

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

H. CHERFA¹, K. AIT MOKHTAR¹, M.E.MUNOZ² & A. SANTAMARIA²

¹ University of sciences and technology Houari Boumediene, FGC/USTHB BP 32 El Alia161111 Bab Ezzouar Algiers, Algeria ha_cherfa@yahoo.fr, kaitmokhtar@yahoo.fr

² Polymer Science and technology Department and polymer institute POLYMAT, Faculty of chemistry, University of the Basque Country UPV/EHU, P.O.Box 1072 San Sebastian, Spain.

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 matériaux locaux tel que les sables de dune et des déchets et sous-produits d'origines diverses (mines, carrières, industrie métallurgique, etc....) sans que cette utilisation ne doive nécessairement se substituer à celle des matériaux traditionnels. 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 un grand complexe sidérurgique qui génère 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.

L'immense étendue désertique de l'Algérie recèle des quantités inestimables de sable de dune généralement de granulométrie 0/2. Ce sable de dune est le seul un matériau local des régions du grand sud Algérien (figure 1) et il est resté très longtemps marginalisé. Actuellement, de grands efforts sont consentis afin de

valoriser le sable de dune et notre travail s'inscrit dans ce cadre puisqu'on se propose de valoriser le sable de dune par la technique du sable laitier.

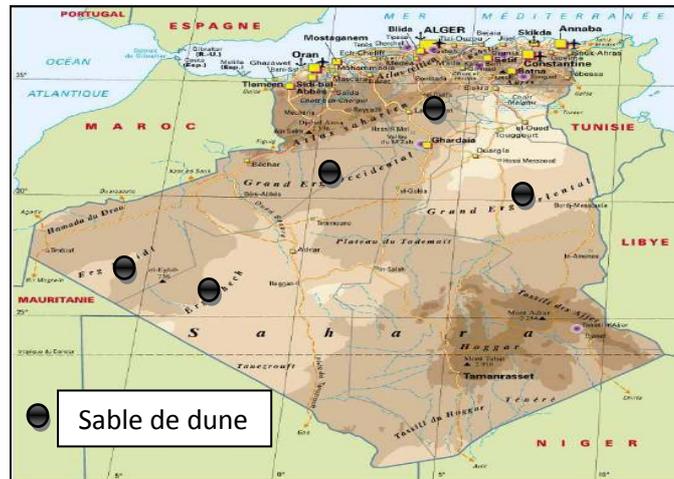


Figure 1. Situation géographique des ergs (sable de dune) de l'Algérie [1]

2. LE SABLE DE DUNE

De nombreux chercheurs, dans des thématiques scientifiques diverses, cherchent à exploiter le sable de dune, propre et présent à l'abondance. Son utilisation pourrait être liée à sa très forte teneur en silice, matériau à la base d'applications dans l'électronique et l'optique par exemple. En génie civil, ce sable présente aussi un grand intérêt économique et environnemental pour l'Algérie. En effet, la hausse de la demande du sable de construction en Algérie, l'incapacité des carrières algériennes à fournir du sable fin et l'arrêt programmé de l'utilisation du sable de plage, qui conduit à un grand problème écologique et touristique pour l'Algérie, sont autant de raisons qui poussent à la valorisation de ce produit.

2.1. Définition

Le sable de dune est un produit de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, la pluie etc. Les déserts de sable, ou ergs, se localisent dans les vastes cuvettes d'épandage ou des puissantes accumulations alluviales se sont concentrées par de grands écoulements liés aux périodes pluviales du début du quaternaire [2].

2.2. Analyses par diffraction des rayons X d'un sable de dune

Les résultats d'analyse élémentaire par DRX menée sur le sable de dune sont présentés graphiquement sur la Figure 2. Nous remarquons un pic d'environ 100 % de silice qui traduit la dominance du SiO_2 dans le sable analysé, les autres éléments révélés étant le CaCO_3 et le Fe_2O_3 présents à de faibles pourcentages.

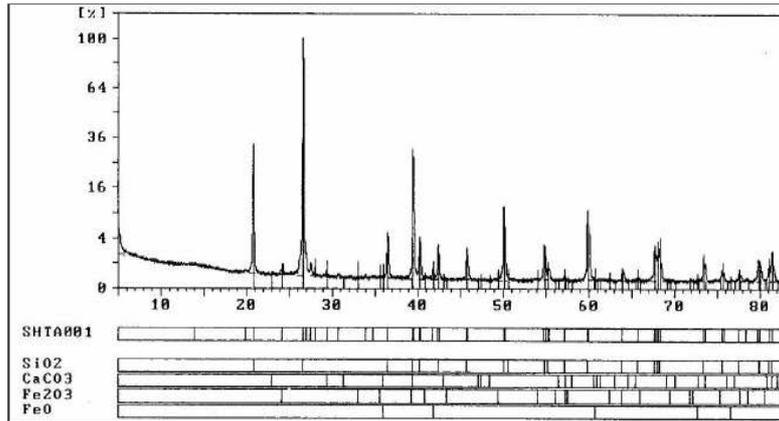


Figure 2. Analyse par DRX d'un sable de dune (Sable de Taghit) [2].

Les sables de dunes sont essentiellement des sables siliceux, les carbonates et les argiles se trouvant sous forme de traces.

2.3. Localisation du site de prélèvement du sable de dune utilisé

Le site de prélèvement est situé dans la partie nord de la ville de Boussaâda, où d'importantes constructions ont été édifiées sur des terrains constitués essentiellement de dunes de sable. Le choix de ce site a été motivé, notamment, en raison des dégradations apparues dans certaines constructions visiblement fondées directement sur les dunes (figure 3).



Figure 3. Localisation du site de prélèvement du sable de dune à Boussaâda. [3]

3. LE LAITIER DE HAUT FOURNEAU

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 [4]. Les procédés de refroidissement (lent ou rapide) du laitier fondu diffèrent selon le produit et la

structure que l'on désire obtenir (figure 4). Le laitier de haut fourneau se présente donc sous plusieurs formes principales : le laitier granulé, bouleté ou cristallisé

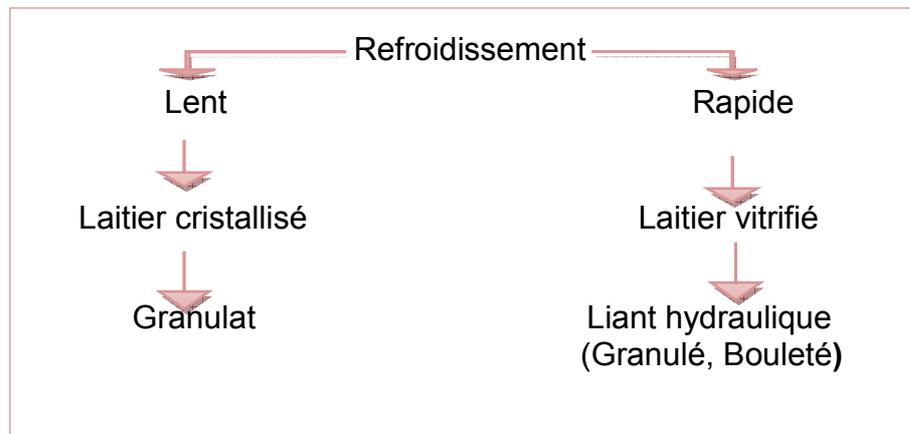


Figure 4 - Processus d'élaboration des différents types de laitiers

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 [5]. 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 5), qui sera utilisé comme sable ou comme liant hydraulique.



Figure 5 - Obtention du laitier granulé par le procédé de granulation

4. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL ET MATÉRIAUX D'ÉTUDE :

4.1. Les sables

On a utilisé trois types de sable. Le premier est un sable de dune de classe granulométrique de 0/2mm provenant de Boussaâda, le deuxième est un sable calcaire concassé 0/6mm et le troisième est sable de laitier granulé de granulométrie 0/5mm [6].

4.1.1. Caractérisation du sable de dune de Boussaâda

L'analyse granulométrique de sable de dune a donné la courbe granulométrique représentée sur la figure 6.

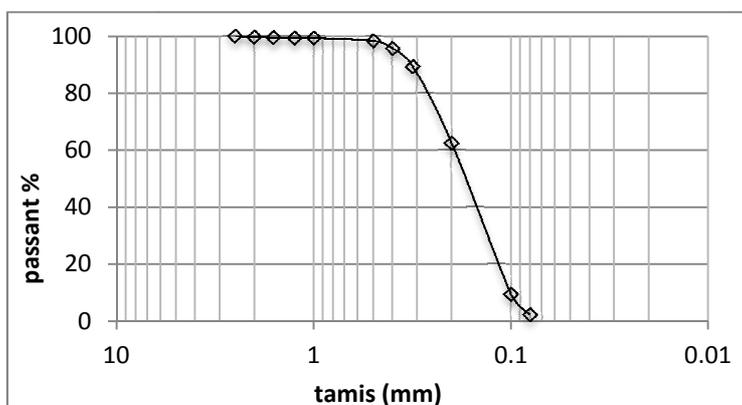


Figure 6 - Courbe granulométrique de sable de dune

D'après cette courbe granulométrique, on constate que le sable de dune est un sable propre mal gradué ($C_u < 6$) et représente une granularité serrée ($C_u < 2$).

4.1.2. L'analyse chimique et physique de sable de dune

Les essais de caractérisation physique et chimique, effectués sur le sable de dune ont donné des résultats récapitulés dans le tableau 1.

Tableau 1 - Caractéristiques physico-chimique du sable de dune.

La masse volumique en vrac (g/cm^3)	1.36
La masse volumique absolue (g/cm^3)	2.62
ES (%)	73,79
Valeur au bleu (g)	0,5
Module de finisse	0.83
Matière organique	0.0
Absorption d'eau (%)	0.44
Silice (SiO_2) (%)	95.53
Carbonates(CaCO_3) (%)	3.39

Le sable de dune présente des caractéristiques chimiques et physiques très favorables à l'utilisation en construction routière, telles que sa propreté (l'absence quasi-totale d'éléments argileux), et sa composition chimique siliceuse (présentant les meilleures performances mécaniques).

4.1.3. Analyse physique et chimique de sable concassé et de sable laitier

Les courbes granulométriques des deux sables sont représentées sur la figure 7 et leur caractéristiques physico-chimiques sont données dans le tableau 2

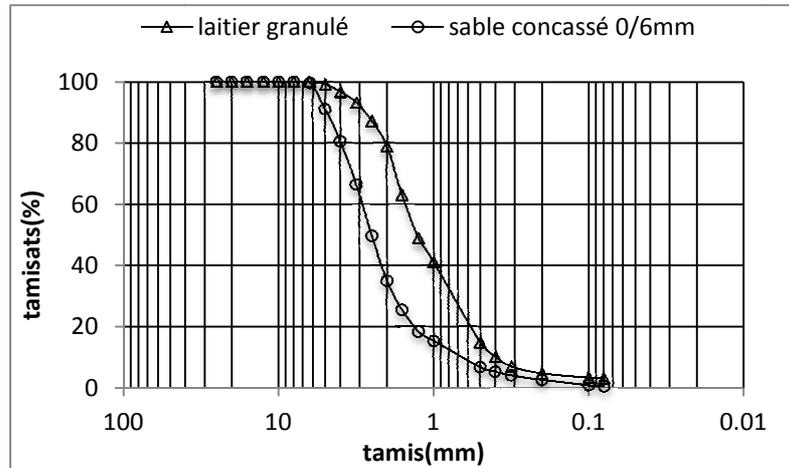


Figure 7 - Les courbes granulométriques de sable 0/6mm et de sable de laitier granulé utilisés.

Tableau 2 - Analyse physico-chimique des sables utilisés.

Matériau	Sable 0/6	Sable de laitier
Teneur en (SiO ₂) %	5.94	34.99
Teneur en (CO ₂) %	39.45	-
Teneur en (Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃)	1.8	10.46
Masse volumique réelle (g/cm ³)	2.75	2.8
Masse volumique en vrac (g/cm ³)	1.45	1.2
ES (%)	94	-
Friabilité (%)	40	19
Surface spécifique (cm ² /g)	-	2057

4.2. Le liant

Le liant utilisé est composé de laitier granulé et d'un activant basique qui est la chaux éteinte. Cette dernière est caractérisée par une teneur en chaux libre > 50%, un refus sur le tamis de 80μ < 10% et une finesse Blaine sur le tamisât à 80μ > 7000 cm²/g.

5. 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% [5]. Il est principalement utilisé dans la confection des assises de chaussées. On parle de sable-laitier lorsque le matériau de base est un sable [7]. Dans notre cas Le sable laitier s'obtient en traitant le sable de dune, corrigé par un sable concassé de

granulométrie 0/6mm, avec des pourcentages différents de laitier granulé activé par 1% de chaux éteint

5.1. Étude de sable de dune avant traitement

Le mélange de base (sable non traité) est composé de 20% de sable concassé et 80% de sable de dune.

Dans le but de déterminer les caractéristiques Proctor de notre mélange de base, on a effectué l'essai Proctor modifié, en utilisant les moules CBR. La courbe Proctor est représentée dans la figure 8

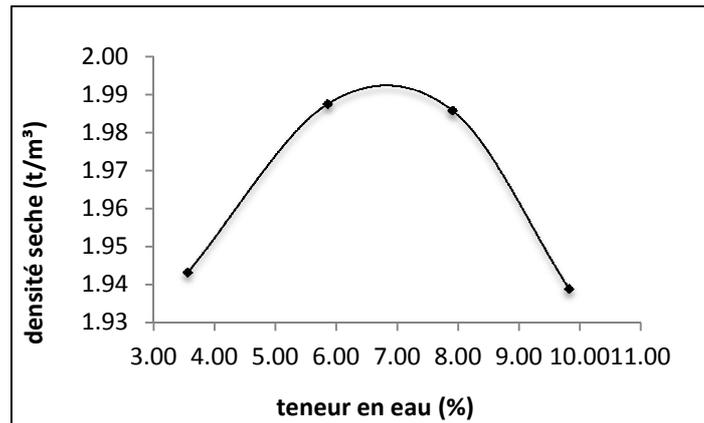


Figure 8- Courbe Proctor modifié du mélange de base

Les caractéristiques Proctor tirées de cette courbe sont les suivantes :

- densité sèche (γ_d) : 1.992 t/m³

- la teneur en eau optimale W_{opm} = 6.9%

La courbe qui donne l'évolution de l'effort de pénétration en fonction de l'enfoncement, obtenue par l'essai CBR, est représentée sur la figure 9

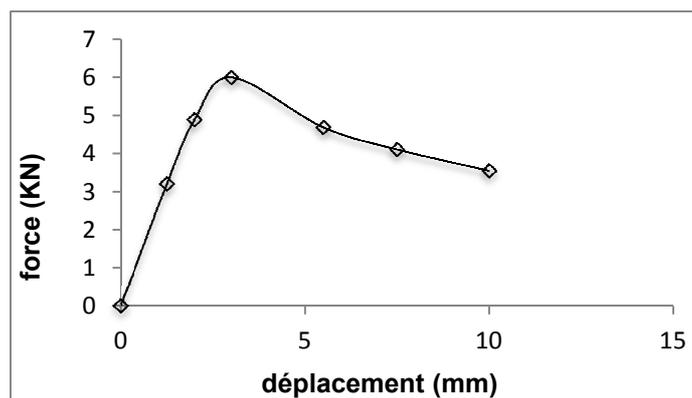


Figure 9- La courbe force – déplacement du mélange de base

A partir de la courbe force – déplacement, on a tiré l'indice portant immédiat de mélange de référence qui est de 43%, il est bien inférieur à 50% d'où la stabilité est insuffisante. Il est donc nécessaire de faire appel à un liant hydraulique pour améliorer la portance de notre mélange.

Pour des raisons de maniabilité, ces liants doivent être à prise lente. C'est pourquoi un liant hydraulique à base de laitier granulé de haut fourneau, activé par la chaux, a été choisi.

5.2. Traitement de sable de dune au laitier granulé

Le choix des compositions des mélanges de sables laitier (sable de dune traité au laitier) s'appuie essentiellement sur les deux critères suivants [7,8] :

- 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 3 récapitule les formulations retenues en respectant les conditions de la stabilité immédiate, sachant que pour chaque mélange, 1% de chaux a été incorporé.

Tableau 3 - 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

5.2.1. 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 10) et on calcule les teneurs en eau.



Figure 10 - Éprouvette de sable laitier compactée dans le moule CBR

Les courbes Proctor modifié ainsi obtenues à plusieurs pourcentages de laitier sont regroupées dans la figure 11.

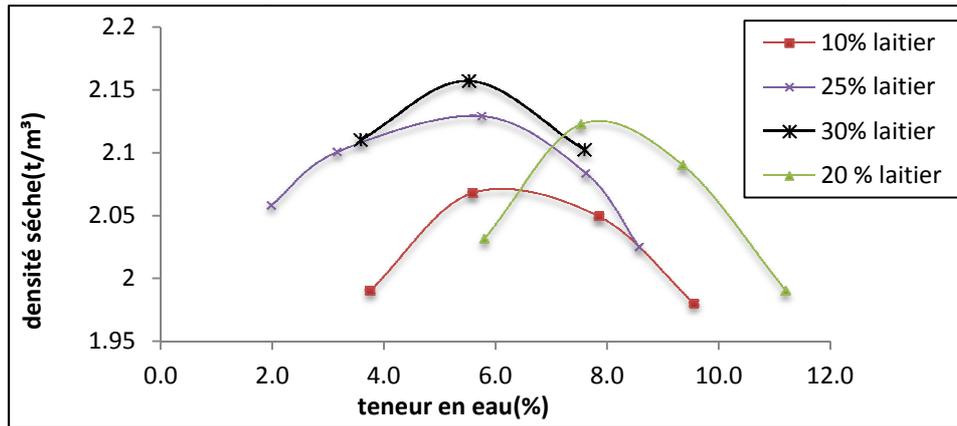


Figure 11 - Les courbes Proctor modifié du sable laitier à plusieurs pourcentages de laitier

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

Les essais de poinçonnement CBR immédiat effectués sur les éprouvettes de sable laitier (figure 10) montrent que l'indice immédiat IPI augmente au fur et à mesure que la teneur en laitier augmente (figure 12).



Figure 12 - Poinçonnement CBR d'une éprouvette de sable laitier

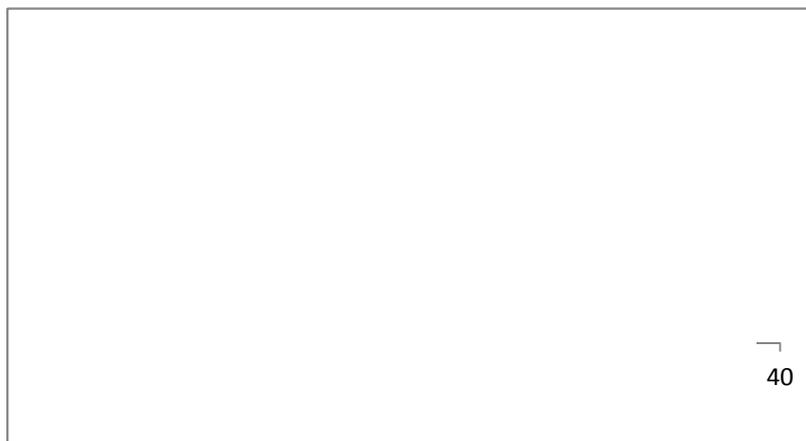


Figure 13 - Évolution de l'indice portant immédiat en fonction de dosage en laitier

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 (ΔIP) sont résumés dans le tableau 4.

Tableau 4 - Résultats de l'essai de portance immédiate

Laitier (%)	IPI (%)	ΔIP
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 (ΔIP) est calculé comme suit :

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

Avec :

IP_0 : indice portant immédiat de mélange de base à 0% de laitier

IP_i : indice portant immédiat de mélange à i pourcentage de laitier, $i = 10, 20, 25, 30\%$.

6. ETUDE DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES DU SABLE LAITIER

6.1. 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 (figure14) 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 14 - 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.

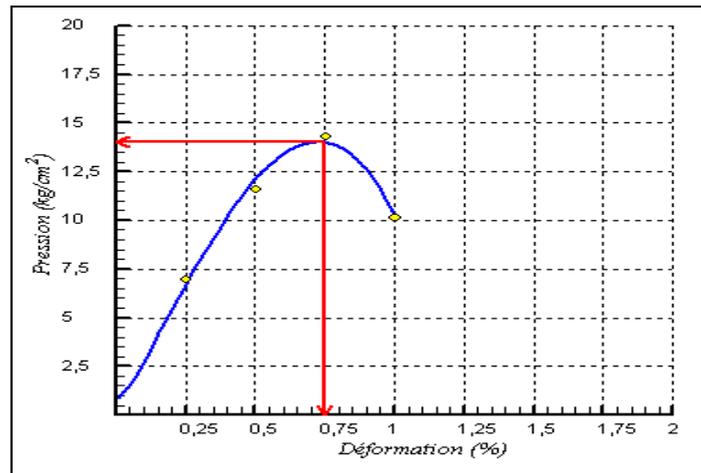


Figure 15 - Courbe contrainte – déformation de sable laitier



Figure 16 - Éprouvette 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.

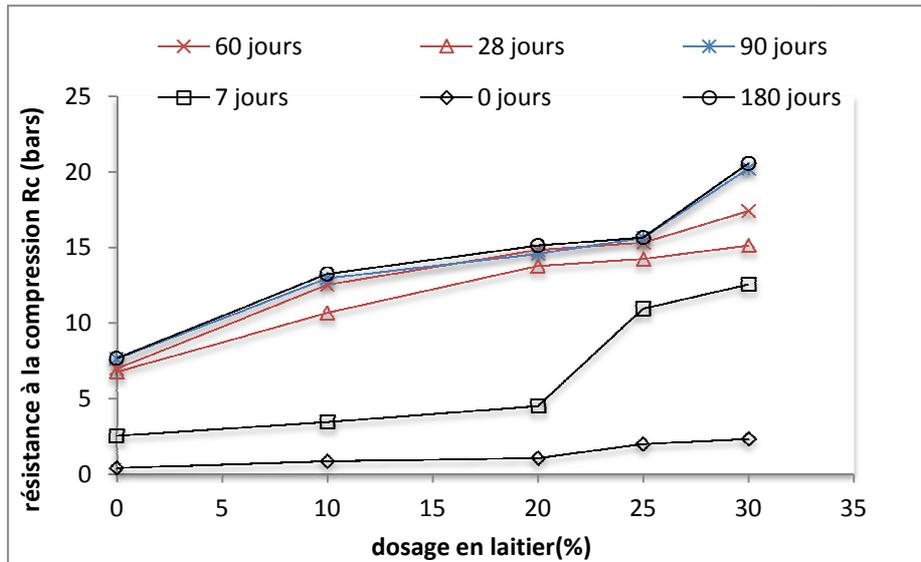


Figure 17 - La résistance à la compression simple en fonction de dosage en laitier au COURS

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

6.2. Calcul de module d'élasticité E des sables laitier

La figure 18 montre l'évolution du module d'élasticité E en fonction du pourcentage de laitier et ce en fonction du temps.

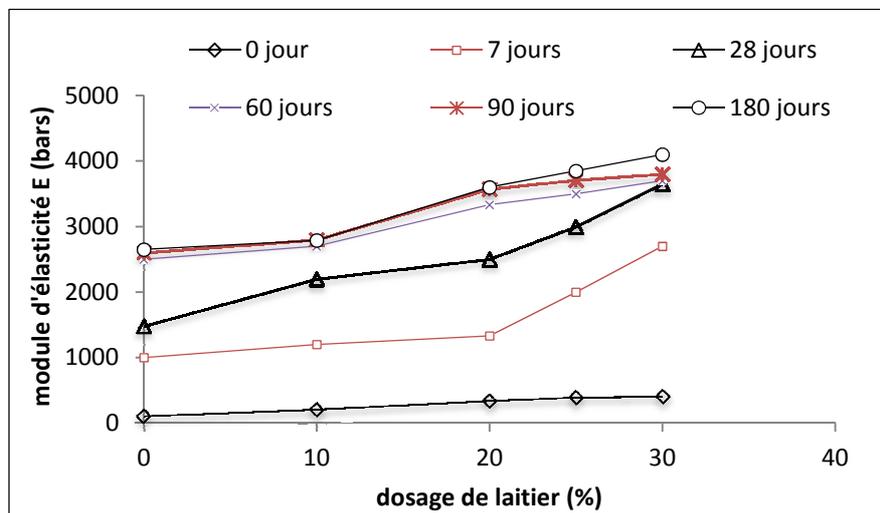


Figure 18 - Évolution de E en fonction de dosage de laitier granulé

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.

6.3. 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 [9], 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 5 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 5 - Résistance à la traction et module d'élasticité à 360 jours

Laitier (%)	0	10	20	25	30
Rt ₃₆₀ (bars)	1.46	3.07	4.07	6.05	6.64
E ₃₆₀ (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 19 et 20.

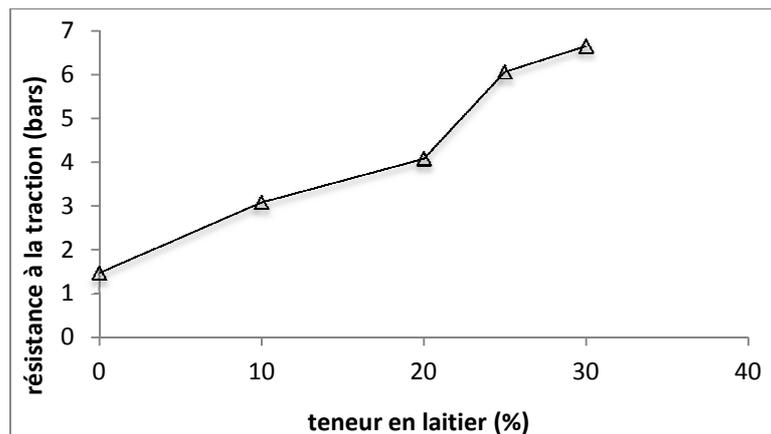


Figure 19 - La résistance à la traction indirecte à 360 jours du sable laitier

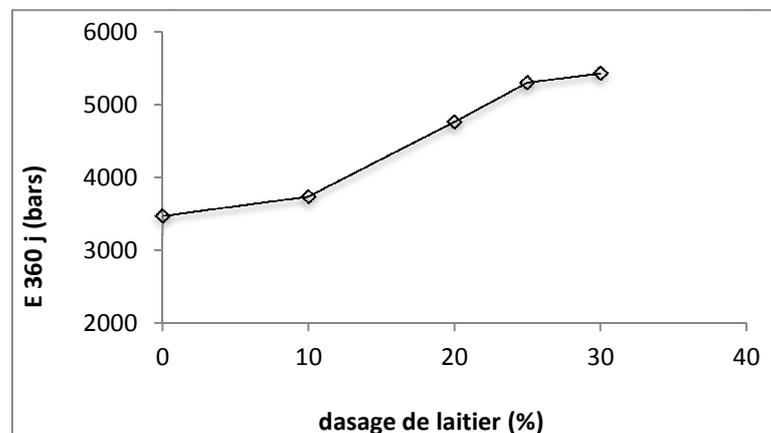


Figure 20 - Le module d'élasticité à 360 jours en fonction de dosage de laitier

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.

7. CONCLUSION

Cette étude nous a permis de mener une caractérisation physico-chimique des sables de dune de Boussaâda (Algérie) qui prouvent que ce sable de dune dispose de caractéristiques lui permettant d'être valorisé en technique routière.

Cette étude montre aussi 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 qui lui offre une meilleure performance mécanique.

RÉFÉRENCES

1. ALIMEN H. (1957), Sable quaternaires du Sahara Nord occidental. Service de la carte Géologique de l'Algérie, Alger, , p. 207.
2. TAFRAOUI A.(2009). Contribution à la valorisation de sable de dune de l'erg occidental (Algérie). Thèse de doctorat, université de Toulouse (France). 67,77 p.
3. MEDDAH A. (2008). Étude du comportement d'un sable de dune sous sollicitations triaxiales. Thèse de Magister, université de M'SILA.31 p.
4. BEHIM M., REDJEL B., JAUBERTHIE R. (2002) « réactivité du laitier de hauts fourneaux d'Annaba (Algérie) en substitution partielle du ciment, Journal de Physique.
5. ALEXANDRE J. et SEBILEAU J.L. (1988) « le laitier de haut fourneau (élaborations, traitements, propriétés et emplois) ».
6. 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.
7. 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.
8. CHAUVIN J.J. (1987), Les sables, Guide pratique d'utilisation routière-, ISTD.
9. 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 »