

Matériaux

ÉTUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE ET THERMIQUE D'UN BÉTON COMPACTÉ AU ROULEAU UTILISÉ DANS LES DIGUES DE BARRAGES

MECHANICAL AND THERMAL BEHAVIOR OF ROLLER COMPACTED CONCRETE (RCC) FOR THE CONSTRUCTION OF DAMS

Mounir Ben JDIDIA¹, Mehrez KHEMAKHEM²

¹ Docteur en Génie Civil - Laboratoire de Mécanique Modélisation et Productique LA2MP, ENIS, Université de Sfax
École Nationale des Ingénieurs de Sfax, SFAX-TUNISIA - BP1173 Rte de Soukra Km 3.5 3038 Sfax,
Mounir.BenJdidia@isetsf.rnu.tn, Tél. : (216) 26151723 - Mail : Mounir.BenJdidia@isetsf.rnu.tn

² Agrégé en Génie Civil - Institut Supérieur des Etudes technologiques de Sfax, SFAX-TUNISIA
mehrez.khemakhem@isetsf.rnu.tn

CONTEXTE

Pour ce projet portant sur le « barrage Moula à Tabarka » le Centre des Ressources Technologiques CRT de l'Institut Supérieur des Études Technologiques de Sfax, dont le principal auteur était le directeur, a effectué les essais de contrôle pour la paroi plastique en béton à la bentonite réalisé par la société italienne SGF, sous traitant de la Société tunisienne SOMATRA GET. Il a également réalisé des essais de caractérisation du BCR *in situ*, essais de perméabilité et de résistance à la compression.

Par rapport au projet français BaCaRa, l'importance de l'essai calorimétrique Langavant pour le choix du ciment et du dosage en adjuvant a été relevée. Ceci met en évidence la nécessité de réaliser la DARC sur chantier.

I. INTRODUCTION

I.1. Historique

Le Béton Compacté au Rouleau BCR est un béton dit de masse [1]. Il est destiné à la réalisation de gros massifs tel que les remblais, les digues, les dallages, les barrages ou encore en corps de chaussée. Depuis 1980, plusieurs ouvrages ont été réalisés au JAPON (d'après Anton J. et al.) au CANADA (Pigott, 1987 ; Marchand et al. ; Ouellet et al., 1998) en France (Couturier B. et al. 1997 ; Projet National BaCaRa 1996 ; Durand J-M et al. 1998) aux Etats-Unis (barrage de Willow Creek dans l'Oregon 331000 m³ de BCR avec une durée de 5 mois d'exécution) en Afrique du Nord en Algérie (Barrage de Koudiat

Acerdoune) au Maroc (le barrage d'Aoulouz 850.000 m³ de BCR). Pour les barrages, le BCR présente certains avantages dont on peut citer la réduction notable des pentes à l'amont et à l'aval ; et par conséquent du volume des matériaux utilisés. On note également, parmi les avantages, la possibilité de réaliser une hauteur importante de la digue (à partir de 100 m et jusqu'à 200 m d'après Anton J. et al.).

I.2. Étude bibliographique

Le BCR pour barrages est un matériau composé de granulats (0-80) (adapté de Ouellet 1998) avec présence d'éléments fins, d'eau, de liant hydraulique à faible chaleur d'hydratation (faible dosage en ciment = dosage conventionnel 1/3 aux environs de 100 à 200 kg/m³ et ceci selon la résistance projetée 7 à 12 MPa d'après Durand JM et al.) et éventuellement d'un adjuvant retardateur. Le dosage en ciment peut être réduit en utilisant une addition cendre volante ou filler calcaire ce qui permettrait de limiter la chaleur d'hydratation (Pouliot N. et al.).

La mise en place du BCR peut être assurée par un compacteur à rouleaux lisses en acier avec ou sans vibration (Pouliot N. et al.) permettant de fournir une énergie de compactage capable de densifier le matériau. Le massif est réalisé en couches successives d'épaisseur à préciser (30 à 50 cm selon Durand JM et al.). La reprise doit être chaude pour assurer la continuité (ne pas former des plans de glissement qui peuvent affecter la résistance au cisaillement), éviter les retraits différentiels (nuisance majeure pour l'étanchéité de l'ensemble par augmentation de la perméabilité).

I.3. Objectifs de l'étude

L'objet de cette étude expérimentale est de rechercher une formulation d'un BCR composé avec des granulats de la région de HWEREB (gouvernorat de Kairouan, Tunisie) et un ciment CEM I 42,5 HRS (Haute Résistance aux Sulfates) avec l'utilisation d'adjuvant. Les facteurs fondamentaux étudiés sont :

- La chaleur d'hydratation du ciment et le choix du type de ciment.

- Le choix et le dosage en adjuvant.
- La Durée d'Accrochage d'une Reprise Chaude (DARC) entre couches successives.

Le présent article présente une étude préliminaire effectuée au laboratoire de l'Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Sfax pour la construction de la digue d'un barrage en BCR.

Le barrage Moula à Tabarka en Tunisie a été réalisé en béton compacté au rouleau par la société SOMATRA-GET Tunisie (voir photo 1).

II. MATÉRIELS ET ESSAIS

Pour l'identification des composants du BCR, des essais normalisés ont été effectués respectivement sur le ciment, le tout venant TV 0-40, sur le mélange granulaire TV 0-40 et sable fin 0-3,15. Pour caractériser le béton à l'état frais, l'essai approprié pour un béton ferme est la mesure de la consistance à l'appareil Vebe. Pour caractériser le béton à l'état durci, l'essai de compression directe sur éprouvette 16x32 a été adopté. Pour étudier l'accrochage entre deux couches successives de BCR formulé, l'essai recommandé par le projet BaCaRa a permis de déterminer la Durée d'Accrochage d'une Reprise Chaude (DARC).

II.1. Analyse granulométrique par voie sèche

Méthode de tamisage par voie sèche NFP18-560. L'essai consiste à déterminer les tamisats en pourcents pour les différents diamètres standards des granulats testés.

II.2. Essai de prise

La mesure des temps de début et de fin de prise est effectuée à l'aide de l'appareil de Vicat équipé d'une aiguille : NT 47.10. L'essai consiste à faire chuter une tige guidée munie d'une aiguille dans une pâte de ciment standard et mesurer la pénétration de cette aiguille en fonction du temps (pas de temps régulier). La période dormante correspond au temps où l'enfoncement de l'aiguille dans l'épaisseur de la pâte est total. Le début de prise est caractérisé par une pénétration presque totale dans la pâte. La fin de prise est caractérisée par un enfoncement nul.



Photo 1 : Barrage Moula à Tabarka en BCR réalisé par SOMATRA-GET Tunisie



II.3. Essai PROCTOR

L'essai normalisé utilisé pour le compactage d'un matériau granulaire pour couches de fondation ou de base d'une route est l'essai **PROCTOR** modifié (NFP 94-093 ; ASTM D 1557). Le béton Compacté au Rouleau est un béton sec composé également de matériau granulaire. Cet essai permet de déterminer la masse volumique sèche maximale et la teneur en eau optimale correspondante pour une énergie de compactage donnée :

$$\rho_d = \left(\frac{\rho_h}{w+100} \right) \times 100$$

où ρ_h est la masse volumique humide et w est la teneur en eau

II.4. Mesure de la chaleur d'hydratation par calorimètre semi adiabatique

Méthode du calorimètre de Langavant : NFP15-436

L'essai consiste à mesurer l'élévation de température due à l'hydratation du ciment d'un coulis ou d'un mortier standard confectionné conformément à la norme et mis dans une boîte munie d'une sonde de température (thermocouple), l'ensemble est calorifugé dans une boîte. Une acquisition continue automatique de la température en fonction du temps est effectuée toutes les secondes.

II.5. Mesure du temps Vebe

L'essai Vebe (ASTM C 1170-91) permet de mesurer la consistance d'un béton ferme placé dans un moule cylindrique (photo 2) en deux couches piquées chacune à 25 coups et soumis à une vibration sur une table à 50 Hz. Durant la vibration, le béton est soumis à une charge de 13 kg appliquée sur une plaque circulaire de diamètre inférieur de 10 mm au diamètre du moule. Le temps Vebe est le temps de vibration permettant l'observation de la remontée de la laitance (formation d'un anneau de pate autour de la plaque et sur les parois du moule).

II.6. Durée d'Accrochage d'une Reprise Chaude (DARC)

Pour la mise en place de couches de BCR successives, il est nécessaire de connaître quelques caractéristiques de la couche précédente avant la mise en place de la couche suivante dans le but de contrôler la reprise. En effet, l'essai de Durée d'Accrochage d'une Reprise Chaude (DARC : Voir photo 3) à l'aiguille Proctor (essai recommandé par le projet BaCaRa) est la méthode proposée pour contrôler si la reprise est chaude, tiède ou froide. Le principe de l'essai consiste à mesurer la force nécessaire pour produire une pénétration de 2,5 mm d'une aiguille **PROCTOR** de section 8 mm² dans le béton formulé BCR écrêté à 5 mm. Conventionnellement, la DARC correspond au temps écoulé depuis la fin du malaxage du BCR jusqu'à l'obtention d'une contrainte de poinçonnement de 50 MPa.

III. PLAN EXPÉRIMENTAL

Pour étudier l'influence de la granulométrie, du dosage en ciment, du dosage en adjuvant sur les propriétés à l'état frais et à l'état durci d'un béton compacté au rouleau, une



Photo 2 : Equipements de l'essai Vebe



Photo 3 : Equipements de l'essai DARC

quarantaine de gâchés ont été effectuées. Le tableau 1 ci-après précise les compositions réalisées et étudiées.

IV. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

IV.1. Ciment à haute résistance aux sulfates HRS

Le choix de la nature du ciment a été fondé sur les deux critères suivants :

- l'eau à stocker dans le barrage peut contenir des sulfates. L'agressivité du milieu est acide,
- la chaleur d'hydratation due à la réaction exothermique doit être la plus faible possible pour une réduction des retraits et des micros fissures.

La chaleur d'hydratation de l'aluminate tricalcique C₃A contenu dans le ciment CEM I est presque le double du C₃S et quadruple du C₂S ; le pourcentage du C₃A est en général de l'ordre de 8 à 12%. Le ciment CEM I 42,5 HRS, qui présente une température d'hydratation de 50 à 60 °C, est un ciment à faible chaleur d'hydratation. De plus, ce ciment dont le pourcentage d'aluminate tricalcique C₃A est limité à 2% est résistant vis-à-vis des sulfates (peu ou pas de formation d'ettringite). En effet, l'essai effectué sur un mortier normal au ciment HRS utilisé montre que la température maximale d'hydratation est de 55 °C alors que,

Type de béton : BCR	N° de Gâchée	Dosage en ciment (KG)	Granulats (KG)		Masse totale	Dosage en eau (KG)	Teneur en eau en %	E/C
			TV0-40	Sable fin				
BCR1	G ₁₁	100	2458	0	2558	128	5,00	1,28
BCR1	G ₁₂	100	2434	0	2534	152	6,00	1,52
BCR1	G ₁₃	100	2423	0	2523	164	6,50	1,64
BCR1	G ₁₄	100	2410,5	0	2510,5	175,7	7,00	1,75
BCR1	G ₁₅	100	2387	0	2487	199	8,00	1,99
BCR1	G ₁₆	110	2449	0	2559	128	5,00	1,16
BCR1	G ₁₇	110	2425	0	2535	152	6,00	1,38
BCR1	G ₁₈	110	2413,4	0	2523,4	164	6,50	1,49
BCR1	G ₁₉	110	2401,7	0	2511,7	175,8	7,00	1,60
BCR1	G ₂₀	110	2378,6	0	2488,6	199,1	8,00	1,81
BCR1	G ₂₁	120	2440,5	0	2560,5	128	5,00	1,07
BCR1	G ₂₂	120	2416,5	0	2536,5	152,2	6,00	1,27
BCR1	G ₂₃	120	2404,7	0	2524,7	164,1	6,50	1,37
BCR1	G ₂₄	120	2392,9	0	2512,9	175,9	7,00	1,47
BCR1	G ₂₅	120	2369,8	0	2489,8	199,2	8,00	1,66
BCR1	G ₂₆	130	2431,8	0	2561,8	128,1	5%	0,99
BCR1	G ₂₇	130	2407,7	0	2537,7	152,3	6%	1,17
BCR1	G ₂₈	130	2395,9	0	2525,9	164,2	6,5%	1,26
BCR1	G ₂₉	130	2384,2	0	2514,2	176	7%	1,35
BCR1	G ₃₀	130	2361	0	2491	199,3	8%	1,53
BCR2	G ₃₁	120	2196,5	244,0	2560,5	128	5%	1,07
BCR2	G ₃₂	120	2174,9	241,6	2536,5	155,10	6%	1,29
BCR2	G ₃₃	120	2164,3	240,4	2524,7	175,9	7%	1,47
BCR2	G ₃₄	120	2153,7	239,2	2512,9	187,6	7,5%	1,56
BCR2	G ₃₅	120	2132,9	236,9	2489,8	199,2	8%	1,66
BCR2 0,5%A2	G ₃₆	120	2153,7	239,2	2512,9	187,6	7,5%	1,56
BCR2 0,5%A1	G ₃₇	120	2153,7	239,2	2512,9	187,6	7,5%	1,56
BCR2 0,3%A2	G ₃₈	120	2153,7	239,2	2512,9	187,6	7,5%	1,56
BCR2 0,3%A1	G ₃₉	120	2153,7	239,2	2512,9	187,6	7,5%	1,56
BCR2 1%A2	G ₄₀	120	2153,7	239,2	2512,9	187,6	7,5%	1,56
BCR2 0,7%A1	G ₄₁	120	2153,7	239,2	2512,9	187,6	7,5%	1,56
BCR1 : TV0-40 ; BCR2 : TV0-40 (90,5%) + Sable fin (9,5%) ; A1 : Adjuvant 1 ; A2 : Adjuvant 2								

Tableau 1 : Compositions étudiées

Massé volumique absolue	Surface spécifique Blaine	Résistance à la compression F_{c28}	Résistance à la traction F_{t28}	Début de prise	Fin de prise
3,1 g/cm ³	3450 cm ² /g	42,5 MPa	7,6 MPa	80 mn	170 mn

Tableau 2 : Caractéristiques du ciment HRS étudié

pour un ciment CPA, la température maximale d'hydratation est de l'ordre de 60°C. La cinétique d'hydratation (montée de la température) du ciment HRS est plus faible que le ciment ordinaire (figure 1) ce qui permet de limiter les retraits à jeune âge. Les caractéristiques du ciment HRS utilisé sont résumées dans le tableau 2.

IV.2. Granulats de la région de HWEREB

La coupure principale est un tout venant calcaire 0-40 et une autre de correction sable de concassage 0-3 relativement riche en éléments fins. L'analyse granulométrique par voie sèche de la coupure principale 0-40 montre que le pourcentage P1 de granulats inférieurs à 5 mm est de 30 % et que le pourcentage P2 de granulats inférieurs à 80 µm est de 3% (figure 2).

Les études antérieures (projet BaCaRa) indiquent que :

- pour favoriser le compactage, le pourcentage d'éléments inférieurs à 80 mm doit rester compris entre 8 et 15 % y compris le liant ;
- pour assurer une bonne compacité, le pourcentage d'éléments inférieurs à 5 mm doit rester compris entre 30 et 40 %.

Le tout venant calcaire 0-40 est en dehors du fuseau granulaire recommandé pour le BCR et les pourcentages P1, P2 sont insuffisants en comparaison avec ceux recommandés. En conséquence, la correction du tout venant calcaire 0-40 est nécessaire par l'ajout de 10 % de sable de concassage 0-3 et on a alors les pourcentages P1 (de granulats

inférieurs à 5 mm) et P2 (de granulats inférieurs à 80 mm) suivants : P1 = 37% et P2 = 5%.

Par ailleurs, il a été utile de déterminer les caractéristiques des matériaux granulaires et qui sont présentées dans le tableau 3 ci-dessous.

On constate que la coupure 0-40 présente une résistance à la fragmentation acceptable ($L_A < 30$) et contient très peu d'éléments argileux (faible limite de liquidité et limite de plasticité indéterminées). La coupure 0-3 de sable concassé est propre et les fines sont d'origine calcaire ($V_B < 1$).

IV.3. Adjuvants

Deux adjuvants ont été utilisés dans cette étude dans le but d'étudier leurs influences respectivement sur le temps de début de prise, sur la résistance à la compression et sur la chaleur d'hydratation.

Les adjuvants utilisés sont :

Un retardateur de prise à fonction secondaire plastifiant appelé **Adjuvant 1**.

Un plastifiant réducteur d'eau à fonction secondaire retardateur appelé **Adjuvant 2**.

V. FORMULATION D'UN BCR

V.1. Compactage des granulats

Le compactage d'un matériau dépend principalement de la teneur en eau (W). Il s'agit de déterminer la teneur en eau

Région	Coupure	Massé volumique absolue	L_A : los Angeles	ES : Equivalent de Sable	W_L : limite de liquidité	W_p : limite de plasticité	Ab : Absorption	V_B : Valeur de Bleu
HWEREB	0-40	2,7 g/cm ³	28 %	32	22 %	Ind	2,4 %	1,5
	0-3	2,7 g/cm ³	28 %	40	18 %	Ind	–	0,2

Tableau 3 : Caractéristiques des granulats de Hwareb

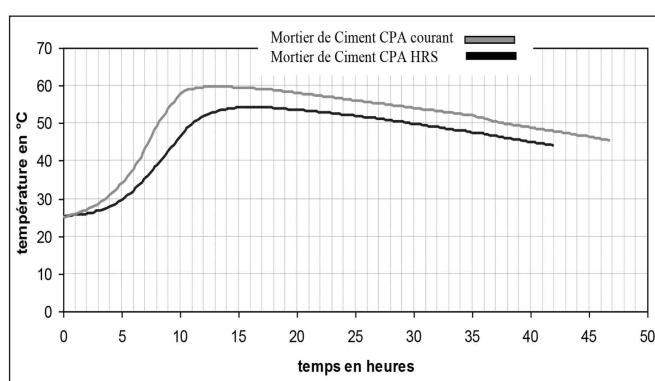


Figure 1 : Chaleur d'hydratation d'un mortier standard

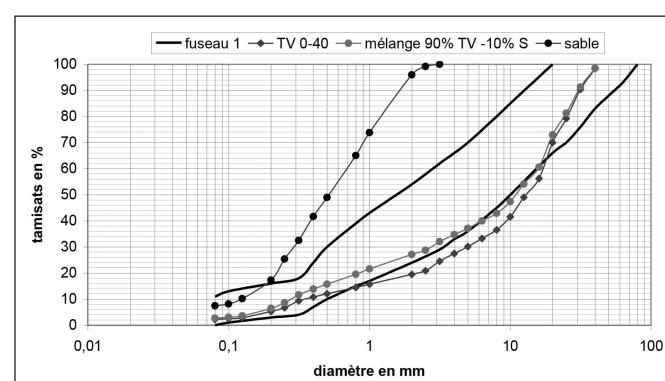


Figure 2 : Analyse granulométrique des granulats

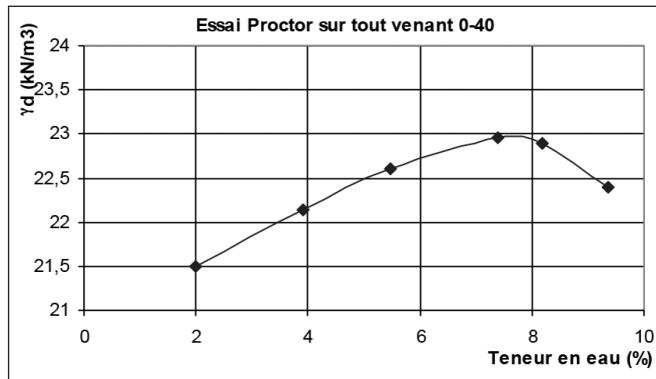


Figure 3 : Courbe Proctor TV 0-40

optimale (W_{opt}) qui correspond à une densification maximale du matériau. Les résultats de l'essai **PROCTOR** (modifié) sur le tout venant calcaire 0-40 et sur le mélange granulaire (90% du tout venant 0-40 et 10 % de la fraction 0-3) montrent que :

- $W_{opt} = 7,4\%$ pour un poids volumique sec maximal $\gamma_d = 22,9 \text{ kN/m}^3$ pour le tout venant 0-40 ;
- $W_{opt} = 7,7\%$ pour un poids volumique sec $\gamma_d = 23,2 \text{ kN/m}^3$ pour le mélange (figures 3 et 4).

On constate une meilleure densification sur le mélange granulaire, donc une meilleure compacité.

V.2. Confection du BCR et contrôle de la fabrication

Les gâchées effectuées G_1 à G_{41} sur les deux types de bétons : BCR1 béton tout venant 0-40 et BCR2 : béton avec le mélange granulaire ont permis d'étudier :

- l'influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression ;
- l'influence de la teneur en eau sur la densité humide, sur la maniabilité à l'appareil Vébé et sur la résistance à la compression ;
- l'influence du type et du dosage en adjuvant sur la résistance à la compression et sur la maniabilité.

De plus, il faut préciser que la confection de toutes les éprouvettes 16*32 (six éprouvettes pour chaque gâchée) a été effectuée à la table Vébé pour un temps de serrage de 90 s après remplissage en deux couches piquées au nombre de 25 coups.

V.2.1. Influence du dosage en ciment sur la résistance mécanique

Pour une résistance de 10 MPa projetée et pour des raisons d'économie, il a été utile de varier le dosage entre 100 et

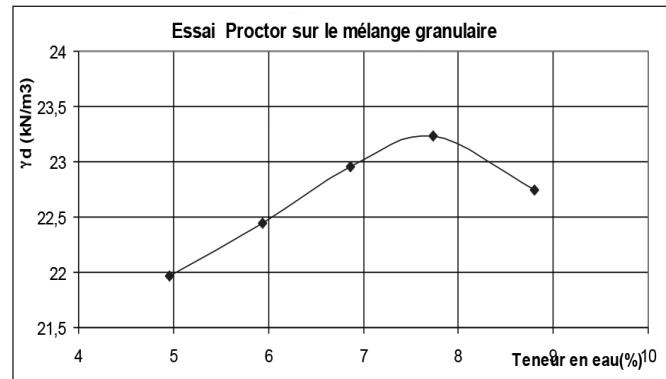


Figure 4 : Courbe Proctor du mélange granulaire

130 avec une teneur en eau fixée à 7%. Le tableau 4 présente les résistances en fonction du dosage en ciment. Les résultats de cet essai montrent d'une part que le dosage optimal en ciment est de 120 kg/m^3 et d'autre part que le BCR2 est plus compact et plus résistant.

V.2.2. Influence de la teneur en eau

Pour étudier l'influence de la teneur en eau sur respectivement la maniabilité, la densité humide et la résistance, le dosage en ciment de 120 kg/m^3 a été adopté pour le premier type de béton BCR1 (Voir tableau 5 et figures 5 et 6).

Les résultats de l'essai Vébé montrent que la teneur en eau optimale est de l'ordre de 7% pour un temps Vébé de 13 secondes (temps d'apparition de la laitance au cours du serrage) ce qui assure une maniabilité satisfaisante.

La résistance mécanique projetée n'a pas été atteinte sur le premier type de béton **BCR1** pour un dosage en ciment de

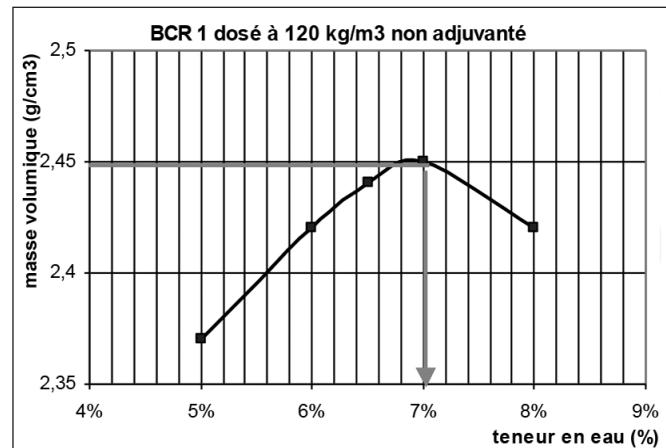


Figure 5 : Essai Proctor (BCR 1)

N° gâchée	CPA HRS (Kg/m³)	Teneur en eau	F_{c7} en MPa*	F_{c28} en MPa*	BCRi
G_{14}	100	7 %	3,9	6,65	BCR1
G_{19}	110	7 %	5,6	7,95	BCR1
G_{24}	120	7 %	8	9,15	BCR1
G_{33}	120	7 %	9	10,4	BCR2
G_{29}	130	7 %	8,15	9,2	BCR1

* Moyenne de trois éprouvettes testées

Tableau 4 : Variation de la résistance en fonction du dosage en ciment

Teneur en eau utilisée	Numéro des gâchées	Fc7 en MPa*	Fc28 en MPa*	Temps Vébé (s)	Masse volumique (g/cm³)
5%	G ₂₁	5,5	6,6	66	2,37
6%	G ₂₂	6,6	7	28	2,42
6,5%	G ₂₃	7,8	8,15	21	2,44
7%	G ₂₄	8	9,15	13	2,45
8%	G ₂₅	6,85	7,75	6	2,42

* Moyenne de trois éprouvettes testées

Tableau 5 : Résultats du BCR1 dosé à 120 kg/m³

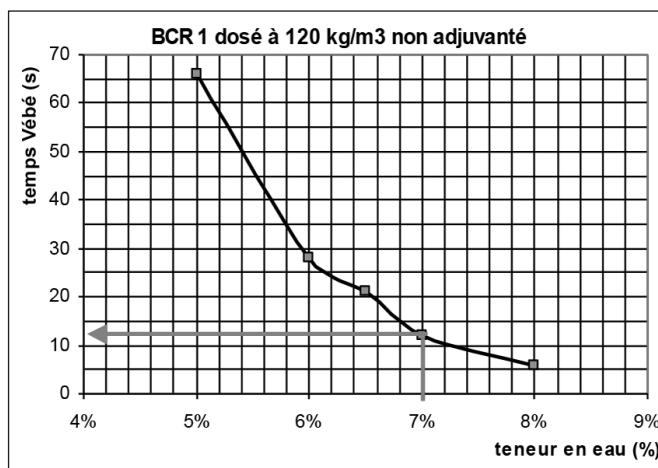


Figure 6 : Temps Vébe (BCR 1)

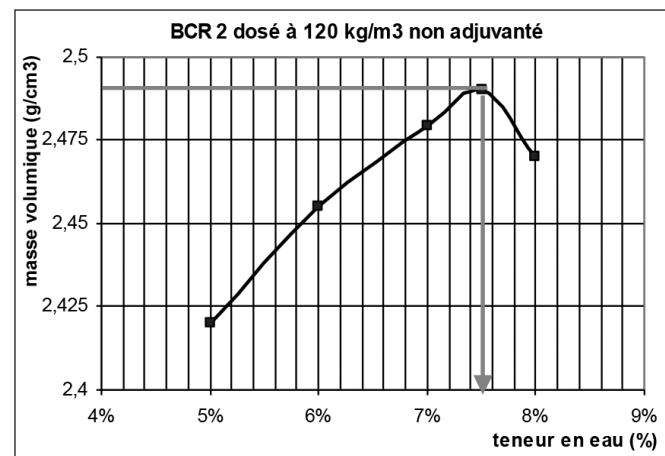


Figure 7 : Essai Proctor (BCR 2)

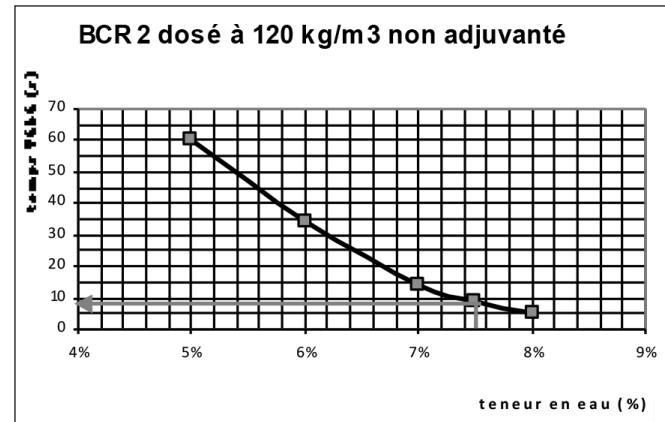


Figure 8 : Temps Vébé (BCR2)

120 kg/m³ mais elle reste quand même acceptable. Toutefois, la maniabilité et la masse volumique à l'état frais sont satisfaisantes.

La résistance mécanique projetée a été atteinte sur le second type de béton BCR2 pour un dosage en ciment de 120 kg/m³ et une teneur en eau de 7,5% (tableau 6). La consistance est plus faible (béton moins ferme) et la masse volumique est légèrement supérieure (figures 7 et 8) à celle du BCR1.

V2.3. Influence du dosage et du type d'adjuvant sur les propriétés du BCR

Pour déterminer l'influence du dosage en adjuvant et du type d'adjuvant sur les propriétés du BCR, la maniabilité et la résistance du béton BCR2 dosé à 120 kg/m³ et avec la

Teneur en eau utilisée	Numéro des gâchées	Fc7 en MPa	Fc28 en MPa	Temps Vébé (s)	Densité (g/cm³)
5 %	G ₃₁	4,7	9,23	60	2,42
6 %	G ₃₂	5,4	9,57	34	2,46
7 %	G ₃₃	6,3	9,9	14	2,48
7,5 %	G ₃₄	8,8 3	10,43	9	2,49
8 %	G ₃₅	8,07	10,2	5	2,47

* Moyenne de trois éprouvettes testées

Tableau 6 : Résultats du BCR2 dosé à 120 kg/m³

Type d'adjvant	N° de gâchée	Dosage en %	Temps Vébé en s	F_{c7} en MPa	F_{c28} en MPa
Sans adjvant	G_{34}	0	9	8,83	10,43
Adjvant 2	G_{36}	0,3	14	6,65	8,5
Adjvant 1	G_{37}	0,3	5,5	7,07	9,7
Adjvant 2	G_{38}	0,5	8	7,5	10,67
Adjvant 1	G_{39}	0,5	5	9,57	11,23
Adjvant 2	G_{40}	1	7	4,43	7,4
Adjvant 1	G_{41}	0,7	5	7,77	9,7

* Moyenne de trois éprouvettes testées

Tableau 7 : BCR2 adjvanté

teneur en eau optimale de 7,5 % ont été déterminées. Les résultats sont récapitulés dans le tableau 7. On constate que le comportement des adjavants se caractérise par :

- une grande augmentation de la maniabilité pour l'adjvant 1 ;
- une maniabilité peu variable pour l'adjvant 2 ;
- une augmentation de la résistance pour un dosage en adjvant de 0,5%.

On constate d'après cet essai que le dosage de 0,5 % en adjvant1 (retardateur de prise) donne une amélioration nette de la résistance et de la maniabilité du BCR2.

VI. INFLUENCE DU TYPE D'ADJUVANT ET DU DOSAGE SUR LA CHALEUR D'HYDRATATION DU CIMENT

Dans les ouvrages massifs, la dispersion de la chaleur produite lors de l'hydratation est très lente; l'élévation de la température peut donc être importante, au point de créer des gradients thermiques entre les zones internes et externes du béton générant des contraintes internes. Ces contraintes peuvent dépasser la résistance à la traction du béton et peuvent engendrer d'abord une fissuration ensuite une rupture pour des gradients thermiques élevés. La recherche d'une faible chaleur d'hydratation permet d'éviter ce phénomène.

Les essais de mesure de la chaleur d'hydratation effectués sur deux mortiers M1 (mortier normal : ciment HRS et sable normalisé) et M2 (mortier avec sable écrêté : ciment HRS et sable écrêté à 2 mm à partir du mélange granulaire du BCR2) ont permis de constater les résultats suivants :

- La réaction du ciment débute plus tôt pour le mortier avec sable écrêté M2 que le mortier standard (sable normal) M1 et la température est plus élevée. En effet, le pic de température pour M2 est de 56,5 °C au bout de 7h alors que, pour M1, le pic est de 54,2 °C au bout de 15h (voir figure 9).

- Une baisse du pic de température a été enregistrée en présence de l'adjvant 1 : retardateur de prise (voir figure 10) et un retard de la réaction pouvant atteindre 30 h pour un dosage de 0,5% a été observé.
- Un adoucissement de la pente de la montée en température a été observé aussi bien pour M1 que pour M2 lorsque le dosage en adjvant 1 augmente (voir figures 10 et 11).

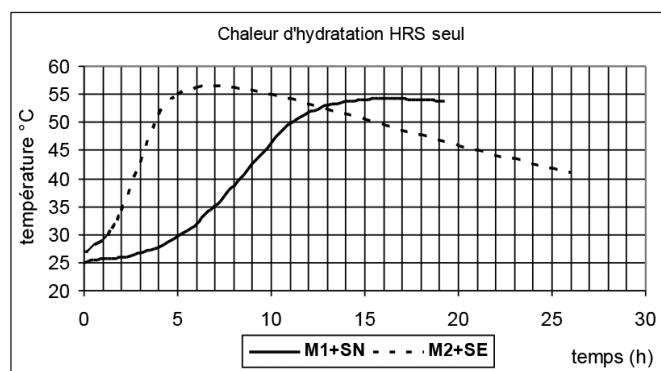


Figure 9 : Chaleur d'hydratation sans adjvant

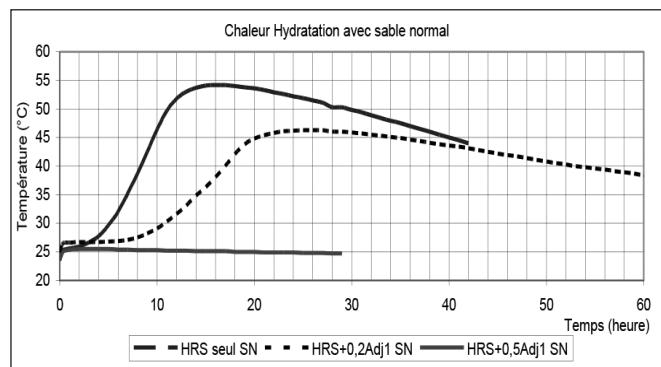


Figure 10 : Chaleur d'hydratation avec adjvant

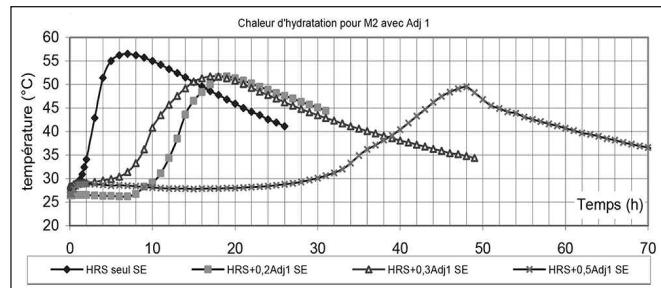


Figure 11 : Chaleur d'hydratation avec adjvant (mortier avec sable écrêté)

VII. DURÉE D'ACCROCHAGE D'UNE REPRISE CHAUE « DARC »

Le BCR2 a été adjvanté au retardateur de prise (adjvant 1) et l'essai DARC a été réalisé avec des températures et des hygrométries variables pour simuler les conditions

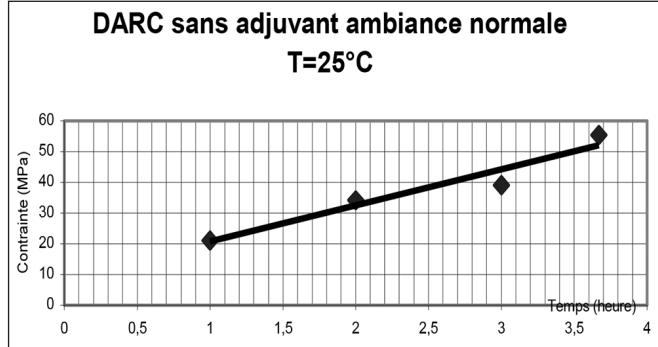


Figure 12 : Contrainte de poinçonnement en fonction du temps : BCR2 sans adjuvant

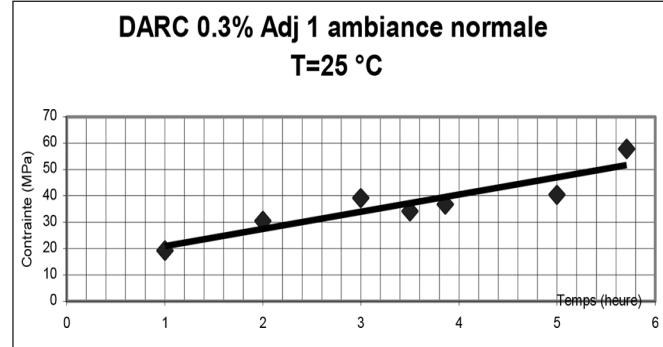


Figure 13 : Contrainte de poinçonnement en fonction du temps : BCR2 adjuvanté

Dosage en adjuvant 1	T=25 °C ambiante	T=30 °C ; H=60%	T=35 °C ; H=60%	T=40 °C ; H=40%	T=45 °C ; H=40%
0 %	3,5 h	3,4 h	3,3 h	3 h	2,5 h
0,2 %	4,6 h	3,5 h	3,7 h	3,2 h	2,5 h
0,3 %	5,4 h	4,2 h	3,5 h	3 h	2,2 h
0,5 %	6 h	5,1 h	3,6 h	3,1 h	2,5 h

Tableau 8 : Influence du dosage en adjuvant et des conditions climatiques sur la DARC

réelles d'exécution; ceci permettrait de déterminer l'influence de ces paramètres sur la DARC.

Les figures 12, 13, montrent que la variation de la contrainte de poinçonnement en fonction du temps est quasi linéaire bien évidemment dans domaine des temps (0,6h) où le béton est encore frais.

La DARC obtenue est effectivement sensible au dosage en adjuvant et aux conditions climatiques d'exécution. Les résultats des essais effectués sont récapitulés dans le tableau 8.

On constate d'après cet essai que, dans des conditions ambiantes, le retardateur de prise joue bien son rôle et que la DARC augmente en fonction du dosage en adjuvant (figure 14).

La DARC diminue lorsque la température augmente. Des études antérieures effectuées au laboratoire montrent que le dosage de saturation en adjuvant est très sensible à la température et peut modifier les propriétés du béton frais et durcis.

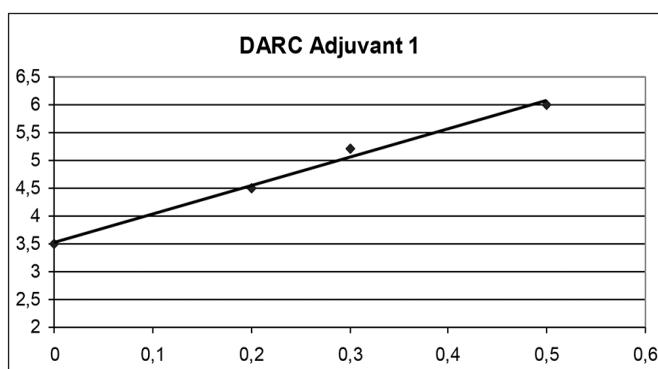


Figure 14 : Variation de la DARC en fonction du dosage en adjuvant

Dans des conditions climatiques normales d'exécution, une période de 3 à 4 heures est possible pour pouvoir appliquer une nouvelle couche et la reprise peut être considérée comme chaude.

Les conditions d'exécution en climats secs et arides nécessitent des dosages plus élevés en adjuvant. Cependant, il faut rester prudent et compléter cette constatation par d'autres études.

VIII. CONCLUSIONS

Le BCR est un béton particulier, en effet la distribution granulaire du tout venant est très étendue, son compactage doit donner une densité sèche de l'ordre de 2300 Kg/m³. Le ciment doit avoir une faible chaleur d'hydratation, le dosage en conséquence doit être réduit et il est aux environs de 120 Kg/m³. Toutefois il est possible de mettre des additions tel que des fines calcaires. En outre le BCR est ferme, la maniabilité à la table Vebe conduit à un temps Vebe de l'ordre de 10 à 14 secondes et la masse volumique du BCR frais est de l'ordre de 2,49 g/cm³. La résistance à la compression à 28 jours du BCR formulé est de l'ordre de 10 MPa. L'adjuvant retardateur a permis d'augmenter la Durée d'Accrochage pour avoir une Reprise Chaude, ce retard passe environ de 3h à 6h.

L'étude expérimentale effectuée a permis de dresser une méthodologie pour la formulation d'un BCR :

- justifier le choix du type de ciment dans le but de minimiser les contraintes thermiques causées par la montée de température (réaction du ciment qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur d'hydratation du ciment),
- justifier le choix du type d'adjuvant et du dosage,
- optimiser le mélange granulaire pour assurer une compacité satisfaisante en ajoutant d'autres coupures,

- avoir un pourcentage d’éléments fins suffisant pour permettre le compactage et obtenir une densification acceptable du BCR (5% minimum de fines de préférence calcaires soit 10 % au total le liant y compris),
- choisir un dosage suffisant en ciment pour atteindre la résistance projetée,
- utiliser un adjuvant retardateur de prise à fonction secondaire plastifiant permet une augmentation de la résistance, une baisse de la température d’hydratation et un début de prise retardé,
- utiliser la DARC comme moyen de contrôle efficace. La reprise du bétonnage peut atteindre 3 h, pour une reprise chaude, dans le cas présent pour le BCR formulé non adjuvanté et pour un climat doux (température de 20 à 25°C et une hygrométrie 80 à 90 %),
- par rapport au projet BaCaRa, il faut noter l’importance de l’essai d’estimation de la chaleur d’hydratation au calorimètre LANGAVANT, qui montre bien le retard de la réaction du ciment en présence du retardateur, ce qui par conséquent aide d’une part au choix du ciment à faible chaleur d’hydratation, et d’autre part permet de déterminer la période dormante en fonction du dosage en adjuvant pendant laquelle on peut affirmer que l’application d’une nouvelle couche est possible et que la reprise peut être considérée comme chaude.

Comme seconde application le béton compacté au rouleau étudié peut être utilisé dans le domaine routier notamment dans les couches de fondation de chaussée. La détermina-

tion des propriétés mécaniques, surtout la résistance en traction et le module, sont nécessaires.

Le BCR peut être également employé dans les couches de base et de roulement mais avec des granulats 0-25 et avec des dosages en ciment plus élevés pouvant atteindre 400 kg/m³ pour avoir une résistance à la traction de l’ordre de 5 MPa.

Une planche d’essai a été réalisée et des opérations de carottage ont été effectuées (photo 4) pour caractériser le BCR in situ étudié. Les résultats concernant la perméabilité et les résistances mécaniques seront communiqués dans un futur article.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Le béton compacté au rouleau, (Projet Français BaCaRa), (1996) Presses de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France les barrages en BCR : ISBN : 2-85978-267-2, 1996.
- [2] Pouliot N., Sedran T., De Larrard F., Marchand J., (2001) Prédiction de la compacité des bétons compactés au rouleau à l’aide d’un modèle d’empilement granulaire, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées N° 233, Juillet-Aout 2001 pp 23-36.
- [3] German H. et al, (2000) Plasticizing-retarding admixture for roller compacted concrete for the dam construction of miel (Colombia), (document Sika).
- [4] Kenneth D., Hansen William G. Reinhrdt, (1991) Roller Compacted Concrete Dams, 1991, McGraw-Hill.
- [5] Durand J-M., Degoutte G., Royet P., Jensen M., (1998) La technique du béton compacté au rouleau(BCR) : Possibilités d’application pour les barrages en Afrique. Sud Sciences & technologies N°1 Janvier 1998 pp 56-62.
- [6] Atis C.D., Sevim U.K., Ozcan F., Bilim C., Krahan O., Tanrikulu A.H., Eksi A. (2004) Materials Letters 58 pp 1446-1450.
- [7] Marchand J., Gagne R., Ouellet E., Lepages (1997) Mixture proportioning of roller compacted concrete. Advance in Concrete Technologie ACI SP171, Proceeding of the third CANMET/ACI International Conference, Aukland, New Zealand, pp. 457-486.
- [8] Zdiri M. (Thèse soutenue 2008) : Etude de formulation et de comportement mécanique des Bétons Compactés au Rouleau (BCR) : Applications routières - Cas des matériaux de gisements locaux Ecole Nationale des Ingénieurs de Tunis.
- [9] Marileau F. Rapport de l’étude des caractéristiques du béton compacté au rouleau routier : Rapport SEM-202013 Association canadienne du ciment 8000, boul. Décarie, bureau 420 Montréal (Québec) H4P 1S2.



Photo 4 : Eprouvette en BCR carottage réalisé dans une planche d'essai