

Effet de la pouzzolane sur le comportement rhéologique des pâtes cimentaires

M. S Mansour

Laboratoire des Matériaux Minéraux et Composites, LMMC Université M'hamed Bougara,
Avenue de l'indépendance, 35000 Boumerdes, Algérie, mansabri2002@yahoo.fr

M.T. Abadlia

Laboratoire des Matériaux Minéraux et Composites, LMMC Université M'hamed Bougara,
Avenue de l'indépendance, 35000 Boumerdes, Algérie

K. Bekkour

Institut de Mécanique des Fluides et des Solides, IMFS, UMR 7507 Université Louis Pasteur, 2 rue Boussingault, 67000
Strasbourg, France.

Résumé

Dans ce travail, nous présentons les résultats d'un ensemble d'essais rhéométriques conduit sur des pâtes cimentaires dans lesquelles une partie du clinker a été substituée par 5% jusqu'à 20% de pouzzolane PZ de la région de BENI-SAF (ALGERIE). L'effet de la pouzzolane sur le comportement rhéologique de la pâte est analysé à partir de tests statique d'écoulement et dynamique de fluage, en utilisant le rhéomètre AR2000 à contrainte imposée. Les résultats obtenus ont montré que le comportement rhéologique en écoulement des pâtes cimentaires dépend du taux de remplacement de la pouzzolane PZ. Il s'avère qu'il existe un taux optimal de 10% PZ pour une meilleure fluidité d'écoulement de la pâte. Par ailleurs, l'étude en régime transitoire (fluage/recouvrance) a permis de mettre en évidence le caractère viscoélastique des pâtes cimentaires qui est atténué par l'augmentation du taux de remplacement de la pouzzolane. Ainsi, la pouzzolane Algérienne semble être une addition qui améliore le comportement du ciment à l'état frais et par la suite, l'ouvrabilité du béton frais.

Abstract

In the present work, we present the results of several rheological tests conducted on cement pastes in which a part of the clinker was replaced by 5% to 20% of pozzolan PZ from region of Beni - SAF (Algeria). The effect of pozzolan on the rheological behavior of cement paste is analyzed from static test (flow) and dynamic test (creep), by using the stress controlled rheometer AR2000. The results obtained showed that the rheological behavior in flow of cement pastes depends on the replacement rate of pozzolan PZ. It appears that there is an optimum rate of 10% PZ which exhibit the better flowability of the paste. Moreover, the study under transient (creep/recovery) has revealed the viscoelastic character of cement paste which is reduced by increasing of pozzolan rate. Thus, the Pozzolan Algérienne seems to be an addition that improves the behavior of the cement in the fresh state and subsequently the workability of fresh concrete.

1. INTRODUCTION

Plusieurs recherches ont été conduites afin d'améliorer les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton en utilisant des particules fines comme ajouts minéraux [1], [2]. Ces derniers sont actuellement utilisés dans le béton afin de développer ses performances et réduire la consommation du ciment. Cette réduction contribuera de manière simple et

économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement. Les ajouts minéraux les plus connus sont les cendres volantes, les laitiers de haut-fourneau ainsi que la fumée de silice, le métakaolin et la pouzzolane. Une substitution de 20% de la pouzzolane de Béni-Saf au ciment confère au béton des performances mécaniques qui égalent sinon surpassent à long terme celle du béton témoin [4]. Ces ajouts affectent significativement la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais. Prévoir l'ouvrabilité du béton n'étant pas pratique, l'étude rhéologique des pâtes cimentaires permet d'y remédier car étant plus simple à effectuer. Le but de cette étude est donc de chercher le meilleur taux de remplacement de la pouzzolane qui engendre le meilleur comportement rhéologique, et qui contribue à produire pour la construction, un béton de très hautes performances. Dans le cadre de ce travail, une étude expérimentale de l'effet de la pouzzolane à différents dosages, sur le comportement rhéologique des pâtes cimentaires, est réalisée. Ces pâtes sont préparées avec 2% en masse de superplastifiant SP et d'une même base de ciment dont une fraction a été remplacée par 5 %, 10 %, 15 % et 20 % de pouzzolane (PZ). Cet effet est analysé à partir du test statique d'écoulement et dynamique de fluage. Les tests rhéologiques sont réalisés en contrainte imposée grâce au rhéomètre AR2000 avec une géométrie à quatre lames. Le modèle rhéologique de Herschel-Bulkley semble être le meilleur modèle qui représente l'écoulement de ces pâtes cimentaires.

2. GENERALITES SUR LES MATERIAUX VISCOELASTIQUES

L'ensemble des mesures de fluage et de recouvrance en contrainte imposée représente souvent une technique rhéologique qui permet d'étudier le comportement viscoélastique des matériaux solides ou liquides. Les suspensions colloïdales ont souvent un comportement viscoélastique et les mesures de fluage/recouvrance peuvent être utilisées pour caractériser les aspects de leur comportement en écoulement. C'est une technique transitoire où une contrainte est imposée, et il en résulte une déformation mesurée en fonction du temps. La complaisance J peut être calculée à partir de ces mesures et sa variation avec le temps permet de caractériser le matériau comme un solide ou un liquide viscoélastique.

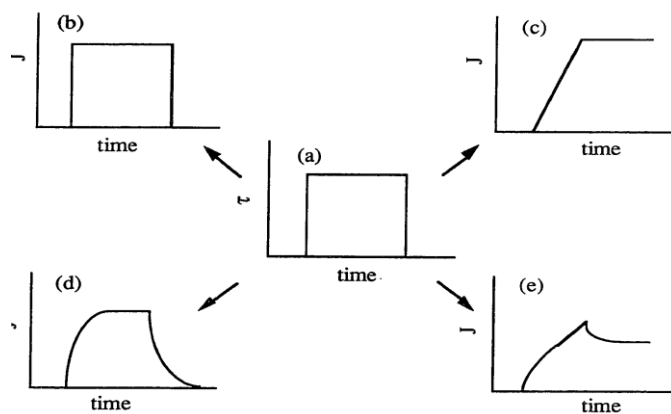


Figure 1. Comportement général en fluage/recouvrance sous une contrainte de cisaillement (a).

La complaisance (J) est définie comme étant la déformation divisée par la contrainte. Pour un solide élastique, c'est l'inverse du module élastique. Les solides ou les liquides se comportent comme un solide élastique idéal (b), un liquide idéal visqueux (c), un solide viscoélastique (d), ou comme un liquide viscoélastique (e) (Figure.1) [5].

3. CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

Les matériaux utilisés dans cette étude sont le clinker et le gypse qui provenant de la région de Meftah (Alger), La pouzzolane utilisée provient de la région de BENI-SAF, ALGERIE. Elle est définie comme un matériau ayant une aptitude à réagir avec la chaux en présence d'eau, et à former des composés possédant des propriétés liantes. Elle est formée d'éléments surtout vitreux, et composés essentiellement de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. Cette pouzzolane ayant une masse volumique de $2.70 \text{ (g/cm}^3\text{)}$, une surface spécifique de $8239.80 \text{ (cm}^2\text{/g)}$ et une activité minérale de 149.80 (mg/g) . Par ailleurs, le superplastifiant à base de polycarboxylate et de phosphonate modifiés et de masse volumique $1.07 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ est utilisé pour la confection des mélanges. Ceci, afin d'assurer une bonne dispersion des grains du mélange de ciment. L'eau utilisée lors du malaxage est l'eau déionisée. Les analyses chimiques des matériaux sont présentées dans la table 1. De plus, leur morphologie, observée au microscope électronique à balayage (MEB) de type ESEMXL30 est illustrée sur la figure 2.

%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PF	CL ⁻
Clinker	22.47	5.46	2.53	65.72	1.08	0.44	0.92	0.21	0.74	0.002
Gypse	10.51	3.37	1.25	27.37	4.49	28.53	0.47	0.11	23.95	0.008
PZ	44.78	16.53	9.01	10.97	4.59	0.17	1.15	3.42	6.55	0.014

Table 1 : Compositions chimiques des matériaux

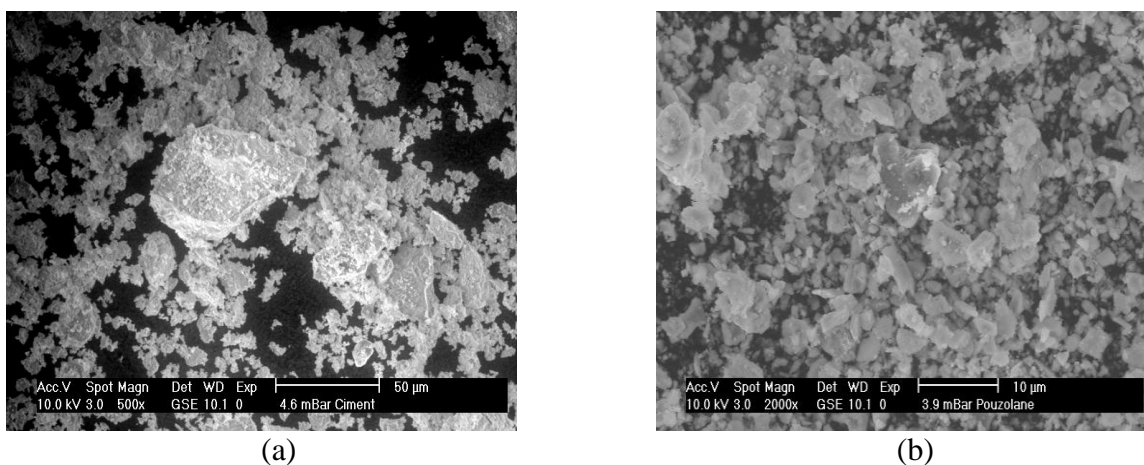


Figure 2 : Morphologie (a) du ciment, (b) de la pouzzolane

4. APPAREILLAGE

Dans ce travail, toutes les mesures ont été effectuées en utilisant le rhéomètre AR2000 à contrainte imposée et une géométrie (vane) à quatre lames. Le rotor vane, de rayon 14mm, tourne dans un cylindre extérieur creux et fixe de 15mm de rayon. L'entrefer est de 1mm. Les échantillons placés dans le cylindre creux, sont maintenus à une température de 20°C grâce à une circulation d'eau pendant les tests. L'utilisation de la géométrie à lames a pour avantage l'élimination du glissement quand le cisaillement se produit complètement à l'intérieur du matériau le long de la surface localisée circonscrite par la vane [6].



Figure 3 : Photos de (a) Rhéomètre 2000, (b) la géométrie vane

5. PREPARATION DES PATES CIMENTAIRES

Des mélanges de ciment à base de clinker, de 5 % de gypse avec un taux d'ajout de 5 %, 10 %, 15 % et 20 % en masse sont élaborés. Tous les mélanges sont préparés dans les mêmes conditions avec un E/C inférieur à 0.30 et 2% de superplastifiant. Les pâtes cimentaires sont préparées selon le protocole suivant :

L'eau ayant une température constante de $19 \pm 0.5^\circ\text{C}$ et contenant le superplastifiant est versée dans le malaxeur. Le mélange de ciment est minutieusement ajouté à l'eau et mélangé pendant 1mn à une faible vitesse, puis 1mn à grande vitesse. Le malaxeur est stoppé durant 1mn30s, pendant lesquelles ses parois sont nettoyées convenablement avec une spatule. Le mélange est malaxé encore 1mn à grande vitesse. La pâte obtenue est gardée au repos 30s avant de la placer dans le rhéomètre. L'échantillon est maintenu à une température constante de $20 \pm 1^\circ\text{C}$ par un contrôleur automatique pendant l'essai. Un précisaillement de 500s^{-1} des pâtes cimentaires pendant 60s, suivi d'une période de repos de 60s est retenu pour tous les essais. Ce précisaillement est effectué dans le but de mettre la structure de la pâte dans un état de rupture irréversible [7]. Lors du test d'écoulement, la pâte cimentaire est cisailée en appliquant une contrainte imposée dont l'intervalle est (0-200) Pa pendant 120s. Pendant le test de fluage, la pâte cimentaire est soumise à une contrainte imposée constante de 0.03 Pa durant 40s, et une déformation est mesurée. Ensuite la contrainte est relâchée, et une

déformation est encore mesurée à nouveau pendant 40s (recouvrance). Des essais préliminaires ont permis de déterminer la contrainte imposée de 0.03 Pa, appartenant au domaine de viscoélasticité linéaire obtenue par le test de balayage en contrainte dont l'intervalle est (0.01- 20) Pa pour une fréquence fixe de 1Hz. Le dispositif de mesure est placé dans une ambiance saturée en vapeur d'eau au cours de toutes les manipulations.

6. RESULTATS ET DISCUSSIONS

6.1 Résultat du MEB

La figure 2 montre la morphologie des matériaux utilisés et révèle que la pouzzolane possède une texture compacte avec des particules de forme irrégulière et plus fines par rapport à celle du ciment. En effet, le diamètre moyen des particules de la pouzzolane $d_{50} = 9.5 \mu\text{m}$ est plus petit que celui ($39 \mu\text{m}$) des particules du ciment. Le rapport des diamètres est d'environ 4. Ce fait montre que la pouzzolane joue le rôle de l'effet de micro filler dans le ciment. Ceci améliore la fluidité des pâtes cimentaires lors de leur écoulement.

6.2. Identification des lois de comportement

Parmi les modèles de comportement rhéologique qui semblent bien représenter l'écoulement de ce type de pâte est le modèle de Herschel-Bulkley car l'erreur standard calculée pour ce modèle est la plus faible comparée à celle des autres modèles. La loi qui décrit ce modèle s'écrit [6]:

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

où K est l'indice de consistance ou viscosité apparente, τ_0 la contrainte seuil qui dépend de l'état structural de la pâte, γ est la vitesse de cisaillement et n caractérise le comportement de la pâte : rhéofluidifiant pour $n < 1$ et rhéoépaississant pour $n > 1$.

Les courbes d'écoulement des différentes pâtes (figure 4) sont modélisées par l'équation de Herschel-Bulkley Il a été constaté que le paramètre de comportement n de l'équation de Herschel-Bulkley donné par le rhéomètre, est pour l'ensemble des pâtes supérieur à un ($n > 1$). Le comportement de la pâte de contrôle (0% d'ajout) correspondant à n égal à 1.1 ($n = 1.1$) est donc rhéoépaississant. Il le demeure même avec l'addition de la pouzzolane ($n = 1.052$ avec 5% PZ, $n = 1.043$ avec 10% PZ, $n = 1.213$ avec 15% PZ et $n = 1.17$ avec 20% PZ). Néanmoins, cet aspect rhéoépaississant est atténué par les taux de 5%PZ et 10% PZ puisque n est inférieur à 1.1 ($n < 1.1$). Par contre cet aspect est accentué par les taux de 15%PZ et 20%PZ puisque n est supérieur à 1.1 ($n > 1.1$).

6.3. Test d'écoulement

Le comportement des pâtes de ciment change avec le taux de remplacement de la pouzzolane. Les courbes d'écoulement des pâtes ont des formes similaires, et les contraintes de cisaillement augmentent en fonction de l'augmentation de la vitesse de cisaillement (figure 4).

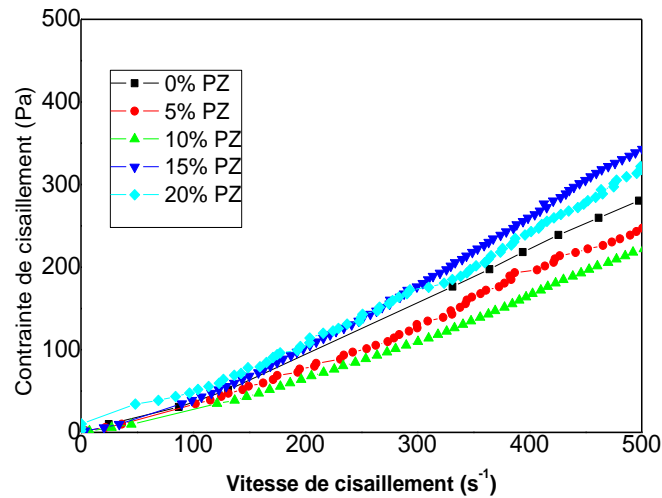


Figure 4. Courbes d'écoulement des pâtes cimentaires contenant la pouzzolane.

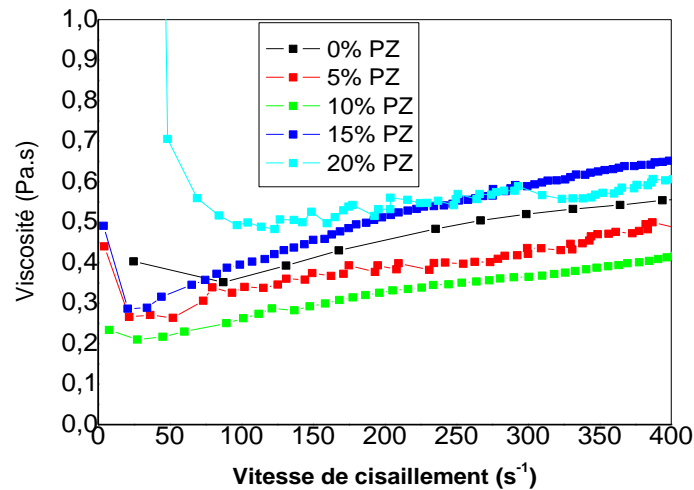


Figure 5. Evolution de la viscosité des pâtes cimentaires contenant la pouzzolane.

Les taux de 15 % PZ et 20% PZ n'ont pas d'effet positif sur la fluidité de l'écoulement des pâtes, vu qu'ils entraînent une augmentation des contraintes de cisaillement par rapport à celles de contrôle (0% PZ). Le taux de remplacement de 10 % PZ semble être le taux optimal pour un meilleur écoulement de la pâte. Par ailleurs, la figure 5 représente l'évolution de la viscosité des pâtes cimentaires pour les différentes proportions de la pouzzolane en fonction de la vitesse de cisaillement. Pour les pâtes contenant 5 % PZ et 10 % PZ, les valeurs de la viscosité sont faibles devant celles de la pâte de contrôle. Par ailleurs, toutes les pâtes cimentaires présentent un comportement initial rhéofluidifiant jusqu'à une certaine valeur limite de la vitesse de cisaillement et ceci à cause de la diminution de la viscosité. Ensuite le comportement devient rhéoépaississant à cause de l'augmentation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement. Néanmoins, il est atténué par 5% PZ et 10% PZ comparé à celui

de la pâte de contrôle. Le comportement rhéoépaississant peut être lié à la présence de superplastifiant comme composante physique de la pâte. L'augmentation de la vitesse de cisaillement augmente le désordre, non seulement entre les particules de ciment mais également à l'intérieur des chaînes polymériques du superplastifiant SP. Par ailleurs, la taille fine et la forme irrégulière des particules de la pouzzolane peuvent contribuer aussi au rhéoépaississement de pâte de ciment [8].

6. 4. Test de Fluage/Recouvrance

L'étude en régime transitoire (test dynamique de fluage) a permis de mettre en évidence les propriétés viscoélastiques des pâtes cimentaires. La figure 6 montre la variation de la complaisance en fonction du temps qui représente le comportement d'un solide viscoélastique de la pâte cimentaire de contrôle (0%PZ) avec une déformation instantanée et une déformation élastique retardée dépendante du temps (fluage). Le taux de remplacement de 5 % PZ engendre le comportement d'un liquide visqueux (Figure 7a). Par contre, les figures 7b, 7c et 7d montrent que les taux de remplacement de 10 % PZ, 15 % PZ et 20 % PZ respectivement, induisent le comportement d'un liquide viscoélastique comparé au comportement solide viscoélastique de la pâte de contrôle (0 % PZ). Par ailleurs, la pouzzolane atténue le caractère viscoélastique lorsque son taux de remplacement augmente. Les déformations subies par les pâtes avec 10% d'ajout sont plus fortes que celles subies par la pâte de contrôle. Celles-ci sont caractéristiques à de faibles interactions interparticulaires causées par les ajouts dans les mélanges de ciment [3] rendant ainsi les pâtes plus fluides. Ce qui implique que la pouzzolane est un ajout qui améliore le comportement en fluage des pâtes cimentaires.

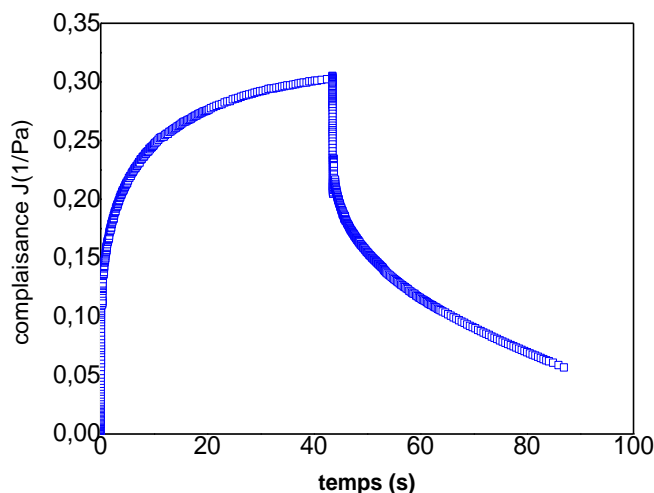


Figure 6. Comportement en fluage/recouvrance de la pâte cimentaire de contrôle

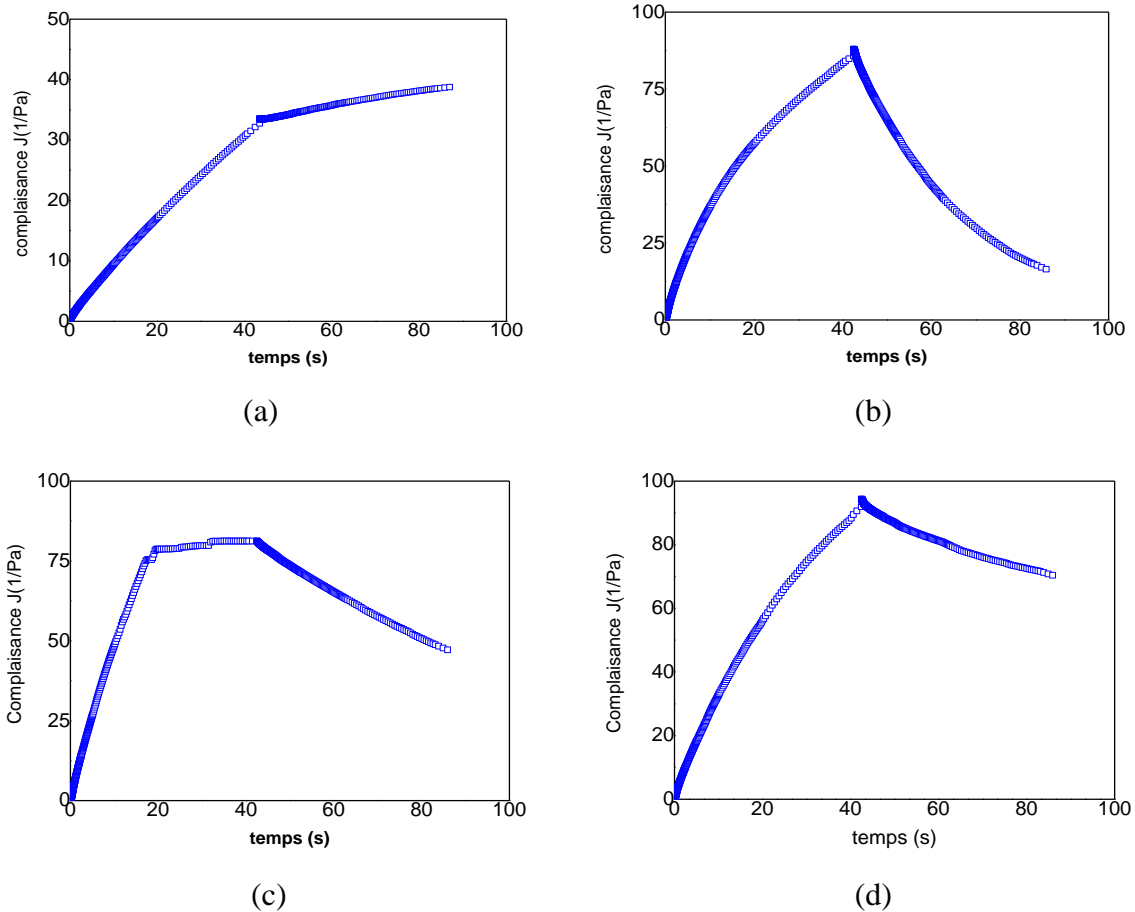


Figure 7. Comportement en fluage/recouvrance des pâtes cimentaires contenant PZ (a) – 5 %, (b) – 10 %, (c) – 15 %, (d) – 20 %.

7. CONCLUSIONS

L'intérêt majeur qui a été à l'origine de cette étude est la possibilité de remplacer une partie d'un matériau industriel qui est le ciment par une addition minérale locale et pas chère (la pouzzolane) afin de réduire la consommation du ciment en Algérie et d'améliorer le comportement rhéologique des pâtes cimentaires à l'état frais. Ce travail a porté sur l'étude de l'effet de la pouzzolane sur le comportement rhéologique des pâtes cimentaires. Plusieurs conclusions peuvent être déduites :

L'effet de micro filler et l'effet pouzzolanique de la pouzzolane ont joué leurs rôles dans l'amélioration de la fluidité de l'écoulement des pâtes cimentaires. La présente étude a permis de mettre en évidence l'existence d'un taux optimal de 10% PZ qui engendre la meilleure fluidité et donc le meilleur comportement en écoulement des pâtes. La viscosité qui diminue en fonction du gradient de cisaillement, pour les pâtes contenant les taux de 5 % PZ et 10 % PZ comparée à la viscosité de la pâte de contrôle. De plus, toutes les pâtes cimentaires présentent un comportement rhéoépaississant pour des vitesses de cisaillement élevées.

L'étude en régime transitoire (fluage/recouvrance) a permis de mettre en évidence les propriétés viscoélastiques des pâtes cimentaires. Il apparaît ainsi que le caractère viscoélastique diminue lorsque le taux de remplacement de la pouzzolane augmente, contribuant ainsi à l'amélioration du comportement rhéologique en fluage des pâtes cimentaires.

Par ailleurs, Une substitution de 20% de la pouzzolane de Béni-Saf au ciment confère au béton des performances mécaniques qui égalent sinon surpassent à long terme celle du béton témoin (Temps > 90 jours).

L'étude rhéologique effectuée sur les pâtes cimentaires a donné des résultats prometteurs qui encouragent l'utilisation du ciment avec la pouzzolane comme composante d'un béton de hautes performances désigné pour l'industrie en Algérie, puisque elle participera à l'amélioration de l'ouvrabilité du béton à l'état frais et à la facilité de sa mise en place.

RÉFÉRENCES

1. Ferraris, C.-F., Obla, K.-H. and Hill, R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete, *Cem. Concr. Res.*, 31, 245-255, 2001.
2. Park, C.-K., Noh, M.-H. and Park, T.-H. Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures, *Cem. Concr. Res.*, 35, 842-849, 2005.
3. Zhang, X. and Han, J. The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste, *Cem. Concr. Res.*, 30, 827-830, 2000.
4. Belaribi, B. Influence de la pouzzolane de Beni-saf sur les caractéristiques mécaniques des bétons, *Can.J. Civ. Eng.*, 30, 580-584, 2003
5. Struble, L.-J. and Schultz, M.-A. Using creep and recovery to study flow behaviour of fresh cement paste, *Cem. Concr. Res.*, 23, 1369-1379, 1993.
6. Nehdi M. and Rahman M.A., « Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction », *Cem. Concr. Res.*, 34, 1993-2007, 2004.
7. Tattersall, G.-H. and Banfill, P.-F.-G. *The Rheology of Fresh Concrete*, Editions Pitman, Boston, 1983.
8. Cyr, M., Legrand, C. and Mouret, M. Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives, *Cem. Concr. Res.*, 30, 1477-1483, 2000.