

OPTIMISATION DE LA FORMULATION DU BÉTON AUTO-PLAÇANT À BASE DE MATÉRIAUX LOCAUX

Adda HADJ MOSTEFA¹, Y. SEBAÏBI¹, H. OUAHHABI¹

¹Département de Génie Civil, Faculté des sciences de l'ingénieur, Université de SIDI-BEL-ABBES, Algérie,

E-mail : addahadjmostefa@yahoo.fr

RESUME : La connaissance, autour du matériau béton, a beaucoup évolué ces deux dernières décennies et notamment dans la formulation de bétons dont les caractéristiques répondent à des besoins spécifiques. Dans ce contexte, le béton autoplaçant (BAP) est un matériau innovant largement usité de par le monde et commence à bénéficier de quelques standards.

La présente étude s'inscrit dans le cadre des travaux de recherche menés au département de génie civil de l'université de SIDI BEL ABBES. Elle concerne l'étude de l'optimisation des paramètres de composition des bétons sur le comportement du béton autoplaçant à l'état frais. Elle a pour objectif de comprendre les rôles que jouent les différents constituants susceptibles d'entrer dans la formulation d'un BAP à base de matériaux locaux et de mettre en évidence les éventuelles interactions entre ses constituants. Les résultats obtenus offrent de belles perspectives pour optimiser les BAP. Nos essais ont permis de cerner une formulation optimale d'un béton autoplaçant répondant aux critères rhéologiques et mécaniques.

Mots - clés : Béton autoplaçant, super plastifiant, matériaux locaux, Béton frais.

1- Introduction

Après l'étude des différentes caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques du ciment, fines et granulats utilisés, on traitera dans ce travail l'ensemble des essais qui ont été réalisés sur ce type de béton (BAP). Pour déterminer les caractéristiques du BAP à l'état frais et son comportement mécanique à l'état durci on suit les étapes décrites ci-dessous :

- Etude de l'effet de la granularité des bétons autoplaçants à base des granulats locaux.
- Etude de l'influence du volume de la pâte (Ciment+Ajout+adjuvant+Eau).
- Détermination de la résistance mécanique à 28 jours.

Tous les essais menés au cours de cette étude ont été effectués sur le béton. Les premiers concernent l'étude des propriétés à l'état frais, en particulier celles des BAP, afin d'estimer leur fluidité et leur ségrégation dynamique et statique (essais d'étalement au cône, de la boîte en L et de la stabilité au tamis). Ensuite, on réalise divers essais concernant les propriétés mécaniques.

2- Formulation des bétons autoplaçants

La méthode de formulation utilisée pour concevoir les compositions de BAP testées dans cette étude expérimentale est la méthode japonaise [01] (Japan Society of Civil Engineers) et [02] :

- Le volume de la pâte de ciment [03] et les volumes granulaires, mélange sec pour 1m³ de béton selon :

$$V_{\text{pâte}} + V_{\text{granulats}} = 1000 \text{ litres}$$

$$V_{\text{pâte}} = V_{\text{ciment}} + V_{\text{Fine}} + V_{\text{Adjuvant}} + V_{\text{Eau}}$$

$$V_{\text{granulats}} = V_{\text{sable}} + V_{\text{G3/8}} + V_{\text{G8/15}}$$

- Volume des gravillons est limité en prenant le rapport G/S égale à 1.
- Volume de la pâte varie entre : 330 à 400 l/m³ (C+F).
- La masse du ciment : Mc=300 à 450 kg/m³.
- MF=10% de la masse du ciment.

Le dosage en super-plastifiant est proche de son dosage à saturation [03].

Les différentes formulations pour 1m³ de béton sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1: Les compositions des bétons autoplaçant

Volume de la pâte (%)	N° de formulation	Ciment (kg)	filler (pouzzolane) (kg)	sable (kg)	Gravier 3/8 (kg)	gravier 8/15 (kg)	eau (litre)	Super Plastifiant (litre)	E/C	G/S
33%	BAP 1	367	37	891	227	678	202	6,05	0,5	1
	BAP 2	367	37	891	452	452	202	6,05	0,5	1
	BAP 3	367	37	891	678	227	202	6,05	0,5	1
35%	BAP 4	389	39	865	219	658	214	6,43	0,5	1
	BAP 5	389	39	865	439	439	214	6,43	0,5	1
	BAP 6	389	39	865	658	219	214	6,43	0,5	1
38%	BAP 7	424	42	825	209	628	232	6,99	0,5	1
	BAP 8	424	42	825	419	419	232	6,99	0,5	1
	BAP 9	424	42	825	628	209	232	6,99	0,5	1
40%	BAP 10	444	44	798	203	608	245	7,32	0,5	1
	BAP 11	444	44	798	405	405	245	7,32	0,5	1
	BAP 12	444	44	798	608	203	245	7,32	0,5	1

3- Formulation des bétons témoins

La formulation de la composition des bétons témoins a été faite d'après la méthode « DREUX GORISSE » basée sur l'analyse granulométrique (sable et différentes fractions de gravier), on a gardé le même dosage en ciment pour chaque volume de pâte et on tire les proportions granulaires.

Le tableau suivant résume les différentes compositions des bétons témoins :

Tableau 2: Les compositions des bétons témoin.

Volume de la pâte (%)	N° de formulation	Ciment (kg)	sable (kg)	Gravier 3/8 (kg)	gravier 8/15 (kg)	eau (litre)	E/C
BT 33%	13	367	519	321	1037	183	0,5
BT 35%	14	389	516	319	1031	194	0,5
BT 38%	15	424	505	313	1010	212	0,5
BT 40%	16	444	503	311	1002	222	0,5

D'après les deux tableaux, on peut constater que notre plan expérimental se compose de 16 gâchées dont 12 conçues par la méthode Japonaise et 4 bétons de références conçues par la méthode granulaire de DREUX-GORISSE. On a proposé pour les différents bétons deux variations. La première est celle du volume de la pâte de ciment (C+F+E+A) de 33%, 35%, 38% et 40%. Quant à la deuxième, on a varié les proportions granulaire des agrégats 3/8 et 8/15 suivant l'ordre suivant : (25%-75%), (50%-50%) et (75%-25%).

Ce qui nous amène à confectionner 96 éprouvettes dont 48 prismatiques (7x7x28) et 48 cylindriques (16x32).

4- Résultats et analyse des essais rhéologiques des bétons frais

Les différents résultats effectués sur béton frais sont regroupés dans le tableau suivant [04]:

Tableau 3: Résultat d'essai sur béton frais

4.1- Résultats et analyse d'essai d'étalement

Tableau 3: Résultat d'essai sur béton frais

Volume de la pâte	N° de formulation	Ciment (kg)	Filler (pouzzolane) (kg)	E/C+F	G/S	Etalement (cm)	Taux de remplissage (%)	Stabilité aux tamis (%)
33%	BAP 1	367	37	0.5	1	42	0	4
	BAP 2	367	37	0.5	1	38	0	4
	BAP 3	367	37	0.5	1	38	0	5
	BAP 4	389	39	0.5	1	58	52	8
35%	BAP 5	389	39	0.5	1	57	50	11
	BAP 6	389	39	0.5	1	62	55	12
	BAP 7	424	42	0.5	1	81	93	21
38%	BAP 8	424	42	0.5	1	79	90	17
	BAP 9	424	42	0.5	1	83	88	19
	BAP 10	444	44	0.5	1	89	100	29
40%	BAP 11	444	44	0.5	1	90	100	28
	BAP 12	444	44	0.5	1	91	100	31

L'essai d'étalement [04] et [05] est le plus utilisé pour mesurer la capacité du matériau à s'écouler en milieu non confiné des bétons autoplaçants.

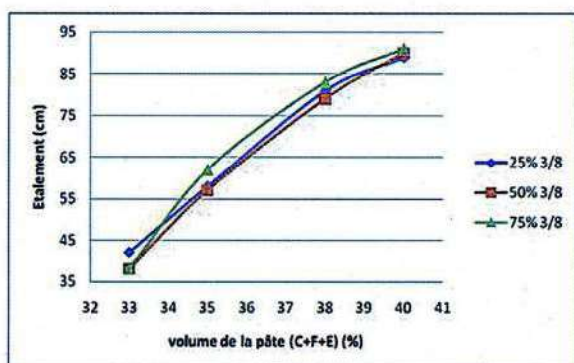


Figure 1: Variation de l'étalement en fonction du volume de la pâte

D'après les résultats du tableau 3 et la figure 1, on remarque qu'en augmentant le volume de la pâte du ciment (C+F+E+A) l'étalement croît presque linéairement jusqu'à une valeur de 91 cm pour le cas 40% et ce quelque soit la

granularité du squelette granulaire des bétons testés. On peut préliminairement justifier ce comportement par la fluidification du béton lorsque le volume de la pâte augmente et non pas par l'effet d'adjuvant car dans notre cas on a fixé ce dernier à 1%. Toutefois, on remarque que seulement deux volumes de pâtes vérifient la condition d'étalement pour avoir un béton autoplaçant qui sont : 35% et 38%.

En effet le volume 33% a donné un béton rhéologiquement ordinaire (ferme) et celui de 40% trop fluide, sujet à ségrégation.

4.2- Résultats et analyse du taux de remplissage

L'essai du taux de remplissage par la boîte en L [04] est utilisé pour mesurer la capacité du matériau à s'écouler en milieu confiné des bétons autoplaçants.

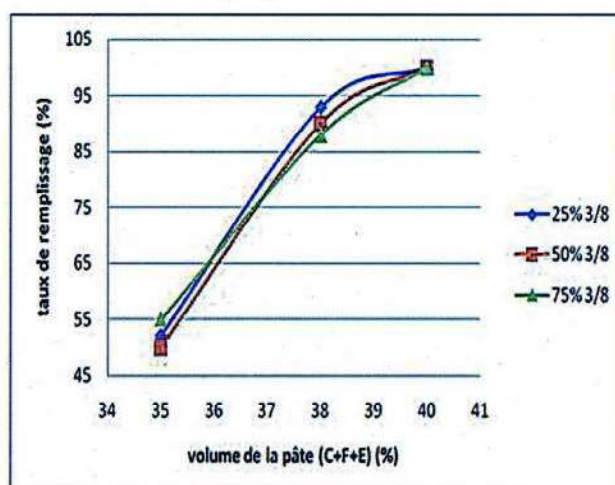


Figure 2: Variation du taux de remplissage en fonction du volume de la pâte.

D'après les résultats du tableau 3 et la figure 2, on remarque qu'en augmentant le

volume de la pâte du ciment (C+F+E+A) le taux de remplissage croît jusqu'à une valeur de 90% puis se stabilise à 100% pour le cas 40% et ce quelque soit la granularité du squelette granulaire des bétons testés. On peut préliminairement justifier ce comportement par la fluidification du béton lorsque le volume de la pâte augment et non pas par l'effet d'adjuvant car dans notre cas on a fixé ce dernier à 1%. Toutefois, on remarque que seulement deux volumes de pâtes vérifient la condition du taux de remplissage pour avoir un béton autoplaçant qui sont : 38% et 40%.

En effet le volume 33% n'a pas donné de taux de remplissage ($H_2=0$) et celui de 35% était inférieur à la valeur minimale (80%).

4.3. Résultats et analyse de la stabilité au tamis

L'essai de la stabilité au tamis [04] est utilisé pour mesurer la capacité du matériau à résister à la ségrégation dynamique des bétons autoplaçants.

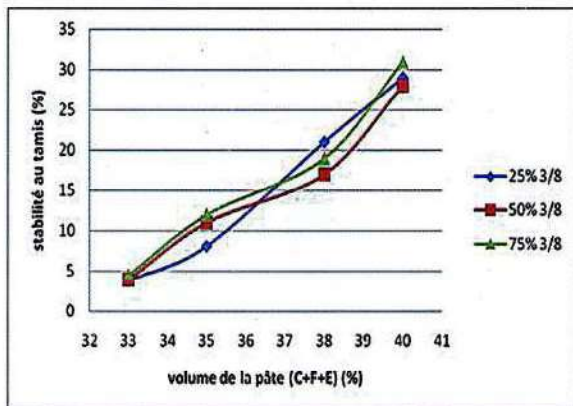


Figure 3: Variation de la stabilité au tamis en fonction du volume de la pâte.

On remarque qu'en augmentant le volume de la pâte du ciment (C+F+E+A) la stabilité croît jusqu'à une valeur avoisinant 30% et ce quelque soit la granularité du squelette granulaire des bétons testés. On peut justifier ce comportement par la fluidification du béton lorsque le volume de la pâte augment et non pas par l'effet d'adjuvant car dans notre cas on a fixé ce dernier à 1%. On remarque que tous les volumes de pâtes vérifient la condition de la stabilité.

Conclusion : On peut conclure à partir des trois essais effectués sur le béton frais que le meilleur autoplaçant est celui dont le volume de la pâte de ciment est de 38% qui vérifie toutes les conditions pour avoir un BAP c'est-à-dire BAP 7, BAP 8, BAP 9.

4.4. Effet de la granularité sur le béton à 38% de volume de la pâte

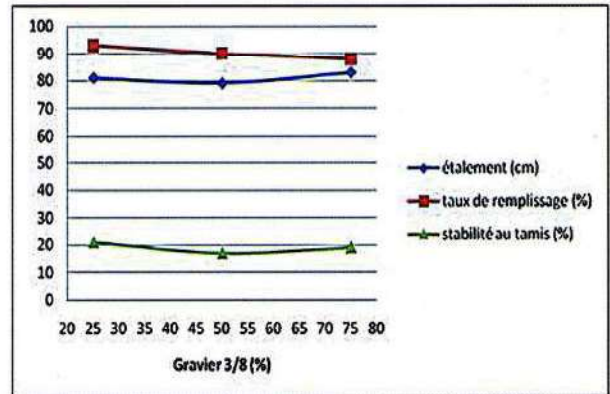


Figure 4: Effet de la granularité sur le béton à 38% de volume de la pâte.

D'après la figure ci-dessus, on remarque que pour l'étalement et la stabilité au tamis, en augmentant la proportion du gravier 3/8 ces derniers diminuent jusqu'à la proportion 50% puis augmentent. Quant au taux de remplissage, en augmentant la proportion, ce dernier diminue. Enfin, la proportion granulaire qui donne les meilleures caractéristiques rhéologiques est celle de 50% de 3/8 et 50% de 8/15.

5. Etude mécanique du béton à l'état durci

5.1. Résultats et analyse d'essai d'écrasement

L'essai d'écrasement est le plus utilisé pour mesurer la résistance du matériau à la compression et à la traction par flexion en milieu non confiné des bétons autoplaçants. Les résultats obtenus de cet essai sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Résultats de la résistance à la compression et traction par flexion

volume de la pâte (%)	N° de la formulation	Résistance à la Compression (MPa)	Résistance à la traction par flexion (MPa)
33 %	BAP 01	27,80	2,52
	BAP 02	29,90	2,85
	BAP 03	30,79	2,91
35 %	BAP 04	28,68	2,86
	BAP 05	31,12	2,96
	BAP 06	30,89	2,98
38 %	BAP 07	30,66	2,95
	BAP 08	33,81	3,28
	BAP 09	33,62	3,18
40 %	BAP 10	31,94	3,07
	BAP 11	33,54	3,35
	BAP 12	34,02	3,28
33 %	BT 01	30,69	2,81
35 %	BT 02	30,85	2,98
38 %	BT 03	33,29	3,03
40 %	BT 04	33,44	3,24

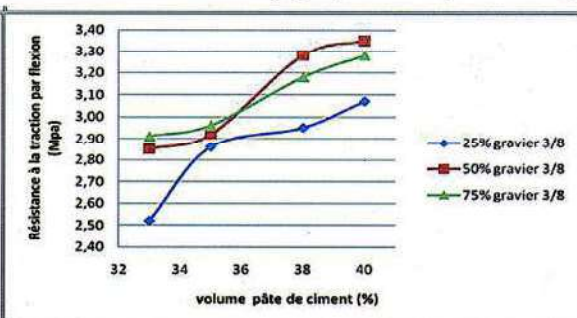
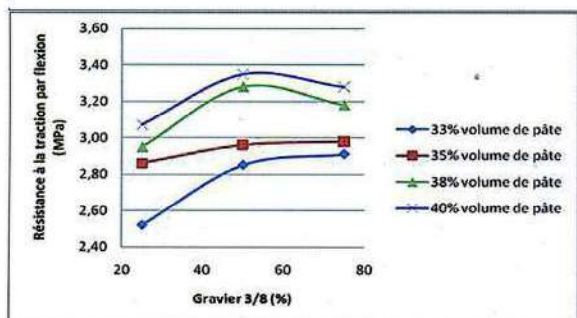
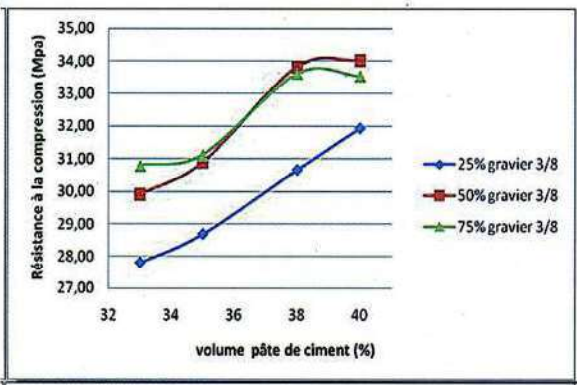
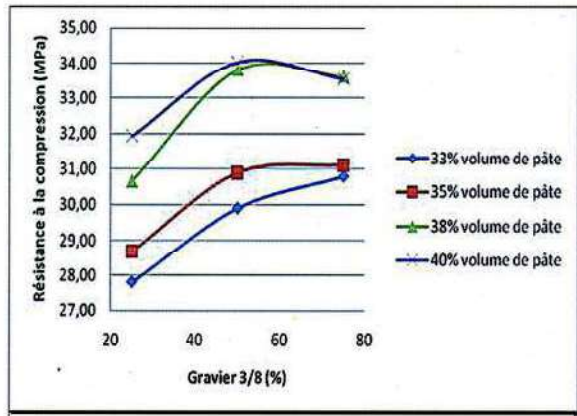


Figure 5: Variation de la résistance mécanique en fonction des proportions granulaires et du volume de la pâte de ciment.

D'après les résultats du tableau 4 et la figure 5, on remarque qu'en augmentant le volume de la pâte du ciment (C+F+E+A) la résistance à la compression augmente. Toutefois, on remarque que le pourcentage en gravier 3/8 a aussi une influence sur la résistance du béton. En effet, pour 25% de 3/8

l'augmentation de la résistance croît presque linéairement, quant à 50% et 75% de 3/8 ils croissent jusqu'à un optimum de résistance puis décroissent. On peut préliminairement justifier l'augmentation de la résistance par l'effet du volume de la pâte de ciment qui est dû à l'optimisation de l'hydratation du ciment. Pour le cas de l'effet de la granularité, on peut le justifier par l'optimisation du squelette granulaire (remplissage optimal des vides) [06] et [07].

Les mêmes observations et justifications sont valables pour la résistance à la traction par flexion.

5.2. Effet de la granularité sur la résistance à la compression et traction pour chaque volume de la pâte de ciment

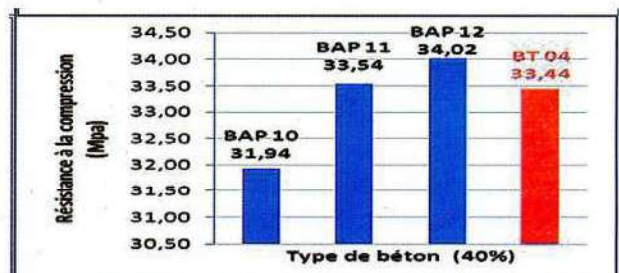
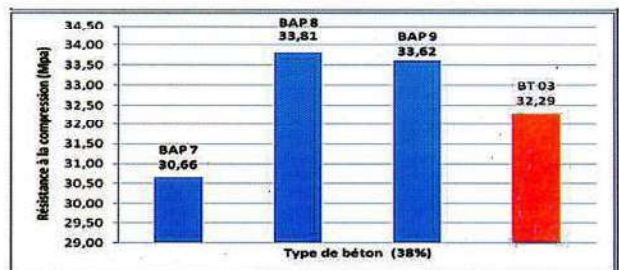
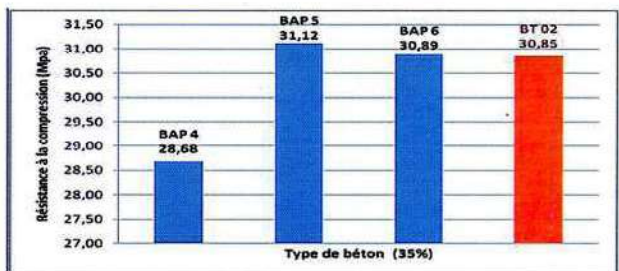
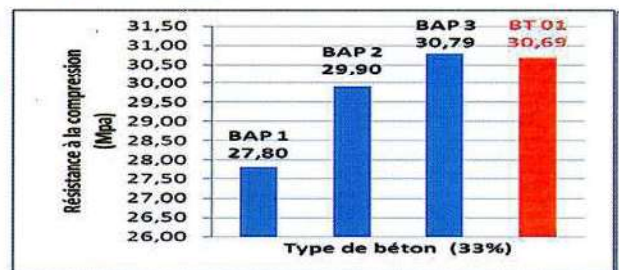


Figure 6: Résultats des essais à la compression pour différents volumes de pâte de ciment et proportions granulaires

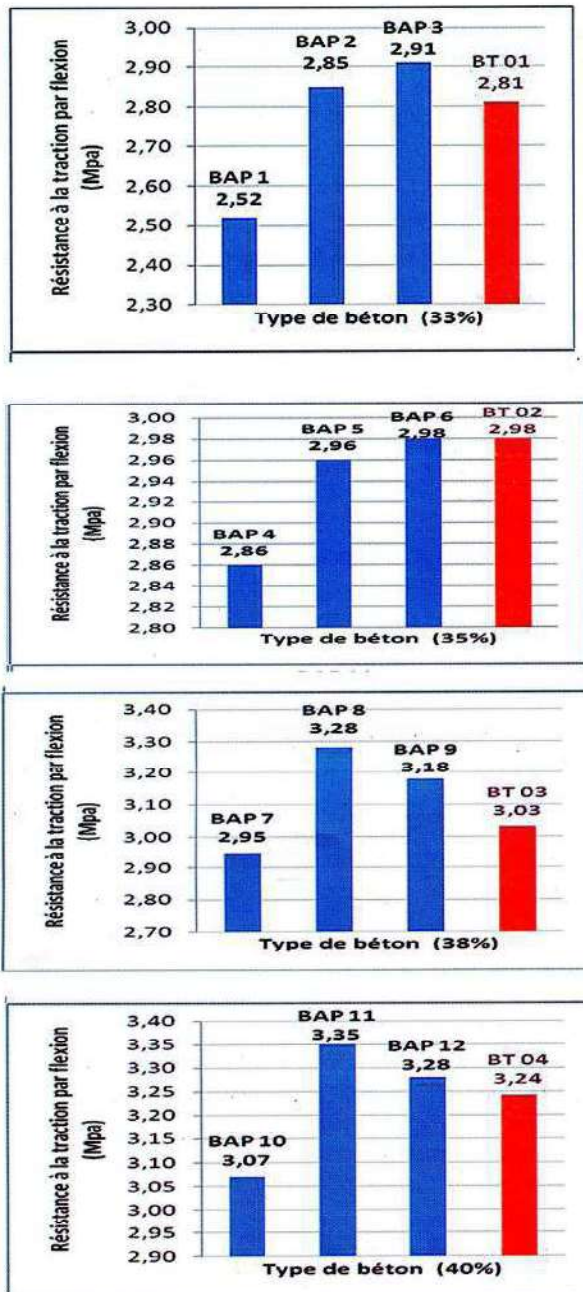


Figure 7: Résultats des essais à la traction par flexion pour différents volumes de pâte de ciment et proportions granulaires.

Des huit graphes, on peut remarquer que BAP1, BAP4, BAP7 et BAP10 donnent des résistances mécaniques inférieures à celles des bétons témoins BT1, BT2, BT3 et BT4. Cela est dû à l'insuffisance du remplissage des vides du squelette granulaire. Par contre, pour les autres BAP on a remarqué qu'ils ont donné tous des résistances supérieures à celles des bétons témoins. En effet, l'augmentation de la proportion 3/8 a optimisé la compacité du mélange [06] et [07].

5.3. Le gain de résistance

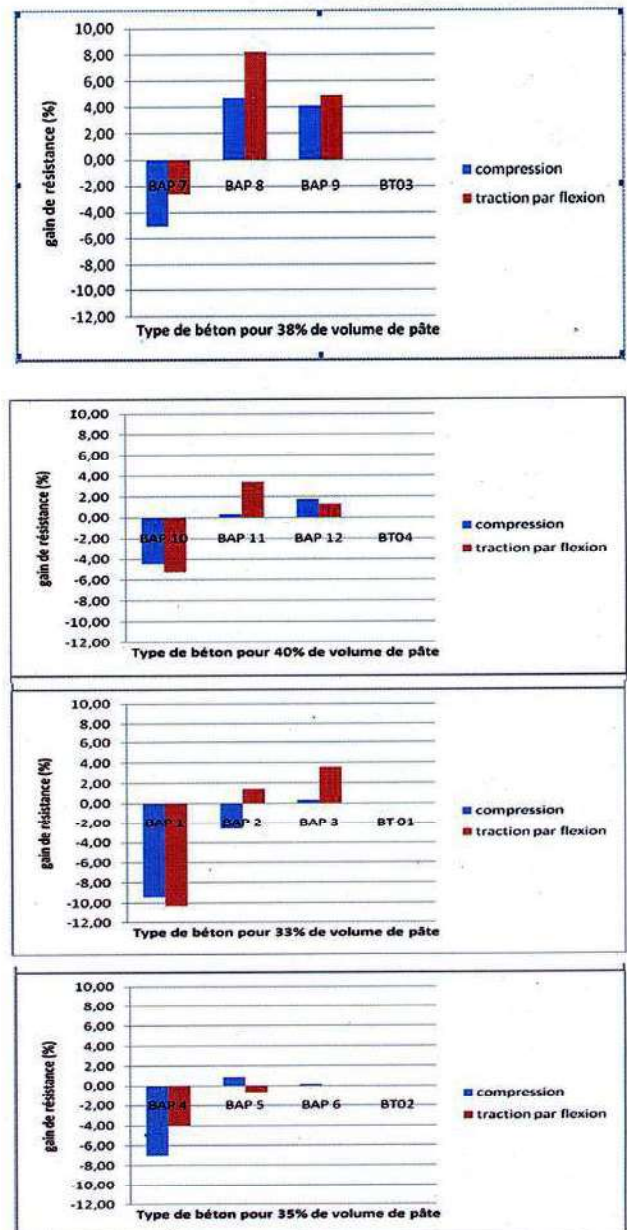


Figure 8: Gain de résistance en fonction des types de béton.

Des quatre graphes, on peut tirer la meilleure formulation de béton qui est celle dont le volume de la pâte est de l'ordre de 38% et une proportion granulaire de 50% de 3/8 et 50% de 8/15, c'est-à-dire BAP 8 dont le gain de résistance a atteint 4,71% à la compression et 8,25% à la traction par flexion.

6. Conclusion

Après la réalisation des essais sur la caractérisation des bétons autoplaçants à l'état frais (essai d'étalement, essai boîte en L, essai à la stabilité au tamis) préconisé par L'AFGC,

pour les différentes séries nous avons abouti aux conclusions suivantes :

- Les compositions des bétons réalisés dans le but d'avoir des bétons autoplaçants n'ont pas satisfait entièrement les critères du BAP.
- La composition BAP08 avec 50% de 3/8 et 50% de 8/15 a satisfait les trois critères rhéologiques d'un BAP. Pour les essais mécaniques sur les bétons autoplaçant à l'état durci, nous avons abouti aux conclusions suivantes :
- Résistance à la compression et traction par flexion:
- Les BAP confectionnés, comparés avec les bétons de références, ont donné des résultats intéressants. On a remarqué que les bétons dont le pourcentage de la proportion du 3/8 est faible donne une résistance faible par rapport au béton témoin. Mais plus cette proportion augmente, plus la résistance augmente dépassant la valeur du béton témoin.
- La série de BAP qui a donné le plus de satisfaction aux essais mécaniques sont ceux dont le volume de la pâte de ciment est de 38%.

Le BAP qui a donné le plus grand gain de résistance est celui du BAP 08.

Référence :

[01] Japan Society of Civil Engineers (JSCE) : «Recommendation for practical application of self-compacting concrete », 1998.

[02] Association Française de Génie Civil (AFGC), «Béton Auto-Plaçants », Recommandations provisoires, Annales du bâtiment et des travaux publics, juin 2000.

[03] Baron J., Olivier J.P et. Weiss J.C. : « Les bétons: bases et données pour leur formulation », sous la direction de Jacques BARON, Jean-Pierre OLIVIER, Ed Eyrolles, 1996.

[04] SEDRAN T ; « Rhéologie et rhéomètre des bétons. Application aux BAP », thèse de doctorat de l'ENPC, 1999.

[05] HAJIME OKAMURA (Professor, Kochi University of Technology, Japan) and MASAHIRO OUCHI (Associate Professor, Kochi University of Technology, Japan), "Self-Compacting Concrete", Received 14 November 2002, accepted 30 March 2003, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 1, No. 1, pp 5-15, / Copyright © 2003 Japan Concrete Institute. E-mail: ouchi.masahiro@kochi-tech.ac.jp, April 2003

[06] DE LARRARD, « Structures granulaires et formulation des bétons », Etudes et Recherches des laboratoires des ponts et chaussées, OA 34.

[07] PROUST E., « Retraits et fluages des bétons autoplaçants : vers une meilleure compréhension des comportements différés », thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 2002.