



Evolution de l'Hydratation du Ciment au Laitier en Utilisant les Essais Thermogravimétriques

Y. KELLOUCHE, A. BOUGARA

Université Hassiba BenboualiChlef, Algérie

Corresponding author: Yasmina.kellouche@yahoo.fr

Résumé : Ce travail s'intéresse à l'analyse des résultats des essais thermogravimétriques dans le but d'évaluer la réactivité du laitier d'El-Hadjar. L'analyse thermogravimétrique est une technique expérimentale d'étude macroscopique de la matière. Elle a pour objectif la caractérisation des matériaux par mesure directe de la perte de masse en fonction de la température et (ou) du temps. Les essais de cette analyse sont effectués sur des pâtes de ciment renfermant différents taux de substitution de laitier (0%, 30%, 50% et 70%) et ayant une surface spécifique de 310 m²/kg avec un rapport E/C de 0.40 hydratées pendant 1, 7 et 28 jours, sous une cure de température de 40°C. Le but de ce travail est l'étude d'évolution de l'hydratation du ciment au laitier en utilisant les essais thermogravimétriques. L'eau liée chimiquement aux hydrates et la portlandite sont quantifiées dans des plages de température bien spécifiées. Les résultats trouvés indiquent que les quantités d'eau non évaporable et de portlandite sont inversement proportionnelles aux taux de substitution de laitier pour tous les âges. Ce résultat ne peut pas confirmer la pouzzolanité du laitier utilisé. La résistance à la compression du ciment au laitier est en corrélation avec la quantité d'eau non évaporable au jeune âge mais elle est différente à long terme.

Mots clés - thermogravimétrie, eau non évaporable, portlandite, résistance à la compression, laitier, pouzzolanité.

Abstract : This work is interesting by the analysis of thermogravimetric test results in the aim of assessing El-Hadjar slag reactivity. Thermogravimetric analysis is an experimental technique of macroscopic study of the material. It has for objective the characterization of materials by direct measure of the loss of mass according to the temperature and (or) of time. The tests of this analysis are made on cement pasts containing various substitution rates of slag (0%, 30%, 50% and 70%), having a specific surface of 310 m²/kg with E/C report of 0.40, hydrated during 1, 7 and 28 days under a temperature cure of 40°C. The purpose of this work is the study of cement slag hydration evolution by using thermogravimetric tests. The chemically bound water to hydrates and portlandite are quantified in well specified temperature ranges. The found results indicate that the quantities of non-evaporable water and portlandite are inversely proportional to slag's substitution rates for all the ages. This result cannot confirm the pouzzolanicity of the used slag. The compressive strength of blended cement slag is in correlation with non evaporable water quantity at early age, but it is different at long-term.

Keywords - thermogravimetry, no-evaporable water, portlandite, compressive strength, slag, pouzzolanicity.

I. INTRODUCTION

L'analyse thermogravimétrique (ATG) est une technique expérimentale d'étude macroscopique de la matière. Cette technique permet l'étude d'espèces ou de systèmes réactionnels dont la transformation au cours du cycle de température s'effectue avec variation de masse. Elle a pour objectif la caractérisation des matériaux par mesure directe de leur masse en fonction de la température et (ou) du temps. Elle permet aussi de quantifier dans un matériau cimentaire l'eau liée chimiquement (eau non évaporable), la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et les carbonates de calcium issus de la carbonatation ou contenus initialement dans des granulats. Cette technique détermine la température et le changement de poids des réactions de décomposition, qui permet les analyses de composition quantitatives. Ivindra Pane et Will [1] ont étudié l'hydratation des pâtes de ciment Portland renfermant trois types d'ajouts minéraux (cendres volantes, laitier granulé et la fumée de silice) en utilisant l'analyse thermogravimétrique et la calorimétrie isotherme. Ils ont observé que l'eau liée chimiquement obtenue est proportionnelle à la chaleur d'hydratation et peut être utilisée comme une mesure d'hydratation. La perte de masse due à la décomposition des $\text{Ca}(\text{OH})_2$ des produits d'hydratation peut être utilisée pour quantifier la réaction pouzzolanique. Les résultats du degré d'hydratation quantifiés en utilisant l'eau liée chimiquement indiquent que l'hydratation globale est retardée en présence des pouzzolanes particulièrement pour les pâtes renfermant le laitier. Escalante J.I. et al. [2] ont utilisé la même technique sur des pâtes de ciment renfermant le laitier, où ils ont estimé la quantité des $\text{Ca}(\text{OH})_2$ par l'analyse thermogravimétrique à la phase 450-550°C. Ils ont observé que cette quantité diminue significativement avec l'augmentation du pourcentage de laitier de substitution. Ils ont expliqué cette observation par le fait que le ciment hydraté produit la portlandite et le laitier la consomme pour former des produits d'hydratations additionnels.

Hinrichs et Older[3] ont rapporté que le pourcentage du laitier n'a pas d'effet significatif sur la réactivité du laitier dans l'ordre de 30 à 60% de remplacement, mais la réactivité diminue à 80% de substitution. Dans une autre étude, Escalante et al.[2] ont établi que la réactivité diminue avec l'augmentation du taux

de substitution du laitier dans le mélange expliquant que cela peut être une conséquence de la réduction du milieu d'activation alcaline prévu par l'hydratation du ciment. D'autre part, Battagin et al. [5] ont montré que le mélange avec un faible taux de remplacement en laitier a une faible réactivité entre 14 et 180 jours. Et même Lumely et al [6] ont trouvé que le degré de réactivité diminue avec le taux de remplacement du laitier et avec la diminution du rapport eau/solide.

Cheng et al.[7] ont étudié l'effet du taux de substitution de laitier sur le développement de résistance de trois mélanges (A : témoin, B : 40% de laitier et C : 60% de laitier). Ils ont conclu qu'un taux de substitution élevé présente une résistance à la compression élevée à long terme. Dans le même contexte, Khatib et Hibbert[8] ont observé qu'il y a une diminution systématique de la résistance avec l'augmentation du taux de substitution au jeune âge. Au delà de 28 jours, la présence du laitier est très efficace, où la résistance du ciment au laitier renfermant 40 à 60% de laitier dépasse celle du ciment Portland. Une réduction appréciable de la résistance pour tous les âges est observée pour un taux de remplacement de 80%.

Dans l'étude expérimentale faite par A. Naceri et I. Messaoudene[9], ils ont pu montrer que l'incorporation au-delà de 30% du laitier d'Elhadjar à un mortier entraîne une diminution des résistances mécaniques. A l'âge de 28 jours et 90jours, les mortiers contenant jusqu'à 30% de laitier avec une finesse de 3500 cm^2/g atteindront des résistances comparables à celles d'un mortier témoin sans ajout. Par contre, Kumar S. et al. [10] ont établi qu'en augmentant les quantités du laitier broyé par broyeur à usure (broyage interne et broyage séparé), les résistances au jeune âge et à long terme des échantillons contenant 80% et 70% respectivement de laitier sont plus élevés que celle du ciment commercial, et que le laitier broyé séparément par broyage à usure peut remplacer le clinker en toute sécurité jusqu'à 80% sans détérioration des propriétés.

II. PRESENTATION DE L'ESSAI THERMOGRAVIMETRIQUE

Thermogravimètre

Le thermogravimètre est une thermo balance qui sert à mesurer les variations de masse. Il comporte trois parties fondamentales : la balance proprement dite, qui assure la pesée en continu

de l'échantillon, le four avec sa régulation de température et le dispositif d'enregistrement. La figure ci-dessous illustre le schéma d'un thermogravimètre.

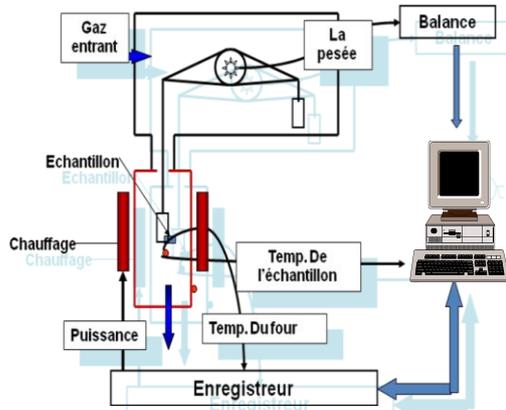
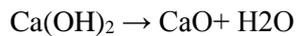


Fig.1 : Principe de fonctionnement de la thermobalance d'analyse thermogravimétrique et Thermodifférentielle

Courbe thermogravimétrique idéale

La figure 2 présente un exemple de courbes thermogravimétriques ATG et ATD d'une pâte de ciment [11]. La perte de masse se produit pendant les phases de températures suivantes

- De 25 à 415°C : une partie d'eau combinée dans les CSH s'évapore et il y a aussi une décomposition du sulfate de calcium entre 180-300°C.
- D'après la courbe ATG, la perte de masse due à la déshydratation du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ qui se déroule dans la région 420-550°C dont la réaction chimique est :



- S'il y a lieu d'une carbonatation, qui se déroule dans la rangée de température de 600-780°C, ainsi la quantité détectée par l'ATG doit être prise en considération.

Tableau 1 : Composition chimique des matériaux utilisés

(%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Mn_3O_4	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	LOI	SO_3
CEMI 52.5N	22.81	7.68	3.09	0.07	1.14	58.13	0.32	0.71	0.35	5.37	-
Laitier	38.20	7.96	4.68	2.04	3.82	42.18	0.20	0.65	0.33	-1.06	0.47

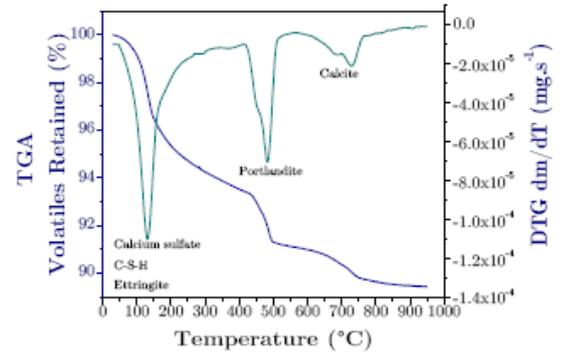


Fig.2 : Courbes ATG et ATD d'un ciment Portland hydraté pendant 12 heures [11]

III. EXPERIMENTATION

Matériaux utilisés

Nous avons utilisé un ciment Portland ordinaire CEM I 52.5N provenant de Lafarge, ayant une surface spécifique de 420 m²/kg et un laitier granulé de haut fourneau produit par l'usine sidérurgique d'El-Hadjar (Annaba). Le laitier utilisé est broyé dans un broyeur à boules jusqu'à obtention d'une surface spécifique de 310 m²/kg. La composition chimique de ces deux matériaux est présentée dans le tableau 1.

L'humidité est de 18% pour le ciment Portland et 0% pour le laitier, l'indice hydraulique du laitier $[(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2] = 1.41$ et sa teneur en verre = 97.9%.

Préparation des échantillons

Les échantillons de pâtes sont préparés avec un rapport eau/liant de 0.40 et coulés dans des moules cubiques de 20 mm de côté. Ces échantillons sont couverts d'une couche de tissu humide pendant 24 h pour éviter l'évaporation. Ils sont ensuite démoulés et conservés dans un bassin d'eau sous une température de cure de 40°C jusqu'à l'âge de l'écrasement. Après les essais de compression, les fragments de pâtes (petits morceaux) sont pris à partir des cubes écrasés pour l'essai thermogravimétrique à différents âges (1, 7, et

28 jours). Ces fragments sont submergés dans l'acétone pour arrêter l'hydratation et empêcher la carbonatation, ensuite séchées dans un

dessiccateur. Et enfin, ils sont broyés pour les faire ensuite passer au tamis de 63 µm.

Déroulement de l'essai thermogravimétrique

Le thermogravimètre utilisé dans cette recherche est le modèle Perkin Elmer Pyris1, les échantillons préparés sont chauffés de la température ambiante jusqu'à 1000°C avec une vitesse de 10°C/min. L'environnement de chauffe (four) est maintenu dans une atmosphère de gaz nitrogène ayant un débit de 15 ml/min. Le four est refroidi rapidement avec de l'eau de 1000°C à 100°C. Le porte échantillon utilisé est en céramique. Avant le commencement des essais, le calibrage du dispositif est effectué. L'essai est facile et ne demande généralement que 40 min.

Paramètres d'étude

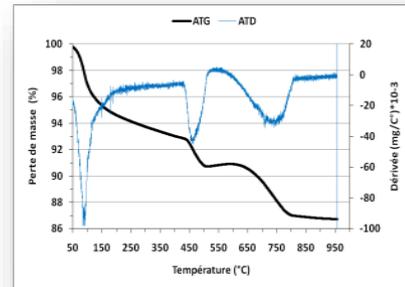
Notre étude est basée essentiellement sur la quantification de l'eau liée chimiquement contenu dans les produits d'hydratation de pâtes de ciment au laitier renfermant différents taux de substitution de laitier (0%, 30%, 50% et 70%) ayant une finesse de 310 m²/kg avec un rapport E/C de 0.4hydratés pendant 1, 7, et 28 jours et soumis à une cure de température de 40°C.

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

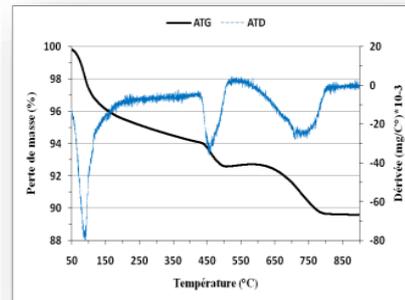
Courbes thermogravimétriques

La figure 3 représente les courbes thermogravimétriques de pâtes de ciments renfermant différents taux de substitutions de laitier (0%, 30%, 50% et 70%) ayant une surface spécifique de 310 m²/kg avec un rapport E/L=0.4 hydratées pendant 1 jour sous une température de cure de 40°C. En général, on a pu remarquer 4 pics essentiels pour tous les types de paramètres étudiés qu'on a interprété en se référant à la littérature comme suit :

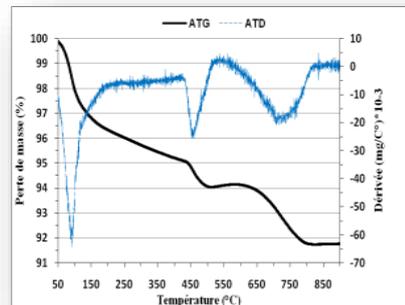
- Entre 50 à 150°C : ce pic est dû à l'évaporation de l'eau libre et la décomposition d'une partie des CSH [12,13].
- Entre 150 et 450°C : c'est la plage de la décomposition des CSH et de l'ettringite [12,13].
- Entre 450 à 550°C : ce pic est le fait de la décomposition des CH [12-15].
- Entre 650 à 750°C : ce pic est dû à la décarbonatation de la calcite CaCO₃ s'il y a lieu une carbonatation de la portlandite [12,14].



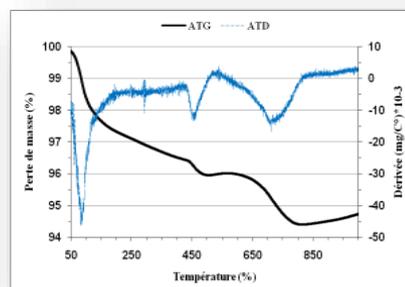
(a)



(b)



(c)



(d)

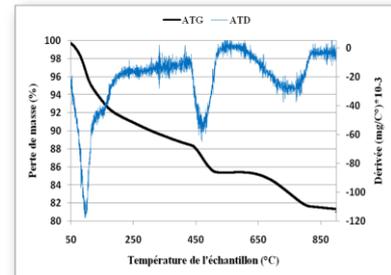
Fig.3 : Courbes thermogravimétriques des pâtes de ciments hydratées pendant 1 jour sous une température de cure de 40°C ; (a) :0% - (b) :30% - (c) :50% et (d) : 70% de laitier.

D'après cette figure, on remarque que les intensités de pics sur les courbes de dérivées (ATD) diminuent avec l'augmentation du pourcentage de laitier dans les mélanges (0%, 30%, 50% et 70%). Cela nous indique que ces intensités ont un rapport avec les pertes de masses représentées par les courbes (ATG). Comme on peut remarquer que le premier pic se constitue de deux pics dans la plage de température entre 50 à 450°C qui correspond à une grande perte de masse sur les courbes ATG.

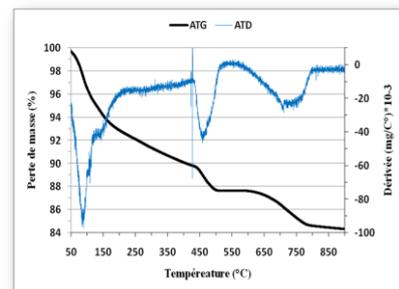
Le même comportement est observé sur la diminution de l'intensité des pics (observés sur les courbes ATD) avec l'augmentation des taux de substitution de laitier pour des pâtes renfermant différents taux de substitution de laitier hydratées pendant 7 jours (voir fig.4). Il est constaté l'apparition d'un 4^{ème} pic dans les courbes ATD dans la plage de température de 120°C à 160°C qui est probablement lié à l'évaporation de l'eau liée chimiquement contenue dans d'autres phases de produits d'hydratation. [12, 13]. Ce pic devient plus visible avec l'augmentation du taux de substitution de laitier, cela peut être attribué à la contribution des produits d'hydratation du laitier à la formation des hydrates à cet âge [16].

D'après la figure 5 représentant l'évolution de la perte de masse des quatre échantillons de pâtes renfermant différents taux de substitution de laitier (0%,30%,50% et 70%) ; à 1 jour d'hydratation la perte de masse diminue avec l'augmentation du taux de substitution de laitier sur toutes les plages de température. Si la plage de température entre 105 à 450°C est considérée, les valeurs enregistrées de la perte de masse due à l'évaporation de l'eau liée chimiquement aux hydrates CSH sont 4.2% pour l'échantillon sans laitier, 3.44%, 2.9% et 1.98% respectivement pour les échantillons renfermant 30%, 50% et 70% de laitier. Ainsi, il est remarqué que la perte de masse diminue proportionnellement avec l'augmentation du taux de substitution de laitier. Le remplacement d'une partie de ciment par le laitier fait ralentir la réaction d'hydratation. Ce phénomène peut être attribué à l'effet de dilution qui se produit au jeune âge et qui est le résultat de remplacement du ciment par un ajout minéral, ceci résulte moins de quantité de ciment hydraté et par suite réduction de la résistance à la compression [17,2 et 18]. Comme on peut le constater, l'ajout (le laitier) à ce stade (1 jour d'hydratation) a un effet négatif sur l'eau liée chimiquement contenue dans les hydrates CSH ; une diminution de 47% au total est

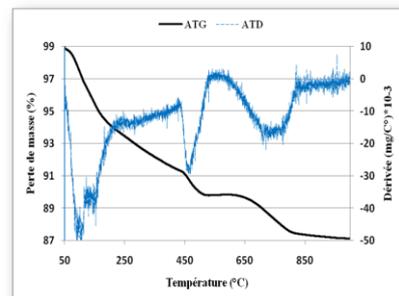
enregistrée par rapport au mortier témoin (0% de laitier). Cela peut amener à dire que le laitier ne contribue pas positivement à l'hydratation à cet âge.



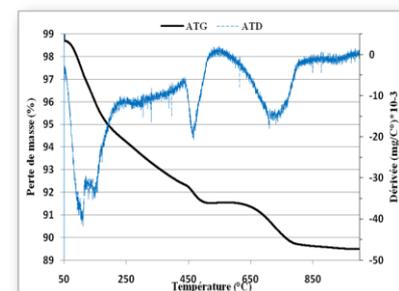
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig.4 : Courbes thermogravimétriques pour des pâtes de ciments hydratées pendant 7 jours sous une cure de température de 40°C ; (a) :0% - (b) :30% -(c) :50% et (d) : 70% de laitier.

A sept jours d'hydratation, les résultats obtenus de la perte de masse due à l'évaporation de l'eau liée chimiquement aux hydrates CSH

sont 7.77% pour l'échantillon sans laitier, 6.84%, 6.1% et 5.26% respectivement pour les échantillons renfermant 30%, 50% et 70% de laitier. Une nette augmentation est observée en comparant ces valeurs avec les résultats obtenus pendant la cure de 1 jour due à l'avancement du processus d'hydratation. Il est aussi remarqué que le taux de diminution de la perte de masse représentant l'évaporation de l'eau liée chimiquement à 7 jours d'hydratation n'est pas aussi significatif que celui de 1 jour ; il est de 31% et 14% respectivement pour 1 et 7 jours d'hydratation correspondant à 50 et 70% de taux de substitution de laitier. Cette observation indique la contribution du laitier à l'hydratation malgré que l'effet de dilution reste toujours le plus prépondérant (l'effet de l'hydratation du laitier controversé l'effet de dilution) [14].

plage de température de 105 à 450°C. La quantité des CSH qui reflète l'avancement de la réaction d'hydratation, est estimé par la quantification de la perte de masse due à l'évaporation de l'eau liée à ces hydrates. En prenant les résultats des essais thermogravimétriques, on a calculé la quantité d'eau non évaporable par la relation suivante [17,4]:

$$ENE = [(W_{105^\circ} - W_{450^\circ}) / W_{450^\circ}] \times 100(1)$$

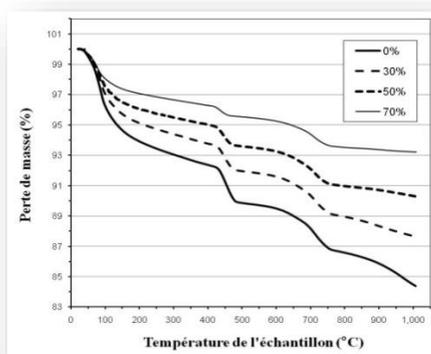
Avec :

ENE : quantité d'eau non évaporable en pourcentage.

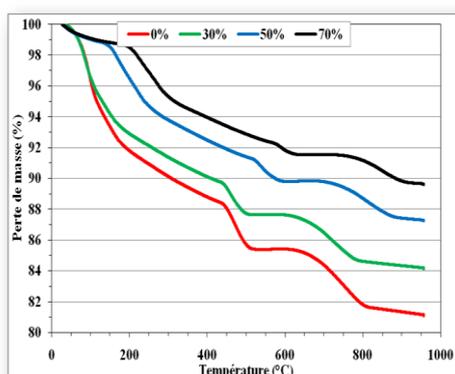
W_{105° : perte de masse à 105°C exprimée en pourcentage par rapport à la masse initiale brûlée;

W_{450° : perte de masse à 450°C exprimée en pourcentage par rapport à la masse initiale brûlée;

L'évolution de l'eau non évaporable des échantillons en fonction du taux de substitution de laitier est représentée par la figure 6. Il est remarqué que la quantité d'eau non évaporable est inversement proportionnelle à l'augmentation du taux de substitution de laitier pour tous les âges. A 1 jour d'hydratation, la quantité de l'eau non évaporable diminue de 4.2% pour une pâte de ciment pur (sans laitier) à 2.01% pour une pâte renfermant 70% de laitier. Ce résultat peut être attribué au remplacement d'une partie de ciment par le laitier, appelé effet de dilution qui est inversement proportionnel au taux de remplacement de l'ajout cimentaire (laitier) [16,19], ou bien à la faible réactivité du laitier utilisé [17,20]. La diminution obtenue en variant le pourcentage du laitier de 0 à 70% est moins significative à long terme ; elle est de 52%, 33% et 32% respectivement pour les âges 1, 7 et 28 jours d'hydratation. Ces résultats montrent que l'effet de la présence du laitier n'est pas remarquable au jeune âge [17,19], mais à long terme la présence du laitier est apparente malgré que l'effet de dilution reste toujours le plus prépondérant (l'effet de l'hydratation du laitier controversé l'effet de dilution)[17]. Ces résultats sont en concordance avec des études antérieures [2,18,22]. Il est aussi constaté que le taux de substitution de 30% utilisé est le taux optimal correspondant à une valeur maximale de la quantité d'eau non évaporable et qu'au-delà de ce taux une nette diminution est observée particulièrement à 28 jours.



(a)



(b)

Fig.5 : Perte de masse dans les pâtes de ciments renfermant différents taux de substitution de laitier hydratée pendant : (a) 1 jour, (b) 7 jours, sous une température de cure de 40°C

Quantité d'eau non évaporable

D'après la littérature [12,13], la déshydratation des hydrates de silicate de calcium (CSH) se produit en général dans la

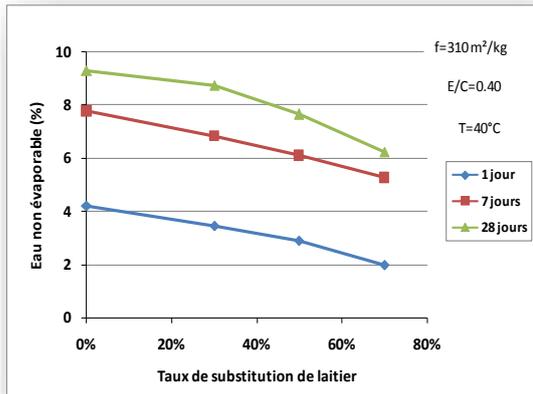


Fig.6 : Effet du taux de substitution de laitier sur l'eau non évaporable

Résistance à la compression

Les courbes représentant l'eau non évaporable montrent une allure presque similaire à celles représentant le développement des résistances observées pour les ciments au laitier sous les mêmes conditions d'hydratation (voir fig.7). A 28 jours, il est observé que la résistance à la compression des pâtes de ciment au laitier augmente avec l'augmentation du taux de substitution de laitier jusqu'à 50%, au-delà de laquelle une perte de résistance est observée. Ces résultats prouvent que la résistance à la compression est liée à la quantité d'eau non évaporable, particulièrement au jeune âge (1 et 7 jours) [9,17]. Cela s'explique par le fait que l'incorporation du laitier dans le ciment entraîne systématiquement une réduction des composés minéraux C_3S et C_2S . Ces derniers, sont les principaux minéraux qui assurent le développement des résistances à court et moyen terme [9].

A long terme, le comportement de l'évolution de la résistance diffère de celui de l'eau non évaporable, on pense qu'il n'y a pas que la quantité d'eau non évaporable liée aux produits d'hydratation qui reflète le développement de la résistance mais probablement la nature, le type d'arrangement de ces produits et la porosité [2,16,22]. En comparant ces résultats avec des études antérieures [4,17] sur le développement de la résistance et de la réactivité, on peut constater qu'il y a une corrélation entre la quantité d'eau non évaporable et la résistance mécanique du ciment composé. A 28 jours, le taux de remplacement de 50% donne la valeur maximale de résistance qui représente 104% de celle d'une

pâte témoin. Ce résultat est presque comparable à celui rapporté par Nacéri et Messaoudene[9] qui ont établi qu'à l'âge de 28 jours et de 3 mois les mortiers contenant jusqu'à 30% du laitier d'Elhadjar ayant une finesse de $350 \text{ m}^2/\text{kg}$ atteindront des résistances comparables à celles d'un mortier témoin sans ajout.

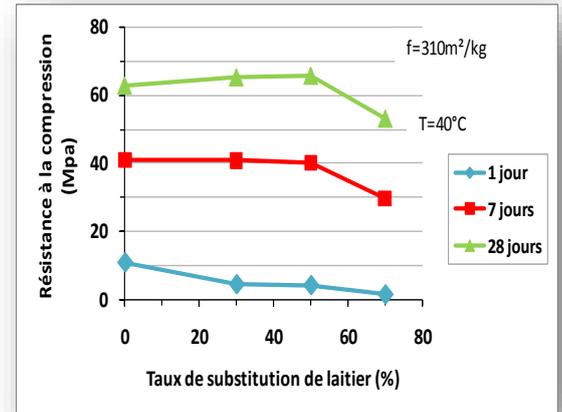


Fig.7 : Effet du taux de substitution de laitier sur la résistance à la compression

Quantité de portlandite

La décomposition de la portlandite se produit en général dans la plage de température de 450 à 550°C , sa décarbonatation se fait dans la plage de température de 680 à 780°C [17,12,13]. La quantité des CH produite qui reflète le caractère d'hydratation du laitier (pouzzolanique ou hydraulique) est estimée par la quantification de la perte de masse due à l'évaporation de l'eau liée à ces hydrates dans la plage de température indiquée précédemment. En prenant les résultats des essais thermogravimétriques du chapitre 3, on a calculé la quantité de portlandite par la relation suivante [4,17] :

$$CH = \frac{74}{18}(W_{450^\circ} - W_{550^\circ}) + \frac{74}{44}(W_{680^\circ} - WW_{780^\circ}) \quad (2)$$

Avec :

CH : quantité de portlandite en pourcentage.

W_{450° : perte de masse à 450°C exprimée en pourcentage par rapport à la masse initiale brûlée;

W_{550° : perte de masse à 550°C exprimée en pourcentage par rapport à la masse initiale brûlée;

W_{680° : perte de masse à 680°C exprimée en pourcentage par rapport à la masse initiale brûlée;

W_{780° : perte de masse à 780°C exprimée en pourcentage par rapport à la masse initiale brûlée.

Cette quantité de CH doit être normalisée par rapport aux taux de substitution de laitier dans le mélange (exemple : pour un taux de remplacement de 50%, on divise les quantités de CH du ciment composé par 0.5).

La figure 8 représentant la variation de la portlandite avec le taux de substitution de laitier, montre une relation inverse entre ces deux paramètres ; en augmentant la quantité de laitier dans la pâte ciment-laitier, la quantité de portlandite diminue progressivement, cela est remarqué pour tous les âges 1, 7 et 28 jours d'hydratation. Par ailleurs, cette quantité de CH croît avec l'âge. La diminution des CH remarquée lors de l'augmentation de la quantité de laitier est soit dû à l'effet de dilution en substituant une partie du ciment par le laitier [19,16], ou bien au comportement pouzzolanique du laitier en consommant une part des CH produits par l'hydratation du ciment [17]. Ces résultats sont confirmés par l'étude faite par Bougara et al.[17] en utilisant 50% de laitier d'El-hadjar avec 50% de ciment Portland sous une cure de température de 20°C, la quantité de Portlandite est en diminution après 28 jours d'hydratation indiquant ainsi le caractère pouzzolanique du laitier d'El-hadjar.

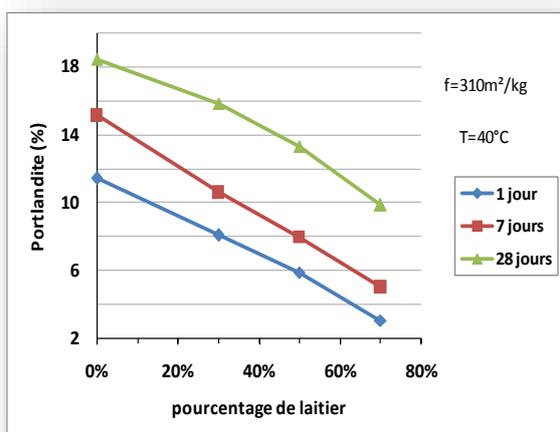


Fig.8 : Effet du taux de substitution de laitier sur la portlandite

V. CONCLUSION

La quantité d'eau non évaporable est inversement proportionnelle à l'augmentation du taux de substitution de laitier pour tous les âges.

Le taux de substitution de laitier de 30% est le taux optimal donnant les quantités d'eau non évaporables les plus élevées.

Il est à penser qu'il n'y a pas que la quantité d'eau non évaporable qui reflète le développement de la résistance mais probablement aussi la nature et le type d'arrangement de ces produits.

De même, la quantité de portlandite diminue progressivement avec l'augmentation du taux de substitution de laitier.

REFERENCES

- [1] I.Pane and W.Hansen, "Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis", *Cement and Concrete Research*, 35 pp. 1155-1164, 2005.
- [2] J.S.Escalante, L.Y.Gomez, K.K.Johal, G.Mendoza, H.Mancha et J.Mendez, "Reactivity of blast furnace slag in Portland cement blends hydrated under different conditions", *Cement and Concrete Research*, vol. 31 (2001), pp.1403-1409.
- [3] W.Hinrichs and I.Odler, "Investigation of the hydration of the Portland cement: hydration kinetics", *Adv. Cem. Res*, Vol.2, pp 9-13, 1989.
- [4] H. M.Dyson, "Early hydration in binary and ternary blended cement systems", PhD thesis, University of Leeds, 2005.
- [5] A.F.Battagin, p. 166-172 in 9th International Congress on the Chemistry of Cement. New Delhi, India 1992. Vol. 3.
- [6] J.S.Lumely, R.S.Golop, G.K.Moir and H.F.W.Taylor, "Degrees of reaction of the slag in some blends with Portland cements". *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, N°1, pp.139-151, 1996.
- [7] A.Cheng, R.Huang, J.K.Wu, C.H. Chen "Influence of GGBS on durability and corrosion behavior of reinforced concrete". *Materials Chemistry and Physics* 93:404-411, 2005.
- [8] J.M.Khatib, J.J. Hibbert "Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin". *Construction and Building Materials* 19: 460-472, 2005.
- [9] A.Nacéri and I.Messaoudene, "Effet de l'activation mécanique du laitier de haut fourneau sur le comportement mécanique du mortier", *Lebanese Science Journal*, vol.7, N° 2, 2006.
- [10] J.S.Kumar, A.Bandopadhyay, V.Rajinikanth, T.C.Alex and R.Kumar, "Improved processing of blended slag cement through mechanical

- activation", *Journal of Material Science*, vol. 39, pp. 3449 – 3452, 2004.
- [11] D.M. Roy and G.M. Idorn, "Hydration Structure and properties of blast furnace slag cements, mortars and concrete", *Porc-Al Concr. Inst.* 79 (6) (1982) 445 – 457.
- [12] K. Garbev, "Structure, properties and quantitative Rietveld analysis of calcium silicate hydrates (C–S–H Phases) crystallised under hydrothermal conditions" PhD Thesis, Institut für Technische Chemie von der Fakultät für Chemie und Geowissenschaften der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Germany; June 2004.
- [13] C.A. Strydom, J.H. Potgieter, "An investigation into the chemical nature of the reactivity of lime". In: Justness H, editor. *Proceedings 10th international congress on chemistry of cement*. Sweden: Gothenburg; 1997. p. 20–49.
- [14] S.C. Mojumdar, I. Janokta, "Thermophysical properties of blends from Portland and sulphoaluminate-belite cements". *Acta Phys Slovaca* 2002;52(5):435–46.
- [15] H.F.W. Taylor, *Cement chemistry*. 2nd ed. London: Thomas Telford Publication; 1998.
- [16] Chidiac, D.K. Panesar, "Evolution of mechanical properties of concrete containing ground, granulated blast furnace slag and effects on the scaling resistance S.E. test at 28 days", *Cement & Concrete Composites* 30 (2008) 63–71.
- [17] A. Bougara, C. Lynsdale, N.B. Milestone, "Reactivity and performance of blast furnace slags of differing origin, Cement and Concrete Composites, 2010, pp.1-6.
- [18] J.I. Escalante, "Nonevaporable" water from neat OPC and replacement materials in composite cements hydrated at different temperatures", *Cem. Conc. Res.*, 2003, vol.33, pp.1883-1888.
- [19] P. Lawrence et al., "Mineral admixtures in mortars effect of inert materials on short term hydration". 2003
- [20] A. Bougara, C. Lynsdale and K. Ezziane, "Activation of Algerian Slag in mortars, Const. and Build". *Mater.* 23 (2009), 542-547.
- [21] G.C. Bye, "Portland cement, composition, production and properties", Pergamon Press, *Materials Engineering Practice Series*, pp.149, 1983.