

INTÉGRATION DES TECHNIQUES INNOVANTES DANS LA CONSTRUCTION DE PETITS BARRAGES

Mihoubi M. K*, Kettab A**, Ayadi A*

* *Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique BP 31 Blida (09000), Algérie.*

Tél/Fax : + 213(0) 2539 94 46, E-mail : mihkam@ yahoo.fr

** *Laboratoire de Recherches des Sciences de l'Eau "LRS-EAU" (E.N.Polytechnique)*
Kettab@Yahoo.fr

RESUME

Les deux dernières décennies ont vu se développer à un rythme croissant l'utilisation de la technique du béton compacté au rouleau (BCR) dans le domaine de la construction des barrages. Malgré cela il existe un nombre modeste de ce type de barrages réalisés à l'échelle du bassin Méditerranéen et ce pour divers raisons techniques et économiques. Néanmoins cette technique reste quand même envisageable et mérite une attention lors d'études de variantes de petits barrages sur fondation rocheuse peu profonde de qualité géotechnique médiocre, surtout, si on sait que cette technique intègre les avantages positifs des techniques de terrassement, à savoir :

- De fortes cadences de mise en œuvre
- Un transport de matériaux avec déversement et réglage au bulldozer
- Une possibilité d'un compactage énergétique de grande puissance
- Des aires de travail très adaptées.

Mais on est jusqu'à ce jour loin de maîtriser l'ensemble des possibilités de cette technique et les perspectives qu'elle peut offrir dans la réalisation des petits barrages.

NB : On définit un petit barrage, tout ouvrage de retenu inférieur à 20 m de hauteur

1. APERÇU HISTORIQUE

Le développement de la technique du béton conventionnel, de masse au cours de ces dernières années a conduit à des réductions successives du dosage en ciment que l'on peut attribuer à l'utilisation :

- d'une classe granulométrique propre.
- de pouzzolanes et de cendres volantes.
- d'agent entraîneur d'air et de plastifiant.

Ces mesures ont entraîné la mise au point d'une technique de béton maigre, une technique innovante, tant par le matériau que pour la mise en œuvre qui se

fait, essentiellement à l'aide d'engins classiques de terrassement. Cette technique a été surtout utilisée au départ dans le cas de barrages poids en béton.

La technique du BCR, est connue sous la dénomination américaine "*Roller Compacted Concrete*" et sous la dénomination japonaise "*Roller Compacted Dam Concrete*". Les contours de l'utilisation de béton maigre sec dans le corps des barrages poids ont été présentés lors du X^{ème} Congrès de Commission Internationale des Grands Barrages à Montréal en 1970 (J. PATON 1970) et qui ont été appuyés par les travaux de certains spécialistes en matériaux de construction dans le but d'optimisation du béton dans le barrage poids (J.M. RAPHAEL 1970). Cette technique de construction a eu beaucoup de succès et s'est concrétisée par la construction de grands barrages, type poids, au Japon et aux Etats-Unis (fig.1).

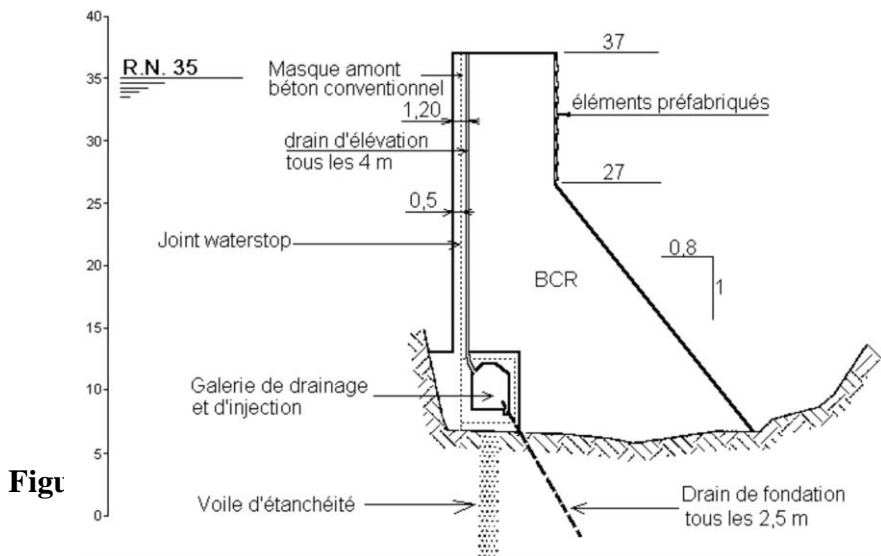


Fig. 1 Coupe transversale d'un barrage poids en BCR.

1. TECHNIQUE DE REALISATION

La réalisation du B.C.R, rompt avec les méthodes traditionnellement utilisées pour la construction des barrages en béton (J.STERNBERG. 1998).

a. Contrairement à la réalisation de façon verticalement par levées successives sur des plots individualisés, la mise en place du BCR se fait par couches horizontales minces sur toute la superficie du barrage (digue).

b. Au lieu d'employer des matériels spécifiques de fabrication et de mise en place du béton (blondins, grues, pervibrateurs, bennes, coffrages), on utilise

plutôt des engins de terrassement et du matériel adapté aux techniques routières (dumpers, convoyeurs, bulldozers, compacteurs,...etc.), sans parler des centrales continues, qui ont une grande capacité de production compte tenu du volume des matériaux à mettre en place. Généralement on travaille avec des cadences de 300, 500, 800 m³/heure en poste continu (ou discontinu) par une ou deux centrales à béton. Le corps du barrage est monté avec des vitesses de 0,5 à 1,50 m/jour.

c. L'utilisation d'engins de terrassement exige des surfaces de plateforme de travail supérieure à 500 m² (P.LONDE et M.LINO1992) afin de permettre aux engins d'évoluer efficacement. La possibilité de réduire au strict minimum la quantité d'eau soutenue par serrage efficace obtenu sous compactage en couches de 20 à 30 cm, se traduit par une économie en liant de l'ordre de 100 à 150 kg/m³ (tableau 1).

Tableau 1 Exemples de barrages en BCR dans le monde.

Barrage	Année de mise en service	Pays	Hauteur max. (m)	Vol. de Béton (m ³ x 10 ³)	Observations
LOUBERRIA	1988	France	25	48,00	Pas de joints
MYKONOS I	1988	Grèce	25	----	Pas de joints
EL KOREIMA	1987	Maroc	42	25,00	Pas de joints, présence d'un système de drainage.
ARABIE	1988	Afrique du Sud	35	110	Pas de joints.
R'MIL	2001	Tunisie	35	----	Barrage mixte CR/Remblai
OLIVETTES	1987	France	36	85,00	Pas de joints Evacuateur en marche d'escalier
RIOU	1990	France	26	85,00	Pas de joints, géomembrane CARPI en étanchéité.
AOULOZ	1991	Maroc	85	85,00	Joints tous les 45 m.
UPPER STILLWATER	1987	Etats Unis	87	1 070,00	Pas de joints, parement amont en béton traditionnel.
TAMAGAWA	1987	Japon	103	1 150,00	Tous les 15 m, parement amont en béton traditionnel (3,0m).
BENIHAROUN	2002	Algérie	120	1 750,00	Tous les 19 m, parement amont en béton traditionnel. (3,0 m).

2.1 Application de la technique du BCR aux petits barrages

Les nouvelles opportunités offertes par le BCR en matière de conception de barrages gravitaires ont générés des approches diversifiées qu'il est intéressant d'examiner à travers des exemples existants. Dans ce contexte trois types de variantes de BCR peuvent être distingués à ce jour. Tout d'abord des ouvrages dérivés de la conception du barrage de WILLOW CREEK au Etats Unis (Type 1). Puis le cas très particulier du barrage d'UPPER STILLWATER qui mérite d'être spécialement abordé (Type 2) et enfin, les ouvrages japonais répondants à la technique RCD qui constituent un autre type de barrage (Type3).

-Pour les barrages de Type 1 et 2 ; une première différence fondamentale provient de la mise en œuvre du béton (M.K.MIHOUBI 1994). Dans les deux premiers types on procède par couches de 300 mm compactées. Le principe japonais (RCD) prévoit la mise en place de sous couches minces de 150 mm superposés sur 0,50 à 0,75 m avant compactage. Dans ce dernier cas le diamètre maximal du granulat n'est plus limité par la ségrégation, la circulation des engins sur les couches assurant une première mise en place du matériau favorisant l'homogénéité avant compactage. Cette particularité, caractérise la technique du RCD, qui a développé là une voie originale propre au japon et qui convient d'être utilisée pour des régions caractérisées par des cycles de gel et dégel ainsi qu'une activité sismique (JAPANESE NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAM 1991).

En ce qui concerne les barrages type 2, l'approche dans ce type d'ouvrage se singularise par la prise en compte d'un effort de traction dans le béton lors du dimensionnement du projet et par le zonage du BCR qui en résulte. L'expérience de UPPER STILLWATER n'a pas apporté cependant d'économie globale importante présentant aussi un risque potentiel qui ne peut être admis dans certains sites. L'avenir de ce type de conception n'est pas évident (tableau 2).

Tableau 2 : Récapitulatif des trois types de conception

Technique de BCR (Type)	Remarques sur le mode de fonctionnement	Commentaires
RCC (type1)	- Classe d'ouvrage ayant permis des conceptions très variées et des modes réalisation diversifiés	1. BCR rustique 2. Soin apporté au parement. 3. Fissuration jugée peu préjudiciable en général.
RCC (type2)	- Ouvrage unique	Recherche d'un volume réduit par sollicitation du béton en traction dans certain cas de charge.
RCD (type3)	- Le plus proche des barrages gravitaires en béton pervibré.	1. Création systématique de joints d'étanchéité tous les 15 m. 2. Béton à résistance élevée. 3. Carapace épaisse (couche) en amont, réalisée en béton pervibré (BCV). 4. BCR mis en œuvre par couches superposées puis compactées et traitement systématique des reprises.

2.2 Composition et dosage du B.C.R

On peut définir le BCR comme étant un matériau comportant les mêmes constituants essentiels qu'un béton classique mais ayant des caractéristiques de dosage différentes. Surtout, si on examine les barrages type 3, qui sont caractérisés par une consistance du béton qui doit assurer une circulation des rouleaux pour assurer un bon compactage.

La teneur en liant sera aussi faible que possible afin de réduire la chaleur d'hydratation et d'éviter la fissuration thermique, tout en assurant les caractéristiques nécessaires de résistance, de pérennité et d'étanchéité. Une partie du ciment sera remplacée par pourcentage de cendres volantes afin de réduire la chaleur d'hydratation et augmenter la consistance du béton RCD. La valeur du rapport sable/granulat du béton RCD est supérieure à celle d'un béton traditionnel afin d'éviter la ségrégation lors du déversement des camions à benne basculante et de faciliter le compactage par les rouleaux vibrants.

2.2.1 Les Granulats

Généralement les granulats utilisés dans la technique RCD n'ont pas besoin d'être d'une très grande qualité, mais il faut prêter attention à la forme de la courbe granulométrique des éléments pour obtenir la consistance et les caractéristiques de compactage voulues. Les granulats proviennent de carrières, ils sont alors concassés ou de matériaux extraits des fouilles de fondation du

barrage en respectant un fuseau granulométrique. Les granulats doivent être très pauvres en matières organiques.

Pour améliorer les caractéristiques du béton frais, on augmente la quantité de fines particules et on contrôle soigneusement leur teneur en eau. Les gros agrégats doivent être dépourvus de matières organiques, ils doivent être assez durs pour éviter l'écrasement par les engins de compactage.

Pour les barrages de TAMAGAWA (Japon) et d'ITAIPIU (Brésil et Paraguay) la dimension des granulats était comprise entre 40 et 150 mm.

2.2.2 Le dosage en eau

Le passage d'engins lourds de compactage exige une confection d'un béton BCR très sec, tel que l'affaissement au cône d'Abrams soit nul. La détermination de l'eau optimale se détermine à l'aide de l'essai Proctor.

Le béton BCR peut contenir de 90 à 120 l/ m³ d'eau avec un rapport eau-ciment supérieur ou égal à 0,68, suivant les essais de laboratoire sur les planches d'essais in situ (Epreuves de convenance), réalisés avec des rouleaux prévus pour le chantier. Afin de prendre en compte la granulométrie du matériau et son comportement rhéologique, ainsi que son aptitude au compactage, on utilise l'essai VEBE.

Généralement pour la variante japonaise (type 3), le dosage en eau est inférieur d'environ de 10 % de celui d'un béton classique.

2.2.3 Le dosage en liant

On utilise généralement du ciment Portland à chaleur d'hydratation modérée (40 à 120 kg/ m³), des pouzzolanes ou encore des cendres volantes. La teneur en cendres volantes correspond à environ 30% de la teneur totale en ciment.

2.2.4 Joints de contraction et de reprise

L'utilisation de joints dans la variante RCC n'est pas exigée, par contre, dans la variante RCD, il serait indispensable de prévoir des joints de contraction transversaux. Ces joints peuvent être prévus tous les 15 mètres.

Pour la variante japonaise, souvent l'étanchéité est assurée par l'adjonction d'un parement amont en béton conventionnel vibré, équipé de joints waterstoppe.

De plus, il faut prévoir des joints de reprise qui représentent des plans potentiels de faiblesse dans la variante japonaise, mais inévitable du fait que la prise du béton est continue.

Un traitement des joints est souhaitable afin de garantir la résistance au cisaillement et l'étanchéité sur ces joints. Un jet d'air ou d'eau sous pression est nécessaire pour nettoyer et finir la surface de la levée. Notons qu'il est

indispensable d'appliquer une couche de mortier de 15 mm sur le joint avant la mise en place d'une nouvelle couche de béton.

Tableau 3 : Exemple de composition de béton.

Caractéristiques	Béton Conventionnel	Béton (Type 3) « RCD »
- Dimension maximale de gros granulats en (mm)	150	150
- Indice de compactage par vibration (CV) en (s)	—	20 ± 10
- Affaissement au cône d'Abrams (slump test) (cm)	4 ± 1	0
- Rapport eau/ciment (cendres volantes comprises) %	68	73
- Rapport sable/granulat (en %)	25	30
Dosage :		
• eau (kg/m ³)	115	95
• ciment +cendre volante (kg/m ³)	170	130
• granulats fins (kg/m ³)	520	660
• granulats gros (kg/m ³)	1570	1550

3. COMBINAISON DU B.C.R ET DES MATERIAUX LOCAUX DANS L' OPTIMISATION DES COUTS

Dans l'optique d'une plus grande économie dans la fabrication du BCR, on cherche à réduire le plus possible la teneur en liant et à utiliser des alluvions naturels, si possible sans traitement préalable. Ceci suppose une adaptation du profil du remblai afin de répondre aux contraintes admissibles pour un tel matériau, en prévoyant des profils entre (0,50 H/1V et 0,9 H/1V) (G. DEGOUTTE 1997).

La combinaison des matériaux enrochement, des remblais en terres et de la technique du BCR, type (RCC), s'avère très avantageuse et prometteuse pour les moyens et petits barrages. Cette nouvelle variante est connue sous l'appellation anglo-saxonne (RCCR).

Dans ce type de variante le remblai de béton (RCCR) est intégré au remblai (tout-venant, enrochement), disponible sur le site. Cette optique a été développée par P.LONDE dans la réalisation de barrage en remblai dur à parements symétriques à masque amont étanche (RDSM) (fig 2). Ce type de solution a fait ses preuves dans la construction de batardeaux dans le cas de grands barrages. Pour ce type de variante, un dispositif d'étanchéité doit être prévu à l'amont (fig.3).

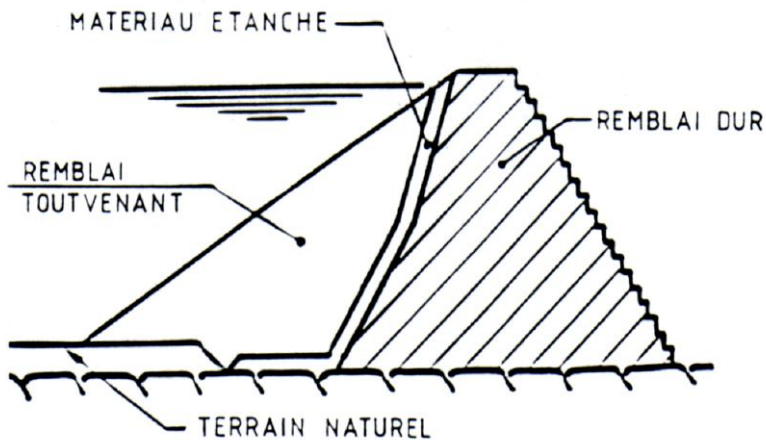


Fig. 2 Exemple d'une variante RDSM (BCR- Tout-venant)

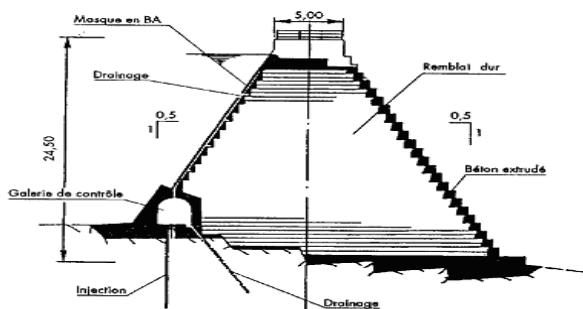


Fig. 3 Coupe type d'un barrage à profil symétrique

Il est à noter que cette variante s'adapte essentiellement pour des barrages à fondation présentant des caractéristiques géotechniques médiocres à faible, ainsi qu'aux sites de faibles activités sismiques.

Le fruit d'expériences menées au Etats-Unis et en France (M.MAUBBOUSSIN 1990), sur des évacuateurs fondés sur remblais ont permis de proposer d'autres solutions intéressantes pour des hauteurs de barrages modérées. Grâce à une protection avec du béton type RCC du parement aval, cas du barrage de TOWLIGA en Georgie (E.U), le TONGUE RIVER au Montana et le barrage de EL KOREIMA en France (fig .4) (K.D.HASEN 1998) et (LINO M 1993).

Cette approche consiste à prévoir quelques mètres de RCC en marche d'escalier en parement aval, de limiter le débit spécifique à $10 \text{ m}^3/\text{s.ml}$ et de vérifier sur un modèle réduit que l'essentiel de l'énergie est dissipée par les marches .

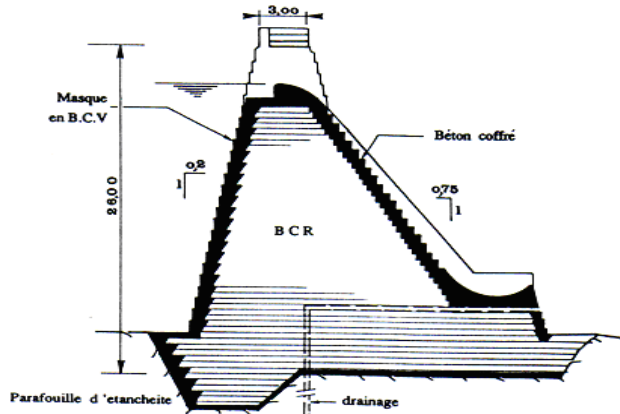


Fig. 4 Barrage de EL KOREIMA, (France) .

4. AVANTAGES DE LA TECHNIQUE DU BCR

Le béton compacté au rouleau (BCR) présente des avantages indéniables qui se résument comme suit :

4.1 Au point de vue des matériaux et matériels utilisés :

On économise environs plus de 30% de ciment et 40% d'eau, généralement le prix du mètre cube de BCR, mis en œuvre dans un barrage de type poids, est en moyenne deux fois inférieur à celui d'un béton classique.

La mise en place du BCR, permet d'utiliser des engins et des matériels de terrassement ce qui permet une diminution assez sensible des effectifs et de relever les cadences de production du béton.

4.2 Au point de vue de délais de réalisation

Les fortes cadences de mise en place permettent de réduire considérablement les délais. Les chantiers sont rapides, ils permettent de réaliser des économies mais, ils obligent le maître de l'oeuvre à étudier une organisation très précise du chantier et à préparer des réserves suffisantes de matériaux à l'avance pour répondre aux besoins

A partir de ce constat on peut dire que la technique du BCR est une solution économique et sûre pour des volumes dépassant les 35000,00 m³ (fig 5).

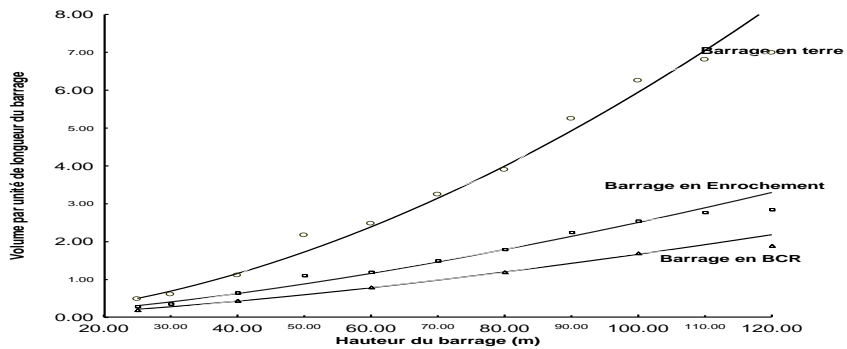


Fig. 5 : Evolution des besoins en matériaux

4.3 Au point de vue économie des coûts

Sur ce plan la réduction des coûts unitaires peut être assurée par la recherche de solutions constructives et économiques, soit par la recherche d'autres solutions spécifiques, c'est-à-dire combinaison du BCR à d'autres matériaux apte à réduire le coût de l'ouvrage.

La facilité d'intégration de l'évacuateur de crues associé à la rapidité d'exécution du projet, constitue un critère valable de choix du BCR pour les petits barrages, surtout si on prend à titre d'exemple, le délai de réalisation au barrage de RIOU, qui a été de 4 semaines pour la digue avec des moyens de dérivation minimums, ceci entraînera des réductions considérables des coûts de réalisation des barrages (fig.6)

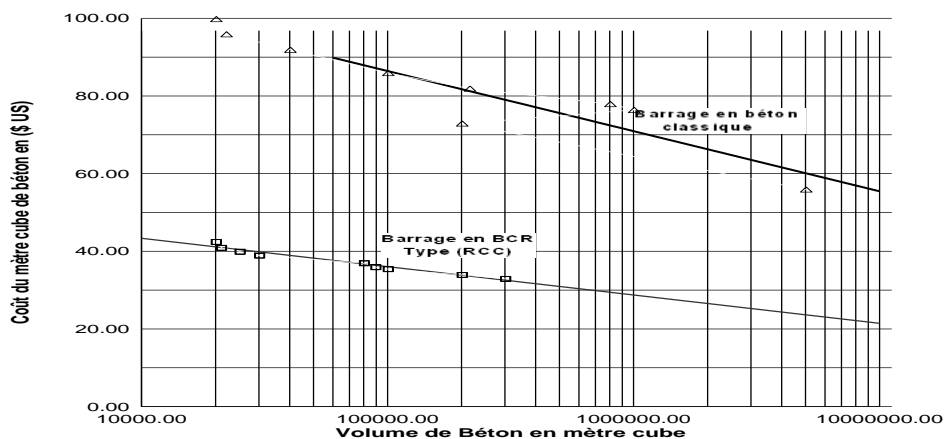


Fig. 6 Evolution des coûts du mètre cube de béton.

CONCLUSION

Malgré les développements en matière d'économie enregistrés dans la technique des barrages en BCR, nous constatons que l'utilisation de ce matériau peut se révéler intéressante et présentant un éventail de solutions économiques pour les petits barrages, surtout si certaines conditions propices se réunissent à savoir :

- la qualité du sol de fondation, cas d'une fondation rocheuse à faible profondeur.
- ouvrage à réaliser pour une urgence pendant une période d'étiage courte.
- disponibilité de la centrale à béton pour l'emploi à proximité.

On peut dire que l'approche économique de l'emploi du BCR, dans la construction de petits barrages tend à privilégier la réduction des coûts des matériaux utilisés grâce à l'utilisation de béton à faibles dosages en liant. L'autre intérêt du BCR paraît surtout, dans l'intégration de l'évacuateur de crues, ce qui nous conduit à envisager ce type d'ouvrage pour les barrages déversants (écrêteurs de crues ou batardeau).

Enfin, la technique du BCR, reste perçue comme une technique non figée qui exige une grande adaptation aux conditions du site et du projet. Seul les recherches et la collaboration des maîtres d'œuvres et d'ouvrages permettront d'aller encore plus loin dans l'optimisation de tels projets dans le futur.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]-PATON J. (1970), Discussion de la Question 39, X^{ème} Congrès de la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB), Montréal, vol VI.
- [2]RAPHAEL J. M. (1970), the Optimum Gravity Dam, Rapid construction of concrete dams , American Society of Civil Engineers, New York, 1970 : 221-247.
- [3]-Bulletin DE LA CIGB N° 75 (1989), Béton Compacté au rouleau pour barrages -Poids : Technique actuelle 160- 211.
- [4]-STERNBERG J. (1998), combining rock fill and RCC to create better dams, International Journal on Hydro Power and Dams, vol V, 46-50.
- [5]-MIHOUBI M.K. (1994) , Intégration de la technique du BCR dans la construction des barrages poids, Algérie Equipement, N°16, 31-34.
- [6]-MAUBOUSSIN M. (1990), BCR méthode de réalisation, session de formation continue, ENPC de Paris les 6-7 novembre, 2-4.

- [7]-JAPANESE NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS (1991), Dams in Japan, vol N°12,15-39.
- [8]-HASSEN K.D. (1998), Form follows in RCC dam too, International Journal on Hydro Power and Dams, vol V, 14-45.
- [9]-LONDE P. & LINO M. (1992), the faced symmetrical hard fill dam: a new concept for RCC, water power and Dam construction, February 1992.
- [10]-DEGOUTTE G.(1997), Petits barrages (recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi), CEMAGREF : 114-139.
- [11]- MIHOUBI M.K (2001) intégration de la technique du BCR dans les petits barrages dans le monde méditerranéen, Séminaire International “ les petits barrages dans le bassin méditerranéen ”, Tunis 28-29 Mai 2001.