

II.1 Analyse chimique du sable de dune :

Le sable de dune se trouve en abondance sous formes des dunes à la place nommé ZAAFRANE à environ 57 km au nord ouest de Djelfa, utilisé en construction comme sable pour béton.

L'analyse chimique réalisée sur les échantillons prélevés a donné les résultats suivants :

Tableau II.1 : Analyse chimique de sable de zaafrane

Matériau	SiO ₂	CO ₂	Fe ₂ O ₃ ,Al ₂ O ₃	CaSO ₄ ,H ₂ O	NaCl	CaCO ₃	P.F ¹	H ₂ O	Bilan
Sable de dune	93.56%	1.49%	1%	Traces	0.29%	3.39%	1.73%	0.24	98.48%

- Il est que notre sable est un sable siliceux ; formé en grande quantité de SiO₂ (silice), avec la présence de quelques traces d'espèces calciques et magnésiques.

II.2 Analyse minéralogique de sable de dune :

L'essai à pour but de déterminer les différentes proportions de minéraux constituants, où en a utilisé le diffractomètre aux rayons X au laboratoire de physique à l'université de Amar Tlédji Laghouat. Les résultats de ces analyses sont présentés dans la Figure II.1

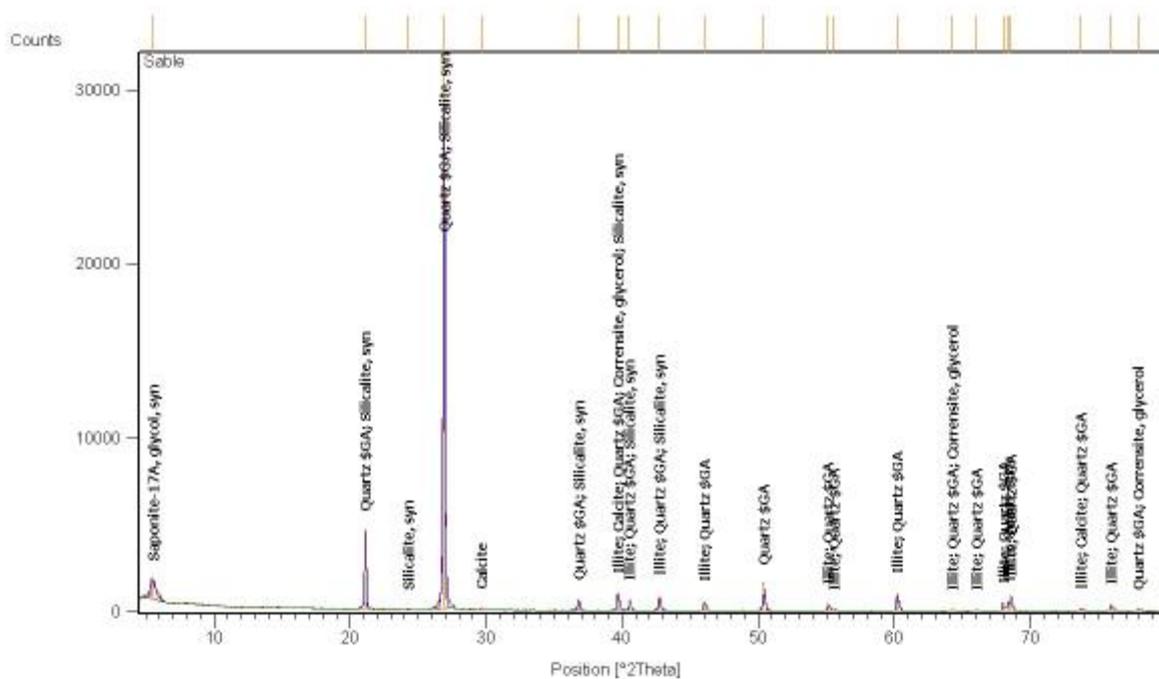


Figure II.1 Analyse minéralogique de sable de dune.

- Les analyses diffractométriques du sable montrent la présence et avec un fort pourcentage de quartz, et un faible pourcentage d'Illite et de calcite.

II.3 Caractéristiques physiques :

Il est nécessaire tout d'abord de déterminer les propriétés physiques de ce matériau valorisé en domaine routier c'est-à-dire de connaître les paramètres suivants : Poids spécifique, masse volumique réelle, masse volumique apparente, propreté et valeur de bleu de méthylène.

Les essais pour la détermination de ces différents éléments ont permis d'obtenir les résultats suivants :

Tableau II.2 : Caractéristiques physiques du sable

La densité apparente (g/cm ³)	1.56
La densité absolue (g/cm ³)	2.45
Propreté	85 %
VBS por 100g	0.07
Module de finesse	0.88

II.4 Caractéristiques mécaniques :

II.4.1 Etude du sable

II.4.1.2 Analyses granulométriques et sédimentométriques :

L'essai a pour but de déterminer en poids, la distribution des particules des sols suivant leurs dimensions.

L'analyse granulométrique s'obtient par deux opérations successives et complémentaires :

- Le tamisage sous l'eau (par voie humide) pour les particules de dimensions $\geq 80\mu\text{m}$ (0.08mm), l'essai est effectué selon la norme NF P94-056.
- La sédimentométrie pour les particules de dimensions $< 80\mu\text{m}$ qui complète la première, elle est effectuée selon la norme (NF P94-056). Le principe de cet essai est fondé sur la loi de Stokes ou la vitesse de sédimentation des particules en suspension dans un milieu dépend de leurs diamètres.
- La distribution des granulats de calcaire est traduite par la courbe appelée « courbe granulométrique »

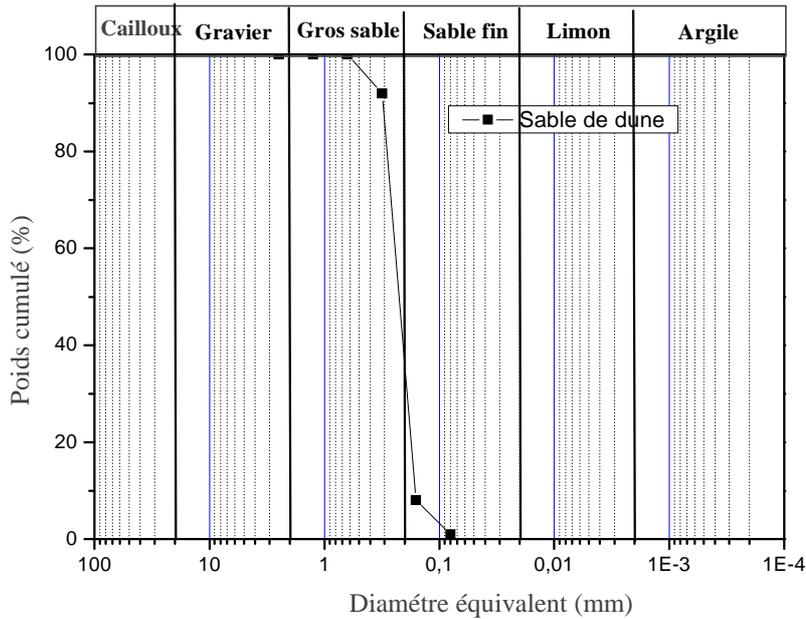
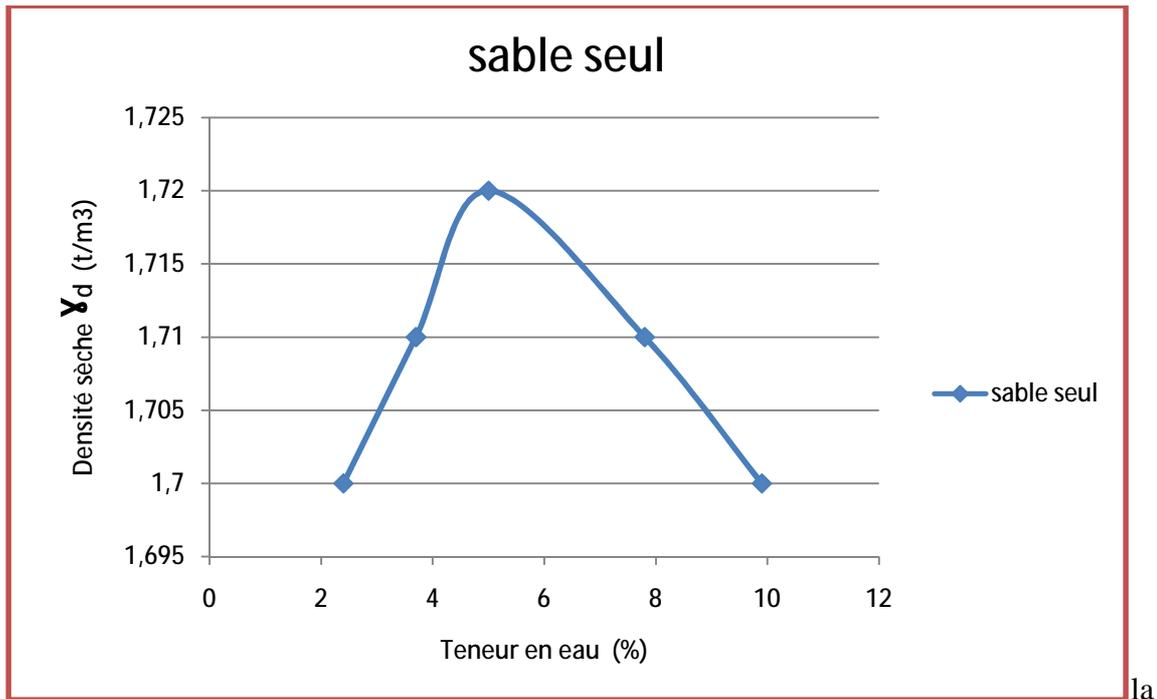


Figure II.2 : courbe granulométrique de sable de dune zaafrane .

II.4.1.3- Essai de Proctor modifié :

Cet essai normalisé (NF P 94-093), permet de reproduire au laboratoire plus ou moins les conditions de compactage sur chantier. Il est effectué généralement selon deux modes de compactages d'intensités différentes : par l'essai Proctor modifié à énergie plus intense et par l'essai Proctor standard (à énergie moyennement poussée), ce dernier a été choisi pour mener cette investigation. Si l'on fait varier la teneur en eau de l'échantillon et que l'on représente graphiquement la variation de γ_d en fonction de $w\%$, on obtient une courbe en cloche qui représente un point haut qu'on l'appelle « optimum Proctor ». La figure II.3. Représente la courbe Proctor de sable utilisé.



la courbe Proctor modifiée de sable utilisé.

Figure II.3 : Essai de Proctor modifié de sable de dune de zaafrane

A partir de cette courbe on peut avoir les paramètres fondamentaux de cet essai (paramètres de Proctor), qui sont la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale. Le résultat est regroupé dans le tableau III.6.

Tableau II.3 : Résultats de l'essai de Proctor modifié

	γ_d (t/ m ³)	w% _{opt}
Sable de zaafrane	1.72	05

III.4 Equivalent de sable

Cet essai par la norme (NF P 18-598), est utilisé pour évaluer la propreté des sables, il est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. On lave l'échantillon selon un processus normalisé et on laisse reposer le tout .au bout de 20 mn, on mesure les éléments suivants :

- La hauteur h_1 : sable propre + éléments fins.
- La hauteur h_2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention, est :

Selon que la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine :

Les résultats de l'essai de l'équivalent de sable, poids spécifique et la densité apparente de sable sont résumés dans le tableau II.4.

$$ES = \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \times 100$$

Tableau II.4 : Caractéristiques physique de sable

Désignation	Poids spécifique (t/m ³)	La densité apparente	Propreté
Valeur trouvé	2.4	1.35	85%

II 4.1.4 ESSAI C.B.R :**Définition :**

Le mode de construction d'une chaussée ou d'une piste souple dépend de :

- L'intensité du trafic
- Caractéristiques du sous-jacent

Il doit y avoir une relation entre ces éléments :

1. Sol sous-jacent
2. Couche de fondation
3. Trafic prévu

Le but de l'essai C.B.R est précisément d'apprécier l'aptitude du sol à supporter des charges routières pour permettre de dimensionner la couche de fondation.

- **Principe :**

Le matériau est compacté dans conditions de l'essai Proctor modifié puis on l'immerge dans l'eau pendant une période, ensuite une charge de poinçonnement égale à la charge de service est appliquée sur l'échantillon, on note les pressions, qui correspondent à des enfoncements donnés.

Par définition, l'indic pour .B.R est le rapport exprimé en pourcentage de pression obtenue sur un matériau standard pour le même enfoncement. On distingue deux types d'essais C.B.R :

- Essai C.B.R immédiat pour laquelle l'échantillon est compacté avec une teneur en eau donnée, puis immédiatement après compactage on procède au poinçonnement.
- Essai C.B.R normalisé, c'est le même que le précédent, la seule différence est que le poinçonnement se fait après quatre jours d'immersion. C'est cet essai qu'on utilise dans notre étude.

- **Préparation du matériau :**

Le compactage devra être fait dans les conditions de l'essai Proctor modifié, il faut que le matériau passe à travers le tamis \emptyset **20mm**.

- Faire l'essai Proctor modifié pour connaître la teneur en eau optimum
- Humidifier le matériau à cette teneur en eau W_{opt} .
- On mélange bien le matériau pour avoir une humidité uniforme.
- On pèse le moule plus la plaque de base.
- Compactage : on compacte le sol avec la teneur en eau W_{opt} suivant l'essai Proctor modifié (5 couches et 55 coups pour chaque couche).
- Araser et déterminer la teneur en eau.
- Enlever la plaque de base, ôter le disque d'espacement et fixer de nouveau le moule sur la plaque de base.
- Poinçonnement
 - Il est recommandé d'utiliser une presse muni d'une tige de poinçonnement de $\emptyset = 5cm$ ($D = 4.96$ cm, $S = 19.3$ cm³) et pourvue d'un contrôleur de cadence, ainsi que d'un comparateur permettant de suivre les enfoncements : On place l'échantillon sur un plateau bien axé sur la tige de poinçonnement, les charges annulaires sont remises en place (leur trou central correspond à la tige de poinçonnement).
 - On mène la tige au contact du sol et quand l'aiguille commence à bouger, on arrête le mouvement et on met le comparateur à zéro, puis on actionne la presse à une vitesse constante d'enfoncement égale à 1.27 mm/min et on note les forces qui correspondent aux enfoncements suivants :

0.625 mm	Soit au bout de	30 secondes
1.25 mm	Soit au bout de	1 minute
2 mm	Soit au bout de	1.5 minutes
2.5 mm	Soit au bout de	2 minutes
5 mm	Soit au bout de	4 minutes
7.5 mm	Soit au bout de	6 minutes
10 mm	Soit au bout de	8 minutes

- Exploitation des résultats

- L'indice portant Californien

On compare la pression qui a provoqué un certain enfoncement dans l'échantillon avec celle qui a provoqué le même enfoncement d'un sol type, on note les pressions correspondantes aux enfoncements 2.5 mm et 5 mm : l'indice est égal au maximum des deux rapports suivants :

$$I_{2.5} = \frac{P_{2.5}}{0.7} \text{ et } I_{2.5} = \frac{P_5}{1.05}$$

$P_{2.5}$: Pression correspond à un enfoncement de 2.5 mm.

P_5 : Pression correspond à un enfoncement de 5 mm.

0.7 Et 1.05 correspond à un enfoncement aux pressions d'enfoncement de matériau standard.

Remarque :

Les valeurs de $P_{2.5}$ et P_5 ne sont pas toujours celles qui ont été déterminées par l'essai, il y'a éventuellement correction des erreurs expérimentales.

Ø Abaque C.B.R :

Cet abaque sert à calculer l'épaisseur de la chaussée en fonction de la charge maximale (P) par roue en tonnes et l'indice portant (I) avec la formule de e :

$$e = \frac{100 + 150\sqrt{P}}{I + 5}$$

II.4.2-Essai de Résistance à la compression des mortiers et bétons.

On réalise des essais de compression simple sur tous nos matériaux à chaque échéance (7,14, 28, 60 jours).

La norme ASTM C 109/C 109M décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai effectué sur éprouvettes 50x50x50 mm³ et des éprouvettes de 70x70x70 mm³ pour le béton.

Chaque éprouvette sera soumise à la compression. En utilisant un appareil d'écrasement caractérisé par une force maximale de 2000 KN.

Si des essais sont réalisés à d'autres âges, ils devront être réalisés dans les limites de temps indiquées dans le tableau (II.10).

Ø Mode opératoire

Une fois l'éprouvette retiré de son milieu de conservation, on l'essuyé avec un tissu sec et on la laisse pendant 2 heure à l'air libre de laboratoire, on la place dans la cellule d'écrasement de l'appareil en appliquant un taux de chargement à une vitesse de déplacement relative entre

la platine supérieure et inférieure correspondant à une vitesse de chargement sur le spécimen de (900 à 1800N/s).

En enregistrant la force maximale indiquée dans le moniteur de la machine, on calcule la résistance à la compression comme suit :

$$SC = \frac{Fc}{A}$$

SC : Résistance à la compression en [MPa],

Fc : Force maximale de compression en [N],

A : surface de l'éprouvette en [mm²].

II.5 La chaux de SAIDA :

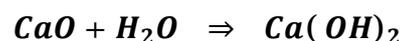
Les différents types de liants se distinguent par le mécanisme de leur durcissement qui est influencé par la composition des matières de départ. La chaux utilisée durant notre étude est celle de la région de Saida ; c'est une chaux éteinte présentant une faible concentration en éléments oxydes comme les silicates SiO₂, et aluminates Al₂O₃ et une forte concentration en éléments basiques comme la chaux libre CaO, ce qui donne à notre liant son aspect aérien.

La fabrication de la chaux remonte à la maîtrise de la pierre. Elle était utilisée comme liant dans les constructions.

La chaux (CaO) est obtenue par cuisson de pierre calcaire à une température entre 750 et 950° C, cuisson pendant laquelle elle abandonnera son gaz carbonique. Cuire le calcaire pour le transformer en chaux s'appelle calcination. Elle est exprimée par l'équation chimique suivante :



Le produit obtenu est appelé chaux vive (oxyde de calcium CaO). Plongée dans l'eau, la chaux vive se transforme en chaux éteinte (hydroxyde de calcium Ca(OH)₂), cette opération s'appelle hydratation. Elle est exprimée chimiquement par l'équation suivante :



II.5.1 Caractéristiques physiques :

Pour caractériser notre chaux on doit se référer aux valeurs données par le tableau :

Tableau II.5 : caractéristiques de la chaux de SAIDA

Matériaux	Masse volumique absolu (g / cm ³)	Masse volumique apparente (g / cm ³)	Surface spécifique (cm ² / g)
Chaux vive(CaO)	3.2 – 3.4	0.8 – 1	Très variable
Chaux éteinte	2.2 – 2.4	0.5 – 0.65	8000 – 12000
Chaux hydraulique	2.6 – 2.9	0.6 – 0.80	5000 – 8000

II.5.2 Temps de prise :

§ Temps de début de prise 1j.

§ Temps de la fin de prise 3j.

Tableau II.6 : Résultats des caractéristiques physiques de la chaux.

Masse volumique absolu (g / cm ³)	Masse volumique apparente (g / cm ³)	Surface spécifique (cm ² / g)	Temps début de prise (jour)	Temps fin de la prise (jour)
2.559	0.521	11053	1j	3j

II.5.3 Analyse chimique et minéralogique de la chaux :

L'analyse chimique réalisée au laboratoire de l'unité de fabrication de la chaux hydratée de Saida a donné les résultats récapitulés dans le tableau II.6

Tableau II.7 Analyse chimique et minéralogique de la chaux.

Composition chimique	Pourcentage
Humidité	/
CaO	67.4%-73.25%
MgO	<0.4%
Fe ₂ O ₃	<2%
Al ₂ O ₃	<1%
SiO ₂	<2.2%
SO ₃	<1%
K ₂ O+NaO	<0.4%
CO ₂	<5%

CaCO ₃	<10%
Ca(OH) ₂	<80%
Constance volumique	bonne
Insoluble	<0.35%

II.6 La pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle utilisée est d'origine volcanique extraite du gisement de Bouhamidi situé au sud de Beni-Saf. Le gisement est représenté par une montagne de forme conique appelée El-Kalcoul situé à la côte absolue de 236 m. Cette pouzzolane est essentiellement formé de scories et de pierres ponce bien stratifiées, de couleur variant du rouge au noir.

La pouzzolane naturelle utilisée dans tous les essais est sous forme d'une poudre (figure II.5), résultante de concassage des scories pouzzolaniques (figure II.4); les étuvés pendant 24 heures à une température de 50°C afin d'éliminer leur humidité, ensuite les broyées jusqu'à ce que la poudre résultante puisse passer à travers un tamis de mailles 80 µm.



Figure II.4: Scories de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf avant broyage.



Figure II.5: Poudre de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf après broyage, & < 80 µm.

La composition chimique de la pouzzolane naturelle après broyage est montrée dans le tableau II.8

Tableau II.8. Composition chimique élémentaire de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf.

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Cl	CaCO ₃
12,36	42,95	16,32	9,49	0,01	1,39	3,00	4,20	0,00	10,75

La surface spécifique de Blaine de la pouzzolane naturelle est: $S_{SB} = 4330 \text{ cm}^2/\text{g}$

La masse volumique absolue de la pouzzolane naturelle est : $\rho = 2,45 \text{ g/cm}^3$