

CHAPITRE 5

L'ETUDE DU LIANT DE LAITIER ACTIVE

5.1 INTRODUCTION

Les liants de laitier basique (activé) représentent des substances hydrauliques obtenues en broyant finement du laitier granulé en compagnie de composés hydrophiles de métaux alcalins (Sodium et Potassium) où bien en gâchant du laitier granulé par des solutions de ces composés (Mezghiche, 1989).

Le laitier granulé du haut fourneau d'El-Hadjar de Annaba convient à la fabrication des ciments, suite à plusieurs études et publications faites sur ce sujet (travaux de Mezghiche, 1989, Behim, 2003 et Guettache, 2002).

Dans cette étude, on a utilisé en guise de composé alcalin une solution aqueuse de carbonate de soude de différentes densité de 1,15 à 1,25 g/cm³, et une solution de la soude caustique de même densité.

Les échantillons du liant de laitier basique ont été confectionnés conformément aux normes en vigueur (malaxage, mise en œuvre, conservation, ...)

L'activation alcaline ne fait pas seulement l'objet de cette partie, mais on a traité également l'activation (par le clinker) et l'activation mixte (soude et clinker), pour comparer les résultats obtenus.

5.2 ESSAIS SUR LA PATE DURCISSANTE

5.2.1 Propriétés physiques

Dès que le laitier finement broyé a été mélangé avec la solution basique, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue sont évolutives dans le temps.

Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée la pâte reste plus au moins malléable. Mais au bout d'un certain temps, les cristaux d'hydrates prenant de plus en plus d'importance, le mélange se raidit, donc il fait prise.

5.2.1.1 : Essai de consistance (détermination de la pâte normale)

La consistance caractérise la plus au moins grande fluidité de la pâte.

a. Cas d'une activation par le clinker

L'ajout du laitier granulé finement broyé au ciment portland est fait de 30 % et de 80 % du poids de ciment.

La consistance normale est évaluée pour ces deux teneurs variantes de laitier (30 % et 80 %).

(on a représenté la dimension d présentant la distance entre la sonde et la plaque en verre)

L'ajout d'une quantité allant à 30 % du laitier améliore la plasticité du liant, pour un $E/C=0,26$, pour les autres rapports elle est équivalente à celle d'un ciment portland, au-delà de 30 % d'addition la plasticité n'est pas considérablement affectée, ce qui est représentée à la figure 5.1

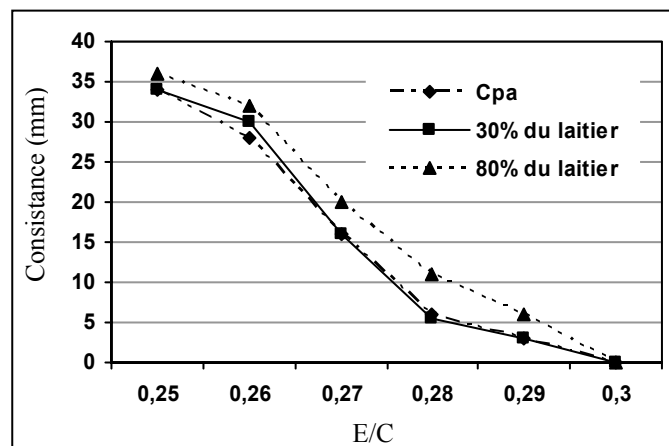


Figure 5.1 : Evolution de la consistance d'un ciment portland au laitier.

La consistance normale s'obtient pour un rapport $E/C = 0,29$, pour les différents types de liant.

b. Cas d'une activation alcaline

La variation de la consistance Vicat en fonction du rapport E/C est évolué pour deux pâtes : l'une d'un ciment portland et l'autre d'un ciment de laitier activé.

L'activant utilisé est le carbonate de soude de deux densités différentes $1,20 \text{ g/cm}^3$ et $1,25 \text{ g/cm}^3$.

Les résultats obtenus sont représentés à la figure 5.2.

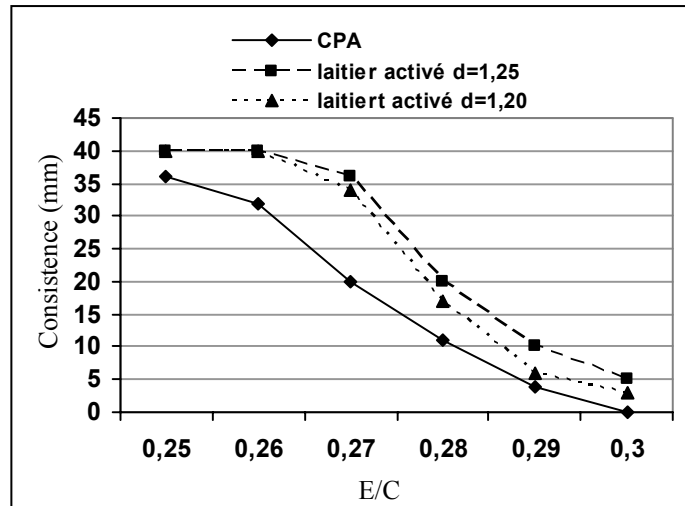


Figure 5.2 : Evolution de la consistance de la pâte de ciment en fonction du rapport E/C et la densité de l'activant.

La consistance normale s'obtient pour un rapport E/C=0,29 pour un ciment portland, par contre dans le cas du ciment au laitier activé, elle s'obtient avec un rapport E/C=0,3.

Le carbonate de sodium est un accélérateur de prise, il est également un rigidifiant (où raidisseur puissant). Donc la plasticité diminue en augmentant la teneur de carbonate de soude (sa densité).

5.2.1.2 Essai de prise

a. Activation par le clinker

Les ciments de laitier au clinker ont des délais de prise longs par rapport au ciments portland, ce qui est lié à l'hydratation faible des composants du laitier.

Le tableau 5.2 représente l'évolution du temps de prise selon les pourcentages du laitier ajoutés au liant.

Tableau 5.1 : temps de prise en fonction des pourcentages de laitier.

Type de liant		Début de prise	Fin de prise
% du laitier	% du CPA		
0	100	2 h 03 min	5 h 11 min
30	70	2 h 20 min	5 h 20 min
50	50	2 h 30 min	5 h 35 min
80	20	2 h 50 min	5 h 45 min

b. Activation alcaline

L'activation du laitier diminue considérablement le début de prise (de quelques heures

à quelques minutes) de même la fin de prise, le tableau 5.2 présente le début et la fin de prise des liants au laitier activés par (la soude caustique et le carbonate de soude en fixant la densité de l'activant à $1,20 \text{ g/m}^3$).

Tableau 5.2 : délai de la prise selon le type de l'activant utilisé.

Type de liant	Composé alcalin	Densité du composé alcalin	Début de prise	Fin de prise
%du laitier				
100	Soude caustique	$1,20 \text{ g/cm}^3$	0 h. 50 min	1 h.15 min
100	Carbonate de soude	$1,20 \text{ g/cm}^3$	0 h. 55 min	1 h.25 min

Les composés alcalins sont des raidisseurs qui épaississent les interstices aqueux en accroissant le seuil de cisaillement de la pâte de ciment ce qui nous donne dès les premières minutes une formation de gel de silice.

Parmi les deux types d'activants utilisés, on remarque une légère différence entre leur effet sur le délai de prise.

b.1 L'influence de la densité du composant alcalin sur la prise

Le temps de prise diminue en augmentant la concentration de l'activant.

Pour étudier l'effet de la densité (concentration) de l'activant sur la prise du liant au laitier, quatre densités sont choisies : 1,10 , 1,15 , 1,20 et $1,25 \text{ g/cm}^3$.

Les deux activants utilisés sont : NaOH et Na_2CO_3 .

Le tableau 5.3 récapitule les résultats obtenus.

Tableau 5.3 : influence de la densité des activants sur la prise du laitier.

Composé alcalin	Densité g/cm^3	Début de prise	Fin de prise
Solution de soude caustique (NaOH)	1.1	1 h. 50 min	3 h. 45 min
	1.15	1 h. 10 min	1 h. 50 min
	1.20	0 h. 50 min	1 h. 15 min
	1.25	0 h. 40 min	1 h. 35 min
Solution de carbonate de soude (Na_2CO_3)	1.1	2 h. 30 min	4 h. 45 min
	1.15	1 h. 45 min	2 h. 15 min
	1.20	0 h. 55 min	1 h. 25 min
	1.25	0 h. 45 min	1 h. 15 min

La solution de la soude caustique, active considérablement le laitier en comparaison avec le carbonate de soude, à une concentration faible de l'ordre 1.10 le début de prise est largement diminué.

A une concentration égale à 1.25 g/m^3 , l'effet des deux activants est comparable.

b.2 L'influence du rapport (solution/liant) sur la prise

Plusieurs facteurs influencent la durée de prise, nous avons tout d'abord la finesse du liant, en second lieu le rapport E/C. Nous allons étudier ce point en variant le rapport E/C de 0.28 à 0.30.

Le tableau 5.4 montre que plus le rapport solution basique / liant (S/L) augmente et plus le temps du début de prise et de fin de prise sont un peu écartés.

Le composé alcalin utilisé est le Na_2CO_3 avec une densité de $1,25 \text{ g/cm}^3$.

Tableau 5.4 : variation du temps de prise en fonction du rapport (S/L)

S/L	0.28	0.30
Début de prise	0 h. 40 min	0 h. 45 min
Fin de prise	1 h. 35 min	1 h. 45 min

Le rapport E/C influence la cinétique de prise, plus ce rapport est faible, plus les grains de ciment sont rapprochés, ce qui rend la prise plus rapide.

c. Cas d'une activation mixte

La teneur croissante du laitier dans le ciment portland affecte négativement son délai de prise, pour y remédier, tout en gardant un pourcentage élevé en laitier, on a recours à l'activation mixte (clinker et soude).

Le tableau 5.5 représente le délai d'un liant présentant 80 % du laitier et activé par la soude.

Tableau 5.5 : le délai de prise selon le type d'activant utilisé :

Type de liant		Composé alcalin	Densité du composé alcalin	Début de prise	Fin de prise
% laitier	% clinker	Soude caustique	1.20 g/cm^3	0 h. 20 min	1 h. 50 min
80	20				

A partir des résultats obtenus, nous remarquons l'effet positif de la combinaison de l'activation calcique avec l'activation alcaline sur le début de prise en comparaison avec l'effet de chacune des deux activations agissant séparément.

5.2.1.3 Essai de l'expansion (gonflement)

Le gonflement est engendré par l'expansion de certains éléments provoquant à long terme des anomalies de résistance et présentant après la prise des fissures dans la masse du liant.

Le tableau 5.6 représente les valeurs du gonflement obtenues pour une pâte normalisée du ciment au laitier suivant les différents types d'activation :

- alcaline.
- Par le clinker.
- Mixte.

Tableau 5.6 : Le gonflement en fonction des types d'activations.

Type d'activation	% laitier	% clinker	Composant alcalin	Gonflement mm
Alcaline	100 %	0	Soude caustique	0
	100 %	0	Carbonate de soude	0
Clinker	0	100 %	-	1.25
	50 %	50 %	-	0.75
	80 %	20 %	-	0.50
Mixte	80 %	20 %	Soude caustique	0.50

On remarque la bonne stabilité des ciments au laitier activé où non activé (sans ajout de composant alcalin).

En général, les éléments nuisibles (MgO, CaO) dans le laitier se trouvent à l'état vitreux dont l'effet néfaste est empêché, par contre si le MgO est sous la forme cristalline (périclase), il est donc réactif de façon nuisible (Neville, 2000).

5.2.2 Propriétés mécaniques

Pour étudier l'effet de l'activation du laitier sur les propriétés mécaniques de la pâte du ciment durcie, on a confectionné des éprouvettes cubiques 2x2x2 cm.

- On a fixé le rapport Solution/ciment à 0,30.
- Les éprouvettes sont conservées dans un milieu humide ($20^{\circ}\text{C}\pm 2$) subissant ainsi un durcissement naturel.
- D'autres éprouvettes ont subi une accélération de durcissement par étuvage (2 h+12 h+2 h) à une température de 80°C et d'une humidité relative de 90 %.

La résistance en compression des pâtes pures du liant est déterminée au différents âges de durcissement (1 j – 7 j – 28 j – 120 j – 365 j).

5.2.2.1 Cas d'une activation par le clinker

Il s'agit ici des ciments portland au laitier, où l'augmentation de la teneur en laitier au-delà de 50 % affecte considérablement la résistance mécanique.

La figure 5.3 représente l'évolution de la résistance en fonction des différents pourcentages de laitier à 7 jours, et à 28 jours de durcissement normal.

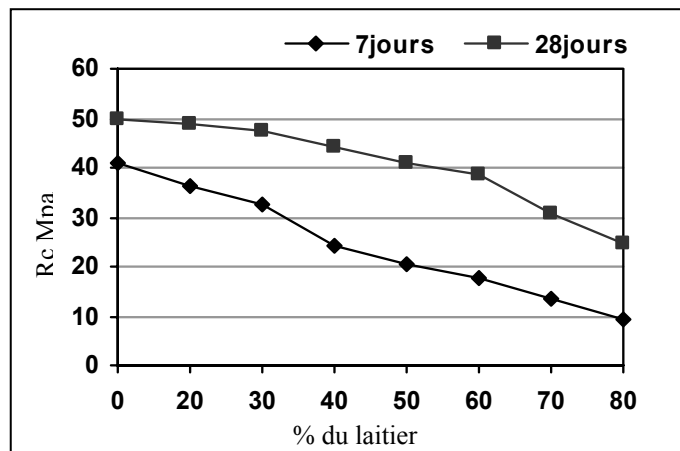


Figure 5.3 : l'évolution de la résistance en fonction de pourcentage du laitier.

Dans ce type d'activation, le laitier est activé par la chaux libérée pendant l'hydratation du clinker (Ca(OH)_2). Cette quantité diminue en augmentant le pourcentage de laitier dans le liant, ce qui diminue le PH du milieu, ne permettant ainsi la dissolution des constituants du laitier et puis la formation des hydrates stables développant la structure du liant et sa résistance ce qui est remarqué nettement à court terme (7 jours de durcissement).

A partir des résultats nous remarquons qu'au-delà de 50 % du laitier une activation supplémentaire du laitier est indispensable.

Parmi les teneurs croissantes du laitier ajoutés au ciment portland, nous avons choisi deux teneurs : 20 % et 50 % du laitier pour effectuer des analyses au rayon X.

Les éprouvettes confectionnées sont examinées par diffraction par les rayons X après 2 jours et un an de durcissement naturel. Les diffractogrammes obtenus sont représentés aux figures suivantes :

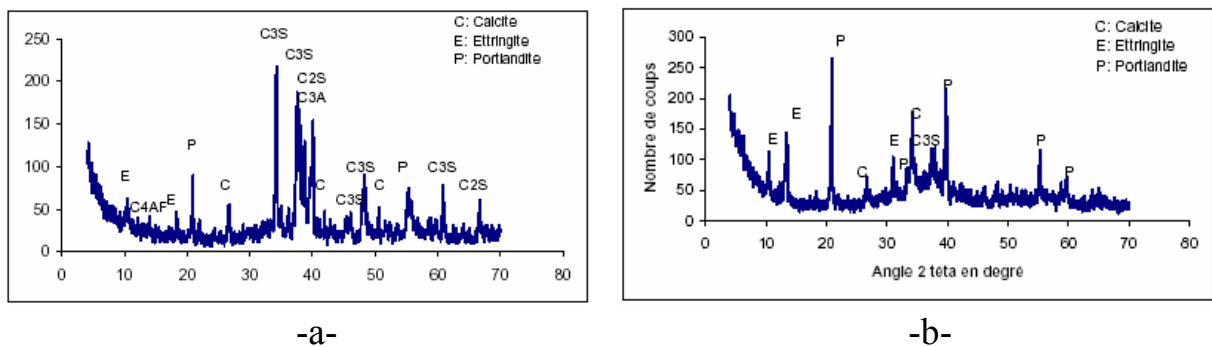


Figure 5.4 : Diffractogrammes d'un liant hydraté présentant 20 % du laitier.
 a : après 2 jours de durcissement.
 b : après un an de durcissement.

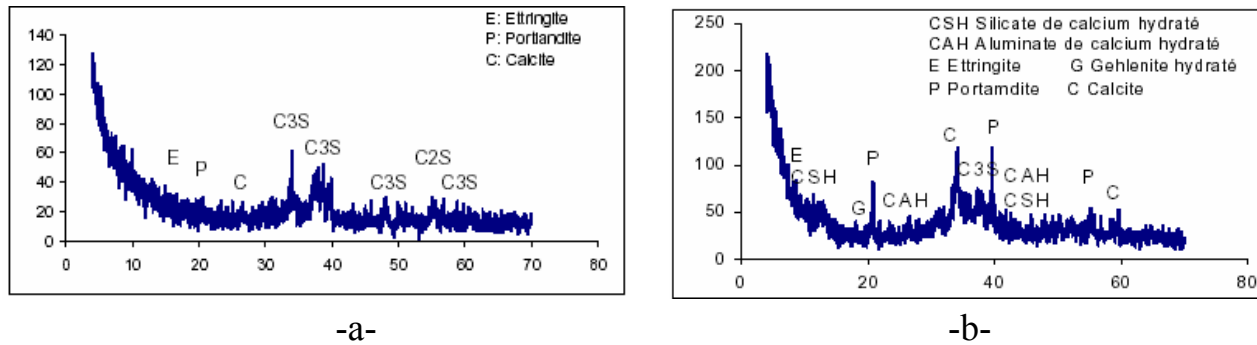


Figure 5.5 : Diffractogrammes d'un liant hydraté présentant 50 % du laitier.
 a : après 2 jours de durcissement.
 b : après un an de durcissement.

A titre de comparaison nous présentons le diffractogramme d'un ciment portland hydraté après un an de durcissement.

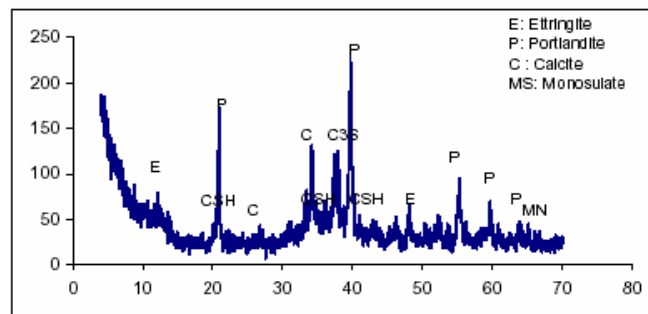


Figure 5.6 : diffractogramme du CPA hydraté.

A partir des diffractogrammes obtenus, nous remarquons que pour des petites teneurs en laitier les produits d'hydratation ne sont pas les mêmes pour les grandes teneurs. Pour une teneur en laitier de 20 % les mêmes produits d'hydratation sont détectés comme dans un ciment portland hydraté (étringite et portlandite).

Par contre pour une teneur en laitier de 50 %, et après un an de durcissement, de nouveaux produits d'hydratation apparaissent :

Les silicates de calcium hydratés (CSH) et l'aluminate de calcium hydraté, également les hydrates du laitier tel que la gehlenite hydratée.

Il faut noter ici que la mise en évidence des silicates de calcium hydratés par les rayons X dans la pâte de ciment portland hydratée après un an de durcissement est difficile à cause de leur structure mal cristallisée (même après une année de durcissement) (Behim et al, 2003).

Les mêmes échantillons sont observés à partir d'un microscope électronique à balayage (MEB) après un an de durcissement. (agrandissement x 20.000)

Les images obtenues sont représentées aux figures suivantes 5.7, 5.8 et 5.9 :

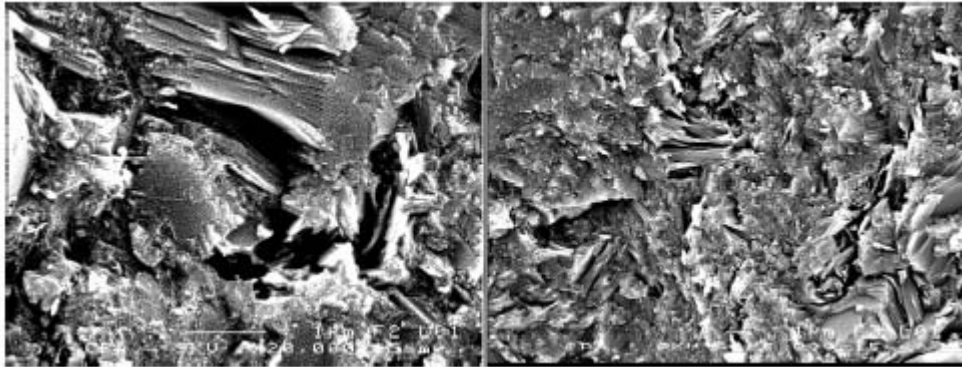


Figure 5.7 : Observation au MEB du CPA hydraté à 365 jours de durcissement.



Figure 5.8 : Observation au MEB du CPJ (20 % du laitier) hydraté à 365 jours.

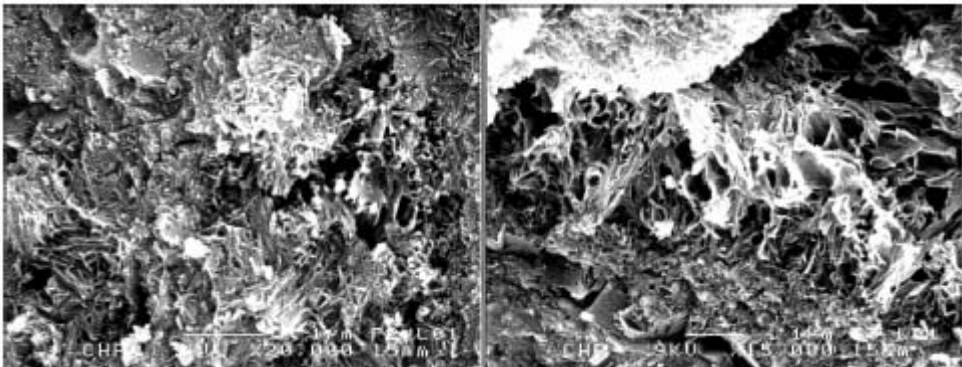


Figure 5.9 : Observation au MEB du CHF (50 % du laitier) hydraté à 365 jours.

Les observations au microscope électronique à balayage réalisées sur les trois types de ciment précédents, (CPA, 20 % du laitier, 50 % du laitier), ont montrés la formation de l'étringite (forme d'aiguilles) de la portlandite (forme de plaques) et des silicates de calcium hydratés (CSH) (Fig. 5.9) d'une structure différente de celle observée dans un CPA, dans ce

dernier (Fig.5.7) on a pu observer la formation de la tobermorite, de la portlandite et peu d'étringite. Et enfin dans le liant présentant 20 % du laitier (fig.5.8) , on peut observer la présence de la portlandite, des CSH et beaucoup d'étringite.

5.2.2.2 Cas d'une activation mixte

Il s'agit d'une activation mixte, la soude ajoutée sous forme d'une solution de densité de $1,15 \text{ g/cm}^3$ et la chaux libérée pendant l'hydratation du clinker (Ca(OH)_2).

Les figures 5.10 et 5.11 présentent l'évolution de la résistance en compression en fonction du pourcentage du laitier et le type d'activant utilisé après 1 jour, 7 jours, 28 jours, 120 jours et 365 jours de durcissement naturel.

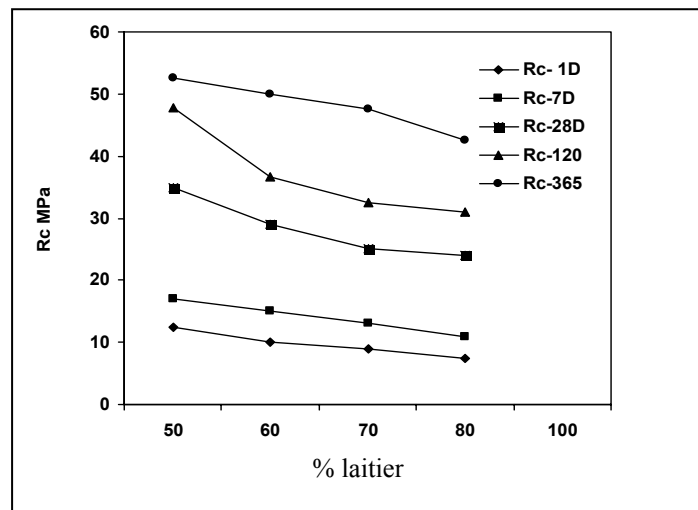


Figure 5.10 : Evolution de la résistance du liant activé par NaOH en fonction du % laitier.

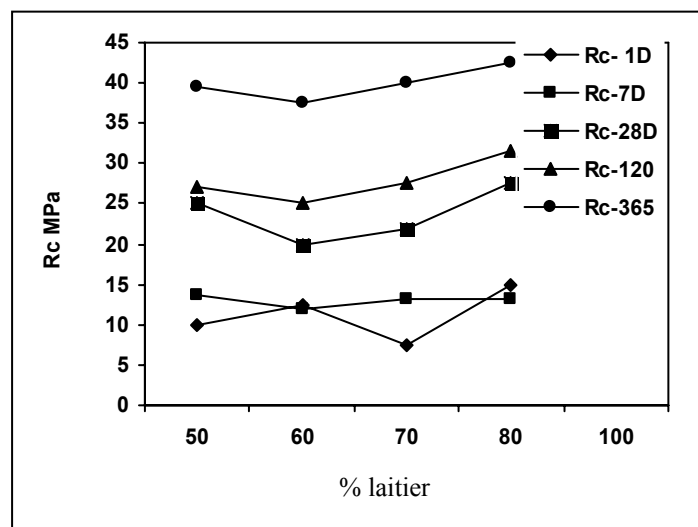


Figure 5.11: Evolution de la résistance du liant activé par Na_2CO_3 en fonction du % du laitier.

A titre de comparaison, nous présentons à la figure 5.11, l'évolution de la résistance mécanique en compression d'un liant activé seulement par le clinker .

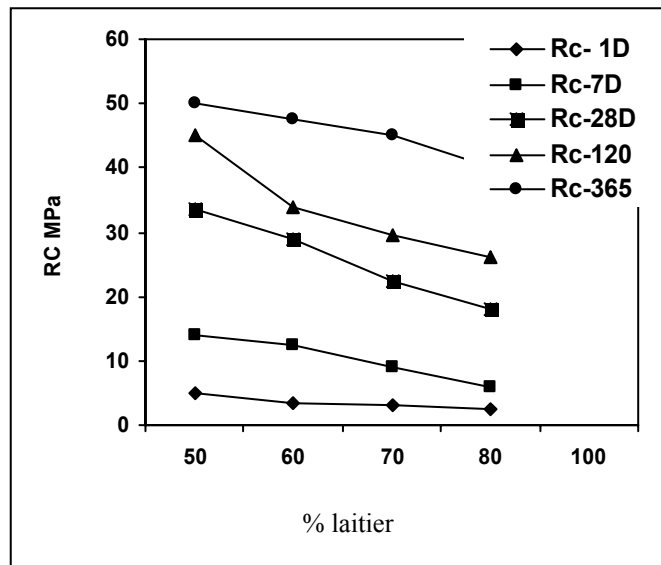


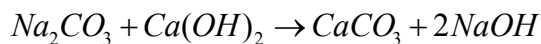
Figure 5.12 : évolution de la résistance du liant activé par le clinker.

Par comparaison, les figures 5.10, 5.11 et 5.12, on remarque l'amélioration de la résistance en compression par l'ajout des activateurs pour les teneurs élevées de laitier.

D'une façon générale, les bases solubles (NaOH , Na₂CO₃) accélèrent la dissolution de la silice et de l'alumine du laitier et facilite leur réaction avec l'hydroxyde de calcium, pour former les CSH.

L'ajout du carbonate de soude s'explique de la façon suivante :

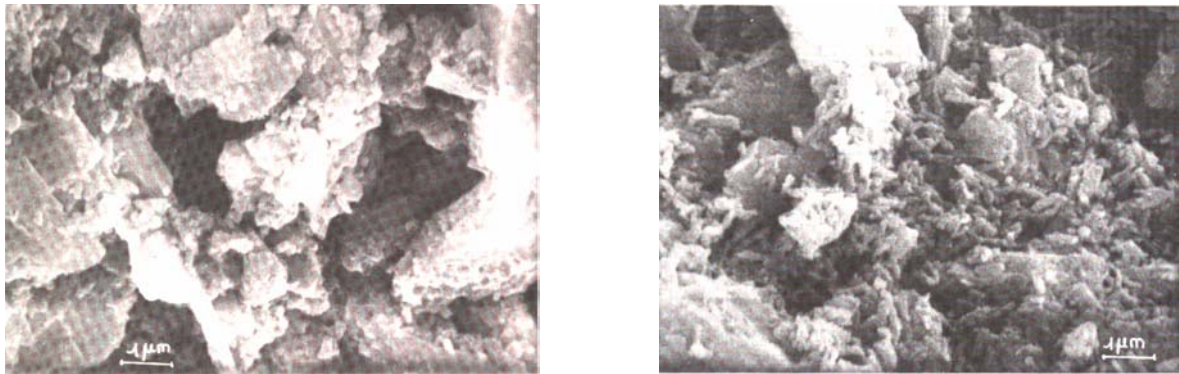
Il réagit avec l'hydroxyde de chaux libérée dès le départ (par l'hydratation des grains de ciment) suivant la réaction suivante :



Il en résulte une double action :

- La formation par précipitation de fines aiguilles de carbonate de calcium augmentant le seuil de cisaillement.
- La formation de soude accélérant le début et la fin de prise du ciment.

La figure (5.13) montre le changement de la structure dans le cas de l'ajout de 5 % du Na₂CO₃, au ciment.



- a -

- b -

Figure 5.13 : Changement de structure d'un mortier en CPA activé par Na_2CO_3 .

a : Mortier Témoin.

b : Mortier Activé. (Venuat, 1984)

5.2.2.3 Cas d'une activation alcaline

Dans cette partie, le pourcentage du laitier est fixé à 100 % (liant de laitier sans clinker), le composant alcalin utilisé est le NaOH et Na_2CO_3 dont la densité varie de 1,15 à 1,25 g/cm³.

Selon (Tchernogov, 1965), le processus de durcissement du mélange laitier et solution alcaline se divise en trois étapes :

- Absorption des silicates de la solution alcaline à la surface du laitier.
- Coagulation de la silice.
- La déshydratation du liant et l'interaction chimique de la silice avec l'hydroxyde de calcium.

On considère que le processus de durcissement caractérise ainsi bien le laitier activé par n'importe quelle solution alcaline (soude caustique, carbonate de soude ou verre soluble).

5.2.2.3.1 L'influence de la densité du composant alcalin sur la résistance

L'augmentation de la densité de l'activant influe positivement sur la résistance en compression.

La figure 5.14 présente l'évolution de la résistance (à 28 jours) en fonction l'augmentation de la densité.

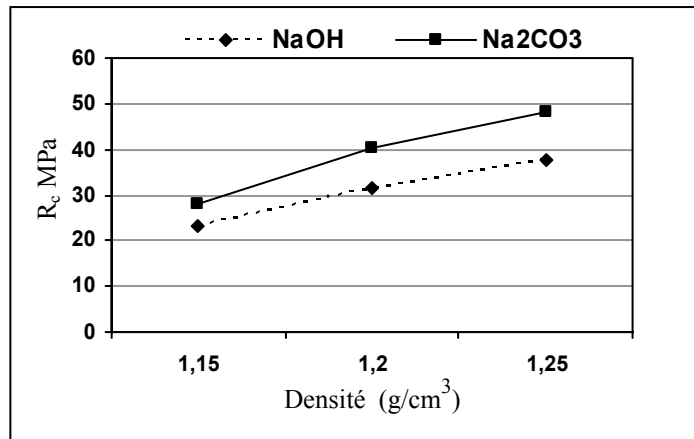


Figure 5.14 : L'évolution de la résistance en compression en fonction de la densité de l'activant à 28 jours de durcissement.

Le développement de la résistance en compression aux différents âges de durcissement est représenté sur les figures 5.15 et 5.16 en utilisant les deux activants NaOH et Na₂CO₃ respectivement.

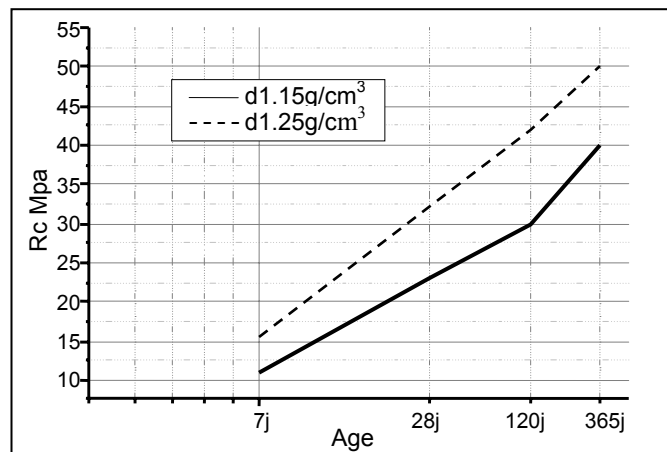


Figure 5.15 : l'évolution de la résistance aux différents âges d'une pâte activée par NaOH.

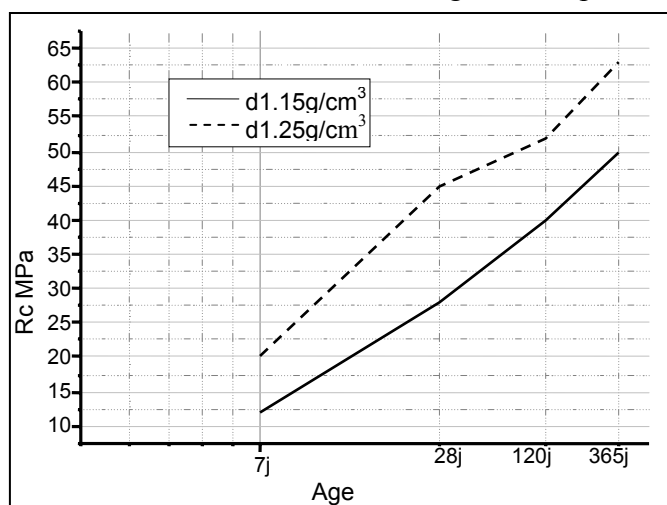


Figure 5.16 : L'évolution de la résistance aux différents âges d'une pâte activée par Na₂CO₃.

A partir des résultats obtenus, nous remarquons l'efficacité du composant alcalin Na_2CO_3 par rapport à l' NaOH au moyen terme où à long terme, cette augmentation de résistance est estimée à 10 % par rapport au liant non activé.

5.2..2.3.2 L'influence de l'accélération du durcissement sur la résistance

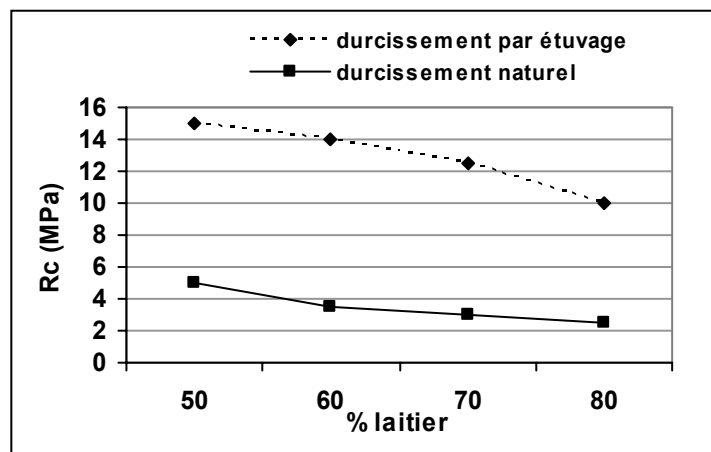
Les ciments de laitier supportent bien l'étuvage. La combinaison de l'activation et l'étuvage améliore nettement les résistances mécaniques, en particulier aux âges précoces.

Les trois types d'activation seront étudiées :

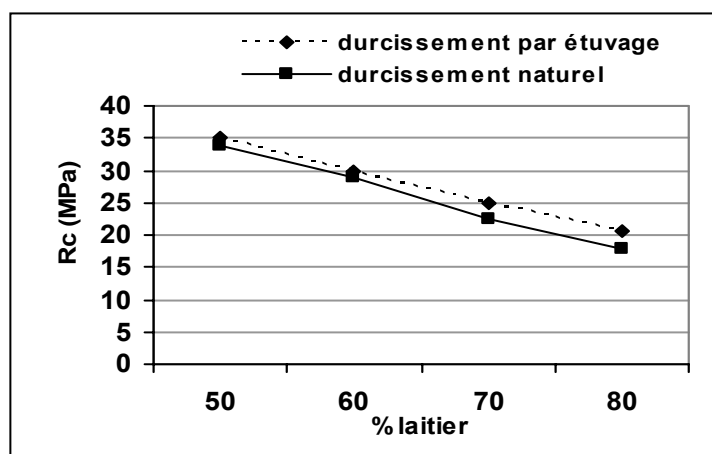
a. Cas de l'activation par le clinker

On considère des pourcentages élevés en laitier (50 %, 60 %, 70 % et 80 %) et le reste est représenté par le clinker.

La résistance mécanique en compression est appréciée après 1 jour (figure 5.17.a) et après 28 jours (figure 5.17.b) de durcissement par étuvage (les éprouvettes sont étuvées pendant un jour, démoulées et ensuite elles sont gardées humides jusqu'à 28 jours), elle est illustrée à la figure 5.17.



-a-



-b-

Figure 5.17 : l'évolution de la résistance en compression en fonction du % du laitier.

a : après 1 jour d'étuvage. b : après 28 jours d'étuvage.

L'étuvage améliore les résistances mécaniques des ciments de laitier au clinker, surtout à court terme de durcissement.

b. Cas d'une activation mixte

En gardant les mêmes pourcentages de laitier, et en fixant la densité du composant alcalin (NaOH) à 1.15 g/cm^3 , la résistance mécanique est déterminée après 1 jour et après 28 jours de durcissement par étuvage.

Les résultats obtenus sont présentés à la figure 5.18.

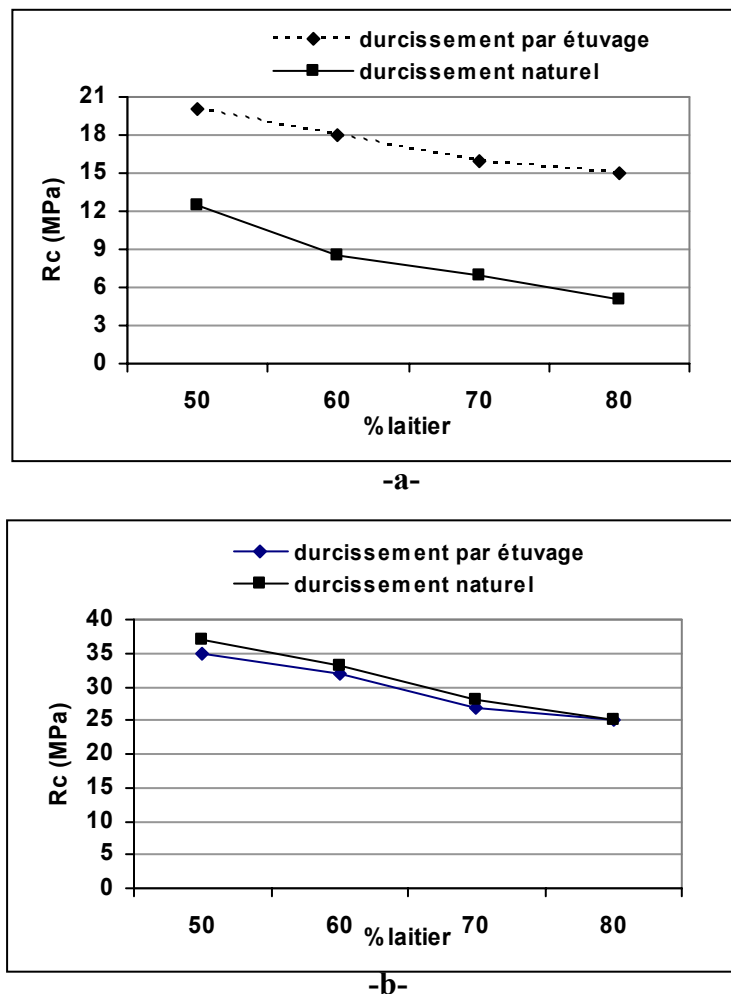


Figure 5.18: L'influence de l'étuvage sur la résistance en compression du liant activé par NaOH
a : après 1 jour .
b : après 28 jours.

L'activation mixte (clinker + soude) influe positivement sur la résistance en compression.

La combinaison de ce type d'activation avec l'étuvage est très bénéfique. L'augmentation de la résistance après un jour de durcissement par étuvage est considérable

même pour les pourcentages élevés en laitier, en comparaison avec l'activation classique (par le clinker).

Cette augmentation de résistance est remarquée aussi après 28 jours de durcissement.

c. Cas d'une activation alcaline

En augmentant le pourcentage du laitier à 100 %, et en choisissant deux composants alcalins NaOH et Na₂CO₃ d'une densité identique 1.15 g/cm³, on représente graphiquement l'évolution de la résistance en compression après 1 jour et après 28 jours de durcissement par étuvage sur la figure 5.19.

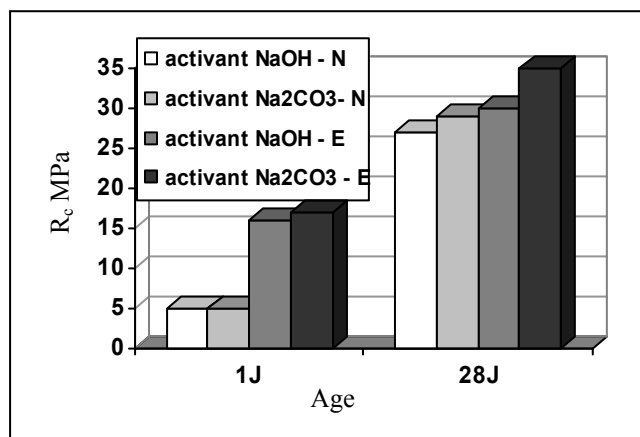


Figure 5.19 : l'influence de l'étuvage sur la résistance en compression d'un liant (sans clinker) activé. (N : durcissement normal , E : durcissement par étuvage).

Les activateurs du laitier augmentent considérablement la résistance des liants au laitier (sans clinker), une légère différence des effets des activateurs sur la résistance est remarquée à moyen terme. Et pour mieux estimer l'influence de l'étuvage et l'activation, la solution de Na₂CO₃ est utilisée pour activer le laitier suivant les différentes densités (1.15, 1.20 , 1.25) g/cm³.

La figure 5.20 représente l'effet de l'étuvage et la densité de l'activateur sur la résistance en compression de pâte de ciment au laitier.



Figure 5.20 : L'influence de la densité de l'activant et l'étuvage sur la résistance en Compression après 1 jour d'étuvage.

L'augmentation de la densité influe positivement sur l'évolution de la résistance des liants au laitier étuvés.

5.2.3 Action des milieux agressifs

Les ciments à forte teneur en laitier conviennent bien aux ouvrages maritimes, l'eau de mer contient des sels qui exercent une action considérable sur les ciments portland par rapport au ciments de laitier, du fait de l'absence de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et l'aluminate tetracalcique dans ces derniers.

Afin d'estimer la qualité des ciments au laitier activé, les éprouvettes cubiques ($2 \times 2 \times 2$ cm) confectionnées à base d'un ciment de laitier activé par Na_2CO_3 , d'une densité de $1,25 \text{ g/cm}^3$ sont immergées pendant une durée de 6 mois dans deux solutions agressives : HCl (0,1 %) et MgSO_4 (3 %). Du fait que les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (surtout les sulfates).

Le coefficient de qualité représente le rapport entre les résistances en compression des éprouvettes immergées dans les solutions agressives au autres immergées dans l'eau potable, plus ce coefficient est élevé plus le ciment est durable.

Les résultats obtenus sont représentés à la figure 5.21.

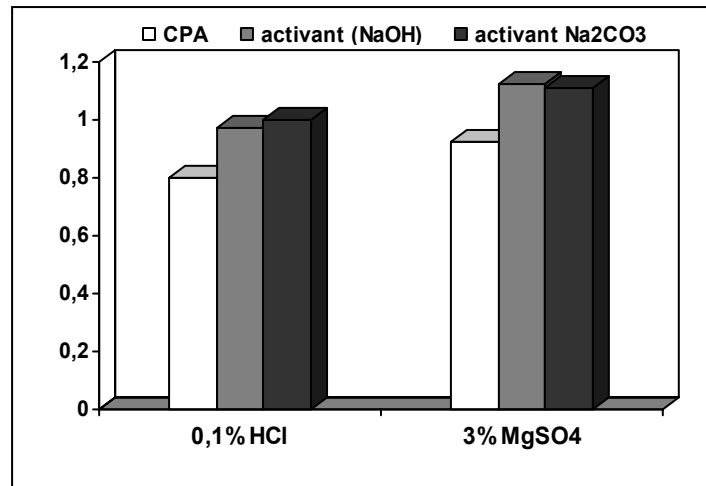


Figure 5.21 : Coefficient de qualité d'une pâte activée immergée dans les Solutions (HCl, MgSO₄).

Les ciments du laitier (activé par les solutions basiques où à partir du clinker) montrent une meilleure résistance dans le milieu nocif, ce comportement est principalement attribué à leur faible teneur en chaux (Ca(OH)₂) qui est souvent responsable des dégâts dans les bétons. de même la forte imperméabilité des pâtes des liants de laitier durcies et la formation supplémentaire des hydrates CSH précipitant dans les pores en diminuant ainsi la porosité et jouant un rôle dans leur résistance aux milieux agressifs.

En comparant l'effet des milieux agressifs, on remarque que les chlorures affectent en plus les ciments de laitier que les sulfates.

5.3 ESSAI SUR LES MORTIERS

Le mortier normal est un mortier qui sert à définir certaines caractéristiques d'un ciment et notamment sa résistance.

5.3.1 Mesures des résistances à la compression et à la traction

Dans cette partie on va traiter seulement l'effet de l'activation alcaline sur le liant de laitier sans clinker tout en étudiant :

- L'influence de la densité de l'activant sur les résistances à la compression et à la traction.
- L'influence de l'accélération du durcissement sur ces résistances.

A cet effet deux types d'activants sont utilisés (NaOH) et (Na₂CO₃) avec des densités qui varient de 1,20 g/cm³ à 1,25 g/cm³ et un rapport solution/ciment = 0,40.

Les éprouvettes confectionnées sont prismatiques de dimensions (4x4x16 cm), conservées dans un milieu humide à 20°C, d'autres ont subi une accélération de durcissement par étuvage (T = 60°C, HR = 95 %) après un jour d'étuvage, elles sont démoulées, puis conservées dans l'eau.

5.3.1.1 L'effet de la densité de l'activant sur les résistances à la compression et à la traction

Les résistances mécaniques en compression et en traction sont estimées après 28 jours et 60 jours de durcissement normal.

Les résultats obtenus sont représentés aux figures (5.22, 5.23 et 5.24) respectivement

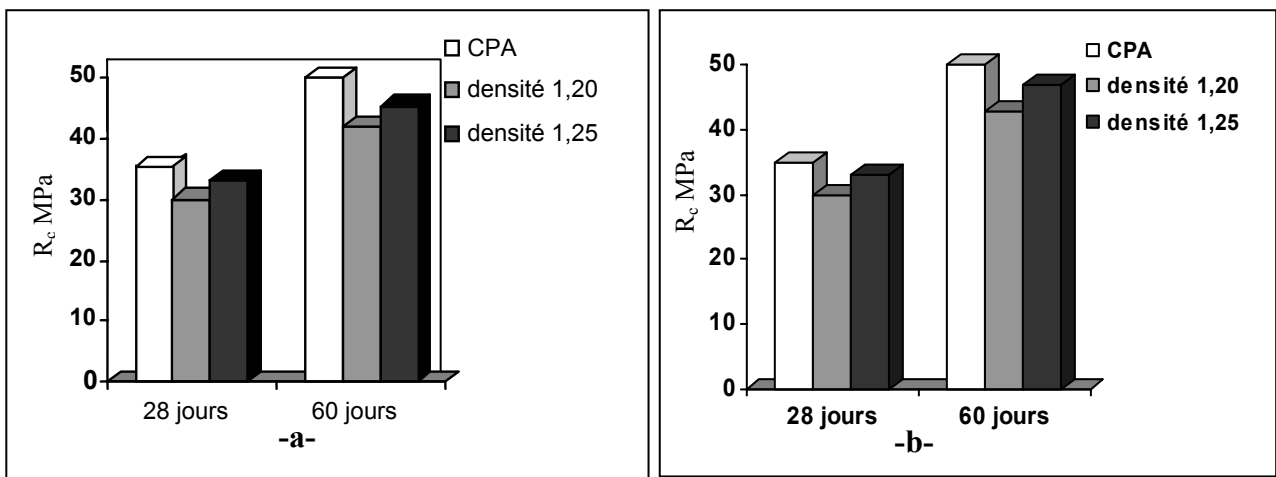


Figure 5.22 : La résistance en compression en fonction de la densité de l'activant utilisé.

a : NaOH, b : Na_2CO_3

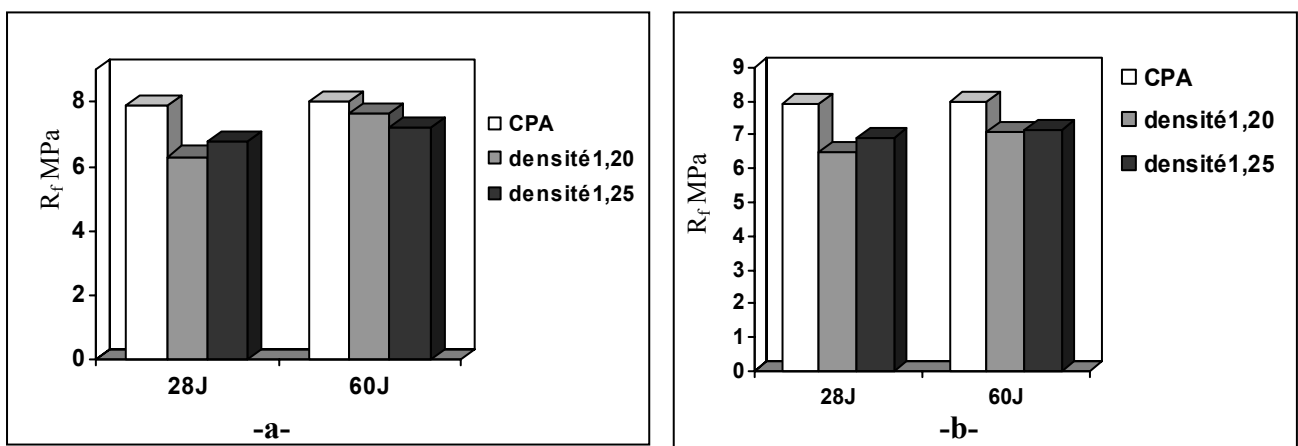


Figure 5.23 : La résistance en flexion en fonction de la densité de l'activant utilisé.

a : NaOH, b : Na_2CO_3

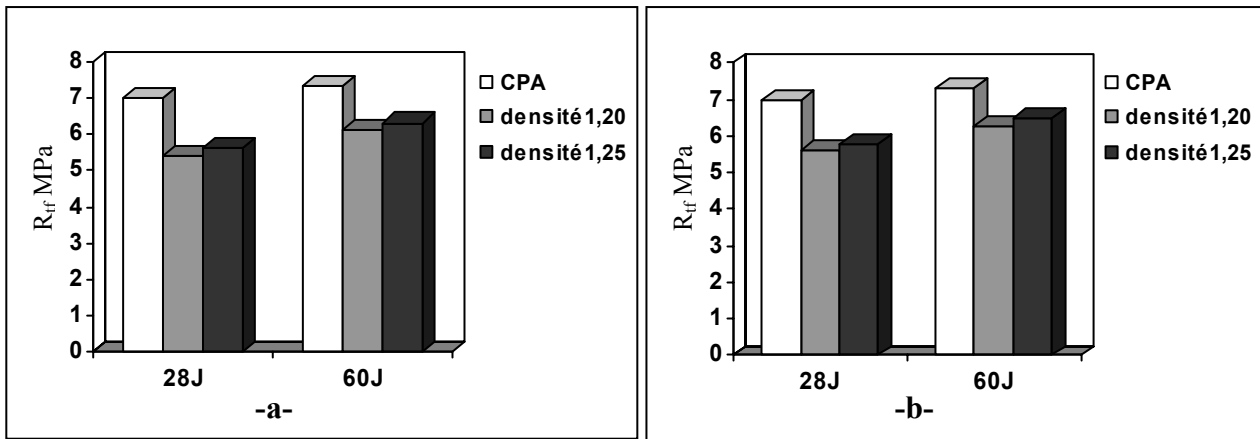


Figure 5.24 : La résistance en traction par flexion en fonction de la densité de l'activant utilisé.(a : NaOH, b : Na₂CO₃).

L'augmentation de la densité de l'activant, joue un rôle positif dans l'amélioration des résistances mécaniques (compression, flexion, traction).

Cette augmentation est légère en traction et en flexion par rapport à la compression.

En comparant ces résultats avec le mortier de référence (ciment portland), on remarque que ces résistances sont toutes presque du même ordre.

5.3.1.2 L'effet de l'accélération de durcissement sur la résistance

Les résistances mécaniques sont estimées après 28 jours de durcissement par étuvage.

La densité des activants est fixée à 1,25 g/cm³.

Les résultats obtenus sont représentés à la figure 5.25:

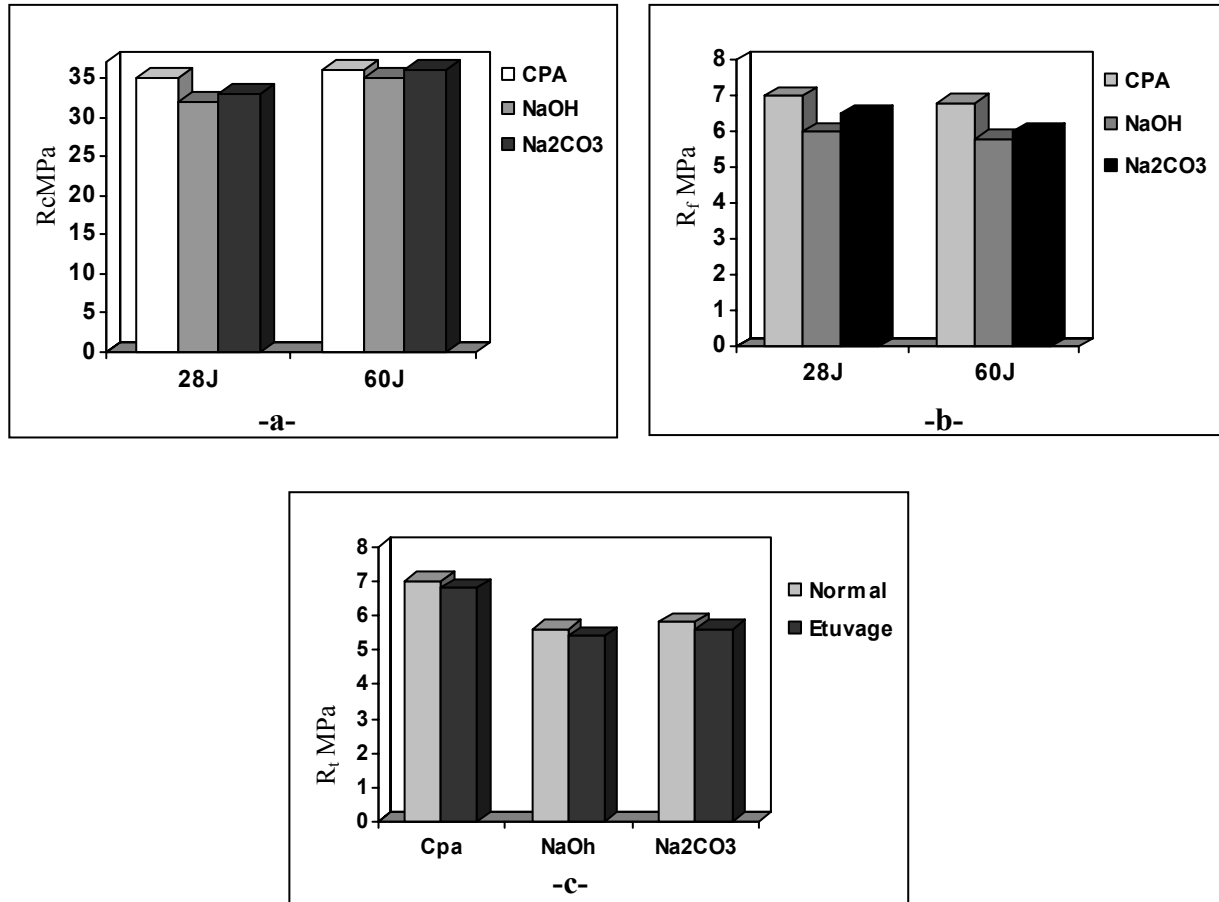


Figure 5.25 : Les résistances mécaniques après étuvage :
 a : résistance en compression (28 jours et 60 jours).
 b : résistance en flexion (28 jours et 60 jours).
 c : résistance en traction (28 jours).

L'étuvage améliore peu les résistances en compression, les résistances en flexion et en traction sont affectées (l'efficacité de l'étuvage apparaîtra généralement après un jour).

5.3.2 Mesure du retrait et du gonflement

Le retrait est un phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise du ciment à cause du départ de l'eau, soit par hydratation où par évaporation.

Par contre, le gonflement est dû à l'absorption d'eau par les produits d'hydratation (le gel), en créant ainsi une pression de gonflement.

On compare dans cet essai la variation de la longueur et de la masse des éprouvettes prismatiques (4x4x16 cm) par rapport à la longueur et la masse initiales.

La figure 5.26 présente les variations linéaires des mortiers en fonction du temps et du type d'activation utilisée.

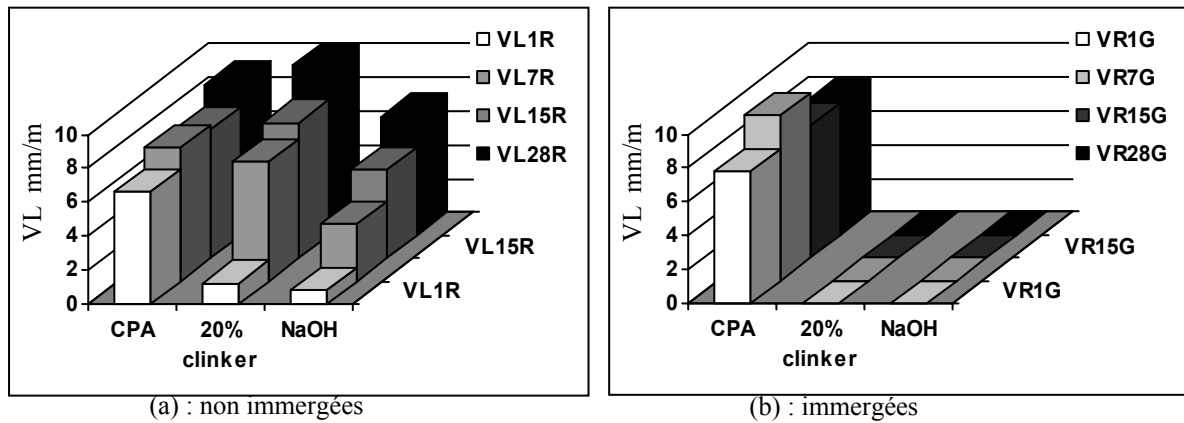


Figure 5.26: variations linéaires des mortiers en fonction du temps et type d'activant.

La figure 5.27 présente les variations massiques des mortiers en fonction du temps et type d'activant.

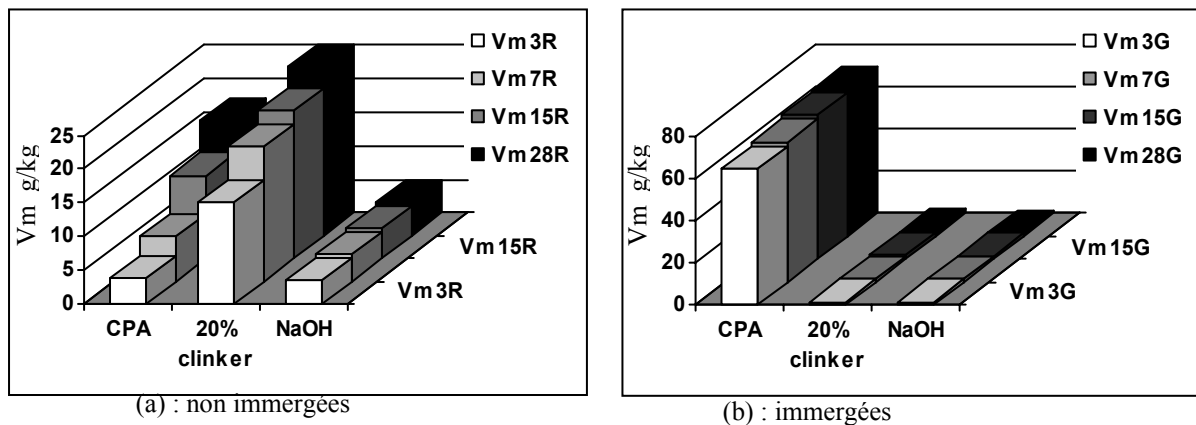


Figure 5.27 : variations massiques des mortiers en fonction du temps et type d'activant.

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que les variations linéaires d'un ciment de laitier sont inférieurs à celles d'un ciment portland (retrait et gonflement).

Le gonflement dans les ciments au laitier activé est nul du fait que :

L'activation du laitier améliore nettement ces variations et en particulier le retrait.

L'ajout de la base (NaOH) augmente le retrait après prise, mais au bout de plusieurs semaines, il diminue sans doute parce que la concentration en alcalis de la phase liquide augmente avec le temps du fait du départ d'une partie d'eau dans l'atmosphère sèche (ainsi se trouve confirmée l'hypothèse du rôle des alcalis sur les retraits à long terme (Venuat, 1984).

La variation massique en milieu naturel augmente dans le cas de l'activation par le clinker, tandis qu'elle diminue par l'activation par le NaOH en comparaison avec un ciment portland.

Ces variations diminuent fortement dans le milieu humide par rapport à un ciment portland ce qui est lié aux deux facteurs suivants :

- dans le cas de l'activation par le clinker, le Ca(OH)_2 qui provoque le gonflement est consommé pendant l'hydratation du laitier.
- Dans le cas de l'activation par le soude, l'absence du composé Ca(OH)_2 .

5.4 CONCLUSION

Cette partie d'étude nous a permis de mettre en valeur l'influence des différentes activations sur le comportement physique et mécanique de la pâte de ciment au laitier, ainsi que celui du mortier.

Certes, l'activation par le clinker est classique, elle a fait l'objet de pas mal d'études soit en Algérie où à l'étranger, et si nous exposons dans cette étude ce type d'activation c'est seulement pour faire des comparaisons et en tirer des conclusions.

A des teneurs inférieures à 50 % de la masse de ciment , le laitier du haut fourneau finement broyé, peut être additionné au ciment portland sans qu'il affecte considérablement les propriétés mécaniques (notant que le délai de prise sera prolongé). Mais au-delà de cette limite, la chute de résistance est nettement remarquée d'où le recours à l'activation mixte.

L'activation mixte (clinker et soude) (où n'importe quelle autre solution basique) récompense l'effet négatif des teneurs élevées en laitier :

- pour des teneurs en laitier allant à 80 % du poids du liant un composant alcalin d'une densité moyenne de (1.15 g/cm^3) peut donner des résistances acceptables à 28 jours (comparables à celles d'un liant de ciment portland composé), à long terme (après 1 an de durcissement) ces résistances s'améliorent significativement.
- Pour une teneur extrême du laitier de 80 %, le début de prise est largement raccourci par l'utilisation de NaOH comme activant : de 2 h. 50 min pour un liant non activé à 20 min, de même la fin de prise.
- La plasticité est un peu affectée par ce type d'activation (l'activant est un raidisseur puissant).

Augmentant la teneur en laitier à 100 % l'activation alcaline du laitier est une méthode très efficace, il suffit d'augmenter seulement la densité du composé alcalin utilisé à 1.20 g/cm^3 où à 1.25 g/cm^3 .

- L'augmentation de la densité du composant alcalin influence les propriétés physiques du liant au laitier notamment son délai de prise de quelques heures à quelques minutes seulement, elle influence aussi ces propriétés mécaniques (résistance mécanique en compression, en flexion et en traction par flexion).
- L'hydratation du ciment au laitier est très lente aux premiers âges, même après son activation alcaline, (il faut noter qu'il existe des composants alcalins assez puissants tel que le verre soluble dont l'utilisation favorise l'hydratation des composants du laitier, et le développement des résistances initiales).

A cet effet, on propose dans le cas de l'activation par la soude et ses sels de procéder à un durcissement par étuvage.

La combinaison de l'activation et l'étuvage est bénéfique, l'augmentation de la résistance est estimée de 3 fois de plus après un jour d'étuvage que celle d'un liant non étuvé. Après 28 jours de durcissement une légère différence est signalée entre le durcissement normal et celui par étuvage. Donc, dans le cas de la préfabrication des éléments structuraux, on propose d'utiliser un ciment de laitier sans clinker activé par la soude où à partir de ses sels, durcissant par étuvage.

Il reste à noter que :

- Les ciments au laitier (activé par le clinker où partir des solutions basiques) présentent un retrait inférieur à celui noté dans un ciment portland et un gonflement nul.
- Les ciments au laitier activé résistent mieux que le ciment portland aux milieux agressifs.

Et enfin notons les améliorations portées sur le côté économique et écologique :

- Réduction du prix du liant.
- Réduction des émissions de CO₂ polluant l'atmosphère.
- Assurer un développement durable à l'industrie du ciment.