

FORMULATION DES BETON DE HAUTES PERFORMANCES AVEC DES AJOUTS CIMENTAIRES LOCAUX

1. Introduction

L'étude d'une composition de béton consiste presque toujours à rechercher conjointement deux qualités essentielles : résistance et ouvrabilité ; or ces deux qualités sont étroitement liées l'une à l'autre mais elles varient en sens inverse. Cet antagonisme ne peut se régler que par des solutions de compromis.

Dreux G. et l'Hermite R. rapportent [1] : «qu'il est difficile d'élaborer une théorie au sens propre et scientifique afin d'aboutir à la meilleure composition donnant à elle seule le béton présentant toutes les qualités souhaitées» et ajoutent : «les méthodes basées sur la recherche de la compacité maximale, considèrent essentiellement le grain du ciment sous son aspect physique de grain fin venant prendre sa place dans le remplissage optimal recherché pour le mélange de l'ensemble des granulats et du ciment ».

On peut considérer que le béton est un matériau non homogène composé de trois phases distinctes :

- la pâte de ciment hydraté, Regourd [2, 3] ;
- la zone de transition entre le granulat et la pâte de ciment hydraté, Maso [4] ;
- les granulats eux-mêmes polycristallins.

Lorsqu'on mesure la résistance en compression du béton on s'aperçoit que la rupture peut se produire à trois niveaux :

- 1 - dans le mortier ;
- 2 - au niveau de l'interface granulat / mortier ;
- 3 - dans le granulat.

De toute évidence le maillon le plus faible limitera la valeur de la résistance [5].

La théorie de la granulation optimale due à Caquot, permet de généraliser les résultats trouvés sur les mélanges binaires ; elle montre l'importance d'un dosage optimal en éléments fins (ciment et / ou fines inertes). Cette théorie est probablement la seule à tirer, d'une façon cohérente, les conséquences d'une interaction entre les grains [6].

Les méthodes proposées sont nombreuses, elles aboutissent toutes à des dosages volumétriques ou de préférence pondéraux.

Elles sont dites à granularité continue lorsque l'analyse des mélanges constituant le béton donne une courbe granulométrique continue depuis les plus petits grains de ciment ou de fillers jusqu'au plus gros grains de graviers.

Quelle que soit la méthode utilisée, la formule de composition calculée ne peut prétendre correspondre parfaitement au béton désiré car il n'est pas possible d'appréhender avec précision par le calcul seul, certaines caractéristiques des constituants influant directement sur la qualité du béton : forme, granulométrie, porosité, adhésivité des granulats, fines de sable, finesse de mouture, classe de résistance vraie du ciment etc. C'est pourquoi, il est couramment admis que le calcul d'une composition de béton n'est qu'une première approche et nécessite par la suite la préparation de mélanges d'essais qui eux, permettront de corriger expérimentalement la formule calculée pour aboutir au béton désiré répondant aux critères définis initialement.

2. Analyse des ajouts cimentaires

Avant même la formulation d'un tel béton il est primordial d'effectuer l'analyse et le contrôle des propriétés physico-chimiques et mécaniques des différents constituants (ciment, sable et graviers) ainsi que les fillers sélectionnés (laitier de haut fourneau, pouzzolane et calcaire). Le liant doit être en particulier d'une classe de résistance supérieure à 45 MPa.

2.1 Le laitier

Le laitier utilisé est un sous-produit de la fabrication de la fonte. Il provient de l'usine d'El-Hadjar Annaba, c'est un sable de granulométrie 0/5 mm, le tableau 1 représente sa composition chimique.

Il subit un refroidissement brutal (trempe) sous un jet d'eau, ce qui permet l'obtention d'un état vitrifié (amorphe). Ceci a pu être vérifié par l'absence de raies de diffraction X.

R. CHAID
Université de Boumerdès
R. JAUBERTHIE
INSA de Rennes
M.T. ABADLIA
Université de Boumerdès
A. BALI
ENP Alger

RÉSUMÉ

Dans notre étude expérimentale, notre but n'est pas de proposer une "méthode recette" pour la formulation des béton de hautes performance, mais plutôt, sur la base des connaissances théoriques et des matériaux disponibles, de formuler des BHP dont les principaux critères sont :

- un béton de bonne ouvrabilité ;
- une résistance en compression à 28 jours supérieure à 50 MPa.

Dans ce but, les essais que nous entreprenons consistent à optimiser les différentes compositions de béton (de référence et ceux avec ajouts). Des essais antérieurs nous ont orientés vers la méthode Dreux Gorisse qui nous paraît très pratique et inspirée de la théorie de Caquot. Elle représente une synthèse de plusieurs méthodes qui sont toutes basées sur la connaissance préalable d'une courbe granulométrique de référence.

MOTS CLÉS

BHP • laitier • pouzzolane • calcaire.

Eléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	RI	PAF
%	39,77	41,69	7,05	1,41	5,49	0,15	0,44	0,10	0,12	0,11

Tableau 1 : Composition chimique du laitier.

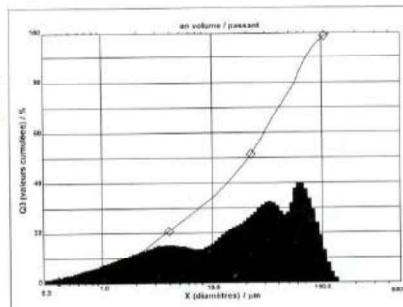
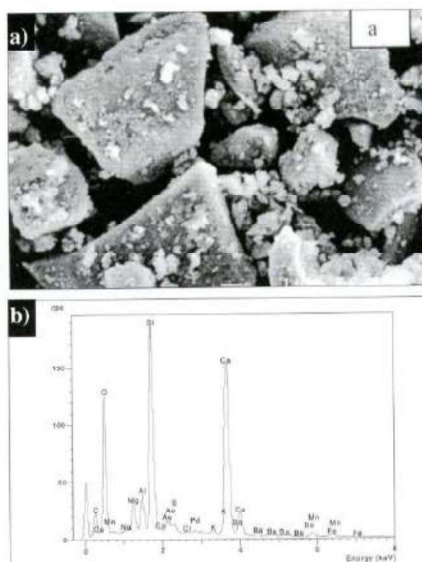


Figure 2 : Distribution granulométrique du laitier.

Figure 1a - 1b : Observation au MEB du laitier

L'observation au MEB du laitier (Figure 1a; x 5 000), présente des nodules d'un aspect poreux dû à de la vapeur d'eau piégée lors de la trempe. Il faudra tenir compte de son influence sur la maniabilité et sur le dosage en eau.



Le résultat de la micro-analyse couplée au MEB (Figure 1b; x 2 000) permet de vérifier le rapport CaO/SiO₂ sur plusieurs grains. Il est compris entre 0.95 et 1.04, ce qui permet de classer ce laitier comme plutôt acide.

L'analyse granulométrique (Figure 2) est obtenue avec un granulomètre laser. Les courbes granulométriques partielle et cumulée du laitier sont représentées respectivement en surface noire et trait plein. On peut observer une granulométrie continue moyenne entre 0.3 et 77 μm avec les classes granulaires suivantes :

- 90% des particules de diamètre inférieur ou égal à 77 μm.
- 50% des particules de diamètre inférieur ou égal à 22 μm.
- 10% des particules de diamètre inférieur ou égal à 2 μm.

Ce laitier va agir sur 2 points :

- a) son pouvoir pouzzolanique, caractérisé par le taux de chaux combinée,
- b) sa granulométrie assurera la densification de la matrice, du fait de la taille de ces particules qui peuvent s'insérer en partie entre les grains de ciment.

Ses autres propriétés physiques sont :

Masse volumique absolue 2,99 g/cm³.
Surface spécifique 8 500 cm²/g.
Activité 125 mg_{CaO}/g.

2.2 La pouzzolane

La pouzzolane utilisée est une pouzzolane naturelle d'origine volcanique, extraite de la carrière Oued-Sly ; le tableau 2 représente sa composition chimique. Elle est aussi riche en silice et en alumine.

Eléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	RI	PAF
%	14,59	44,95	16,91	09,47	3,70	0,20	1,35	1,34	0,56	1,30

Tableau 2 : Composition chimique de la pouzzolane.

La figure 3a (x 5 000) représente une vue globale au MEB, la figure 3b (x 2 000) représente la microanalyse globale. Ces données confirment les constations précédentes et la composition chimique présentée (Tableau 2). Les particules de la pouzzolane de néoformation ont un aspect poreux semblable à celui du laitier.

La granulométrie de la pouzzolane est plus resserrée que celle du laitier et même que celle du ciment, elle s'étale entre 2 et 15 μm seulement (Figure 4).

Les classes granulaires sont :

Les classes granulaires sont :

- 75% des particules de diamètre inférieur ou égal à 15 μm.
- 50% des particules de diamètre inférieur ou égal à 6 μm.
- 25% des particules de diamètre inférieur ou égal à 2 μm.

Ses autres propriétés physiques sont :

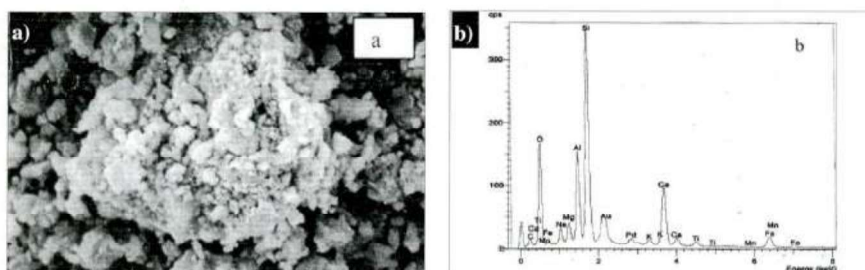


Figure 3 (a-b) : Observation au MEB de la pouzzolane.

Masse volumique absolue 2.66 g/cm³.
Surface spécifique 9 565 cm²/g.
Activité 115 mg_{CuO}/g.

2.3 Le calcaire

Le calcaire utilisé est extrait de la carrière de Meftah, sa composition chimique est reportée sur le tableau 3.

Eléments	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	RI	PAF
%	53,08	0,04	0,93	0,56	0,23	2,60	0,53	0,08	0,52	42,55

Tableau 3 : Composition chimique du calcaire.

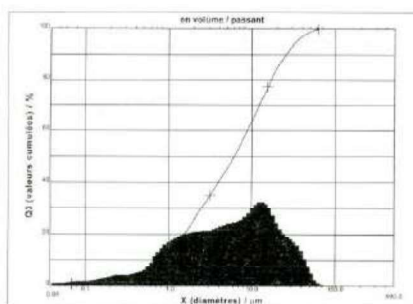


Figure 4 : Distribution granulométrique de la pouzzolane

La micro-analyse (Figure 5b, x 2 000) effectuée aussi bien sur une large plage, que sur des points a donné des compositions chimiques invariantes.

Les particules de calcaire se présentent sous forme de rosaces, constituées de plusieurs plaquettes enchevêtrées (Figure 5a, x 5 000).

La granulométrie du calcaire utilisé est encore plus resserrée que celle du ciment, du laitier et de la pouzzolane, les dimensions de ses particules ne dépassent guère les 6 µm (Figure 6).

Les différentes classes granulaires sont :

- 75% des particules de diamètre inférieur ou égal à 6 µm.
- 50% des particules de diamètre inférieur ou égal à 3.5 µm.
- 25% des particules de diamètre inférieur ou égal à 1.7 µm.

Ses autres propriétés physiques sont :
Masse volumique absolue 2.80 g/cm³.
Surface spécifique 16 594 cm²/g.

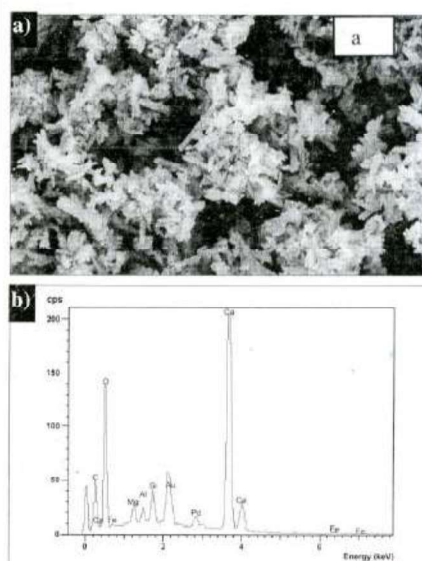


Figure 5 (a-b) : Observation au MEB du calcaire.

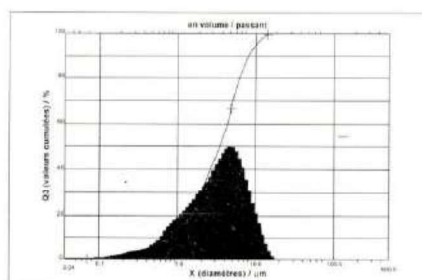


Figure 6 : Distribution granulométrique du calcaire

3. Compositions des BHP avec ajouts cimentaires

Cette partie a été réalisée dans les laboratoires nationaux Algériens, aussi nous avons utilisés des matériaux locaux. Le ciment est un CPA 45 produit par l'usine de Meftah, le sable est celui de Baghlia (sable de rivière), les graviers sont extraits de la carrière Jaubert et l'adjuvant est un plastifiant réducteur d'eau (Contact Super F) produit par Granitex.

3.1 Formulation de la composition de base (CB)

Nous avons projeté une résistance à 28 jours de 30 MPa et une maniabilité au cône d'Abrams de 6 à 8 cm d'affaissement.

Après analyse et contrôle des différents matériaux et à partir du graphique granulométrique du sable et des trois fractions de graviers (3/8, 8/15 et 15/25), les coordonnées du point de brisure A fixées à ($x = 12.5$ et $y = 44$ %), nous avons retenu le dosage des granulats suivant :

- sable32 %.
- fraction 3/815 %.
- fraction 8/1515 %.
- fraction 15/2515 %.

Pour un coefficient de compacité = 0.840 relatif à un diamètre maximal du gros granulat ($D_{max} = 25$ mm), la composition finale, après correction est la suivante :

- ciment400 kg/m³.
- sable540 kg/m³.
- fraction 3/8250 kg/m³.
- fraction 8/15295 kg/m³.
- fraction 15/25575 kg/m³.
- eau200 l/m³.

Les caractéristiques du béton élaboré (CB) répondent bien aux objectifs visés, résistance à 28j de 30 MPa et un affaissement : $A_c = 6$ à 8 cm (tableau 4).

Compositions	Béton frais		Béton durci	
	Affaissement (cm)	Masse volumique (kg/m ³)	7 j	28 j
Calculée	7,5	2 260	22	31
Corrigée	8,0	2 270	23	33

Tableau 4 : Caractéristiques de la composition de base (CB)

3.2 Formulation du béton de référence (BR)

En prenant comme référence la composition précédente (CB), nous avons élaboré un béton supposé de haute performance, en balayant les plages suivantes :

- teneur en adjuvant de 0.6 à 2.0 % avec un rapport E/C constant de 0.30 (tableau 5).
- rapport eau / ciment (E/C) de 0.35 à 0.50 avec un dosage en adjuvant optimal (tableau 6).

Dosage en adjuvant (%)	Béton frais		Béton durci	
	Affaissement (cm)	Masse volumique (kg/m ³)	7 j	28 j
CB	8,0	2 270	23	33
0,6	4,0	2 365	29	38
1,3	5,5	2 371	35	41
2,0	7,0	2 376	37	47

Tableau 5 : Influence du dosage en adjuvant sur les caractéristiques de la composition de base.

Rapport E/C	Béton frais		Béton durci	
	Affaissement (cm)	Masse volumique (kg/m ³)	7 j	28 j
0,30	7,0	2 376	37	47
0,35	7,5	2 379	37	42
0,40	8,0	2 383	39	39
0,50	13,0	2 387	27	36

Tableau 6 : Influence du rapport E/C sur les caractéristiques de la composition de base.

- diamètre maximal (D_{max}) 16 et 25 mm (tableau 7).

D_{max} (mm)	Béton frais		Béton durci	
	Affaissement (cm)	Masse volumique (kg/m ³)	7 j	28 j
25	7,0	2 376	37	47
16	8,0	2 405	40	52

Tableau 7 : Influence du diamètre (D_{max}) sur les caractéristiques de la composition de base.

On note un accroissement des caractéristiques mécaniques du béton frais et durci lorsque le dosage en adjuvant croît. La résistance mécanique à 28 jours est de 47 MPa pour un dosage en adjuvant de 2 %, "valeur que l'on retiendra par la suite".

Le tableau 6 montre l'influence du rapport eau / ciment. On peut remarquer que l'augmentation du rapport E/C donne très rapidement des affaissements au cône incompatibles avec une mise en place correcte, mais avec des résistances à la compression sensiblement affaiblies. Le rapport optimal est donc 0.30.

Une fois le dosage en adjuvant et le rapport eau / ciment optimisés respectivement : 2 % et 0.30, on procède à l'étude de l'influence du diamètre (D_{max}) des gros granulats sur les caractéristiques du béton.

Ces résultats (tableau 7) illustrent bien l'influence du diamètre maximal (D_{max}) des granu-

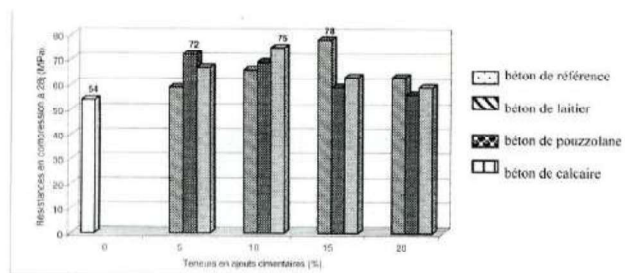


Figure 7 : Evolution des résistances en compression en fonction de la teneur d'ajout cimentaire.

lats, sur les propriétés des bétons, que se soit à l'état frais ou à l'état durci.

Par conséquent, ces trois paramètres sont très significatifs, on note un gain de résistance de près de 74 % à 7 jours et de 58 % à 28 jours, avec une densification de la masse, ce qui rend le béton de contrôle (BC) ainsi obtenu moins perméable et par la même plus résistant aux agressions chimiques.

3.3 Formulation des bétons avec ajouts cimentaires

Le but de cette partie consiste à déterminer les compositions optimales des ajouts cimentaires en explorant les différentes possibilités de leur insertion.

Pour cela, nous avons broyé les ajouts, en fonction de la broyabilité jusqu'à une surface spécifique Blaine de : 5 000, 7 000 et 10 000 cm²/g. Nous avons aussi fait varier leur teneur entre 5 et 20 % de la masse du ciment.

Le figure 7 illustre la synthèse de l'évolution des résistances mécaniques à 28 jours des bétons durcis pour les différentes compositions mais ici, en utilisant un ciment Portland CEM I 52,5. On note une augmentation des résistances mécaniques, ainsi qu'une densification de la matrice pour tous les bétons avec ajouts cimentaires par rapport à celles du béton de référence dont sa résistance mécanique à 28 jours est de 52 MPa et sa masse volumique au même âge 2427 kg/m³. Ces résultats sont obtenus pour des moutures très poussées :

- laitier : SSB = 8 500 cm²/g.
- pouzzolane : SSB = 9 565 cm²/g.
- calcaire : SSB = 16 594 cm²/g.

En conséquence, les valeurs optimales de la teneur de chacun des ajouts semble se situer à :

- 15 % pour le laitier.
- 5 % pour la pouzzolane.
- 10 % pour le calcaire.

Les masses volumiques respectives des bétons durcis sont :

- 2 488 kg/m³ pour le laitier.
- 2 460 kg/m³ pour la pouzzolane.
- 2 475 kg/m³ pour le calcaire.

4. Conclusion

La méthode de Dreux Gorisse nous a conduit à des compositions de béton satisfaisantes, présentant des gains très significatifs de résistance mécanique, la mouture poussée des ajouts cimentaires a favorisé l'accroissement de la compacité des bétons, ce qui explique l'augmentation elle aussi importante de leurs masses volumiques.

Sur le plan physico-mécanique, ces ajouts réagissent par leur finesse et pour certains par leur activité pouzzolanique, engendrant ainsi un squelette plus cohérent et laisse prévoir un béton plus résistant aux agressions chimiques et plus durable.

Le rapport eau / ciment et la teneur en adjuvant retenus pour la suite de notre étude sont respectivement 0,30 et 2 % de la masse du ciment et le diamètre maximal des gros granulat est 16 mm. Ces résultats seront exploités pour la formulation des bétons de hautes performances et suivis d'une étude approfondie de l'incidence des différents ajouts cimentaires (15 % de laitier, 10 % de calcaire et 5 % de pouzzolane) sur leurs caractéristiques physico-mécaniques et structurales ■

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Dreux G., " Nouveau guide du béton ", E. rylolles, Paris, 1998.
- [2] Regourd M., " Microstructure of cement blends including fly ash silica fume, slag and fillers ", [Microstructure des mélanges de ciment comprenant la fumée silice de cendres volante, des scories et des fillers], Materials Research Society, édité par L. Struble et P. Brwn, vol. 85, 1987, p. 187-200.
- [3] Regourd M., " La microstructure, dans les bétons à très haute performances - caractérisation, durabilité, applications ", édité par Y. Malier, Presses de l'école nationale des ponts chaussées, 2-85978-187-0, p. 25-44, 1992.
- [4] Maso J-C., " L'étude expérimentale du comportement du béton sous sollicitations monoaxiales et pluriaxiales, dans le béton hydraulique ", Presses de l'école nationale des ponts chaussées, 1982, ISBN 2-85978-187-0, p. 247-259.
- [5] Aitcin P-C., " La technologie des bétons à très haute résistance en Amérique du Nord ", Material and structures, n° 20, p. 180-189, 1987.
- [6] Baron J., " Les principes de composition du béton de porosité minimale ", Le béton hydraulique, p. 143-160, presse de l'ENPC, Paris, 1983.