

# UTILISATION DU SABLE DE DUNE EN TECHNIQUE ROUTIERE - ETUDE DES PROPRIETES MECANQUES D'UNE FORMULATION DE SABLE LAITIER.

H. CHERFA & K. AIT MOKHTAR

Faculté de génie civil/ Université des sciences et de la technologie USTHB

[ha\\_cherfa@yahoo.fr](mailto:ha_cherfa@yahoo.fr) & [kaitmokhtar@yahoo.fr](mailto:kaitmokhtar@yahoo.fr)

## RÉSUMÉ

L'Algérie, dont 70% de la superficie est constitué par le Sahara connaît la réalisation de nombreux projets routiers tels que le projet de l'autoroute Est - Ouest d'un linéaire de 1.216 Km et qui s'intègre dans le grand projet régional de l'autoroute maghrébine dont le linéaire est de 7.000 Km et dont la réalisation a été retenue par les pays de l'union du Maghreb arabe. Ces projets, qui se font avec la technique des chaussées bitumineuses, nécessitent de grandes quantités de matériaux nobles tels que les granulats et sables concassés qui se font de plus en plus rares. L'immense étendue désertique de l'Algérie recèle des quantités inestimables de sable de dune qui reste marginalisé. On se propose dans cet article de valoriser ce matériau à l'aide de la technique du sable laitier ; le laitier étant lui-même un déchet sidérurgique très abondant en Algérie. Les résultats obtenus montrent que le traitement du sable de dune par du laitier activé par de la chaux entraîne une augmentation de la portance, de la résistance à la compression simple, du module de rigidité et de la résistance à la traction.

## 1. INTRODUCTION

A l'échelle internationale, la technique routière se préoccupe depuis un certain temps de l'utilisation des déchets et sous-produits d'origines diverses (mines et carrières, industrie métallurgique, industrie plastique, etc....) et ceci dans le but d'améliorer les caractéristiques des matériaux routiers qui subissent un trafic de plus en plus élevé et des conditions climatiques de plus en plus sévères. L'utilisation des déchets permet aussi de contribuer à la protection de l'environnement en évitant la mise en dépôt de ces rejets, de construire des chaussées à moindre cout car les matériaux de carrière se font de plus en plus rares et ont un prix de revient élevé. Parmi les déchets et sous-produits industriels qui, sous l'angle d'une évaluation globale de leurs aptitudes d'emploi en technique routière, présentent des possibilités optimales, se trouvent les laitiers de haut fourneau.

L'Algérie possède de grands complexes sidérurgiques qui génèrent de grandes quantités de laitier. A titre d'exemple, la production annuelle de laitier au complexe sidérurgique de l'est de l'Algérie est estimée à 500.000 tonnes par an. Le diagramme de Keil [1] permet de situer le laitier de haut fourneau par rapport à d'autres liants utilisés en technique routière (figure 1). Ce diagramme montre que les laitiers ont une composition relativement proche de celle du clinker du ciment Portland, même si celui-ci ne nécessite qu'un apport d'eau pour déclencher son hydraulité.

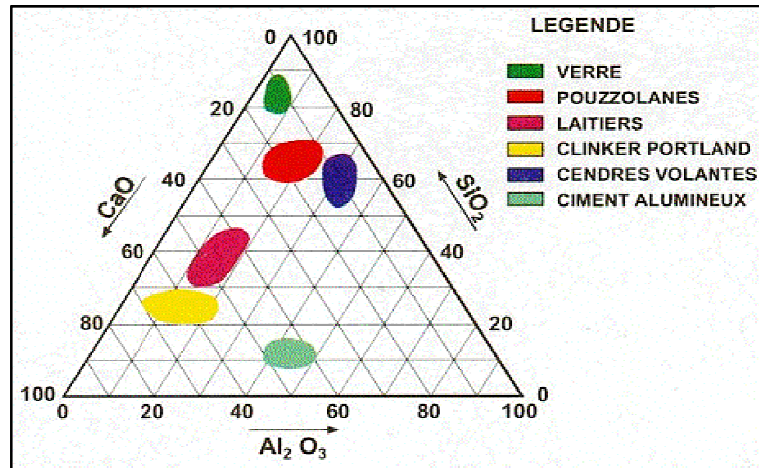


Figure 1- Diagramme de Keil

Le laitier de haut fourneau, a pour rôle de rassembler les éléments non volatiles apportés par la gangue des minerais, les cendres de combustible et les fondants rajoutés à la charge. L'histoire du laitier montre que ce matériau, considéré à l'origine comme un sous-produit fatal de l'élaboration de la fonte, est devenu aujourd'hui très recherché du fait de la diversification de son utilisation [2]. Les procédés de refroidissement (lent ou rapide) du laitier fondu diffèrent selon le produit et la structure que l'on désire obtenir (figure 2). Le laitier de haut fourneau se présente donc sous plusieurs formes principales : le laitier granulé, bouleté ou cristallisé.

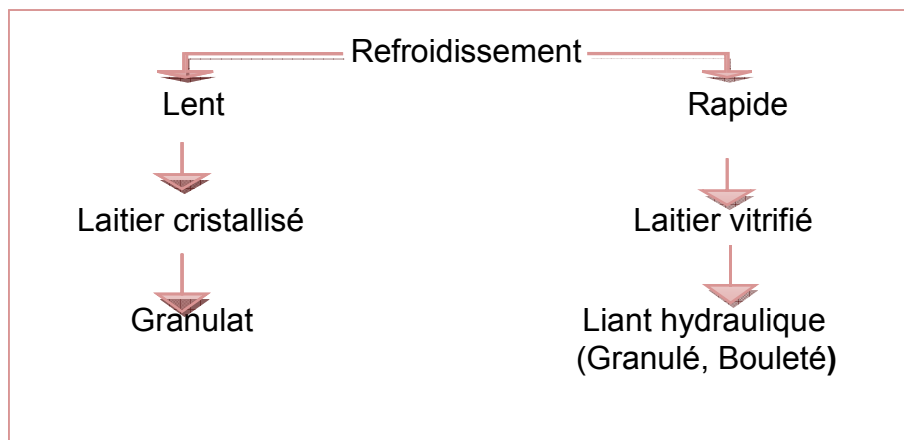


Figure 2 - Processus d'élaboration des différents types de laitiers

Le laitier granulé de haut fourneau s'obtient par refroidissement brusque par un courant d'eau, ce qui permet de freiner le processus de cristallisation et d'obtenir ainsi, un matériau vitrifié et granulé [3]. Ce mode de refroidissement transforme le laitier liquide en un granulat fin (procédé de granulation du laitier) à grains déchetés de granulométrie 0/5mm (figure 3), qui sera utilisé comme sable ou comme liant hydraulique.



Figure 3 - Obtention du laitier granulé par le procédé de granulation

Le laitier bouleté est obtenu par la technique du bouletage qui est une technique qui permet des économies d'eau importantes par rapport à la granulation et nécessite d'autre part des installations moins coûteuses. Le principe de cette méthode consiste à cisailer le jet de laitier liquide par des jets d'eau et à projeter le mélange « eau – laitier » dans l'atmosphère par l'intermédiaire d'un tambour rotatif tournant à grande vitesse. La fragmentation du laitier résulte simultanément de l'action de l'eau et de l'air. Les particules sont projetées à plusieurs mètres du tambour, et d'autant plus loin qu'elles sont plus grosses. C'est pendant cette trajectoire aérienne que la trempe a lieu. Le matériau s'égoutte ensuite naturellement, et on obtient ainsi des boulettes dont la granulométrie peut aller jusqu'à 20 mm. Ces boulettes sont des boules creuses de laitier expansé de densité très faible (Figure 4).

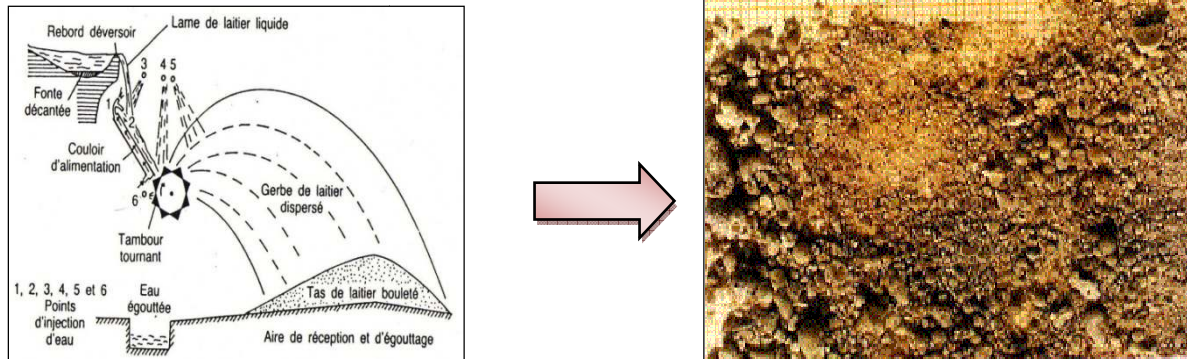


Figure 4 - Obtention de laitier bouleté par la technique de bouletage

## 2. CARACTERISATION DES MATERIAUX

### 2.1. Les sables

On a utilisé deux types de sable dont la composition chimique est présentée dans le tableau 1 et les courbes granulométriques dans la figure 5. Le premier sable est un sable de dune siliceux de classe 0/2mm et le deuxième est un sable calcaire concassé 0/6mm [4].

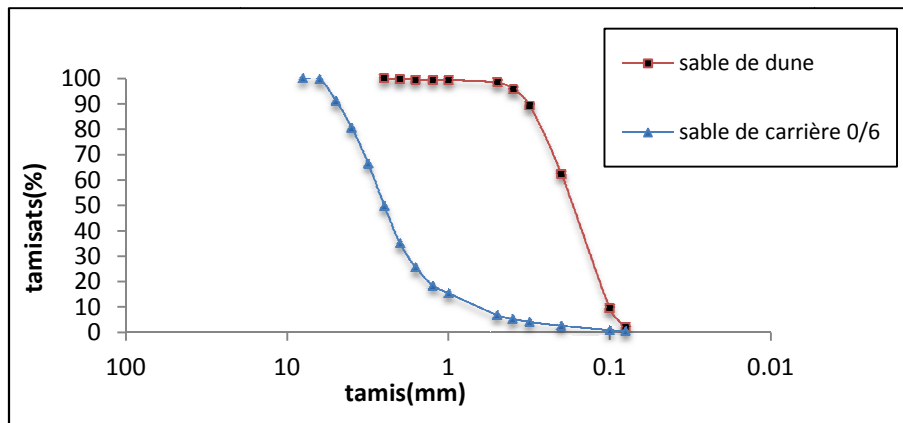


Figure 5 - Les courbes granulométriques des sables utilisés.

Tableau 1 - Analyse chimique des sables utilisés.

Matériau	Sable 0/6	Sable de dunes
(SiO <sub>2</sub> )	5.94%	95.53%
(CO <sub>2</sub> )	39.45%	1.49%
(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.8%	1%
(CaSO <sub>4</sub> , 2H <sub>2</sub> O)	Traces	Traces
(NaCl)	0.12%	0.29%
(CaCO <sub>3</sub> )	89.65%	3.39%
Perte au feu	40.07%	1.73%
Eau de constitution	10.62%	10.24%
Bilan	98.13%	100.48%

Par ailleurs ces sables sont caractérisés par des équivalents de sable de 74% pour le sable de carrière et de 94% pour le sable de dune avec des valeurs au bleu de méthylène respectives de 0.5 et de 0.4, ce qui atteste de leur faible pollution.

## 2.2. Le liant

Le liant utilisé est composé de laitier granulé et d'un activant basique qui est la chaux éteinte.

### 2.2.1. Laitier granulé :

C'est le laitier granulé de granularité 0/5mm (Figure 6) avec une teneur en inertes égale à 0,29 %, de fraîche production, d'une couleur grise verdoyante [4].

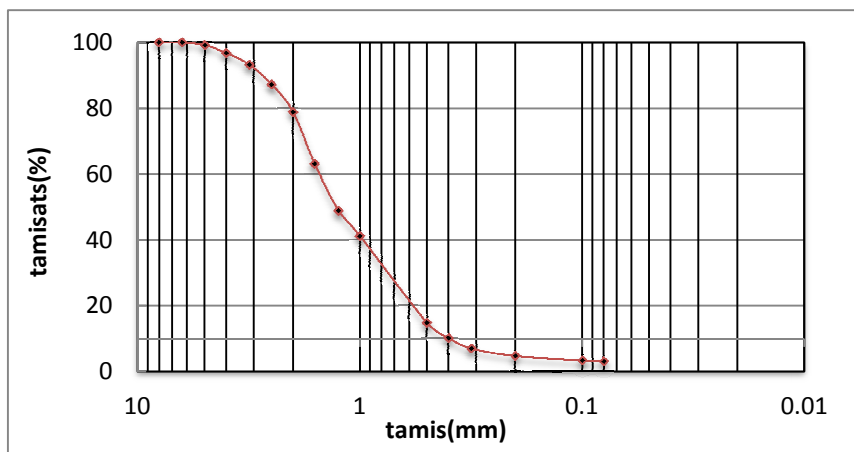


Figure 6 - Courbe granulométrique du laitier granulé

Les résultats de l'analyse chimique effectuée sur le laitier granulé sont regroupés sur le tableau 2.

Tableau 2 - Analyse chimique du laitier granulé

Composition chimique en (%)											
CaO	SO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	P.A.F.	
45.78	0.38	34.99	9.79	3.92	0.67	2.47	0.86	0.01	0.34	0.50	

Les analyses effectués sur le laitier et qui sont représentées dans le tableau 3 montrent que ce matériau peut être utilisé comme liant vu la valeur de son coefficient de réactivité  $\alpha$  qui est de 39. L'indice de basicité de 1.3 montre le caractère basique de notre laitier, caractère favorable pour une utilisation en technique de sable laitier [4].

Tableau 3 - Caractéristiques physico-chimiques du laitier.

La masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.2
La masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.8
Friabilité (%)	19
Surface spécifique Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	2057
Coefficient de réactivité $\alpha$	39
Module de basicité	1.3
Le produit A.C	448.19

On note que le produit A.C représente une réactivité potentielle du laitier dans lequel C représente la teneur en CaO et A la teneur en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

La figure 7 présente le diffractogramme du laitier granulé, typique d'un matériau essentiellement vitreux. En effet les laitiers vitreux présentent en diffraction des rayons X un ou plusieurs halos larges et diffusés. Ces halos sont l'image du désordre local qui existait dans le liquide et qui a été figé pendant la trempe. Outre la fraction vitreuse, le laitier présente de faibles quantités de minéraux cristallisés. (Figure7).

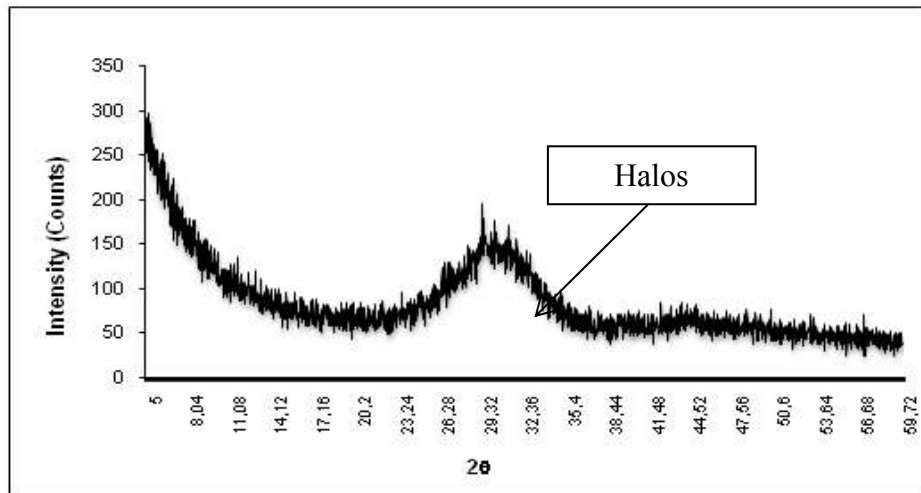


Figure 7 - Diffractogramme aux rayons X de laitier granulé d'El Hadjar

Le diffractomètre aux rayons X utilisé, est destiné à l'identification des phases cristallines dans un composé donné. Cela nous a permis de montrer que notre laitier granulé est amorphe et il est principalement composé de Mililite.

### 2.2.2. La chaux :

La chaux qui joue le rôle d'activation du laitier granulé est caractérisée par une teneur en chaux libre > 50%, un refus sur le tamis de 80 $\mu$  < 10% et une finesse Blaine sur le tamisât à 80 $\mu$  > 7000 cm<sup>2</sup>/g.

## 3. ETUDE DE MELANGE DE SABLE LAITIER

Un sable laitier **SL** peut être défini comme le mélange, effectué en centrale de malaxage, d'un (ou plusieurs) sable(s), d'un certain pourcentage de laitier vitrifié (granulé ou bouleté) et d'un activant basique à un dosage généralement voisin de 1% [3]. Il est principalement utilisé dans la confection des assises de chaussées. On parle de sable-laitier lorsque le matériau de base est un sable [5].

### 3.1. Méthodologie de formulation du sable laitier SL

Le choix des compositions des mélanges de sables laitier s'appuie essentiellement sur les deux critères suivants [5,6] :

- La stabilité immédiate qui traduit globalement l'aptitude au compactage et à la circulation des engins de chantiers ;
- Les performances mécaniques qui caractérisent l'aptitude du matériau à résister à long terme aux différents modes de sollicitations dues au trafic.

Plusieurs formulations ont été réalisées en faisant varier les pourcentages du laitier, le tableau 4 récapitule les formulations retenues en respectant les conditions de la stabilité immédiate, sachant que pour chaque mélange, 1% de chaux a été incorporé.

Tableau 4 - Les formulations testées de sable laitier

Formulation	Laitier (%)	Sable 0/6 (%)	Sable de dune(%)
1	10	30	60
2	20	20	60
3	25	25	50
4	30	20	50

### 3.2. Détermination des caractéristiques Proctor modifié de sable laitier (SL)

Les essais Proctor modifié ont été effectués pour chaque dosage en laitier incorporé dans le mélange afin de déterminer les densités sèches et les teneurs en eau optimales pour chaque formulation.

Après le compactage, on démoule les éprouvettes CBR (Figure 8) et on calcule les teneurs en eau.



Figure 8 - Epreuve de sable laitier compactée dans le moule CBR

Les courbes Proctor modifié ainsi obtenues à plusieurs pourcentages de laitier sont regroupées dans la figure 9.

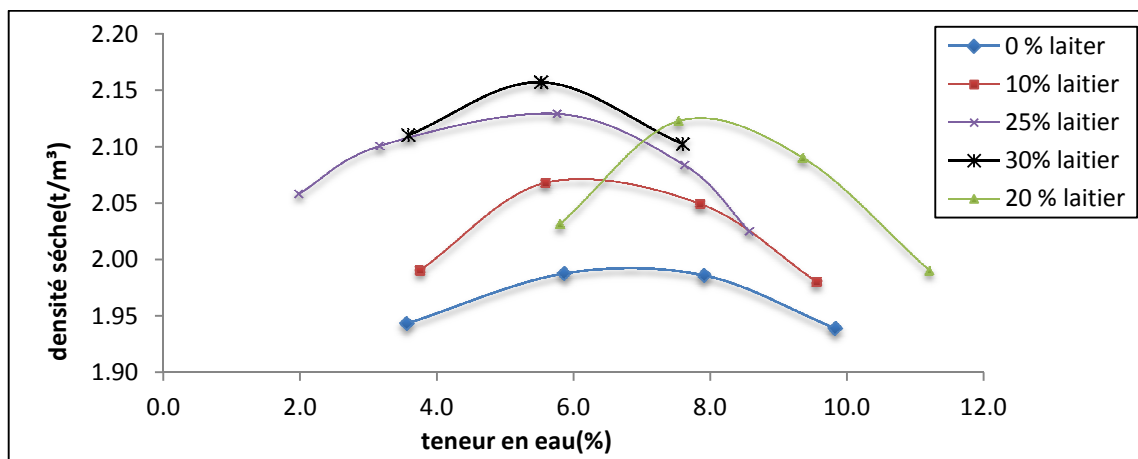


Figure 9 - Les courbes Proctor modifié du sable laitier à plusieurs pourcentages de laitier

### 3.3. Déterminations de l'indice portant immédiat (IPI) du sable laitier SL

Les essais de poinçonnement CBR immédiat effectués sur les éprouvettes de sable laitier (figure10) montrent que l'indice immédiat IPI augmente au fur et à mesure que la teneur en laitier augmente (figure 11).



Figure10 - Poinçonnement CBR d'une éprouvette de sable laitier

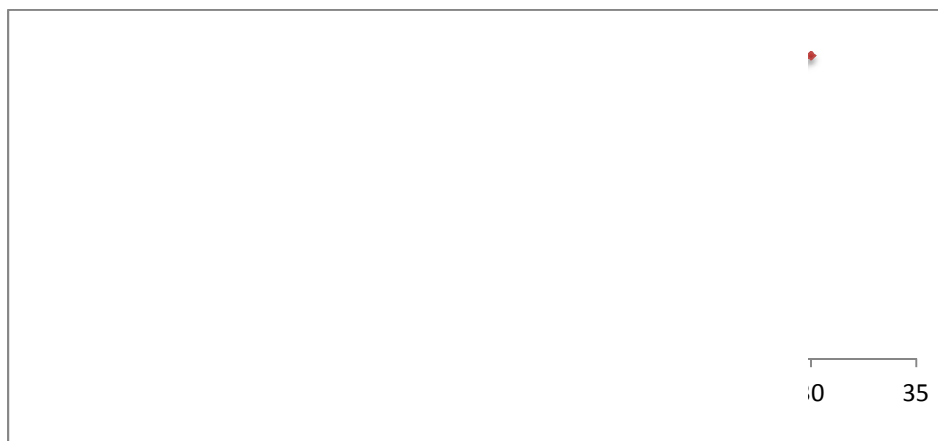


Figure 11 - Évolution de l'indice portant immédiat en fonction de dosage en laitier  
 Nous remarquons que l'indice portant immédiat augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier sans pour autant atteindre un optimum avec les teneurs testées. Les résultats obtenus ainsi que le gain de stabilité ( $\Delta IP$ ) sont résumés dans le tableau 5.

Tableau 5 - Résultats de l'essai de portance immédiate

Laitier (%)	IPI (%)	$\Delta IP$
0	43	-
10	70.47	63.88
20	74.6	73.49
25	116.47	170.86
30	148.5	245.35

Sachant que le gain de stabilité ( $\Delta IP$ ) est calculé comme suit :



$$\Delta IP = \frac{IP_0 - IP_i}{IP_0}$$

Avec :

IP<sub>0</sub> : indice portant immédiat de mélange de base à 0% de laitier

IP<sub>i</sub> : indice portant immédiat de mélange à i pourcentage de laitier, i = 10, 20, 25, 30%.

#### 4. ETUDE DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES DU SABLE LAITIER

##### 4.1. Résistance à la compression simple

L'essai de compression simple est réalisé sur des éprouvettes de sable laitier de diamètre 50mm et de hauteur 100 mm (figure12) compactées statiquement à l'OPM et conservées à une température de 20 °C pendant des durées bien déterminées.

Des séries de trois éprouvettes pour chaque formule ont été testées à 0, 7, 28, 60, 90 et 180 jours.



Figure 12 - Confection des éprouvettes par le compactage statique

Sur la figure 13, nous avons représenté la courbe contrainte – déformation pour un sable laitier traité à 20 % de laitier et pour un écrasement à 90 jours. La figure 14 représente la même éprouvette après essai.

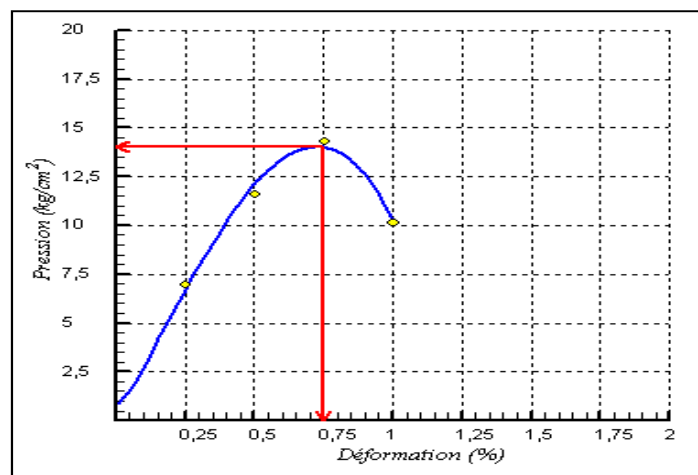


Figure 13 - Courbe contrainte – déformation de sable laitier



Figure 14 - Eprouvette de sable laitier écrasée à 90 jours

Les courbes qui traduisent l'évolution de la résistance à la compression au cours du temps à différents pourcentages de laitier sont représentées dans la figure 15.

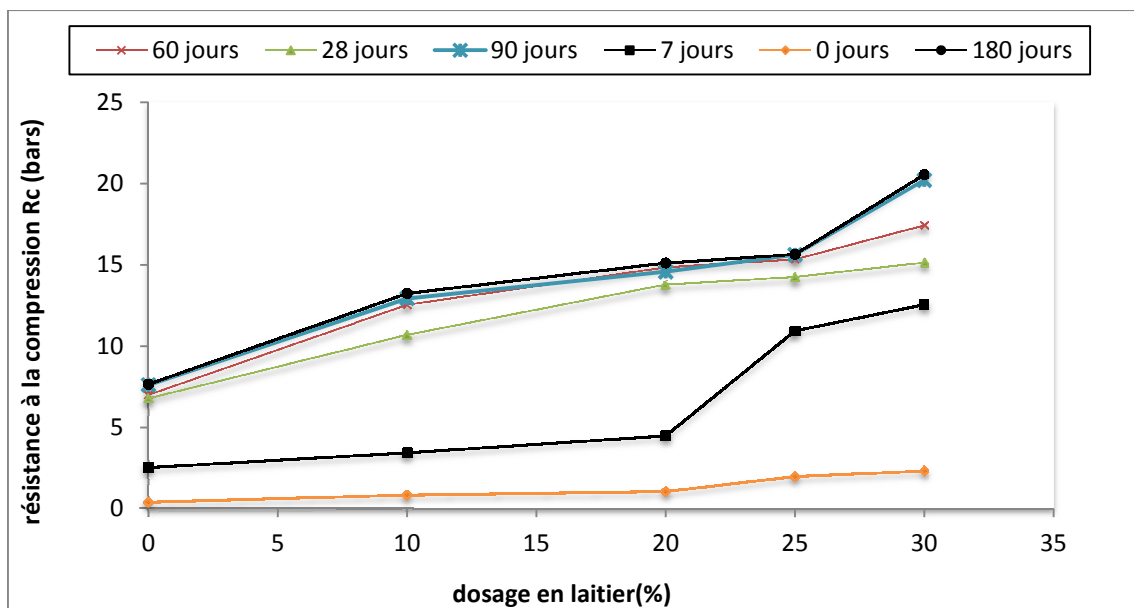


Figure 15 - La résistance à la compression simple en fonction de dosage en laitier au cours

On remarque que l'ajout du laitier granulé améliore la résistance à la compression simple de notre sable laitier au cours de temps.

#### 4.2. Calcul de module d'élasticité $E$ des sables laitier

La figure 16 montre l'évolution du module d'élasticité  $E$  en fonction du pourcentage de laitier et ce en fonction du temps.

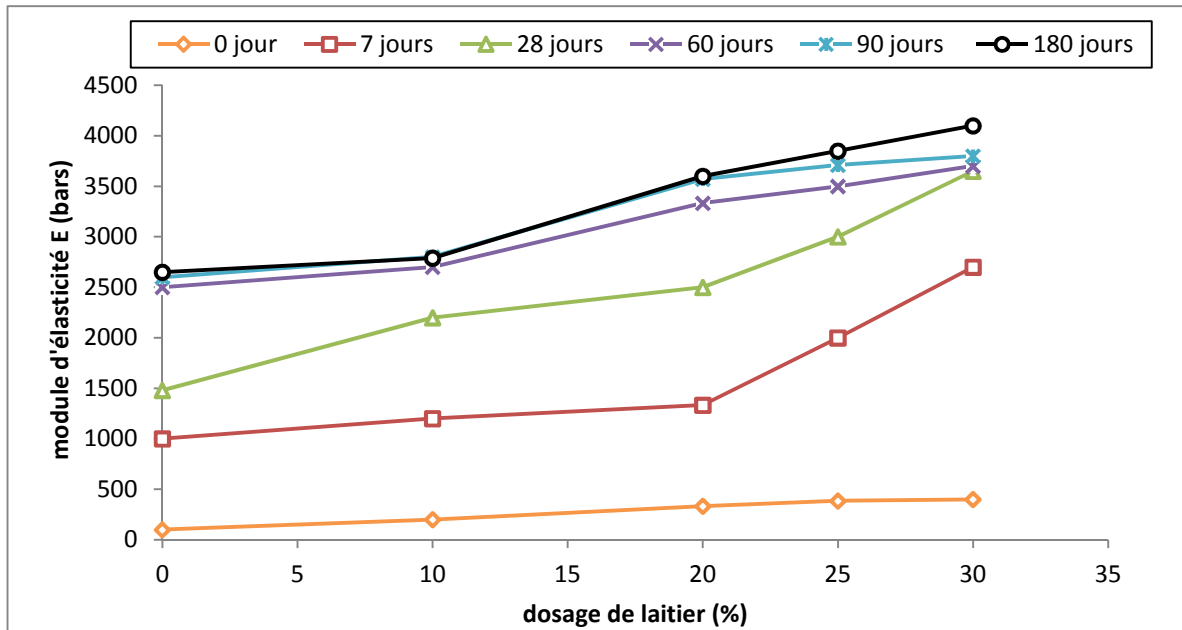


Figure 16 - Evolution de E en fonction de dosage de laitier granulé

On remarque que le module d'élasticité E de sable laitier évolue de la même façon que la résistance à la compression simple au cours de temps. On remarque une certaine stabilisation du module à 90 jours ce qui indique la prise totale de sable laitier.

#### 4.3. La résistance à la traction de sable laitier

Des essais de traction à 90 et 180 jours ont été effectués et les valeurs obtenues nous permettent de déterminer les valeurs de la résistance à la traction et du module à 360 jours tels que le précise la norme NF P 98-114-2 [7], et dont les formules figurent ci après:

$$Rt_{360j} \text{ (bars)} = Rt_{90j} / 0.7$$

$$E_{360j} \text{ (bars)} = E_{90j} / 0.75.$$

Le tableau 6 donne les valeurs de la résistance à la traction et le module d'élasticité du sable laitier pour les différents dosages en laitier à 360 jours.

Tableau 6 - Résistance à la traction et module d'élasticité à 360 jours

Laitier (%)	0	10	20	25	30
Rt <sub>360</sub> (bars)	1.46	3.07	4.07	6.05	6.64
E <sub>360</sub> (bars)	3467	3733	4761	5300	5429

Les courbes qui donnent l'évolution de la résistance à la traction et de module d'élasticité E, à un an, en fonction de pourcentage de laitier sont représentés respectivement dans les figures 17 et 18.

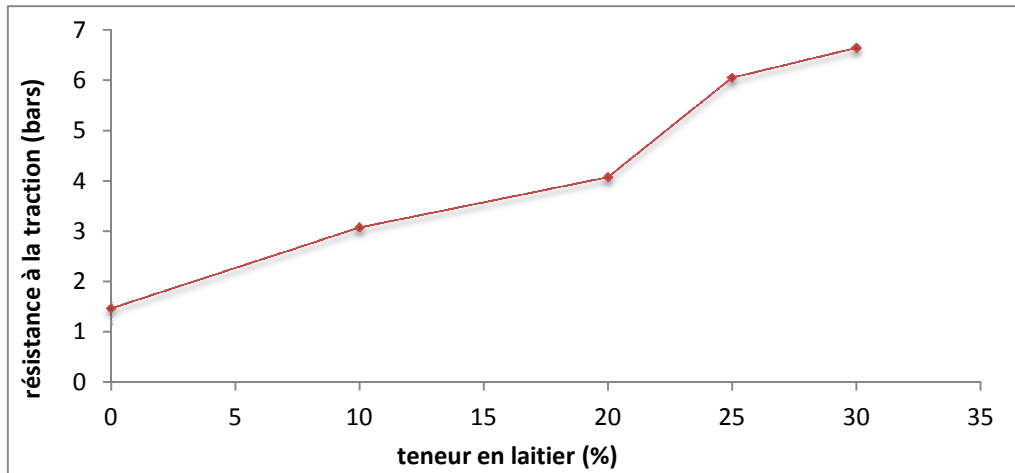


Figure 17- La résistance à la traction indirecte à 360 jours du sable laitier

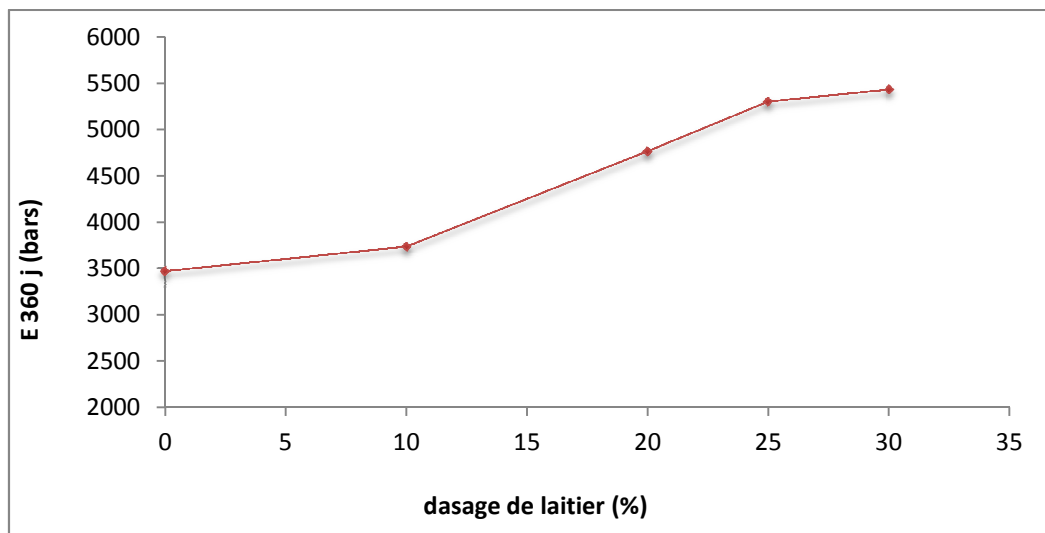


Figure 18- Le module d'élasticité à 360 jours en fonction de dosage de laitier

La résistance à la traction  $R_t$  et le module d'élasticité  $E$  évoluent de la même façon. Et augmentent en fonction de la teneur en laitier.

## 5. CONCLUSION

Cette étude montre que l'incorporation progressive du laitier granulé améliore la portance et entraîne une augmentation des résistances mécaniques des sables laitier à travers le temps.

Vu les propriétés des laitiers qui sont très proches de celles de ciment, on peut dire que les performances mécaniques remarquables sont dues au rôle chimique du laitier qui consiste à améliorer la microstructure du mélange en fixant la Portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  libérée par l'hydratation du laitier. Cette réaction hydraulique donne naissance à un deuxième silicate de calcium hydraté supplémentaire (CSH), principal responsable de durcissement du mélange de sable laitier.

## Références

1. ZEGHICHI, L. (1998). Etude des liants et bétons à base des alcalis et ciments au laitier. Thèse de magister, Université de Biskra, Biskra, Algérie, 120 p.
2. BEHIM M., REDJEL B., JAUBERTHIE R. (2002) « réactivité du laitier de hauts fourneaux d'Annaba (Algérie) en substitution partielle du ciment, Journal de Physique.
3. ALEXANDRE J. et SEBILEAU J.L. (1988) « le laitier de haut fourneau (élaborations, traitements, propriétés et emplois) ».
4. CHERFA H., AIT MOKHTAR K. (2009), Valorisation des déchets industriels pour la stabilisation des couches de chaussées : cas des laitiers des hauts fourneaux, Séminaire International « Innovation et Valorisation dans le Génie Civil ». Les 5 – 7 février 2009 à Hammamet, Tunisie. Communication pages79 -89.
5. PATIER (2001) « les techniques routières à base de laitiers vitrifiés de haut fourneau », (extrait de la conférence Banque mondiale d'AMMAN), séminaire sur les laitiers de haut fourneau les 08 et 09 Mars 2001.
6. CHAUVIN J.J. (1987), Les sables, Guide pratique d'utilisation routière-, ISTED.
7. NF P 98-114-2 (1994) Norme française. Assises de chaussées « méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques – partie 1 : sables traités aux liants hydrauliques »