

# ELABORATION D'UN BETON A HAUTES PERFORMANCES A PARTIR DE MATERIAUX LOCAUX

Par

**Abdelhafid BOUZIDI**

Institut de Génie Civil, Université de Blida

**Mohamed GHRICI**

Maître Assistant, Centre Universitaire de Chlef

**Abdelmalek BRAHMA**

Chargé de cours, Institut de Génie Civil, Université de Blida

## Résumé

*Cette étude, réalisée dans la région de Chlef, montre la possibilité d'obtention d'un béton à hautes performances (BHP) à partir de matériaux locaux.*

*Des paramètres de composition et de fabrication ont été étudiés, un superplastifiant (SPA, produit en Algérie) a été utilisé et une maniabilité suffisante, maintenue pendant au moins une heure, a été obtenue.*

*Avec des matériaux courants et en l'absence d'ajouts actifs, des résistances en compression de l'ordre de 60 MPa ont été atteintes.*

**Mots clés : béton à hautes performances - formulation - superplastifiant - maniabilité - optimisation - surfacage.**

De ce point de vue, les BHP offrent de larges possibilités mais leur confection et leur utilisation restent, à de rares exceptions près, au stade de l'expérimentation dans les laboratoires.

Nous décrivons ici, d'abord une méthode de formulation des BHP à partir des matériaux locaux [1], puis, nous analysons les résultats des essais d'écrasement obtenus.

## ❖ Matériaux utilisés

Le choix s'est porté, en premier lieu, sur les matériaux disponibles dans la région. Nous avons donc utilisé les granulats courants les plus usités dans la région pour la confection des bétons ordinaires et sur lesquels nous avons réalisé des essais de conformité.

## ❖ Gros granulats

Deux types de graviers (8/15) et un gravier intermédiaire (3/8) ont été utilisés (voir Tableau 1 et Figure 1).

## ❖ Sables

Là encore, deux types de sables ont été utilisés. Leurs caractéristiques sont données au tableau 2. Signalons ici que la quantité de fines est inférieure à 1% pour les deux sables.

## 1 INTRODUCTION

Pour des impératifs de mise en place, les bétons sont gâchés avec un excès d'eau. Ils sont, de plus, placés, dès leur mise en œuvre, à l'action des agents climatiques qui, dans la plupart des cas, favorisent le séchage.

L'évaporation rapide de l'eau de gâchage, aux jeunes âges, se traduit généralement par une diminution des performances du béton. Aussi, des bétons utilisant une quantité d'eau de gâchage plus faible, pour une même ouvrabilité sont très recherchés.

| Type de granulat                              | 1                          | 2                           | 3                          |
|---|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Provenance                                    | Carrière ENOF (Oued Fodha) | Carrière canal (Oued Fodha) | Carrière ENOF (Oued Fodha) |
| Classe  | 8/15                       | 8/15                        | 3/8                        |
| D <sup>max</sup> (mm)                         | 16                         | 12.5 <sup>(1)</sup>         | 10                         |
| Nature minéralogique                          | Calcaire marneux           | Calcaire marneux dur        | Calcaire marneux + fer     |
| Coefficient de forme                          | 0.14                       | 0.286                       | 0.138                      |
| Masse volumique absolue (t/m <sup>3</sup> )   | 2.665                      | 2.667                       | 2.665                      |
| Masse volumique apparente (t/m <sup>3</sup> ) | 1.37                       | 1.52                        | 1.38                       |
| Impuretés                                     | 3.5 % (argile)             | 2.8 % (calcaire)            | 4 % (calcaire)             |

Tableau 1 : Caractéristiques physiques des gros granulats.

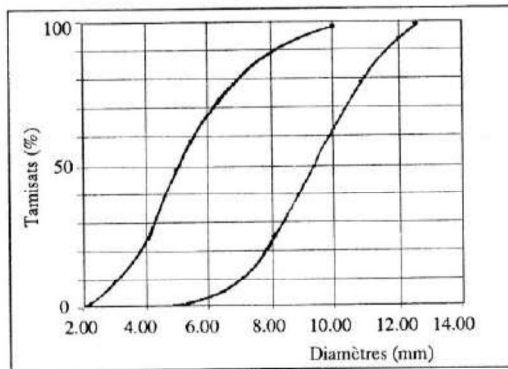


Figure 1 : Courbes granulométriques des graviers types 2 et 3.

| Type de sable                                 | 1                             | 2                             |
|---|-------------------------------|-------------------------------|
| Provenance                                    | Sablière ENIR (Oum Drouh)     | Sablière ENAVA (Oued Farasse) |
| Classe  | 0/6.3                         | 0/0.5                         |
| D <sup>max</sup> (mm)                         | 4 <sup>(2)</sup>              | 1                             |
| Nature minéralogique                          | Gras de quartzite et calcaire | Silicieux                     |
| Module de finesse                             | 3.02                          | 0.94                          |
| Masse volumique absolue (t/m <sup>3</sup> )   | 2.58                          | 2.68                          |
| Masse volumique apparente (t/m <sup>3</sup> ) | 1.65                          | 1.67                          |
| Equivalence de sable                          | 92.4 %                        | 93 %                          |

Tableau 2 : Caractéristiques physiques des sables.

#### ❖ Liant

Le liant utilisé est un CPA 325. Sa composition chimique est donnée au tableau 3 ci-après.

| Constituants chimiques | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | SO <sub>3</sub> |
|------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|
| Pourcentage            | 22.32            | 5.30                           | 2.74                           | 62.10 | 0.62 | 1.82            |

Tableau 3 : Composition chimique du ciment utilisé.

#### ❖ Superplastifiant

C'est un superplastifiant accélérateur, à base de polymère sulfoné, de couleur marron et de densité

(1) Granulat tamisé. Seule la fraction inférieure à 12.5 mm a été retenue.  
(2) Granulat tamisé. Seule la fraction inférieure à 4 mm a été retenue.

égale à 1.22, produit par la société Granitex de Oued Smar (Alger).

## 2 FORMULATION DES BETONS

La formulation se base essentiellement sur les deux critères suivants :

- compacité maximale,
- caractéristiques rhéologiques à l'état frais satisfaisantes.

Ce qui, pour une composition optimale en granulat, correspond au béton qui s'écoule le plus rapidement au maniabilimètre LCL ; la teneur en eau et le dosage en ciment étant fixés a priori.

Dans notre étude, le dosage en ciment est fixé à 400 kg/m<sup>3</sup> et le volume d'eau à 200 l/m<sup>3</sup>. Les proportions relatives des divers granulats ont été obtenues par la méthode graphique de Dreux - Gorisse. La composition (par m<sup>3</sup>) du béton de base est rapportée au tableau 4.

| Composants    | Ciment | Eau | Gravier  | Sable  | Rapport S/G |
|---------------|--------|-----|----------|--------|-------------|
| Quantité (Kg) | 400    | 200 | 1 133.56 | 662.28 | 0.55        |

Tableau 4 : Composition du béton de base.

#### □ Optimisation du squelette granulaire

En conservant le même volume de la pâte, on optimise le squelette granulaire par la recherche du rapport sable/gravier qui donnera la meilleure maniabilité.

Le tableau 5 illustre les différentes compositions de bétons, obtenues en faisant varier la composition de base.

Signalons que la quantité de gravier intermédiaire (Type 3) a été prise égale à 25% de la masse totale du gravier type 1 conformément à la méthode d'optimisation Baron-Lesage [2].

Les résultats sont reproduits sur la figure 2, qui montre l'évolution de la maniabilité du béton en fonction du rapport sable/granat. Il apparaît clairement sur cette figure que la valeur optimale du rapport sable/gravier est voisine de 0.6. On retiendra donc la composition 2 du tableau 5.

| Composition | Unité             | Composition de base | 1      | 2      | 3      | 4      |
|-------------|-------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|
| Ciment      |                   | 400                 | 400    | 400    | 400    | 400    |
| Eau         |                   | 200                 | 200    | 200    | 200    | 200    |
| Gravier G2  | Kg/m <sup>3</sup> | 906.85              | 937.31 | 877.54 | 824.93 | 778.27 |
| Gravier G3  |                   | 226.71              | 234.33 | 219.38 | 206.23 | 194.57 |
| Sable S1    |                   | 622.28              | 585.82 | 658.15 | 721.81 | 778.54 |
| S/G3 + G2   |                   | 0.55                | 0.50   | 0.60   | 0.70   | 0.80   |
| G3/G2       |                   | 0.25                | 0.25   | 0.25   | 0.25   | 0.25   |

Tableau 5 : Compositions des bétons testés.

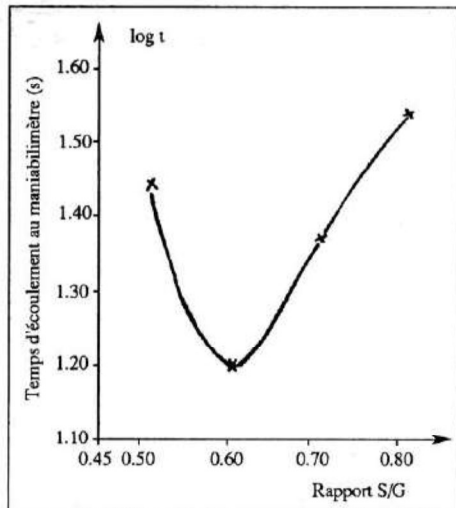


Figure 2 : Temps d'écoulement au maniabilimètre en fonction de S/G.

#### □ Optimisation de la teneur en eau

Ici, l'optimisation consiste à obtenir une fluidité demandée avec un rapport E/C le plus faible possible, en utilisant une quantité optimale de superplastifiant.

Dans notre cas, le dosage en superplastifiant a été fixé à 1.5% du poids du ciment suivant les prescriptions de la fiche technique du producteur [3].

Pour déterminer la quantité d'eau minimale désirée, nous avons fait varier le rapport E/C dans les proportions indiquées au tableau 6 en mesurant l'affaissement correspondant au cône d'Abrams.

| Composition  | Unité             | 1       | 2       | 3       | 4       |
|--------------|-------------------|---------|---------|---------|---------|
| Ciment       |                   | 400     | 400     | 400     | 400     |
| Eau          |                   | 120     | 140     | 160     | 180     |
| Gravier G2   | Kg/m <sup>3</sup> | 877.54  | 877.54  | 877.54  | 877.54  |
| Gravier G3   |                   | 219.38  | 219.38  | 219.38  | 219.38  |
| Sable S1     |                   | 658.15  | 658.15  | 658.15  | 658.15  |
| SP           |                   | 6 (2+4) | 6 (2+4) | 6 (2+4) | 6 (2+4) |
| E/C          |                   | 0.30    | 0.35    | 0.40    | 0.45    |
| Affaissement | cm                | 0       | 3       | 5       | 7       |

Tableau 6 : Optimisation de la quantité d'eau.

On peut constater que la consistance voulue n'a pas été atteinte pour toutes les valeurs du rapport E/C. Ce qui a nécessité une correction de la formulation du béton. Sachant que le sable utilisé est un sable grossier, nous avons procédé à sa correction par ajout d'un sable plus fin (Type 2).

Cette correction a été réalisée sur la formulation du béton n°3 du tableau 6.

Les nouvelles compositions des bétons sont données au tableau 7. Les résultats de l'affaissement au cône en fonction du rapport sable (Type 1)/sable

(Type 2) montrent une nette amélioration des propriétés rhéologiques du béton.

Toutefois, cette amélioration constatée est insuffisante. Au-delà de 40% d'ajout de sable correcteur (Type 2), on ne constate aucune amélioration notable dans la consistance du béton.

| Composition       | Unités            | 1         | 2         | 3         |
|-------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| Ciment            |                   | 400       | 400       | 400       |
| Eau               |                   | 160       | 160       | 160       |
| Gravier G2        | Kg/m <sup>3</sup> | 877.54    | 877.54    | 877.54    |
| Gravier G3        |                   | 219.38    | 219.38    | 219.38    |
| Sable S1          |                   | 460.70    | 394.90    | 329.10    |
| Sable S2          |                   | 197.50    | 263.30    | 329.10    |
| SP                |                   | 6 (2 + 4) | 6 (2 + 4) | 6 (2 + 4) |
| Pourcentage S1/S2 |                   | 70 / 30   | 60 / 40   | 50 / 50   |
| Affaissement      | cm                | 7         | 8         | 8.5       |

Tableau 7 : Compositions avec sable correcteur.

La formulation adoptée est celle du béton n° 2 du tableau 7 car la formulation n° 3 peut avoir une influence diminutive sur la résistance du béton durci.

#### □ Optimisation du dosage en superplastifiant

Afin d'exploiter au mieux les propriétés du superplastifiant, nous avons été amenés à déterminer son dosage optimal en utilisant la méthode des coulis [4].

Les résultats sont rapportés à la figure 3. On observe qu'au-delà d'un dosage de l'ordre de 2% l'effet du superplastifiant devient très faible. Dans notre cas, le dosage de saturation en superplastifiant est pris égal à 1.9% du poids du ciment.

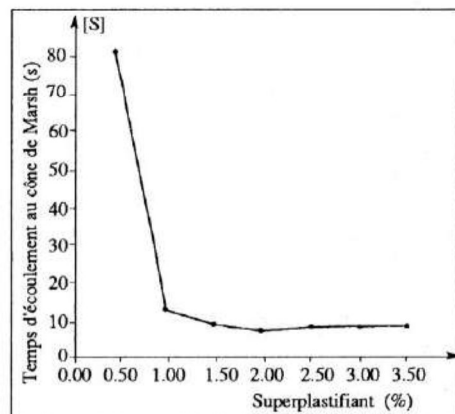


Figure 3 : Temps d'écoulement au cône de Marsh en fonction du superplastifiant.

#### □ Modalités d'introduction du superplastifiant

Le superplastifiant a, en général, un double effet : il déflocule les grains de ciment et lubrifie le mélange du béton. Son adduction, par fraction, au mélange doit

forcément avoir une influence notable sur la consistance finale.

Pour rendre compte de l'influence du mode d'introduction du superplastifiant, nous avons réalisé un essai utilisant les données du tableau 8. Les résultats de la figure 4 mettent bien en évidence l'influence du mode d'introduction du superplastifiant sur la consistance finale du mélange.

Conformément aux résultats de la figure 4, on retiendra la formulation n°2 du tableau 8 qui est de consistance plastique à très plastique.

| Composition       | Unités            | 1                | 2                | 3                |
|-------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|
| Ciment            |                   | 400              | 400              | 400              |
| Eau               |                   | 160              | 160              | 160              |
| Gravier G2        | Kg/m <sup>3</sup> | 877.54           | 877.54           | 877.54           |
| Gravier G3        |                   | 219.38           | 219.38           | 219.38           |
| Sable S1          |                   | 394.90           | 394.90           | 394.90           |
| Sable S2          |                   | 263.30           | 263.30           | 263.30           |
| SP                |                   | 7.6<br>(2.5+5.1) | 7.6<br>(3.8+3.8) | 7.6<br>(5.1+2.5) |
| Pourcentage S1/S2 |                   | 30 / 70          | 50 / 50          | 70 / 30          |
| Étalement         |                   | 1.5              | 1.7              | 1.4              |

Tableau 8 : Proportionnage du superplastifiant.

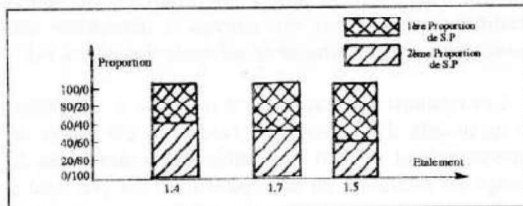


Figure 4 : Influence du fractionnement du S.P. en fonction de l'étalement.

Au cours de la formulation du béton on a pu constater que, même l'introduction, par fraction, de l'eau, pouvait améliorer le comportement rhéologique du béton frais. C'est ce que montrent les résultats relatifs aux formulations du tableau 9.

La formulation finale du béton étudié est reproduite au tableau 10.

### 3 CONFECTION DES EPROUVETTES

Cette opération est d'une grande importance car elle influe de façon notable sur le produit final. Signalons ici que le mode d'introduction des matériaux dans le malaxeur diffère des méthodes employées pour les bétons ordinaires.

Dans le cadre de notre travail, les matériaux ont été introduits dans le malaxeur suivant l'ordre ci-après :

| Composition | Unités            | 1                | 2                | 3                |
|-------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|
| Ciment      |                   | 400              | 400              | 400              |
| Eau         |                   | 155              | 150              | 145              |
| (E1+E2)     |                   | 129+26           | 125+25           | 121+24           |
| Gravier G2  | Kg/m <sup>3</sup> | 877.54           | 877.54           | 877.54           |
| Gravier G3  |                   | 219.38           | 219.38           | 219.38           |
| Sable S1    |                   | 394.90           | 394.90           | 394.90           |
| Sable S2    |                   | 263.30           | 263.30           | 263.30           |
| SP          |                   | 7.6<br>(3.8+3.8) | 7.6<br>(3.8+3.8) | 7.6<br>(3.8+3.8) |
| Rapport E/C |                   | 0.388            | 0.375            | 0.363            |
| Étalement   |                   | 1.8              | 1.6              | 1.5              |

Tableau 9 : Compositions modifiées des bétons.

| Composants   | Quantité (kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------------|-------------------------------|
| Ciment       | 400                           |
| Eau (E1+E2)  | 150 (125 + 25)                |
| Gravier G2   | 878                           |
| Gravier G3   | 220                           |
| Sable S1     | 395                           |
| Sable S2     | 263                           |
| SP (SP1+SP2) | 7.6 (3.8 + 3.8)               |
| E/C          | 0.375                         |
| G3/G2        | 0.251                         |
| S/G          | 0.599                         |

Tableau 10 : Formulation finale (granulats secs).

- 1 - Introduction et répartition de gros granulats (G2 et G3) sur l'ensemble du fond du malaxeur.
- 2 - Introduction et répartition du liant.
- 3 - Introduction et répartition des granulats fins (S1 et S2).
- 4 - Malaxage à sec pendant une minute.
- 5 - Introduction de la quantité d'eau E1 avec une première partie de superplastifiant SP1 suivi d'un malaxage pendant une minute et trente secondes.
- 6 - Introduction de la deuxième partie de superplastifiant SP2 et malaxage pendant trente secondes.
- 7 - Introduction de la deuxième quantité d'eau E2, malaxage durant trente secondes.

### 4 ESSAIS D'ECRASEMENT

Pour ces essais, nous avons utilisé des éprouvettes  $\phi = 150$  mm, H = 300 mm. Le béton a été introduit dans les moules, en trois couches, par piquage.

Les éprouvettes ont été conservées dans l'eau à  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ . Elles ne sont retirées de l'eau qu'une heure avant le début de l'essai.

Systématiquement, avant le surfaçage, les éprouvettes sont soumises à la pesée. Leur masse moyenne est de 12.95 kg soit une densité de 2.444, ce qui semble être en parfait accord avec les estimations faites par De Larrard et Malier [5] qui estiment que la densité d'un BHP non armé est de l'ordre de 2.4 à 2.5.

Le surfaçage des éprouvettes est réalisé à l'aide de "la boîte à sable".

Les résultats des essais à la compression sont reproduits sur la figure 6, qui montre l'évolution de la résistance en fonction du temps.

La rupture des éprouvettes est le plus souvent du type "rupture par colonne longitudinale" (voir photo), parfois par éclatement.

L'aspect de la surface de rupture est rugueux à lisse ce qui révèle une certaine faiblesse de la matrice ☹

## 5 CONCLUSION

Cette étude a montré qu'il est désormais possible d'obtenir des BHP à partir de matériaux locaux, surtout lorsqu'on sait que le ciment utilisé est un CPA 325 à fort taux d'alumine et que les granulats ne sont pas de bonne qualité car poreux et présentant, en outre, un certain nombre d'éléments plats.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. Bouzidi : "Elaboration et comportement mécanique des bétons à hautes performances". Mémoire de DUEA ; Centre Universitaire de Chlef, Juillet 1993.
- [2] J. Baron, R. Lesage : "Méthode expérimentale de composition des bétons". Rapport de recherche LCPC n° 64, Juillet/Août 1976.
- [3] Fiche technique des produits Granitex, Oued Smar Alger.
- [4] F. De Larrard & C. Puch : "Formulation des bétons à hautes performances, méthode de coulis". Bul. LCPC n° 161, Mai/Juin 1989.
- [5] F. De Larrard, Y. Malier : "Propriétés constructives des bétons à très hautes résistances". Annales ITBTP n° 476, Décembre 1989.

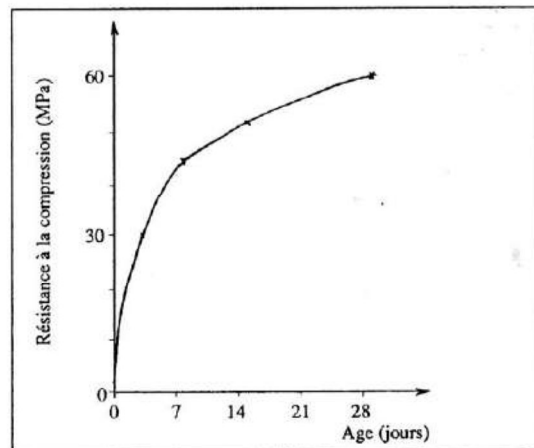


Figure 6 : Résistance à la compression en fonction de l'âge.