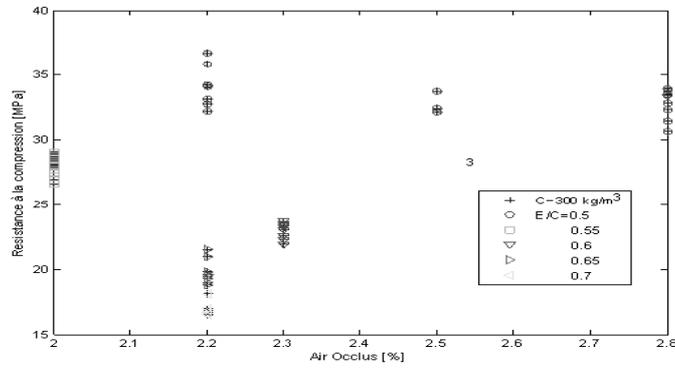


Figure 7. Evolution de la résistance à la compression à 28j de bétons conservés à l'eau pour un dosage en ciment de 300 kg/m³ et différents rapports eau/ciment en fonction du pourcentage d'air occlus.

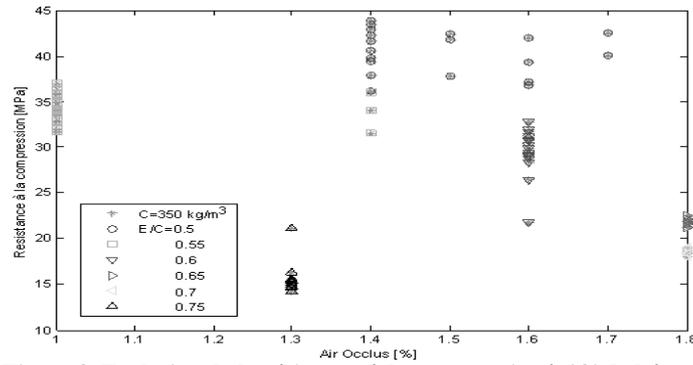


Figure 8. Evolution de la résistance à la compression à 28j de bétons conservés à l'eau pour un dosage en ciment de 350 kg/m³ et différents rapports eau/ciment en fonction du pourcentage d'air occlus.

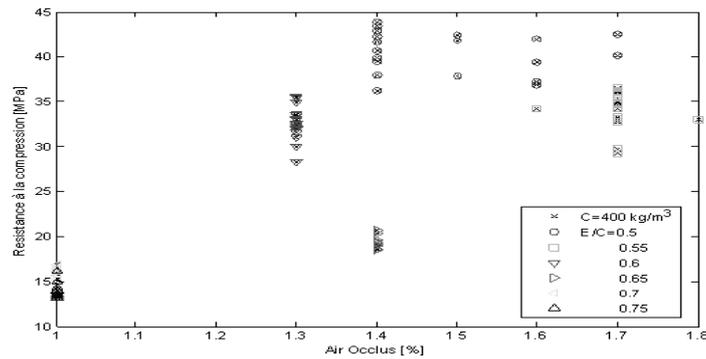


Figure 9. Evolution de la résistance à la compression à 28j de bétons conservés à l'eau pour un dosage en ciment de 400 kg/m³ et différents rapports eau/ciment en fonction du pourcentage d'air occlus.

Les Figures 8 et 9 montrent que les bétons réalisés avec des dosages en ciment de 350 kg/m^3 et 400 kg/m^3 pour différents rapports E/C ont un pourcentage d'air occlus compris entre 1 % et 1.8 %, plus petit que ceux réalisés avec un dosage de 300 kg/m^3 (Figure 7) dont le pourcentage d'air occlus varie entre 2 et 2.8. Ceci est dû particulièrement à l'effet de la consistance qui passe de fluide à très plastique à plastique, puis ferme.

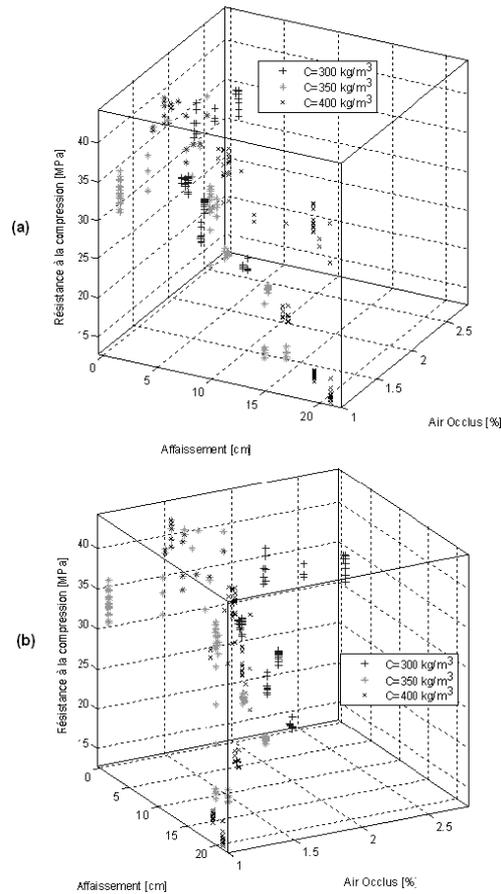


Figure 10. Evolution de la résistance à la compression à 28j de bétons conservés à l'eau en fonction de l'affaissement et du pourcentage d'air occlus suivant deux vues différentes.

L'analyse réalisée sur l'ensemble des mesures effectuées est représentée en tridimensionnel sur la Figure 10 et montre l'évolution de la résistance à la compression à 28 jours de bétons conservés à l'eau en fonction de l'affaissement et du pourcentage d'air occlus. Il est clair, que la teneur en air croît avec la diminution de l'affaissement, c'est-à-dire, lorsqu'on passe de bétons fluides aux bétons fermes. En retour, cet air affectera la résistance à la compression.

Comparaison entre valeurs calculées et mesurées de la résistance à la compression des bétons

Dans le cadre de cette étude, on a utilisé la relation de Féret pour le calcul des résistances à la compression des bétons à 28 jours.

Sous sa forme la plus complète, la relation de Féret s'écrit comme suit :

$$f_c = k_f f_{mc} \left[\frac{v_c}{v_c + v_e + v_a} \right]^2 \quad (1)$$

où f_c est la résistance du béton à l'échance considérée, f_{mc} la résistance normale du ciment à la même échance, v_c , v_e , v_a , les volumes respectifs de ciment, d'eau et d'air occlus rapportés au volume du béton ; k_f est un coefficient. Cette relation se présente comme le produit de trois termes :

- $\left[\frac{v_c}{v_c + v_e + v_a} \right]^2$, dont la valeur dépend de la formulation du béton et, en premier lieu du rapport E/C ;

- f_{mc} dont la valeur dépend du ciment ;

- le coefficient k_f enfin, dont la valeur, dans le domaine des bétons courants, dépend principalement des granulats (sable et graviers) utilisés.

Dans ce cas $f_{mc} = 48,7$ MPa et $k_f = 5$.

Dans le cadre de ce travail, les volumes d'air ont été mesurés avec un aéromètre à béton (norme NF P 18-353) et l'équation utilisée pour le calcul des résistances à la compression des bétons à 28 jours est la suivante :

$$f_c = \frac{243,5}{\left(1 + 2,98 \left(\frac{E + V_a}{C} \right) \right)^2} \quad (2)$$

Le nombre d'essais étant conséquent, on peut estimer la probabilité que les valeurs mesurées \hat{f}_c soient proches des valeurs calculées f_c . Dans ce cas, la formule théorique ne

donne pas de résultats conservatifs. Dans ce sens on peut définir cette probabilité de dépassement comme une probabilité de défaillance P_f . Elle est définie par :

$$P_f = P(M < 0) = P(\hat{f}_c < f_c) \quad (3)$$

où $M = \hat{f}_c < f_c$ désigne la marge de sécurité.

On n'aborde pas dans cet article la question de la modélisation probabiliste. On utilisera donc uniquement les résultats d'essais en ayant une approche fréquentiste. La fréquence de défaillance F_f est alors définie par :

$$F_f = \frac{\text{card}(\Omega_i)}{N_i} \quad (4)$$

où $\Omega_i = \left\{ f_{ci} \mid \hat{f}_{ci} < f_{ci} \right\}, i \in \{I_1, \dots, I_n\}$ et \hat{f}_{ci} résultat de l'essai à la compression

ayant pour valeur calculée f_{ci} , n le nombre de classes de résistance et N_i le nombre d'éprouvettes de résistance calculée f_{ci} .

Les valeurs des résistances à la compression calculées par la relation de Férét sont en abscisses et les valeurs effectivement mesurées sont en ordonnées (Figs. 11, 12, 13 et 14). Une comparaison entre théorie et expérience est donnée sur les Figures 11, 12 et 13 correspondantes chacune à un dosage en ciment de 300 kg/m³, 350 kg/m³ et 400 kg/m³ respectivement. Ces Figures montrent que, pour les rapports E/C > 0.6, la relation de Férét donne, pour les trois dosages en ciment, des valeurs de résistances surestimées et la fréquence de défaillance dans cet intervalle tend vers 1 et les sous-estime pour les rapports E/C ≤ 0.6 et la fréquence de défaillance dans ce cas tend vers 0. Comme l'illustrent les Figures 11, 12 et 13, plus les valeurs mesurées de la résistance à la compression des bétons sont petites et plus la fréquence de défaillance est grande.

La ligne discontinue tracée sur la Figure 11 présente la loi d'évolution et correspond à la droite de régression aux moindres carrés. Toutefois, la ligne courte discontinue tracée en bas sur la Figure 12 est un ajustement aux moindres carrés pour les trois séries de valeurs de résistances à la compression faibles c'est à dire inférieures à 27 MPa. Celle discontinue en haut est un ajustement pour la seconde partie c'est-à-dire les résistances à la compression supérieures à 27 MPa. Par contre la ligne inclinée est une tentative de modèle pour rejoindre ces deux parties, on peut voir ainsi qu'il y a deux tendances et qu'il ne serait pas étonnant que l'on ait un comportement. Les mêmes constatations sont observées sur la Figure 13. Sur les Figures 11, 12 et 13 suscitées on a voulu représenter les valeurs des histogrammes correspondants à des valeurs non nulles ou non égales à 1, sauf pour ceux du haut ($F_f = 0$) car on a des valeurs très proches de la ligne.

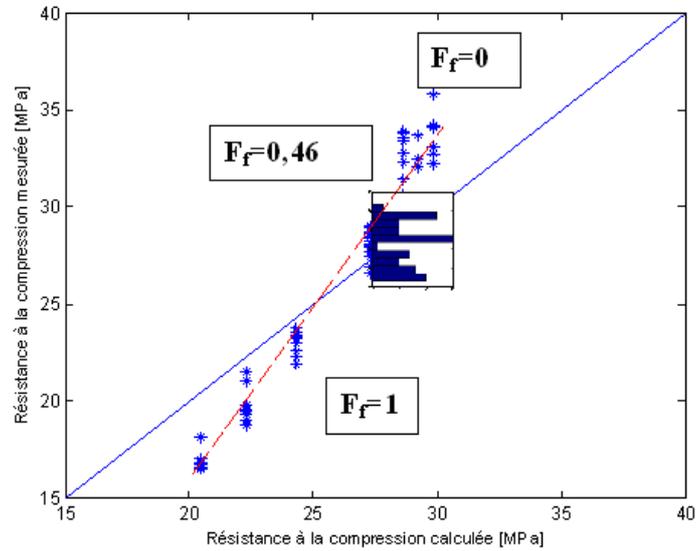


Figure 11. Comparaison entre valeurs calculées et mesurées de la résistance à la compression de bétons pour un dosage en ciment de 300 kg/m³ et différents rapports eau/ciment.

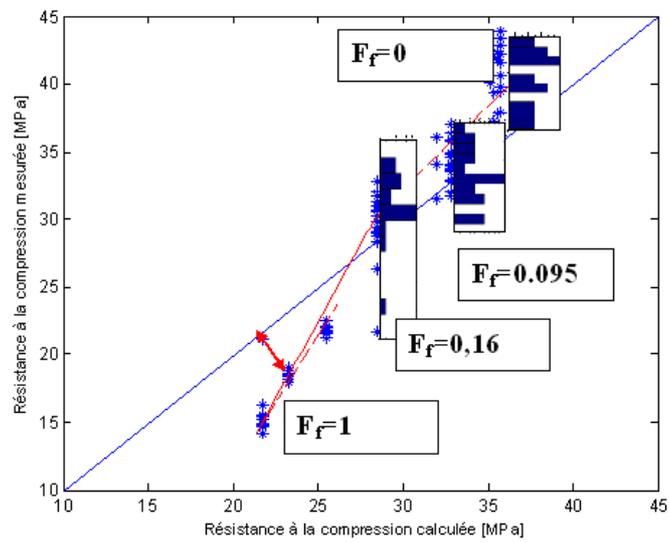


Figure 12. Comparaison entre valeurs calculées et mesurées de la résistance à la compression de bétons pour un dosage en ciment de 350 kg/m³ et différents rapports eau/ciment.

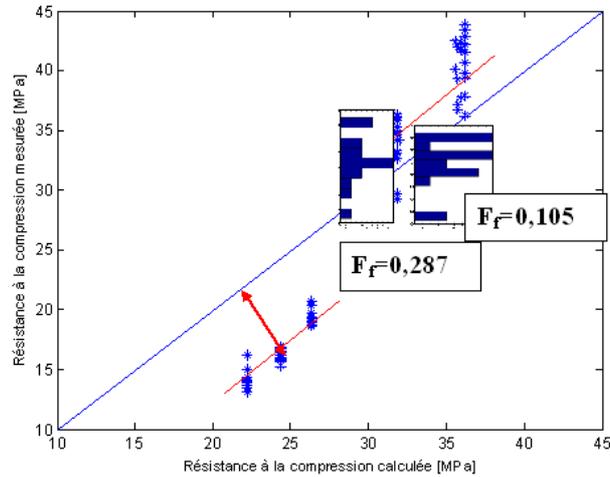


Figure 13. Comparaison entre valeurs calculées et mesurées de la résistance à la compression de bétons pour un dosage en ciment de 400 kg/m³ et différents rapports eau/ciment.

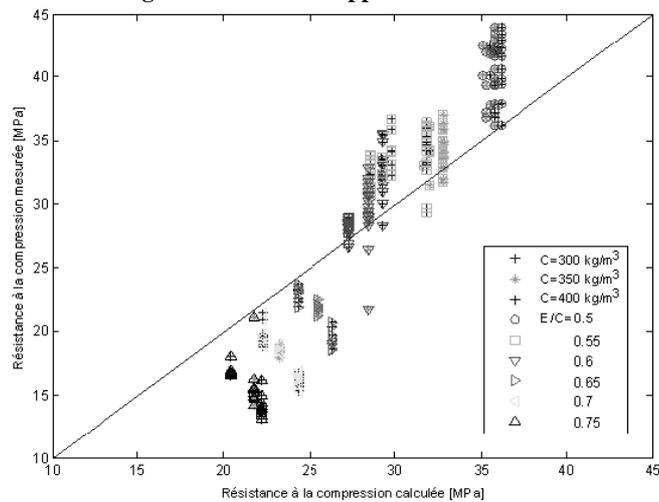


Figure 14. Vérification expérimentale de la relation de Féret.

La Figure 14 regroupe l'ensemble des mesures effectuées et des valeurs calculées et montre que les valeurs des résistances à la compression calculées par la relation de Féret sont légèrement différentes de celles effectivement mesurées, avec une erreur moyenne (en valeur absolue) de 2.35 MPa, ceci peut être dû, selon l'équation 5, au cumul des incertitudes suivantes:

- L'incertitude de l'aéromètre à béton qui est de l'ordre de 0.5%,
- L'incertitude, difficile à estimer, de mesure du volume d'air. En effet, celle ci est réalisée sur le béton en place dans l'aéromètre et non celui du béton en place dans les éprouvettes sur

lesquelles on mesure la résistance. Or le volume d'air, sensible aux conditions de malaxage et de mise en place, peut différer d'un cas à l'autre,

- L'incertitude sur le dosage en ciment $\Delta C = \pm 0.05 \text{ kg}$,

- L'incertitude sur le dosage en eau ΔE qui est fonction de l'erreur absolue des éprouvettes utilisées lors de l'expérimentation et qui diffère d'un cas à l'autre.

A partir de l'équation (2), on a déterminé $\frac{\Delta f_c}{f_c}$, connaissant $\Delta E, \Delta V_a$ et ΔC

$$\frac{\Delta f_c}{f_c} = \frac{2}{1 + 2,98 \left(\frac{E + V_a}{C} \right)} \left[\frac{2,98}{C} \Delta E + \frac{2,98}{C} \Delta V_a + 2,98 \frac{(E + V_a)}{C^2} \Delta C \right] \quad (5)$$

Sur la Figure 14, on n'a pas indiqué les barres d'erreurs car ces dernières sont inférieures en général à 2 MPa et donc très en dessous de la dispersion observée. La dispersion est donc majoritairement extérieure aux incertitudes de mesures.

Depuis bientôt cent seize ans que la règle de Féret a été proposée, on se contente de montrer ici, qu'elle permet une très bonne prévision de la résistance à la compression de bétons préparés avec différents rapports E/C (Figs. 11, 12, 13 et 14). Elle sous-estime toutefois les résistances pour $f_c \geq 27 \text{ MPa}$, c'est-à-dire pour les rapports E/C ≤ 0.6 et les surestime pour $f_c \leq 27 \text{ MPa}$, c'est-à-dire pour les rapports E/C > 0.6 . Cela permet d'être en sécurité pour la moyenne partie des bétons ou $f_c \geq 25 \text{ MPa}$ (valeur exigée par l'Organisme National Algérien (CTC)).

CONCLUSION

A l'issue de la campagne d'essais, qui a constitué un travail expérimental considérable (environ 700 éprouvettes de 16x32 cm ont été confectionnées), on peut dresser la liste des conclusions suivantes :

Les résultats des essais montrent que le ciment est conforme aux exigences de sa classe. Ces masses volumiques sont incluses dans l'intervalle imposé par la norme NA 231 et sa consistance est conforme à la norme NF EN 196-3. De même, ces résistances en compression obtenues à 2, 7 et 28 jours sont conformes aux exigences de la norme EN 196-1, comme indiqué dans le Tableau 3.

L'étude entreprise montre que les granulats de la carrière Djebel Abiod ont présenté de bonnes propriétés physiques, physico-chimiques et mécaniques, qui répondent en général, aux spécifications exigées par la norme P 18-541. Pour cette étude, ces granulats ont été utilisés en tant que tel, on n'a pratiqué aucun traitement (lavage) pour formuler des bétons préconisés par l'Organisme National Algérien de Contrôle Technique de la Construction (CTC).

Dans le cadre de l'optimisation des proportions du squelette granulaire, le rapport optimum expérimental G/S trouvé (pour lequel l'affaissement est maximal) est de 1.7.

La résistance à la compression à 28 jours ainsi que le pourcentage d'air occlus décroissent avec l'augmentation de l'affaissement qui est due à l'influence du rapport E/C, et plus particulièrement, lorsque la consistance passe de ferme à plastique à très plastique puis fluide.

Lorsque la teneur en air augmente, toutes choses égales par ailleurs, la résistance à la compression des bétons diminue pour les essais effectués sur les bétons dont les rapports E/C de 0.5, 0.55 et 0.6. Par contre, pour les rapports E/C de 0.65, 0.70 et 0.75, la résistance à la compression des mélanges augmente mais très peu, certainement, en raison de la consistance très plastique à fluide de certains bétons particulièrement ceux dosés à 350 kg/m³ et 400 kg/m³.

Selon les normes en vigueur sur l'application des cures au béton et en considérant la classe faible du ciment utilisé, ce sont les rapports E/C de 0.5, 0.55 et 0.6 qui offrent aux bétons les valeurs de résistances supérieures à 25 MPa (valeur exigée par l'Organisme National Algérien de Contrôle Technique de la Construction (CTC)) pour une cure à l'eau. Il est donc très important d'utiliser une cure soit par protection du béton contre le séchage par exemple par une bâche, soit par vaporisation de l'eau au jeune âge quand on utilise des rapports E/C très faibles.

Les bétons mis au point couvrent une gamme de résistance extrêmement large depuis 11.9 MPa jusqu'à des bétons de 40.3 MPa destinés pour les structures en béton armé de bâtiment ou de travaux publics et ce pour une classe de résistance de 32.5. Ces bétons ont présenté de bonnes propriétés rhéologiques à l'état frais, et ont pu être utilisés pour fabriquer dans de bonnes conditions divers corps d'épreuve.

Pour un rapport E/C donné, les résistances à la compression ne semblent pas être affectées par le dosage en ciment (300 kg/m³, 350 kg/m³ et 400 kg/m³), ceci est valable pour tous les rapports E/C examinés. Dans ces conditions, un dosage de 300 kg/m³ reste suffisant et par conséquent économique.

Les valeurs des résistances à la compression calculées par la relation de Féret sont légèrement différentes de celles effectivement mesurées, avec une erreur moyenne (en valeur absolue) de 2.35 MPa. On se contente de montrer ici, que la règle de Féret permet une très bonne prévision de la résistance à la compression de bétons préparés avec différents rapports E/C. Elle sous-estime toutefois les résistances pour $f_c \geq 27$ MPa et les surestime pour $f_c \leq 27$ MPa. Cela permet d'être en sécurité pour la moyenne partie des bétons où $f_c \geq 25$ MPa (valeur exigée par l'Organisme National Algérien de Contrôle Technique de la Construction (CTC)).

REFERENCES

- Abrams, L.D. 1919, (1981). *Properties of concrete*. Cité par Neville, A.M., 3rd Ed., Pitman.
 Addis, B.J. and Alexander, M.G. 1994. Cement-Saturation and its effects on the compressive strength and stiffness of concrete. *Cement and Concrete Research*, 24(5): 975-986.
 Baron, J. et Ollivier, J.P. 1996. *Les bétons bases et données pour leur formulation*. Edition Eyrolles, Paris.

- Baron, J. et Lesage, R. 1976. *La composition du béton hydraulique du laboratoire au chantier*. Rapport de recherche des LCPC N° 64, Paris, Décembre.
- Baron, J. et Lesage, R. 1969. *Compacité et maniabilité des bétons hydrauliques*. Rapport de recherche des LCPC no. 3, Paris, Août.
- Boukli Hacene, M.A. and Ghomari, F. 2007. Study of the compression resistance of local concretes. *Twelfth International Colloquium on Structural and Geotechnical Engineering, ICSGE, Cairo, Egypt, 10-12 December*, pp.1005-1014.
- De Larrard, F. 2000. *Structures granulaires et formulation des bétons*. Traduit de l'anglais par Lecomte A., Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Paris.
- De Larrard, F. et Belloc, A. 1999. L'influence du granulats sur la résistance à la compression des bétons. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, 219 : 41-52, Janvier-Février.
- De Larrard, F. et Tondat, P. 1993. Sur la contribution de la topologie du squelette granulaire à la résistance en compression du béton. *Materials and Structures, RILEM*, 26 : 505-516.
- Dreux, G. et Festa, J. 1995. *Nouveau guide du béton et ses constituants*. Editions Eyrolles, Paris.
- Dreux, G. et Gorisse, F. 1983. Composition des bétons : méthode Dreux Gorisse, bilan de cinq années d'application en Côte d'Ivoire. *Annales de l'Institut Technique du bâtiment et des Travaux Publiques*, no. 414, Paris, Mai.
- Feret, R. 1892. Sur la compacité des mortiers. *Annales des Ponts et Chaussées*, Série 7, 4 : 5-164.
- Ferkous, S., Houari, H., Chikh, N. Mouatsi, M. 1999. Durabilité des bétons : constat, causes et remèdes. *Actes du deuxième séminaire national de génie civil, Université Mentouri, Constantine*, 24-25 mai.
- Glanville, W.H., Collins, A.R. and Matthews, D.D. 1947. The grading of aggregates and workability of concrete. *Road Research Tech. Paper n°5*, HMSO, London.
- Gorisse, F. 1978. *Essais et contrôle des bétons*. Editions Eyrolles, Paris.
- Khelidj, A., Loukili, A. et Bastian, G. 1998. Etude expérimentale du couplage hydro-chimique dans les bétons en cours de maturation : incidence sur les retraits. *RILEM, Materials and Structures*, 31: 588-594.
- Lebart, L., Morineau, A. et Fenelon, J.P. 1982. *Traitement des données statistiques*. Dunod, Paris.
- Lesage, R. 1974. *Etude expérimentale de la mise en place du béton frais*. Rapport de recherche des LCPC N° 37, Paris, Juin.
- Ministère algérien de l'habitat et de l'urbanisme 2005. *Les sables de concassage*. Centre national d'études et de recherches intégrées du bâtiment / C.N.E.I.B., Mai.
- Mounanga, P., Baroghel-Bouny, V., Loukili, A. and Khelidj, A. 2006. Autogenous deformations of cement pastes: Part I. Temperature effects at early age and micro-macro correlations. *Cement and Concrete Research*, 36(1): 110-122, January.
- Neville, A.M. 1995. *Properties of concrete*. Longman, Harlow.
- Popovics, S. 1990. Analysis of concrete strength versus water-cement ratio relationship. *ACI Materials Journal*, 87: 517-528.
- Powers, T.C. 1968. *Properties of fresh concrete*. John Wiley & Sons, New York, 664 p.