

## Influence des Superplastifiants à base d'Ether Polycarboxylique EPC sur la Fluidité des Pâtes Cimentaires

A.HARICHANE<sup>1,2</sup>, A. BENMOUNAH<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculté des Sciences et de la technologie, Université Djilali Bounaama Khemis-Mililana, Algérie

<sup>2</sup>Unité de Recherche Matériaux, Procédés et Environnement, Université M'Hamed Bougara Boumerdes, Algérie

### RESUME

La principale difficulté rencontrée dans la formulation des bétons à hautes performances (BHP) consiste à choisir le couple ciment-superplastifiant le plus efficace permettant d'obtenir une réduction maximale de l'eau, une bonne ouvrabilité et une rhéologie satisfaisante du béton pendant le temps de mise en œuvre. L'obtention de la plus grande ouvrabilité dépend de la compatibilité entre l'adjuvant et le ciment utilisé. Le présent travail a pour but de vérifier la compatibilité de deux superplastifiants à base d'éther polycarboxylique (SP EPC) de structures chimiques différentes avec le ciment CEM II 42.5 et d'étudier l'influence des SP EPC sur les la fluidité d'une pâte cimentaire. L'étude expérimentale s'articule sur la mesure du temps d'écoulement dans le viscosimètre de Marsh d'un coulis de ciment en faisant varier le rapport E/C, le dosage et le type de SP EPC. Un plan factoriel complet a été proposé dans ce travail pour étudier les interactions ciment-EPC, et optimiser le choix et le dosage en superplastifiant pour le ciment étudié. Une bonne fluidité a été obtenue avec le SP EPC1 pour un rapport E/C= 0.4 et un dosage en superplastifiant de 1.25%.

**Mots-clefs:** fluidité, superplastifiant, viscosimètre de Marsh, plan factoriel

### I. INTRODUCTION

La formulation des nouveaux bétons vise une plus grande ouvrabilité, un coulage facile et une très bonne résistance mécanique, ce qui nécessite l'utilisation de superplastifiants. Les polymères de type éther polycarboxylique EPC sont parmi les plus performants [1,2]. Ils présentent une structure en peigne [3], leur chaîne principale porte un groupement carboxylique chargé négativement ce qui facilite l'adsorption de la molécule sur la surface des particules de ciment par interaction électrostatique, les chaînes latérales contiennent des structures de polyéthylène glycol (PEG) qui favorisent la dispersion des particules de ciment en raison de l'encombrement stérique qu'ils produisent [4-11].

La performance d'un EPC est étroitement liée à son poids moléculaire et à sa densité de charge anionique. Le SP EPC avec le poids moléculaire moyen a les meilleures performances de dispersion, tandis que le PC de poids moléculaire élevé est le moins performant en matière de dispersion [12,13], mais le PC avec un poids moléculaire élevé retarde fortement l'hydratation de ciment [14]. La capacité d'un EPC à s'adsorber sur les particules de ciment et à les disperser est influencée par sa teneur en groupement carboxylique, les EPC à haute densité de charge présentent une forte adsorption, bonne capacité de dispersion initiale, ce qui signifie que la fluidité de la pâte de ciment augmentera avec l'augmentation de nombre de COO<sup>-</sup> sur la chaîne principale de SP EPC [15].

La structure chimique différente des EPC a un effet différent sur les performances du béton, certains EPC présentent des incompatibilités avec certains ciments [16,17] qui peuvent se traduire

par l'apparition d'un retard de prise de la pâte de ciment, de faibles comportements à l'écoulement, et la perte d'affaissement pouvant être le résultat d'une incompatibilité entre le clinker et le superplastifiant. Les situations d'interactions indésirables peuvent provenir : d'un mauvais dosage, du mode d'addition ou de la structure moléculaire du polymère [18-20] ; de la composition chimique et minéralogique du ciment [21] en particulier sa teneur en  $C_3A$  [22–24], en sulfate de calcium et en sulfates alcalins [25, 26].

Il est donc, important d'avoir une méthodologie pour sélectionner le SP EPC approprié pour le ciment donné. De plus, l'utilisation d'un dosage optimum de SP EPC est également essentielle car les faibles dosages peuvent entraîner une perte de fluidité et un sur dosage pourrait entraîner une ségrégation, un retard de prise et une utilisation non économique du superplastifiant. La sélection du type et le dosage du superplastifiant peuvent être basés sur la fluidité de la pâte cimentaire à travers des tests simples, comme avec le cône Marsh.

L'objectif de ce travail est l'étude de l'influence de deux SP EPC sur fluidité d'une pâte cimentaire dans le but d'optimiser le type et le dosage du polycarboxylate qui améliorent et conservent la fluidité de béton pendant une heure et réduisent le rapport eau/ciment.

## II. ETUDE EXPERIMENTALE

### II.1 Matériaux Utilisés

#### A/ Ciment

Le ciment utilisé dans ce travail est un ciment portland composé (CEM II/42.5) contenant 10% de calcaire et 5% de tuf, produit par la cimenterie de HADJAR SOUD (Skikda, Algérie) et dont les caractéristiques chimiques, minéralogiques et physiques sont mentionnées dans le tableau 1.

Le début et la fin prise ont été déterminés par l'appareil de Vicat.

**TABEAU 1.** Composition et propriétés du ciment (CEM II/42.5)

Caractéristiques Chimiques					
Désignation	PAF	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO
%	4.33	18.84	4.81	3.18	61.63
Désignation	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO <sub>libre</sub>
%	1.51	2.31	0.74	0.17	1.85
Caractéristiques Minéralogiques					
Désignation	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	
%	58.47	18.55	8.8	11.38	
Caractéristiques Physiques					
Désignation	Début de prise	Fin de Prise	Expansion (mm)	Finesse de Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	
	2h 5mn	3h 6mn	1	3600	

#### B/ Superplastifiant

Les deux types de superplastifiants utilisés, nous ont été fournis par l'entreprise SOLU-EST-ANNABA; le premier, commercialisé sous le nom POLYFLOW SR 3600 est désigné par EPC<sub>1</sub>, le deuxième, POLYFLOW SR 5400 est désigné par EPC<sub>2</sub>. Ce sont des polymères non chlorés de nouvelle génération, à base d'éther polycarboxylique modifié. Les poids moléculaires de deux EPC et les indices de polydispersité ont été analysés par Chromatographie d'Exclusion Stérique Multi-Détection.

La méthode du dosage acido-basique a été utilisée pour mesurer la concentration de groupe carboxylique. La concentration carboxylique peut être calculée par :

$$C(\text{COO}^-) = [C_{\text{NaOH}} \times V_{\text{NaOH}}] \times m / 100$$

Où  $C(\text{COO}^-)$  = concentration carboxylique (mmol/100 g);  $C_{\text{NaOH}}$  = la concentration molaire de NaOH (mmol/L);  $V_{\text{NaOH}}$  = volume de la solution de NaOH (L); et  $m$  = le poids de l'échantillon.

**Tableau 2.** Caractéristiques des superplastifiants étudiés

Superplastifiant	EPC <sub>1</sub>	EPC <sub>2</sub>
Extrait sec	22% ± 1 %	30% ± 1 %
Forme	liquide	Liquide
Couleur	brun	Brun
PH	5.5 ± 1	5 ± 1
Masse volumique	1.05 ± 0.02 g/cm <sup>3</sup>	1.07 ± 0.02 g/cm <sup>3</sup>
Teneur en chlore	< 0.1 % g/l	< 0.1 % g/l
Mn (Da)	4 036	13 621
Mw (Da)	4 386	15 959
IPD	1.087	1.172
C (COO <sup>-</sup> ) (mmol/g)	1.82	1.67

## II.2 Matériels utilisés

Pour étudier la fluidité des pâtes cimentaires, nous avons utilisé le viscosimètre de Marsh tel qu'il est proposé par Halal et al [27]. L'essai consiste à mesurer le temps qu'il faut pour vider un cône contenant 1 litre de coulis à travers un orifice d'évacuation de 5 mm de diamètre.

On fait une première mesure de l'écoulement à 5 min après le premier contact du ciment avec l'eau. On place ensuite le coulis dans un récipient qui sera recouvert d'un film plastique pour éviter toute évaporation d'eau. On effectue une deuxième mesure de l'écoulement à 60 min après le début de l'essai, et en malaxant le coulis une minute environ avant d'effectuer la mesure.

## II.3 Préparation des coulis de ciment

Une série des coulis a été préparée à  $T = 20^\circ\text{C} \pm 1$  en combinant les deux types de superplastifiant (EPC) avec le ciment pour donner deux couples à étudier ; C-EPC<sub>1</sub>, C-EPC<sub>2</sub>. Ces mélanges sont confectionnés avec trois rapports E/C de 0.35, 0.4 et 0.45 en variant le dosage de superplastifiant EPC/C (tableau 3).

**Tableau 4.** Paramètres d'essais de la fluidité des coulis

Variation des paramètres d'essais			
Pâtes cimentaires	EPC/C %	E/C	Type EPC
C-EPC <sub>1</sub>	0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2	0.35, 0.40, .45	EPC <sub>1</sub>
C-EPC <sub>2</sub>	0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2	0.35, 0.40, .45	EPC <sub>2</sub>

## III. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Un plan factoriel complet à trois facteurs et à deux niveaux 2<sup>3</sup> complété par deux points centraux [28] a été proposé dans cette étude, le nombre d'essais est donc de 10. Les trois facteurs à étudier sont : le rapport E/C, le dosage en superplastifiant EPC/C et le type de SP EPC, les niveaux bas et hauts de chaque facteur sont définis dans le tableau 3.

Les réponses étudiées sont le temps d'écoulement à 5 mn et le temps d'écoulement à 60 mn. On peut représenter le plan par des matrices, la matrice d'expérimentation (unités normales) ou la matrice d'expériences (unités codées), (tableaux 3 et 4).

Le but de ce plan est l'optimisation de type de SP EPC qui offre une très bonne fluidité à 5 mn et conserve cette fluidité à 60 mn pour un faible rapport E/C et faible dosage.

**Tableau 3.** Tableau d'expérimentation (unités courantes)

N° essai	E/C	EPC/C %	Type de SP EPC
1	0.35	0.75	EPC <sub>1</sub>
2	0.45	0.75	EPC <sub>1</sub>
3	0.35	1.75	EPC <sub>1</sub>
4	0.45	1.75	EPC <sub>1</sub>
5	0.35	0.75	EPC <sub>2</sub>
6	0.45	0.75	EPC <sub>2</sub>
7	0.35	1.75	EPC <sub>2</sub>
8	0.45	1.75	EPC <sub>2</sub>
9	0.4	1.25	EPC <sub>1</sub>
10	0.4	1.25	EPC <sub>2</sub>

**Tableau 4.** Plan d'expériences (unités codées)

N° essai	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Temps d'écoulement (s) à 5 mn	Temps d'écoulement (s) à 60 mn
1	-1	-1	-1	307	480
2	+1	-1	-1	97	116
3	-1	+1	-1	206	209
4	+1	+1	-1	89	89
5	-1	-1	+1	525	541
6	+1	-1	+1	101	121
7	-1	+1	+1	232	235
8	+1	+1	+1	93	94
9	0	0	-1	110	105
10	0	0	+1	114	109
Niveau -1	0.35	0.75	EPC <sub>1</sub>		
Niveau +1	0.45	1.75	EPC <sub>2</sub>		

L'analyse statistique de nos résultats a été faite au moyen du logiciel Minitab 18. Il est développé à l'université de Pennsylvania, USA, par les chercheurs F Barbara. Ryan, A Thomas. Ryan, Jr. et L Brianen 1972. Actuellement il est disponible en 8 langues, Il est largement utilisé par les chercheurs, il permet à l'utilisateur de se concentrer davantage sur l'analyse des données et l'interprétation des résultats [28].

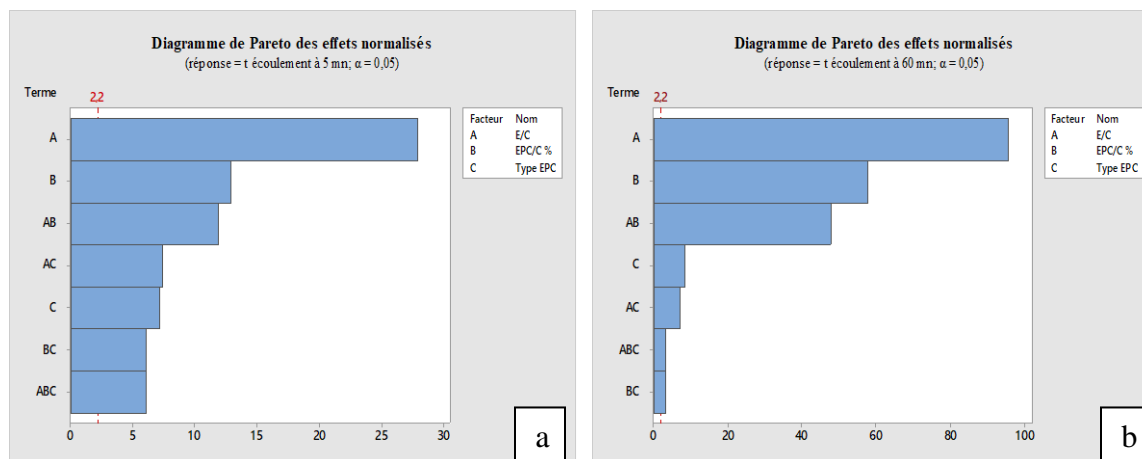
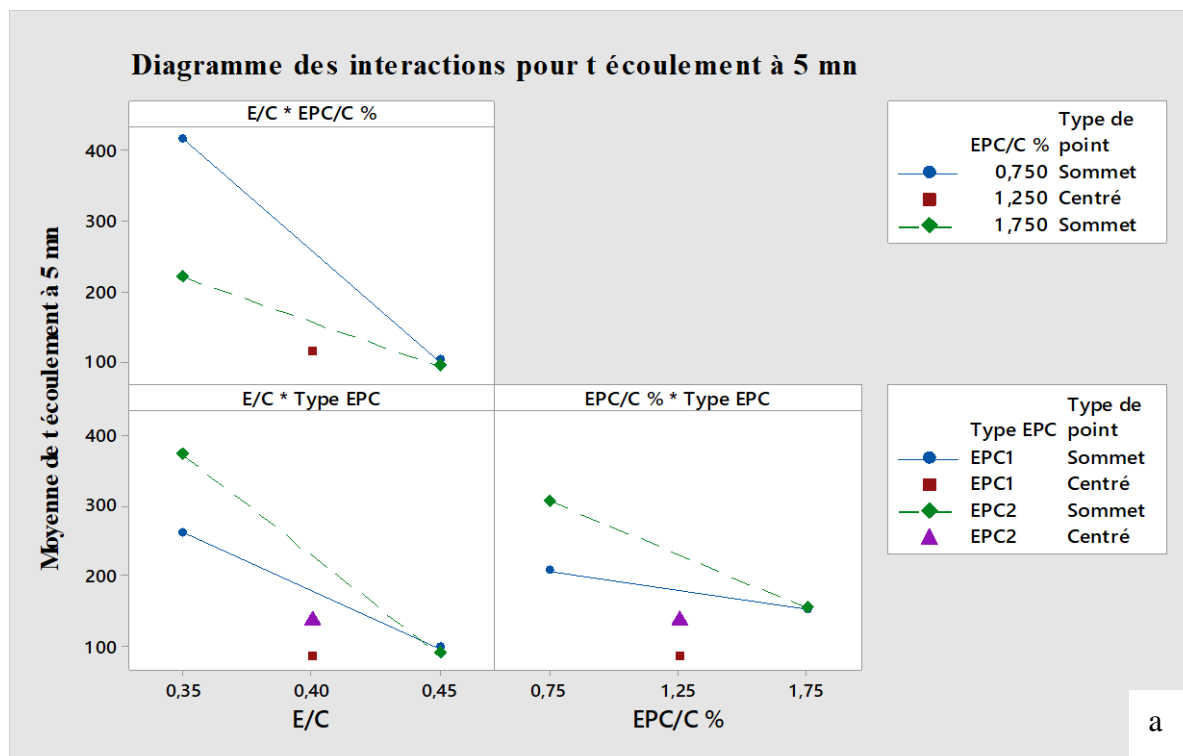
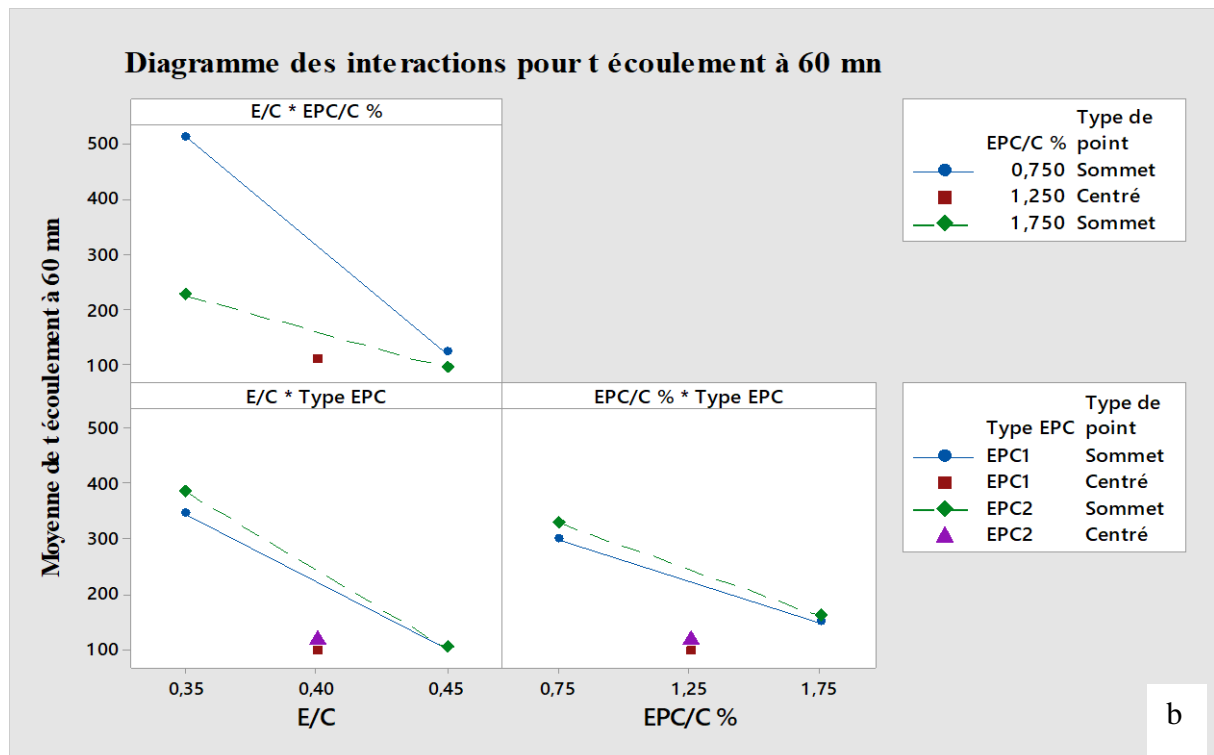


FIGURE 1. Diagramme de Pareto des Effets pour le temps d'écoulement, a : à 5 mn, b : à 60 mn

Le diagramme de Pareto (figure 1) est un moyen simple pour classer les effets et les interactions par ordre d'importance la figure1. Les barres qui coupent la ligne de référence (2.2) sont statistiquement significatives au seuil 0.05. Les trois facteurs (E/C, EPC/C et le type EPC) et leurs interactions ont des effets significatifs sur la fluidité à 5 mn (figure 1a) et à 60 mn (figure 1b).

Afin de montrer les interactions possibles entre les facteurs il est utile d'étudier le sens des coefficients d'interactions et la façon de contrôler (figure 2).





**FIGURE 2.** Diagramme des interactions pour le temps d'écoulement, a: à 5mn, b: à 60 mn

Dans un diagramme des interactions (figure 2), des droites parallèles indiquent l'absence d'interactions. Plus la différence de pente est grande entre les segments, plus le degré d'interaction est élevé.

- ✓ On remarque une interaction importante entre le rapport E/C et le dosage EPC/C à 5mn et elle reste constante après 1 heure : la fluidité des coulis est améliorée par l'augmentation de dosage EPC/C ou par l'augmentation du rapport E/C.
- ✓ Une forte interaction entre le dosage EPC/C et le type de SP EPC, le rapport E/C et le type de SP EPC à 5mn (figure 2a) : Pour les niveaux élevés du rapport E/C et EPC/C, les deux SP EPC ont le même pouvoir fluidifiant, et pour les niveaux inférieurs du E/C et EPC/C le SP EPC1 offre moins de viscosité (moins du temps d'écoulement au cône de Marsh) donc une très bonne fluidité pour un faible rapport E/C et un faible dosage en superplastifiant (EPC/C).
- ✓ Une faible interaction entre le dosage EPC/C et le type de SP EPC, le rapport E/C et le type de SP EPC à 60 mn (figure 2b) : pour les niveaux hauts du rapport E/C et dosage EPC/C, les deux SP EPC présentent presque le même pouvoir dispersant. Pour les niveaux bas du rapport E/C et de dosage EPC/C, l'efficacité de SP EPC1 est diminuée tandis que l'efficacité de SP EPC2 est améliorée après 1 heure.

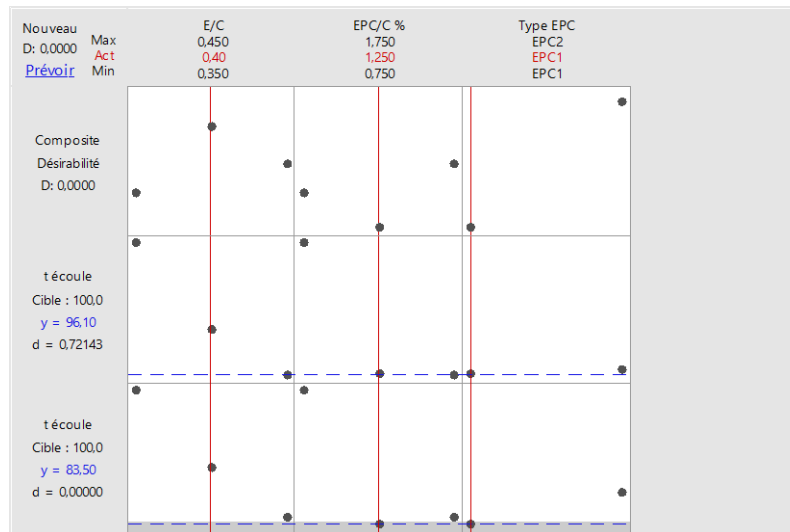


FIGURE 3. Diagramme d'optimisation de la fluidité

Le diagramme d'optimisation (figure 3) illustre l'effet de chaque facteur (colonnes) sur les réponses (lignes). Les lignes rouges verticales sur le diagramme représentent les paramètres de facteur actuels. Les chiffres qui figurent en haut d'une colonne indiquent les paramètres des niveaux de facteurs actuels (en rouge). Les lignes horizontales bleues et les chiffres représentent les réponses par rapport au niveau de facteur actuel. Les réponses sont respectivement de haut en bas, le temps d'écoulement à 5mn et à 60mn. Dans notre modèle étudié, la meilleure fluidité a été obtenue avec EPC<sub>1</sub>, avec un rapport E/C = 0.4 et dosage en superplastifiant EPC/C= 1.25%.

## VI. DISCUSSION

Les effets positifs des deux SP EPC (figure 3 et 4) sont basés uniquement sur ses structures en peigne, qui sont construits avec des chaînes principales de polycarboxylate (COO<sup>-</sup>) greffées par des chaînes latérales contenant des structures à base de polyéthylène glycol (PEG) [29]. Les groupes anioniques adsorbent sur les surfaces minérales de ciment chargées positivement, telles que celles composées de Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub> (C<sub>3</sub>A) et Ca<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>10</sub> (C<sub>4</sub>AF) [30], par interaction électrostatique tandis que les chaînes latérales fournissent un encombrement stérique pour empêcher les particules de ciment de coaguler, ainsi une bonne fluidité initiale des mélanges cimentaires est assurée. Les SP EPC pourraient non seulement réduire la limite d'élasticité et maintenir la fluidité, mais induisent également un effet retardateur sur l'hydratation du ciment [31,32] (figure 2b).

Aux faibles rapports E/C, et faibles dosages en superplastifiant (figure 2), le SP EPC<sub>1</sub> présente une très bonne fluidité initiale comparativement à celle du SP EPC<sub>2</sub>, et une mauvaise conservation de la fluidité pendant 1 heure. L'explication de ces différences peut être due à la concentration en groupe carboxylique (1.82 et 1.70 mmol/g) et le poids moléculaire (4 386, 15 959 Da) respectivement pour le SP EPC<sub>1</sub> et le SP EPC<sub>2</sub>. De nombreux articles publiés ont rapporté que les molécules PCE de haute densité de charge (teneur en groupe carboxylique) présentaient une forte adsorption, une bonne capacité de dispersion initiale et une courte conservation de la fluidité,

tandis que le PCE de faible densité de charge a montré une faible capacité d'adsorption, une faible capacité de dispersion initiale, mais une très bonne conservation de la fluidité [33].

Le SP EPC<sub>2</sub> de poids moléculaire élevée montre son efficacité de conservation de la fluidité après 1 heure par rapport le SP EPC<sub>1</sub>, résultat conforme aux travaux de Qianping Ran et al.

Le superplastifiant le plus efficace est celui qui confère la meilleure compatibilité au coulis et la plus grande fluidité pour des faibles rapports E/C, et faibles dosage en superplastifiant, et qui permet de conserver la fluidité des bétons jusqu'à la mise en œuvre.

Le rapport E/C, le dosage en superplastifiant et le type de superplastifiant sont les paramètres les plus importantes qui conditionnent la rhéologie des bétons, des mortiers ou des coulis.

Les deux SP EPC étudiés sont des polymères non chlorés d'une nouvelle génération chimique à base d'éther polycarboxylique modifié ont montré leur efficacité. Celle-ci peut être attribuée à la structure chimique et à la concentration carboxylique.

La fluidité de SP EPC<sub>2</sub> est améliorée après 1 heure pour un rapport E/C = 0.4 ; donc le SP EPC<sub>2</sub> de poids moléculaire élevé permet d'obtenir un long maintien de rhéologie, il est donc parfaitement adapté à l'industrie du Béton Prêt à l'Emploi BPE (bétons pompés sur longue distance).

## RÉFÉRENCES

[1] Raffaella Abile, Alessandro Russo, Claudio Limone, Fabio Montagnaro, Impact of the charge density on the behaviour of polycarboxylate ethers as cement dispersants, *Construction and Building Materials* 180 (2018) 47749

[2] Ahmed Tareq Noamana, Mayyadah S. Abedb, Alaa A. Abdul Hamead, Production of polycarboxylate-ether superplasticizer (PCE) coated sand with modified hardened properties in cement mortar, *Cons Buig Mat* 245, 2020, 118442

[3] Kaihong Zhonga, Qiang Shaoa,, Haijun Xua, Jiangxiong Weib. Effects of core-shell polycarboxylate superplasticizer on the fluidity and hydration behavior of cement paste, *Colloids and Surfaces A* 590 (2020) 124464

[4] S. Sha, M. Wang, C. Shi, Y. Xiao, Influence of the structures of Polycarboxylate superplasticizer on its performance in cement-based materials-a review, *Constr. Build. Mater.* 233 (2020) 117257

[5] B. Ma, H. Qi, H. Tan, Y. Su, X. Li, X. Liu, C. Li, T. Zhang, Effect of aliphatic-based superplasticizer on rheological performance of cement paste plasticized by Polycarboxylate superplasticizer, *Constr. Build. Mater.* 233 (2020)

[6] H. Yang, J. Plank, Z. Sun, Investigation on the optimal chemical structure of methacrylate ester based polycarboxylate superplasticizers to be used as cement grinding aid under laboratory conditions: effect of anionicity, side chain length and dosage on grinding efficiency, mortar workability and strength development, *Constr. Build. Mater.* 224 (2019) 1018–1025

[7] X. Wang, Y. Yang, X. Shu, Q. Ran, J. Liu, Effects of polycarboxylate architecture on flow behaviour of cement paste, *Adv. Cem. Res.* (2019) 1–10,



- [8] K. Kai, Y. Heng, W. Yingbin, Effect of chemical structure on dispersity of Polycarboxylate superplasticiser in cement paste, *Adv. Cem. Res.* (2019) 1–9.
- [9] M. Ezzat, X. Xu, K. El Cheikh, K. Lesage, R. Hoogenboom, G. De Schutter, Structure property relationships for polycarboxylate ether superplasticizers by means of RAFT polymerization, *J. Colloid Interface Sci.* 553 (2019) 788–797
- [10] T. Conte, J. Plank, Impact of molecular structure and composition of polycarboxylate comb polymers on the flow properties of alkali-activated slag, *Cem. Concr. Res.* 116 (2019) 95–101.
- [11] Chee Ban Cheah, Ling Ling Tiong, Eng Poh Ng, Chuan Wei Oo, The engineering performance of concrete containing high volume of ground granulated blast furnace slag and pulverized fly ash with polycarboxylate-based superplasticizer, *Construction and Building Materials* 202 (2019) 909–921.
- [12] X. Peng, X. Li, Z. Li, Evaluation of the dispersing properties of polycarboxylate type superplasticizers with different molecular weight in cement systems, *J. Dispersion Sci. Technol.* 34 (9) (2013) 1265–1272.
- [13] J. Liu, Y. Yang, Q. Zhang, et al., Effect of molecular weight of slow-release polycarboxylate superplasticizer on the properties of cementitious system, *Adv. Cem. Res.* 30 (7) (2018) 285–292.
- [14] F. Kong, L. Pan, C. Wang, et al., Effects of polycarboxylate superplasticizers with different molecular structure on the hydration behavior of cement paste *Constr. Build. Mater.* 105 (2016) 545–553.
- [15] L. Ferrari, J. Kaufmann, F. Winnefeld, et al., Multi-method approach to study influence of superplasticizers on cement suspensions, *Cem. Concr. Res.* 41 (10) (2011) 1058–1066.
- [16] W. Prince, M. Espagne, P.-C. Aitcin, Ettringite formation: a crucial step in cement superplasticizer compatibility, *Cem. Concr. Res.* 33 (5) (2003) 635–641.
- [17] P.-C. Nikinamubanzi, P.-C. Aitcin, Cement and superplasticizer combinations: compatibility and robustness, *Com. Concr. Agg.* 26 (2) (2004) 102–109.
- [18] D. Marchon, P. Juilland, E. Gallucci, L. Frunz, R.J. Flatt Molecular and submolecular scale effects of comb-copolymers on tri-calcium silicate reactivity: toward molecular design *J. Am. Ceram. Soc.*, 100 (2017), pp. 817-841
- [19] Yamada K, Takahashi T, Hanehara S, Matsuhisa M. Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer. *Cem Concr Res* 2000;30:197–207.
- [20] Kirby GH, Lewis JA. Comb polymer architecture effects on the rheological property evolution of concentrated cement suspensions. *J Am Ceram Soc* 2004;87(9):1643–52.
- [21] O. Burgos-Montes, M. Palacios, P. Rivilla, and F. Puertas, “Compatibility between superplasticizer admixtures and cements with mineral additions,” *Constr. Build. Mater.* 31, 2012, 300-309
- [22] Plank J, Dai Z, Zouaoui N, Vlad D. Intercalation of Polycarboxylate superplasticizers into C3A hydrate phases. In: 8th CANMET/ACI superplasticizers and other chemical admixtures in concrete, Sorrento, Italia; 2006. p. 201–14.

[23] Zingg A, Winnefeld F, Holzer L, Pakusch J, Becker S, Figi R, et al. Interaction of polycarboxylate-based superplasticizers with cements containing different C3A amounts. *Cem Concr Compos* 2009;31(3):153–162.

[24] Alonso MM, Palacios M, Puertas F, De la Torre AG, Aranda MAG. Effect of polycarboxylate admixture structure on cement paste rheology. *Mater, Construcc* 2007;57(286):65–81.

[25] Magarotto R, Moratti F, Zeminian N. Influence of sulfates content in cement on the performances of superplasticizers. In: 8th CANMET/ACI, Sorrento, Italia, 2006. p. 215–30

[26] Yan He, Xiong Zhang, Shuhua Liu, R.D. Hooton, Tao Ji, Yaning Kong. Impacts of sulphates on rheological property and hydration performance of cement paste in the function of polycarboxylate superplasticizer, *Constr Mat*, 256, 2020, 119–428.

[27] A. Hallal, E.H. Kadri, K. Ezziane, A. Kadri H. Khelafi, Combined effect of mineral admixtures with superplasticizers on the fluidity of the blended cement paste, *Construction and Building Materials* 24 (2010) 1418–1423

[28] Akers, Michael D (2018), *Exploring, Analysing and Interpreting Data with Minitab 18* (1st ed.), United Kingdom, Compass Publishing. ISBN 978-1-912009-19-0

[29] Xin Shu, Qianping Ran, Jiaping Liu, Hongxia Zhao, Qian Zhang, Xiumei Wang, Yong Yang, Jinzhi Liu, Tailoring the solution conformation of polycarboxylate superplasticizer toward the improvement of dispersing performance in cement paste, *J. Dispersion Sci. Technol.* 31 (2010) 790–798

[30] K. Yoshioka, E. Tazawa, K. Kawai, T. Enohata. Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals. *Cem. Concr. Res.*, 32 (10) (2002), pp. 1507–1513

[31] Kong, F.R.; Pan, L.S.; Wang, C.M.; Xu, N. Effects of polycarboxylate superplasticizers with different molecular structure on the hydration behavior of cement paste. *Constr. Build. Mater.* 2016, 105, 545–553. [CrossRef]

[32] Zhang, Y.R.; Kong, X.M.; Lu, Z.B.; Lu, Z.C.; Hou, S.S. Effects of the charge characteristics of Polycarboxylate superplasticizers on the adsorption and the retardation in cement pastes. *Cem. Concr. Res.* 2015, 67, 184–196

[33] Anatol Zingg, Frank Winnefeld, Lorenz Holzer, Joachim Pakusch, Stefan Becker, Renato Figi, Ludwig Gauckler, Interaction of polycarboxylate-based superplasticizers with cements containing different C<sub>3</sub>A amounts, *Cement and Concrete Composites*, Volume 31, Issue 3, March 2009, Pages 153–162

[34] Qianping Ran; Jinzhi Liu; Yong Yang; Xin Shu; Jiaping Zhang; and Yonglin Mao, Effect of Molecular Weight of Polycarboxylate Superplasticizer on Its Dispersion, Adsorption, and Hydration of a Cementitious System, *J. Mater. Civ. Eng.*, 2016.