

VALORISATION DE LA POUDRE DE MARBRE COMME ADDITIF DANS LA FORMULATION DE BETONS AUTOPLAÇANTS

CHAID Rabah¹, HADDADOU Naïma², HAMZA Malika Sabria¹, MESBAH Habib Abdelhak³

¹Unité de recherche Matériaux - Procédés et Environnement, UMBB, Algérie

²Département d'architecture, Université d'Alger, Algérie

³Laboratoire des Matériaux du Génie Civil et Génie Mécanique, IUT-Rennes, France

Auteur correspondant : CHAID Rabah ; r.chaid@univ-boumerdes.dz

RESUME

L'industrie cimentaire est une activité génératrice de gaz à effet de serre puisque de l'ordre d'une tonne de dioxyde de carbone (CO₂) est émise dans l'atmosphère par tonne de ciment produit. De nombreux produits minéraux peuvent être ajoutés aux bétons pour modifier leurs caractéristiques techniques en vue d'applications particulières et/ou pour améliorer le bilan environnemental de leur cycle de vie. Cet article rapporte l'étude de l'influence de l'addition des déchets de marbre sur les propriétés du béton autoplaçant (BAP). Plusieurs taux d'addition ont été testés. Des bétons ont été préparés avec un rapport Eau/Liant (E/L) de 0,33 et un dosage en ciment Portland égal de 400kg/m³. Utilisé seul comme composition de référence (blanc), ou avec des ajouts de poudre de marbre à des dosages de 15, 20 et 30% par rapport à la masse du ciment. Les propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais et durcis ont été testées à l'aide d'essais spécifiques, en faisant varier la finesse de la poudre de marbre à 3000, 7000 et 9000 cm²/g et la teneur en superplastifiant à 1,5% et 1,75%. Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de la poudre de marbre améliore les propriétés des bétons autoplaçants et concordent avec les recommandations de l'Association Française de Génie Civil (AFGC).

MOTS-CLES : BAP, Ajout, Marbre, Valorisation, Ecologie.

ABSTRACT

The cement industry is a greenhouse gas-generating activity since approximately one ton of carbon dioxide (CO₂) is emitted into the atmosphere per ton of cement produced. Many mineral products can be added to concrete to modify their technical characteristics for particular applications and/or to improve the environmental balance of their life cycle. This article reports the study of the influence of the addition of waste marble on the properties of self-consolidating concrete (SCC). Several addition rates were tested. Concrete were prepared with a Water/Binder (W/L) ratio of 0.33 and an equal Portland cement dosage of 400kg/m³. Used alone as a reference composition (white), or with additions of marble powder at dosages of 15, 20 and 30% relative to the mass of the cement. The properties of the self-compacting concrete in the fresh and hardened state were tested using specific tests, by varying the fineness of the marble powder at 3000, 7000 and 9000 cm²/g and the Superplasticizer content at 1.5% and 1.75%. The results obtained show that the use of marble powder improves the properties of self-consolidating concrete and is consistent with the recommendations of the French Association of Civil Engineering (AFGC).

KEYWORDS: SCC, Addition, Marble, Valorization, Ecology

1. INTRODUCTION

De nombreuses innovations techniques ont été réalisées pour répondre aux demandes d'applications particulières des bétons ou pour faciliter leur usage. Ainsi avec les bétons autoplaçants (BAP), c'est l'aptitude des bétons à être aisément mis en œuvre sans recourir à des applications de vibrations qui est recherchée. Les objectifs sont de réduire les délais de mise en œuvre, les besoins matériels, de faciliter la mise en œuvre pour moins de pénibilité du travail correspondant, d'accroître la qualité de bétonnage (Noor *et al.*, 1999). En Algérie, ce type de béton présente un intérêt supplémentaire lié à la densité du ferrailage imposée par le règlement parasismique notamment dans les zones à forte sismicité.

Les bétons autoplaçants (BAP) se distinguent des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons à vibrer, par leurs propriétés à l'état frais (AFGC, 2008 ; Sedran *et al.*, 2000). Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique).

Ces propriétés résultent de formulations spécifiques. L'hyper fluidité des BAP peut être obtenue grâce à une dernière génération d'adjuvants « super plastifiant haut réducteur d'eau ». Des agents de viscosité peuvent parfois être nécessaires pour maîtriser la ségrégation.

Cet article porte sur l'étude expérimentale de l'influence de l'ajout de poudre de marbre à différentes Surfaces Spécifiques Blaine (SSB), 3000, 7000 et 9000 cm^2/g sur les propriétés des BAP. La poudre de marbre utilisée est un déchet de l'industrie du marbre. Son utilisation permet de réduire la pression sur les ressources naturelles. Actuellement, la poudre de marbre est l'une des additions minérales les plus utilisées dans la production du béton dans le monde, notamment en Turquie (Kürşat *et Alp*, 2015). Ce pays possède 700 carrières de marbre, 250 types de marbre et des réserves qui représentent 40% des réserves mondiales (Saetta *et al.*, 2004 ; Chan *et al.*, 2000). Peu de travaux traitant de l'effet de l'incorporation de poudre de marbre (PM) dans les bétons ont été publiés. Topçu *et al.* (Topçu *et al.*, 2009) ont montré qu'une teneur en PM de 200 kg/m^3 est appropriée pour améliorer les propriétés des BAP à l'état frais et durci. Guneyisi *et al.*, (2009) ont montré que l'introduction de PM dans les mortiers autoplaçants par substitution partielle du ciment conduit à l'augmentation du temps d'écoulement et des temps de début et de fin de prise, tandis qu'elle diminue la résistance à la compression et la vitesse de propagation d'ondes. Ergun (2011) a rapporté que le

remplacement de 5% du ciment par de la PM améliore la résistance à la compression des bétons conventionnels en raison de sa grande finesse (5960 cm^2/g). Aruntas *et al.*, (2010) ont rapporté que l'incorporation de déchets de marbre à un taux de 10% réduirait le coût de production du ciment. Les travaux réalisés dans la présente étude avaient pour but de déterminer l'influence d'apports de poudre de marbre de différentes finesses à différents dosages, avec utilisation d'un superplastifiant. Certaines additions ont un effet négatif lorsqu'elles sont mélangées avec le ciment seul (mélange binaire), c'est le cas des fillers calcaires qui diminuent les résistances à la compression à long terme. Pour atténuer ce défaut, il est possible d'utiliser des mélanges ternaires, voire quaternaire (ciment Portland plus plusieurs ajouts) (Boukhelkhal, 2012).

2. MATERIEL ET METHODE

2.1. Ciment Portland

Le ciment Portland utilisé est un CEM II/A - 42,5, provenant de la cimenterie de M'Sila du groupe LAFARGE-Algérie, dont les compositions chimique et minéralogique sont reportées sur le tableau 1. Sa SSB est de 3995 cm^2/g .

Tableau 1. Composition en % pondéraux du ciment Portland CEM II 42,5 utilisé (* PAF : perte au feu)

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ca O	MgO	SO ₃
%	16,80	4,46	2,94	58,83	1,68	2,35
Oxydes	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	P.A.F	Total
%	0,60	0,03	0,15	0,22	11,74	100
Minéraux	C ₂ S	C ₃ S	C ₃ A	C ₄ AF		
%	20	62	7	11		

2.2. Poudre de marbre

Le marbre utilisé, commercialisé par l'entreprise nationale de marbre «ENA marbre», est issu de la carrière de Fil-Fila située à 25 km à l'est du centre-ville de Skikda. La roche est extraite par abattage de moellons de 80 à 100 cm de plus grande dimension, qui sont concassés puis broyés.

Tableau 2. Composition de la poudre de marbre utilisée (% pondéraux)

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ca O	MgO	SO ₃
%	0,48	0,10	0,12	54,45	0,72	0,46
Oxydes	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	P.A.F	Total
%	0,01	0,01	0,02	0,01	45,53	100
Minéraux	Quartz (SiO ₂)	Calcite (CaCO ₃)	Dolomite (CaMg(CO ₃) ₂)			
%	1,5	95,5	3,0			

2.3 Superplastifiant

Le superplastifiant (SP) utilisé est un adjuvant haut réducteur d'eau commercialisé par l'entreprise GRANITEX sous le nom de MEDAFLOW 145.

2.4 Granulats

Un mélange de 70,27% en poids de sable siliceux grossier (SR) de Baghlia et de 29,73% en poids d'un sable fin calcaire (SD) de Boussaâda a été utilisé comme granulats pour la confection des mortiers. Pour éviter tout risque de blocage du béton en milieu confiné, la taille maximale des gravillons est limitée à 15 mm. Les gravillons utilisés à cet effet, provenant de Sétif, sont composés de deux fractions 3/8 et 8/15.

2.5 Formulations des BAP

Afin de tester l'influence des différents paramètres étudiés, une série de 18 formulations notées BAPT 1 à 18 a été préparée. Une gâchée de 300 L a été préparée pour chaque formulation. Un témoin (BAPT) a été préparé par la même manière mais sans apport de poudre de marbre ni de plastifiant. Ces dernières présentent un rapport E/C constant et un rapport E/L variable où le total des fines (ciment y compris) est de 460, 480 et 520 kg/m³. La poudre de marbre a été utilisée à 3 finesses (SSB) : 3000, 7000 et 9000 cm²/g. Le superplastifiant a été utilisé à 1,5 ou 1,75% de la masse du ciment. Les compositions des bétons avec et sans poudre de marbre arrêtées pour le programme expérimental sont reportées dans le tableau 3.

TABLEAU 3. Formulations retenues des BAP

	PM	SSB	SP	Eau	SR	SD	G3/8	G8/15
	kg	cm ² /g	L	L	kg	kg	kg	kg
BAPT	/	/	6	132	680	194	449	414
BAP1	60	3000	6	152	658	188	434	401
BAP2	60	7000	6	152	658	188	434	401
BAP 3	60	9000	6	152	658	188	434	401
BAP 4	60	3000	7	152	658	188	434	401
BAP 5	60	7000	7	152	658	188	434	401
BAP 6	60	9000	7	152	658	188	434	401
BAP 7	80	3000	6	158,4	651	186	429	396
BAP 8	80	7000	6	158,4	651	186	429	396
BAP 9	80	9000	6	158,4	651	186	429	396
BAP 10	80	3000	7	158,4	651	186	429	396
BAP 11	80	7000	7	158,4	651	186	429	396
BAP 12	80	9000	7	158,4	651	186	429	396
BAP 13	120	3000	6	172	636	182	420	387
BAP 14	120	7000	6	172	636	182	420	387
BAP 15	120	9000	6	172	636	182	420	387
BAP 16	120	3000	7	172	636	182	420	387
BAP 17	120	7000	7	172	636	182	420	387
BAP 18	120	9000	7	172	636	182	420	387

PM : poudre de marbre ; SSB : Surface Spécifique Blaine ; SP : superplastifiant ; SR : sable de rivière ; SD : sable de dunes ; G_{3/8} : graviers 3/8 ; G_{8/15} : graviers 8/15)

3. RESULTATS

Les propriétés des BAP obtenus avec chaque formulation ont été déterminées à l'état frais et après 3, 7, 28, 56 et 90 jours de prise hydraulique. Seuls les résultats des essais mécaniques effectués à 56 jours sont présentés ici. Le tableau 4, présente les différentes propriétés du béton témoin.

Tableau 4. Propriétés rhéologiques et mécaniques du béton témoin.

Masse volumique (kg/m ³)	2305
Etalement (mm)	610
Stabilité au tamis (%)	12,32
Boîte en L	0,76
Résistance à la traction(MPa)	4,88
Résistance à la compression (MPa)	41
Vitesse de propagation d'onde (m/s)	4298

3.1. Bétons à l'état frais

Tous les bétons étudiés avec poudre de marbre ont présenté des étalements supérieurs à 60 cm, une stabilité au tamis inférieure à 15% et des rapports à la boîte en L supérieurs à 0,8. Ce qui permet de conclure que l'ensemble de ces bétons présente une fluidité acceptable, ne présente pas de risque de blocage et respecte les recommandations de l'AFGC.

3.1.1. Masses volumiques

La figure 1 montre que la masse volumique des bétons frais augmente avec le dosage et la finesse de la poudre de marbre et avec le dosage en superplastifiant. La poudre de marbre agit donc comme un filler qui par sa finesse s'insère entre les grains fins de sable, de gravier et du ciment. Il en résulte une meilleure compacité et donc une augmentation de la masse volumique (Diederich, 2010).

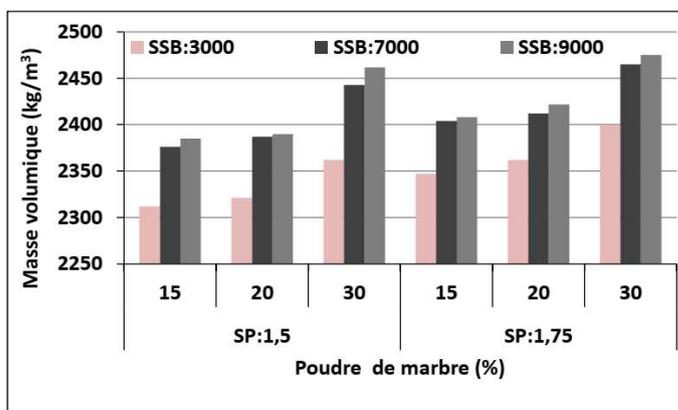


Figure 1. Effet du dosage et de la finesse de la poudre de marbre sur la masse volumique des BAP frais

On note un accroissement de la masse volumique au fur et à mesure de l'augmentation du taux d'apport de poudre de marbre, sa finesse ainsi que le taux de superplastifiant. Cet accroissement peut être expliqué par l'effet de l'arrangement des micros grains remplissent le milieu poreux en augmentant la fermeté du béton. Le superplastifiant assure une meilleure mobilité.

3.1.2. Étalement

La figure 2 montre que l'ensemble des formulations testées donnent des bétons autoplaçants qui respectent le critère d'étalement (550 à 850 mm). L'étalement spécifié est respectivement compris entre 633 mm (BAP 13) et 703 mm (BAP 4). L'étalement augmente avec le taux de superplastifiant et en tenant compte de l'effet des fines qui s'insèrent dans les vides et libèrent l'eau emprisonnée, la conjugaison de ces deux facteurs améliore l'ouvrabilité de la matrice.

Pour toutes les compositions de BAP, l'auréole de laitance à la périphérie des galettes de béton était absente ou très faible (de 0,5 à 1 mm) suite à la bonne répartition des granulats et l'hydratation du ciment au jeune âge. De plus, les gros granulats ont toujours été entraînés correctement par la matrice cimentaire et ne sont pas restés amoncelés au milieu des galettes de béton (Hermida, 2008).

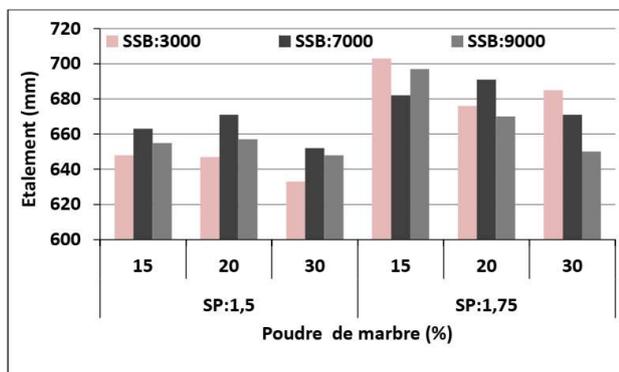


Figure 2. Mesures de l'étalement des BAP.

3.1.3. Résistance à la ségrégation statique et dynamique

Pour la ségrégation statique ou stabilité au tamis, les BAP présentent des taux de ségrégation inférieurs à 15%, synonyme d'une stabilité correcte. L'augmentation du taux d'ajout de poudre de marbre et de sa finesse atténue la stabilité au tamis, alors que le dosage en superplastifiant agit en sens inverse.

Pour la ségrégation dynamique caractérisée par l'essai L-Box, les résultats représentés sur la figure 4 sont conformes à ce que l'on peut attendre d'un béton autoplaçant.

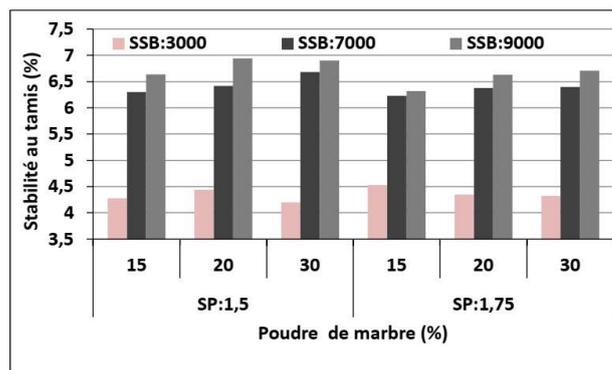


Figure 3. Ségrégation statique des BAP.

Cependant, le plus important dans cet essai est que le béton testé s'écoule à travers les armatures correctement (R'mili et al., 2007). Sur ce point, aucun problème n'est à signaler puisque tous les BAP présentent des taux de remplissage supérieurs à 0,80. Les BAP avec un superplastifiant élevé s'écoulent mieux que les BAP avec 1,5% de superplastifiant.

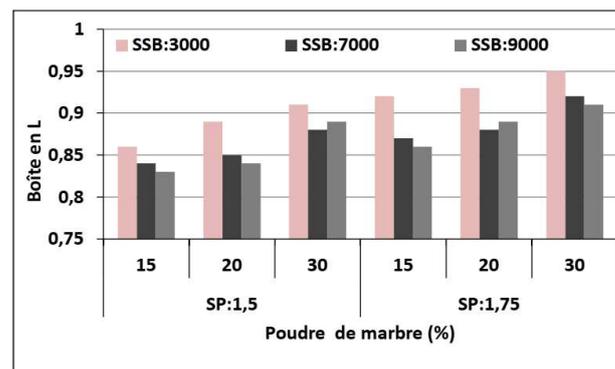


Figure 4. Ségrégation dynamique des BAP.

3.2 Bétons à l'état durci

3.2.1 Résistance à la flexion et à la compression

Les résultats illustrés à la Fig. 5 montrent une augmentation de la résistance à la flexion pour l'ensemble des compositions. Ces résultats s'expliquent par l'hydratation du C₃S en présence du CaCO₃ de la poudre de marbre ce qui produit des hydrates de carbo-silicate de calcium qui affectent de bonnes performances mécaniques. Selon J. Baron et J.P. Ollivier (Baron et Ollivier, 1996), il existe des forces de type chimique qui s'ajoutent à celles de Van der Waals pour assurer la cohésion entre la pâte de ciment et les granulats calcaires. En ce qui concerne les pâtes avec ajout de poudre de marbre, les amas de CSH sont très denses ce qui induit une grande compacité (Chaid, 2015). L'évolution de la résistance à la traction par flexion est similaire à celle de la résistance à la compression comme on pouvait l'attendre, bien que cependant moins prononcée.

Cela peut s'expliquer par le broyage poussé malgré la faible réactivité de la poudre de marbre par rapport au ciment (Nor Atan et Awang, 2011).

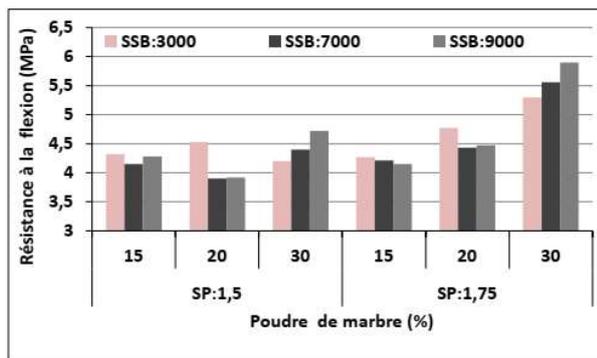


Figure 5. Résistance à la flexion des BAP.

Une amélioration de la résistance à la compression est constatée pour les formulations BAP 16, 17 et 18 (voir Tableau 3 et Fig. 6) des bétons autoplaçants par rapport aux bétons avec un taux faible en ajout.

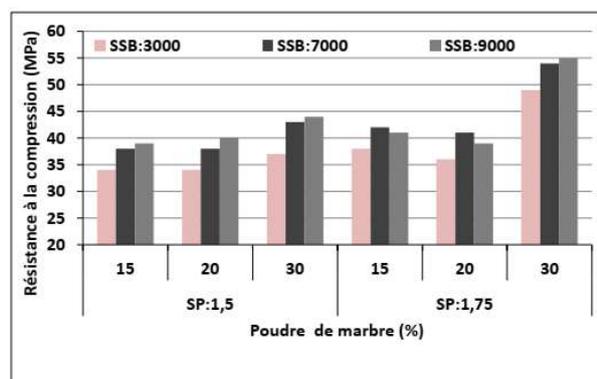


Figure 6. Résistance à la flexion des BAP.

Ceci laisse supposer que l'excédent d'eau efficace, qui n'a pas participé à l'hydratation du ciment et au mouillage des granulats, est absorbée par les fines de marbre ce qui se traduit par l'accroissement de la résistance mécanique [Tang *et al.*, 2016]. Concernant l'effet de la finesse et le % d'ajout on constate qu'ils ont un effet positif sur la résistance à la compression. Cette augmentation de la résistance est due à la compacité élevée des compositions à des SSB élevées. La composition optimale est 30% d'ajout avec une SSB de 9000 cm²/g et 1,75 % de superplastifiant.

Concernant l'effet de la finesse et le % d'ajout on constate qu'ils ont un effet positif sur la résistance à la compression. Cette augmentation de la résistance est due à la compacité élevée des compositions à des SSB élevées. La composition optimale est 30% d'ajout avec une SSB de 9000 cm²/g et 1,75 % de superplastifiant.

3.2.3 Vitesses de propagation du son à travers les éprouvettes de béton durci

Les valeurs de la vitesse de propagation d'ondes à travers les BAP comportant différents teneurs en PM, testés à 56 jours sont présentées sur la figure 7. D'après ces valeurs, on constate, une augmentation des vitesses de propagation d'ondes avec l'accroissement de la teneur en PM.

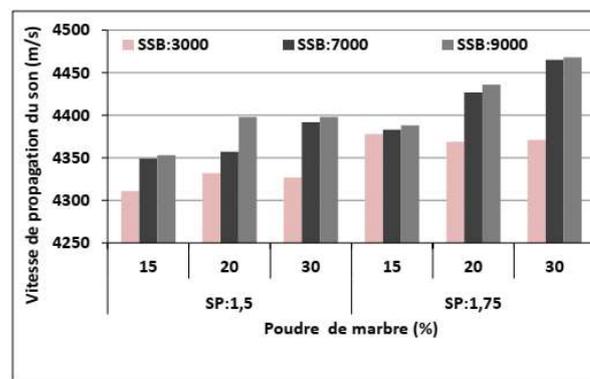


Figure 7. Vitesse de propagation du son à travers les BAP.

L'évolution des vitesses de propagation d'ondes présente un comportement tout à fait similaire à celui des résistances mécaniques (Garnier *et al.*, 2009). L'augmentation des vitesses de propagation d'ondes avec l'augmentation de la teneur en PM peut être expliquée par l'augmentation de la densité des mélanges.

3.3 Corrélation entre les résistances mécaniques

La plupart des formules empiriques reliant les résistances mécaniques des bétons traditionnels sont non linéaires. Selon Neville, 2008, cette relation prend la forme suivante :

$$f_t = a(f_c)^b \quad (1)$$

où :

- f_t : résistance à la traction en MPa ;
- f_c : résistance à la compression en MPa ;
- a et b : constantes.

La figure 8 montre une corrélation entre les résistances à la compression et à la traction, On constate une augmentation quasi linéaire de la résistance à la traction en fonction de la résistance à la compression. En comparant notre modèle à ceux proposés par d'autres normes pour les bétons ordinaires :

- BS 8007/87 : f_t = 0,12f_c^{0,7}
- ACI 318/99 : f_t = 0,5f_c^{0,5}
- BAEL 1999 : f_t = 0,6+0,06f_c

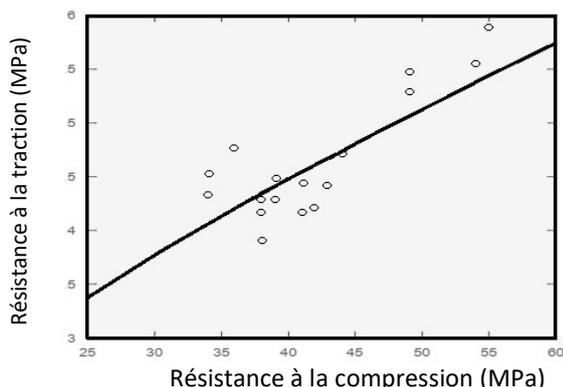


Figure 8. Corrélation entre les résistances mécaniques

On constate qu’au même niveau de résistance à la compression, toutes les résistances à la traction déterminées suivant les autres modèles sont inférieures à celles estimées par notre modèle :

$$f_t = 0,47 f_c^{0,61} \quad (2)$$

Ceci veut dire que les modèles reliant les résistances mécaniques des bétons traditionnels sous-estiment la résistance à la traction des BAP. Il est nécessaire donc de développer des modèles reliant les résistances mécaniques propres aux BAP [Caré *et al.*, 2000].

3.4. Rhéologie de la pâte cimentaire

Cette partie présente la caractérisation rhéologique à l’échelle du fluide porteur (c.-à-d. la pâte de ciment) dans le béton autoplaçant, afin d’évaluer le potentiel de la poudre de marbre.

Nous abordons aussi bien la recherche de la fluidité par des essais de caractérisation à l’étalement au mini cône, que la recherche de la stabilité du béton par des essais de caractérisation rhéologique.

Le tableau 4 montre que toutes les pâtes sont fluides (diamètre de galette > 25 cm), au-delà de 25% de poudre de marbre on remarque qu’il y a l’apparition de la laitance.

Tableau 5. Diamètres de la galette de la pâte de ciment avec ajout mesurés au mini-cône.

Compositions	Temps (min)			
	30	60	90	120
PM 05	28	28	28	27
PM 10	28	28	28	28
PM 15	29	29	29	29
PM 20	29	30	30	31
PM 25	30	31	30	30
PM 30	32	32	31	32

Les résultats des essais rhéologiques sont donnés par les rhéogrammes présentés dans les Figures 9 et 10.

Ces figures représentent les variations de la contrainte de cisaillement (τ) et la viscosité plastique (γ) pour les pâtes contenant du ciment, à différents dosages en poudre de marbre et 1,75% de superplastifiant (PCE). De la Figure 9 on constate que l’ajout de poudre de marbre (PM) n’a pas une influence sur la contrainte de cisaillement, ce qui explique que les particules de PM jouent le même rôle que celles du ciment.

La figure 10 montre que plus le pourcentage de la poudre de marbre augmente plus la viscosité de la pâte diminue ; cela peut être expliqué par l’effet dispersant de l’adjuvant qui s’adsorbe à l’interface des grains de l’ajout créant ainsi des forces répulsives entre les particules, réduisant ou éliminant l’adhésion entre les particules voisines (agglomération) ainsi qu’une réduction de la quantité d’eau consommée par les réactions d’hydratation.

D’un point de vue rhéologique, le béton autoplaçant recherché doit répondre à la meilleure fluidité mais encore à la meilleure stabilité vis-à-vis de la ségrégation. Pour limiter le risque de sédimentation des granulats les plus lourds à l’état statique et de ségrégation en écoulement dynamique, les pâtes de ciment doivent présenter un seuil d’écoulement et une viscosité suffisants. Plusieurs travaux de recherche ont montré la possibilité de corréler le seuil du béton à celui du fluide porteur, comme la pâte de ciment (Su *et al.*, 2003 ; Yen *et al.*, 1999).

Les rhéogrammes des pâtes cimentaires, montrent l’évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement (shear rate). D’après les résultats obtenus, toutes les pâtes ont un comportement identique à celui Herschel-Bulkley décrit par l’équation (3) :

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

τ_0 : contrainte seuil ;

K : consistance ;

n : indice d’écoulement.

Lorsque le béton se déforme, le mortier se déforme également sous l’effet du rapprochement des granulats. Il en résulte, selon De Larrard, que le seuil d’un béton est une fonction croissante du seuil du fluide porteur et qu’il dépend fortement des interactions entre inclusions granulaires (Petit, 2005 ; Ouchi *et al.*, 1999).

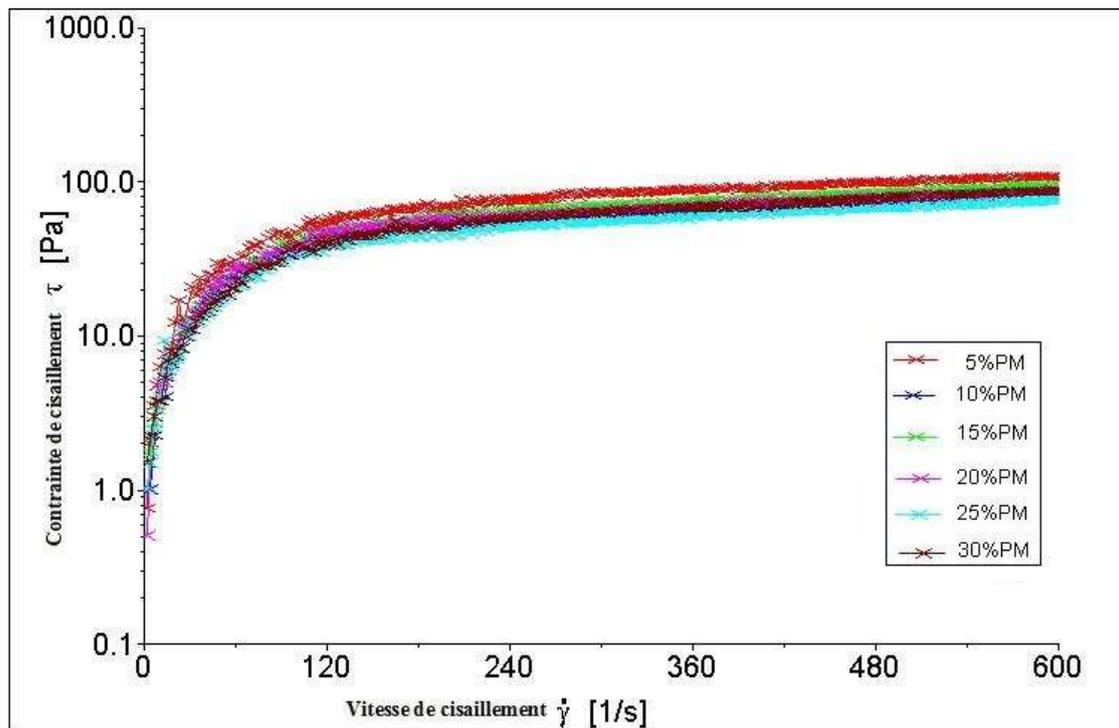


Figure 9. Contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement des pâtes cimentaires

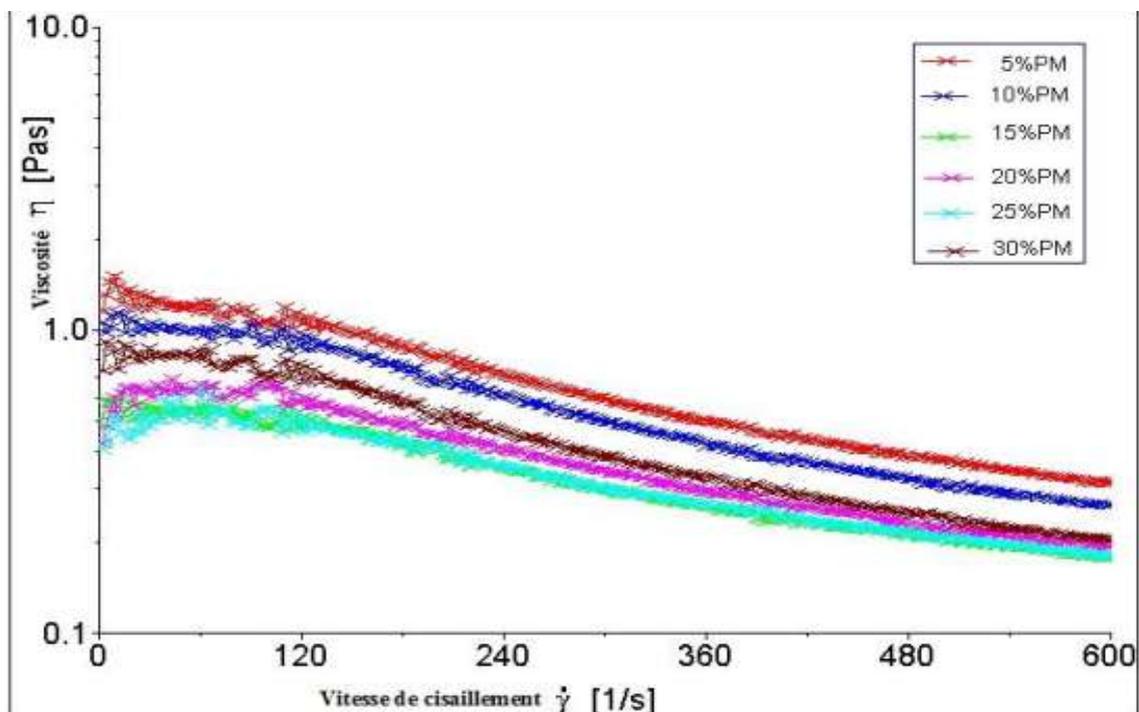


Figure 10. Viscosité plastique en fonction du taux de cisaillement avec différents pourcentages de poudre de marbre.

4. CONCLUSION

L'étude réalisée sur des bétons autoplacants additionnés de poudre de marbre (PM) de différentes finesses (3000, 7000 et 9000 cm²/g) à des dosages de 15, 20 et 30% par rapport à la masse du ciment et d'un superplastifiant SP utilisé à 1,5% et 1,75% a permis de montrer que la poudre de marbre peut substituer partiellement le calcaire. La formulation d'un béton autoplacant à base de poudre de marbre est envisageable à des dosages allant de 15 à 30% de poudre de marbre. Un dosage en superplastifiant de 1,5% diminue la mobilité du béton à travers le ferrailage et entraîne surtout une Surface Spécifique Blaine trop élevée. Par conséquent, un dosage en superplastifiant tel que $1,5\% < SP \leq 1,75\%$ conduit à des résultats satisfaisants en termes de mobilité du béton en milieu confiné et d'ouvrabilité. L'incorporation de poudre de marbre à un dosage de 30% par rapport à la masse de ciment permet d'améliorer les propriétés rhéologiques.

Les résultats obtenus sur les paramètres d'ouvrabilité que sont le diamètre d'étalement, L'écoulement dans la boîte en L et la stabilité au tamis ne permettent pas de dégager le dosage optimal des additions. Pour cela les paramètres de résistance mécanique en compression et en traction par flexion sont nécessaires. Les essais sur les résistances mécaniques ont permis d'apporter un argument supplémentaire suggérant plutôt un dosage de 30% de poudre de marbre.

L'étude a montré que la finesse (SSB = 7000 et 9000 cm²/g) des fillers poudre de marbre a peu d'effet sur la demande en superplastifiant et entraîne même de manière significative une augmentation jusqu'à 30% de la résistance à la compression particulièrement aux jeunes âges par comparaison à un béton autoplacant avec une finesse similaire à celle du ciment (SSB = 3000 cm²/g) avec le même rapport eau/liant. Sur le plan physico-mécanique, la poudre de marbre réagit par sa finesse, engendrant ainsi un squelette plus cohérent, une peau de béton relativement plus imperméable et par conséquent un béton plus résistant. Il paraît intéressant, d'insister sur le fait que l'influence de la finesse de la poudre de marbre est d'autant plus significative que l'on cherche à fabriquer des bétons plus performants. L'emploi de la poudre de marbre en ajout au BAP permet d'améliorer les résistances en compression et en traction par flexion. L'accroissement des résistances à court terme est surtout notable pour les BAP avec un ajout de PM de finesse élevée qui entraîne jusqu'à 15% et 8% d'accroissement de la résistance à la compression et à la flexion respectivement.

Finalement, ces bétons présentent des résistances acceptables et restent dans la gamme des bétons courants. Ces bonnes résistances des BAP sont liées au volume de pâte important, à l'utilisation d'adjuvant réducteur d'eau dont l'effet bénéfique sur la résistance mécanique est connu, et à la présence d'une quantité importante de filler dont l'action a un effet positif sur la compacité et par conséquent sur la résistance mécanique.

5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aruntas H-Y., Guru M., Dayi M. and Tekin I., (2010). Utilization of waste marble dust as an additive in cement production, *Materials and Design*, **31**, 4039-4042, doi: [10.1016/j.matdes.2010.03.036](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.03.036)
- Boukhelkhal A., (2012). Rhéologie, caractérisation physico mécanique et durabilité des bétons autoplacants à base de la poudre de marbre, *Thèse de Magister*, Université de Laghouat.
- Caré S., Linder R., Barochel-Bouny V. et De Larrard F., Charonnat Y., (2000). Effet des additions minérales sur les propriétés d'usage des bétons Plan d'expérience et analyse statistique, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Chaid R., (2015). Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux, *thèse doctorale*, Ecole nationale Polytechnique, Edition : Presses académiques francophones,
- Chan S-Y-N., Feng N-Q. and Tsang M-K-C., (2000). Durability of High Strength Concrete Incorporation Carrier Fluid flying Agent, *Magazine of Concrete Research*, **52**, n°4, 235-242. doi.org/10.1680/mac.2000.52.4.235
- Diederich P., (2010). Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplacant du béton, *Thèse de doctorat*, Université Toulouse III - Paul Sabatier.
- Ergun A., (2011). Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete, *Construction and Building Materials*, **25**, 806-812, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.00
- Garnier V., Chaix J-F., Rossat M., Payan C. et Corneloup G., (2009). Caractérisation Non Destructive des bétons par propagation d'ondes ultrasonores, *19^{ème} Congrès Français de Mécanique (CFM'09)*, Marseille 24 au 28 août 2009.
- Guneyisi E., Gesoglu M. and Ozbay E., (2009). Effects of marble powder and slag on the properties of self-compacting mortars, *Materials and Structures*, **42**, 813–826. doi: [10.1016/j.cemconres.2006.04.002](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.04.002)
- Hermida G., (2008). Influence du volume de pâte et de la concentration en ciment sur la performance du béton : vers le développement d'un béton à contenu minimal en pâte, *Thèse de doctorat*, Ecole normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.

Kürşat Esat Alyamaç, Alp Buğra Aydın, (2015). Concrete properties containing fine aggregate marble powder, *KSCE Journal of Civil Engineering*, **19 (7)**, doi.10.1007/s12205-015-0327-y.

Noor M. and Uomoto T., (1999). Three-dimensional discrete element simulation of rheology tests of self-compacting concrete, *First International RILEM symposium on self-compacting concrete*, RILEM Publications, 35-46.

Nor Atan M-D. and Awang H., (2011). the compressive and flexural strengths of self-compacting concrete using raw rice husk ash, *journal of engineering science and technology*, © school of engineering, Taylor's university, **vol. 6, n° 6**, 720 – 732.

Ouchi M. et Edamatsu Y., (1999). A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar's particles in self-compacting concrete, *First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, 121-130.

Petit J-Y., (2005). Détermination de l'effet de la température, des superplastifiants et des ajouts à la matrice cimentaire sur les variations des propriétés rhéologiques des micro-mortiers et bétons auto-compactants : apport de la calorimétrie et de la conductimétrie. *Thèse de doctorat*, Laboratoire d'Artois Mécanique Thermique Instrumentation.

R'mili A. et Ben Oueddou M., (2007). Caractéristiques et propriétés des bétons autoplaçants (BAP), *Conférence : Matériaux Sols et Structures MS2 07*, Hammamet, Tunisie, 25-31.

Saetta A-V. and Vitaliani R-V., (2004). Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures, Part I: Theoretical formulation, *Cement and Concrete Research*, **34**, 571-579. doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.09.009

Su N. and Miao B., (2003). A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content, *Cement and Concrete Composites*, **vol. 25**, 215-222. doi.10.1016/S0958-9465(02)00013-6

Tang W-C., Ryan P-C., Cui H-Z., and Liao W., (2016). Properties of Self-Compacting Concrete with Recycled Coarse Aggregate, *Advances in Materials Science and Engineering*. Article ID 2761294, 11 p, doi.org/10.1155/2016/2761294

Topçu I-B., Bilir T. and Uygunoglu T., (2009). Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete, *Construction Building Materials*, **23(5)**, 1947-1953. doi.10.1016/j.conbuildmat.2008.09.007

Yen T., Tang C-W., Chang C-S., Chen K-H., (1999). Flow behaviour of high strength high performance concrete, *Cement and Concrete Composites*, **vol. 21**, 413-424, doi.10.1016/S0958-9465(99)00026-8