

# PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET DURABILITÉ DES CIMENTS TERNAIRES À BASE DE CALCAIRE ET DE LAITIER GRANULÉ

TOUFIK BOUBEKEUR<sup>1</sup>, BENSALD BOULEKBACHE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centre universitaire de Tissemsilt

<sup>2</sup> Département de Génie Civil, Université Hassiba Benbouali de Chlef

## RÉSUMÉ

Cet article présente les résultats d'un programme expérimental tendant à évaluer les propriétés mécaniques et la durabilité d'un ciment ternaire contenant du clinker (K), du calcaire (L) et du laitier granulé (S). Le calcaire ajouté au ciment (CEM I) conduit à une amélioration de l'hydratation induisant un gain de résistance à court terme. D'autre part, le laitier, par son pouvoir hydraulique latent, contribue par son hydratation à améliorer les résistances mécaniques à long terme. Par conséquent, avec un ciment ternaire composé de (K-L-S), une meilleure performance mécanique pourrait être obtenue.

Des prismes de mortier de ciment CEM I substitué jusqu'à 20% de calcaire et 40 % de laitier ont été testés à 2, 7, 28, 60 et 90 jours. Les résultats montrent la contribution du calcaire à l'hydratation du ciment CEM I au jeune âge en augmentant la résistance initiale des ciments. L'hydratation ultérieure du laitier est très efficace dans la production des ciments ternaires avec une résistance à la compression similaire ou plus élevée que celle du CEM I à partir de 60 jours. Des spécimens ont été testés dans des solutions de sulfate et d'acide pour l'étude de la durabilité des ciments composés dans les milieux agressifs. Les résultats ont montré que l'utilisation de 30 % à 40 % de laitier en substitution d'un ciment CEM I contenant 10 % de calcaire améliore sa résistance aux agents agressifs.

**Mots clés :** Ciment, Calcaire, Laitier, Résistance, Durabilité.



## 1. INTRODUCTION

L'industrie des matériaux de construction connaît un essor considérable en Algérie. La recherche actuelle sur les matériaux est concentrée sur le développement de nouveaux composites cimentaires, dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques, physiques et la durabilité des matériaux cimentaires. Les avantages du remplacement partiel du ciment par les ajouts minéraux sont divers. Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques et la durabilité, à la réduction du retrait au séchage. Ils permettent aussi la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment.

L'environnement des ouvrages en béton armé, en particulier dans les milieux agressifs, ainsi que la nature des composantes du ciment jouent un rôle prépondérant sur les propriétés mécaniques des ciments. Une propriété importante d'ingénierie du béton est la durabilité. Elle détermine la durée de vie des structures en béton de façon très significative. En raison des interactions du béton avec des influents externes comme le gel-dégel, la corrosion des aciers et les attaques chimiques, la durabilité du béton est menacée.

En Algérie, les cimenteries utilisent le calcaire, la pouzzolane et le laitier comme ajout pour la fabrication du ciment, le pourcentage d'ajouts est autour de 6 à 20% en conformité avec la norme NF EN 197-1 pour la production d'un ciment composée CEM II/A. La cimenterie d'Ain Touta de Batna produit un ciment ternaire en utilisant un complément de 6 à 20% de pouzzolane et de calcaire (<http://www.scimat.dz>), celle d'Ain El Kebira utilise 6 à 20% de laitier et de calcaire comme ajouts (<http://www.scaek.dz/cpj.asp>). Il est donc nécessaire d'évaluer l'effet de l'interaction entre le calcaire et le laitier sur les propriétés des ciments.

Dans le monde, environ 250 millions de tonnes de laitier sont produites, parmi lesquelles environ 90 millions de tonnes sont utilisées dans la production de ciments comme ajouts [1]. De nombreuses études ont montré que le laitier granulé a été largement utilisé comme un substituant dans le ciment CEM I en raison de ses avantages sur les propriétés mécaniques et la durabilité des mortiers ou bétons et ses avantages environnementaux et économiques [2, 3].

Le présent travail a pour objet l'étude de l'effet de la substitution de différentes quantités de laitier sur les résistances mécaniques des ciments à base de calcaire et son influence sur la durabilité vis à vis des milieux agressifs, tels que les sulfates et les acides.

## 2. MATÉRIAUX ET ESSAIS

Le ciment utilisé dans tous les essais est constitué de clinker provenant de la cimenterie d'Oued Sly (Chlef) et mélangé avec 5% du gypse pour régulariser la prise qui varie avec la composition chimique du ciment [4]. Le ciment a une

finesse de 2950  $\text{cm}^2/\text{g}$  et une masse volumique absolue de 3160  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

Le calcaire utilisé dans les essais est celui employé comme matière première dans la fabrication du ciment; il est broyé à une finesse d'environ 3400  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Le laitier utilisé, extrait des déchets de l'usine d'El Hadjar (Annaba) est broyé jusqu'à une finesse d'environ 3900  $\text{cm}^2/\text{g}$ , et présentant une masse volumique absolue de 2870  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

Les compositions chimiques du clinker, calcaire et laitier sont données dans le tableau 1.

Tableau 1. Compositions chimiques et propriétés physiques des matériaux utilisés

	Clinker	Calcaire (L)	Laitier (S)
CaO	64.76	53.13	42.20
SiO <sub>2</sub>	21.34	0.55	42.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.13	0.40	5.85
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.78	0.17	1.90
MgO	0.47	1.02	4.72
SO <sub>3</sub>	2.28	1.50	1.54
K <sub>2</sub> O	1.18	0.03	0.43
Na <sub>2</sub> O	0.04	0.03	0.12
PAF	1.00	43.13	0.80
Finesse ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	2950	3900	3400
Densité spécifique	3.14	2.72	2.87
C <sub>3</sub> S	66	/	/
C <sub>2</sub> S	14	/	/
C <sub>3</sub> A	7	/	/
C <sub>4</sub> AF	12	/	/

Le sable utilisé dans cette étude est un sable normalisé 0/2 (EN 196-1), il est siliceux, propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie. Quinze combinaisons ont été préparées à partir de différents pourcentages d'ajouts de calcaire et de laitier comme le montre le tableau 2.

L'effet des ajouts sur la résistance à la compression et sur la durabilité a été étudié à court et à long terme sur des éprouvettes de mortier normal de dimension 40x40x160 mm pour un rapport E/C égal à 0,5. En se basant sur les résultats des essais mécaniques, sept combinaisons ont été sélectionnées pour les essais de durabilité. La résistance aux sulfates et aux acides est mesurée sur trois sections de mortier contenant des ciments à base de calcaire avec différents taux de laitier (0, 20, 30 et 40 %).

Après démoulage, les éprouvettes sont conservées dans l'eau à 20 °C pendant 28 jours avant d'être soumises à l'immersion dans deux solutions de sulfates (5% de sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et 5% de sulfate de magnésium ( $\text{MgSO}_4$ ) et dans deux acides, 1% d'acide hydrochlorique (HCl) et 3% d'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Les solutions de conservations sont renouvelées tous les 30 jours.

Chaque deux semaine, la résistance aux sulfates est évaluée par l'expansion des éprouvettes conformément à la norme ASTM C-1012 [5], et la résistance chimique aux attaques par les acides est évaluée par la mesure de la perte de masse conformément à la norme ASTM C-267 [6].



Tableau 2. Les différentes combinaisons testées

Notation	CEM I	Calcaire (L)	Laitier (S)
LOS0 (CEM I)	100	0	0
L0S10	90	0	10
L0S20	80	0	20
L0S30	70	0	30
L0S40	60	0	40
L10S0	90	10	0
L20S0	80	20	0
L30S0	70	30	0
L10S10	80	10	10
L10S20	70	10	20
L10S30	60	10	30
L10S40	50	10	40
L20S10	70	20	10
L20S20	60	20	20
L20S30	50	20	30
L20S40	40	20	40

### 3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

#### 3.1 Résistance à la compression

##### 3.1.1 Effet du calcaire

La figure 1 montre le développement de la résistance à la compression des mortiers contenant du calcaire à l'âge de 2, 7, 28, 60 et 90 jours.

On remarque qu'au jeune âge (2 jours), la résistance à la compression est similaire à celle du mortier de contrôle pour une substitution de 10 % de calcaire. Une faible quantité de calcaire joue le rôle d'accélérateur des réactions d'hydratation.

Pour une substitution de 20 % de calcaire, la résistance diminue de 37 % par rapport au ciment CEM I. A 28 jours, la résistance à la compression diminue de 11 % et 20 % avec des substitutions de 10 % et 20 % de calcaire respectivement.

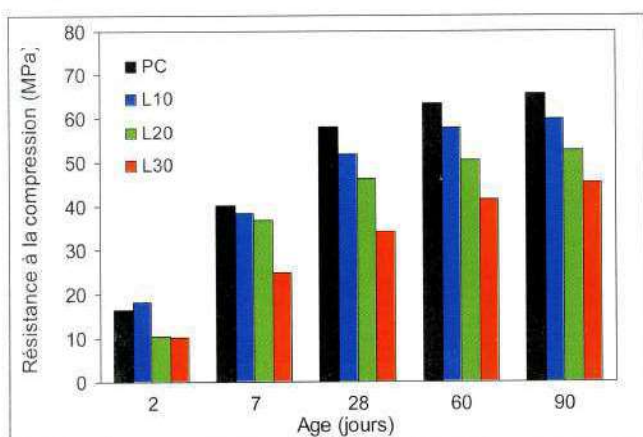


Figure 1. Evolution de la résistance à la compression des mortiers contenant du calcaire

##### 3.1.2 Effet du laitier

Les résultats de la résistance à la compression des mortiers contenant du laitier sont présentés dans la figure 2. La présence du laitier dans la composition du ciment modifie considérablement ses propriétés mécaniques au jeune âge et à long terme.

La substitution du ciment par du laitier a donné de faibles

résistances à la compression au jeune âge (2 à 7 jours) comparées à celles obtenues à long terme pour des taux de substitution supérieurs à 30%. Ceci est dû à la lenteur de l'activité hydraulique du laitier granulé d'El Hadjar au jeune âge [3]. La cinétique d'hydratation des ciments au laitier est lente et dépend du taux de substitution du laitier [2]. Pour une substitution de 30%, la résistance du ciment binaire LOS30 dépasse celle du CEM I à partir de 60 jours d'hydratation.

Cependant, les résistances à la compression des ciments au laitier pour des substitutions de 10 et 20% sont similaires à celle du CEM I. Plus particulièrement, pour les résistances à la compression des ciments avec 20 % et 30 % de laitier dépassant celle du CEM I de 3 % et 4 % respectivement. Des résultats similaires ont été observés par d'autres chercheurs sur des essais sur pâtes de ciment au laitier [2, 3].

La réaction d'hydratation du laitier est très lente, par conséquent en climat froid, il est recommandé d'utiliser un accélérateur de durcissement pour activer l'hydratation d'un ciment au laitier pour un taux de substitution supérieur à 20%.

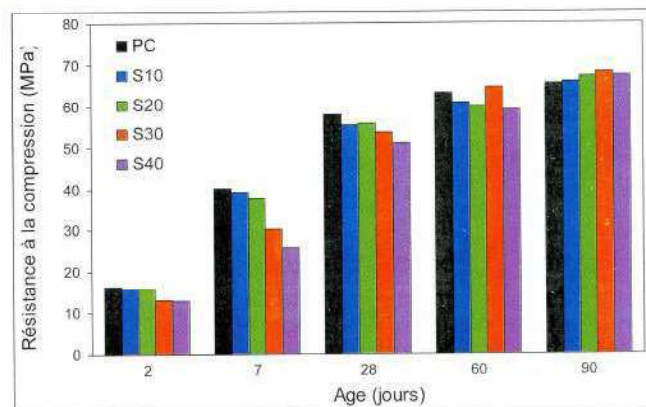


Figure 2. Effet du laitier sur la résistance à la compression

##### 3.1.3 Effet des couples calcaire-laitier

La figure 3 montre l'influence des différentes combinaisons calcaire-laitier sur la résistance à la compression des mortiers. On constate, au jeune âge (2 à 7 jours), une diminution de la résistance avec l'augmentation du pourcentage du laitier sur les mortiers de ciment à base de calcaire. Cependant, à long terme (90 jours), l'incorporation de 20 % à 30 % du laitier dans le ciment contenant 10 % de calcaire donne une légère amélioration des résistances de 5 % par rapport au ciment de contrôle (L10S0).

L'addition de 10 % de calcaire et de petites quantités de laitier (10 %) donne des résistances à la compression au jeune âge. Dans ce cas, une augmentation de 16 % a été obtenue par rapport au mortier de contrôle (L10S0). Cependant, à partir de 28 jours, la résistance à la compression change significativement en fonction des combinaisons. Pour un ciment ternaire (K-L-S), elle est maximale pour une combinaison de 10 % de calcaire et 20 % de laitier.



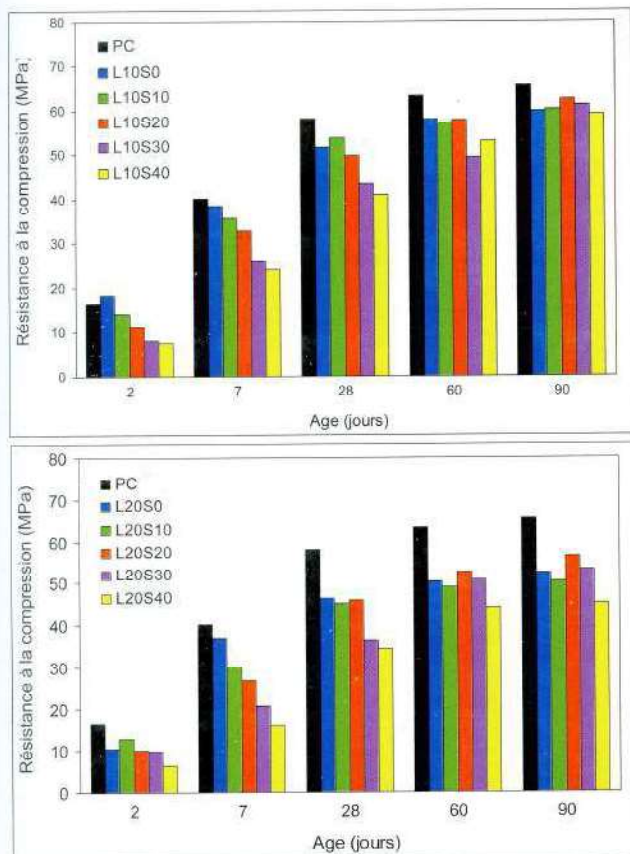


Figure 3. Variation de la résistance à la compression pour les différentes combinaisons

La figure 4 illustre les courbes d'isoréponses de la résistance à la compression et qui montre l'effet de la combinaison du calcaire et du laitier sur les résistances des ciments ternaires. A 2 et 7 jours, le point correspondant à la résistance à la compression maximale est obtenu par le remplacement de 10% de calcaire et d'un faible pourcentage de laitier. Une amélioration de 11 % par rapport à la résistance du ciment CEM I a été enregistrée. Cependant, après 90 jours, la résistance maximale est obtenue avec un large taux de substitution du laitier (20% à 40%). A ce niveau, la résistance est améliorée de 5 % par rapport au ciment CEM I correspondant.

Les courbes d'isoréponses ont une même enveloppe à 2 et 7 jours (figures 4 (a) et (b)), les valeurs optimales de la résistance se trouvent autour de 10% du taux de calcaire et un faible taux de laitier (0% -10 %). Toutefois, l'enveloppe des courbes d'isoréponses changent sensiblement après 28 jours. A 90 jours, la résistance maximale est obtenue lorsque le ciment ternaire contient une plus grande proportion de laitier (30 %) et environ 5 % de calcaire.

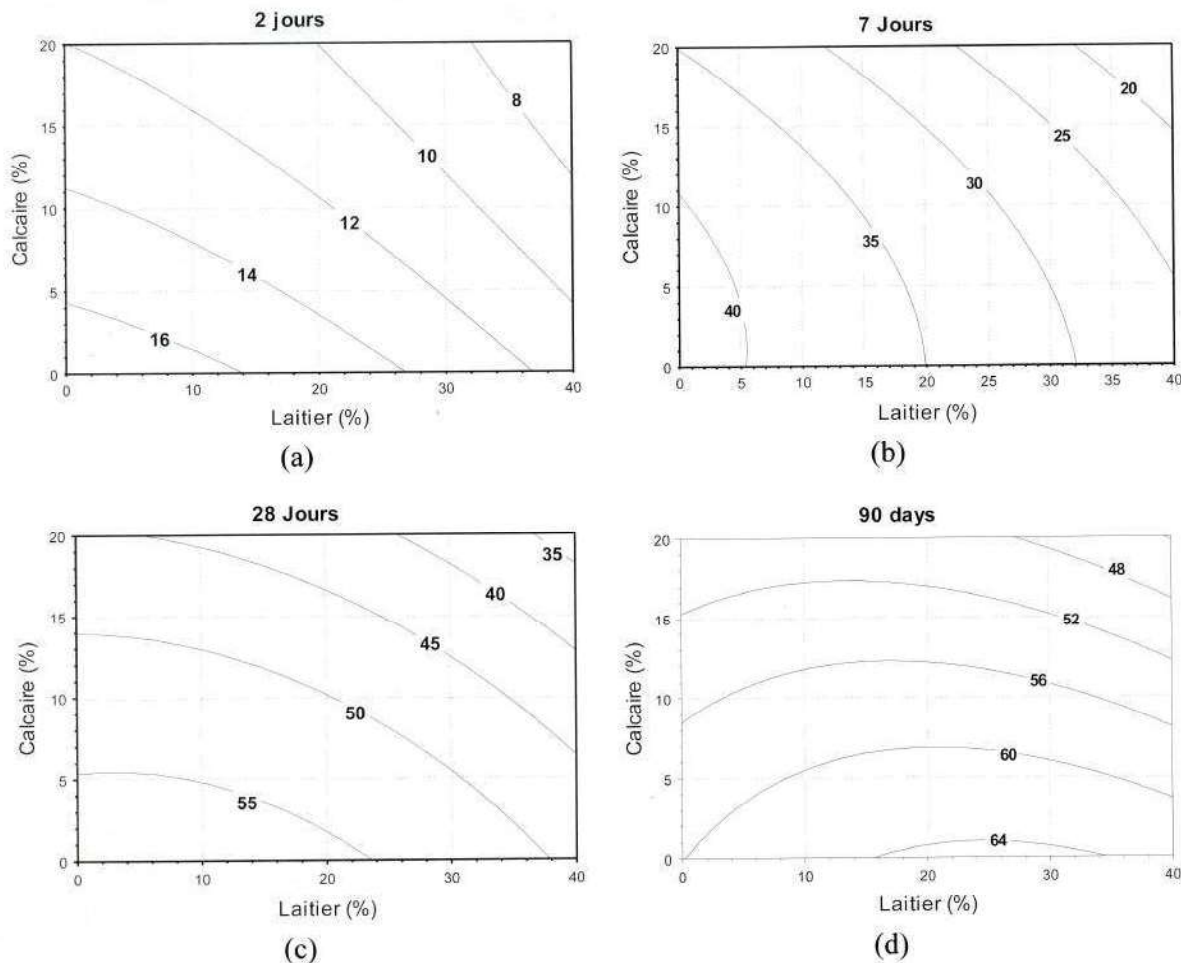


Figure 4. Courbes isoréponses de la résistance à la compression pour les systèmes ternaires



En résumé, pour un ciment ternaire, les résistances maximales à long terme (au delà de 28 jours), sont obtenues avec une substitution de 5% de calcaire et une substitution de 30 % de laitier. Ces résistances sont proches de celles du ciment témoin.

### 3.2 Durabilité

#### 3.2.1 Attaques des mortiers par les sulfates

Les résultats relatifs à l'expansion des mortiers immergés dans les solutions contenant 5 % de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et 5 %  $\text{MgSO}_4$  sont présentés dans la figure 5.

Par rapport à la solution  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , le ciment témoin CEM I présente l'expansion la plus importante soit 2.38 % après 180 jours. Par rapport à la solution  $\text{MgSO}_4$ , les mêmes observations ont été constatées où une expansion de 1.4 % a été trouvée.

Par rapport à la solution  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , les ciments binaires contenant 40 % de laitier (L0S40) présentent une expansion de 1.72 % soit une réduction de 28 % par rapport au ciment témoin CEM I. Des résultats similaires ont été observés sur des ciments ternaires contenant du calcaire et du laitier ajout [7, 8].

Pour les ciments binaires contenant 10 % de calcaire (L10S0), l'expansion après 180 jours d'immersion est de 1.64 % pour les éprouvettes placées dans la solution  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  contre 1,26 % pour les éprouvettes conservés dans la solution  $\text{MgSO}_4$ . Donc l'addition de 10 % de calcaire a permis de réduire l'expansion par rapport au ciment de contrôle CEM I de 31 % et 10 % dans les solutions sulfatiques  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et  $\text{MgSO}_4$  respectivement.

Pour les ciments ternaires, la substitution de 40 % de laitier et 10 % de calcaire (L10S40) a permis de réduire l'expansion de 49 % des éprouvettes placées dans la solution  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et de 44 % pour les éprouvettes placées dans la solution  $\text{MgSO}_4$ .

Finalement, Les ciments ternaires contenant 10% de calcaire et 30 % à 40 % de laitier offrent une bonne résistance aux attaques par les sulfates.

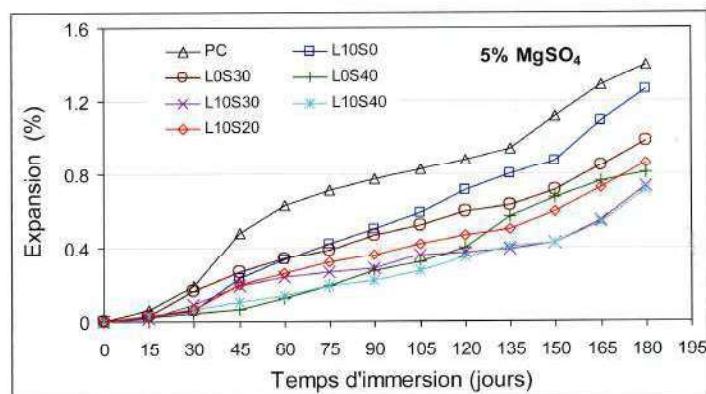
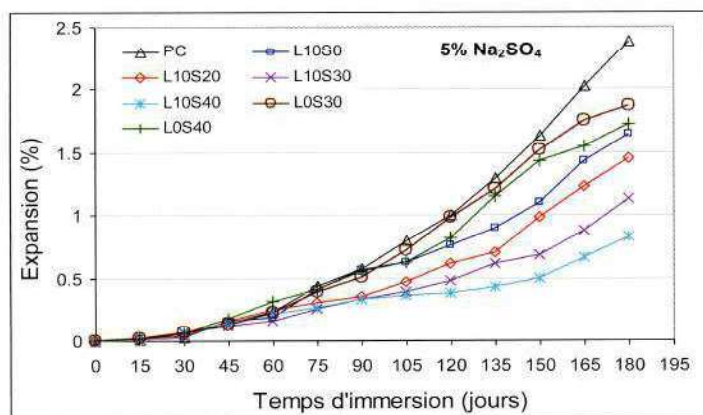


Figure 5. Expansion des mortiers en fonction des périodes d'immersion

#### 3.2.2 Attaques des mortiers par les acides

Les résultats relatifs aux attaques par les acides des mortiers de ciments contenant des différents pourcentages d'ajouts de calcaire et de laitier, dans les solutions de 1 %  $\text{HCl}$  et 3 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$  sont présentés dans la figure 6. La perte de la masse après 180 jours d'immersion pour le ciment sans ajout CEMI est de 9% et 60% pour 1%  $\text{HCl}$  et 3%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  respectivement.

A 180 jours, la substitution de 40 % de laitier dans le ciment (L0S40) a réduit la perte de masse par rapport au ciment CEM I de 20 % dans la solution de 3%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et de 47 % pour les éprouvettes conservés dans la solution de 1 %  $\text{HCl}$ . Des résultats similaires ont été trouvés sur des coulis de bétons contenant du laitier [9]. La perte de masse pour le ciment contenant 10 % de calcaire (L10S0) est presque similaire à celle du ciment de contrôle dans la solution de 3%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et la perte de masse est réduite de 22% dans la solution de 1%  $\text{HCl}$ .

La substitution de 40% de laitier dans le ciment contenant 10% (L10S40) de calcaire, a réduit la perte de masse par rapport au mortier de contrôle (L10S0) de 24 % dans la solution à 3 % de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et de 13 % dans la solution de 1% de  $\text{HCl}$ .

Les mortiers contenant 10% de calcaire et 30 à 40 % de laitier offrent une bonne résistance aux attaques par les acides

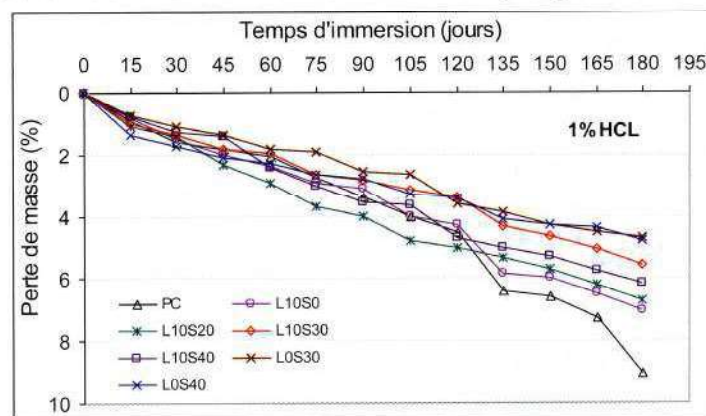


Figure 6a. Variation de la masse des mortiers en fonction de la période d'immersion dans 1% d' $\text{HCl}$  et 3%  $\text{H}_2\text{SO}_4$



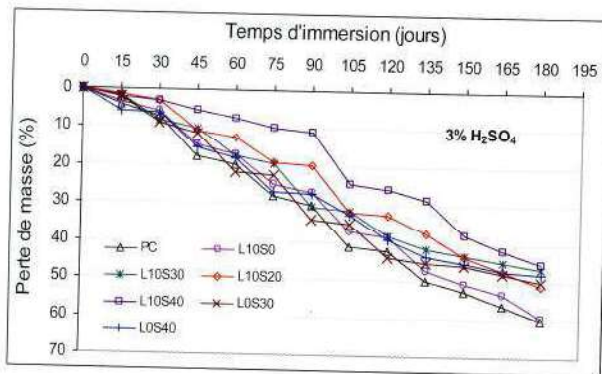


Figure 6b. Variation de la masse des mortiers en fonction de la période d'immersion dans 1% d'HCl et 3% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

#### 4. CONCLUSIONS

Les résultats obtenus à travers cette étude nous ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- le calcaire améliore l'hydratation du ciment à court terme. Un pourcentage de 10% est optimal pour aboutir à des performances maximales (résistances) d'un ciment composé.
- un ciment binaire contenant 20% à 30% de laitier présente de meilleures résistances à long terme.
- la substitution du clinker dans un ciment CEM I par 10 % de calcaire et 20 % à 30 % de laitier améliore la résistance à la compression à long terme, du fait que l'hydratation du laitier est très lente.
- l'expansion des mortiers dans une solution contenant 5 % de MgSO<sub>4</sub> indique que les ciments à base de 30% de laitier avec une addition de 10% de calcaire assurent une meilleure résistance aux sulfates. Par contre dans celle de 5 % de NaSO<sub>4</sub>, la meilleure résistance est obtenue avec une substitution de 40 % de laitier.
- les pertes de masses des mortiers de ciment contenant 10 % de calcaire montrent que l'incorporation de 30 % à 40 % du laitier améliore la résistance des mortiers aux attaques des acides HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.
- la substitution d'un ciment CEM I contenant 10 % de calcaire par 30 % de laitier constitue un ciment ternaire présentant de bonnes résistances mécaniques et de bonnes résistances aux attaques chimiques.

#### RÉFÉRENCES

- [1] Boukendakdji, O., Kenai S., Kadri E.H., Rouis F., Effect of slag on the rheology of fresh self- compacted concrete. *Construction and Building Materials* Vol.23, 2009, pp. 2593-2598.
- [2] Bougara, A. Lynsdale, C. Ezziane, K., Activation

of Algerian slag in mortars. *Construction and Building Materials* 23 (2009), pp. 542-547

[3] Menendez G., Bonavetti V., Irassar E.F. Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag. *Cement & Concrete Composites* vol. 25 (2003), pp. 61-67.

[4] Neville, A.M., *Properties of concrete*, Third Edition, Pitman, London, 1982.

[5] ASTM C-1012-95. Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution.

[6] ASTM C-267. Standard test method for chemical resistance of mortars. *Annual Book of ASTM Standards*, 04.05, 1997.

[7] Tsivilis S., Kakali G., Skaropoulou A., Sharp J.H., Swamy, R.N., Use of mineral admixtures to prevent thaumasite formation in limestone cement mortar. *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, 2003, pp. 969-976.

[8] Skaropoulou A., Tsivilis S., Kakali G., Sharp J.H., Swamy, R.N., Thaumasite form of sulfate attack in limestone cement mortars: A study on long term efficiency of mineral admixtures. *Construction and Building Materials* Vol.23, 2009, pp. 2338-2345.

[9] Bakharev, T. Sanjayan, J.G. Cheng, Y-B., Resistance of alkali-activated slag concrete to acide attack. *Cement and Concrete Research*, vol. 33, 2003, pp. 1607-1611.