

VALORISATION DES GRANULATS LOCAUX DANS LA FABRICATION DE BÉTON À HAUTES PERFORMANCES (CAS DU SUD-OUEST ALGÉRIEN)

T. Rikioui, Y. Abdelaziz et A. Mekkaoui
Laboratoire FIMAS, Université de Béchar, Béchar 08000, Algérie
labonum@yahoo.fr

(Received 6 December 2010 - Accepted 29 March 2011)

RÉSUMÉ

Sur la base d'un programme expérimental visant à aboutir à une optimisation des formulations des bétons à hautes performances (BHP) à base des granulats locaux, une étude a été conduite afin d'identifier les propriétés physico-chimiques et mécaniques des granulats localement disponibles au niveau de la ville de Béchar (sud-ouest algérien). Une étude estimative comparative entre le béton conventionnel et son équivalent de BHP a été également établie. Enfin, des applications potentielles sont commentées au moyen de deux cas pratiques.

Mots-clés: béton à hautes performances, granulats locaux, optimisation

ABSTRACT

On the basis of an experimental program to achieve an optimization of formulations of high performance concretes (HPC) based on local aggregates, a study was conducted to identify the physicochemical and mechanical properties of the aggregates locally available at the city of Béchar (southwest Algeria). A comparative estimate study between the conventional concrete and its HPC equivalent was also initiated. Finally, potential applications are commented using two practical cases.

Keywords: high performance concretes, local aggregates, optimization

INTRODUCTION

Depuis l'origine, le béton traditionnel est caractérisé essentiellement par sa résistance à la compression. Il doit désormais en être autrement avec les nouveaux bétons car beaucoup d'autres propriétés se trouvent être améliorées et peuvent ainsi devenir déterminantes dans le choix des solutions retenues dans les projets. Les bétons à hautes performances présentent une durabilité améliorée et une résistance accrue. Ils peuvent supporter des charges supérieures ou permettre des constructions plus élancées. Ils peuvent également présenter des formes plus complexes et permettent de réaliser de plus grandes portées. Des progrès considérables ont été enregistrés dans ce domaine au cours de ces dernières décennies. Les granulats connus pour les bétons ordinaires conviennent en principe

également pour un béton à haute résistance. Toutefois, dans de nombreuses régions, le choix de granulats est très limité et, pour des raisons économiques, les usagers sont tenus d'utiliser ceux existants sur site (Rikioui, 2006).

A ce propos, le présent article expose les résultats expérimentaux d'une démarche rationnelle, afin d'aboutir à l'optimisation et l'exploitation de formulations du BHP à base des granulats locaux et à une estimation comparative entre 1 m³ de béton conventionnel et son équivalent de BHP. Enfin, des applications potentielles sont commentées au moyen de deux exemples.

PROVENANCES DES MATÉRIAUX

Granulats et eau de gâchage de béton

La région de Béchar se situe dans le sud ouest algérien (Figure 1A). Sa diversité géologique constitue une véritable richesse en matière de matériaux de construction (graviers et sables). Une industrie extractive importante est concentrée préférentiellement vers le sud de la ville de Béchar (Figure 1B). On exploite les calcaires du Djebel Béchar en front de taille (Fabre, 1976) et les alluvions des principaux réseaux hydrographiques (Figure 1C).

Les matériaux utilisés dans cette étude sont illustrés sur la Figure 1 ci-dessous :

-Le sable (S) est roulé prélevé dans l'Oued Manouarar situé à environ 70 km au sud de la ville de Béchar (N°3).

-La production de granulats concassés G1, G2 et G3 (N°2) est issue du concassage du banc calcaire de Djiniène (Figure 1D) qui clôture l'étage du Namurien de Djebel Béchar (Fabre, 1976).

-L'eau exploitée dans le gâchage de béton est celle d'A.E.P, provenant du barrage de Djorf Torba est indexée par le N°1 sur la carte.

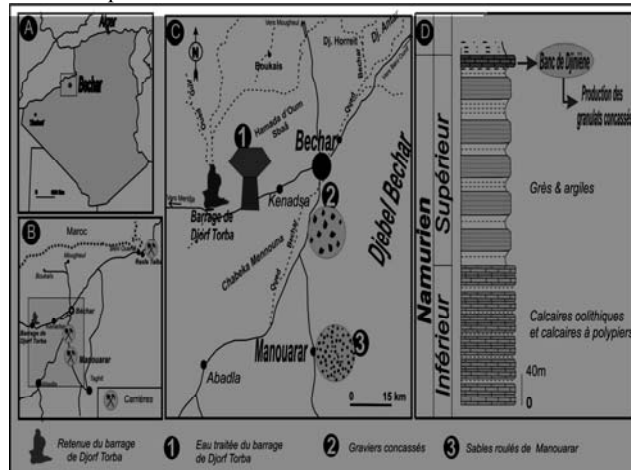


Figure 1. Esquisses géographiques illustrant la position des carrières et les provenances des matériaux utilisés (granulats et eau de gâchage).

Ciment

Le ciment exploité ici, le CPA CEM II 42.5 de type CRS (ciment résistant aux sulfates) de production locale est largement disponible sur le marché national.

Fumée de silice

La fumée de silice localement commercialisée est jugée nécessaire pour cette expérimentation. Elle permet de combler les minuscules vides dans le béton.

Superplastifiants

Les adjuvants employés sont de type superplastifiant haut réducteur d'eau commercialisé sur le marché national. Leur utilisation a pour but de concilier l'exigence de réduction de la quantité d'eau, synonyme de résistance et de durabilité accrues avec l'exigence d'un surcroît d'eau, synonyme d'ouvrabilité facilitée.

IDENTIFICATION DES MATÉRIAUX

Granulats

Les graviers G1, G2 et G3 correspondent pétrographiquement à un calcaire micritique gréseux partiellement dolomitisé. Le sable est constitué principalement par deux proportions : silice et calcaire.

Suite aux essais d'identification en vigueur, les caractéristiques des matériaux ont été déterminées (Tableau 1).

Les identifications physiques et mécaniques des différents granulats ont mis en évidence leurs conformités aux spécifications de la norme NF P 18-301 (Georges & Claude, 1990). Également, les granulats (G1, G2, G3 et S) ne montrent pas d'anomalie dans leurs courbes granulométriques (Figure 2). À la lumière de ces résultats, les fractions G1, G2 et G3 se rangent respectivement dans les classes 2/6, 6/12 et 12/20 (NF P 18-560).

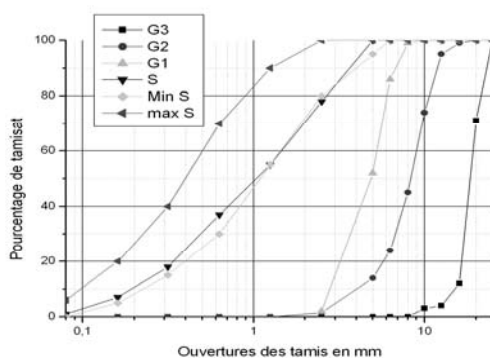


Figure 2. Courbes granulométriques des granulats et fuseau de spécification des sables pour béton.

TABLEAU 1

Résultats d'Identification des Granulats

Désignations		Produits			
Classe d/D		Sable 0/5	Graviers G1	Graviers G2	Graviers G3
Masses volumiques	Absolue	2,57 t/m ³	2,67 t/m ³		
	Apparente	1,75 t/m ³	1,40 t/m ³	1,51 t/m ³	1,35 t/m ³
Propreté superficielle %		X	1,05	1	0,8
Équivalent de sable %		73	X	X	X
Coefficient LA		X	21 % ≤ 40%		
Coefficient M.D.E		X	17 % ≤ 35 %		
Friabilité de sable (FS)		35,8 % ≤ 40 %	X	X	X
Lieu de prélèvement		Oued Manouarar	Concasneur « SONATRO »		
Nature		Silico- calcaire	Calcaire dolomitisé gréseux		
Coefficient d'aplatissement		X	7,17 %	4,15 %	3,62 %
Module de finesse		4,04 %	-	-	-
Bleu de méthylène		0,26 %	X	X	X

Du point de vue chimique, une analyse sommaire de ces composants atteste l'absence d'éléments nuisibles pour le béton et conforte l'analyse pétrographique (Tableau 2).

TABLEAU 2

Résultats d'Analyse Chimique Sommaire des Granulats

Désignations	Insolubles (%)	Carbonates (%)	Sulfates (%)	Chlorures (%)
Sable S	49,70	50	Trace	0,30
Graviers G1	21,25	78,26	Trace	0,49
Graviers G2	15,46	84,23	Trace	0,31
Graviers G3	14,92	84,78	Trace	0,30

Eau « E »

L'eau employée dans le gâchage est celle du robinet, dont les résultats d'analyse physico-chimique sont mentionnés dans le Tableau 3 :

TABLEAU 3

Résultats d'Analyse Physico-Chimique de l'Eau de Gâchage

pH	Résidu sec à 105 C° (mg/l)	Chlorures (Cl ⁻) (mg/l)	Sulfates (SO ₄ ²⁻) (mg/l)	Matière en suspension (mg/l)	Conductivité à 25 C° en (ms/cm)
8,13	800,00	234,30	123,02	Nulle	0,93

Ciment « C »

Parmi les cinq types de ciments courants, le CPA-CEM I -42.5 de type CRS (ciment résistant aux sulfates) de provenance locale fut choisi. Ce ciment répond aux spécifications de la norme algérienne NA443. Il est caractérisé par une couleur foncée. Il est manufacturé en broyant du clinker contenant un taux réduit d'aluminat de calcium et une proportion plus faible de gypse que celle du ciment portland composé. Ses principales caractéristiques sont mentionnées dans le Tableau 4.

TABLEAU 4

Résultats d'Analyse d'Identification de Ciment

Composition	Taux des éléments
SO ₃	1,9%
MgO	1,7%
Perte au feu	1%
Surface spécifique Blaine	3100 cm ² /g
Silicates tricalciques, C3S	57%
Silicates bicalciques, C2S	19%
Aluminates tricalciques, C3A	3,0%
Alumino ferrites tetracalciques, C4AF	14%

Superplastifiants

Les superplastifiants choisis à titre comparatif et notés MEDAPLAST SP, MEDAPLAST SP40 et MEDAFLOW 30 sont des hauts réducteurs d'eau (conformément à la norme EN 934-2) (Baron & Olivier, 1999).

Fumée de silice « F.S »

Le produit choisi, nommé MAPEPLAST SF est un adjuvant à activité pouzzolanique à base de fumée de silice. C'est une poudre à employer avec des superplastifiants, afin d'obtenir des mortiers et des bétons de consistance thixotrope, plastique et fluide ou très fluide.

FORMULATION DU BHP

On a choisi d'apprécier l'effet de deux facteurs contrôlés, à savoir le rapport pondéral E/L d'eau par rapport au liant ($L=C+F.S$) et le dosage en eau. Sachant que pour l'ensemble des plans d'expériences réalisées, le dosage en eau prend comme niveaux extrêmes 130 l/m^3 et 150 l/m^3 avec un rapport E/L allant de 0,28 à 0,33 et un taux fixe en F.S égale à 8% du poids de ciment, les autres composants de la formulation sont à un niveau constant. Le dosage en ciment est considéré comme facteur constant et fixé à 420 kg par mètre cube de béton. On dispose de trois adjuvants différents disponibles dans le marché pour entamer cette phase. Les matériaux inertes (granulats) sont considérés comme facteurs constants. Leurs proportions ont été estimées par la méthode de Faury (Dreux, 1998). Sept (07) formulations (confections) de béton ont été préparées pour les essais expérimentaux (Tableau 5).

TABLEAU 5

Les Différentes Variantes de Formulation des Bétons en Kilogramme pour un Mètre Cube de Béton (C=420, F.S=34)

Confection	Superplastifiants		E	E/(C+F.S)	Sable	Graviers		
	Type	Dosage				2/6	6/12	12/20
BHP 0	1	10	130	0,28	573	186	464	697
BHP 1	1	12	147	0,32	573	186	464	697
BHP 2	2	12	150	0,33	573	186	464	697
BHP 3	3	12	150	0,33	560	182	453	680
BHP 4	1	12	145	0,32	692	91	1096	0
BHP 5	1	12	147	0,32	692	91	1096	0
BHP6	1	12	147	0,32	573	186	464	697

avec :

type 1 : MEDAPLAST SP 40,

type 2 : MEDAPLAST SP,

type 3 : MEDAFLOW 30.

PERFORMANCES DES BÉTONS

Ouvrabilité

La maniabilité (ouvrabilité) peut se définir comme la facilité de mise en place du béton sans malfaçon. L'ouvrabilité n'est pas une grandeur physique mesurable, elle est la résultante de plusieurs facteurs. Il existe de nombreux essais et tests. Le test appliqué ici est

celui de l'affaissement au cône d'Abrams (NF P 18-541) (Figure 3), dont les résultats sont mentionnés dans le Tableau 6.



Figure 3. Test d'ouvrabilité au cône d'Abrams.

TABLEAU 6

Résultats du Test d'Affaissement des Bétons

Confections	Type de superplastifiant	Affaissement (cm)	Classe de consistance
BHP 0	1	1	Ferme
BHP 1	1	6	Plastique
BHP 2	2	7,75	Plastique
BHP 3	3	2	Ferme
BHP 4	1	5	Plastique
BHP 5	1	6	Plastique
BHP 6	1	12,5	Très plastique

Essais mécaniques

La résistance à la compression est obtenue en écrasant trois éprouvettes cylindriques 16/32 avec des cubes de 7 cm d'arête récupérés après essai de traction par flexion de six prismes de 7x7x28 cm³.

La résistance à la flexion et la résistance à la traction du béton ont été mesurées par flexion sous moment constant d'éprouvettes prismatiques de dimensions 7x7x28cm³ (Dreux, 1998). Les résultats moyens avec leurs écarts types sont indiqués dans le Tableau 7.

TABLEAU 7
Résultats des Essais Mécaniques des Différentes Formulations de Béton

Confections	Masses volumiques g/cm ³	f _{c7} (MPa)		f _{c28} (MPa)		f _{t28} (MPa)		f _{l28} (MPa)	
		Moy	σ	Moy	σ	Moy	σ	Moy	σ
BHP 0	2514	-	-	62,5	1.87	-	-	-	-
BHP 1	2533	59,0	2.16	98,0	0.82	7,02	0.63	4,22	0.38
BHP 2	2534	55,0	5.71	67,0	4.96	7,02	0.36	4,22	0.22
BHP 3	2491	46,0	4.90	57,5	2.12	7,63	0.55	4,59	0.33
BHP 4	2490	45,0	4.64	83,0	6.16	9,48	1.49	4,59	0.9
BHP 5	2492	67	5.35	72,0	4.32	-	-	-	-
BHP 6	2533	-	-	74,0	3.26	-	-	-	-

avec :

f_{c7} : résistance mécanique à la compression à 7 jours,

f_{c28} : résistance mécanique à la compression à 28 jours,

f_{t28} : résistance mécanique à la flexion à 28 jours,

f_{l28} : résistance mécanique à la traction par flexion à 28 jours,

Moy : valeur moyenne,

σ : écart type.

Durabilité

La faible porosité procure au béton de nombreux avantages déterminants pour sa durabilité. Un béton en contact avec un milieu agressif (eau pure, eau séléniteuse, eau contenant des acides organiques) subira une attaque beaucoup plus lente si les capillaires du béton sont moins nombreux et plus fins (Cimbéton, 2006).

Dans ce contexte, trois éprouvettes prismatiques en béton ont été conservées dans l'eau pure stagnante depuis plus de quatre ans. Elles sont destinées à l'essai d'écrasement en compression simple dont les résultats moyens, avec les écarts types de la formulation du BHP 6 sont rapportés dans le Tableau 8.

TABLEAU 8
Résultats de Compression Simple de Béton après 4 ans de Conservation dans l'Eau Pure

béton	Dimensions (cm ³)	Masses volumiques (g/cm ³)		Charge de rupture (kN)		Résistance à la compression (MPa)	
		Moy	σ	Moy	σ	Moy	σ
BHP 6	15x10x15	2,51	0.08	830	56.55	55,33	3.77

Bien que la durée de conservation des éprouvettes en béton dans l'eau pure est grande, le taux de diminution de résistance à la compression de ces éprouvettes est faible. Cela indique que l'attaque de ce béton par les éléments agressifs est très lente.

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

À la lumière de ce qui précède, les granulats utilisés peuvent être utilisés sans équivoque dans la formulation des bétons à hautes résistances, car toutes les valeurs de résistance à la compression sont supérieures à 60 MPa. Un affaissement de 12,5 cm au cône du BHP 6 donne naissance à un béton à hautes performances. Pour les bétons d'affaissement inférieur à 2 cm ces types peuvent être utilisés dans les bétons de traverse de chemin de fer, ainsi que dans les chaussées rigides des aérodromes.

Bien que les structures en béton ne soient pas normalement conçues pour résister à des efforts de traction directe, la mesure de la résistance à la traction, s'avère intéressante pour certaines applications comme les autoroutes en béton, les chaussées rigides, etc. qui sont conçues compte tenu de la résistance à la flexion du béton (Aïtcin, 2001) qui est liée elle-même à la résistance en traction.

Les résultats de cette expérimentation montrent que l'addition de la fumée de silice contribue à l'amélioration de la résistance à la traction du béton, mais les valeurs restent toujours bien modestes et le rapport des résistances à la traction aux résistances à la compression tend à diminuer dans le cas du BHP (Rikioui, 2006).

EXEMPLES D'APPLICATION

Le BHP présente des avantages technologiques intéressants par rapport au béton ordinaire. Sa durabilité est améliorée face aux agents physico-chimiques agressifs (perméabilité réduite), et ses résistances mécaniques sont également augmentées. De ces propriétés du BHP découle un grand avantage en matière d'entretien à long terme, ainsi que son ouvrabilité facilite largement sa mise en œuvre même dans les zones de forte densité d'armatures. Une résistance finale accrue après durcissement permet de réduire les dimensions des ouvrages. Tout cela se traduit par une économie d'espace, de temps et de coût.

En qualité de techniciens impliqués dans divers projets de construction dans la région sud-ouest de l'Algérie, l'utilisation du BHP peut avoir localement des tombées positives, techniques et économiques.

A titre indicatif et non limitatif, on évoque deux exemples d'application, afin de mettre en valeur les avantages technico-économiques du BHP.

Aérodrome de Béchar

Le dimensionnement des chaussées particulièrement rigides dépend de la résistance à la flexion de son béton (STBA, 1988), et l'amélioration remarquable de ce facteur pour le BHP, incitent à faire une comparaison entre les résultats de résistance de béton de l'Aérodrome de Béchar (béton réalisé par les mêmes granulats, ciment et adjuvant) et le béton considéré (BHP) faisant l'objet de cette partie de la recherche.

Des éprouvettes prismatiques (15x15x60 cm³) en béton de la chaussée rigide (Bch) de l'Aérodrome de Béchar, stockées et conservées dans un laboratoire, ont été écrasées après 1030 jours. Les résultats de cette expérience sont mentionnés dans le Tableau 9 suivant.

TABLEAU 9

Résultats de la Formulation de Béton de Chaussée de l'Aérodrome de Béchar

Composition moyenne	Résistance à la flexion sous moment constant			
	Eprouvette	Charge de rupture (kN)	Contrainte de flexion (MPa)	Résistance en traction (MPa)
Gravier 20/40: 738 kg Gravier 12/20: 228 kg Gravier 02/12: 310 kg Sable 0/3: 561 kg Ciment CPA CEMI 42,5: 375 kg Eau : 140kg Entraîneur d'air 0,45 kg superplastifiant 1,0 %	1	47,5	6,33	3,8
	2	46,8	6,24	3,74
	3	48,2	6,42	3,85
	Réponse moyenne	47,5	6,33	3,76

Selon le cahier de charges de l'Aérodrome de Béchar, ces résultats sont satisfaisants pour ce corps de chaussée. Pour l'appréciation de cette expérimentation, on évoque une comparaison des résultats obtenus (Figure 4). On constate le fait suivant :

Bien que l'âge soit très différent pour les prismes en BHP (4 semaines) et pour ceux en bétons de chaussées (34 mois), les résistances à la rupture en traction par flexion des BHP sont largement supérieures à celles des Bch et l'utilisation du BHP permet donc de minimiser l'épaisseur de la chaussée rigide.

Pont de Fom El Erg (région de Kerzaz-Béchar)

Ce pont mixte se trouve à environ 380 km au sud de la ville de Béchar. Il est construit sur le cours de l'Oued Saoura et mis en service depuis 1994. Il assure un rôle vital pour la route nationale N°6 reliant Béchar à Adrar. Toutefois, après une courte durée de sa mise en service, la dilatation du pont aux deux extrémités causa des dégâts des joints sous chaussée et du mur front des culées, ce qui implique la nécessité d'entreprendre des travaux de réparation, qui entravent le trafic routier. Ces travaux, qui doivent être répétés périodiquement, consistent en une démolition des anciennes dalles et leur reconstruction en utilisant un béton ordinaire.

A l'instar des travaux de réparations effectués sur le pont Jacques-Cartier de Sherbrooke (Québec) (Blais *et al.*, 1996) au début des années 80, le tablier du pont a subi des réparations majeures consistant en un remplacement partiel du béton jusqu'au premier niveau d'armatures. Ce projet a démontré qu'on peut utiliser un béton à haute performance pour reconstruire des tabliers détériorés du pont du Fom El Erg, ce qui procure des avantages majeurs :

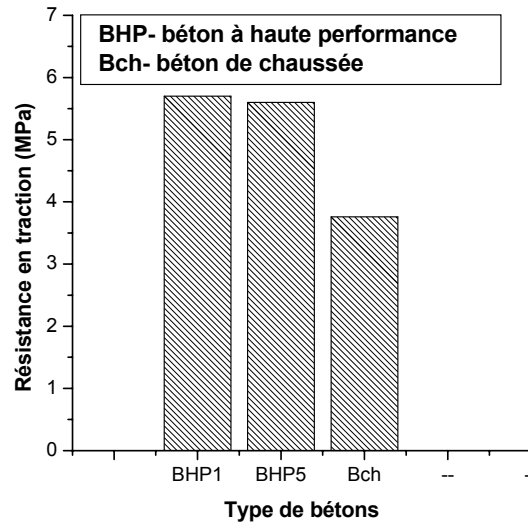


Figure 4. Histogramme de comparaison BHP -Bch à la traction par flexion.

-La durabilité des bétons à hautes performances est nettement supérieure à celle des bétons ordinaires. La comparaison de la perméabilité aux ions chlore des bétons à haute performance et des bétons ordinaires montre la nette supériorité des bétons à hautes performances (Blais, 1996) et, par conséquent, la possibilité d'échapper aux travaux de réparation répétitive et de courte efficacité.

- Le béton à hautes performances a une résistance initiale élevée si bien qu'il ne fallait que 24 à 36 heures pour atteindre la résistance de 24 MPa exigée avant de rouvrir le pont au trafic routier.

- La résistance initiale du BHP accélère le processus de reconstruction et minimise le temps d'achèvement des travaux de réparation.

- Par sa position stratégique sur la route nationale N°6 (Béchar et Adrar), l'ouverture permanente du pont au trafic assure sûrement un rôle socioéconomique majeur pour la région.

CONCLUSION

Les propriétés physico-chimiques et mécaniques des granulats locaux conviennent largement au béton traditionnel et ils ont fait leur preuve en BHP. La fumée de silice assure un rôle important dans la composition des BHP en assurant une amélioration des résistances à la flexion et à la traction de 20 % environ. Cette amélioration peut engendrer une diminution de l'épaisseur des chaussées rigides ordinaires.

Deux classes de BHP ont été élaborées, la première est 0/12 qui a permis d'avoir une résistance f_{c28} de l'ordre de 70 MPa, la seconde est celle de la classe 0/20, qui atteint une résistance f_{c28} allant jusqu'à 98 MPa, ce qui justifie par la présence des fibres son classement parmi les bétons à ultra hautes performances (BUHP) (Cimbéton, 2006).

Sur le plan économique, et même que le coût du BHP est 2,25 plus élevé que le béton ordinaire, le BHP reste le plus économique à long terme et même à moyen terme grâce à sa durabilité.

RÉFÉRENCES

- Aïtcin, C. 2001. *Bétons haute performance*. Eyrolles, 684 p.
- Baron, J. et Ollivier, J. 1999. *Les bétons bases et données pour leur formulation*. Eyrolles, 522 p.
- Blais, F.A., Dallaire, E., Lessard, M., Aïtcin, P.C. 1996. The reconstruction of the bridge deck of the Jacques-Cartier bridge in Sherbrooke (Québec) using high-performance concrete. *Annual Conference of the Canadian Society of Civil Engineering*, Edmonton, Alberta, Canada, May 1996, Vol. IIa, pp. 501-507.
- Cimbéton, 2006. *Les bétons: formulation, fabrication et mise en œuvre*. Tome 2, fiche technique, édition octobre, pp. 93-104.
- Dreux, G. 1998. *Nouveau guide du béton et de ses constituants*. Eyrolles, huitième édition, 410 p.
- Fabre, J. 1976. *Introduction à la géologie du sud algérien*. SNED édition, Alger, 422 p., 1ht.
- Georges, A. et Claude, T. 1990. *Granulats*. Presse Ponts et Chaussée, 718 p.
- Rikioui, T. 2006. *Etude comparative entre béton à hautes performances et béton classique d'une poutrelle soumise à la flexion*. Université de Béchar, pp. 24-87.
- STBA 1988. *La méthode ACN- PCN*. pp. 26-27.