

**République algérienne démocratique et populaire**  
**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**  
**UNIVERSITE DE SAAD DAHLAB BLIDA**



**Faculté de Technologie**  
**Département de Génie Civil**  
**MEMOIRE DE MASTER**  
**OPTION : Matériaux en Génie Civil**

**Utilisation des SIG pour la réalisation de cartes des**  
**Sables de Dunes destinés à la construction**

**ENCADREES :**

**Mme F.Z. HALFAYA**

**Mme S.CHERGUI BENARIEB**

**PRESENTES :**

**HASSINI Seif Eddin**

**BENTCHIKOU Noubia**

## ***Remerciements***

**T**out d'abord nous remercions nos encadreurs Mme **HALFAYA Fatma Zohra** et Mme **CHERGUI BENARIEB Soumia** pour leurs orientations et leurs aides précieuses qui nous ont illuminé et guidé dans notre parcours afin de réaliser ce mémoire .

**N**os remerciements sont adressés aux membres du jury pour nous avoir fait honneur d'accepter d'examiner notre modeste travail.

**N**ous tenons à remercier également :

**Dr GUELATI**, Directeur de l'unité à LCTPS **Hussein Dey** et son équipe de nous avoir reçu et aider pour réaliser notre travail.

**N**os sincères remerciements vont également à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont apporté de l'aide pour l'élaboration de ce travail, en particulier :

**Mr ABDELKADER , Mme RABIAA, Mme AHLEM**

**NOUS** remercions grandement tous nos collègues et amis (es) pour leurs encouragements et leurs aides, en particulier **Dr ATMANI, Dr HAMMOUDA,**

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à mes parents les plus chères au monde*

*En particulier à ma très chère mère qui m'a toujours accompagnée par sa prière et qui n'a jamais cessé de m'encourager et de me soutenir.*

*À mes frères et sœurs j'adresse toute ma reconnaissance pour leur amour et leur encouragement.*

*À mes belle-sœurs et beaux-frères, ainsi qu'à mes neveux et mes nièces.*

*À toute ma famille et mes amis (es)*

*Seife eddin*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à mes parents les plus chères au monde*

*A ma très chère mère qui m'a toujours accompagnée par sa prière et qui n'a jamais cessé de m'encourager et de me soutenir.*

*A mon père, que je le remercie infiniment d'être pour moi un exemple de persévérance, de foi en l'avenir, et d'ambition.*

*Je dédie ce travail à mon mari et mon petit et beau garçon, je remercie le bon Dieu de les avoir mis dans ma vie.*

*A mes frères et sœurs j'adresse toute ma reconnaissance pour leurs amours et leurs encouragements.*

*A mes belle-sœurs et beaux-frères, ainsi qu'à mes neveux et mes nièces.*

*A toute ma famille et mes amis (es)*

*Noubia*

## ملخص

عملنا يتكون من جزأين رئيسيين:

الجزء الأول يتعلق برمال الكثبان، ويتضمن إجراء دراسات حول هذه الرمال من خلال أخذ عينات من هذا المواد وإجراء اختبارات فيزيائية وكيميائية لتحديد معلومات كل عينة والحصول على قاعدة بيانات لرمال الكثبان التي يمكن استخدامها في البناء.

الجزء الثاني مخصص لإنشاء الخرائط على نظام المعلومات الجغرافية (SIG) والذي يهدف إلى تحديد مواقع العينات المدروسة من رمال الكثبان لاستخدام هذه الخرائط في عملية اتخاذ القرار.

سيتم إنشاء هذه الخرائط باستخدام برنامج QGIS.

## ***Abstract***

Our work consists of two main parts:

The first part is related to dune sand, and it includes conducting studies on this sand by taking samples of this material and conducting physical and chemical tests to determine the information of each sample and obtaining a database of dune sand that can be used in construction.

The second part is dedicated to creating maps on the Geographic Information System (SIG), which aims to locate the studied samples from the dune sands in order to use these maps in the decision-making process.

These maps will be created using QGIS software.

## ***Résumé***

Notre travail est constitué de deux grandes parties :

La première partie concerne les sables de dune, cela consiste à faire des études sur ces sables en prélevant des échantillons de ce matériau et en effectuant des essais physiques et chimiques afin d'identifier les paramètres de chaque échantillon et d'obtenir une base de données des sables de dune qui pourraient être utilisés pour la construction

La deuxième partie est dédiée à la réalisation des cartes sur Système d'Information Géographique (SIG) et qui consiste à localiser les échantillons de sables de dunes étudiés afin de pouvoir utiliser ces cartes dans la prise de décision. Ces cartes seront réalisées à l'aide du logiciel QGIS

## *Table des matieres*

<i>Remerciement</i>	
<i>Dédicace</i>	
<i>Liste des figures</i>	
<i>Liste des tableaux</i>	
<i>Liste des cartes</i>	
<i>Introduction générale</i> .....	<i>1</i>
<b>Chapitre I : Étude bibliographique</b>	
<b>I.1. Introduction</b> .....	<b>3</b>
<b>I.2. Le Sable</b> .....	<b>3</b>
<b>I.3. Origine et formation du sable</b> .....	<b>4</b>
<b>I.4. Granulométrie du sable</b> .....	<b>5</b>
<b>I.5. La composition du sable</b> .....	<b>6</b>
<b>I.6. Les différentes catégories de sable</b> .....	<b>6</b>
<b>I.6.1. Les sables de plage</b> .....	<b>6</b>
<b>I.6.2. Les sables de carrière</b> .....	<b>7</b>
<b>I.6.3. Les sables de désert</b> .....	<b>7</b>
<b>I.6.4. Les sables de fracturation</b> .....	<b>8</b>
<b>I.7. Le sable du désert du Sahara Algérien</b> .....	<b>9</b>
<b>I.7.1. Caractéristiques et spécificités géographiques</b> .....	<b>9</b>
<b>I.8. Historique sur le sable des dunes</b> .....	<b>9</b>
<b>I.8.1. Les premières utilisations du sable des dunes</b> .....	<b>9</b>
<b>I.8.2. Utilisations du sable des dans la construction à travers l'histoire</b> .....	<b>10</b>
<b>I.9. Aperçu sur le sable des dunes</b> .....	<b>10</b>
<b>I.9.1. Formation de sable de dune</b> .....	<b>11</b>
<b>I.9.2. Les différentes formes de dune</b> .....	<b>11</b>
<b>I.9.3. Différents types des dunes</b> .....	<b>13</b>
<b>I.10. Propriétés des dunes :</b> .....	<b>16</b>
<b>I.11. Utilisation des sables de dune</b> .....	<b>16</b>
<b>I.11.1. Utilisation du sable de dunes dans le béton :</b> .....	<b>17</b>

I.11.2. Utilisation du sable de dunes dans le domaine routier : .....	17
I.12. Intérêts du sable des dunes.....	18
I.12.1. Intérêts économiques.....	18
I.12.2. Intérêts techniques.....	18
I.12.3. Intérêts environnementaux.....	18
I.12.4. Intérêts scientifiques.....	18
I.13. Conclusion.....	19

## Chapitre II : Essai physique et chimique

II.1. Introduction.....	20
II.2. Les essais de caractéristique physique.....	20
II.2.1 Analyse granulométrique du sable.....	20
II.2.2. Module de finesse du sable.....	22
II.2.3. La masse volumique apparente .....	23
II.2.4. La masse volumique absolue.....	25
II.2.5 Équivalent sable.....	27
II.2.6. Teneur en eau du sable.....	29
II.2.7. Capacité d'absorption.....	30
II.3. L'essai de caractéristique chimique .....	33
II.3.1. Chlorures.....	33
II.3.2. Les Insolubles .....	34
II.3.3. La teneur en Carbonates.....	35
II.3.4. Différences entre la détermination de la teneur en insolubles et en carbonates .....	37
II.3.5 Sulfates.....	37
II.4. Conclusion .....	39

## **Chapitre III : Résultats des caractéristiques Physiques et Chimiques**

<b>III.1. Introduction.....</b>	<b>40</b>
<b>III.2. Matériaux utilisé.....</b>	<b>40</b>
<b>III.3. Propriétés physiques .....</b>	<b>41</b>
<b>III.3.1. Analyse granulométriqu .....</b>	<b>41</b>
<b>III.3.2. Module de finesse (Mf).....</b>	<b>47</b>
<b>III.3.3. Masse volumique absolue ( <math>\gamma_s</math>).....</b>	<b>48</b>
<b>III.3.4. Masse volumique apparente ( <math>\gamma</math>) .....</b>	<b>49</b>
<b>III.3.5. Equivalence de sable .....</b>	<b>51</b>
<b>III.3.6. Capacité d'absorption .....</b>	<b>56</b>
<b>III.4. Propriétés chimique.....</b>	<b>60</b>
<b>III.4.1.Détermination des insolubles et des sulfates .....</b>	<b>60</b>
<b>III.4.1.1 Détermination des insolubles .....</b>	<b>60</b>
<b>III.4.1.2. Détermination des Sulfates .....</b>	<b>61</b>
<b>III.4.2. Détermination du taux de carbonate d'un sable .....</b>	<b>62</b>
<b>III.4.3. Détermination des chlorures .....</b>	<b>62</b>
<b>III.5 Conclusion.....</b>	<b>64</b>

## **Chapitre IV : Etablissement d'une carte des sables étudié sur SIG**

<b>IV.1. Introduction .....</b>	<b>66</b>
<b>IV.2. Définition des Systèmes d'Information Géographique.....</b>	<b>66</b>
<b>IV.3. Historique sur les SIG .....</b>	<b>66</b>
<b>IV.4. La nature des données dans un SIG .....</b>	<b>67</b>
<b>IV.5. Les modes de représentation des données de localisation dans un SIG .....</b>	<b>68</b>
<b>IV.5.1. Le mode vecteur .....</b>	<b>68</b>
<b>IV.5.2. Le mode raster .....</b>	<b>69</b>
<b>IV.6. Les composantes d'un SIG .....</b>	<b>70</b>

<b>IV.7. Les fonctions d'un SIG .....</b>	<b>71</b>
<b>IV.8. Domaines d'application.....</b>	<b>71</b>
<b>IV.9. Les logiciels SIG.....</b>	<b>72</b>
<b>IV.10. Présentation du logiciel QGIS .....</b>	<b>73</b>
<b>IV.11. Utilisation des SIG pour la cartographie des sables étudiés.....</b>	<b>73</b>
<b>IV.11.1. Saisie et structuration des données dans QGIS .....</b>	<b>73</b>
<b>IV.11.2. Utilisation de QGIS pour afficher les attributs des échantillons étudiés...</b>	<b>74</b>
<b>IV.11.3. Carte de localisation des échantillons de sable étudiés .....</b>	<b>75</b>
<b>IV.11.4. Cartographie de l'équivalence de sable .....</b>	<b>77</b>
<b>IV.11.5. Cartographie de l'indicateur absorption capillaire.....</b>	<b>80</b>
<b>IV.11.6. Carte de synthèse des indicateurs équivalence de sable au visuel et</b>	
<b>absorption capillaire .....</b>	<b>81</b>
<b>VI.12. Conclusion.....</b>	<b>82</b>

## *Liste des figures*

<b>Figure I.1:</b> Variations géographiques et visuelles du sable de plage.....	6
<b>Figure I.2:</b> Vue photographique d'une carrière.....	7
<b>Figure I.3 :</b> Vue géologique et esthétique du sable du desert.....	8
<b>Figure I.4 :</b> Sahara Algérien .....	9
<b>Figure I.5 :</b> Dunes transversale.....	12
<b>Figure I.6 :</b> Dunes transversale.....	12
<b>Figure I.7 :</b> Dune parabolique.....	13
<b>Figure I.8 :</b> Avant-dune typique sur la côte des Etats-Unis à Island Beach Park, New Jersey .....	14
<b>Figure I. 9 :</b> Falaise dunaire, les Chevrets, Saint- Coulomb, Ile- et- Vilaine, France .....	14
<b>Figure I.10 :</b> Dune perchée fixée par de l'oyat en arrière d'une falaise dunaire .....	15
<b>Figure I.11 :</b> Cordon dunaire artificiel, Cap Ferret, Gironde, France.....	16
<b>Figure II.1 :</b> Essai analyse granulométrique par tamis.....	21
<b>Figure II.2 :</b> Matérielle et essai de la masse volumique apparente .....	24
<b>Figure II.3 :</b> Méthode de l'éprouvette.....	26
<b>Figure II.4 :</b> L'essai de floculation.....	28
<b>Figure II.5 :</b> Le rapport hauteur de sable.....	28
<b>Figure II.6 :</b> Moule tronconique .....	31
<b>Figure II.7 :</b> Essai détermination du Coefficient d'absorption .....	32
<b>Figure II.8 :</b> Calcimètre Bernard. ....	37
<b>Figure III.1 :</b> Machine à tamiser.....	42
<b>Figure III.2 :</b> Essai de l'analyse granulométrique. ....	43
<b>Figure III.3 :</b> courbe granulométrique de sable de dune TEBESBESTE. ....	44
<b>Figure III.4 :</b> courbe granulométrique de sable de dune NEZLA. ....	45
<b>Figure III.5 :</b> courbe granulométrique de sable de dune EL MALGHARINE.....	46
<b>Figure III.6 :</b> courbe granulométrique de sable de dune TMACINE. ....	47
<b>Figure III.7 :</b> Superposition des graphes des 4 types de sable.....	48
<b>Figure III.8 :</b> Essai pour déterminer la masse volumique absolue .....	49
<b>Figure III.9 :</b> Essai pour déterminer la masse volumique apparente.....	50
<b>Figure III.10 :</b> Détermination de l'équivalent de sable. ....	52
<b>Figure III.11 :</b> Essai d'équivalent de sable .....	53

<b>Figure III.12</b> : Moule tronconique.....	<b>57</b>
<b>Figure III.13</b> : Essai Capacité d'absorption.....	<b>57</b>
<b>Figure III.14</b> : préparation des échantillons.....	<b>61</b>
<b>Figure III .15</b> : Essai de filtrations.....	<b>62</b>
<b>Figure III.16</b> : Agitateur magnétique.....	<b>63</b>
<b>Figure IV.1:</b> Le mode vecteur.....	<b>68</b>
<b>Figure IV.2:</b> le mode raster .....	<b>69</b>
<b>Figure IV.3</b> : les composants d'un SIG .....	<b>70</b>
<b>Figure IV.4</b> : Domain d'application d'un SIG.....	<b>72</b>
<b>Figure IV.5</b> : Matérialisation des coordonnées géographiques des échantillons de sable sur un fond image.....	<b>74</b>
<b>Figure IV.6</b> : Affichage des attributs d'un échantillon de sable .....	<b>75</b>
<b>Figure IV.7</b> : Réalisation des cartes thématiques dans QGIS .....	<b>77</b>

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau I.1</b> : Définitions granulométriques selon Bonnot-Courtois et Fournier .....	<b>5</b>
<b>Tableau III.1</b> : Localisation GPS des échantillons de sables étudiés.....	<b>40</b>
<b>Tableau III.2</b> : Localisation GPS des échantillons du Laboratoire GEICA.....	<b>41</b>
<b>Tableau III.3</b> : Analyse granulométrique du sable de dune N° 1 (TIBESBEST) .....	<b>43</b>
<b>Tableau III.4</b> : Analyse granulométrique du sable de dune N° 2 (NEZLA).....	<b>44</b>
<b>Tableau III.5</b> : Analyse granulométrique du sable de dune N°3 (EL MALGHARIN).....	<b>45</b>
<b>Tableau III.6</b> : Analyse granulométrique du sable de dune N°4 (TMACINE).....	<b>46</b>
<b>Tableau III.7</b> : Module de finesse Mf pour les quatre sables.....	<b>47</b>
<b>Tableau III.8</b> : Masse volumique absolue .....	<b>49</b>
<b>Tableau III.9</b> : la masse volumique apparente .....	<b>50</b>
<b>Tableau III.10</b> : Tolérance de l'équivalent de sable.....	<b>53</b>
<b>Tableau III.11</b> : Equivalent de Sable Visuel (ESV).....	<b>53</b>
<b>Tableau III.12</b> : Equivalent de Sable Piston (ESP) .....	<b>54</b>
<b>Tableau III.13</b> : équivalent de sable visuel (ESV) .....	<b>54</b>
<b>Tableau III.14</b> : Equivalent de Sable Piston (ESP) .....	<b>54</b>
<b>Tableau III.15</b> : Equivalent de Sable Visuel (ESV).....	<b>55</b>
<b>Tableau III.16</b> : Equivalent de Sable Piston (ESP) .....	<b>55</b>
<b>Tableau III.17</b> : Equivalent de Sable Visuel .....	<b>55</b>
<b>Tableau III.18</b> : Equivalent de Sable Piston (ESP) .....	<b>56</b>
<b>Tableau III.19</b> : Coefficients Capacité d'absorption.....	<b>58</b>
<b>Tableau III.20</b> : Caractéristique physique des différents sables .....	<b>58</b>
<b>Tableau III.21</b> : caractéristiques physique de la laboratoires du groupe 'GEICA' .....	<b>59</b>
<b>Tableau III.22</b> : Les résultats propriétés chimique.....	<b>64</b>

## *Liste des cartes*

<b>Carte IV.1</b> : Localisation des échantillons de sables étudiés .....	<b>76</b>
<b>Carte IV.2</b> : Analyse thématique de l'indicateur équivalence de sable au visuel.....	<b>78</b>
<b>Carte IV.3</b> : Analyse thématique de l'indicateur équivalence de sable au visuel.....	<b>79</b>
<b>Carte IV.4</b> : Analyse thématique de l'indicateur absorption capillaire.....	<b>80</b>
<b>Carte IV.5</b> : Synthèse des analyses thématiques des indicateurs équivalence de sable au visuel et absorption capillaire.....	<b>82</b>

## **Introduction Générale**

La demande croissante sur les granulats, pour la fabrication des bétons, a provoqué un problème environnementale qui est bien l'épuisement rapide des sabliers, l'exploitation anarchique des sables de mer causant ainsi un grave préjudice à l'équilibre de l'environnement à proximité des plages en ayant une répercussion directes sur les ressources naturelles, l'érosion des berges et avancé des plages.

Le sable de dune est un matériau qui se trouve en abondance dans le Sahara. Effectivement, l'Algérie est un pays riche en ce matériau, presque 60% du territoire algérien est constitué de sable. L'utilisation du sable de dune permet de crée une économie dans le transport des matériaux, puisqu'il est disponible, en grande quantités et facilement accessible. Par ailleurs son extraction n'engendre pratiquement pas de frais supplémentaires et son mélange avec les autres matériaux peut se faire facilement.

Les sables de dune sont utilisés dans la composition de béton destinée à la réalisation de différentes constructions et ouvrages

Nous avons étudié quatre échantillons de sables de dune de la wilaya de TOUGGOURT. Nous avons déterminé leurs caractéristiques physiques et chimiques. Les résultats obtenus ont été mis sous Système d'Information Géographique (SIG).

Nous avons organisé notre travail en quatre grands chapitres :

- Le premier chapitre sera consacré à l'étude bibliographique sur les différents sables de dunes
- Le deuxième chapitre présente les définitions de certains essais essentiels pour évaluer les propriétés physiques et chimiques du sable
- Le troisieme chapitre est consacré à l'étude expérimentale des Sables des dunes, ainsi qu'à la détermination des différentes propriétés physiques et chimiques de ces derniers

- Le quatrième chapitre est dédié à la présentation des systèmes d'information géographique (SIG), ainsi que leur utilisation pour la cartographie et la cartographie thématique des échantillons des sables étudiés.

*Chapitre I*  
*Étude bibliographique*

**I.1. Introduction**

Dans ce chapitre, nous aborderons divers aspects liés au sable des dunes. Tout d'abord, nous fournissons une définition générale du sable des dunes, en mettant l'accent sur sa composition et ses caractéristiques géologiques. Ensuite, nous examinons de près le comportement mécanique des matériaux granulaires, en mettant en évidence les propriétés spécifiques du sable des dunes. Enfin, nous explorons en détail le comportement du sable des dunes, en analysant les forces et les processus qui influencent sa dynamique, notamment les mouvements éoliens, les changements saisonniers et les interactions avec l'environnement environnant.

**I.2. Le Sable**

Le domaine de la géologie présente des difficultés particulières en termes de terminologie. En effet, aucune autre science ne rencontre autant de difficultés pour décrire les différentes caractéristiques des matériaux géologiques, comme c'est le cas pour le sable. En substance, le sable se présente sous forme de matériau solide granulaire composé de petites particules résultant de l'érosion de matériaux minéraux, tels que les roches, ou organiques, comme les coquillages ou les squelettes de coraux. La définition des matériaux granulaires en géologie fixe sa dimension entre 0,063 mm (limon) et 2 mm (gravier) [1]. Une autre description plus technique définit le sable comme étant la partie des granulats pierreux dont la taille des grains est comprise entre 0,08 mm et 05 mm ou autrement dit ont un diamètre maximum de moins de 6,3 mm et leur pourcentage de passage à travers un tamis de 0,08 mm ne doit pas dépasser les 30% [2]. Ces chiffres un peu différents mais rapprochés suggèrent que la définition des sables est une généralisation qui peut être appliquée à diverses classifications. Cependant, les bornes de ces définitions peuvent différer selon le contexte ou la classification en question. En d'autres termes, les limites ou les critères spécifiques qui définissent les sables peuvent varier en fonction de la façon dont ils sont classifiés ou utilisés dans différents domaines.

Communément appelé agrégat fin de béton le sable est un élément essentiel pour les projets de construction et également considéré comme l'un des principaux composants du béton moderne. Sa fonction principale est d'ajuster la proportion et de combler les vides des granulats grossiers dans le béton. En génie civil, il existe quatre types de sable couramment utilisés : le sable de rivière, le sable de mer, le sable de désert et le sable

fabriqué par machine. Ces différents types de sable peuvent présenter des caractéristiques distinctes en termes de granulométrie, de forme et de texture, ce qui peut influencer leurs propriétés mécaniques et leur comportement dans les applications de construction.

### **I.3. Origine et formation du sable**

Au fil du temps, les roches sont érodées ou altérées sous l'effet de l'eau et du vent, et les sédiments qu'elles produisent sont transportés vers les régions en aval. Ces sédiments subissent une décomposition progressive jusqu'à devenir des grains de sable fins. La composition du sable varie en fonction du type de roche dont proviennent les sédiments et de l'intensité de l'environnement. Le granit est la roche sableuse la plus courante, où les minéraux de feldspath se dissolvent plus rapidement que le quartz, entraînant la fragmentation de la roche en petits morceaux. Le sable de rivière est largement utilisé dans l'industrie de la construction, étant collecté dans la rivière ou dans sa plaine inondable. Toutefois, cette pratique cause souvent des problèmes environnementaux et économiques, car de nombreuses petites rivières sont épuisées. Le taux d'extraction de sable dans ces zones est supérieur au taux de renouvellement, ce qui en fait une ressource non renouvelable [3]. Le sable présent sur les plages est formé par l'érosion. Au fil des millénaires, le mouvement incessant des vagues a érodé les roches situées près de la côte, entraînant une accumulation de sédiments. Les intempéries, la sédimentation des rivières et les interactions des animaux marins avec les roches, tels que la consommation d'algues, accélèrent également le processus de formation des plages. Lorsque suffisamment de sable est présent, la plage agit comme une barrière qui protège le sol de l'érosion. Ce sable de plage est particulièrement adapté à la construction en raison de sa forme angulaire et de ses différentes tailles [4]. Les dunes sont formées par des conditions arides et des dépôts de vent. En raison de sa position géographique et de sa proximité avec l'équateur, le désert du Sahara est très sec. Les dunes de sable géantes pour lesquelles il est célèbre sont principalement le résultat du manque de végétation et d'eau. Au fil du temps, le vent érode les particules plus fines, comme l'argile et la matière organique morte, laissant derrière elles du sable et des roches plus grossières. Bien que les dunes de sable ne représentent que 15% de la superficie du Sahara, les roches nues en constituent environ 70% ce qui nous amène au titre suivant : Le sable du désert du Sahara Algérien [5].

#### I.4. Granulométrie du sable

La granulométrie est une caractéristique physique essentielle du sable, car c'est le critère qui définit la notion de sable en fonction de la taille de ses éléments. Lors de l'étude de la formulation, la granulométrie est un paramètre clé car elle permet d'optimiser la compacité. Elle est déterminée en mesurant la taille des grains individuels à l'aide d'un tamisage standardisé. La granulométrie est souvent exprimée en termes de pourcentage de sable qui passe à travers différents tamis de taille définie. La granulométrie du sable peut être divisée en sable grossier, moyen et fin (voir Tableau 1) [6].

**Tableau I.1 :** Définitions granulométriques selon Bonnot-Courtois et Fournier [6]

	Taille	Dénomination
	> 20 mm	Galets
	5 à 20 mm	Graviers
2 mm	2 à 5 mm	Granules
	1 à 2 mm	Sable grossier
	0.5 à 1 mm	Sable moyen
200 µm	200 à 500 µm	Sable fin
	100 à 200 µm	Sablon grossier
63 µm	63 à 100 µm	Sablon fin
	40 à 63 µm	Silt
	2 à 40 µm	Vase
	< 2 µm	Argiles

### I.5. La composition du sable

Le sable est constitué de différents minéraux dérivés du silicium. Les principaux types de minéraux qui constituent le sable sont la silice, les silicates, les argiles et les carbonates. Le terme "sable" peut être utilisé pour qualifier la variété de minéraux qui constitue le composant majoritaire, tels que le sable quartzueux ou siliceux qui est principalement composé de grains de quartz, ou le sable calcaire qui est principalement composé de grains de calcaire. Bien que les silicates soient la famille la plus abondante dans la nature, les carbonates et les argiles ne se trouvent généralement que sous forme de trace dans le sable.

### I.6. Les différentes catégories de sable

#### I.6.1. Les sables de plage

Les sables de plage, également connus sous le nom de sables côtiers ou marins, sont des matériaux granulaires naturels qui proviennent des côtes et des fonds marins. Ils jouent un rôle crucial dans diverses applications industrielles et de construction. Ces sables polyvalents sont utilisés pour la construction de routes, la fabrication de béton et de mortier, ainsi que la production de verre et de céramiques. Leur origine géographique influence leur composition chimique, leur granulométrie, leur couleur et leur forme. Les sables de plage peuvent présenter une large gamme de couleurs, allant du blanc éclatant aux teintes dorées, noires ou même rouges, en fonction des minéraux et des particules présentes dans la région d'où ils proviennent. Leur granulométrie varie également, allant des grains fins et doux aux grains plus grossiers et anguleux. Cette diversité de couleurs et de granulométries confère à chaque plage ses caractéristiques uniques.



**Figure I.1:** Variations géographiques et visuelles du sable de plage.

**I.6.2. Les sables de carrière**

Les sables de carrière sont des matériaux granulaires obtenus par l'extraction de roches dans des carrières spécialisées. Ils sont largement utilisés dans de nombreuses applications, notamment la construction de routes, la production de béton, la fabrication de céramiques et la production de verre. Ces sables sont soigneusement triés et classés en fonction de leur taille, afin de répondre aux exigences spécifiques des utilisateurs. Cette classification permet d'obtenir une granulométrie uniforme et précise, garantissant ainsi des performances optimales dans diverses industries. Les sables de carrière offrent une grande variété de couleurs, de textures et de propriétés physiques en fonction de la composition minéralogique des roches d'origine. Leur utilisation polyvalente et leur disponibilité abondante en font des matériaux essentiels pour de nombreuses activités de construction et de fabrication.



**Figure I.2:** Vue photographique d'une carrière.

**I.6.3. Les sables de désert**

Les sables de désert sont des matériaux granulaires d'origine naturelle, provenant de vastes zones arides. Ces sables sont souvent riches en silice, ce qui en fait une ressource précieuse pour diverses applications industrielles. Ils sont largement utilisés dans la production de verre, où leur teneur en silice contribue à la formation de compositions de verre de haute qualité. De plus, les sables de désert sont également utilisés dans la fabrication de panneaux solaires, car ils offrent une excellente conductivité thermique et une résistance élevée aux conditions environnementales extrêmes. En raison de leur

disponibilité abondante dans les régions désertiques, ces sables peuvent également être utilisés dans la construction de routes, offrant une alternative durable et économique pour les infrastructures dans ces zones. Les caractéristiques uniques des sables de désert, telles que leur composition minérale et leur granulométrie, les rendent précieux et polyvalents pour une gamme d'applications industrielles essentielles.



**Figure I.3 :** Vue géologique et esthétique du sable du désert.

#### **I.6.4. Les sables de fracturation**

Le sable de fracturation, également appelé sable de frac, est un type particulier de sable utilisé dans le processus de fracturation hydraulique. Il s'agit d'un sable de haute qualité, composé de grains de quartz de taille uniforme, souvent de forme angulaire. Le sable de frac est utilisé pour créer des fractures dans les formations rocheuses profondes afin de permettre la libération du gaz naturel ou du pétrole piégé dans la roche. Lors de la fracturation hydraulique, de grandes quantités d'eau mélangées à des produits chimiques sont injectées sous pression dans le puits, ce qui entraîne la fissuration de la roche. Le sable de frac est ensuite injecté dans les fractures pour les maintenir ouvertes, permettant ainsi aux hydrocarbures de s'écouler plus facilement vers le puits. Le choix du sable de frac approprié est crucial pour maximiser l'efficacité de la fracturation hydraulique et l'extraction des ressources souterraines.

## **I.7. Le sable du désert du Sahara Algérien**

### **I.7.1. Caractéristiques et spécificités géographiques**

Le sable du désert est un matériau fascinant qui est présent dans plusieurs régions du monde, notamment dans les vastes étendues de sable du Sahara, le plus grand désert chaud du monde. Le Sahara est un désert qui s'étend sur une superficie de 3,32 millions de miles carrés (8,6 millions de kilomètres carrés) à travers onze pays ainsi que le Sahara occidental. Cette région est presque entièrement située au nord de l'Afrique [6] Cela nous conduit au Grand Sud algérien, également connu sous le nom de Sahara algérien qui constitue la portion du désert du Sahara située sur le territoire de l'Algérie. Cette région représente près de 90 % de la superficie totale de l'Algérie. Ce territoire est caractérisé par la présence d'ergs (dunes de sable) et de regs (terrains caillouteux), ainsi que de massifs volcaniques situés dans le Grand Sud [7].



**Figure I.4 : Sahara Algérien**

## **I.8. Historique sur le sable des dunes**

### **I.8.1. Les premières utilisations du sable des dunes**

Les utilisations les plus anciennes du sable des dunes peuvent être retracées jusqu'aux civilisations antiques et aux communautés autochtones de différentes régions. Par exemple, en Égypte, à l'époque des pharaons, les dunes le long du fleuve Nil étaient utilisées pour la construction de briques servant à des projets de construction [8]. Dans différentes régions du monde, des civilisations anciennes ont exploité les ressources de sable des dunes pour diverses applications. En plus de l'Égypte, des exemples peuvent être trouvés en

Mésopotamie, où le sable des dunes était utilisé dans la construction de structures, et en Amérique du Nord, où les peuples autochtones utilisaient le sable des dunes pour fabriquer des poteries et des outils.

### **I.8.2. Utilisations du sable des dans la construction à travers l'histoire**

Tout au long de l'histoire, le sable des dunes a été largement utilisé dans les activités de construction en raison de son abondance et de ses propriétés souhaitables. Il a été utilisé pour la fabrication de briques en le mélangeant avec de l'argile ou de la boue en tant qu'agent liant [8]. De plus, le mortier composé d'un mélange de chaux ou de ciment, de sable et d'eau a été essentiel dans la construction de diverses structures. Le sable des dunes a également joué un rôle important dans la production de béton, largement utilisé comme matériau de construction. Le mortier à base de sable des dunes a été utilisé pour lier les briques et les pierres dans la construction de bâtiments, de murs et de structures. Sa résistance et sa capacité à adhérer aux matériaux de construction en ont fait un composant essentiel.

Au fil du temps, les techniques de fabrication de briques en utilisant du sable des dunes ont été améliorées, ce qui a permis de construire des structures plus solides et durables. L'abondance du sable des dunes a rendu son utilisation économiquement avantageuse, et sa disponibilité dans de nombreuses régions en a fait un choix populaire pour les projets de construction. De ce fait le sable des dunes a joué un rôle crucial dans la construction tout au long de l'histoire. Sa disponibilité, ses propriétés favorables et sa polyvalence en font un matériau précieux pour diverses applications. Avec l'évolution des techniques de construction et des technologies, le sable des dunes continue d'être utilisé et amélioré pour répondre aux besoins de l'industrie de la construction moderne.

### **I.9. Aperçu sur le sable des dunes**

En raison de son abondance naturelle (notamment dans le Sahara), de son coût d'extraction quasiment nul et de sa propreté apparente, le sable de dune émerge comme une solution au problème de l'épuisement des ressources naturelles. Il se positionne également comme un matériau d'avenir qui peut parfaitement remplacer les deux types de sables mentionnés précédemment [9].

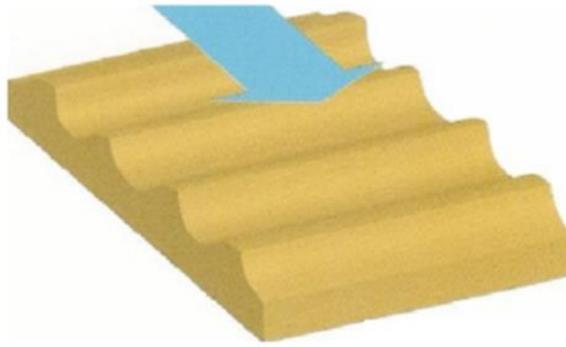
**I.9.1. Formation de sable de dune**

La formation de dune, ce fait en présence de plusieurs conditions tels que : le vent, quantité importante de sable et de l'espace etc... Une grande quantité de sable, au moins en partie sec, doit être disponible où les vents sont assez forts et fréquents. Avec la Poussées du vent, les grains de sables ce déplacement par bonds successifs puis ils se posent à l'endroit où la force du vent est devenue trop faible. Les grains se superposent pour former une dune. Il est très possible d'identifier le sens des vents grâce à ces particularités (le côté de la pente douce de la dune indique le sens du vent alors que celui avec une pente plus raide est le coté qui se trouvent à l'abri).

**I.9.2. Les différentes formes de dune**

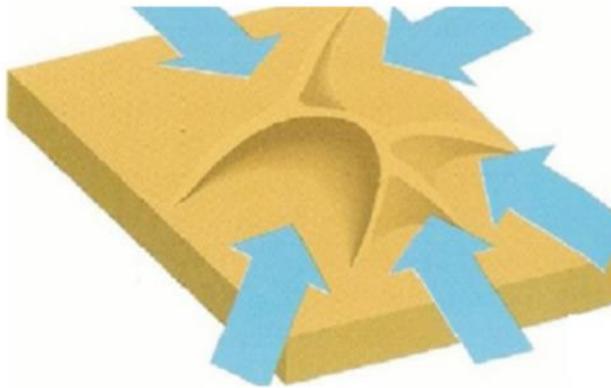
Il existe différentes formes de dune et cela est dû à la variété des conditions météorologiques qui influencent sur elles. En fonction des vents, les massifs dunaires épousent différentes configurations, on peut citer comme exemple : Les dunes transversales, Les dunes en étoile (complexe), Les dunes en coupole ou les dunes en parabole

**Les dunes transversales :** Les dunes transversales sont des formations sableuses dynamiques qui se déplacent, sont rectilignes et sont orientées perpendiculairement à la direction du vent. Ces dunes se forment dans les régions où les vents dominants soufflent régulièrement dans une direction prédominante, Un exemple emblématique de dune transversale est la Grande Dune du Pilat [10], située sur la côte atlantique française, près de la commune de La Teste-de-Buch, en Gironde. Cette dune spectaculaire s'étend sur environ 3 kilomètres le long de la côte, atteignant une hauteur de près de 110 mètres. Elle est connue pour sa forme classique de dune transversale, avec une crête allongée qui s'étend perpendiculairement à la ligne de rivage. La Grande Dune du Pyla est soumise à des vents marins constants, ce qui a permis l'accumulation progressive de sable et la formation de cette impressionnante dune [11].



**Figure I.5 :** Dunes transversale

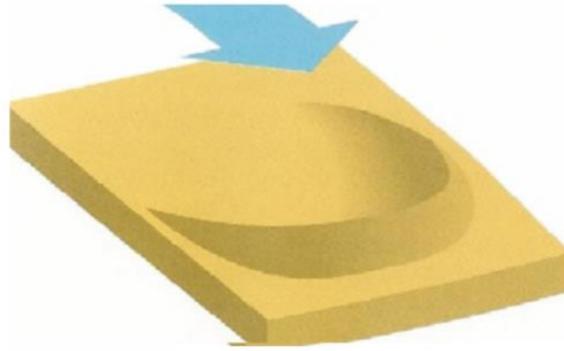
**Les dunes en étoile (complexe) :** Les dunes en étoile, également connues sous le nom de dunes complexes, sont des formations sableuses immobiles qui se trouvent généralement dans les clairières des forêts de pins. Leur formation peut être attribuée à un déséquilibre dans le système des vents [10] . Ces dunes se caractérisent par leur configuration particulière en forme d'étoile, avec plusieurs bras divergents s'étendant à partir d'un point central. Contrairement aux dunes mobiles qui se déplacent avec le vent, les dunes en étoile sont relativement stables en raison de facteurs environnementaux spécifiques.



**Figure I.6 :** Dunes en étoile

**Les dunes en coupole ou les dunes en parabole :** La dune parabolique est une formation caractérisée par une disposition dissymétrique en forme de fer à cheval, avec une concavité tournée vers le vent. Cette dune est souvent partiellement stabilisée par la végétation environnante. Contrairement aux dunes mobiles, la dune parabolique présente une

orientation inverse par rapport à la direction du vent. Une fois formée, elle a tendance à être peu mobile et ne migre généralement que très peu [10].



**Figure I.7 :** Dune parabolique

### **I.9.3. Différents types de dunes**

Il existe différents types de dunes, chacun ayant ses caractéristiques distinctives. Parmi les principaux types de dunes, on peut citer :

**Les avant-dunes :** Elles présentent sous la forme d'un bourrelet végétalisé, parallèle au trait de côte, étroitement associé par des échanges de sable réciproques avec la plage en arrière de laquelle elle s'est développée, appartenant donc avec elle à un même système sédimentaire (**Figure I.8**). C'est cette étroite solidarité avec la plage, jouant dans les deux sens qui donne à l'avant dune son caractère unique et la distingue clairement des autres types de dunes qui bordent aussi les plages. Un auteur a écrit avec raison : « les avant dunes actives occupent en bordure de mer la position la plus avancée dans un système dunaire, mais toutes les dunes en position la plus avancée ne sont pas des avant dunes. D'autres types de dunes peuvent se trouver en position la plus avancée sur des côtes en situation d'érosion ou sur des côtes où des avant dunes sont incapables de se former [12].



**Figure I.8 :** Avant-dune

**Les falaises dunaires :** La falaise dunaire n'est pas une dune à proprement parler. Il s'agit d'un escarpement taillé par l'érosion marine d'une ancienne dune restée meuble, naturellement fixée par une végétation de pelouse, de taillis, voire de forêt, sous laquelle un sol a pu se développer (**Figure I.9**). La falaise, comme ses congénères développées dans d'autres types de roche, recule sous l'effet des vagues de tempête qui attaquent son pied et de l'eau pluviale qui peut être à l'origine de ravinements et de glissements localisés. Mais, à leur différence, le vent intervient aussi dans son évolution car il est capable d'ouvrir dans le sable de l'escarpement des brèches qui accélèrent son repli.



**Figure I. 9 :** Falaise dunaire, littoral de Djijel

**Les dunes perchées :** Les dunes perchées sont des dunes qui se forment au sommet d'une falaise vive (**Figure I.10**). Elles sont alimentées en sable par le vent à partir de l'estran basal, éventuellement à partir de l'escarpement quand il est sableux comme dunaire.



**Figure I.10 :** Dune perchée fixée par de l'oyat en arrière d'une falaise dunaire.

**Les cordons dunaires artificiels :** il correspond à un rempart de sable édifié par l'homme en bordure de la mer (**Figure I.11**). La côte d'aquitaine fournit un excellent exemple de ce type de dune manipulée [13]. A l'origine, sur littoral en état d'érosion rapide, balayé par des vents d'ouest fort et fréquents, il n'existait en arrière de la plage que des falaises dunaires ou des amas dunaires embryonnaires arasés à l'occasion des tempêtes. Le sable mis en mouvement sur l'estran alimentait des dunes qui s'avançaient vers l'intérieur des terres. Ces dunes avaient été fixées par des plantations de pins maritimes. Pour empêcher les sables d'envahir les jeunes boisements, il fut décidé de les arrêter au plus près de la mer par la mise en place d'obstacles- Palissades d'une part, couverture d'oyats d'autre part. Le résultat étant la constitution d'un cordon calibré d'une largeur de l'ordre de 150 à 200 m et d'une hauteur de 12 à 15 m [14]. Le « profil idéal » qui lui est donné. Un glacis externe tourné vers la mer, un plateau, un talus d'envahissement interne n'existe pas dans la nature et il nécessite des travaux constants pour le conserver [15]. En l'absence de maintenance, ils se déforment, comme on a pu le constater pendant la dernière guerre mondiale, car il est en total déséquilibre avec les forces en action, celle de la mer et celle du vent. S'il n'est pas entretenu, le cordon dunaire artificiel est appelé à disparaître en une trentaine d'années.



**Figure I.11 :** Cordon dunaire Bou Aada.

### **I.10. Propriétés des dunes :**

Les dunes sculptées par le vent, adoptent des formes variées. Cependant, elles partagent toutes la même propriété, les pentes égales (l'angle de talus, entre 30° et 35°). On le vérifie expérimentalement en versant du sable sur une plaque plane, horizontale et surélevée. Le sable s'accumule et le tas grossit jusqu'à ce que les pentes atteignent la valeur critique : au-delà, le sable excédentaire coule le long des bords de la plaque. Le sable est utilisé pour faire du béton et comme matière première du verre. Il peut être utilisé pour filtrer les liquides. Du fait de sa facilité de manipulation, il est également employé lorsque l'on a besoin d'acheminer de la matière (peu importe sa nature) dans un endroit, par exemple pour servir de protection (sac de sable contre les éclats d'explosion et les balles). Il est aussi utilisé comme abrasif dans des usines pour nettoyer des pièces métalliques. Le sable est également un élément important de l'industrie touristique, lorsqu'il est présent sur les plages et les dunes où il est également un élément indispensable à la protection de la côte.

### **I.11. Utilisation des sables de dune**

Les sables sont des éléments essentiels du processus sédimentaire et représentent une ressource très importante du point de vue économique: remblais, granulats pour béton, matériaux de construction, sables siliceux pour l'industrie. Ces derniers (appelés autrefois sables industriels) constituent l'essentiel de la matière première de l'industrie du verre, des moules, des noyaux de fonderie; ils entrent aussi dans la fabrication des céramiques et des

mortiers spéciaux. Le sable est aussi le milieu naturel où s'accumulent les minéraux lourds alluvionnaires. Ces concentrations minéralisées sableuses sont dénommées Placers (un mot espagnol) et l'on y extrait de l'or, des diamants, de la cassitérite (minerai d'étain), de la magnétite (oxyde de fer), de l'ilménite (oxyde de titane et de fer), etc...

Les Placers d'ilménite ou « sables noirs » sont importants économiquement pour la fabrication des pigments de la peinture blanche (gisements côtiers en Australie) et comme source du titane-métal.

Les sables jouent également un grand rôle comme réservoirs potentiels pour les nappes d'eau (aquifères) ou les hydrocarbures. Il est à noter que l'exploitation du sable, souvent anarchique, soit réglementée pour éviter de perturber la fragilité et l'équilibres naturels: érosion des plages dont l'alimentation naturelle en sable a été coupée; destruction à terre de la nappe phréatique, etc...

#### **I.11.1. Utilisation du sable de dunes dans le béton :**

Depuis longtemps, le sable de dunes a été utilisé pour le remblayage des fouilles de fondations et les travaux routiers. Cependant, son utilisation en tant que constituant principal du béton n'est apparue qu'après l'introduction du concept de béton de sable par F. Coignet en 1853, comme indiqué dans le rapport général et les conclusions du 23e Congrès mondial de la route. Cette innovation a suscité l'intérêt pour de nouvelles recherches visant à explorer la possibilité d'utiliser le sable de dunes comme composant principal dans les structures du génie civil. Par conséquent, plusieurs actions de recherche ont été entreprises, tant en Algérie qu'à l'étranger, pour étudier cette possibilité, bien que leur réalisation ait été entravée [10], [16]

#### **I.11.2. Utilisation du sable de dunes dans le domaine routier :**

L'utilisation des sables des dunes dans les techniques routières présente plusieurs avantages. Ces sables, déjà utilisés dans le passé, peuvent être mélangés aux sols existants pour renforcer leur stabilité et capacité de charge, améliorant ainsi la résistance et la durabilité des chaussées. Ils sont également employés comme matériau de remblai, offrant un bon drainage pour prévenir les problèmes d'eau stagnante. De plus, les sables des dunes sont utilisés dans la fabrication de revêtements de surface, offrant une meilleure adhérence

et une durabilité supérieure. Leur utilisation permet également de réduire les coûts de transport et d'approvisionnement, offrant ainsi des avantages économiques.

### **I.12. Intérêts du sable des dunes**

L'Algérie est un pays riche en sable de dune (presque 60% du territoire algérien), a introduit la technique du béton de sable. Plusieurs études et recherche ont été élaborées afin de valoriser ce matériaux [17] Le sable de dune, abondamment présent dans le Sahara, présente des intérêts :

#### **I.12.1. Intérêts économiques**

L'utilisation du sable de dune permet de créer une économie dans le transport des matériaux, car il est disponible partout en grande quantité. De plus, son extraction ne génère pratiquement aucun frais supplémentaires. Il peut être facilement mélangé avec d'autres matériaux, ce qui facilite son utilisation dans diverses applications.

#### **I.12.2. Intérêts techniques**

Le sable de dune offre des avantages techniques importants. Deux types de sable de dune peuvent contribuer à la densification des matériaux, améliorant ainsi leurs caractéristiques géotechniques. Il augmente le frottement interne et améliore la portance des matériaux. De plus, il peut être utilisé pour réduire la plasticité des matériaux de qualité inférieure. Ces propriétés en font un matériau polyvalent pour diverses applications techniques.

#### **I.12.3. Intérêts environnementaux**

L'utilisation du sable de dune peut contribuer à la préservation de l'environnement. En utilisant ce sable abondant et naturellement renouvelable, on peut réduire la dépendance vis-à-vis des sources traditionnelles de sable, comme les rivières et les carrières, qui peuvent causer des problèmes environnementaux tels que l'érosion des rives et la destruction des habitats naturels.

#### **I.12.4. Intérêts scientifiques**

Le sable de dune offre également un intérêt scientifique. Étudier sa composition, sa formation et ses caractéristiques peut aider à mieux comprendre les processus géologiques et environnementaux. De plus, les dunes de sable peuvent servir de sites de recherche pour étudier les phénomènes tels que l'érosion, la migration des dunes et les changements climatiques.

**I.13. Conclusion**

En se basant sur l'étude bibliographique exhaustive présentée dans ce chapitre, il est indéniable que les recherches sur le sable des dunes ont été approfondies de manière significative dans diverses régions, en particulier au sein des vastes étendues désertiques de l'Algérie. La revue de littérature réalisée a permis d'explorer en détail les concepts théoriques liés à ce domaine, en se concentrant notamment sur la définition précise des dunes de sable, les différents types de dunes existants ainsi que les mécanismes sous-jacents à leur formation. De plus, une attention particulière a été portée aux multiples domaines d'utilisation associés à ces formations sableuses. Les connaissances acquises grâce à cette étude approfondie contribuent à une meilleure compréhension de l'écosystème des dunes de sable et ouvrent des perspectives prometteuses pour des applications variées dans divers domaines de la science et de la pratique

## *Chapitre II*

### *Essai physique et chimique*

**II.1. Introduction**

Afin d'approfondir notre compréhension du sable, il est indispensable de réaliser une série d'essais. Ce chapitre vise à présenter les définitions de certains essais essentiels pour évaluer les propriétés physiques et chimiques du sable. Dans cette optique, nous examinerons de près les caractéristiques fondamentales de cette ressource naturelle, en mettant l'accent sur les méthodes d'analyse permettant une évaluation précise. En explorant ces essais pertinents, nous serons en mesure de mieux appréhender les différentes facettes du sable et de tirer des conclusions éclairées sur son utilisation potentielle.

**II.2. Les essais de caractéristique physique**

Les essais portant sur les caractéristiques physiques du sable revêtent une importance capitale dans la conception et l'analyse des structures et fondations utilisant le sable comme matériau de base. Ils offrent des informations essentielles permettant d'évaluer la stabilité, la capacité portante, la perméabilité, ainsi que d'autres propriétés indispensables pour assurer la performance et la durabilité des ouvrages construits à partir de ce matériau.

**II.2.1 Analyse granulométrique du sable**

L'analyse granulométrique du sable consiste à mesurer la répartition des tailles de particules présentes dans un échantillon de sable. Cette analyse est cruciale car elle permet de déterminer la granulométrie du sable, qui est un facteur clé pour son utilisation dans divers projets de construction tels que les routes, les bâtiments, et autres. Il existe différentes méthodes pour mesurer la granulométrie du sable, telles que le tamisage, la sédimentation et la diffraction laser [18] [19]

En France, la norme NF EN 933-1 est couramment utilisée pour l'analyse granulométrique du sable. Cette norme est une norme européenne qui décrit la méthode de tamisage pour déterminer la distribution granulométrique des granulats, y compris le sable, et spécifie les méthodes d'essai pour la détermination de la granulométrie. L'objectif de l'utilisation de cette norme dans l'industrie de la construction est d'assurer que les granulats utilisés dans les bétons et les revêtements ont une granulométrie appropriée. Les laboratoires d'essais utilisent également cette norme pour mesurer la granulométrie des échantillons de granulats [20]



**Figure II.1** Essai analyse granulométrique par tamis.

### **Principe et But**

Le tamisage est une méthode largement utilisée pour déterminer la granulométrie du sable. Cette méthode est basée sur le principe selon lequel les particules plus grosses que la taille de maille du tamis seront retenues sur le tamis tandis que les particules plus petites passeront à travers les mailles. Pour réaliser une analyse granulométrique du sable par tamisage, une série de tamis de tailles de mailles décroissantes est disposée en pile, du plus grand en haut au plus petit en bas. L'échantillon de sable est versé sur le tamis supérieur, puis le tamis est secoué verticalement et horizontalement pendant une période spécifiée pour que les particules de sable puissent passer à travers les mailles. Les particules qui ne passent pas à travers le tamis sont collectées et pesées pour obtenir la masse retenue sur chaque tamis. La procédure de tamisage est répétée pour chaque tamis de la série, de manière à obtenir une distribution granulométrique complète du sable. Les résultats obtenus sont représentés sous forme de pourcentage cumulé de masse passant à travers chaque tamis en fonction de la taille des mailles. Les résultats de cette analyse sont présentés sous forme de courbe granulométrique, qui indique la proportion de chaque taille de particules dans l'échantillon de sable. Des études telles que [19] et [21] ont utilisé cette méthode pour déterminer la granulométrie du sable dans leurs recherches respectives. Ces informations sont ensuite utilisées pour sélectionner le sable approprié pour des projets spécifiques en génie civil.

Le tamisage est une méthode simple, rapide et économique pour déterminer la granulométrie du sable. Cependant, cette méthode peut ne pas être appropriée pour les échantillons contenant des particules très fines ou très grosses. Dans ce cas, d'autres méthodes telles que la sédimentation et la diffraction laser peuvent être utilisées pour compléter l'analyse granulométrique du sable.

### II.2.2. Module de finesse du sable

Le module de finesse est une mesure essentielle pour caractériser la granulométrie des particules de sable dans diverses applications de génie civil et de construction. Il permet de décrire la distribution de la taille des particules de sable en fonction du pourcentage cumulé en masse retenu sur une série spécifiée de tamis normalisés [22]. Dans le domaine de la construction, le choix du sable utilisé pour la fabrication du béton est crucial car il peut affecter les propriétés du béton résultant. Ainsi, le module de finesse du sable est souvent utilisé comme un paramètre clé dans la sélection et la spécification du sable à utiliser pour obtenir les propriétés de béton souhaitées [23]. Par exemple, un sable avec un module de finesse plus élevé peut donner un béton plus fluide et plus facile à travailler, tandis qu'un sable avec un module de finesse plus faible peut donner un béton plus ferme et plus résistant. En conséquence, le module de finesse est une mesure importante pour garantir la qualité et la performance du béton dans diverses applications de construction.

#### **But Et Principe**

Le module de finesse est un paramètre qui permet de caractériser la distribution de la taille des particules de sable. Il est déterminé en utilisant différentes méthodes, dont la plus courante est la séparation des fractions de particules de sable à l'aide d'une série de tamis de différentes tailles, cette méthode de mesure du module de finesse du sable implique plusieurs étapes :

- Tout d'abord, il est nécessaire de tamiser l'agrégat avec des tamis de tailles différentes, allant de 80 mm à 150 microns. Cette étape permet de séparer les différentes fractions de particules du sable selon leur taille.
- Ensuite, il faut enregistrer le poids des granulats retenus sur chaque tamis. Cela permet de déterminer la quantité d'agrégats de chaque fraction de taille.
- Après avoir enregistré le poids de chaque fraction d'agrégats, il est nécessaire de calculer le poids cumulé des granulats retenus sur chaque tamis. Cette étape est cruciale car elle permet d'obtenir la quantité totale de chaque fraction de taille.
- Le pourcentage cumulé d'agrégat retenu est ensuite calculé en divisant le poids cumulé de chaque tamis par le poids total de l'échantillon initial de sable.
- Enfin, le module de finesse est calculé en additionnant les pourcentages cumulatifs de chaque tamis et en divisant la somme par 100. Cette valeur est très importante car elle permet de décrire la distribution de la taille des particules de sable.

Une autre méthode consiste à utiliser un analyseur de taille de particules par diffraction laser pour mesurer la distribution de la taille des particules de sable, à partir de laquelle le module de finesse peut être calculé. Cette méthode est généralement utilisée dans les milieux de recherche en raison de sa précision. En outre, le module de finesse peut être calculé mathématiquement à partir des données de distribution de la taille des particules obtenues à partir de tests tels que l'analyse granulométrique, l'indice de tri et le coefficient d'uniformité .

Préférentiel 2.2 à 2.8 , Un peut trop fin 1.8 à 2.2 , Un peut trop grossier 2.8 à 3.2 [24] [25].

En résumé, le module de finesse permet de définir la finesse ou la granulométrie du sable. Un petit nombre indique un sable fin, tandis qu'un grand nombre indique un sable grossier. Pour la proportion de mélange, un sable fin nécessitera plus de ciment et aura tendance à développer plus de fissures. En revanche, un sable grossier produira un mélange de béton qui sera dur et difficile à finir, et causera une ségrégation. Ainsi, le module de finesse joue un rôle crucial dans le choix du sable à utiliser pour le béton, car il peut affecter les propriétés physiques et mécaniques du béton résultant telles que sa compaction, sa perméabilité et sa résistance mécanique [26].

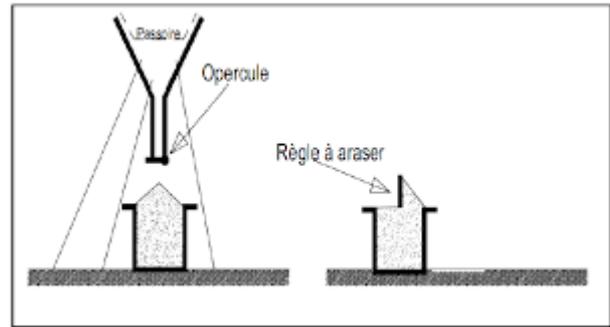
### II.2.3. La masse volumique apparente

La densité apparente du sable est une propriété physique clé qui mesure la densité du sable en prenant en compte les espaces vides entre les grains de sable. Cette mesure est importante car elle est liée à la capacité du sable à fournir de l'eau et des nutriments aux plantes, ainsi qu'à son aptitude à la construction et à d'autres utilisations industrielles. Cette densité est définie comme la masse d'un volume de sable sec, incluant les espaces vides. Elle est influencée par plusieurs facteurs clés tels que la taille et la forme des grains de sable, ainsi que par leur arrangement. Les grains de sable plus gros ont tendance à avoir une masse volumique apparente plus faible que les grains de sable plus petits, tandis que les grains de sable bien arrondis ont tendance à avoir une masse volumique apparente plus élevée que les grains de sable anguleux [27].

Il est important de comprendre que la densité apparente du sable est différente de sa densité en vrac car la densité apparente prend en compte les vides entre les particules de sable, tandis que la densité en vrac ne le fait pas. La densité en vrac est utilisée pour déterminer la **porosité** du sable, tandis que la densité apparente est utilisée pour déterminer la **compaction** du sable sous différentes charges [28].



**Figure**  
apparente



**II.2** : Matérielle et essai de la masse volumique

### **Buts Et Principes**

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer la densité apparente d'un sol, qu'elles soient effectuées en laboratoire ou sur le terrain. Parmi les méthodes de terrain, on peut citer la méthode au sable, la méthode au cylindre, la méthode au densitomètre à membrane et la méthode par gammamétrie :

- **La méthode au cylindre** : utilise également un cylindre rempli de matériau pour déterminer la densité apparente en fonction de la masse et du volume.
- **La méthode au densitomètre à membrane** : implique l'utilisation d'un densitomètre à membrane pour déterminer la densité apparente en fonction de la pression exercée sur la membrane.
- **La méthode par gammamétrie** : est une méthode de mesure de densité apparente qui utilise des rayons gamma pour évaluer l'absorption des rayons et déterminer la densité apparente.

Cependant, il est important de noter que la valeur de la densité apparente peut varier en fonction du type de sol ainsi que de la méthode utilisée pour la mesure. Une analyse de variance des résultats obtenus permet de déterminer la contribution relative de ces facteurs dans la variation de la densité apparente mesurée. En effet, le choix de la méthode de mesure peut dépendre de nombreux facteurs tels que la disponibilité des équipements, la nature du sol à mesurer ou encore les exigences de l'étude. Ainsi, il est essentiel de prendre en compte les différences potentielles entre les méthodes et de choisir la méthode la plus appropriée en fonction du contexte spécifique de la mesure de densité apparente [28].

Le but de mesurer la densité apparente est de déterminer la proportion de volume de pores ou d'espaces vides présents dans le matériau étudié. C'est un paramètre clé pour évaluer l'état de santé des sols et les impacts des activités humaines sur ces derniers. Ainsi, la mesure de la densité apparente est une méthode importante pour comprendre la structure physique des sols et pour améliorer les pratiques agricoles, environnementales et industrielles.

#### **II.2.4. La masse volumique absolue**

La densité du sable est une caractéristique importante pour déterminer ses propriétés et sa qualité. La masse volumique absolue est une mesure de la densité d'un matériau et est utilisée pour déterminer la quantité de matériau qui peut être contenue dans un volume donné. La masse volumique absolue du sable peut varier en fonction de sa composition, de sa structure et des conditions environnementales dans lesquelles il est trouvé. Elle peut aussi varier en fonction des types de sables. La compréhension de la masse volumique absolue du sable est importante pour déterminer sa qualité et sa performance dans différentes applications industrielles et de construction.

#### **But et Principe**

L'objectif de cet essai est de mesurer la masse d'une fraction granulaire, notamment dans le cadre de la préparation d'une composition de béton. Cette mesure permet en particulier de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaires nécessaires pour obtenir un béton aux caractéristiques spécifiées. Cette information est cruciale pour obtenir un béton de qualité conforme aux exigences de conception [29].

La méthode de mesure de la masse volumique absolue du sable implique de remplir une mesure d'un volume connu (par exemple, une mesure de 1 dm<sup>3</sup>) avec le sable à mesurer et de déterminer la masse totale de la mesure remplie de sable. En divisant ensuite la masse de sable par le volume occupé par le sable dans la mesure, on peut calculer la masse volumique absolue du sable, qui est exprimée en unités telles que kg/m<sup>3</sup> ou g/cm<sup>3</sup>. Cette méthode est simple et pratique [30]. Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la masse volumique absolue du sable, à la fois sur le terrain et en laboratoire :

- La méthode du pycnomètre à eau
- La méthode du cylindre gradué ou du pycnomètre à mercure
- La méthode du volume de la boîte
- La méthode de la plaque vibrante

- La méthode de la sonde de gamma-ray
- La méthode du cône de sable
- La méthode de l'essai Proctor

En laboratoire, l'une des méthodes les plus courantes est la méthode de l'éprouvette ou du béccher dont les étapes sont les suivantes :

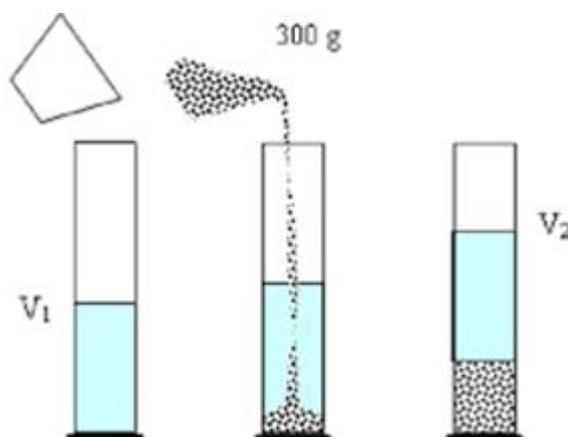
- Peser le béccher vide
- Remplir le béccher avec le sable et tasser légèrement
- Peser le béccher rempli de sable
- Ajouter suffisamment d'eau pour remplir le béccher
- Peser le béccher rempli d'eau et de sable
- Soustraire le poids du béccher vide du poids total
- Calculer la masse volumique absolue à partir de la formule suivante :

Masse volumique absolue = (Masse du béccher rempli d'eau et de sable - Masse du béccher vide) / Volume du béccher [31].

Ces mêmes étapes peuvent s'appliquer pour la méthode de l'éprouvette (**Figure II.3**)

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume V d'eau.
- Peser un échantillon sec de granulats M (environ 300g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume V'.
- La masse volumique absolue peut alors être calculée par la formule suivante :

Masse volumique absolue = masse de l'échantillon (M) / (V' - V) [29]



**Figure II.3** : Méthode de l'éprouvette

Il est important de ne pas confondre la masse volumique absolue avec la densité du sable qui est de 1,6 kg/m<sup>3</sup> [29].

### II.2.5 Équivalent sable

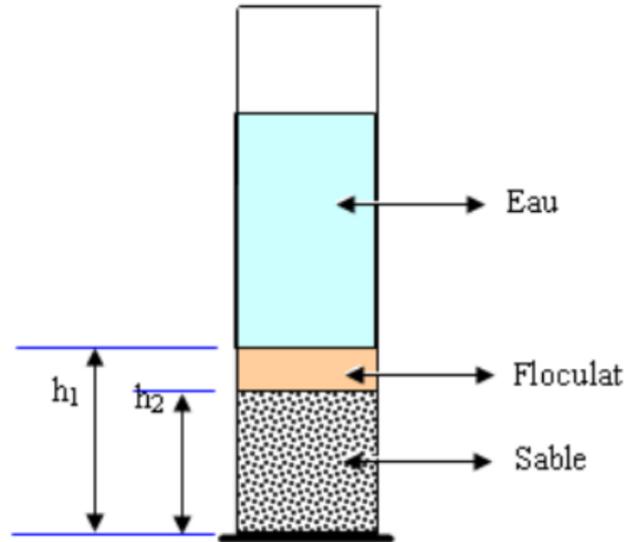
En géotechnique, l'équivalent de sable est un indice qui permet de caractériser la propreté d'un sable [32]. Ce test est une méthode utilisée pour déterminer les proportions relatives de matière fine et de sable dans les sols et les agrégats minéraux. Elle repose sur la comparaison du volume de sable avec le volume d'argile et de matières fines dans un échantillon, et s'exprime sous la forme d'un rapport connu sous le nom d'équivalent de sable. Le test d'équivalence de sable est un test sur le terrain rapide qui peut être utilisé pour déterminer l'acceptabilité des matériaux pour une utilisation dans la construction [33].

#### **But et Principe**

L'objectif principal de l'essai d'équivalent de sable est d'évaluer la propreté des sables utilisés dans la composition des bétons, ainsi que dans les sols. Bien que ce test soit moins important pour les sols, le paramètre le plus significatif pour ces derniers est la valeur de bleu du sol. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers, en utilisant une procédure normalisée. Cette procédure permet quantifier la propreté du matériau testé. En somme, l'essai d'équivalent de sable est un outil essentiel pour garantir la qualité et la sécurité des constructions, en évaluant la propreté des matériaux utilisés et en s'assurant qu'ils répondent aux normes de qualité requises [32].

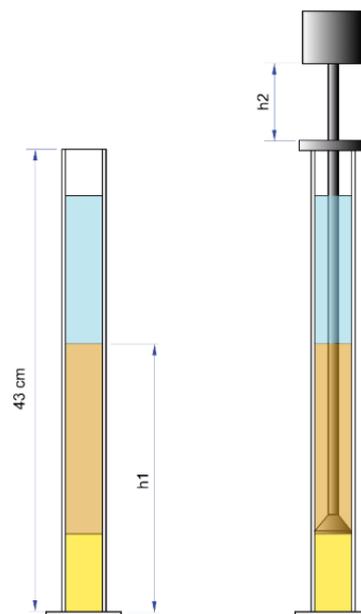
L'essai de floculation et le rapport de hauteur de sable sont deux essais utilisés pour évaluer la qualité d'un sol en termes de finesse et de teneur en éléments argileux :

- L'essai de floculation mesure la quantité de matières fines et argileuses dans un échantillon de sol en les faisant flocculer à l'aide d'une solution lavante. Cette méthode utilise deux cylindres gradués remplis de solution lavante et un tube laveur pour agiter et laver l'échantillon. Après une période de repos, la hauteur du niveau supérieur du flocculat est mesurée pour calculer l'équivalent de sable de l'échantillon (**Figure II.4**) [34], [35].



**Figure II.4 :** L'essai de floculation.

- Le rapport de hauteur de sable, quant à lui, mesure la proportion de sable fin et de grains grossiers dans un échantillon de sol. Cette méthode consiste à remplir un cylindre gradué de sol, à ajouter de l'eau jusqu'à une hauteur donnée, puis à mesurer la hauteur de la couche de sable fin au-dessus de la couche de sable grossier (**Figure II.5**) [32].



**Figure II.5 :** Le rapport hauteur de sable

En résumé, l'essai de floculation mesure la quantité de fines et d'argile, tandis que le rapport de hauteur de sable mesure la proportion de sable fin et grossier. Les deux essais sont utiles pour évaluer la qualité d'un sol dans différents contextes et peuvent être utilisés en complément l'un de l'autre pour une évaluation plus complète.

Des études ont montré qu'il existe une corrélation entre les valeurs de l'essai d'équivalent de sable et les limites d'Atterberg, qui sont une mesure de la plasticité des sols. Cela signifie que les résultats de l'essai d'équivalent de sable peuvent être utilisés pour estimer les limites d'Atterberg et donc la plasticité des sols. Les limites d'Atterberg sont importantes pour déterminer les propriétés des sols tels que leur capacité portante, leur comportement à la compression, leur perméabilité, leur rétractabilité et leur gonflement. Par conséquent, l'essai d'équivalent de sable peut être un outil utile pour évaluer les propriétés des sols et leur aptitude à des fins spécifiques telles que la construction de routes, les fondations de bâtiments, etc [36].

### **II.2.6. Teneur en eau du sable**

La mesure de la teneur en eau est une étape importante dans de nombreuses industries, notamment dans la construction et l'agriculture. Elle consiste à déterminer la quantité d'eau présente dans un matériau donné, tel que le sol ou le sable. En ce qui concerne ce dernier, la teneur en eau peut avoir un impact important sur ses propriétés physiques et mécaniques. Par exemple, un sable sec aura une densité plus élevée et sera plus résistant à la compression qu'un sable mouillé. De plus, la teneur en eau peut affecter la capacité du sable à s'écouler et à être compacté [37]. Il existe différentes méthodes pour mesurer la teneur en eau d'un échantillon de sable, telles que la méthode du séchage au four, la méthode de la pycnométrie et la méthode des capacités électriques. Chacune de ces méthodes a ses avantages et ses inconvénients, et le choix de la méthode appropriée dépendra du type de sable et des exigences spécifiques de l'application.

#### **But et Principe**

Pour clarifier, la différence entre la teneur en eau volumique et massique se résume ainsi : la teneur en eau massique d'un matériau est la quantité d'eau qu'il contient par rapport à sa masse sèche, tandis que la teneur en eau volumique mesure la quantité d'eau dans le matériau par rapport à son volume total. En général, la teneur en eau massique est mesurée en laboratoire par pesée et séchage, tandis que la teneur en eau volumique est mesurée in situ avec des méthodes telles que la méthode nucléaire. Il existe une relation entre ces deux mesures, et déterminer la teneur en eau volumique peut aider à estimer la teneur en eau massique. En effet, connaître la quantité d'eau présente dans un matériau par rapport à son

volume total peut fournir des informations utiles pour calculer la quantité d'eau en fonction de la masse sèche [38].

La teneur en eau peut être déterminée par la méthode de séchage en étuve (la perte de poids après évaporation dans une étuve) : Un échantillon de sable humide pesant 50 g est placé dans une étuve à une température de 110 à 115°C pendant 24 heures, puis refroidi à température ambiante dans un dessiccateur et pesé à nouveau. La différence de poids avant et après le chauffage donne la teneur en eau de l'échantillon. La teneur en eau peut être exprimée en pourcentage à l'aide de la formule % Teneur en eau :

**$(\text{Perte de poids dans l'échantillon} \times 100) / \text{Poids de l'échantillon avant chauffage}$**  [39]

La teneur en eau du sable joue un rôle crucial dans les travaux de terrassement, car elle permet de vérifier la capacité portante du sol et de déterminer le niveau de circulation des engins. Elle permet également de déterminer la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale pour un compactage efficace. En effet, une teneur en eau insuffisante peut entraîner une mauvaise compaction et donc une portance réduite, tandis qu'une teneur en eau excessive peut entraîner une instabilité et un affaissement. En ajustant la teneur en eau du sable en fonction de l'application, on peut donc garantir des travaux de terrassement de qualité et éviter les problèmes éventuels [38], [40].

### **II.2.7. Capacité d'absorption**

La capacité d'absorption du sable est une caractéristique essentielle qui définit sa capacité à retenir et à absorber l'eau. C'est une propriété fondamentale qui joue un rôle crucial, car lorsque le sable entre en contact avec l'eau, il peut absorber une quantité variable de liquide, en fonction de sa porosité, de sa granulométrie, de sa composition et d'autres facteurs. Cette capacité d'absorption d'eau du sable est influencée par les propriétés physiques et chimiques des grains de sable qui le composent.

#### **Mesure**

Pour mesurer le coefficient d'absorption du sable, la norme NF P 18-555 est généralement utilisée [41]. Cette méthode normalisée offre une manière fiable d'évaluer la capacité d'absorption d'eau du sable. En suivant les étapes prescrites, il est possible de déterminer avec précision le coefficient d'absorption.

- Le processus commence en séchant soigneusement l'échantillon de sable dans un four à une température contrôlée entre 110°C et 115°C jusqu'à ce qu'il atteigne une masse constante. Cela garantit l'élimination complète de toute humidité présente dans le sable, permettant des mesures précises.
- Une fois que l'échantillon de sable a refroidi à température ambiante, sa masse sèche est mesurée et enregistrée. L'échantillon est ensuite placé dans un récipient et de l'eau est ajoutée pour recouvrir le sable d'environ 5 cm. Cela permet au sable d'absorber l'eau pendant une période spécifique.
- Après une période de trempage de 24 heures, le sable est soigneusement retiré du récipient et laissé s'égoutter pendant 15 minutes. Cette période d'égouttage permet d'éliminer l'excès d'eau, ne laissant que l'eau absorbée à l'intérieur des particules de sable.
- La dernière étape consiste à peser à nouveau l'échantillon de sable et à enregistrer sa masse, incluant désormais l'eau absorbée. Avec la masse sèche initiale et la masse de l'eau absorbée connues, le coefficient d'absorption peut être calculé à l'aide de la formule fournie. Ce coefficient représente le pourcentage d'eau absorbée par rapport à la masse du sable sec [40].

En suivant ces procédures normalisées, les ingénieurs, chercheurs et professionnels de l'industrie de la construction peuvent évaluer les caractéristiques d'absorption d'eau de différents types de sable. Cette connaissance est précieuse pour diverses applications, notamment la conception et l'optimisation des mélanges de béton, des systèmes de filtration et des structures de protection côtière, garantissant ainsi l'adéquation et la durabilité des matériaux à base de sable dans différents projets.



**Figure II.6** : Moule tronconique



**Figure II.7 :** Essai détermination du Coefficient d'absorption

### Intérêt du coefficient d'absorption du sable

Le coefficient d'absorption du sable est essentiel pour évaluer l'impact de l'eau, parmi les intérêts qu'on peut citer en ce qui concerne sa détermination lors de la fabrication du béton :

- Durabilité : Un sable ayant une capacité d'absorption élevée peut poser des défis de durabilité pour le béton, car il peut entraîner une perte de maniabilité du béton à un rythme plus rapide [43]. Cela peut aboutir à une structure en béton plus faible et moins durable.
- Maniabilité : La capacité d'absorption du sable peut affecter la maniabilité du béton, c'est-à-dire la facilité avec laquelle le béton peut être mélangé, placé et fini. Un sable ayant une capacité d'absorption élevée peut absorber plus d'eau du mélange de béton, ce qui peut entraîner une perte de maniabilité et rendre difficile la mise en place et la finition du béton [44].
- Résistance : La capacité d'absorption du sable peut également affecter la résistance du béton. Un sable ayant une capacité d'absorption élevée peut entraîner un rapport eau-ciment plus élevé, ce qui peut affaiblir la structure du béton [45].

Le coefficient d'absorption des granulats est considéré comme un indicateur de leur qualité selon les réglementations en vigueur, plutôt que de fixer des limites de porosité. Ce coefficient mesure l'augmentation de masse des granulats après 24 heures d'imbibition, reflétant ainsi le volume des pores accessibles à l'eau. Une valeur élevée indique une durabilité réduite du béton dans un environnement agressif. L'entrée d'eau dans les pores peut affaiblir la structure en cas de gel et accélérer le processus de carbonatation en conditions d'hygrométrie faible. De plus, l'utilisation de granulats à fort coefficient d'absorption sans pré-humidification peut entraîner une mauvaise maniabilité du béton lors du mélange. Les normes établissent des valeurs spécifiées supérieures pour le coefficient

d'absorption d'eau afin de garantir la qualité des bétons utilisés dans différents contextes, notamment ceux exposés à un environnement agressif [46] .

### **II.3. L'essai de caractéristique chimique**

L'étude de la composition chimique du sable revêt une importance cruciale dans la compréhension approfondie des constituants minéraux et des éléments chimiques présents dans cette ressource abondante. En analysant en détail la composition chimique précise du sable, notamment les minéraux dominants et les éléments caractéristiques à l'échelle microscopique, nous sommes en mesure de décrypter les interactions complexes entre ces composants chimiques et d'explorer leur influence sur les multiples propriétés du sable. Cette exploration nous permettra d'appréhender les mécanismes qui façonnent sa texture, sa densité, sa stabilité et d'autres caractéristiques. De plus, en comprenant la composition chimique du sable, nous pourrions appréhender son rôle dans l'ingénierie civile et environnementale. Ainsi, cette analyse nous ouvre des perspectives essentielles pour une meilleure compréhension de cette ressource naturelle et de ses multiples applications scientifiques et industrielles.

#### **II.3.1. Chlorures**

Le test des chlorures sur le sable est une analyse chimique qui permet de déterminer la teneur en chlorures dans le sable. Cela peut être important dans certaines applications, comme la construction de structures en béton armé, car une teneur élevée en chlorures peut causer la corrosion des armatures métalliques. Il peut être effectué en utilisant différentes méthodes d'analyse, telles que la spectroscopie, la chromatographie ou des kits de test colorimétriques. Les résultats du test de chlore peuvent être exprimés en termes de concentration de chlore total ou de formes spécifiques de chlore, telles que le chlore libre ou le chlore combiné.

##### **II.3.1.1. Méthodes**

La norme NF EN 14629 est une norme qui définit deux méthodes de mesure du taux total de chlorures soluble dans l'acide. Cette norme concerne les produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton. Elle permet de contrôler la teneur en chlorures des bétons. Les teneurs en chlore peuvent provenir de l'eau de gâchage, de ciment et des sables [47]. Il est important de prendre en compte la teneur totale d'ions chlorures dont la valeur est déterminée selon les méthodes décrites dans la norme. La

norme NF EN 14629 est donc une référence pour la mesure de la teneur en chlorures dans les bétons et les produits de protection et de réparation des structures en béton [48].

En résumé, la teneur en chlorures sur le sable peut être mesurée par dosage acido-basique, par les méthodes définies dans la norme NF EN 14629, ou encore par des études expérimentales qui mesurent la teneur en chlorures pour chaque type de sable ou pour chaque pourcentage de chlorures.

### **II.3.1.2. Interprétation**

Pour interpréter les résultats de la détermination de la teneur en chlorures sur le sable, il est important de connaître la méthode utilisée pour la détermination de la teneur en chlorures. Les résultats peuvent être interprétés en fonction de la norme en vigueur pour le contrôle de la teneur en chlorures des bétons. Cette norme indique que la teneur en chlorure du béton doit intégrer la somme des contributions de tous les constituants du béton. Si la teneur en chlorures est supérieure à la norme, cela peut indiquer un risque de corrosion des armatures et une réduction de la résistance du béton. Les résultats peuvent également être interprétés en fonction des objectifs de l'étude. Par exemple, une étude peut avoir pour but d'examiner l'effet de différents pourcentages de chlorures dans le sable de concassage sur la résistance, la porosité et la migration des ions chlorures dans le béton. Dans ce cas, les résultats peuvent être interprétés pour déterminer l'effet des chlorures sur ces propriétés du béton. En général, la détermination de la teneur en chlorures dans le sable est importante pour comprendre et éviter la détérioration du béton armé due à la présence de chlorures [49].

### **II.3.2. Les Insolubles**

La teneur des insolubles dans le sable peut varier en fonction de divers facteurs, tels que la source du sable et les conditions environnementales. En général, le sable est composé de grains minéraux provenant de la désagrégation de roches comme le quartz, le feldspath, le mica, etc. Cependant, il peut également contenir des impuretés sous forme d'insolubles, qui sont des substances qui ne se dissolvent pas facilement dans l'eau ou d'autres solvants.

La teneur en insolubles dans le sable n'est généralement pas mesurée ni rapportée, mais elle peut être estimée en analysant la composition chimique du sable. L'estimation de la teneur en résidus insolubles peut être utile dans les études géologiques pour comprendre la composition et les propriétés du sable.

Des techniques telles que la spectroscopie, la microscopie électronique à balayage (MEB) ou la diffraction des rayons X peuvent également être utilisées pour identifier et caractériser les composants insolubles, Mais la méthode de digestion dans de l'acide chlorhydrique est la plus couramment utilisée dans les études géologiques, les analyses de sols et d'autres domaines où il est important de connaître la teneur en insolubles dans le sable. Elle implique la digestion de l'échantillon de sable dans de l'acide chlorhydrique, suivi de la filtration du résidu insoluble. Après lavage et séchage, le résidu est pesé pour déterminer la quantité d'insolubles présents. Cette méthode permet d'évaluer la pureté du sable, d'identifier les impuretés et d'obtenir des informations sur sa composition minéralogique [50].

### **II.3.3. La teneur en Carbonates**

L'évaluation de la teneur en carbonate dans le sable est d'une importance cruciale dans de nombreux domaines. Le carbonate peut influencer les propriétés physiques et chimiques du sable, et sa quantification précise est essentielle pour comprendre et prédire le comportement de ce matériau.

Ci-dessous les différentes méthodes couramment utilisées pour analyser le carbonate contenu dans le sable. Chaque méthode présente des principes et des étapes spécifiques qui permettent de mesurer et de calculer la teneur en carbonate avec une précision variable. Ces méthodes comprennent la titration acido-basique, la méthode gazométrique, la méthode de perte au feu, la photométrie de flamme, le calcimètre volumétrique et la complexométrie avec EDTA. Le suivant est le détail de certaines :

#### **Titration acido-basique**

Cette méthode repose sur la réaction entre le carbonate présent dans le sable et l'acide chlorhydrique. L'acide chlorhydrique réagit avec le carbonate pour former du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), de l'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) et des chlorures. La quantité d'acide chlorhydrique consommée lors de la réaction est proportionnelle à la quantité de carbonate présente dans l'échantillon. Ainsi, en mesurant la quantité d'acide chlorhydrique consommée, il est possible de calculer la teneur en carbonate dans le sable [51].

La titration acido-basique est une méthode simple et peu coûteuse. Cependant, elle n'est pas adaptée aux échantillons à faible teneur en carbonate et peut réagir avec d'autres minéraux contenant des composants solubles dans l'acide.

**Méthode Gazométrique**

Dans cette méthode, le carbonate réagit avec l'acide chlorhydrique dans un système fermé, généralement un flacon en verre équipé d'un dispositif pour mesurer le volume de gaz. La réaction produit du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) qui s'accumule dans le flacon. Le volume de CO<sub>2</sub> produit est mesuré, et en utilisant les lois des gaz parfaits, il est possible de calculer la quantité de carbonate dans le sable [51].

La méthode gazométrique présente l'avantage d'être relativement simple et peu coûteuse. Cependant, elle nécessite la mise en place d'un système fermé, ce qui peut poser des difficultés, et elle n'est pas adaptée aux échantillons à faible teneur en carbonate.

**Méthode de perte au feu**

Cette méthode implique de chauffer l'échantillon de sable à une température élevée, généralement dans un four, pour brûler toute la matière organique et décomposer le carbonate en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). La perte de poids de l'échantillon due à la combustion de la matière organique et à la libération de CO<sub>2</sub> est mesurée. En connaissant la masse initiale de l'échantillon, on peut calculer la quantité de carbonate présente [51].

**Calcimètre volumétrique**

Cette méthode consiste à mesurer le volume de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) produit lors de la réaction entre le carbonate du sable et l'acide chlorhydrique. L'échantillon de sable est placé dans un dispositif où l'acide chlorhydrique est ajouté, provoquant la libération de CO<sub>2</sub>. Le volume de CO<sub>2</sub> produit est mesuré à l'aide d'un dispositif de mesure approprié, tel qu'une burette graduée. En utilisant les lois des gaz parfaits, on peut calculer la quantité de carbonate présente dans le sable [52].

Les avantages de la méthode du calcimètre volumétrique sont sa simplicité et son utilisation répandue. Cependant, elle nécessite un équipement spécialisé, ce qui peut être coûteux.

L'interprétation de la teneur en carbonate dans le sable dépend du contexte spécifique de l'analyse, tel que le but de l'analyse, le type de sédiment étudié et les méthodes utilisées pour déterminer la teneur en carbonate. Selon l'Association internationale des entreprises de dragage (IADC), un sable est classé comme un sable « carbonaté » lorsque sa teneur en carbonate est supérieure à 90% ; un sable « carbonaté siliceux » a une teneur en carbonate de 50 à 90% ; et l'adjectif « calcaire » est utilisé pour les dépôts ayant une teneur en carbonate de 10 à 50% [53].



**Figure II.8 :** Calcimètre Bernard.

### II.3.4. Différences entre la détermination de la teneur en insolubles et en carbonates

Les méthodes de détermination de la teneur en insolubles dans le sable et de la teneur en carbonate dans le sable diffèrent de la manière suivante :

#### ➤ **Teneur en insolubles dans le sable**

Objectif : Estimer les composants non solubles dans le sable.

Méthodes : Digestion dans de l'acide chlorhydrique ou centrifugation.

Analyse : Déterminer la partie du sable qui reste après la digestion.

#### ➤ **Teneur en carbonate dans le sable**

Objectif : Estimer la quantité de carbonate de calcium dans le sable.

Méthodes : Titration acido-basique, méthode gazométrique, méthode de perte au feu, photométrie de flamme, calcimètre volumétrique et complexométrie avec EDTA.

Analyse : Mesurer la quantité de dioxyde de carbone produit ou la quantité d'ions calcium dans l'échantillon.

### Implications

- Teneur en insolubles dans le sable : Comprendre la composition et les propriétés du sable.
- Teneur en carbonate dans le sable : Études géologiques telles que la formation de boue carbonatée, description précise des grains de carbonate et évaluation des potentiels de ressources en hydrocarbures.

### II.3.5 Sulfates

La détermination de la teneur en sulfate du sable est importante en génie civil pour plusieurs raisons. Elle permet de prévoir les risques de réaction sulfatique et d'assurer la

durabilité des structures. Elle permet également de contrôler la qualité des matériaux de construction tels que le béton et l'asphalte. La teneur en sulfate influence les caractéristiques géotechniques du sol et permet d'évaluer sa capacité portante et sa perméabilité. De plus, la mesure de la teneur en sulfate permet de garantir la conformité aux normes et réglementations en vigueur. Les études montrent également que la teneur en sulfate du sable peut avoir un effet sur la durabilité du béton. La présence de sulfates dans le sable utilisé dans le béton peut jouer un rôle bénéfique en contribuant à la formation de produits sulfatés souhaités tels que l'étringite et/ou la thaumasite. Ces composés peuvent renforcer la résistance et la durabilité du matériau en agissant comme des agents liants supplémentaires. Cependant, il est important de respecter les normes qui limitent les teneurs en sulfates, car un excès de sulfates peut entraîner une réaction excessive et indésirable avec les composants du ciment, provoquant des altérations du béton. Ainsi, un contrôle adéquat de la concentration et de la libération des sulfates dans le béton est essentiel pour garantir une attaque sulfatique maîtrisée et une performance optimale du matériau. La gestion appropriée des sulfates dans le sable permet de tirer parti de leurs avantages tout en évitant les effets néfastes potentiels [54].

### **Principe de la méthode**

La gravimétrie est une méthode d'analyse qui utilise la masse pour déterminer la quantité d'une substance dans un échantillon. Cette méthode consiste à extraire les sulfates présents dans le sable en utilisant une solution d'eau distillée. L'échantillon de sable est mélangé avec de l'eau distillée, puis la solution est filtrée pour séparer le sable des ions sulfate dissous. La solution filtrée est ensuite traitée chimiquement pour précipiter les sulfates. Le précipité est ensuite filtré, séché, puis pesé pour déterminer la quantité de sulfate présente dans le sable [55]. Cependant, il est important de noter que la gravimétrie n'est pas la méthode la plus couramment utilisée pour déterminer la teneur en sulfate du sable, car elle peut être plus longue et plus complexe que d'autres méthodes plus courantes telles que la spectrophotométrie ou la méthode de dosage par spectrométrie d'émission atomique à source plasma (ICP) [56].

**II.4. Conclusion**

Une analyse approfondie et précise des caractéristiques du sable permet de garantir sa qualité, d'anticiper les problèmes potentiels et d'optimiser son utilisation dans diverses applications. Ces connaissances sont essentielles pour assurer la sécurité, la durabilité et l'efficacité des projets de construction et des applications industrielles où le sable est utilisé.

*Chapitre III*

*Résultats des caractéristiques*

*Physiques et Chimiques*

### III.1. Introduction

Le présent chapitre vise à fournir une présentation détaillée du matériau utilisé dans le cadre de notre étude (Sable des dunes), ainsi qu'à déterminer ses différentes propriétés :

- ✓ Les propriétés physiques comprennent la densité, la masse volumique, l'équivalent de sable, la porosité et les granulométries.
- ✓ Les propriétés chimiques englobent les insolubles, les carbonates, les sulfates et les chlorures.

### III.2. Matériaux utilisés

Notre étude porte sur les sables de dunes de la région de TOUGGOURT. Le prélèvement des échantillons de sable s'est fait dans quatre communes à savoir :

- Sable de dune TEBESBEST
- Sable de dune NEZLA
- Sable de dune TMACINT
- Sable de dune ELMALGARIN

A chaque échantillon a fait l'objet d'une localisation GPS (Tableau III.1)

**Tableau III.1** : Localisation GPS des échantillons de sables étudiés

Echantillons de sable des dunes	Coordonnées	
	X	Y
<b>TEBESBEST</b>	6°08'40.1"	33°06'34.5"
<b>NEZLA</b>	6°01'46.5"	33°04'44.5"
<b>TMACINT</b>	5°96'72.28"	33.00'31.9"
<b>ELMALGARIN</b>	6°05'53.7"	33°10'51.8"

De plus, notre recherche a également inclus d'autres échantillons dont les essais n'ont pas été réalisés dans nos propres laboratoires, mais dans **une filiale du groupe "GEICA" dont le laboratoire était situé à OUARGLA**. Les résultats de ces essais nous ont ensuite été transmis sous forme d'un rapport d'analyse, permettant ainsi une comparaison et une analyse approfondie avec les échantillons étudiés :

- Sable de dune IN AMINAS
- Sable de dune INACO
- Sable de dune HASSI MESSAOUD

**Tableau III.2 :** Localisation GPS des échantillons du Laboratoire GEICA

Echantillons de sable des dunes	Coordonnées	
	X	Y
IN AMINASE	9.52960500	28.38933667
INACO	9.49438083	28.11308333
HASSI MESSOUD	6.12785278	31.94683667

### III.3. Propriétés physiques

Les essais sur les quatre premiers sables ont été effectués au laboratoire pédagogique du département Génie Civil de l'université Saad Dahleb BLIDA1.

Pour déterminer les propriétés physiques des quatre sables étudiés, nous avons suivi les normes des essais présentés ci-dessous :

#### III.3.1. Analyse granulométrique selon la norme (NF 18-560) [55]

L'analyse granulométrique par tamisage est une méthode d'essai qui consiste à tamiser le granulat sur une série de tamis à mailles carrées de dimensions d'ouverture décroissante et à peser le refus sur chaque tamis.

Le but de cette analyse est de déterminer la répartition des grains suivant leurs dimensions. Le principe de cette manipulation consiste à prendre un échantillon de sol séché au préalable et de le verser dans une colonne de tamis dont ils sont classés dans l'ordre croissant des ouvertures de bas en haut. La pesée des refus des tamis permet de tracer la courbe granulométrique. Cet essai est réalisé aux laboratoires **GENIE CIVIL SAAD DAHLAB**

#### Matériel nécessaire

- Une machine à tamiser
- Une série de tamis conformes (12 tamis plus le fond)
- Un couvercle qui évite la perte de matériau pendant le tamisage et un réceptacle de fond pour recueillir le dernier tamis
- Une main écope pour le remplissage



**Figure III.1 :** Machine à tamiser

### **Mode opératoire**

- a.** On doit dresser la colonne des tamis, de sorte que les ouvertures des tamis doivent être croissantes de bas en haut.
- b.** Prendre 1 kg de sable.
- c.** Verser le sable dans le tamis supérieur.
- d.** Procéder à l'agitation mécanique pendant environ 5 min. Après agitation de la série de tamis, les grains de l'échantillon se trouvent séparés selon leurs dimensions et chaque tamis retient une partie dite refus partiel du tamis
- e.** Procéder à la pesée cumulée des refus des tamis en commençant par le tamis supérieur. Le refus cumulé (total) d'un tamis est la somme de tous les refus partiels des tamis qui se trouvent au-dessus.



**Figure III.2 :** Essai de l'analyse granulométrique.

La proportion (en %) du refus cumulé d'un tamis rapportée au poids total s'exprime :

$$\% \text{ Refus} = (\text{Poids refus cumulé} / \text{Poids échantillon}) \times 100$$

$$\% \text{ Tamisât} = \% 100 - \% \text{ Refus}$$

Les résultats des essais de Analyse granulométrique du sable de dune N° 1 (**TIBESBEST**) sont présentés dans le tableau suivant:

**Tableau III. 3 :** Analyse granulométrique du sable de dune N° 1 (**TIBESBEST**)

Ouverture tamis (mm)	Poids (gr)		Teneurs (%)	
	Refus partiel	Refus cumulés	% Refus	% Passant
5	00	00	00	100
4	00	00	00	100
3,15	00	00	00	100
2,5	00	00	00	100
2	00	00	00	100
1,6	0,05	0,05	0,005	99,995
1,25	0,27	0,32	0,032	99,968
1	0,11	0,43	0,043	99,957
0,63	0,38	0,81	0,081	99,919
0,315	576,88	577,69	57,769	42,231
0,16	399,8	977,49	97,746	2,251
0,08	19,06	996,55	99,655	0,345
FOND	3,39	999,94	99,994	0,006

On trace la Courbe Granulométrique, courbe exprimant les pourcentages des passants dans les tamis successifs.

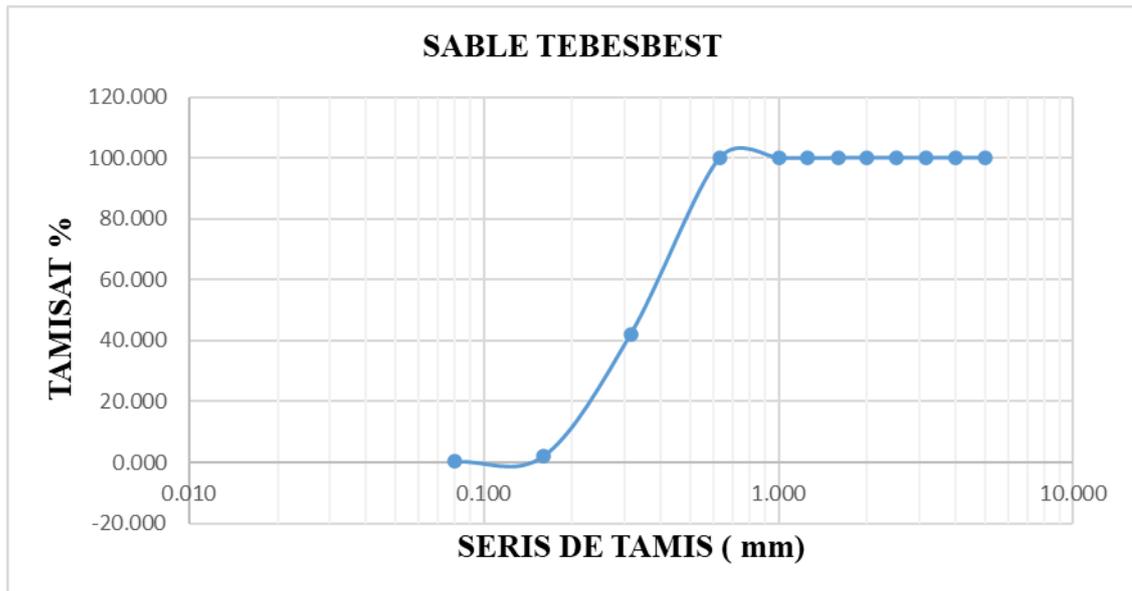


Figure III.3 : courbe granulométrique de sable de dune TEBESBESTE.

Les résultats des essais Analyse granulométrique du sable de dune N° 2 (NEZLA) sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau III.4 : Analyse granulométrique du sable de dune N° 2 (NEZLA)

Ouverture tamis (mm)	Poids (gr)		Teneurs (%)	
	Refus partiel	Refus cumulés	% Refus	% Passant
5	0	0	0	100
4	0	0	0	100
3,15	0	0	0	100
2,5	0	0	0	100
2	0,06	0,06	0,006	99,994
1,6	0,13	0,19	0,019	99,981
1,25	0,24	0,43	0,043	99,957
1	0,22	0,65	0,065	99,935
0,63	5,89	6,54	0,654	99,346
0,315	331,5	338,04	33,804	66,196
0,16	512,18	850,22	85,022	14,978
0,08	137,65	987,87	98,787	1,213
FOND	10,97	998,84	99,884	0,116

On trace la Courbe Granulométrique, courbe exprimant les pourcentages des passants dans les tamis successifs

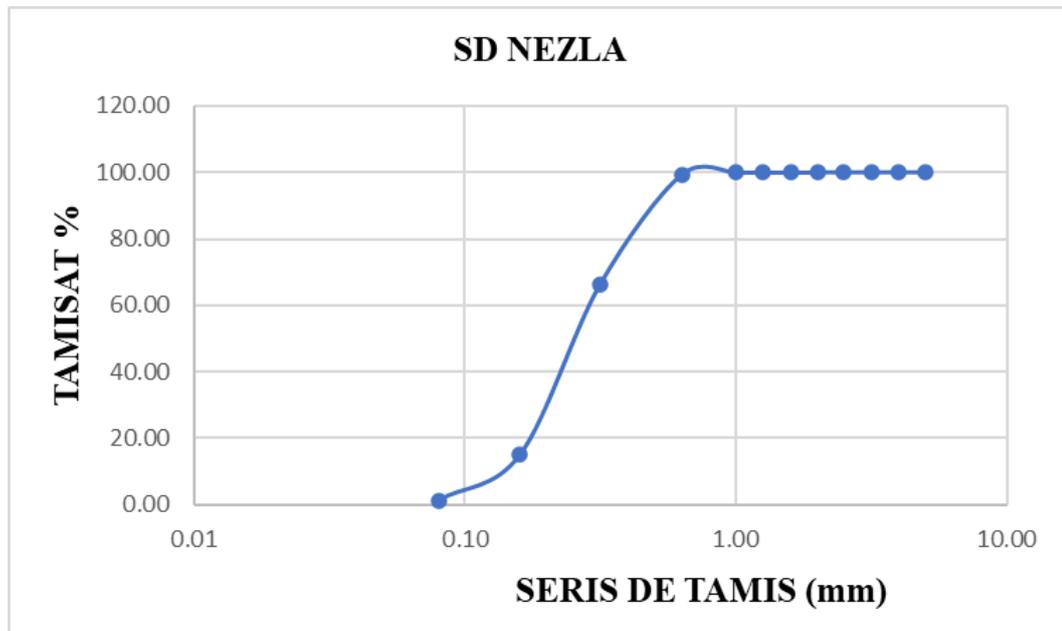


Figure III.4 : courbe granulométrique de sable de dune NEZLA.

Les résultats des essais Analyse granulométrique du sable de dune N°3(ELMALGHARIN) sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau III.5 : Analyse granulométrique du sable de dune N°3 (EL MALGHARIN)

Ouverture tamis (mm)	Poids (gr)		Teneurs (%)	
	Refus partiel	Refus cumulés	% Refus	% Passant
5	00	00	00	100
4	0,14	0,14	0,014	99,986
3,15	1,66	1,8	0,18	99,82
2,5	8,83	10,63	1,063	98,937
2	8,20	18,83	1,883	98,117
1,6	13,52	32,35	3,235	96,765
1,25	27,79	60,14	6,014	93,986
1	43,10	103,24	10,324	89,676
0,63	109,55	212,79	21,279	78,721
0,315	237,06	449,85	44,985	55,015
0,16	311,74	761,59	76,159	23,841
0,08	167,81	929,4	92,94	7,06
FOND	72,45	1000	100	00

On trace la Courbe Granulométrique, courbe exprimant les pourcentages des passants dans les tamis successifs.

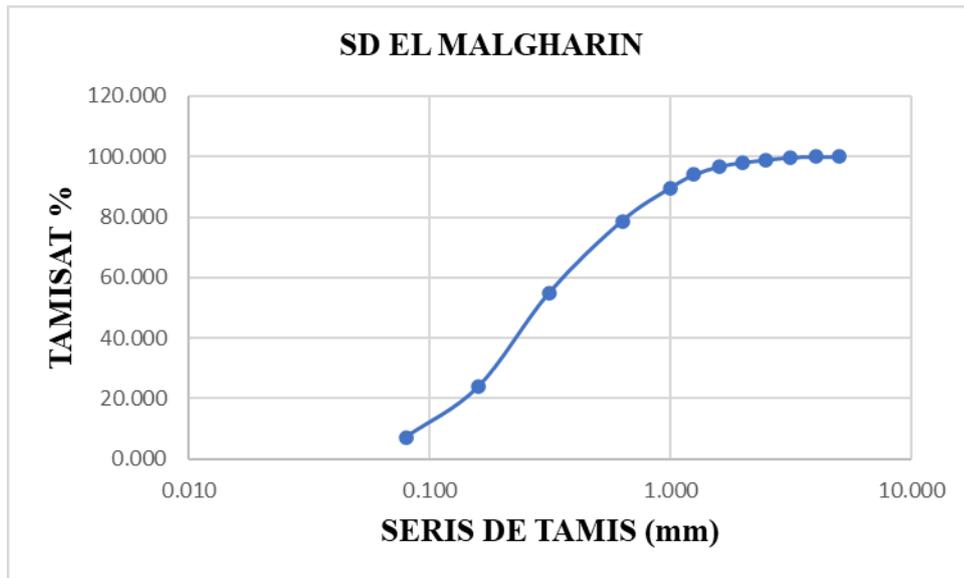


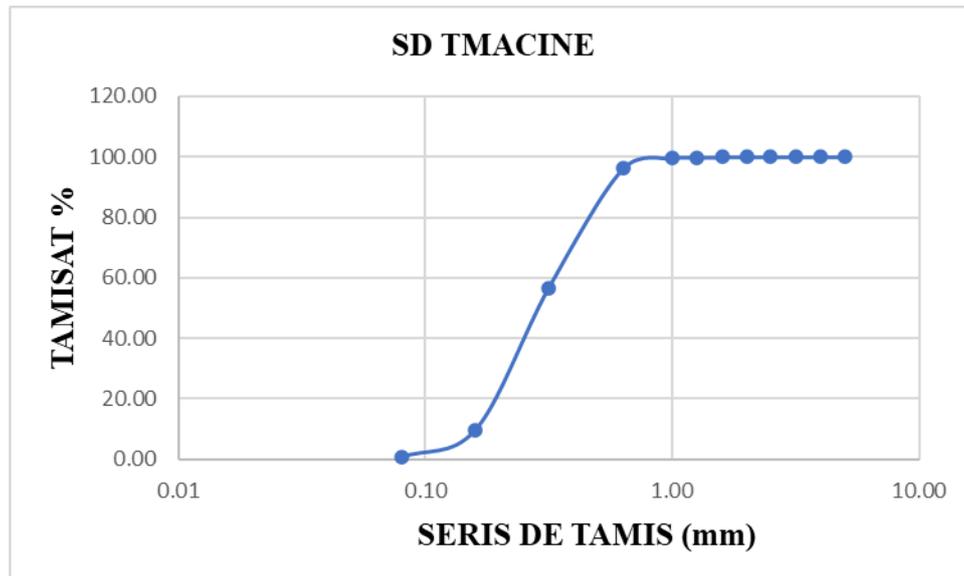
Figure III.5 : courbe granulométrique de sable de dune EL MALGHARINE.

Les résultats des essais Analyse granulométrique du sable de dune N°4 (TMACINE) sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau III.6 : Analyse granulométrique du sable de dune N°4 (TMACINE)

Ouverture tamis (mm)	Poids (gr)		Teneurs (%)	
	Refus partiel	Refus cumulés	% Refus	% Passant
5	00	00	00	100
4	00	00	00	100
3,15	00	00	00	100
2,5	0,12	0,12	0,012	99,988
2	0,06	0,18	0,018	99,982
1,6	0,31	0,49	0,049	99,951
1,25	1,28	1,77	0,177	99,823
1	2,49	4,26	0,426	99,574
0,63	34,82	39,08	3,908	96,092
0,315	396,24	435,32	43,532	56,468
0,16	467,71	903,03	90,303	9,697
0,08	91,24	994,27	99,427	0,573
FOND	5,73	1000	100	00

On trace la Courbe Granulométrique, courbe exprimant les pourcentages des passants dans les tamis successifs.



**Figure III.6** : courbe granulométrique de sable de dune **TMACINE**.

### III.3.2. Module de finesse (Mf)

Un bon sable doit présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion.

- Si le sable possède trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton.
- Si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile.

On peut quantifier les caractéristiques plus ou moins fin des sables par le calcul du module de finesse (Mf). Qui correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis dont les dimensions des ouvertures sont (5 – 2,5 – 1,25 – 0,63 – 0,315 – 0,16) mm.

$Mf = \sum \% \text{ de refus cumulés} / 100$  Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables.

Les résultats des essais Module de finesse Mf pour les quatre sables sont présentés dans le tableau suivant:

**Tableau III.7** : Module de finesse Mf pour les quatre sables

Propriétés physiques	Sable de dune <b>TEBESBESTE</b>	Sable de dune <b>NEZLA</b>	Sable de dune <b>EL MALGHARINE</b>	Sable de dune <b>TMACINE</b>
Module de finesse (Mf) %	1,55	1,19	1,49	1,37
Constatation	Sable fin	Sable fin	Sable fin	Sable fin

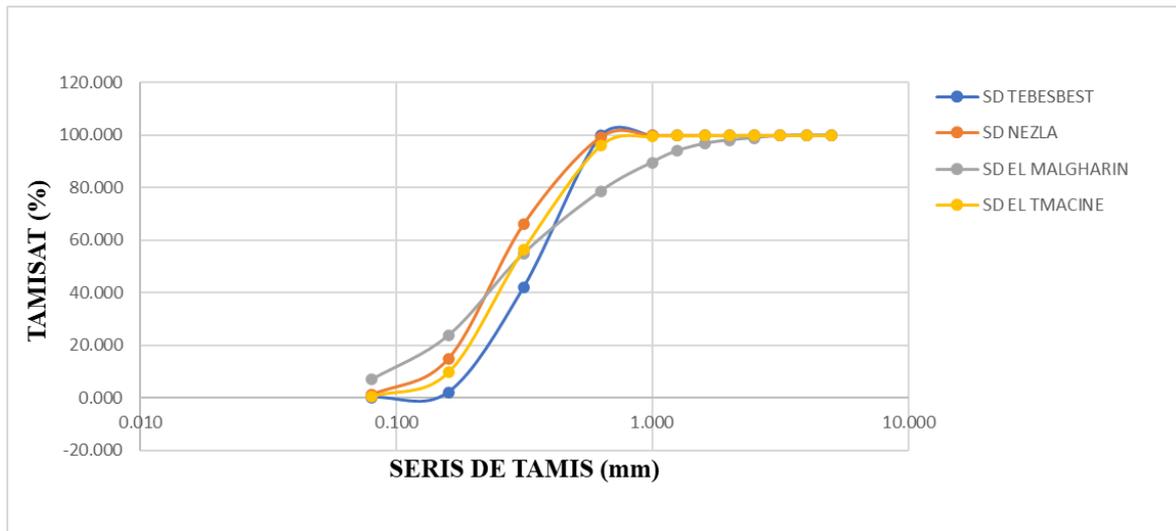


Figure III.7 : Superposition des graphes des 4 types de sable.

### Commentaire

- Les résultats du module de finesse montrent que les quatre échantillons NEZLA , EL MALGHARIN ,TMACINE et TEBESBEST est un sable fin .

### III.3.3. Masse volumique absolue ( $\rho_{ab}$ )

C'est la masse des particules solides par unité de volume, sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains [56].

Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire, comme par exemple lorsque on élabore une composition de bétons. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaires malaxées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

Il existe deux méthodes pour déterminer la masse volumique absolue :

- Méthode de l'éprouvette graduée.
- Méthode de la mesure au pycnomètre.

Dans notre étude nous avons utilisé la méthode la plus simple et le plus rapide dont l'utilisation à besoin de matériel courant du laboratoire qui est la méthode de l'éprouvette graduée.

On détermine la masse volumique absolue par la formule suivante :

$$\rho_{ab} = \frac{M}{V_2 - V_1V}$$

**Mode opératoire**

- a. Remplir une éprouvette graduée avec un volume  $V_1$  d'eau.
- b. Peser un échantillon sec  $M$  de granulats (100 g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- c. Lire le nouveau volume  $V_2$ .



**Figure III.8** : Essai pour déterminer la masse volumique absolue.

Les résultats des essais Masse volumique absolue des sables après trois essais sur chaque sable et sont présentés dans le tableau suivant:

**Tableau III.8** : Masse volumique absolue

Sables	NEZLA	ELMALGARIN	TEBESBEST	TMASIN
<b>Masse volumique absolue (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.5	2.5	2.56	2.5

### III.3.4. Masse volumique apparente ( $\rho_{app}$ )

C'est la masse du matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides [57,58].

La méthode consiste à remplir un récipient dont le volume  $V$  est bien connu, par un échantillon sec de sable, en prenant soin de bien raser le bord du récipient, peser l'échantillon sec  $M$  de granulats.



**Figure III.9 :** Essai pour déterminer la masse volumique apparente.

On détermine la masse volumique apparente par la formule suivante :

$$\rho_{app} = M/V$$

Avec :

- M : La masse du matériau
- V : Le volume total du matériau

Les résultats des essais de la masse volumique apparente sont présentés sur le tableau suivant :

**Tableau III.9:** Masse volumique apparente

Sable	<b>NEZLA</b>	<b>ELMALGARIN</b>	<b>TEBESBEST</b>	<b>TMASIN</b>
N° D'essai	1394.18	1515.62	1504.92	1263.35
	1387.39	1520.29	1505.14	1272.83
	1392.78	1551.20	1515.57	1278.76
	1395.93	1548.16	1508.95	1288.04
	1400.02	1557.04	1510.52	1296.4
<b>La moyenne (g/cm 3)</b>	<b>1388.05</b>	<b>1538.462</b>	<b>1509.02</b>	<b>1279.876</b>

**III.3.5. Equivalence de sable norme (NF P18 598) [60]**

Les granulats employés pour le béton doivent être propres, car les impuretés perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des adhérences entre les granulats et la pâte. Le degré de propreté est fourni par essai appelé "équivalent de sable ". Cette dernière complète l'analyse granulométrique par tamisage elle donne la répartition des grains de diamètre inférieur à 80 µm et aussi pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. Il est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier.

L'essai de l'équivalence de sable complète l'analyse granulométrique par tamisage, elle donne la répartition des grains de diamètre inférieur à 80 µm et aussi pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. Il est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier.

**Mode opératoire**

- a. Remplir les éprouvettes avec la solution, jusqu'au premier trait (inférieur)
- b. Verser la quantité de sable  $m=120(1+W)$
- c. Laver et remplir les éprouvettes, avec le tube plongeur et bien fermer les éprouvettes et secouée 90 cycle en 30s
- d. Sortir le tube, fermer le robinet lorsque le niveau du liquide atteint le trait supérieur puis laisser reposer 20 min en évitant toute vibration. La tolérance sur le temps de repos est faible (plus ou moins 10 sec) car la hauteur du flocculat dépend fortement de celui-ci
- e. 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

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



(a) Laver et remplir les éprouvettes



(b) Appareil agitateur



(c) Laver et remplir les éprouvettes



(d) Reposer 20 min

**Figure III.10** : Détermination de l'équivalent de sable.

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

- ESV (équivalent de sable visuel)
- ESP (équivalent de sable au piston)



(a) Esv



(b) Esp

**Figures III.11.** Essai d'équivalent de sable

a) ESV : Equivalent Sable Visuel

b) ESP : Equivalent Sable Piston

Le tableau suivant montre le classement des sables selon leurs propriétés

**Tableau III.10 :** Tolérance de l'équivalent de sable

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
ES <65	ES <60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
65 ≤ ES <75	60 ≤ ES <70	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour béton de qualité courante et on ne craint pas particulièrement le retrait.
75 ≤ ES <85	70 ≤ ES <80	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ES ≥ 85	ES ≥ 80	Sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses, risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Les résultats des essais de l'équivalent de sable (TEBESBEST) sont présentés dans le tableau suivant:

**Tableau III.11 :** Equivalent de Sable Visuel (ESV)

La hauteur H2' « moyenne »	Essai 1				Essai 2			
	Lectures			Moyenne	Lectures			moyenne
	11	10.9	10.9	<b>10.93</b>	10.9	10.7	10.8	<b>10.8</b>
La hauteur H1 « moyenne »	21.8	21.6	21.5	<b>21.63</b>	23	22.8	22.8	<b>22.87</b>
ESV (%)	<b>50.51</b>				<b>47.22</b>			
ESV moyenne (%)	<b>49</b>							

**Tableau III.1 : Equivalent de Sable Piston (ESP)**

La hauteur H2 « moyenne »	Essai 1				Essai 2			
	Lectures			Moyenne	Lectures			Moyenne
	9.4	9.4	9.4	<b>9.4</b>	9.4	9.4	9.4	<b>9.4</b>
La hauteur H1 « moyenne »	21.8	21.6	21.5	<b>21.63</b>	23	22.8	22.8	<b>22.87</b>
ESP (%)	<b>43.46</b>				<b>41.10</b>			
ESP moyenne (%)	<b>42</b>							

**Commentaire :**  $ES_v < 65$  et  $ES_{piston} < 60$  donc le sable argileux (risque de retrait ou de gonflement a rejeter pour des bétons de qualité

Les résultats des essais de l'équivalent de (TMASSIN) sont représentés sur le tableau suivant :

**Tableau III.2 : Equivalent de sable visuel (ESV)**

La hauteur H2' « moyenne »	Essai 1				Essai 2			
	Les lecteur			Moyenne	Les lecteur			Moyenne
	11.2	11.1	11.1	<b>11.13</b>	11	11	11	<b>11</b>
La hauteur H1 « moyenne »	27	26.9	26.8	<b>26.9</b>	24.1	24	24.3	<b>24.13</b>
ESV (%)	<b>41.38</b>				<b>45.59</b>			
ESV moyenne (%)	<b>43</b>							

**Tableau III.3 : Equivalent de Sable Piston (ESP)**

La hauteur H2' « moyenne »	Essai 1				Essai 2			
	Les lecteur			Moyenne	Les lecteur			Moyenne
	9.7	9.7	9.7	<b>9.7</b>	9.5	9.5	9.5	<b>9.5</b>
La hauteur H1 « moyenne »	27	26.9	26.8	<b>26.9</b>	24.1	24	24.3	<b>24.13</b>
ESP (%)	<b>36.06</b>				<b>39.37</b>			
ESP moyenne (%)	<b>38</b>							

**Commentaire :**  $ES_v < 65$  et  $ES_{piston} < 60$  donc le sable argileux (risque de retrait ou de gonflement a rejeter pour des bétons de qualité

Les résultats des essais de l'équivalent de (NEZLA) sont représentés sur le tableau suivant :

**Tableau III .4 :** Equivalent de Sable Visuel (ESV)

La hauteur H2' « moyenne »	Essai 1				Essai 2			
	Les lecteurs			Moyenne	Les lecteurs			Moyenne
	10.6	10.6	10.5	<b>10.57</b>	10.5	10.4	10.5	<b>10.47</b>
La hauteur H1 « moyenne »	14.6	14.5	14.5	<b>14.53</b>	14.4	14.4	14.4	<b>14.4</b>
ESV (%)	<b>72.74</b>				<b>72.71</b>			
ESV moyenne (%à	<b>73</b>							

**Tableau III.5 :** Equivalent de Sable Piston (ESP)

La hauteur H2' « moyenne »	Essai 1				Essai 2			
	Les lecteurs			Moyenne	Les lecteurs			Moyenne
	7.9	7.9	7.9	<b>7.9</b>	7.8	7.8	7.8	<b>7.8</b>
La hauteur H1 « moyenne »	10.6	14.5	14.5	<b>14.53</b>	14.4	14.4	14.4	<b>14.4</b>
ESP (%)	<b>54.37</b>				<b>54.17</b>			
ESP moyenne	<b>54</b>							

**Commentaire :** dans ce cas nous avons refait l'essai et nous avons obtenu les mêmes résultats a savoir pour le même sable nous avons deux classifications

Les résultats des essais de l'équivalent de (LMELGARIN) sont représentés sur le tableau suivant :

**Tableau III.6 :** Equivalent de Sable Visuel

La hauteur H2' « moyenne »	Essai 1				Essai 2			
	Les lecteur			Moyenne	Les lecteur			Moyenne
	10.2	10.3	9.9	<b>10.13</b>	9.8	9.8	9.8	<b>9.8</b>
La hauteur H1 « moyenne »	17.3	16.7	16.5	<b>16.83</b>	15.8	15.8	15.6	<b>15.73</b>
ESV (%)	<b>60.19</b>				<b>62.30</b>			
ESV moyenne (%)	<b>61</b>							

Tableau III.7 : Equivalent de Sable Piston (ESP)

La hauteur H2' « moyenne »	Essai 1				Essai 2			
	Les lecteur			Moyenne	Les lecteur			moyenne
	6.7	6.7	6.7	<b>6.7</b>	6.7	6.7	6.7	<b>6.7</b>
La hauteur H1 « moyenne »	17.3	16.7	16.5	<b>16.83</b>	15.8	15.8	15.6	<b>15.73</b>
ESP(%)	<b>39.80</b>				<b>42.59</b>			
ESP moyenne (%)	<b>41</b>							

**Commentaire :**  $ESV < 65$  et  $ES\ piston < 60$  donc le sable argileux ( risque de retrait ou de gonflement a rejeter pour des bétons de qualité

### III.3.6. Capacité d'absorption

On effectue les étapes suivantes pour déterminer le coefficient d'absorption, qui est défini comme le rapport entre l'augmentation de la masse de l'échantillon après son immersion dans l'eau et la masse sèche de l'échantillon :

- Prendre un échantillon de sable.
- Placer l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à une température de 20 °C.
- Après 24 heures, retirer délicatement le sable de l'eau sans subir de pertes.
- Laisser l'échantillon sécher à l'air libre pendant 2 heures, en veillant à ne pas le dessécher.
- Peser la masse de l'échantillon lorsqu'il est légèrement imbibé (lorsqu'il est légèrement humide)

$$Ab = (Ma - Ms / Ms) \times 100$$

Ms = masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105 C°

Ma = masse de l'échantillon imbibé.



Figure III.11 : Moule tronconique.



Figure III.12 : Essai Capacité d'absorption.

Les résultats des essais de la Capacité d'absorption sont présentés dans le tableau suivant:

**Tableau III.8 :** Coefficients Capacité d'absorption

	<b>Sable de dune TIBESBEST</b>	<b>Sable de dune NEZLA</b>	<b>Sable de dune ELMALGARIN</b>	<b>Sable se dune TMACINTE</b>
<b>Coefficient de la Capacité d'absorption</b>	1.86	3.13	2.88	4.97

**RECAPITULATIF :**

Après avoir déterminé toutes les caractéristiques physiques de ses sables de dune, nous présentons les résultats dans le tableau suivant :

**Tableau III .20 :** Caractéristique physique des différents sables

<b>Propriétés physiques</b>	<b>Sable de dune TEBESBSET</b>	<b>Sable de dune TMASSINTE</b>	<b>Sable de dune NEZLA</b>	<b>Sable de dune ELMGARIN</b>
<b>Masse volumique apparente (Mvap)</b>	1509.02	1279.87	1388.05	1538.46
<b>Masse volumique absolue (Mvab)</b>	2 .56	2 .5	2.5	2 .5
<b>Equivalent de sable visuel (ESV)</b>	48.87	43.48	72.73	61.25
<b>Equivalent de sable au piston (ESP)</b>	42.28	37.72	54.27	41.20
<b>Module de finesse (Mf)</b>	1.55	1.19	1.49	1.37
<b>Capacité d'absorption</b>	1.86	3.13	2.88	4.97

Nous présentons les résultats des essais des caractéristiques physiques des sables de dune de la région d'IN AMENAS, de HASSIMESAOUUD et d'INACO réalisés au laboratoires du groupe "GEICA" Ghardaïa dans le tableau suivant:

Tableau III .21 : Caractéristiques physiques

ESSAIS	SABLE			
		ECH N°1 IN AMENAS	ECH N°2 HASSI MESAOUUD	ECH N°3 INACO
Analyse granulométrique	8	100	100	100
	6.3	100	100	95
	5	100	100	94
	2.5	98	97	92
	1.25	90	89	88
	0.63	57	62	60
	0.315	17	34	15
	0.160	07	15	02
	0.08	04	6	00
Module de finesse	MF	2.31	2.11	2.43
Masses volumique	Absolue	2.56	2.60	
	Apparent	1.54	1.58	
Equivalent De Sable	/	67.59	64.75	29.68

- Les coefficients ES sont entre 65 et 75 pour le sable In Aminas et Hassi Messoud correspond a un Sable légèrement argileux de propreté admissible pour béton de qualité courante et on ne craint pas particulièrement le retrait.
- La valeur 29,68 inferieur a 60 % pour INACO correspond a un Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
- Le module de finesse est de l'ordre entre 2,21et 2,43 caractérisant un sable préférentiel

### III.4. Propriétés chimique

Les essais chimiques sur les quatre sables ont été effectués au laboratoire **LCTP (Laboratoire Central des Travaux Public) Hussein Dey**.

Pour déterminer ces propriétés, nous avons suivi les normes des essais présentés ci-dessous :

#### III.4.1. Détermination des insolubles et des sulfates

##### III.4.1.1 Détermination des insolubles (Norme NFP 15-461) [61]

Le principe de l'essai est de faire bouillir l'échantillon avec l'acide chlorhydrique et filtrer le mélange pour déterminer les corps qui ne sont pas solubles dans l'acide chlorhydrique.

##### Mode opératoire

- a. Prendre 200g de sable l'étuver à température de 80°C pendant 48 heures.
- b. Puis le placer dans dessiccateur le quartagé et pulvériser dans un mortier.
- c. En suite le tamisé dans tamis de 0,200 mm.
- d. Mesuré 1g d'échantillon ( $P_0$ ) le mettre dans une fiole Erlenmeyer à 250 ml et ajouter 100ml d'acide chlorhydrique HCl à 10%.
- e. Faire bouillir doucement jusqu'à l'obtention d'une couleur jaune claire.
- f. Laisser refroidir le mélange à la température ambiante et le filtrer dans un papier filtre.
- g. Laver le bûcher avec de l'eau distillée afin de récupérer les résidus et réserve le filtrat qui servira à l'essai de détermination de sulfate.
- h. Mettre le papier filtre contenant les insolubles dans un creuset déjà peser vide **m<sub>0</sub>** dans un four à 900°C.
- i. Peser le creuset après calcination **m<sub>1</sub>**.



l'étuver à température de 80°



Préparation des échantillons dans l'acide chlorhydrique

**Figure III .13** : préparation des échantillons.

$$\mathbf{nsolub} = \frac{m_0 - m_1}{M_e} \times 100$$

#### **III.4.1.2. Détermination des Sulfates (NBS 1377/1975)**

On peut trouver les sulfates dans les sols sous formes de sodium ( $\text{Na}_2 \text{SO}_4$ ), magnésium ( $\text{Mg SO}_4$ ) ou bien de sulfate de calcium ( $\text{Ca SO}_4$ ). La détermination de cette dernière est très importante puisque il peut attaquer le béton et provoquer une chute de résistance des matériaux.

##### **Mode opératoire :**

- a. Prend le filtrat obtenu par l'essai des insolubles.
- b. Ajuster jusqu'à 250 ml avec l'eau distillée puis agiter le filtrat.
- c. Prendre 100ml de filtrat dans une fiole Erlenmeyeret ajouté 10ml de  $\text{BaCl}_2$  diluée à 5% (détecteur).
- d. Faire chauffer doucement pendant 4 à 5 minutes puis refroidir à température ambiante pendant 15 minutes.
- e. Filtration de la solution avec un papier filtre N° 541 puis peser un creuset vide P1 et mettre le papier à l'intérieur.
- f. Calcination des creusets et le papier filtre à 900°C pendant 15 minutes puis prendre la mesure du creuset après calcination P2.



**Figure III.14** : Essai de filtrations

### III.4.2. Détermination du taux de carbonate d'un sable (Norme NFP15-461) [62]

On détermine le taux de carbonates d'un sable pour déterminer le taux de calcaire. Une teneur en carbonate élevée signifie une faible teneur en minéraux argileux et généralement indique une résistance au cisaillement relativement élevée.

#### **Mode opératoire;**

- a. Prendre 0.5g d'échantillon déjà tamisé et étuvé 24h à T° 110 à 115 °C.
- b. Mettre dans une fiole Erlenmeyerde 250 ml.
- c. Ajouter 10ml Hcl à 10%. Faire chauffer le mélange pour activer la réaction puis on ajoute 2 à 3 gouttes de phénol phtaléine 0,1% (détecteur).
- d. Titrer avec de l'hydroxyde de sodium NaOH et la verser en petite goutte sur le mélange jusqu'à l'apparition de la couleur Rose.

### III.4.3. Détermination des chlorures (Méthode de Morh (BS) révisée par M.J Bowly

C'est un dosage par précipitation : il consiste à faire réagir les ions chlorure Cl<sup>-</sup> avec les ions argent Ag<sup>+</sup> en présence d'ions chromate CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Dans la méthode de Morh, une solution de nitrate d'argent de concentration connue est ajoutée, à la burette, à un volume connu de la solution contenant des ions Cl<sup>-</sup> dont la concentration est inconnue. L'ajout à cette solution de quelques gouttes de chromate de sodium permet de repérer, par formation d'un précipité rouge brique à la fin de la réaction entre les ions Ag<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup>.

**Mode opératoire :**

- a. Prendre environ 1 kg de sable et mettre l'étuve à  $105\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 110^{\circ}\text{C}$  et le faire passer au tamis  $200\text{ }\mu\text{m}$ .
- b. Placer 50 g de sable sec dans une fiole de 500 ml et ajouté 100 ml d'eau distillée agiter pendant 24 heures. En suite le filtrer à l'aide d'un papier filtre, puis prendre 25 ml de filtrats.
- c. Mesurer le PH par un appareil incorporé dans le filtrat, il faut que le PH soit compris :  $6,5 < \text{PH} < 7,5$ 
  - Si le  $\text{PH} > 7,5$ , c'est-à-dire solution basique. On ajoute acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$  jusqu'au titrage
  - Si le  $\text{PH} < 6,5$  c'est à dire solution acide on ajoute  $\text{CaCO}_3$  jusqu'au titrage.
- d. Ajouter deux à trois goutte dichromate de potassium  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  à 10%.
- e. Remplir la burette avec de la solution de nitrate d'argent  $\text{AgNO}_3$ .
- f. Introduire également le barreau aimanté puis placer l'erenmeyer sur l'agitateur magnétique, et mettre le tout sous la burette.
- g. Titrer goutte à goutte par le nitrate d'argent  $\text{AgNO}_3$  jusqu'à l'obtention d'une couleur rouge brique.

**Figure III.:** Agitateur magnétique

Les résultats des essais chimiques sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau III .22** : Les résultats propriétés chimique

Désignations	Composition chimique (%)			
	Sable de dune <b>TEBESBSET</b>	Sable de dune <b>TMASSINTE</b>	Sable de dune <b>NEZLA</b>	Sable de dune <b>ELMGARIN</b>
<b>Insolubles (INS)</b>	77.80	78.67	78.88	78.50
<b>Sulfates(<math>CaSO_4 \cdot 2H_2O</math>)</b>	3.18	3.20	3.22	3.10
<b>Carbonatation (<math>CO_2</math>)</b>	4.31	3.45	4.31	3.45
<b>Chlorures (NaCl)</b>	0.64	0.53	0.64	0.58

Les résultats de l'analyse chimique montre que :

- Les quatre sables de dune est de nature siliceux non soluble dans ce qui explique le taux élevé des insolubles dans la composition chimique, On a remarqué aussi que les sables de dune contient presque la même quantité d'insoluble
- Pour les sulfates les quatre sables contient une petit quantité de sulfate

### III.5 Conclusion

En conclusion, les résultats des tests effectués sur les échantillons de sable de dune ont permis de caractériser leurs propriétés physiques et chimiques :

- L'analyse granulométrique a permis de classer les échantillons de sable en différentes catégories. NEZLA, EL MALGHARINE et TMACINE ont été identifiés comme des sables très fins, tandis que TEBESBESTE est considéré comme un sable fin.
- Il a été observé que les sables TMACIN, TEBESBEST, EL MALGARIN, NEZLA et INACO présentent un risque de retrait ou de gonflement, les classant ainsi comme des sables argileux à rejeter pour des bétons de qualité. En revanche, les sables HASSI MESAUD et IN AMINAS sont considérés comme des sables légèrement argileux acceptables pour des bétons de qualité courante, avec un risque de retrait moins prononcé.
- De plus, il convient de noter que les quatre sables de dune étudiés (TMACIN, NEZLA, TEBESBEST et EL MALGARIN) sont principalement composés de silice et présentent une insolubilité élevée. Ils ont montré des caractéristiques chimiques similaires en termes de teneur en insolubles.

- En ce qui concerne les sulfates, tous les sables de dune présentent des quantités relativement faibles de sulfates.
- Enfin, l'analyse chimique du sable HASSI MESAOUUD a révélé qu'il n'est pas agressif, ce qui signifie qu'il ne présente pas de risque particulier pour les matériaux de construction. Ces résultats mettent en évidence les différences et similitudes entre les sables de dune étudiés, tant du point de vue physique que chimique. Il est essentiel de prendre en compte ces caractéristiques lors de la sélection et de l'utilisation des sables de dune dans les projets de construction, afin de garantir des performances et une durabilité optimales des matériaux.

## *Chapitre IV*

### *Etablissement d'une carte des sables étudiée sur SIG*

**IV.1. Introduction**

Dans ce chapitre nous allons présenter les systèmes d'information géographique (SIG) en commençant d'abord par la définition et l'historique ensuite nous passons à la nature et aux modes de représentation des données dans un SIG tout en présentant les avantages et les inconvénients de chaque mode. Nous présentons les composantes et les fonctions des SIG ainsi que les domaines de leur application. Par ailleurs nous parlons des logiciels SIG et nous donnons une brève description du logiciel QGIS que nous avons utilisé pour la réalisation de la cartographie dans notre étude. Enfin, nous abordons l'application des SIG pour notre cas d'étude, notamment, à travers leur utilisation pour la cartographie et la cartographie thématique des échantillons de sables étudiés.

**IV.2. Définition des Systèmes d'Information Géographique**

Il existe plusieurs définitions pour les systèmes d'information géographique parmi les quelles nous pouvons citer celle les définissant comme « un ensemble de principes, de méthodes, d'instruments et de données à référence spatiale, utilisé pour saisir, conserver, transformer, analyser, modéliser, simuler et cartographier les phénomènes et les processus distribués dans l'espace géographique. Les données sont analysées afin de produire l'information nécessaire pour aider les décideurs » [64]

Les SIG utilisent des bases de données géographiques pour intégrer, traiter et représenter des informations sous différentes formes, notamment sous forme de cartes. Les données géographiques comprennent des données spatiales organisées en couches et des données alphanumériques organisées en tableaux. Ces données doivent être de qualité [65].

**IV.3. Historique sur les SIG**

Dans les années soixante, la notion de SIG était encore peu connue, les techniques de dessin assisté par ordinateur (DAO) étaient déjà utilisées, apportant de nouvelles orientations dans le traitement des données. Le concept SIG a été proposé pour la première fois par le topographe canadien R.F. Tomlinson début des années soixante.

En 1964, Howard T. Fisher, formé au LCGSA (Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis – Harvard – USA) a théorisé un grand nombre de concepts sur la manipulation de données géolocalisées, concepts ensuite appliqués dans les années 1970. En France, dans les années 1975, la ville de Marseille a été la première collectivité à se doter d'un système d'information géographique, conçu par la société ICOREM

(informatique communale région méditerranée) filiale de la Caisse des Dépôts. Au début des années 1980, M&S Computing (qui deviendra plus tard Intergraph) avec Bentley Systems Incorporated pour la plateforme CAD, Environmental Systems Research Institute (ESRI), CARIS (Computer Aided Resource Information System), MapInfo Corporation et ERDAS (Earth Resource Data Analysis System), deviennent des logiciels commerciaux, intégrant un nombre important de fonctionnalités, combinant la première approche de la « séparation spatiale », avec la deuxième approche consistant à l'organisation d'attribut dans les structures de base de données. En 1986, le système MIDAS (Mapping Display and Analysis System), le premier logiciel S.I.G pour ordinateur personnel a été développé sous DOS. MIDAS a été rebaptisé MapInfo au début des années 1990 lors de son portage sous Windows. C'est à partir de ce moment-là que le S.I.G passe du monde de la recherche pour devenir une industrie à part entière.

À la fin du XXe siècle, la croissance exponentielle des différents systèmes d'information a permis au S.I.G de se démocratiser et de devenir accessible à tous les utilisateurs disposant d'un ordinateur et d'un accès à Internet. Plus récemment, l'avènement de solutions Open Source fonctionnant sous différents systèmes d'exploitation a permis de voir émerger un nombre croissant de solutions. [66]

#### **IV.4. La nature des données dans un SIG**

Dans un système d'information géographique, les données se présentent sous forme de deux natures différentes mais toutefois complémentaires. Il s'agit en l'occurrence des données de localisation et des données descriptives. [67]

Le concept des données de localisation est dérivé du modèle de représentation des objets dans les cartes traditionnels. Ces modèles utilisent des points, des lignes, des polygones et des volumes pour représenter la géométrie et les mesures de la nature.

Les données descriptive ou attributs qui sont des données décrivant des propriétés particulières des objets géographiques. Ce sont, donc, des données alphanumériques associées aux données de localisation. Par exemple le type de végétation, le numéro d'un parcellaire, l'adresse d'une rue etc. [67]

Dans les bases de données, les données géographiques sont généralement stockées et différenciées selon différentes échelles, dimensions, types et moments, sous forme de couches et de blocs (Jones 2013) [68]; Cette approche facilite la classification et le stockage des données [69]

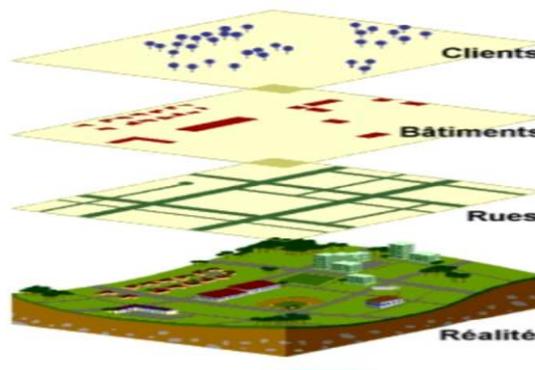
### IV.5. Les modes de représentation des données de localisation dans un SIG

Dans un Système d'Information Géographique les données de localisation sont représentées sous deux modes, soit sous forme de vecteurs (mode vecteur), soit sous forme d'image (mode raster).

#### IV.5.1. Le mode vecteur

Dans le mode vecteur, les objets sont repérés et représentés dans le plan par leurs coordonnées X et Y. [67], par exemple chaque point peut représenter un objet (un bâtiment, une borne etc.), les objets linéaires (routes, courbes de niveau, cours d'eau, ...) sont représentés par une succession de coordonnées (x, y).

Les objets surfaciques sont représentés par une succession de coordonnées (x, y) constituant des objets fermés et on parle de polygones tels que les parcelles, les forêts etc. la Figure IV.1 représente le model vecteur.



**Figure IV.1:** Le mode vecteur

#### Les avantages et les inconvénients du mode vecteur

- **Les avantages**
  - ✓ Données précises en matière de localisation.
  - ✓ Dans le mode vecteur, il est possible d'extraire, de mettre à jour et de généraliser les données.
  - ✓ Prends en considération la topologie, notion qui gère la disposition des objets les uns par rapport aux autres, telle que la proximité.
  - ✓ C'est un mode qui ne nécessite pas un grand volume de stockage.
- **Les inconvénients**

- ✓ La saisie des données vecteur est plus lente.
- ✓ Les données sont plus complexes, notamment dans leur traitement.
- ✓ Les données vecteur sont des données très coûteuses

#### IV.5.2. Le mode raster

Le modèle raster est plus adapté pour représenter des variables continues. De plus, la représentation sous forme de grille correspond bien à l'organisation informatique des données. Ce mode est également adapté pour l'utilisation de méthodes de traitements numériques de l'information pour la description de certains éléments géographiques naturels.

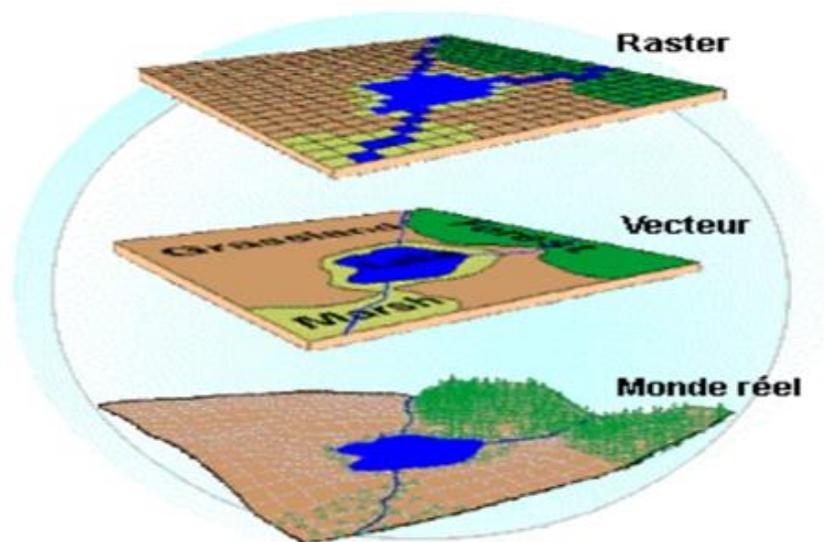


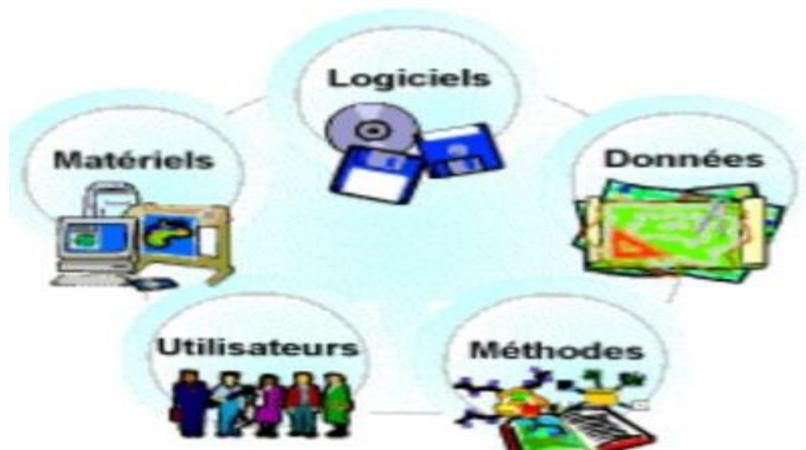
Figure IV.2: le mode raster

#### Les avantages et inconvénients de mode raster

- **Les avantages**
  - ✓ Simplicité d'analyse spatiale.
  - ✓ Technologie abordable.
  - ✓ Structure simple permettant la superposition des données
- **Les inconvénients**
  - ✓ Problématique dans la transformation de coordonnées.
  - ✓ Nécessite un grand volume de stockage
  - ✓ La sélection des cellules entraîne une perte d'information

#### IV.6. Les composantes d'un SIG

- **Matériel** : Actuellement, les systèmes d'information géographique (SIG) sont compatibles avec divers types d'ordinateurs, allant des serveurs de données aux ordinateurs de bureau connectés à des réseaux locaux (fermés ou à accès limité) ou globaux (Internet), ainsi qu'avec des configurations autonomes.
  - **Logiciels** : Les logiciels SIG fournissent les fonctionnalités nécessaires pour stocker, analyser et visualiser toutes les informations associées.
  - **Données** : Les données représentent sans aucun doute les éléments essentiels des SIG. Les données géographiques ainsi que les données tabulaires qui y sont associées peuvent être générées en interne ou obtenues auprès de fournisseurs de données, qu'il s'agisse de bases de données partagées ou non, ou de simples fichiers texte.
  - **Utilisateurs** : Étant essentiellement un outil, l'utilisation d'un SIG (et donc, ses utilisateurs) est ce qui permet d'exploiter ses fonctionnalités. Les SIG sont destinés à une vaste communauté d'utilisateurs, allant de ceux qui créent et maintiennent les systèmes à ceux qui intègrent la dimension géographique dans leur travail quotidien.
- Avec l'émergence des SIG en ligne et des logiciels SIG libres (open source), la communauté des utilisateurs de SIG connaît une croissance significative chaque jour.
- **Méthodes** : L'implémentation et l'utilisation d'un SIG nécessitent le respect de règles et de procédures spécifiques à chaque organisation, discipline scientifique et projet SIG [70].



**Figure IV.3** : les composants d'un SIG

**IV.7. Les fonctions d'un SIG**

Dans un système d'information géographique, il existe différentes fonctionnalités parmi lesquelles nous pouvons citer

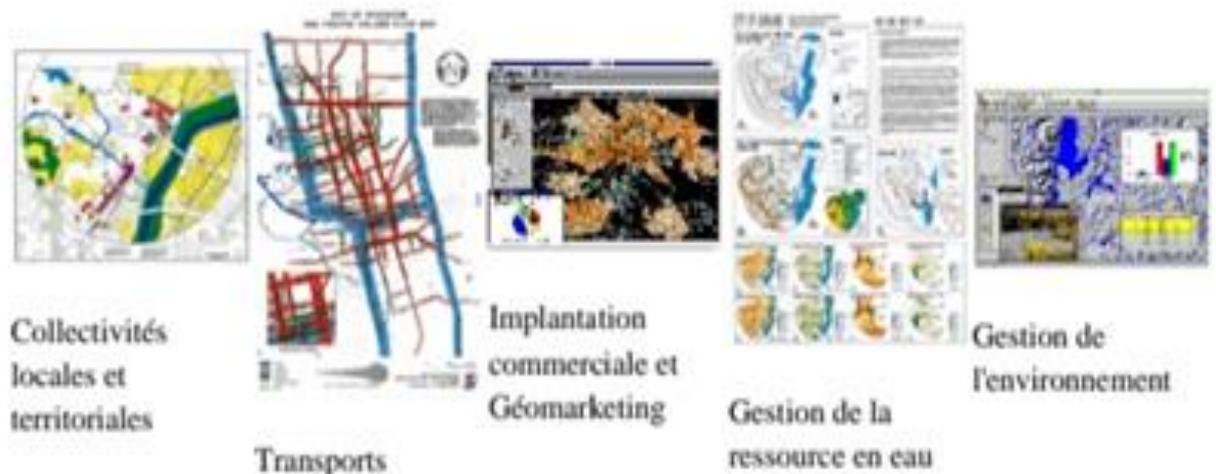
- la gestion de leur affichage, l'utilisation d'outils de navigation pour explorer les objets graphiques et la visualisation de leurs attributs.
- Créer et calculer de nouveaux attributs.
- Utiliser des symboles pour représenter les différentes couches graphiques, créer des étiquettes ou effectuer des analyses thématiques.
- Les analyses thématiques
- Les outils de géo traitements (zones tampons, croisement de couches) [71].

**IV.8. Domaines d'application**

Les domaines d'application des SIG sont aussi nombreux nous avons cité :

- Tourisme (gestion des infrastructures, itinéraires touristiques) : Les services SIG sont utilisés pour planifier des itinéraires touristiques, cartographier les attractions, les hébergements, les transports et faciliter la navigation pour les touristes.
- Géomarketing : Les SIG sont utilisés pour mener des études de marché géographiques, identifier les zones de chalandise, analyser les tendances de consommation et prendre des décisions stratégiques en matière de localisation d'activités commerciales.
- Milieu scolaire (parcours des autobus scolaires)
- Inventaire et gestion des ressources (équipements urbains)
- Planification urbaine (cadastre, POS, voirie, réseaux assainissement) Les SIG sont utilisés pour l'analyse géographique dans la planification urbaine, l'aménagement du territoire, la gestion des infrastructures, l'évaluation des impacts environnementaux et la modélisation de scénarios d'aménagement.
- Gestations des installations (AM/FM, Automatic Mapping and Facilities Management)
- Protection civile (gestion et prévention des catastrophes)
- Politique (cartes électorales)
- Transport (planification des transports urbains, optimisation d'itinéraires)
- Hydrologie (gestion des AEP, réserves hydroélectriques)
- Réseaux de distribution (gaz, électricité, marchandises)
- Foresterie (gestion des coupes et sylviculture)
- Géologie (prospection minière)

- Biologie (études du déplacement des populations animales)
- Défense (planification des opérations militaires)
- Agriculture et gestion durable des ressources : Les SIG sont utilisés dans l'agriculture pour la gestion des terres, la planification des cultures, l'optimisation de l'irrigation, la gestion des pesticides et l'analyse des rendements. Ils sont également utilisés pour la gestion des ressources des ressources que l'eau, les forêts et les sols [72].



**Figure IV.4 :** Domain d'application d'un SIG

#### IV.9. Les logiciels SIG

Parmi les logiciels SIG existants nous avons les logiciels propriétaires et les logiciels libres. On peut citer pour les premiers

- **MapInfo** : est un logiciel disponible en version d'essai créé dans les années 1980 aux États-Unis.
- **Arc GIS** : est un outil SIG puissant qui permet de créer des cartes, d'effectuer des analyses spatiales et de partager des visualisations intelligentes.

Pour les logiciels SIG libres, on peut citer le logiciel QGIS qui est parmi les logiciels les plus utilisés en tant que logiciel libre. Il fournit des fonctionnalités similaires à celles trouvées dans les logiciels SIG payants comme Arc GIS et MapInfo [73].

#### IV.10. Présentation du logiciel QGIS

QGIS est un logiciel SIG libre et open source qui a débuté en mai 2002 et s'est établi en tant que projet sur SourceForge en juin 2002 [74]

L'objectif de ses développeurs est de mettre à disposition du grand public un logiciel SIG non onéreux et utilisable sous différentes plates-formes [ 75]. QGIS est publié sous licence GPL (General Public License). C'est un projet officiel de la fondation Open Source Geospatial (OSGeo)[76].

De par sa gratuité, sa convivialité et ses fonctionnalités QGIS est actuellement utilisé dans beaucoup de pays à travers le monde. En effet ses atouts sont nombreux, grâce à son interface,

il offre la possibilité de travailler dans un environnement simple et facile, la réalisation de cartes thématiques est agréablement accessible.[77] Ce sont ces caractéristiques qui nous ont poussé à utiliser ce logiciel dans notre travail.

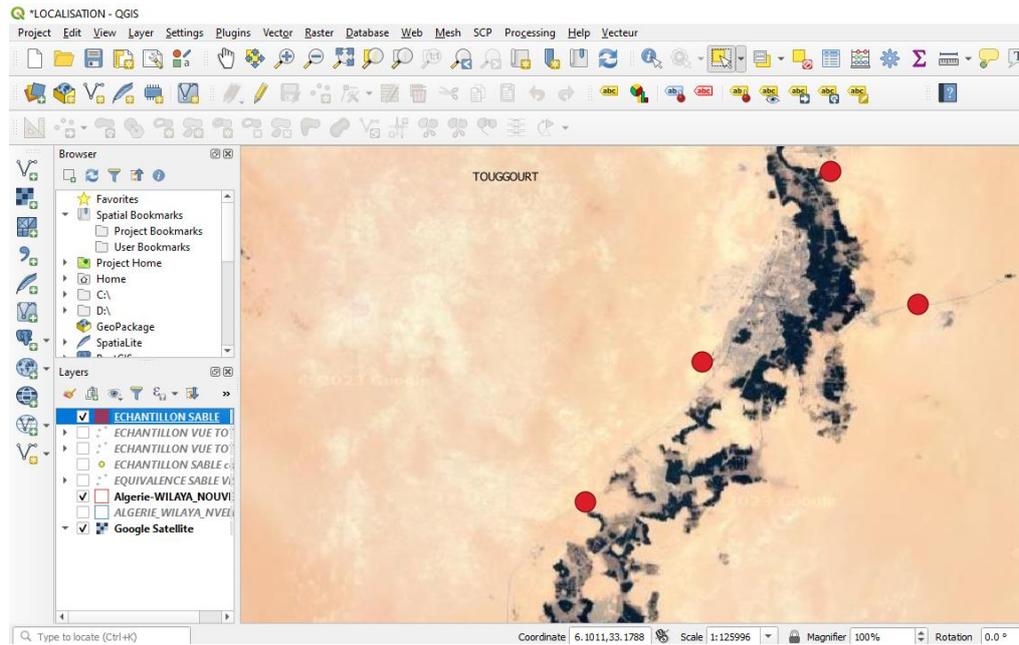
#### **IV.11. Utilisation des SIG pour la cartographie des sables étudiés**

Dans ce travail nous allons utiliser le logiciel SIG QGIS d'une part pour l'introduction et la structuration des données relatives aux échantillons de sables étudiés. Il s'agit en l'occurrence de l'exploitation des données issues des traitements réalisés sur ces échantillons pour la détermination des caractéristiques physico-chimiques de ces derniers. D'autre part et à partir de certains indicateurs physiques de ces sables, nous avons pu réaliser des cartes thématiques afin de localiser les sables qui pourront être éventuellement utilisés dans le domaine de la construction en Algérie.

##### **IV.11.1. Saisie et structuration des données dans QGIS**

Les données descriptives des échantillons étudiés ont, tout d'abord, été saisies dans un fichier Excel. Elles ont ensuite été importées dans QGIS afin de les structurer selon les normes spécifiques à la saisie de ce type de données dans les SIG.

Sur l'ensemble de ces données, nous avons commencé par l'exploitation des données relatives aux coordonnées géographiques afin de matérialiser ces échantillons sur un fond de carte. Ainsi des entités de types points ont été créées.



**Figure IV.5 :** Matérialisation des coordonnées géographiques des échantillons de sable sur un fond image

#### IV.11.2. Utilisation de QGIS pour afficher les attributs des échantillons étudiés

La fonctionnalité de consultation des données est l'une des fonctionnalités des systèmes d'information géographique permettant d'afficher les attributs des entités ou des objets localisés dans un territoire donné. Dans le logiciel SIG QGIS, nous pouvons afficher toutes les caractéristiques saisies des échantillons étudiés ainsi et par exemple pour l'échantillon situé dans la commune d'El Malgarin (figure IV.6) une fiche apparaît dès qu'on clique sur la commande information. Cette fiche contient toutes les données descriptives de l'échantillon en question.

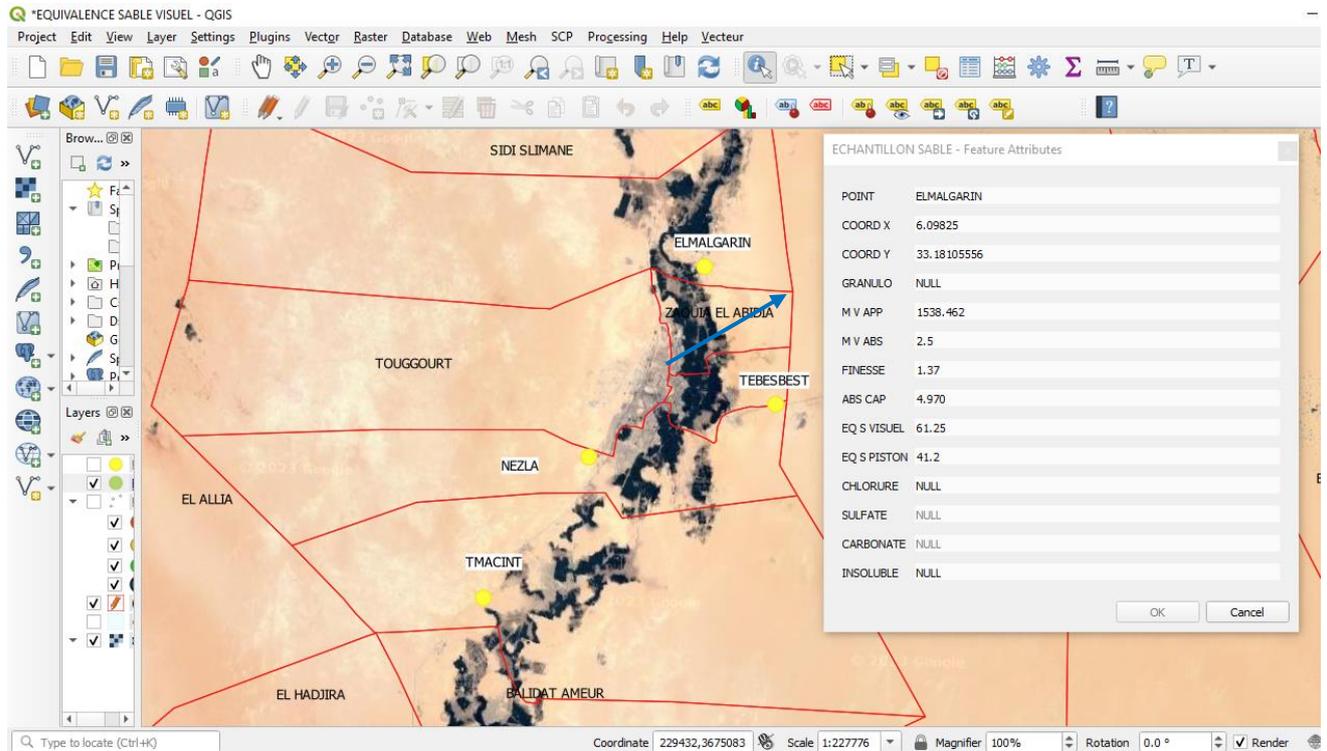
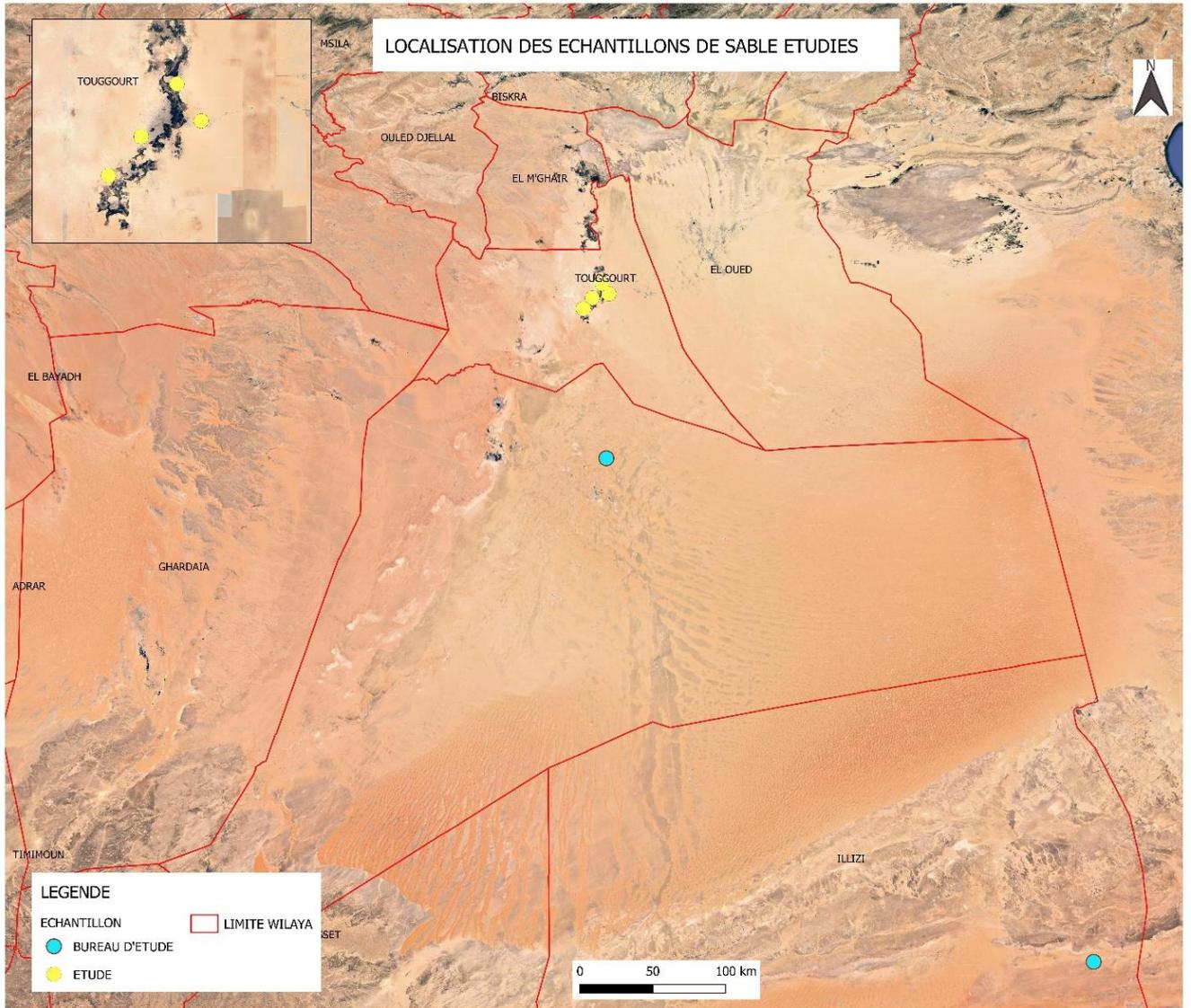


Figure IV.6 : Affichage des attributs d'un échantillon de sable

### IV.11.3. Carte de localisation des échantillons de sable étudiés

La carte IV.1 montre la localisation des échantillons étudiés. Les points matérialisés en jaune représentent les échantillons que nous avons prélevés dans quatre (4) communes de la wilaya de Touggourt à savoir les communes d'El Margarine, Tabesbest, Nezla et Tamacint. Les autres points représentés en bleu représentent les échantillons que nous avons récupéré des bureaux d'études cités précédemment. Ces points sont situés respectivement du Nord au Sud dans la wilaya de Ouargla et la wilaya d'Illizi comme indiquer sur la carte IV.1 ci-dessous.



Carte IV.1 : Localisation des échantillons de sables étudiés

#### IV.11.4. Cartographie de l'équivalence de sable

Pour l'élaboration des cartes de l'équivalence de sable au visuel et au piston, nous avons utilisé, dans QGIS, la fonction permettant la réalisation de l'analyse thématique.

Afin de déterminer les différentes classes de l'équivalence de sable conformément aux normes de classification de cet indicateur, nous avons utilisé la méthode de graduation comme indiqué dans la figure IV.7 ci-dessous, ce qui nous a permis de faire la classification en choisissant la méthode et le nombre de classe pour cette thématique.

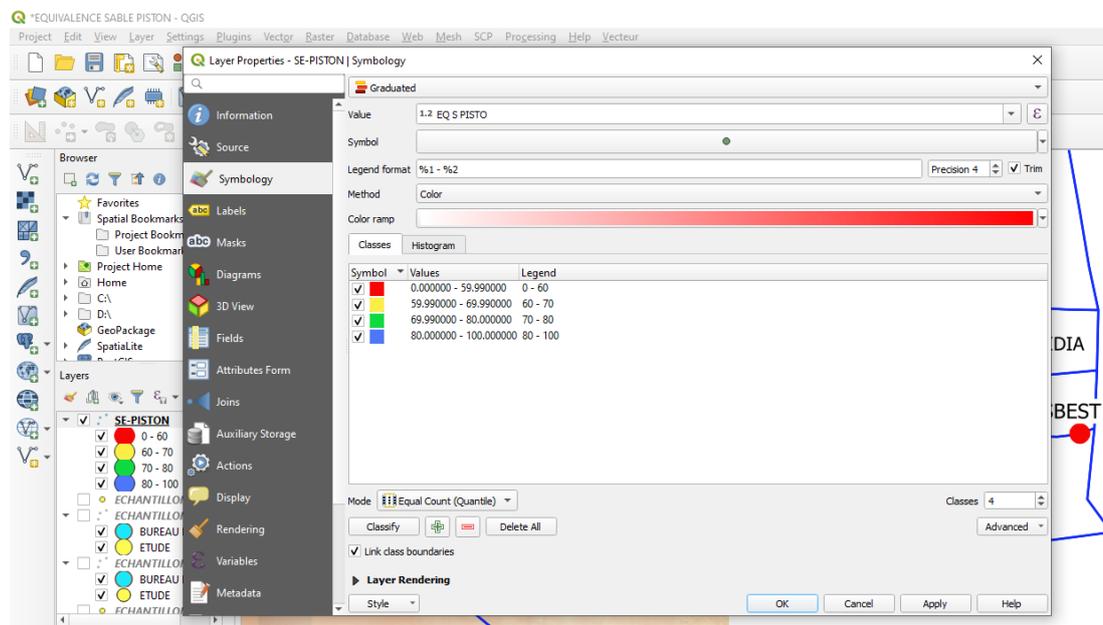


Figure IV.7 : Réalisation des cartes thématiques dans QGIS

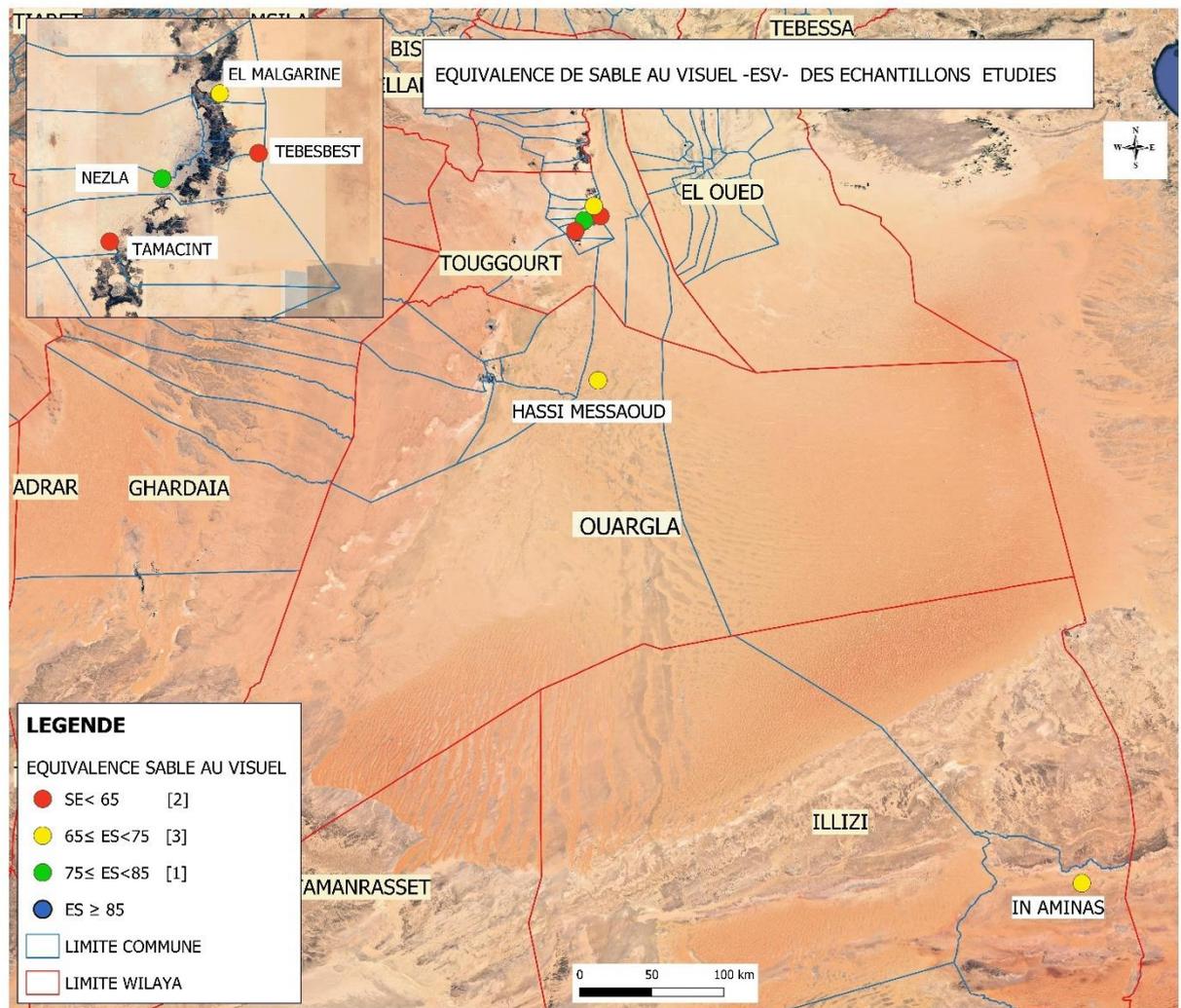
- **Cartographie de l'équivalence au visuel**

La carte thématique de l'indicateur de l'équivalence de sable au visuel met en exergue les différentes classes de cet indicateur. La classification révèle quatre (3) différentes classes représentées dans des couleurs différentes sur la carte. Nous avons deux (2) échantillons soit 33,33% du total des échantillons étudiés classés, selon les normes de classification utilisées, dans la classe de l'équivalence de sable au visuel inférieur à 65. Ces derniers sont représentés en rouge sur la carte. Ce sable est un sable argileux qui présente un risque de retrait ou de gonflement ce qui le rend rejetable pour des bétons de qualité.

Le deuxième sable est classé dans l'intervalle  $65 \leq ES \text{ visuel} < 75$ , dans ce cas nous avons trois (3) échantillons soit 50% du total. Ils sont représentés en jaune sur la carte, ils sont

localisés respectivement, du Nord au Sud, dans la commune d'El Margarine, Hassi Messaoud et In Aminas. Ces sables sont dans la classe des sables légèrement argileux dont la propreté est admissible pour béton de qualité courante et pour laquelle on ne craint pas particulièrement le retrait.

Le reste des échantillons se trouve dans la classe dont la SE au visuel est comprise entre  $65 \leq ES < 75$ . Il y a un seul échantillon dans cette classe (soit 16,76%) du total des échantillon étudiés, il est situé dans la commune de Nezla et matérialisé en couleur verte sur la carte. Ce sable est considéré comme étant un sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.

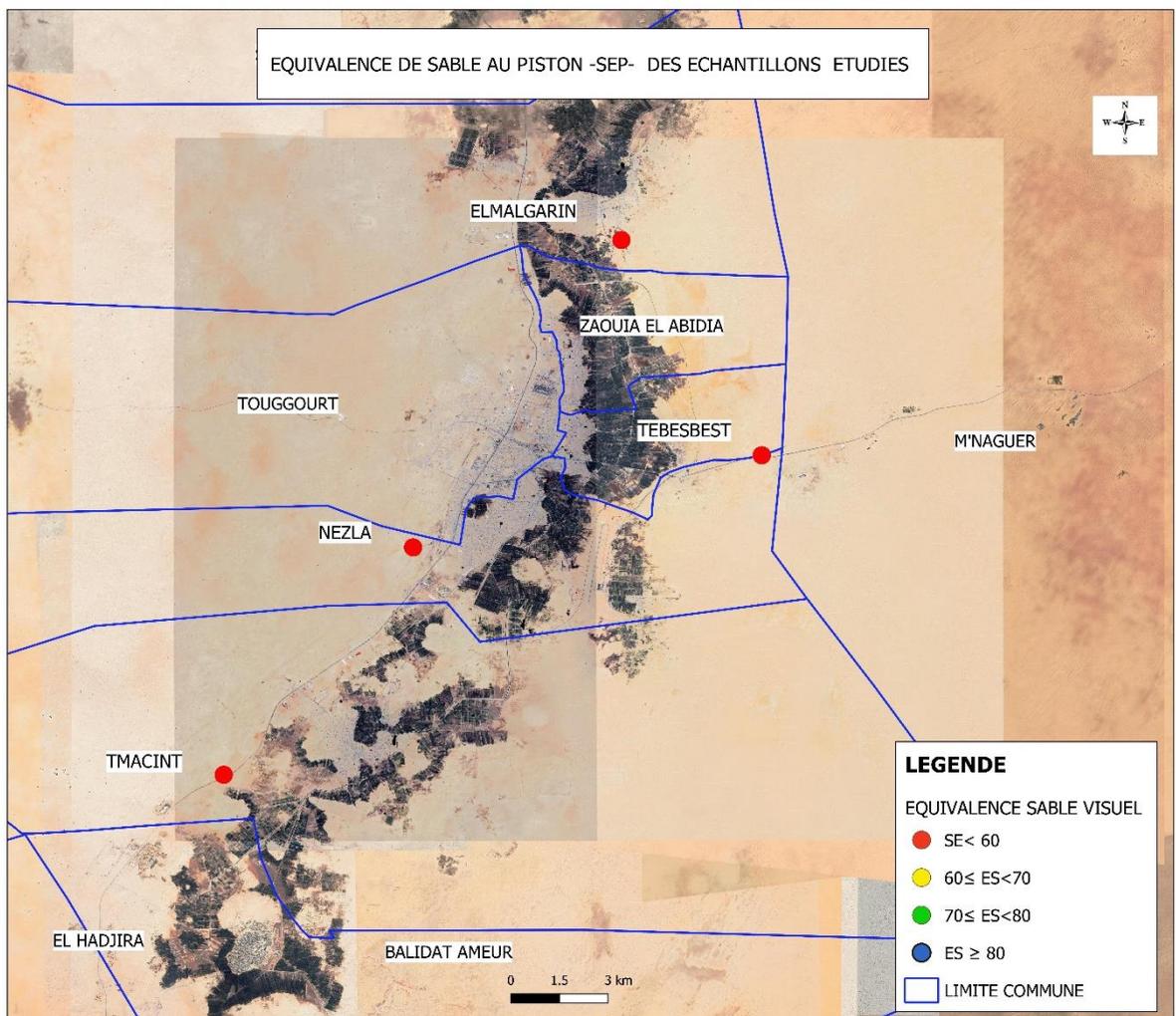


Carte IV.2 : Analyse thématique de l'indicateur équivalence de sable au visuel

- **Cartographie de l'équivalence de sable au piston**

Dans cette thématique nous avons utilisés les résultats de traitement de l'indicateur équivalence de sable au piston (ESP) pour les échantillons que nous avons prélevé au niveau de quatre (4) communes de la wilaya de Touggourt seulement car les autres échantillons ne disposent pas de cette donnée.

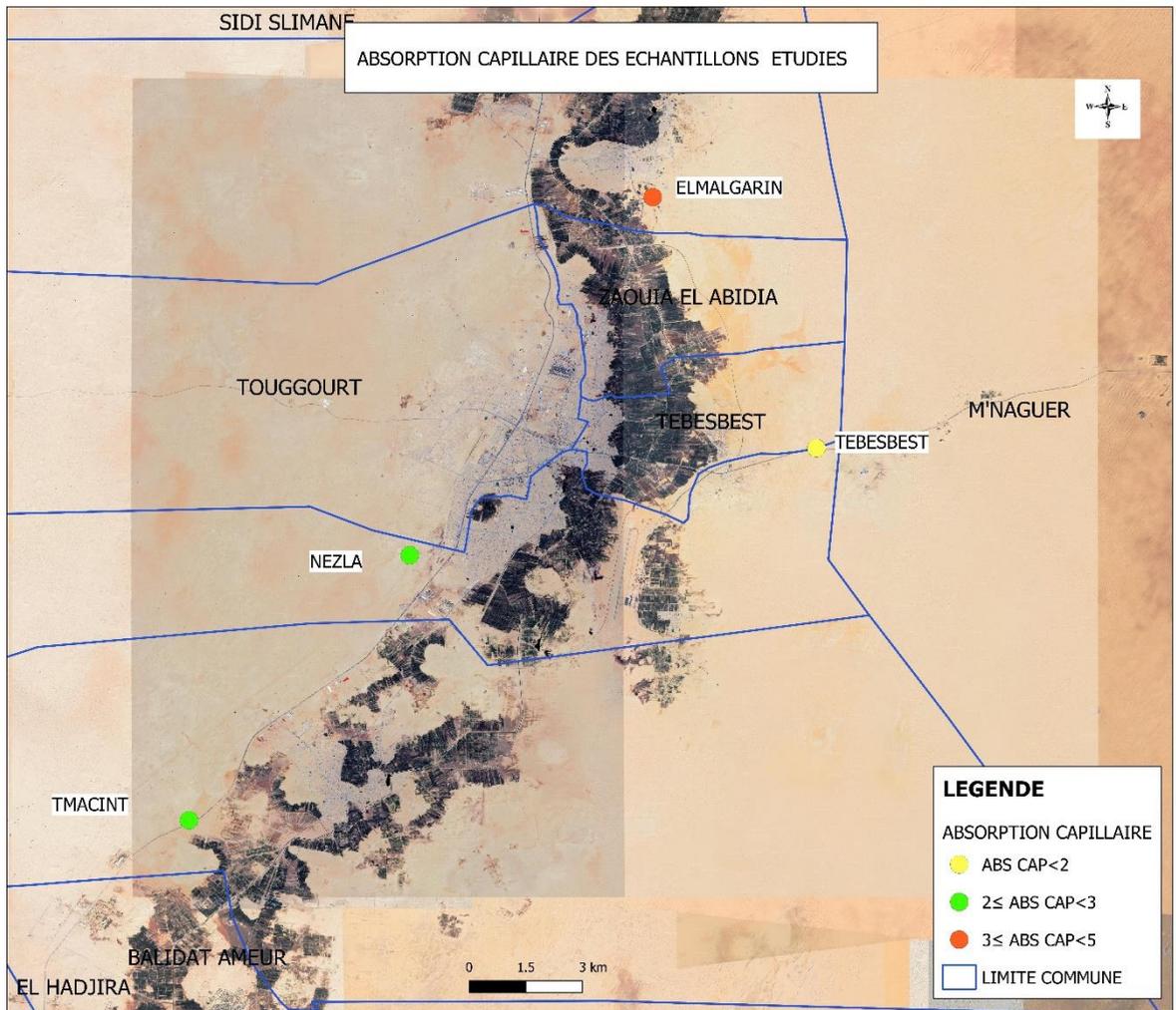
L'analyse thématique de cet indicateur montre que tous les échantillons de sables étudiés sont classés dans la même catégorie, ils ont tous une ESP inférieure à 60 et ils sont représentés avec la même symbologie sur la carte IV. 3. Ces sables sont donc tous des sables argileux avec un risque de retrait ou de gonflement par conséquent ils sont à rejeter pour des bétons de qualité.



**Carte IV.3 :** Analyse thématique de l'indicateur équivalence de sable au visuel

**IV.11.5. Cartographie de l'indicateur absorption capillaire**

Pour de l'indicateur de l'absorption capillaire et par manque de données sur l'ensemble des échantillons étudiés, l'analyse thématique est réalisée seulement sur les échantillons de sable prélevés au niveau des communes de Touggourt. C'est en fonction des résultats de traitement obtenus que nous avons effectué notre classification. A ce stade, il en ressort trois classes bien distinctes. La première classe fait ressortir les sables à faible absorption capillaire, la seconde à moyenne absorption capillaire et la dernière concerne ceux ayant une absorption capillaire élevée.



**Carte IV.4 :** Analyse thématique de l'indicateur absorption capillaire

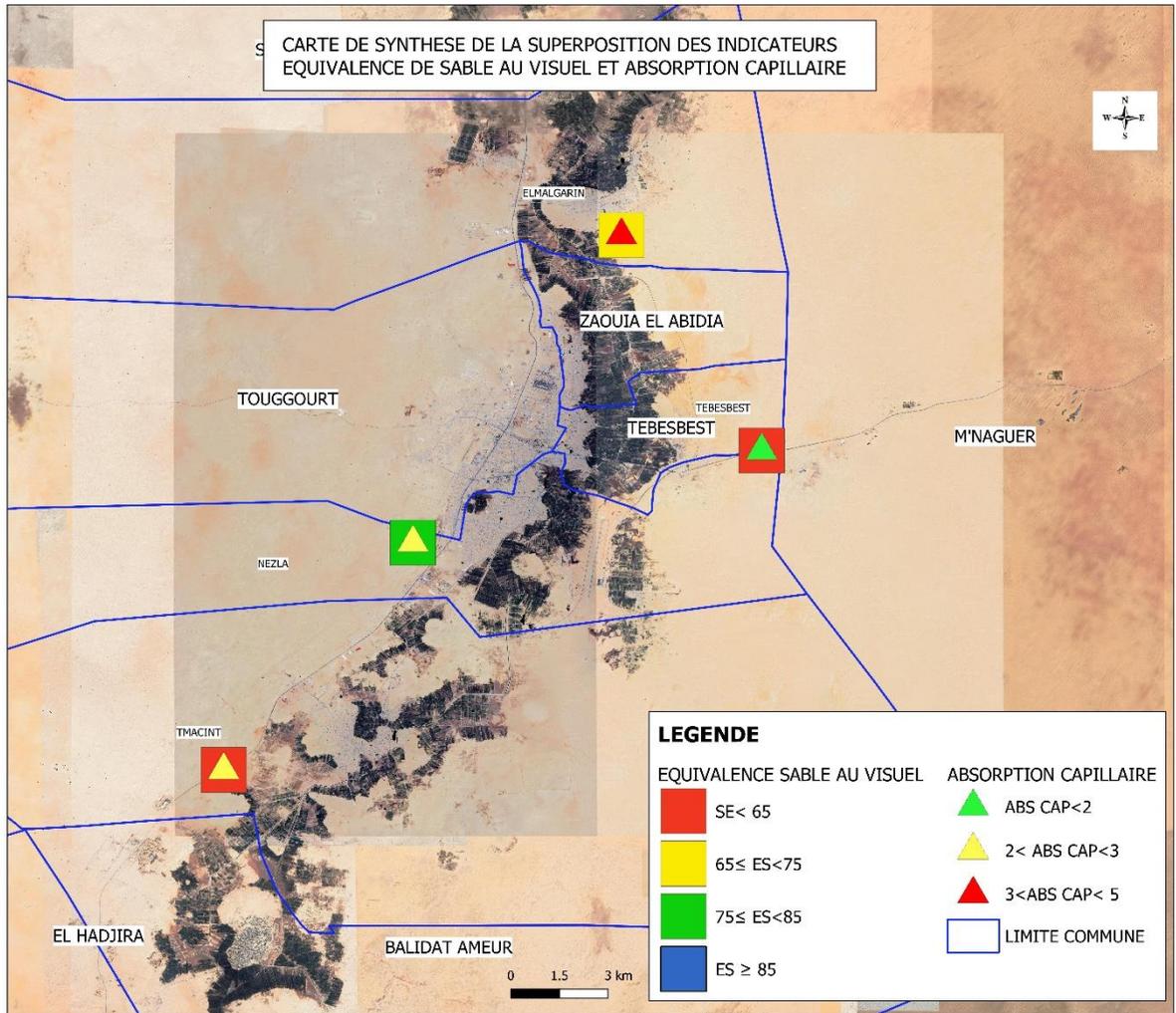
La carte de l'analyse thématique obtenue (Carte IV. 3) fait ressortir les sables en fonction de ces classes en les localisant sur le terrain. Ainsi les sables représentés en jaune sont ceux à faible absorption capillaire et nous avons un seul sable pour cette classe, il est situé à la

limite Sud de la commune de Tebesbest. Les sables avec le symbole vert sont ceux dont l'absorption capillaire est moyenne, nous avons pour cette classe deux sables, l'un dans la commune de Nezla et l'autre dans la commune de Tmacint. Enfin le dernier sable est classé dans la catégorie à absorption capillaire élevée et il est localisé dans la commune d'EL malgarine.

#### **IV.11.6. Carte de synthèse des indicateurs équivalence de sable au visuel et absorption capillaire**

A partir des données des indicateurs équivalence de sable au visuel et l'absorption capillaire, nous avons réalisé une analyse thématique de synthèse afin de localiser le ou les meilleurs sables parmi les échantillons étudiés qui pourront éventuellement être exploités dans le domaine de la construction. Sur la carte de l'analyse thématique de synthèse (Carte IV. 5), l'équivalence de sable au visuel est représentée avec un symbole « carré » et l'absorption capillaire est représentée avec le symbole « triangle ». La cartemontre ce qui suit :

- Pour l'échantillon de sable prélevé à El Malgarine, la ESV montre que le sable est dans la classe des sables légèrement argileux dont la propreté est admissible pour un béton de qualité courante et pour laquelle on ne craint pas particulièrement le retrait avec un indice d'absorption capillaire élevé.
- Pour l'échantillon de la commune de Tebesbest, la ESV le sable est argileux et présente un risque de retrait ou de gonflement ce qui le rend rejetable pour des bétons de qualité en plus il est caractérisé par une absorption capillaire faible.
- L'ESV de l'échantillon prélevé au niveau de la commune de Tamacint révèle un sable argileux avec un risque de retrait ou de gonflement donc rejetable pour des bétons de qualité mais avec une absorption capillaire moyenne.
- L'échantillon de la commune de Nezla est un sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité avec une absorption capillaire moyenne.



**Carte IV.5 :** Synthèse des analyses thématiques des indicateurs équivalence de sable au visuel et absorption capillaire

## VI.12. Conclusion

D'après cette analyse thématique de synthèse, il ressort que le meilleur des sables étudiés en fonction des indicateurs utilisés est celui localisé dans la commune de Nezla.

## *Conclusions générales et Perspectives*

Dans le cadre de notre projet, nous avons étudiés les caractéristiques physico- chimique de quatre échantillons de sable de dune de la région de TOUGGOURT. Le choix de ce thème est guidé par le fait que ce matériau est en abondance dans notre pays et aussi à proximité des agglomération sahariennes.

- ✓ L'étude bibliographique présentée, a permis de donner les définitions des sables des dunes, les différents types de dunes existants, les mécanismes de leur formation ainsi que leurs domaines d'utilisation.
- ✓ Après avoir déterminé des propriétés physiques et chimiques des sables de dunes utilisées conformément aux normes établies dans le domaine de la construction. Nous avons pu classé les quatre échantillons de sables TMACIN, TEBESBEST, EL MALGARIN et NEZLA, ainsi que les trois échantillons IN AMINASS, HASSI MESOUD et INACO, du point de vu :
  - Module de finesse
  - Equivalence de sable
  - Les insolubles
  - Les sulfates
- ✓ Les résultats obtenus de notre étude ont été présentés sur Système d'Information Géographique, en réalisant plusieurs cartes pour la cartographie et la cartographie thématique des échantillons de sables étudiés.

Nous avons rencontré beaucoup de problèmes en réalisant ce travail, entre autres

- ✓ Le transport des échantillons de sables, qui nous ont été confisqué, alors nous avons été obligés de changer la zone d'étude et donc refaire le travail à zéro.
- ✓ Le manque de données sur les échantillons de sable IN AMINASS, HASSI MESOUD et INACO, ne nous a pas permis de les cartographier mais ca nous a permis de remplir notre base de données.

Nous ne pouvons terminer ce travail sans espérer voir à l'avenir une continuité dans cet axe de recherche. Pour cela et en perspectives, nous proposons aux futurs travaux de prendre en considération les points suivants :

- Etudier un grand nombre de chantiers de sable afin d'obtenir des résultats satisfaisants.
- Faire des essais sur une composition de béton de sables afin de déterminer les propriétés mécaniques des bétons de sables des dunes ainsi que de faire des calculs de structures réalisées par des bétons de sables étudiés.
- Utiliser d'autres techniques de l'outil SIG comme la télédétection, pour réaliser des cartes plus performantes et interactives afin de pouvoir donner aux autorités des régions du sud de prendre les décisions adéquates quant à l'utilisation des sables de dunes.

## *Références*

- [1] **C. K. Wentworth**, « A scale of grade and class terms for clastic sediments », *J. Geol.*, vol. 30, n° 5, p. 377-392, 1922.
- [2] **J.-J. Chauvin**, *Les sables: guide pratique d'utilisation routière*. ISTE, 1987.
- [3] **D. Padmalal, K. Maya, D. Padmalal, et K. Maya**, « Sources of Sand and Conservation », *Sand Min. Environ. Impacts Sel. Case Stud.*, p. 155-160, 2014.
- [4] « How Is A Beach Formed? - WorldAtlas ». <https://www.worldatlas.com/articles/how-is-a-beach-formed.html> (consulté le 1 juillet 2023).
- [5] « Sahara | Encyclopedia.com ». <https://www.encyclopedia.com/places/africa/african-physical-geography/sahara> (consulté le 1 juillet 2023).
- [6] **J. Fournier, C. Bonnot-Courtois, R. Paris, O. Voldoire, et M. Le Vot**, « Analyses granulométriques, principes et méthodes », *CNRS Dinard*, vol. 99, 2012.
- [7] **M. Cherbi**, *Algérie*. De Boeck Supérieur, 2017.
- [8] **S. Ramadan, M. A. Hamdan, A. M. Abu Khadra, et M. Abdel Wahed**, « The provenance and history of Abu Muharak barchan sands (Kharga Depression) inferred from textural, mineralogical, and geochemical perspectives », *Arab. J. Geosci.*, vol. 15, n° 19, p. 1582, oct. 2022, doi: 10.1007/s12517-022-10848-2.
- [9] **P. Hesp**, « Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics », *Geomorphology*, vol. 48, n° 1-3, p. 245-268, 2002.
- [10] **B. ouakhir A. Hakim**, « Utilisation Du Sable De Dunes En Technique Routière Etude Bibliographique », Master's Thesis, Université Mohamed Khider - Biskra, 2015.
- [11] « Dune du Pilat », *Dune du Pilat | Pyla sur Mer*. <http://www.dunedupilat.com/en/the-dune/dune-du-pilat/> (consulté le 2 juillet 2023).
- [12] **J. Welsch**, *La dune Littorale artificielle de la côte de Gascogne*. 1928.
- [13] **P. Barrère**, « Dynamics and management of the coastal dunes of the Landes, Gascony, France », *Coast. Dunes Balkema Rotterdam Brookfield*, p. 25-33, 1992.
- [14] **J. Favennec**, « Gestion conservatoire des dunes littorales non boisées », *Biodiversité Prot. Dunaire Off. Natl. For. Ed Tec Doc*, 1997.
- [15] **M. Bédérina, M. M. Khenfer, R. M. Dheilily, et M. Quéneudec**, « Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes », *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, n° 6, p. 1172-1179, 2005.

- [16] **A. Hocine**, « Étude des bétons à base des sables de dune », *Univ. MOHAMED KHEIDER BISKRA*.
- [17] **A. Guettala, B. Mezghiche, et R. Chebili**, « Strength comparisons between rolled sand concrete and dune sand concrete », in *Concrete Durability and Repair Technology: Proceedings of the International Conference Held at the University of Dundee, Scotland, UK on, 1999*, p. 55.
- [18]. Corrections Granulométriques Des Latérites Par Des Graveleux Latéritiques Et Du Sable Grossier En Vue D'optimiser La Durabilité Des Routes En Terre Dans Les Agglomérations Des Environs Proches De La Ville D'Antananarivo Madagascar Rakotomalala
- [19]. **Amey K, Bedja K, Neglo K**. Distribution longitudinale de la granulométrie du sable littoral togolais : Grain moyen, sorting index et skewness. [Internet]. 2008 [cité 12 mai 2023].
- [20]. **Hachani D, Gayon H**. Révision de la norme NF EN ISO/CEI 17025. Qual Sécurité Au Lab [Internet]. 2018
- [21]. Kouto YA. CARACTÉRISATION GRANULAIRE ET PHYSICO- MÉCANIQUE DE SABLE SILTEUX ET GRAVIERS ROULES DU TOGO. In 2016
- [22] **Zoshchuk NI, Vladim irov, Kuznetsov V**. INFLUENCE DE LA FORME DES GRAINS DE SABLES SUR LES PROPRIETES DES BETONS. In 1984
- [23]. Zubkov V, Kovalevskij ED, Anisimov VM. METHODE DE VIBROCOMPACTAGE PROFOND DE FONDATIONS EN SABLE. In 1983
- [24]. Fineness Modulus of Sand | PDF | Young's Modulus | Ph [Internet]. [cité 12 mai 2023]. Disponible sur: <https://www.scribd.com/document/482448671/Fineness-Modulus-of-Sand>
- [25]. **Pagna Kagonbe B, Tsozué D, II Y, Nzeukou A, Madi A, Basga S**, et al. Physical Characterization and Optimization of Fineness Moduli of Natural Sand from The North Region of Cameroon Used in Construction. *J Sustain Constr Mater Technol*. 20 avr 2020;5:407-19.
- [26]. Fineness Modulus of Sand | PDF | Sand | Construction Aggregate [Internet]. [cité 12 mai 2023]. Disponible sur: <https://www.scribd.com/document/227254492/Fineness-Modulus-of-Sand>
- [27]. **Grosbellet C**. Evolution et effets sur la structuration du sol de la matière organique apportée en grande quantité. In 2008 [cité 13 mai 2023].

- [28]. **Yoro G, Godo G.** Les méthodes de mesure de la densité apparente : analyse de la dispersion des résultats dans un horizon donné.
- [29]. Détermination de La Masse Volumique Absolue D | PDF | Densité | Science [Internet]. Scribd. [cité 13 mai 2023]. Disponible sur: <https://fr.scribd.com/document/202640846/Determination-de-la-masse-volumique-absolue-d>
- [30]. **Belouadah Messaouda** Masse Volumique Université de Msila TPN°1 [Internet]. [cité 13 mai 2023]. Disponible sur: [https://elearning.univ-msila.dz/moodle/pluginfile.php/81226/mod\\_resource/content/1/TPN%C2%B01-1.pdf](https://elearning.univ-msila.dz/moodle/pluginfile.php/81226/mod_resource/content/1/TPN%C2%B01-1.pdf)
- [31]. Masse volumique absolue du sable [Internet]. [cité 13 mai 2023]. Disponible sur: [https://masse.galerie-creation.com/\\_s/masse-volumique-absolue-sable/1206228/](https://masse.galerie-creation.com/_s/masse-volumique-absolue-sable/1206228/)
- [32]. **Belouadah messaouda.** Équivalent de sable [Internet]. Université de MSILA; Disponible sur: <https://elearning.univ-msila.dz/>
- [33]. **Hveem F.** SAND EQUIVALENT TEST FOR CONTROL OF MATERIALS DURING CONSTRUCTION. In 1953 [cité 14 mai 2023]. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/SAND-EQUIVALENT-TEST-FOR-CONTROL-OF-MATERIALS-Hveem/70314db7d1c123a0d35b4e5344271fc7330eb716>
- [34]. Équivalent de sable - Mode opératoire [Internet]. [cité 14 mai 2023]. Disponible sur: <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Equivalent-de-sable-page-2.html>
- [35]. « Équivalent de sable » : historique des versions — Wikipédia [Internet]. [cité 14 mai 2023]. Disponible sur: [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89quivalent\\_de\\_sable&action=history](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89quivalent_de_sable&action=history)
- [36]. **Rossi G.** STATISTICAL CONSIDERATIONS ON THE SAND EQUIVALENT TEST. In 1983 [cité 14 mai 2023]. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/STATISTICAL-CONSIDERATIONS-ON-THE-SAND-EQUIVALENT-Rossi/2bcb77b50008b888a1f8529d32d697f80619809a>
- [37]. Teneur en eau (milieux poreux). In: Wikipédia [Internet]. 2022 [cité 14 mai 2023]. Disponible sur: [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Teneur\\_en\\_eau\\_\(milieux\\_poreux\)&oldid=198187321](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Teneur_en_eau_(milieux_poreux)&oldid=198187321)
- [38]. **Fauchard C, Guilbert V, Sagnard F, Froumentin M.** Mesures de teneurs en eau volumique et massique sur du sable.

- [39]. Determining the Essential Qualities of Sand: 6 Tests | Moulding | Metallurgy [Internet]. [cité 14 mai 2023]. Disponible sur: <https://www.engineeringenotes.com/metallurgy/casting/determining-the-essential-qualities-of-sand-6-tests-moulding-metallurgy/20905#>
- [40]. La teneur en eau [Internet]. tp.demain. [cité 14 mai 2023]. Disponible sur: <https://tpdemain.com/module/la-teneur-en-eau/>
- [41]. P18-555 [Internet]. Afnor EDITIONS. [cité 22 juin 2023]. Disponible sur: <https://www.boutique.afnor.org/en-gb/standard/p18555/aggregates-measurement-of-densities-absorption-coefficient-and-water-content/fa021241/56192>
- [42]. Mesure Du Coefficient D'absorption Des Sables | PDF [Internet]. Scribd. [cité 22 juin 2023]. Disponible sur: <https://fr.scribd.com/doc/202638586/Mesure-Du-Coefficient-d-Absorption-Des-Sables>
- [43]. **Olonade KA, Ajibola IK, Okeke CL.** Performance evaluation of concrete made with sands from selected locations in Osun State, Nigeria. *Case Stud Constr Mater.* 1 juin 2018;8:160-71.
- [44]. Effect of the Quality of Sand on Cement [Internet]. Sigmatest. [cité 22 juin 2023]. Disponible sur: <https://www.sigmatest.org/blog/geometrical-requirements-of-aggregate/>
- [45]. Investigating sand quality effect on concrete strength: a case of Debre Markos and its vicinities: *International Journal of Construction Management: Vol 22, No 12* [Internet]. [cité 22 juin 2023]. Disponible sur: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15623599.2020.1774838>
- [46]
- [47]. 1p-289-kahloun-a.pdf [Internet]. [cité 14 juin 2023]. Disponible sur: <https://asmatec.asso-web.com/uploaded/1p-289-kahloun-a.pdf>
- [48]. EN 14629:2007 - Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test [Internet]. [cité 14 juin 2023]. Disponible sur: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/dd606840-1f97-4e0b-87ce-2438812d3e6b/en-14629-2007>
- [49]. **Smain B, Kamali-Bernard S, Said K, Belkacem M.** Etude de la résistance, la porosité, et migration des ions chlorures des BAP à base de sable de concassage. *MATEC Web Conf.* 2018;

- [50]. USGS Open-File Report 2005-1001: Laboratory Procedures [Internet]. [cité 16 juin 2023]. Disponible sur: [https://woodshole.er.usgs.gov/openfile/of2005-1001/htmldocs/insoluble\\_residues.htm](https://woodshole.er.usgs.gov/openfile/of2005-1001/htmldocs/insoluble_residues.htm)
- [51]. A comparative study of methods for determining carbonate content in marine and terrestrial sediments. *Mar Pet Geol.* 1 juin 2020;116:104337.
- [52]. **Lamas F, Irigaray C, Oteo C, Chacón J.** Selection of the most appropriate method to determine the carbonate content for engineering purposes with particular regard to marls. *Eng Geol.* 1 sept 2005;81(1):32-41.
- [53]. Carbonate sand fill - The properties of carbonate sand are different than more commonly used quartz sand and its behaviour must be considered when using it for fill. [Internet]. IADC Dredging. [cité 16 juin 2023]. Disponible sur: <https://www.iadc-dredging.com/subject/dredging-terminology/carbonate-sand-fill/>
- [54]. Colas J. Etude de la valorisation des déblais de chantiers de tunnels riches en sulfates en granulats à béton. 2012;
- [55]. Introduction à l'analyse gravimétrique : gravimétrie par volatilisation (leçon) | Khan Academy [Internet]. [cité 14 juin 2023]. Disponible sur: <https://fr.khanacademy.org/science/chemistry/chemical-reactions-stoichiome/limiting-reagent-stoichiometry/a/gravimetric-analysis>
- [56]. Touzé P, Druon M. Dosage des sulfates par spectrométrie d'émission atomique à source plasma (ICP) dans les matériaux du génie civil.
- [57] la norme NF 18-560 :
- [58] DUPAIN. R, LANCHON. R, J. C. SAINT ARROMAN "granulats, sols, ciments et bétons – caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire", Edition casteilla – 25, ruerouge-75005 Paris 1995.
- [59] **DREUX. G et FESTA. J,** : «Nouveau guide du béton et ses constituants» P 409 édition Eyrolles 1998.
- [60] **F. GORISSE,**: « Essais et contrôle des bétons » P200 édition Eyrolles1978.
- [61] NF P 18 – 598 « Granulats : Equivalent de sable » AFNOR – Paris – 1997
- [62] Organigramme de détermination de la teneur en sulfates BS 1377. Formulaire obtenu au laboratoire LTPS OURGLAT
- [63] **Hesp P. Foredunes and blowouts** : « initiation deomorphology and dynamics». *Geomorphology* 2002 ; 48 : 245-68.

[64] **Prélaz-Droux R.** « (1995) - Système d'information et gestion du territoire, Approche systémique et procédure de réalisation, collection Meta, presses polytechniques et universitaires Romandes. 156p. »

[65] **F CHABAN**, «Apport potentiel des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) pour une meilleure gestion d'un littoral dans une optique de développement durable » Thèse De Doctorat De Ecole Doctorale des Sciences pour l'Ingénieur EDSPI, France, 2011.

[66][https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me\\_d%27information\\_g%C3%A9ographiq%20ue](https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_d%27information_g%C3%A9ographiq%20ue)

[67]**Chergui Benarieb S.** «2020- les systèmes d'information géographique, cours 1ère année Master génie civil, université Saad Dahlab Blida Alger.30p»

[68] **Jones, C.**, 2013. «Geographical information systems and computer cartography (second edition). New York»: Routledge. [Google Scholar]

[69], Reflections and speculations on the progress in Geographic Information Systems (GIS): a geographic perspective»

[70] **H DARWICHE**, « Contribution des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) à la gestion et à l'aide à la décision: Approche pluridisciplinaire pour l'évaluation des aspects à risques Site d'application: dans le nord de la France »Thèse De Doctorat De Ecole Doctorale des Sciences pour l'Ingénieur EDSPI, France, 2011.

[71] Support-GIS-basic-to-read.pdf

[72] **F.Z HALFAYA**, « Evaluation des courbes de vulnérabilité sismique d'un réseau de conduites enterrées », Thèse De Doctorat De L'école Normale Supérieure De Cachan, Paris, France, 2013.

[73] qgis-fr.pdf

[74] <http://www.qgis.org/fr/docs/>

[75] **Chergui Benarieb S, Farhi A** , «Utilisation des logiciels SIG libres dans les communes en Algérie cas des communes de la wilaya de Biskra. » Conference: 4ème colloque de l'AFGP Ville durable: milieu physique et gouvernance territoriale Tanger les 3, 4 et 5 Octobre 2017: Tanger, Maroc

[76]<http://qgis.org/fr/site/about/index.html>

