

ETUDE DES DEFORMATIONS DE RETRAIT D'UN MORTIER CONTENANT DIFFERENTES ADDITIONS MINERALES

Itim Ahmed.*, Ezziane Karim.*, Kadri El Hadj**

*Laboratoire de Geomatériaux, Université Hassiba Benbouali Chlef, Algérie, ahitim@yahoo.fr
Laboratoire L2MGC, Université de Cergy Pontoise, France.*

Résumé

Trois ajouts minéraux largement utilisés en cimenterie ont été testés afin de suivre leurs retraits durant plus d'une année d'observation lors de leur substitution d'une partie de ciment. Les essais ont été effectués sur des éprouvettes de mortiers normalisés où le ciment a été remplacé par 5, 15 et 25% de calcaire, 10, 20, 30 % de pouzzolane naturelle et 10, 30 et 50% de laitier des hauts fourneaux. La quantification séparée du retrait endogène et exogène a montré la contribution effective de chaque ajout sur la modifiatrice de la microstructure et de la production des hydrates supplémentaires. La microstructure a été bien améliorée en présence du calcaire et d'un taux modéré du laitier tandis qu'elle reste normale avec la pouzzolane naturelle. Le taux de substitution inférieur à 10%, des ajouts actifs, conduit à une production supplémentaire des hydrates. Cette surproduction qui accompagne le retrait endogène se manifeste beaucoup plus lorsque le calcaire est largement remplacé par le calcaire.

Mots clés : mortier, ciment, laitier, calcaire, pouzzolane, retrait, hydrates, microstructure.

1. INTRODUCTION

Le retrait du béton peut être défini comme la déformation d'un élément de béton libre de toute sollicitation mécanique extérieure dans une ambiance thermodynamique constante, ainsi on distingue le *retrait* dans une ambiance sèche et le *gonflement* dans une ambiance saturée. La prédiction de cette déformation est d'une très grande importance pour l'étude de la durabilité et de l'aptitude au fonctionnement à long terme des structures en béton (ponts, ouvrages hydrauliques, etc.). En effet, elles peuvent être à l'origine de la fissuration, de pertes de précontrainte, d'une redistribution des contraintes, et même, plus rarement, de la ruine de l'ouvrage [1]. Cette variation dimensionnelle dépend de plusieurs paramètres tels que la composition du béton, la qualité de ses constituants, la taille des éléments ainsi que les conditions extérieures de conservation. Le retrait du béton possède différentes origines d'où on peut distinguer les différents retraits qui caractérisent le séchage du béton:

2. RETRAIT ENDOGENE

On appelle retrait endogène, le retrait provoqué par des phénomènes strictement internes au béton, en absence de tout échange d'eau avec l'extérieur, c'est ce qu'on appelle en thermodynamique un système fermé [1]:

Le retrait endogène est un phénomène propre à l'hydratation du ciment qui témoigne de son évolution et de la quantité des hydrates formés. Ce retrait est rapide et croit lorsque la quantité d'eau diminue, il s'achève (95 %) au bout de (1 à 4) semaines [1]. On distingue d'après l'évolution de la structure du matériau l'apparition de plusieurs phénomènes qui donnent au retrait endogène plusieurs formes de déformation d'où on présente les formes majeures qui le détermine.

- a) Retrait de serrage (Contraction Le Chatelier)
- b) Retrait thermique
- c) Retrait d'hydratation (auto-dessiccation)

3. RETRAIT EXOGENE

Le retrait exogène se produit lorsque les surfaces de l'élément sont libres et peuvent échanger l'humidité avec le milieu extérieur. Ceci provoque une perte d'eau à travers les pores de la pâte ce qui atteste de la qualité de la microstructure à conserver ou à perdre son humidité.

- a) Retrait de dessiccation
- b) Retrait de carbonatation

4. MECANISMES DU RETRAIT DE DESSICCATION

Le départ de l'eau présente initialement dans les pores du béton induit une déformation du squelette solide. Les expériences de retrait de dessiccation montrent que la distribution des pores et les caractéristiques du gel CSH ont une influence prépondérante sur la déformation de retrait de dessiccation. Les trois principaux mécanismes proposés pour les valeurs usuelles de l'humidité relative (plage 50-100 %) sont liés aux effets suivants [2]:

- a) Pression capillaire
- b) Pression de disjonction
- c) Variation de l'énergie surfacique solide

4. EFFET DES ADDITIONS MINERALES

En général, l'incorporation des additions minérales dans la composition du béton entraîne une demande en eau supplémentaire, un volume de pâte plus important et une formation supplémentaire de produits CSH, ce qui engendre un retrait plus important. De même, la présence des ajouts est accompagnée par une modification de la microstructure et une augmentation du pourcentage des pores fins comme le cas de la fumée de silice [3]; ce qui n'entraîne pas forcément un retrait important.

Dans une étude de synthèse, Mehta [4] reporte que le retrait des produits renfermant des mélanges de ciment Portland-pouzzolanes est généralement supérieur à celui du produit correspondant ne contenant

que du ciment Portland. Car le retrait est attribué à la teneur en CSH laquelle serait relativement plus élevée dans le cas des mélanges de ciment Portland-pouzzolanes. Les pâtes à la fumée de silice possèdent une structure des pores plus fins et par conséquent, retiennent plus d'eau condensée au niveau capillaire à une humidité relative donnée. A des taux d'humidité relative situés sous le niveau capillaire, les pertes de poids et de retrait sont limitées par la quantité de CSH ; celle-ci étant plus grande dans les pâtes aux fumées de silice [5].

Khatri et al. [6] examinent le retrait d'un béton ayant un E/C égal à 0.35, ils trouvèrent que la substitution de 10% de fumée de silice dans un ciment ordinaire augmente le retrait au jeune âge et réduit celui-ci à long terme. Cet effet est largement réduit lorsque la fumée de silice est substituée avec un ciment au laitier où la portlandite est moins disponible.

De même, Jianyong et Yan [7] observent, sur trois bétons de rapport E/C égal à 0.26 et confectionnés avec un ciment ordinaire, 30 % de laitier et le troisième de 10% de fumée de silice et 30% de laitier, que le retrait de dessiccation est pratiquement identique au jeune âge, après 28 jours les valeurs commencent à se distinguer et à 180 jours le retrait atteint respectivement 220, 96 et 127 micromètres. Cette réduction est attribuée au grand nombre d'hydrates formés lors de la présence de substance minérale qui rend la pâte plus rigide et moins déformable.

ACI Committée 232 [8], reporte que le retrait des cendres volantes augmente légèrement si le rapport E/C reste constant. Cet écart reste faible pour un taux de substitution inférieur à 20%. De même Mehta [5] confirme qu'aucune différence de retrait n'est observée sur des bétons comportant moins de 25% de cendres volantes. Par contre, lors de la présence de 50% de laitier le retrait est largement supérieur. Les mesures effectuées par Chen et Chan. [9] sur des éprouvettes de mortier contenant 35 et 68 % de laitier présentent un retrait supérieur à celui d'un mortier témoin, cet important retrait provoque des autocontraintes de traction et une fissuration de peau ce qui explique les chutes de résistance lors d'une forte présence de laitier. Quant à la fumée de silice, les résultats de retrait sont peu influencés par des taux inférieurs à 10%, et la différence de retrait devient plus marquante au delà de 25 % et d'autant plus lorsque le béton est exposé à une dessiccation précoce [5].

Atiz et al. [10] étudient l'évolution du retrait des éprouvettes de mortier ayant un rapport E/C égale à 0.4, ils concluent que le retrait d'un mortier renfermant 10, 20 et 30 % de cendres volantes est réduit respectivement de 25, 37 et 43% après 5 mois d'observation. Ceci est attribué certainement à la forte concentration de la chaux libre et de MgO dans ces cendres. Chindaprasirt et al [11] ont testé l'effet de la finesse des cendres volantes sur la déformation du retrait de dessiccation, les résultats confirment que tous les mortiers aux cendres volantes présentent un retrait moins important quelque soit la finesse et ceci à cause du besoin en eau qui se voit être diminué avec la présence de ces cendres.

Sur des éprouvettes en béton conservées 7 jours dans l'eau, Ravindrarajah et Tam [12] observèrent que le retrait augmente de 23 et 38 % lorsque on substitue le ciment par 20 et 40 % de cendres volantes pour un béton de classe 25 et de 10 et 32 % pour un béton de classe 35. Lorsque la durée de cure passe de 7 à 28 jours le retrait est réduit autant plus pour les taux élevés. Ils enregistrèrent une réduction de 2, 15 et 33% pour des taux de substitution de 0, 20 et 40%. Cette réduction de retrait avec l'augmentation de la cure est associée avec la faible porosité résultant de la lenteur de la réaction pouzzolanique.

5. ETUDE EXPERIMENTALE

Afin de bien valoriser les ajouts minéraux utilisés en cimenterie, nous avons procédé à la quantification de leurs effets sur les déformations différées dues à la dessiccation. Les mesures des déformations différées concernent les éprouvettes séchant à l'air libre pour la mesure du retrait de dessiccation et les éprouvettes isolées pour la mesure du retrait endogène. Le mortier destiné pour la mesure du retrait est composé d'un sable normalisé. Le ciment a été remplacé par 5, 15 et 25 % de calcaire 10, 20 et 30% de pouzzolane

naturelle et 10, 30 et 50% de laitier. La composition et les caractéristiques des matériaux utilisés sont regroupées dans le tableau 1.

Les éprouvettes de mortier sont confectionnées avec un sable normalisé avec les proportions sable-ciment-eau de 3 :1 :0.47. Une quantité de 1% d'un superplastifiant (medaplast) a été ajoutée afin d'améliorer la maniabilité. Les mélanges sont coulés dans des moules prismatique 4x4x16 cm et recouverts d'une toile de jute humide afin d'empêcher toute évaporation au très jeune âge. A un jour d'âge, les éprouvettes sont démoulées et préparées pour les mesures de retrait.

Tableau 1 : Caractéristiques des matériaux utilisés

Composante %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CL	Na ₂ O	K ₂ O	PAF	SSB cm ² /g	Teneur en verre
CEM I	20.58	4.90	4.70	62.8	0.53	2.28	2.17			1.00	3100	/
Laitier	42.2	5.85	1.9	42.2	4.72	1.54		0.12	0.43	0.8	3200	>80%
Pouzzoulane	46.4	17.5	10.5	10.5	3.8	0.4		3.4	1.5	4.31	3200	>15%
Calcaire	2.5	0.6	0.9	52.6	0.5			0.02	0.05	41.9	3400	/

Les éprouvettes de mortiers, âgées de 1 jour, sont munies d'une bande adhésive aux deux bouts pour éviter les effets de bord. Pour la mesure du retrait endogène les éprouvettes sont complètement recouvertes d'une mince couche de bitume entourée d'une bande adhésive pour assurer un milieu sans échange hydrique avec le milieu extérieur. Lors de la mesure du retrait, les éprouvettes sont placées dans un bâti de mesure de déformations de retrait doté d'un comparateur ayant une précision de 1µm. La figure 1 montre la position des éprouvettes dans le bâti de mesure.

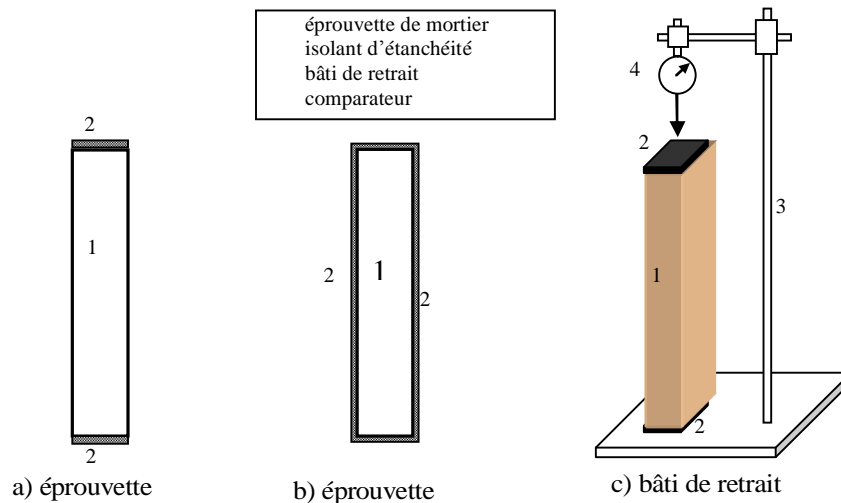


Figure 1 : Schémas du dispositif de mesure de retrait

5.1. RESULTATS DU RETRAIT DES EPROUVETTES

Le retrait total évolue très rapidement pour tous les types d'éprouvettes à cause de la taille de ces dernières qui rend la dessiccation plus favorable. Au jeune âge le retrait est presque indépendant de la composition du mortier, l'effet des ajouts minéraux ne se manifeste qu'après la première semaine avec une légère supériorité pour le ciment ordinaire. A long terme, la présence des ajouts minéraux diminue le retrait final en fonction de la qualité et la quantité de ces ajouts.

Le retrait total des éprouvettes au calcaire représenté sur la figure 2 montre une importance déformation dépassant celle du ciment sans calcaire. Après le septième jour, le retrait du mortier témoin évolue beaucoup plus rapidement et se distingue de ceux du calcaire jusqu'à l'âge de six mois. A long terme, le calcaire n'a pas d'effet significatif sur le retrait final où ses valeurs se rejoignent avec celles du ciment ordinaire autour de 1250 $\mu\text{m/m}$.

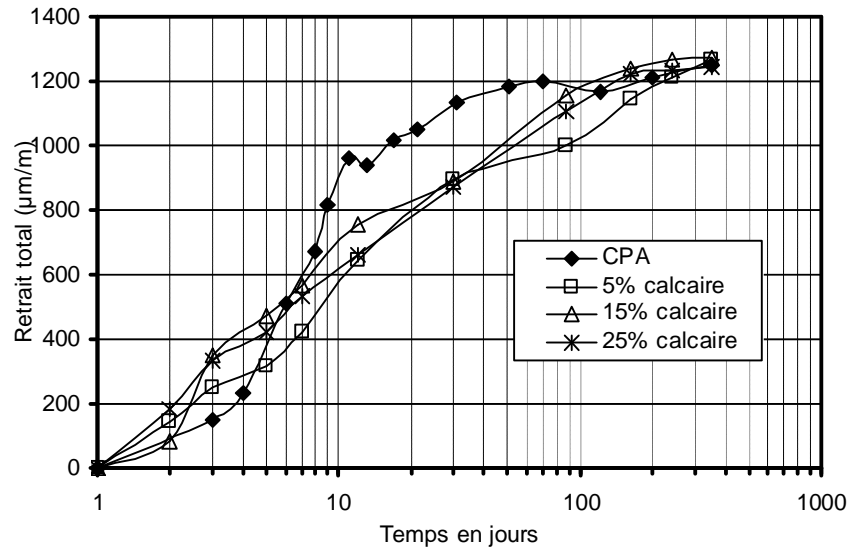


Figure 2 : Evolution du retrait total des éprouvettes au calcaire

Sur la figure 3, Le retrait des éprouvettes au ciment à la pouzzolane est peu supérieur à celle du ciment témoin à cause de la grande porosité engendrée par les ciments pouzzolaniques au jeune âge. Après le cinquième jour la pouzzolane engendre un retrait moins important que celui du ciment ordinaire après le déclenchement de sa réactivité. Après le dixième jour, l'échantillon à 10% de pouzzolane déclenche un retrait très important et dépasse celui du mortier témoin. A une année d'observation, le retrait de l'éprouvette à 20% de pouzzolane atteint celui de l'éprouvette témoin tandis que celui à 30% de pouzzolane reste légèrement inférieur.

Sur la figure 4, le laitier d'El-Hadjar fait diminuer le retrait tel qu'on obtient après une année d'observation 1250, 1163, 1140 et 1030 $\mu\text{m/m}$ pour le mortier au ciment ordinaire et ceux contenant respectivement 10, 30 et 50% de laitier. Cette diminution de retrait est beaucoup plus prononcée après la première semaine à cause de l'effet filler joué par le laitier et la qualité des pores à long terme.

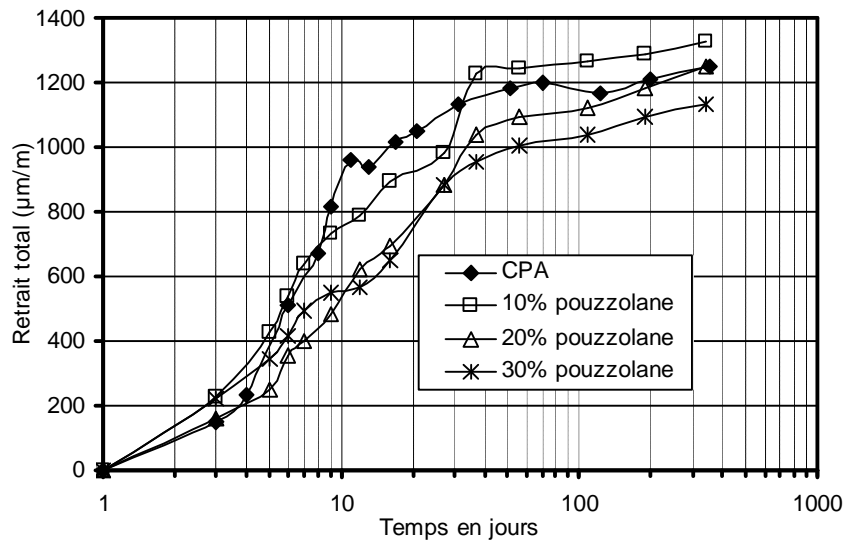


Figure 3 : Evolution du retrait total des éprouvettes à la pouzzolane

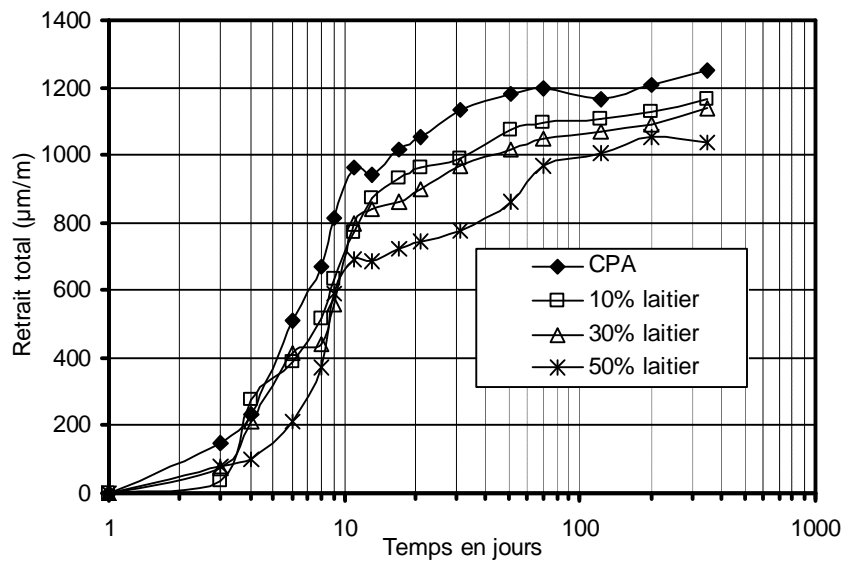


Figure 4 : Evolution du retrait total des éprouvettes au laitier

5.2. RESULTATS DU RETRAIT ENDOGENE

Le retrait endogène est la déformation des éprouvettes isolées sans échange hydrique avec le milieu extérieur. Ces valeurs témoignent de l'évolution de l'hydratation et la dessiccation interne due à la consommation d'eau par le processus chimique de la formation des hydrates. La figure 5 illustre les résultats du retrait endogène pour différents taux de calcaire. Avec son effet filler et sa création d'autres sites de germination, la formation des hydrates est accélérée en provoquant un retrait plus important durant la première semaine. A long terme, le retrait du mortier avec 5% de calcaire atteint celui du mortier témoin, par contre ceux avec 15 et 25 % de calcaire enregistrent une légère supériorité.

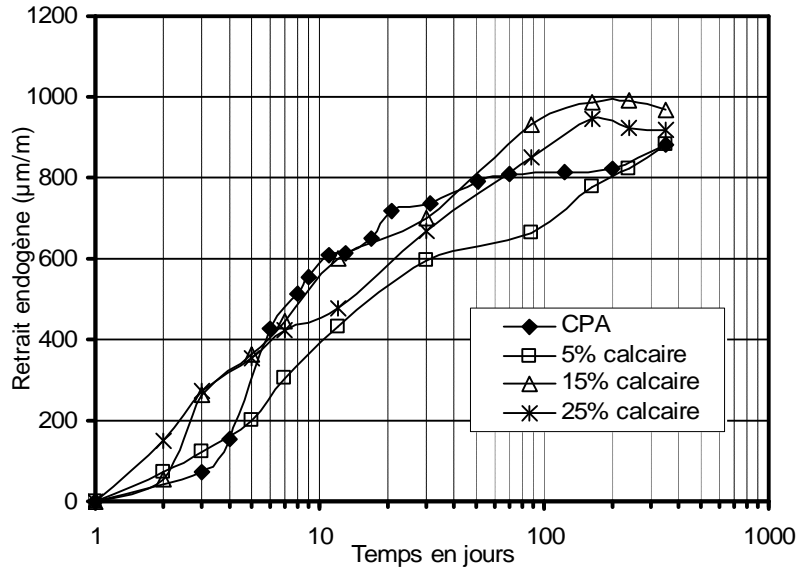


Figure 5 : Evolution du retrait endogène des éprouvettes au calcaire

L'évolution des courbes de retrait endogène des mortiers à la pouzzolane, de la figure 5.6, montre une activité de la pouzzolane au jeune âge due à une importante consommation d'eau par l'hydratation. Ce résultat est en conformité avec les résultats de l'essai de prise où les taux élevés de cette substance engendrent une accélération de la prise [13]. A long terme, Après le dixième jour, le retrait endogène des mortiers à la pouzzolane est réduit et devient nettement inférieur à celui du mortier témoin. Ce résultat confirme la faible pouzzolanité, de cet ajout, conduite par une faible teneur en verre [14].

L'effet du laitier sur l'hydratation est illustré sur la figure 7 où l'évolution du retrait endogène montre un effet passif du laitier au jeune âge, surtout avant le dixième jour. Après cette date, le taux de substitution devient plus prononcé où le laitier commence à prendre son effet et son hydraulité latente se déclenche après la saturation de la solution interstitielle par la chaux. Déjà le mortier à 10% de laitier engendre un retrait endogène supérieur, donnant lieu à une plus forte formation d'hydrates. Par contre celui à 50% de laitier, son retrait endogène est largement inférieur témoignant d'un taux de substitution excessif conduisant à des produits d'hydratation moins nombreux.

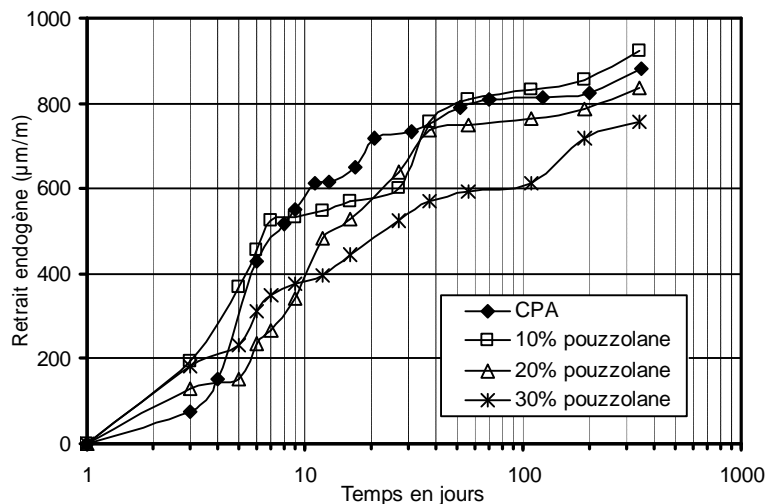


Figure 6 : Evolution du retrait endogène des éprouvettes à la pouzzolane naturelle

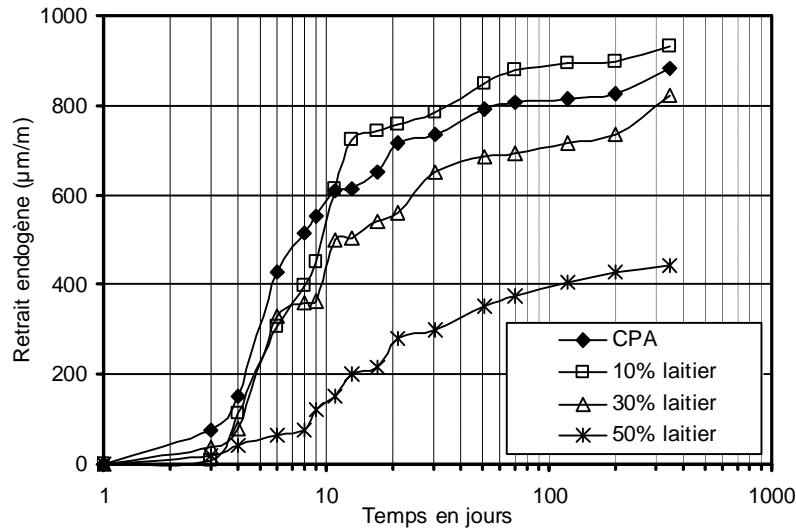


Figure 7 : Evolution du retrait endogène des éprouvettes au laitier

5.3. RESULTATS DU RETRAIT EXOGENE

Le retrait exogène représente la déformation des éprouvettes en présence d'un échange hydrique avec le milieu extérieur. Ces valeurs représentent la combinaison entre la dessiccation et la carbonatation qui témoignent de la porosité de la microstructure et sa capacité à favoriser le séchage. Il est mesuré comme la différence des retraits de deux éprouvettes l'une libre et l'autre isolée. Les figures 8, 9 et 10 illustrent les résultats pour les différents ajouts et leurs taux de substitution utilisés.

Le retrait exogène des éprouvettes au calcaire représenté sur la figure 5.8 montre un effet positif au jeune âge quelque soit la quantité de calcaire présente dans le ciment. Après la première semaine, la pâte au calcaire est moins poreuse avec des pores plus affinés empêchant ainsi la dessiccation. A une année d'observation, le retrait enregistré est de 367, 384, 305 et 325 µm/m pour le mortier témoin et ceux contenant respectivement 5, 15 et 25% de calcaire.

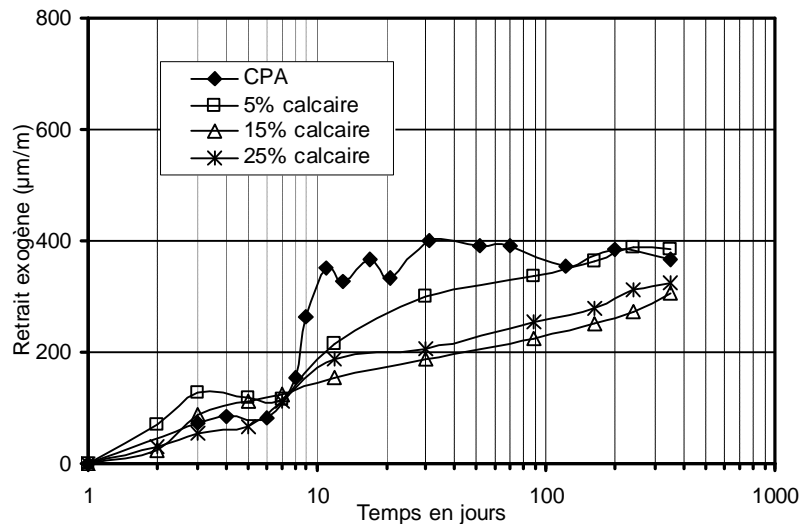


Figure 8 : Evolution du retrait exogène des éprouvettes au calcaire

Le retrait exogène des éprouvettes à la pouzzolane naturelle est représenté sur la figure 5.9 et qui montre une activité précoce de cette substance, caractérisée par une nette réduction du retrait. Cette réduction est

d'autant plus marquante après la première semaine où la pouzzolanité commence à prendre effet. Cette réduction est due à la qualité de la microstructure et à l'affinement des pores qui empêchent l'évaporation de l'eau. A long terme, le retrait de dessiccation est presque identique indépendamment de la quantité de ciment substitué.

Le laitier contribue par sa finesse et son hydraulicité à réduire la dessiccation pour les taux modérés de 10 et 30%. Au jeune âge, les éprouvettes au laitier développent un retrait identique à celui de l'éprouvette témoin jusqu'à l'âge de sept jours où l'addition de 50% de laitier se manifeste par une plus forte dessiccation. A long terme, on peut conclure qu'une utilisation modérée du laitier réduit le retrait par l'amélioration de la qualité de la microstructure. Le retrait de dessiccation représenté sur la figure 5.10, montre une qualité de la microstructure d'un ciment comportant 30% de laitier identique à celle d'un ciment portland et beaucoup plus meilleure pour des taux inférieurs.

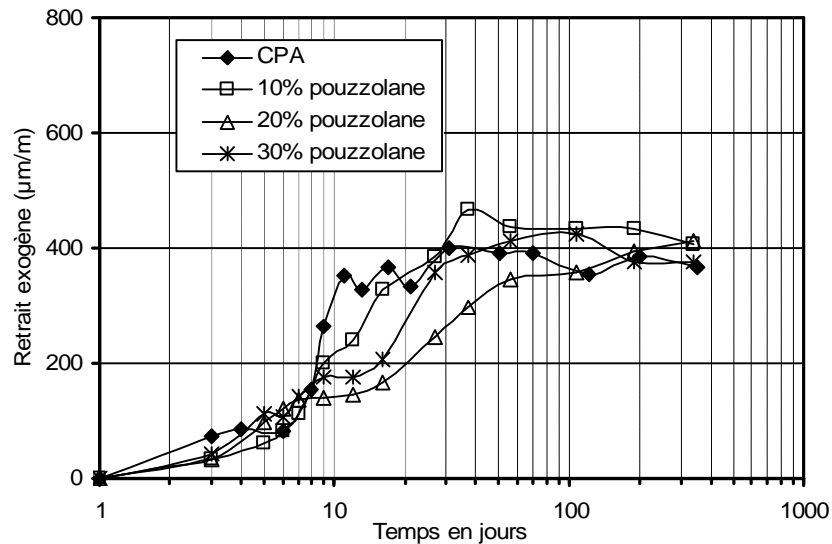


Figure 9 : Evolution du retrait exogène des éprouvettes à la pouzzolane naturelle

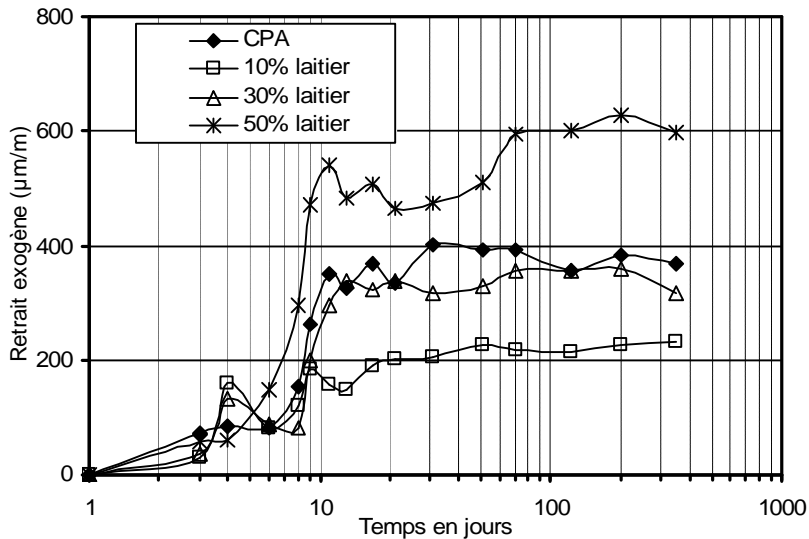


Figure 10 : Evolution du retrait exogène des éprouvettes au laitier

6. CONCLUSION

La présence des ajouts minéraux à des taux convenables fait diminuer le retrait de dessiccation, cela est le résultat de leur contribution à l'amélioration de la microstructure. Le calcaire engendre un retrait semblable à celui du ciment ordinaire, par contre le laitier fait diminuer le retrait final proportionnellement aux taux de substitution. De son côté, la pouzzolane naturelle fait augmenter le retrait à 10% de substitution et une fois ce taux dépassé sa valeur est réduite. Les pertes d'eau sont plus significatives au jeune âge pour le calcaire et le laitier. Ceci montre la nécessité d'une cure prolongée pour les éprouvettes de laitier et de calcaire et un peu moins pour celles à la pouzzolane pour éviter toute perte d'eau qui peut entraîner l'affaiblissement de l'hydratation.

REFERENCES

- 1 Acker P., "Comportement mécanique du béton: Apports de l'approche physico-chimique", Rapport de Recherche LPC, N°152, Juillet 1988, 122p.
- 2 Baron J., "Les retraits de la pâte du ciment", dans, "Le béton hydraulique : connaissance et pratique", Presses des ENPC, 1982, pp.485-502.
- 3 Sellevold E.J., Nilsen T., "Les fumées de silice condensées dans la fabrication du béton: une étude mondiale", dans, "Matériaux supplémentaires en cimenterie", CANMET, 1987, pp.183-273.
- 4 Mehta P.K., "Pouzzolanes naturelles", dans, "Matériaux complémentaires en cimentation", Editeur V.M. Malhorta, 1987. pp.3-38.
- 5 Mehta P.K., "Pozzolanic and cementitious by-products in concrete : Another look", Proceedings of the 3th CANMET/ACI International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Trondheim, Norway, 1989, pp.1-43.
- 6 Katri R.P., Sirivivatnanon V., Gross W., "Effect of different supplementary cementitious materials on mechanical properties of high performances concrete", Cement and Concrete Research, Vol 25, N°1, 1995, pp.209-220
- 7 Jianyong L., Yan Y., "A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete", Cement and Concrete Research , Vol 31, N°8, 2001, pp.1203-1206.
- 8 ACI Committee 232, "Use of fly ash in concrete, Manual of concrete practice", ACI 232.2R-96, 33p.
- 9 Chen J.C., Chan Y.W., "Effect of temperature and humidity conditions on the strength of blast furnace slag cement concrete", Proceedings of the 3th CANMET/ACI International Conference of fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Trondheim, Norway, 1989, pp.1377-1397.
- 10 Atis C.D., Kilic A., Sevim U.K., "Strength and shrinkage properties of mortar containing a nonstandard high calcium fly ash", Cement and Concrete Research, Vol 34, N°1, 2004, pp.99-102.
- 11 Chindaprasirt P., Homwuttiwong S., Sirivivatnanon V., "Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulphate resistance of blended cement mortar", Cement and Concrete Research, Vol 34, N°7, 2004, pp.1087-1092.
- 12 Sri Ravindrarajah R., Tam C.T., "Properties of concrete containing low calcium fly ash under hot and humid climate", Proceedings of the 3th CANMET/ACI International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Trondheim, Norway, 1989, pp.139-155.
- 13 K. Ezziane, E. H. Kadri, A. Hallal and R. Duval, Effect of mineral additives on the setting of blended cement by the maturity method , Materials and Structures, Available online 24 Avril 2009.
- 14 K. Ezziane, A. Bougara, A. Kadri, H. Khelafi, E. Kadri, Compressive strength of mortar containing natural pozzolan under various curing temperature, Cement and Concrete Composites, Vol. 29, N° 8, September 2007, Pages 587-593.