

EFFET DE L'ACTIVATION MÉCANIQUE DES CIMENTS AUX AJOUTS MINÉRAUX SUR LES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DU MORTIER

A. NACERI & M. BENIA

Laboratoire de Géomatériaux,
Département de Génie Civil, Université de
M'sila, Algérie

Mots-clés : Finesse (surface spécifique), ciment composé, mortier et réponse mécanique.

RESUME: Le présent travail se propose d'étudier l'influence de la finesse (surface spécifique) des ciments aux ajouts minéraux (C.P.J.-C.E.M II) sur la résistance mécanique du mortier. Ce travail est une contribution à l'amélioration des propriétés des mortiers par activation mécanique de deux types de ciments composés de différentes cimenteries (liants hydrauliques avec différents ajouts minéraux : laitier et tuf).

Les propriétés physiques des ciments composés (C.P.J.-C.E.M II) activés mécaniquement par un broyage poussé à l'état anhydre et à l'état hydraté (densité spécifique, consistance des pâtes de ciments et délais de prise) ainsi que les caractéristiques mécaniques des mortiers confectionnés à leurs bases (R_f et R_c) ont été étudiées.

D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que l'augmentation de la surface spécifique et la composition chimique des ciments aux ajouts minéraux sont les principaux responsables à l'amélioration de la réactivité latente des additions minérales et de l'accroissement des résistances mécaniques des mortiers.

1- INTRODUCTION

L'utilisation des ajouts minéraux dans la production des ciments Portlands composés (C.P.J.-C.E.M II) a résolu en grande partie le problème d'autosuffisance nationale, ainsi que celui de la baisse du coût énergétique. En faisant varier les pourcentages d'ajouts, on pourrait obtenir en fonction des domaines d'utilisation, différents types de ciments aux ajouts minéraux avec les propriétés physico-mécaniques demandées [1]. Les ajouts minéraux sont largement utilisés dans la fabrication des ciments avec additions minérales dans le monde [2]. Du point de vue économique, ils présentent un facteur très important dans la production du ciment Portland composé (C.P.J.-C.E.M II), du moment que la consommation en clinker baisse en fonction du taux d'ajout utilisé. Le ciment portland composé (C.P.J.-C.E.M II) avec ajout minéral se distingue par un durcissement ralenti à sa période initiale en comparaison avec un ciment Portland ordinaire sans ajout, c'est-à-dire sans constituant secondaire (C.P.A.-C.E.M I) [3]. Cette propriété latente du ciment avec ajout minéral (C.P.J.-C.E.M II), nécessite l'emploi d'un bon activant, chimique (utilisation des solutions alcalines qui modifient la prise et le durcissement), mécanique (broyage poussé du liant hydraulique) ou thermique (accélération des réactions chimiques par l'élévation de la température) [4]. Les ciments composés avec ajouts minéraux (C.P.J.-C.E.M II) ont des temps de prise un peu plus longs que les ciments Portlands purs (C.P.A.-C.E.M I), surtout dans le cas de bétonnage par temps froid. On sait que les temps de prise peuvent être raccourcis [5] :

- * grâce à une finesse (surface spécifique) plus grande,
- grâce à l'emploi d'adjuvants accélérateurs (la soude, la potasse, les chlorures de sodium, ...).

- L'objectif de cette étude est d'évaluer expérimentalement l'influence de la finesse (surface spécifique)

des ciments aux ajouts minéraux sur la résistance mécanique du mortier. Ce travail est une contribution à l'amélioration des propriétés des mortiers par activation mécanique de deux types de ciments (C.P.J.-C.E.M II) de différentes cimenteries (ciments fabriqués avec différents ajouts minéraux actifs et inertes : laitier et tuf).

2- MATÉRIAUX UTILISÉS

2.1- Ciments composés utilisés

Deux types de ciments composés «CPJ-CEM II» de différentes cimenteries algériennes ont été utilisés dans notre étude expérimentale qui sont :

CPJ-CEM II de Sour-El Ghoulane (Wilaya de Bouira).
CPJ-CEM II de Hadjar Soud (Wilaya de Skikda).

Ces deux types de ciments aux ajouts minéraux étudiés sont des CPJ-CEM II/ A et CPJ-CEM II/B, qui présentent des compositions chimiques différentes (clinkers et ajouts minéraux différents).

Chaque type de ciment composé utilisé a été broyé dans un broyeur à boulets afin d'obtenir différentes finesses de mouture (différentes surfaces spécifiques) en faisant varier le temps de broyage de 15 à 30 minutes :

1^{ère} finesse (F1) : $t = 0$ min (finesse initiale de sortie de la cimenterie : finesse commercialisée du ciment).

2^{ème} finesse (F2) : $t = 15$ min (temps de broyage est égal à 15 minutes).

3^{ème} finesse (F3) : $t = 30$ min (temps de broyage est égal à 30 minutes).

Le pourcentage d'ajout des deux ciments utilisés est inférieur à 35 % conformément à la norme NF-EN-1971 qui stipule que les ciments composés «CPJ-CEM II» doivent contenir au minimum 65% de clinker.

Le tableau 1 présente le type d'ajout minéral cimentaire utilisé pour les deux ciments composés étudiés

Ciments composés CPJ-CEM II	Sour-El-Ghozlane	Hdjar-Soud
Clinker (%)	85	65
Régulateur de prise	Gypse	
Teneurs (%)	5%	
Ajouts	Tuf	Laitier
Teneurs (%)	10	30

Tableau 1: Ajouts minéraux des deux ciments composés étudiés.

La composition chimique des deux (02) types de ciments utilisés dans notre travail expérimental a été déterminée au moyen de la méthode d'essai «Fluorescence aux rayons X».

Le tableau 2 donne la composition chimique des deux ciments retenus dans notre étude expérimentale.

Types de Ciments	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)
CPJ-SG	23,48	5,63	3,28	60,60
CPJ-HS	24,77	5,81	3,68	64,03

	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Cl ⁻ (%)
	1,38	0,97	0,19	1,18	0,012
	1,19	0,93	0,19	1,19	0,008

Tableau 2: Composition chimique des deux types de ciments étudiés.

Nous avons retenu deux types de ciments composés CPJ-CEM II à base d'ajouts minéraux différents (tuf et laitier), ceci dans le but d'analyser l'influence de la surface spécifique des ciments composés à différents ajouts cimentaires sur les caractéristiques physiques des ciments à l'état anhydre et à l'état hydraté et aussi sur le comportement mécanique du mortier.

2.2- GRANULATS FINS (SABLE)

Le sable utilisé dans cette étude provient des abords de l'oued Maïter. Cet oued est situé entre les collines de Boussâada, entre lesquelles souffle un vent provenant du sud chargé de grains fins.

Le sable de dune de Boussâada, siliceux, ses grains roulés de formes arrondies et de surfaces lisses, est caractérisé par sa finesse, sa granulométrie et son diamètre maximal (grosier maximale) qui n'excède pas 3,0 mm.

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
Sable de dune	94,000	0,880	0,370	2,960	0,110

Eléments	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	C.L	P.F
Sable de dune	-	-	-	-	1,500

Tableau 3: Composition chimique du sable naturel utilisé (Fluorescence aux rayons X).

Le tableau 3 présente la composition chimique du sable naturel utilisé (sable de dune).

Les principales caractéristiques physiques des granulats fins utilisés (sable de dune) sont regroupées dans le tableau 4.

Matériaux utilisés	Masse spécifique [γ] en (kg/l)	Masse volumique [ρ] en (kg/l)
Sable de dune	2,58	1,50

Module de finesse Mf	Equivalent De sable (ESP/ESV)	Porosité [P] en (%)
1,73	74/76	42

Tableau 4: Caractéristiques physiques du sable utilisé.

2.3- EAU DE GÂCHAGE

L'eau de gâchage utilisée pour la confection du mortier doit être pure autant que possible, elle ne doit pas contenir une quantité excessive de vase, de matières organiques, acides, sels, matières sucrées, etc. ...

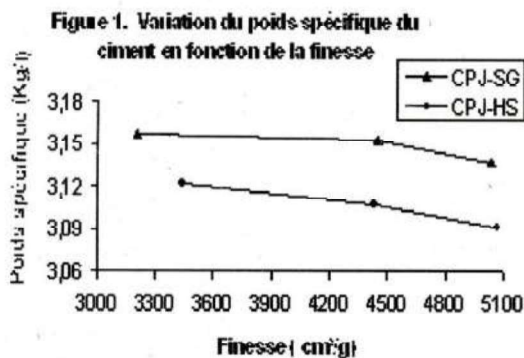
L'eau utilisée dans notre étude est une eau potable « eau du robinet » fournie au laboratoire de Génie civil à l'université de M'sila.

3- METHODE EXPERIMENTALE

Le mortier étudié dans ce travail expérimental est un mortier normal avec $C/S = 1/3$ et $E/C = 0,55$. Les propriétés physiques étudiées sont : la consistance normale et le temps de début et de fin de prise déterminées par l'essai de Vicat des pâtes pures des ciments composés utilisés. Les propriétés mécaniques étudiées des mortiers préparés sont la résistance à la compression et à la flexion sur des éprouvettes normalisées $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Après démoulage à 24 heures d'âge, les éprouvettes sont conservées dans un environnement humide (20°C et 100% HR) et ce jusqu'à l'âge de l'essai de flexion à 7, 28 et 90 jours. Les deux bouts de chaque éprouvette seront testés en compression afin de déterminer la résistance du mortier pour chaque dosage en laitier pour différents âges.

4- RESULTATS EXPERIMENTAUX

4.1- INFLUENCE DE LA FINESSE SUR LE POIDS SPECIFIQUE DES CEMENTS



D'après les résultats obtenus (figure 1), on remarque :

- Une différence significative du poids spécifique entre les différents ciments étudiés.
- Une diminution du poids spécifique au fur et à mesure que la finesse de mouture augmente.

Pour ce qui est de la différence entre les poids spécifiques des ciments étudiés, ceci peut être dû à la nature de l'ajout minéral incorporé dans le ciment composé (différence des masses volumiques des ajout minéraux).

Le ciment composé de type CPJ-CEM II/A (à base de tuf) présente des poids spécifiques nettement supérieures par rapport au ciment composé de type CPJ-CEM II/B (à base de laitier de haut fourneau), ceci est dû principalement à la quantité de clinker présente dans chaque type de ciment composé et à la porosité de l'ajout minéral utilisé.

4.2- INFLUENCE DE LA FINESSE SUR LA PÂTE DES CEMENTS UTILISES

Figure 2. Evolution de la consistance normale de la pâte de ciment en fonction de la finesse

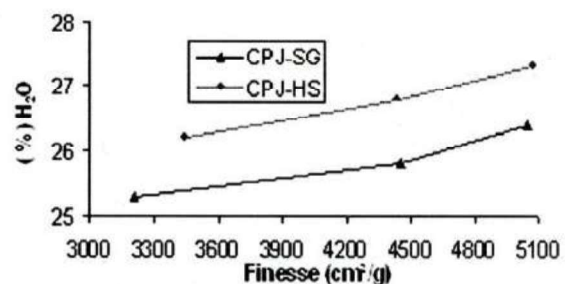


Figure 3. Evolution du temps de début de prise de la pâte de ciment en fonction de la finesse

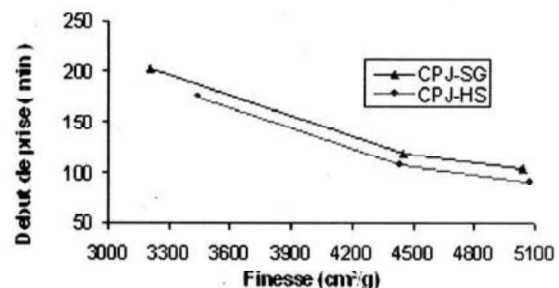
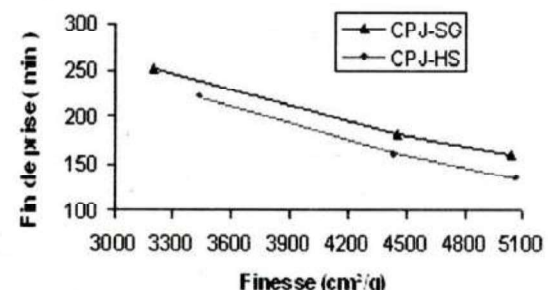


Figure 4. Evolution du temps de fin de prise de la pâte de ciment en fonction de la finesse



D'après les résultats obtenus (figures 2, 3 et 4), on remarque que l'augmentation de la finesse du ciment a un double effet :

- Augmentation de la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance normale de la pâte du liant.

- Raccourcissement des délais (temps) de prise.

On remarque aussi que la granulométrie (distribution des grains) du ciment, a une influence prédominante sur la demande en eau du ciment, ceci se traduit par :

- une augmentation de la surface totale des grains qu'il faut mouiller au fur et à mesure que le ciment étudié est broyé plus finement.

- une grande proportion de vides (diminution du poids spécifique) que l'eau devra remplir avant de participer à la maniabilité de la pâte de ciment (porosité élevée).

On constate que la demande en eau croît proportionnellement avec l'augmentation de la finesse de mouture du ciment, ceci est dû d'une part à l'augmentation de la surface totale des grains qu'il faut mouiller au fur et à mesure que le ciment étudié est broyé plus finement, et d'autre part à la diminution du poids spécifique (porosité élevée).

De même, on remarque que les temps de début et de fin de prise diminuent proportionnellement avec l'augmentation de la finesse de mouture des ciments, cela s'explique par le fait que la réaction pouzzolanique est accélérée à court terme. Ce qui veut dire aussi que la cinétique d'hydratation du liant devient de plus en plus rapide en fonction de l'augmentation de la finesse.

En effet, les particules très fines adhèrent les unes aux autres et déclenchent le phénomène de prise de la pâte de ciment. Ainsi l'effet de la grande surface spécifique sur l'accélération de la réaction pouzzolanique réagit avec la portlandite pour former d'autres cristaux supplémentaires de CSH.

Donc, on peut conclure que la finesse du ciment est une caractéristique importante : lors du gâchage, plus les particules sont fines, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète (raccourcissement des délais de prise).

4.3- COMPORTEMENT MECANIQUE DU MORTIER

Les résultats des essais mécaniques (compression et flexion) réalisés sur des éprouvettes de mortier à base de sable de dune avec différentes finesesses de mouture des ciments composés utilisés aux différents âges de durcissement (7, 28 et 90 jours), sont présentés par les figures 5 à 6,

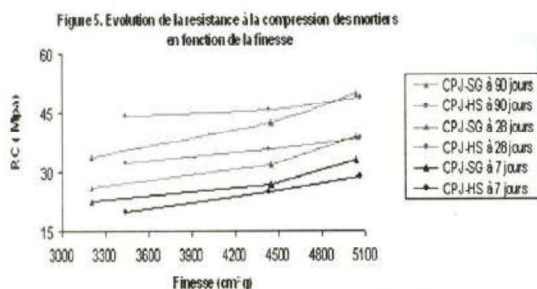
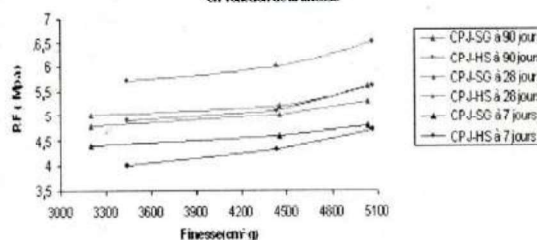


Figure 6. Evolution de la résistance à la flexion des mortiers en fonction de la finesse



On remarque que l'accroissement des résistances en fonction de l'âge de durcissement est pratiquement identique pour tous les échantillons testés.

D'après les résultats obtenus de la résistance à la compression et à la flexion des mortiers confectionnés à base de sable de dune (Boussâada), on constate que :

L'augmentation de la surface spécifique du ciment entraîne un accroissement des résistances mécaniques. Cela s'explique par l'accroissement de la cinétique rapide d'hydratation des minéraux C_3S et C_2S . Ces derniers sont donc les deux minéraux principaux qui assurent le développement des résistances à court et à moyen terme.

L'augmentation de la surface spécifique du ciment améliore nettement les résistances mécaniques du mortier. Ceci confirme le rôle de la finesse de mouture (activation mécanique ou broyage poussé) dans l'hydratation rapide et complète du ciment composé (réaction pouzzolanique) par la formation de la portlandite $C_3A(OH)_2$ libérée pendant l'hydratation du ciment. Cette réaction pouzzolanique donne naissance à un deuxième silicate de calcium hydraté supplémentaire (CSH) : principal responsable du durcissement de la pâte.

Donc la faiblesse des résistances aux jeunes âges (à court terme) peut être compensée par l'activation mécanique (augmentation de la finesse de mouture).

5- CONCLUSION

D'après les résultats expérimentaux obtenus, il ressort que l'augmentation de la surface spécifique et la composition (type et nature d'ajout minéral) des ciments aux ajouts minéraux sont les principaux responsables à l'amélioration de la réactivité latente des additions minérales et de l'accroissement des résistances mécaniques des mortiers.

Les résultats obtenus dans cette étude expérimentale, nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

* l'augmentation de la finesse (surface spécifique) des ciments composés influe sensiblement sur le besoin en eau nécessaire pour avoir une consistance normale.

* les temps de prise (début et fin) diminuent proportionnellement avec l'augmentation de la finesse des ciments composés.

* l'activation mécanique (broyage poussé) des ciments aux ajouts minéraux présente deux avantages essentiels : une bonne résistance mécanique du mortier ainsi qu'une cinétique d'hydratation accélérée aux premiers âges de durcissement (à court terme).

Enfin, les ciments aux ajouts minéraux doivent être finement broyés ($S_p > 3500 \text{ cm}^2/\text{g}$) afin d'accélérer la cinétique d'hydratation des ciments à court terme (amélioration de la réactivité des ajouts minéraux cimentaires) et assurer une bonne résistance mécanique du matériau.

6- BIBLIOGRAPHIE

1. **AK. SCHINDLER & K.J. FOLLIARD**, "Influence of supplementary cementing materials on the heat of hydration of concrete", Advanced in Cement and Concrete IX Conference, Colorado, pp. 10-14, 2003.
2. **R. KARA ALI**, "Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires", Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2002.
3. **A. BESSA, JP. BIGAS & JL. GALLIAS**, "Influence des additions minérales naturelles et industrielles sur les principaux paramètres de formulation de mortiers", XXI^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil, 2003.
4. **M. PAPADAKIS & M. VENUAT**, "Réactions d'hydratation", Fabrication et utilisation des liants hydrauliques, 2^{ème} Edition, Paris, pp. 187-205, 1966.
5. **K. HERMANN**, "Les ajouts", Bulletin du ciment, N° 4, Paris, 1995.