



Université Abderrahmane Mira de Bejaia
Faculté de Technologie
Département des Mines et géologie

Memoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master
Filière : Génie Minier

Option : Valorisation des Ressources Minérales

Présenté par

Mr. BENBOUZID ABDELMADJID

Mr. BOUZEKRI NASSIM

Thème

*Investigation et domaines d'usage des sables de
carrières, d'oueds, des dunes et de plages.*

Soutenu devant le jury composé de :

Président	Mr Djazeiri. O	MAA	U.A.M.Bejaia
Promoteur	Mr Ayaden. B	MAA	U.A.M.Bejaia
Examinatrice	Mme Bouzidi. N	MCA	U.A.M.Bejaia

Promotion : 2019-2020

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier :

- ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire et malgré les obstacles et les difficultés qu'on a pu rencontrer à cause de la pandémie et toutes les personnes qui m'ont aidé lors la rédaction de ce mémoire.
- Nous voudrions dans un premier temps remercier , notre promotrice madame **BOUZID.N** pour sa patience , sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils qui ont contribué à alimenter notre réflexion.
- Nous tenons aussi à remercier profondément les enseignant du département de mines et géologie, qui nous ont donné de leurs savoir et nous ont soutenu tout au long de notre parcours universitaire.
- Merci aux membres de jury d'avoir accepter de juger notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mes parents,

*Ma mère ma raison d'être celle qui éclaire mon chemin et
l'illumine d'amour et d'affection qui ma soutenu et encouragé
durant ces années d'études.*

*Mon père en signe d'amour et de gratitude pour tout le soutien
et sacrifice qu'il a fait à mon égard.*

Que dieu vous garde et vous apporte santé et bonheur.

*A mes chers sœurs Dyhia, Célia et mon frère Massenssen je le
souhaite un avenir éclairons pleins de bonheur.*

A mon petit neveu Samir dieu le protège.

A ma meilleure amie Nadjet et mon ami Islam.

A toute ma famille, oncle tante mes cousines et cousins.

A tout mes amis (es) et tous ceux que j'aime.

Abdelmadjid

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A ma très chère **mère** qui me soutient dans le bonheur comme dans la douleur,
qui n'a jamais cessé de prier pour moi, qui me comprend mieux que quiconque,
et je l'aime de toute ma force de ma conscience.*

*A mon très cher **père** que j'aime plus que tout et qui m'a toujours encouragée et
qui croit en moi, merci*

*Tous les deux ont éclairé mon chemin en me tenant la main tout au long de mes
années d'étude « Que Dieu me les garde ».*

*A mes très chers amis, c'est comme des frères a moi sauf que nous n'avons
seulement pas allaité , **Hichem(24) et Musta.***

*A mes très chers frères et Sœurs du sang, je tiens a vous un amour a jamais.
Son oublié mes chers veuves **anfal, mehdi et anayis.***

A tous ceux qui m'aiment

Nassim bzk.

Liste des figures

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Figure. I.1: les différents types des granulats

Figure I.2 : Opération de concassage (carrière)

Figure I.3 : Localisation de la roche exploitable

Figure I.4 : Convoyeurs à bandes

Figure I.5 : Engins roulants

Figure I.6 : la dune de Sahara algérienne.

Figure I.7 : Sable de dune

Figure I.8 : La formation dunaire.

Figure I.9 : Les formes de dunes.

Figure I.10 : coupe transversale des différents milieux de la dune.

Figure I.11 : Dune verte.

Figure I.12 : la dune blanche ou jaune

Figure I.13 : La dune grise

Figure I.14 : La dune noire.

Figure I.15 : La dune brune.

Figure I.16 : Dune baltique.

Figure I.17 : mouvement des dunes

Figure I.18 : La barkhane (Sud-Marocain).

Figure I.19 : La morphologie de la barkhane.

Figure I.20 : Zonation bathymétrique du littoral et de la plate-forme continentale

Figure I.21 : Gain et perte de sédiments par une plage

Figure I.22 : Schéma illustrant la forme d'une plage ouverte.

Figure I.23 : Une dragueuse de sable.

Figure I.24 : Extraction du sable des plages.

Figure I.25 : Les sables d'oueds.

Figure I.26 : Granulats alluvionnaires.

Figure I.27 : Différents types de morphologie des oueds selon écoulements à plusieurs chenaux par Schumm (1985)

Figure I.28 : Le transport sédimentaire en rivière - La déstabilisation des particules et les différents modes de transfert

Figure. I.29 : Différentes manifestations du tri granulométrique dans le milieu naturel.

Figure I.30 : Gisement au-dessus de la nappe phréatique.

Figure I.31 : Gisement sous la nappe phréatique.

Figure I.32 : Les différents types de transport.

Chapitre II : Etude comparative des différents sables

Figure II.1 : Homogénéisation du sable

Figure II.2 : l'aplatissement du sable

Figure II.3 : Opération du quartage

Figure II.4 : Tamiseuse électrique

Figure II.5 : Courbes granulométriques de sable de plage(Oran)

Figure II.6 : étapes d'essai de la masse volumique apparente

Figure II.7 : Méthode de mesure de la masse volumique apparente

Figure II.8 : Méthode de mesure de la masse volumique absolu

Figure II.9 : montre les différentes étapes expérimentales pour la détermination du poids volumique sec.

Figure II.10 : l'essai d'Equivalent de sable

Figure II.11 : Les étapes d'essai de l'absorption

Figure II.12 : Transformation de la courbe granulométriques de plage (Oran) à la droite fractale de sable

Figure II.13 : Agitateur contenant la solution de bleu de méthylène (GLOBAL CONCEPT /Laboratoire & Engineering à El Bouni/Annaba).

Figure II.14 : Test de la tache positif indiquant la présence de minéraux argileux

Figure II.15 : Calcimètre de Bernard du Département de Géologie de la Faculté des Sciences de la Terre /Université Badji-Mokhtar/Annaba.

Figure II.16 : Exemple de montage des échantillons de sable sur film adhésif (Échantillons du sable mixte de la plage Ain Achire).

Figure II.17 : Exemple d'une lame mince d'un échantillon de sable (Plage-Militaire).

Figure II.18 : Exemple de composition minéralogique du sable sombre de la plage d'Ain Achire.

Figure II.19 : Courbes granulométriques du sable concassé(Koussane).

Figure II.20 : Courbe fractal de sable de la dune de bakhala.

Figure II.21: Courbe granulométrique des différents sables avec le fuseau granulaire.

Chapitre III : domaines d'usage industriel de chaque type de sables

Figure III.1. : Procédé de fabrication des céramiques et porcelaines.

Figure III.2 : le moulage en sable.

Liste des tableaux

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Tableau I.1 : Les caractéristiques dimensionnelles des granulats.

Tableau I.2 : Les principaux minéraux de roches meubles ou massives.

Chapitre II : Etude comparative des différents sables

Tableau II.1 : Analyse granulométrique du sable de plage (Oran)

Tableau II.2 : Interprétation des valeurs de la moyenne granulométrique

Tableau II.3 : Classes de granulométrie des sols

Tableau II.4 : Grosseur ou finesse en fonction du pourcentage de passant au tamis de 0,5

Tableau II.5 : Résultats de l'essai module de finesse.

Tableau II.6 : Masse volumique apparente de sable de plage.

Tableau II.7 : Le poids volumique des grains solides sable de plage.

Tableau II.8 : Classes de propreté d'après les valeurs de l'équivalent de sable

Tableau II.9 : Résultats d'équivalent du sable de plage.

Tableau II.10 : Le coefficient d'absorption du sable de plage

Tableau II.11 : Résultats de la teneur en eau de sable de plage.

Tableau II.12 : Analyses granulométriques et Analyse fractal de sable de plage.

Tableau II.13 : Analyse granulométrique du sable concassé (Koussane)

Tableau II.14 : Caractéristiques physiques du Sable concassée (Koussane).

Tableau II.15 : Les taux des minéraux, carrières ainbelbel.

Tableau II.16 : Les compositions chimiques des sables de carrière

Tableau II.17 : Coefficient Los-Angeles et Micro-Deval,(carrière Ain belbel).

Tableau II.18 : Coéf Los-Angeles et Micro-Deval (carrière Ain chebbi).

Tableau II.19 : Caractéristiques physiques des Sable de dune de la région d'Adrar .

Tableau II.20 : Propriétés physiques des sables du sud algérien.

Tableau II.21 : Caractéristiques chimique du Sable de dune.

Tableau II.22 : Analyses chimique de sable de dune d'AIN EL-BEIDA, 5 km d'Ouargla.

Tableau II.23 : Composition chimique et minéralogique du sable de dune de Tamantit et Hassilatou.

Tableau II.24 : Les résultats des propriétés physico-chimiques de sable de dune des différentes régions du sud algérien.

Tableau II.25 : analyse granulométriques des sables de dunes de déférente région.

Tableau II.26 : Analyses granulométriques et Analyse fractal de sable de la dune de bakhala.

Tableau II.27 : Caractéristiques physiques du différent sable utilisée.

Tableau II.28 : Analyse chimiques des sables utilisés.

Tableau II.29 : Analyse granulométrique des différents sables utilisée.

Chapitre III : domaines d'usage industriel de chaque type de sables

Tableau III.1 : Composition chimique de quelques verres.

Abréviations

d : dimension inférieure du granulat.

D : dimension supérieure du granulat.

HMM : hautes mers moyennes.

BMM : basses mers moyennes.

W : la teneur en eau.

R² : coefficient de corrélation.

ES : équivalent de sable.

SC : sable de carrière.

SO : sable d'oueds.

SD : sable des dunes.

ESV : équivalent de sable visuel.

ESP : équivalent de sable au piston.

EP : effectifs partiel.

EC : effectifs cumule.

CE : conductivité électrique.

CA : coefficient d'absorption.

MH : masse du sable humide.

MSEC : masse du sable après le séchage.

RI : résidu insoluble.

DF : droite fractale.

MF : module de finesse.

L.A : coefficient de Los-Angeles.

M.D : coefficient Micro-Duval.

Résumé

Dans le but d'une investigation sur les différents types des sables des carrières, dunaires, plages et oueds comme une matières premières importante au monde, particulièrement en Algérie et leur provenance selon les processus naturel, météoriques – l'eau, le vent, l'action des cycles de gel et dégel, des procédés ont été intégré dans le cadre d'exploitation de ces matériaux, extraction, chargement et transport, et traitement.

Cette étude est articulé principalement sur les diverses applications essentielles pour les sables dans le domaine d'industrie comme la verrerie, la fonderie (noyautage), la céramique (dégraissant), et pour d'autre usages industriels présenté dans la fonderie (moulage), la céramique (fondant). Les sables siliceux trouvent d'autres applications avec les abrasifs, la filtration, les produits réfractaires, les bétons cellulaires.

Des échantillons de sable ont été soumis à une caractérisation physico-chimique. Pour se faire, des techniques d'analyses ont été utilisées telles que la diffraction à rayons X (DRX), la minéralogie et enfin une analyse granulométrie par tamisage. D'après ces analyses, on s'aperçoit que la matière première de sable renferme principalement du quartz (SiO_2), contenant principalement des inclusions ferrifères, argileuses et organiques qui représentent des impuretés.

Mots clés : Sables, Analyses chimiques, Caractéristiques physiques, Industrie.

Abstract

In order to investigate the different types of sands of quarries, dunes, beaches and wadis as a raw material important of world, particularly in Algeria and their origin according to natural processes, meteoric - water, wind, the action of freezing and thawing cycles, processes have been integrated into the framework of exploitation of these materials, extraction, loading and transport, and treatment.

Sand samples were subjected to a physical-chemical characterization. To do this, analytical techniques were used such as X-ray diffraction (DRX), mineralogy and finally a granulometry analysis by sieving. Based on these analyses, sand material is found to contain mainly quartz (SiO_2), containing mainly iron, clay and organic inclusions that represent impurities.

This study focuses mainly on the various essential applications for sands in the industrial field such as glassware, foundry (core), ceramics (degreasing), and for other industrial uses presented in foundry (moulding), ceramics (melting). Silica sands find other applications with abrasives, filtration, refractory products, cellular concretes...

Keywords: sands, chemical analysis, physical characteristics, industry, glass.

ملخص

بهدف إجراء تحقيق حول أنواع مختلفة من الرمال من المحاجر و الكثبان و الشواطئ و الأودية كمادة خام مهجورة في الجزائر و أصلها حسب العمليات الطبيعية النيزكية -المياه و الرياح و عمل الدورات التجميد و الذوبان ، تم دمج العمليات في سياق استغلال هذه المواد و الاستخراج و التحميل و النقل و المعالجة.

تم إخضاع عينات الرمل للتوصيف الفيزيائي و الكيميائي . للقيام بذلك ، تم استخدام تقنيات تحليلية مثل حيود الأشعة السينية (XRD) ، و علم المعادن و أخيراً تحليل حجم الجسيمات عن طريق الغرلة . بناءً على هذه التحليلات ، يمكن ملاحظة أن المادة الرمل تحتوي بشكل أساسي على الكوارتز (SiO_2) ، و التي تحتوي بشكل أساسي على الحديد و الطين و الشوائب العضوية التي تمثل الشوائب .

تعتمد هذه الدراسة بشكل أساسي على التطبيقات الأساسية المختلفة للرمل في المجال الصناعي مثل الأواني الزجاجية ، و المسبك (التجويف) ، و السيراميك (مزيل الشحوم) ، و للاستخدامات الصناعية الأخرى المعروضة في المسبك (الصب) ، و السيراميك (أقراص سكرية) . (تجد الرمال السليسة تطبيقات أخرى مع المواد الكاشطة ، و الترشيح ، و المنتجات الحرارية ، و الخرسانة الخلوية ...

الكلمات المفتاحية: الرمال، التحليلات الكيميائية، الخصائص الفيزيائية ، الصناعة ، الزجاج.

SOMMAIRE

Remerciement.....	I
Dédicace	II
Abréviations	III
Résumé.....	IV
Lise des fuguer.....	V
Lise des tableaux.....	VI
INTRODUCTION GENERALE.....	VII
Chapitre I : Synthèses bibliographiques	
I. GENERALITES SUR LES SABLES.....	4
I.1 Introduction.....	4
I.2 Granulats.....	4
I.2.1 Caractéristiques et types de granulats.....	5
I.2.2 Différents types de granulats.....	6
I.3 Roches meubles et roches massives.....	8
I.4 Les sables.....	9
I.4.1 L'origine du sable.....	9
I.4.1.1 Les sables artificiels.....	9
I.4.1.2 Les sables naturels.....	10
I.4.2 Classification des sables.....	11
I.4.2.1 La granulométrie.....	11
I.4.2.2 La propreté.....	11
I.4.2.3 La nature minéralogique.....	11
I.5 Les différents types des sables.....	11
I.5.1 Le sable de carrière (concassage).....	11
I.5.1.1 Procédure de fabrication du sable.....	12
I.5.1.1.1 L'extraction.....	12
I.5.1.1.2 Le chargement et le transport.....	13
I.5.1.1.3 Le traitement.....	14
I.5.1.1.3.1 L'élimination des impuretés.....	14
I.5.1.1.3.2 Le concassage / broyage.....	14
I.5.1.1.3.3 Le criblage.....	14
I.5.1.1.3.4 Le lavage.....	14

I.5.1.1.3.5 Stockage et expédition.....	15
I.5.2 Les sables de dunes.....	15
I.5.2.1 Nature de sable dune.....	16
I.5.2.1.1 Mécanismes de formation.....	16
I.5.2.2 Type de dune.....	16
I.5.2.3 Les formes de sable de dune.....	17
I.5.2.4 Les différents milieux de la dune.....	18
I.5.2.5 La dune littorale.....	22
I.5.2.5.1 Le mouvement de dune littorale.....	22
I.5.2.5.2 La formation des dunes littorales.....	23
I.5.2.6 Physique des dunes.....	23
I.5.2.7 Propriétés des sables de dune.....	25
I.5.3 Le sable des plages.....	26
I.5.3.1 La formation de sables des plages.....	26
I.5.3.2 L'origine des matériaux et le budget sédimentaire des plages.....	27
I.5.3.3 Propriétés des plages.....	28
I.5.3.4 Les types des plages.....	29
I.5.3.5 Les caractéristiques morphologiques des plages.....	30
I.5.3.5.1 Le haut de plage.....	30
I.5.3.5.2 Le bas de plage.....	30
I.5.3.5.3 L'estran.....	30
I.5.3.5.4 L'avant plage.....	31
I.5.3.6 Techniques d'extraction.....	31
I.5.3.7 Traitement.....	32
I.5.3.7.1 Traitement Physico-chimique.....	33
I.5.3.7.2 Les traitements biologiques.....	33
I.5.3.7.3 Les techniques d'inertage.....	33
I.5.3.8 Conclusion sur le sable des plages.....	33
I.5.4 Les sables d'oueds (rivières).....	34
I.5.4.1 Différentes morphologies des oueds.....	34
I.5.4.2 Transport granulat en oued.....	35
I.5.4.3 Le tri granulométrique en oued - Lien avec la morphologie.....	36
I.5.4.4 L'extraction.....	37

I.5.4.5 Le transfert aux lieux de traitement.....	38
I.5.4.6 Le traitement.....	39
I.6 Conclusion.....	39
Chapitre II : Etudes comparatives des différents types de sables	
II. Etude comparative des différents types des sables.....	40
II.1 Introduction.....	40
II.2 Sable de plage.....	40
II.2.1 Les caractéristiques physique de sable de plage.....	41
II.2.1.1Analyse granulométrique Norme (EN 933-2).....	41
II.2.1.2Module de finesse.....	41
II.2.1.3Masse volumique apparente Norme (EN 18-554).....	45
II.2.1.4Masse volumique absolu, Norme (NF P18-555).....	46
II.2.1.5Equivalent de sable (NF P 18-598).....	49
II.2.1.6Absorption d'eau.....	41
II.2.1.7La Teneur en eau.....	52
II.2.1.8Classe Granulaire de Sable de plage.....	52
II.2.2 Caractérisation minéralogique des sables de plage (Ain achire).....	54
II.2.2.1Minéraux argileux.....	54
II.2.2.2 Minéraux carbonatés.....	56
II.2.2.3 Minéraux non argileux.....	57
II.3 Sable de carrières ou Concassée.....	58
II.3.1 Analyse granulométrique.....	58
II.3.2 Caractéristiques physiques du Sable Concassée (Koussane).....	60
II.3.3 Caractéristiques chimiques.....	61
II.3.4 Caractéristiques mécaniques.....	61
II.4 les sables des dunes.....	62
II.4.1 Caractéristiques physiques des sables des dunes.....	62
II.4.2 Caractéristiques chimiques et minéralogiques des sables des dunes.....	63
II.4.3 Caractéristique physico-chimiques des sables des dunes.....	65
II.4.4 Analyse granulométrique.....	65
II.4.5 Classe Granulaire de Sable de la dune de Bakhala.....	66
II.5 Les sable alluvionnaire.....	67
II.5.1 Caractéristiques physiques des sables alluvionnaires.....	68

II.5.2 les compositions chimiques.....	68
II.5.3 Analyse granulométrique.....	69
II.6 Conclusion.....	69
Chapitre III : Domaines d'usage industriel de chaque type de sables	
III. Domaines d'usage industriel de chaque type de sables.....	70
III.1 Introduction.....	70
III.2 Caractéristiques des matières premières.....	71
III.2.1 Sables extra-siliceux.....	72
III.2.2 Sables siliceux.....	72
III.2.3 Sables silico-argileux et argileux.....	73
III.3 L'usage de sables dans la verrerie.....	73
III.3.1 La matière première.....	73
III.3.2 Elaboration du verre.....	74
III.4 L'usage des sables dans l'industrie Céramique fine.....	75
III.4.1 Procédé de fabrication des céramiques fine.....	75
III.4.1.1 Procédés de fabrication.....	75
III.4.1.2 Préparation de la poudre.....	76
III.4.1.3 Préparation de la composition.....	77
III.4.1.4 Façonnages (mise en forme).....	78
III.4.1.5 Traitement thermique.....	79
III.4.1.6 Le séchage.....	80
III.4.1.7 La cuisson.....	81
III.4.1.8 Le frittage.....	84
III.4.1.9 Emaillage.....	85
III.4.1.10 Contrôle de qualité.....	85
III.5 L'usage des sables dans la fonderie.....	85
III.5.1 La fonderie.....	85
III.5.2 Le moulage.....	86
III.5.2.1 Le moulage en sable.....	86
III.5.2.2 Le moule.....	86
III.5.2.2.1 Moulage au sable Silico-argileux dit sable noir ou «sable vert ».....	87
III.5.2.2.2 Moulage au sable a prise chimique.....	87
III.6 Conclusion.....	87

CONCLUSION GENERALE..... 90

Introduction générale

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Le sable est un matériau granulaire constitué de petites particules provenant de la désagrégation de matériaux d'origine minérale ou organique. Juste après l'eau, il constitue la seconde ressource minérale la plus consommée au monde et la plus exploitée par l'homme.

Pour la plupart d'entre nous, le sable évoque les vacances, le soleil, le bien-être mais c'est à peu près tout. Or le sable est omniprésent dans nos vies, il fait partie intégrante de notre société et est même l'un de ses constituants fondamentaux. Le sable est fondu pour être transformé en verre ; il est aussi la source de nombreux minéraux dont le dioxyde de silicium qui entre dans la composition d'une multitude de produits du quotidien, notamment les produits de haute technologie si bien que les ordinateurs et toutes les puces électroniques ne pourraient pas être fabriquées sans sable, mais, le secteur qui consomme le plus de sable, c'est la construction. [1].

Le sable est extrait des continents mais aussi de plus en plus aujourd'hui des mers. Il y a plusieurs décennies, il existait des carrières de sables à ciel ouvert mais rapidement elles ont été épuisées. On est alors allé chercher le sable en profondeur dans les continents mais aussi au fond des mers et des océans. Aujourd'hui, l'extraction de sable marin fournit une part importante de la production globale de sable.

L'objectif du travail, est de faire une investigation sur les différents types de sables, et de connaître leurs propriétés physiques et chimiques aussi leur usage dans le domaine de l'industrie.

Nous avons structuré notre mémoire comme suit :

Après une introduction générale,

Chapitre 1 : Nous avons présenté dans ce chapitre les sables en générale, définitions des sables, les différents types des sables.

Chapitre 2 : Dans ce chapitre on a étudié les différents types des sables selon la granulométrie et les caractéristiques physique et chimique.

Chapitre 3 : Enfin dans ce chapitre on a cité quelques domaines d'usage des sables et les techniques d'élaborations de ses derniers.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I :
Synthèses
bibliographiques

I. GENERALITES SUR LES SABLES :

I.1. Introduction :

Juste après l'eau, il constitue la seconde ressource minérale la plus consommée au monde et la plus exploitée par l'homme, notre civilisation repose littéralement sur le sable avec plus de 200 utilisations dans des domaines variés tels que la construction et l'industrie, on le retrouve partout, dans le verre, les puces électroniques, les cosmétiques, le plastique, les élastiques, les écrans, le papier, l'asphalte, la peinture, le détergent, la fibre optique et la liste pourrait s'étirer sur des pages entières, même le dentifrice et le vin contiennent souvent du dioxyde de silicium, un antiagglomérant dérivé du sable.

Le sable s'est rapidement positionné comme une matière première indispensable et surexploitée, toutes ces activités entraînent une raréfaction des ressources disponibles, alors même que les demandes en cette matière première ne cessent de s'accroître [1].

Il provient de l'érosion d'une roche mère par des agents le plus souvent météoriques – l'eau, le vent, l'action des cycles de gel et dégel – sa nature dépend donc de sa source, il existe autant de sables différents que de roches sur la planète ! trois critères relatifs à ses grains permettent de le caractériser : la nature (minérale ou organique), la forme (morphoscopie) et les dimensions (granulométrie), ces deux dernières dépendent de la durée du transport et de ses agents de transport : le vent et l'eau, laquelle peut être pluviale, fluviale ou marine [2].

I.2. Granulats :

Définition :

La plupart des définitions relatives aux granulats sont empruntées du texte de la norme française XP [3]. Un granulats est un ensemble de grains compris entre 0 et 125 mm, issus des matériaux pierreux, ils sont de petites dimensions se situe dans l'une des 6 familles tel que les fillers, sablons, sables, graves, gravillons et ballast, produits par l'érosion ou broyage mécanique (concassage) des roches suivantes :

- alluvions glaciaires
- sables et graviers alluvionnaires fluviatiles
- sables et graviers du littoral
- roches éruptives anciennes

- roches volcaniques récentes
- alluvions marines
- couches de sables ou de sablons
- roches sédimentaires consolidées
- roches métamorphiques

I.2.1. Caractéristiques et types de granulats :

Les granulats sont utilisés dans divers domaines, ils sont obtenus :

- en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire, terrestre ou marine.
- en concassant des roches massives.

Leurs natures, leurs formes et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production.

La nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi, chaque roche possédant des caractéristiques intrinsèques spécifiques en termes de résistance mécanique et de tenue au gel, ainsi que des propriétés physico-chimiques et des propriétés chimiques [4].



Figure. I.1: les différents types des granulats [4].

Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis.

Un granulat est désigné par sa classe granulaire exprimée par le couple d/D ou $0/D$ avec :

d : dimension inférieure du granulat

D : dimension supérieure du granulat.

Tableau. I.1: Les caractéristiques dimensionnelles des granulats [4].

Familles	Dimensions	Caractéristiques
Fillers	0/D	$D < 2$ mm avec au moins 85 % de passant à 1,25mm et 70 % de passant à 0,063 mm
Sablons	0/D	$D \leq 1$ mm avec moins de 10 % de passant à 0,063 mm
Sables	0/D	$0 \text{ mm} < D \leq 4 \text{ mm}$
Graves	0/D	$D < 6.3 \text{ mm}$
Gravillons	d/D	$d \geq 2 \text{ mm}$ et $D \leq 63 \text{ mm}$
Ballasts	d/D	$d \geq 31,5 \text{ mm}$ et $D = 50$ ou 63 mm

Les granulats doivent répondre à des exigences et des critères de qualité et de régularité qui dépendent, d'une part, de la nature de la roche (résistance aux chocs et à l'usure, caractéristiques physico-chimiques,...) et, d'autre part, de caractéristiques physiques liées au processus d'élaboration des granulats (dimensions, formes, propreté,...).

Les granulats sont donc spécifiés par deux types de caractéristiques : Caractéristiques intrinsèques, liées à la nature minéralogique de la roche et à la qualité du gisement, telles que, par exemple :

- La masse volumique réelle,
- L'absorption d'eau et la porosité,
- La sensibilité au gel,
- La résistance à la fragmentation et au polissage,
- La gélivité.

Les caractéristiques des granulats sont fonction de leur famille (gravillons, sables, sablons, fillers) et font l'objet de méthode d'essais et de détermination adaptée.

I.2.2. Différents types de granulats : [4].

Un granulats, en fonction de sa nature et de son origine, peut-être :

- a) **Naturel** : d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions fluviales ou marines) ou de roches massives (roches éruptives, calcaires, métamorphiques...), n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage), les granulats naturels sont issus de diverses roches :

- ❖ **Roches magmatiques ou éruptives** : elles proviennent du refroidissement d'un magma préalablement fondu. Parmi les roches éruptives, on distingue :
 - les roches volcaniques qui naissent par solidification de coulées de lave : basaltes, andésites, rhyolites ;
 - les roches plutoniques : granites, diorites, syénites, gabbros...
 - ❖ **Roches sédimentaires** : elles se forment à la surface de la terre par accumulation de sédiments. elles résultent de l'érosion des roches éruptives ou des dépôts de sédiments marins. On les rencontre souvent sous la forme de roches meubles telles que les alluvions siliceuses, silico-calcaires ou calcaires. On distingue les roches sédimentaires :
 - silicatées : grès, grès quartzites, silex, chailles, sédiments glaciaires...
 - carbonatées : calcaires, dolomies...
 - ❖ **Roches métamorphiques** : elles se sont produites suite à des phénomènes tectoniques. elles proviennent de la transformation des roches éruptives ou sédimentaires, sous l'action de la température, de la pression ou de l'apport de substances chimiques : quartzites, gneiss, schistes, micaschistes, marbres... etc.
Elles affleurent plus particulièrement dans les massifs montagneux anciens.
- b) **Artificiel** : d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant par exemple des transformations thermiques : sous-produits industriels, granulats réfractaires.

On distingue plusieurs types de granulats artificiels qui peuvent être utilisés pour des usages spécifiques, sous-produits industriels, concassés ou non.

Les plus employés sont le laitier cristallisé concassé et le laitier granulé de haut fourneau obtenus par refroidissement à l'eau.

Remarque : le laitier est un coproduit de la fusion en haut fourneau du minerai de fer.

Granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement Il s'agit de granulats élaborés spécialement pour répondre à certains emplois, notamment des granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels (granulats ferreux, ...etc.) ou des granulats réfractaires.

- c) **Recyclé** : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments ou des structures de chaussées [4].
- d) **Granulats légers** : Les granulats légers usuels sont la ponce (lave volcanique de couleur gris clair rendue très légère par les nombreuses bulles de gaz emprisonnées lors du refroidissement), la pouzzolane (roche d'origine volcanique à structure alvéolaire de couleur brun-noir à rouge brique), l'argile ou le schiste expansés et le laitier expansé.
- e) **Granulats lourds** : Ces granulats se caractérisent par leur densité élevée :
- La barytine : matière opaque plus ou moins blanche à structure lamellaire, sa densité moyenne est de 4,5.
 - La magnétite : oxyde de fer dont la densité varie de 4 à 5.
 - La limonite de densité 3,7.
 - La pyrite de fer de densité 5.
 - Les déchets ferreux dont la densité varie de 7,4 à 7,7.
 - L'ilménite (densité 5) – la galène (densité 7,6) – le corindon (densité 4) – la serpentine – la pandermite – la colemanite – etc...

I.3. Les granulats naturels :

Les granulats naturels sont issus de roches meubles ou massives qui sont essentiellement constituées de silice, de silicate et de carbonate.

Tableau. I.2: les principaux minéraux de roches meubles et massives [4].

Principal minéral	Exemples de roches
Silice	Quartz, granite, gneiss, grès, silex, chailles
Silicate	Feldspaths, micas, argile, diorites, gabbros, basaltes
Carbonate	Calcite, dolomite

I.4. Les sables :

On définit les sables comme étant la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 80 µm et 05 mm ; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce sont aussi les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas 30% [5].

Dans le sens le plus courant, on entend par "sable" une roche sédimentaire meuble, dont la dimension est comprise entre les dimensions 0,062 à 5mm, non compris les fillers, du point de vue géologique, le terme sable recouvre deux aspects : un aspect granulométrique (taille des grains) et un aspect minéralogique (nature minéralogique des grains), une particule individuelle est appelée grain de sable, mais lorsqu'on dit sable, on pense essentiellement aux sables naturels abondants dans de nombreux pays et dont les réserves sont quasi inépuisables. En fait, la définition granulométrique du sable est plus compliquée, elle varie suivant les époques et diffère suivant les pays et selon la destination.

Le sable peut avoir une origine naturelle ou artificielle ; d'origine naturelle, il provient de la désagrégation naturelle de roches au cours de leur processus d'érosion, artificiel, il est obtenu par broyage de roches massives après des opérations de concassage et de criblage, il est appelé aussi sable de carrière, il est caractérisé par des grains aux aspérités marquées, la composition du sable varie d'un endroit à l'autre selon la nature des roches. Dans l'industrie du verre, de la fonderie et d'autres domaines, le sable recherché est celui qui a une grande teneur en silice un bon classement et des grains arrondis ou subarrondis, sont appelés sables siliceux ou sables industriels [6].

I.4.1. L'origine du sable :

Les sables se différencient par un grand nombre de paramètres et on peut distinguer les deux types de sables : Les sables naturels et ceux issus d'une chaîne d'élaboration (artificiels) [7].

I.4.1.1. Les sables artificiels :

Il s'agit de produits de carrière, résultant du concassage d'une roche quelconque mais dure, à la suite d'un traitement adapté (pré-concassage, concassage secondaire et tertiaire) à l'aide d'appareils du type concasseur à mâchoires ou gravillonneur giratoire. La classification des concassés se fait à l'aide de cribles vibrants et permet d'obtenir toute la gamme des produits finis désirés [8].

La nature des sables artificiels est très variable puisqu'elle dépend de la roche que l'on concasse. Il peut s'agir :

- soit de roches naturelles : calcaires durs, granites, roches volcaniques
- soit de matériaux déjà artificiels : laitier de haut-fourneau, débris de tuile ou de brique (ce qui confère au sable obtenu des propriétés pouzzolaniques).

Les roches naturelles peuvent être prélevées soit dans leur gîte primaire c'est-à-dire dans le substratum rocheux en place (carrière de roche), soit dans leur gîte secondaire, c'est-à-dire dans des alluvions torrentielles, caillouteuses (carrière d'alluvion). C'est pourquoi, on appelle parfois, par erreur, les sables concassés provenant des carrières d'alluvion, des "sables de rivière" ; on réservera ce nom aux sables prélevés en rivière mais naturels, c'est-à-dire ne résultant pas d'un concassage [8].

Remarque : pour obtenir des sables artificiels, on doit éviter le concassage de roches tendres (calcaires tendres, gypse, grès, tufs) ou altérés (granites kaolinisés, roches volcaniques angélisées) ou encore de roches qui s'effritent (schistes, tufs, lave altérée, etc.).

I.4.1.2. Les sables naturels :

Ce sont des matériaux qui existent, dans certaines régions, en abondance dans la nature. Ils sont le résultat d'un processus complexe d'érosion et de sédimentation. Leur formation s'effectue en trois étapes successives : la décomposition sur place des différentes roches suivie d'un transport qui les amène à un dépôt où ils demeurent sous différentes formes. Les plus rencontrés et les plus connus sont :

- Les sables marins.
- Les sables marins littoraux.
- Les sables fluviatiles.
- Les sables éoliens.
- Sables du Sahara. (dunes)
- Sables de regs.
- Sables géologiques en place.
- Sables gypseux.
- Sables gypso-calcaires.

I.4.2. Classification des sables :

On peut classer les sables selon trois paramètres dont :

I.4.2.1.La granulométrie :

Elle permet de séparer les sables en trois catégories :

- ✓ **Sables fins** : plus de 75% des éléments supérieurs à 80 μ m, sont inférieurs à 0,5mm, ces sables doivent être notablement corrigés pour acquérir des propriétés comparables à celles des graves.
- ✓ **Sables moyens** : moins de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 μ m sont compris entre 0,2 et 2mm.
- ✓ **Sables grossiers** : plus de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 μ m sont compris entre 0,5 et 5mm, ces sables ont des propriétés qui se rapprochent des graves [9].

I.4.2.2.La propreté :

La propreté d'un sable est une caractéristique déterminante par l'essai d'équivalent de sable, afin de donner des limites pour chaque type de sable.

I.4.2.3.La nature minéralogique :

En général, les sables peuvent être classés comme suit : [10]

- ✓ Sables siliceux.
- ✓ Sables silico-calcaires.
- ✓ Sable calcaires.

I.5.Les différents types des sables :**I.5.1.Le sable de carrière (concassage) :**

Le sable de concassage ou le sable de carrière est un matériau abondant en Algérie. Son utilisation a été approuvée après la promulgation d'une loi le 14 juin 2005 par le ministre de l'habitat et de l'urbanisme Algérien [11].

Le sable de concassage est exploité dans des carrières à ciel ouvert, ou bien souterraines résulte de l'abattage et concassage de la roche massive. Leurs formes sont souvent plus anguleuses avec des surfaces plus rugueuses que les sables naturels, qui sont plus ronds avec des surfaces plus lisses.

Ainsi, les propriétés globales du sable de concassage: la morphologie, la dureté, la densité, la stabilité physique et chimique, ainsi que la couleur, dépendent de la source d'extraction [11].



Figure I.2 : Opération de concassage (carrière).

I.5.1.1.Procédure de la production du sable :

Le sable provient de l'exploitation des gisements naturels, issue de concassage des roches massives (calcaires ou éruptives), sa nature, sa forme et ses caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production [12].

En outre, leurs productions peuvent se décomposer en trois opérations: l'extraction, le traitement, le chargement et le transport.

I.5.1.1.1.L'extraction :

a) **Découverte :** La roche saine (exploitable) d'un site ne peut être accessible qu'après décapage de la couche de terre végétale et des roches altérées (Figure I.3). Ces deux derniers seront stockés sous forme de merlon, pour être réutilisés lors du réaménagement du site [13].

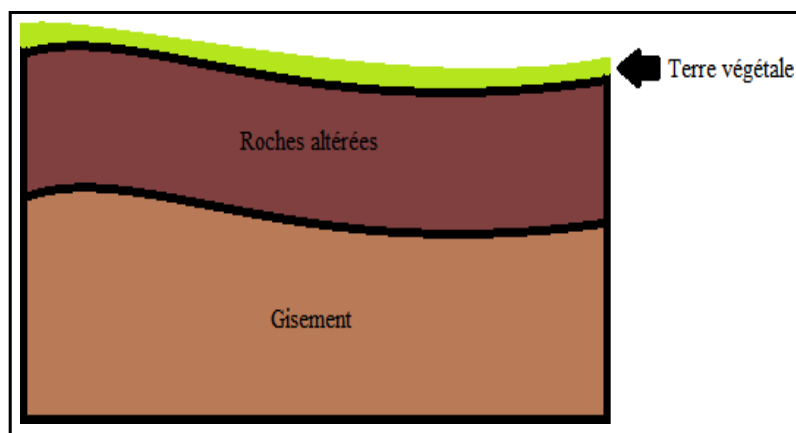


Figure I.3 : Localisation de la roche exploitable

b) L'abattage : L'abattage consiste à défragmenter la matière première par l'utilisation d'explosifs, les tirs de mine provoquent l'abattage d'une grande quantité de matériaux fragmentés, dont la taille pouvant dépasser 1 mètre dans leur plus grande dimension.

Le taux des fines générées au cours de l'abattage peut être aussi élevé que 20 % [14].

L'opération d'abattage se fait en trois étapes :

- Implantation et forage des trous: des forages sont effectués minutieusement dans les roches massives et dans le diamètre varie en fonction du volume à abattre.
- Chargement d'explosif : les explosifs sont chargés par des artificiers dans les forages méthodiquement.
- Tir : la réduction dimensionnelle se fait dans cette dernière étape. Il est exécuté de façon limitée vu les nuisances (nuisances sonores, vibrations... etc.) qu'il engendre.

I.5.1.1.2. Le chargement et le transport :

Cette opération intermédiaire entre l'extraction et le traitement doit se faire de la meilleure façon qui soit pour des optimisations économiques (réduction de la distance entre l'installation d'extraction et l'installation de traitement).

Le transfert des matériaux (brut ou tout-venant), qu'ils soient concassés, peut s'effectuer par des convoyeurs à bandes (Figure I.4), ou au moyen d'engins roulants (Figure I.5).



Figure I.5 : Engins roulants [15].



Figure I.4 : Convoyeurs à bandes [15].

I.5.1.1.3. Le traitement :

Le sable se produit au cours de cette dernière étape à partir des matériaux bruts, et ayant des caractéristiques physiques et chimiques normalisées.

Le traitement s'effectue au sein de la carrière, ou la sablière, par des installations automatisées et contrôlées, et s'étale sur 5 phases :

- L'élimination des impuretés
- Le concassage / broyage
- Le criblage
- Le lavage
- Le stockage et expédition

I.5.1.1.3.1.L'élimination des impuretés :

Cette opération consiste à éliminer les matériaux terreux qui sont collés à la surface des grains à l'aide d'un pré-cribleur vibrant, ou dans certains cas un pré-lavage.

Les matériaux traités sont ensuite pré-stockés près du poste primaire, afin d'assurer l'approvisionnement de l'installation pour les étapes suivantes.

I.5.1.1.3.2.Le concassage / broyage :

Le concassage et le broyage sont des opérations mécaniques qui consistent à réduire la taille de la matière première, ces opérations se font en plusieurs étapes, dans des appareils communément appelés concasseurs, afin d'obtenir une série de granulats, cette phase est considérée comme étant un facteur clé dans la production réussie de sable [16].

I.5.1.1.3.3.Le criblage :

C'est une sorte de tamisage, qui permet de sélectionner les grains, pour obtenir différentes classes de granularités normalisées (gravillons, sable). Le criblage s'effectue sur des grilles perforées (métalliques, caoutchouc, tissus synthétiques), communément appelées "cribles". Il existe des cribles vibrants inclinés et des cribles vibrants horizontaux.

Le criblage a généralement deux vocations dans la chaîne de production: une vocation technique et une vocation de classement [14].

I.5.1.1.3.4. Le lavage :

Débourber, laver ou dépoussiérer permet d'obtenir des granulats propres. Le traitement des granulats par voie humide vise à améliorer la propreté des matériaux par un lavage énergétique qui entraîne les produits indésirables et notamment les argiles.

La majorité de ces produits est éliminée lors du scalpage mais des nouveaux traitements sont souvent nécessaires au cours de l'élaboration afin d'affiner la propreté [15].

I.5.1.1.3.5. Stockage et expédition :

Une fois que les granulats ont été traités et triés selon leurs granulométries. Les produits obtenus ayant les caractéristiques voulues seront acheminés vers des aires de stockage

Enfin, selon la demande du client et des moyens existants, les produits stockés sont acheminés vers leur destination avec différents modes de transport.

D'autre part, la distance moyenne entre les carrières et les lieux de consommation a augmenté ces dernières années [15], à titre d'exemple, un pays comme l'Algérie possède 197 unités d'extraction de granulats, dont 49 % qui se localisent majoritairement à l'Est du pays.

De ce fait, parfois le transport de ces matériaux revient particulièrement cher est ceci quand la plupart des unités de production sont localisées en un seul point (Est de l'Algérie).

I.5.2. Les sables de dunes :

Définition :

Le sable des dunes est le résultant d'une érosion et d'une sédimentation des différentes roches suivie d'un transport fluvial et parfois éolien. La plus grande partie des formations sableuses est généralement constituée de quartz. Il est caractérisé par une granulométrie fine.

Dans une autre signification le sable de dune qui s'impose du fait de son abondance dans la nature (Sahara), de son coût d'extraction presque nul, et de sa propreté apparente, constitue la solution au problème d'épuisement des ressources naturelles et se présente comme un matériau d'avenir [7].



Figure I.6 : la dune de Sahara algérienne [17].



Figure I.7 : Sable de dune

I.5.2.1. Nature de sable dune :

I.5.2.1.1. Mécanismes de formation :

Les dunes se forment dans des zones où le sable est abondant et non fixé par la végétation (désert, plage, lit fluvial à l'étiage). Le sable est érodé et pris en charge par le vent (déflation). Il est transporté aux ras du sol par saltation, puis s'accumule quand la compétence du vent chute (versant sous le vent). Une dune peut se déplacer par érosion du versant au vent et accumulation sur le versant opposé.

Le même processus peut se produire sous l'eau à la faveur d'un courant marin (dune hydraulique), par exemple dans le pas de Calais où elles abritent peu d'espèces mais des espèces rares et inféodées à ce milieu [17].

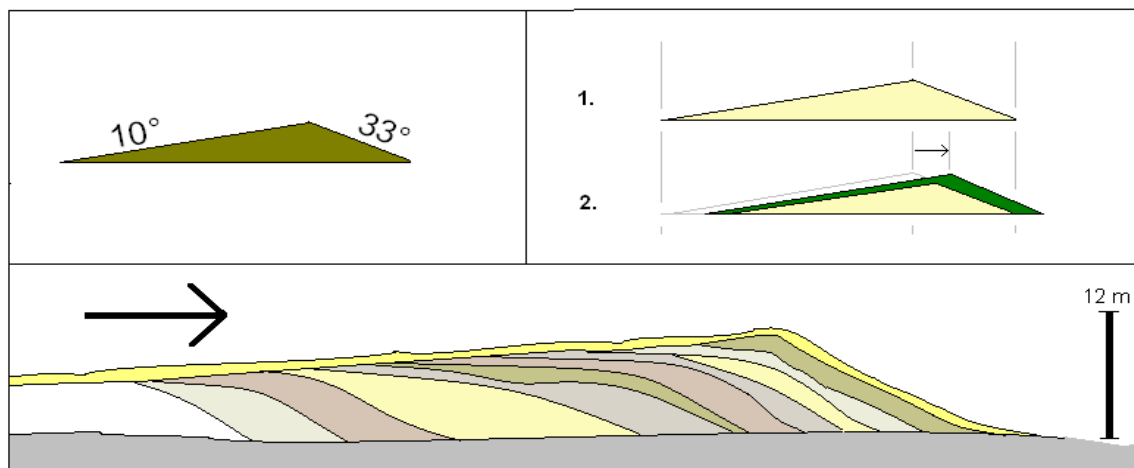


Figure I.8 : La formation dunaire [17].

I.5.2.2. Type de dune :

A. Les avant-dunes : qui sont des bourrelets plus ou moins fixés par la végétation (oyats par exemple), parallèles au trait de côte et solidaire de la plage, c'est-à-dire échangeant du sable avec elle, dans un même système sédimentaire. Elle est différente d'une ancienne arrière dune en cours d'érosion, et d'une dune formée par du sable venant de terre sur un secteur où une avant-dune active ne pourrait pas se former. En Espagne et en Tunisie, ces avant-dunes sont systématiquement considérées comme faisant partie du domaine public maritime, ce qui facilite leur protection. L'avant-dune se forme à partir de fixation du sable en haut de plage, par des plantes pionnières spasmophiles,

- B. les falaises dunaires :** est plutôt un profil résultant de l'érosion marine d'une dune ancienne fixée par une pelouse ou un boisement qui ont été à l'origine de la formation d'une couche d'humus ou de sol sableux.
- C. les dunes perchées :** apparaissent au sommet d'une falaise vive. Elles sont alimentées en sable par le vent à partir de l'estran, voire à partir du profil de pente, quand il s'agit d'une falaise dunaire.
- D. les cordons dunaires artificiels :** sont construits par l'homme, généralement comme élément de protection contre la mer ou d'une zone cultivée et/ou construite. Ils nécessitent un entretien permanent, sans lequel ils se désintègrent en quelques décennies. Certains cordons sont ainsi semi-naturels (ex : avant-dunes plus ou moins dégradées rectifiées par des engins et fixées par des oyats) [17].
- E. type complexe :** Tous ces types de dunes peuvent exister sous trois formes : simple, composée et complexe. Les dunes simples sont des collines avec un nombre minimal de côtés escarpés qui en définissent la typologie géométrique. Les dunes composées sont des plus grandes dunes, surmontées de dunes similaires plus petites. Les dunes complexes sont, elles, formées de plusieurs types de dunes différents. Une dune en demi-lune soutenant une dune en étoile est une des dunes complexes les plus communes. Les dunes sont simples quand le vent reste constant pendant leur formation [17].

I.5.2.3. Les formes de sable de dune : Il existe trois formes :

- La forme la plus commune sur la Terre (et sur Mars) des dunes est celle en demi-lune, aussi appelée transversale ou barkhane en forme de croissant. Les collines en demi-lune sont, généralement, plus larges que courtes. Elle naît là où l'apport de sable est faible et sous des vents unidirectionnels
- la dune parabolique sont en forme de U. Elles sont typiques des déserts côtiers. La plus longue dune en parabole connue mesure 12 kilomètres. Ce type de dune se forme quand, aux extrémités d'une formation sableuse, commence à apparaître de la végétation qui en arrête la progression, tandis que la partie centrale continue à avancer. Elles se forment quand le vent ne souffle que dans une seule direction dominante.
- les siouf ou SIF, dunes en forme de sabre, sont des ondulations longitudinales s'amincissant vers une extrémité [18].

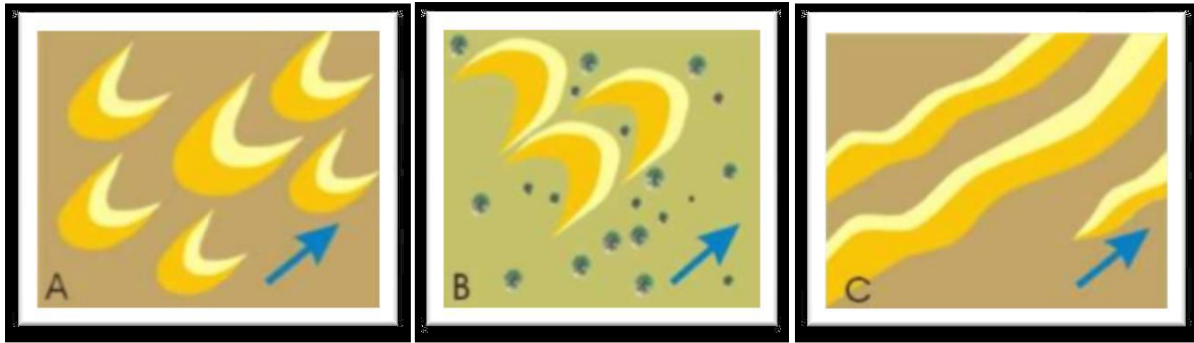


Figure I.9 : Les formes de dunes [18].

A: barkhanes ; B: dunes paraboliques ; C: dunes longitudinales

La flèche bleue indique la direction du vent dominant

I.5.2.4. Les différents milieux de la dune :

Les dunes sont composées de milieux différents, On distingue différents types de dunes : les dunes mobiles peu ou pas fixées par la végétation (oyats, chiendents des sables etc.) ou dunes blanches, les dunes « reliques » définitivement fixées par la végétation comme les dunes grises (mousses, lichens, argousiers, etc.), les dunes noires (arbres) et les dunes fossiles recouvertes par des dépôts sédimentaires autres que le sable.

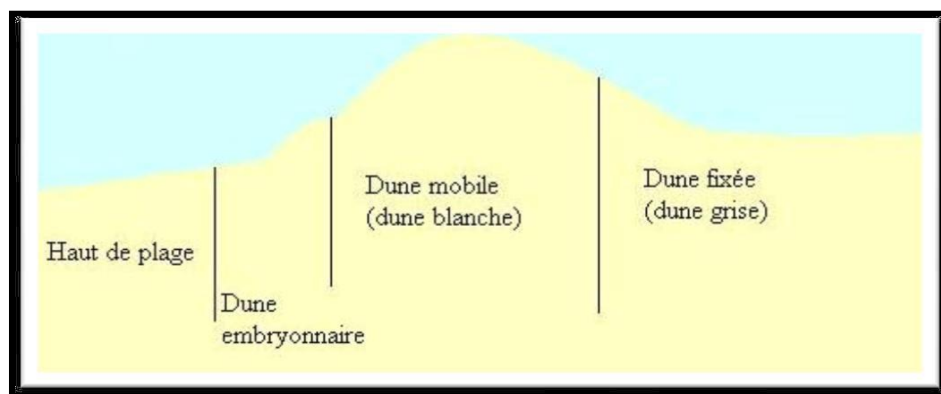


Figure I.10 : coupe transversale des différents milieux de la dune [17].

1. **la dune verte** (appelée aussi avant-dune ou dune embryonnaire) : végétation pionnière des hauts de plage s'installant sur une dune en formation ou à la base d'une dune mobile, dominée par des peuplements clairsemés de psammophytes de type chiendent des sables, Renouée maritime, Pourpier de mer, Soude brûlée, Cakilier maritime, Panicaut maritime, Euphorbe maritime et liseron des dunes [17].



Figure I.11: Dune verte [17].

Ces plantes favorisent l'installation de macro mycètes saprotrophes et fixent le sable, formant des buttes sableuses néoformées appelées nebkas et peuvent aboutir à son accrétion sous forme d'une accumulation subhorizontale située en pied de dune (banquette surélevée de quelques décimètres par rapport au haut de plage).

Cette dune est normalement éphémère, qu'elle soit balayée par les vagues de tempête ou qu'elle se transforme en un autre type plus évolué, la dune bordière où l'emplacement des obstacles primitifs n'est plus individualisable [17].

- 2. La dune blanche ou jaune:** partie de la dune littorale mobile colonisée par l'Oyat, plante fixatrice adaptée à une assez faible salinité du substrat (2 % maximum) à laquelle s'associent d'autres espèces spasmophiles (Panicaut des dunes, Achillée maritime, giroflée des dunes, chou marin, liseron des dunes, gaillet des sables, Lis maritime).

Elle comprend un glacis externe ou une falaise sableuse et un plateau dunaire caractérisés par des formes de déflation (siffle-vent qui peut évoluer en couloir ou plaque de déflation, caoudeyre, dune parabolique) et des zones d'accumulation marquées (tuc, poudrières). À la dune vive succède une dune semi-fixée caractérisée par une accumulation moindre des sables soufflés par les vents (ces derniers étant majoritairement arrêtés par la dune blanche) et le développement d'une végétation dense en tapis [17].



Figure I.12: la dune blanche ou jaune [17].

3. **la dune grise** : partie de la dune sous le vent correspondant au talus interne de la dune blanche, où pénètrent des plantes herbacées fixatrices succédant aux espèces pionnières, le tout évoluant peu à peu vers une pelouse constituée d'un tapis dense de mousses et lichens (accompagnés de l'Immortelle des dunes, la Linaire des sables, la rose pimprenelle, l'oeillet des dunes, l'Ophrys passion (**It**), la Canche blanchâtre (**en**), la Luzerne marine, le raisin de mer, le Chardon champêtre, le thym serpolet ou les Orobanches) qui enrichit le sable de matière organique et d'humus. Il existe souvent, au sein de cette dune et à l'arrière de celle-ci, des cuvettes naturelles ou artificielles (mares de chasse, prélèvements de sédiments) dont une partie est, au moins temporairement, en contact avec la nappe phréatique [17].



Figure I.13: La dune grise [17].

4. **la dune noire** : la pelouse basse fait place à une pelouse haute envahie par des Bryophytes du genre *Tortula*, aux teintes brun foncé à noires lorsqu'elles sont sèches.



Figure I.14 : La dune noire [17].

5. **la dune brune (dune boisée ou frange forestière)** : la pelouse est progressivement remplacée par des prairies enrichies d'espèces pré-forestières (Saulé des dunes, Rosiers), puis par des buissons et fourrés (Ajonc, Prunelliers), arbustes (espèces consolidatrices succédant aux fixatrices, du type argousier, églantier, sureau, troène...), voire un boisement littorale [17].



Figure I.15 : La dune brune [17].

I.5.2.5. La dune littorale : Les dunes littorales ou dunes bordières se forment sur le long des côtes basses où les vents et l'apport de sédiments par la dérive littorale permettent l'accumulation de sable sur les plages. À marée basse, le haut de plage est asséché par le vent ce qui permet le transfert des sables vers l'intérieur des terres, essentiellement par roulage et

saltation. La largeur de l'estran est donc un facteur primordial du bon développement des dunes: plus il est large, plus la surface de déflation éolienne et donc la quantité de sédiments soufflés sont importantes. Dans le processus de formation des dunes, les plantes pionnières jouent un rôle fondamental, assurant le dépôt, la fixation et la stabilisation de l'accumulation dunaire. Ces plantes sont adaptées à l'instabilité du substrat et présentent de longues racines traçantes



Figure I.16 : Dune baltique [17].

La dune littorale est donc une forme d'accumulation sédimentaire fixée par une végétation spasmophile, il s'agit d'une construction bio géomorphologique [17].

I.5.2.5.1. Le mouvement de dune littorale :

Les dunes littorales, poussées par les vents, peuvent envahir graduellement les terres si la topographie de l'arrière-côte le permet; ce fut l'une des raisons de leur fixation le long de la côte landaise par la plantation d'une forêt de pin maritime. Lors des tempêtes, les dunes constituent une réserve de sable face à l'érosion des vagues: l'attaque directe des vagues entaille la dune et le sable prélevé est transféré dans les petits fonds. Il remonte normalement lors des périodes de calme sous l'action des houles [17].

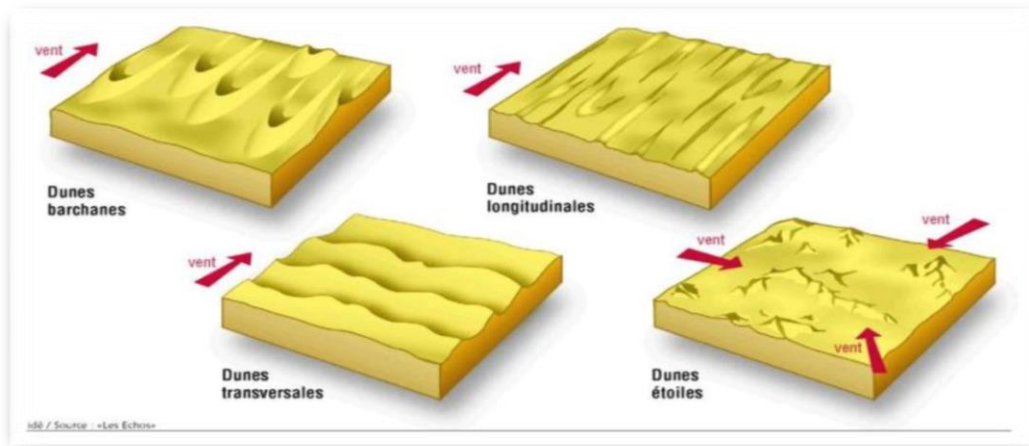


Figure I.17 : mouvement des dunes [17].

I.5.2.5.2. La formation des dunes littorales :

La formation des dunes littorales nécessite des conditions particulières:

- Un stock de sable disponible apporté par les fleuves, la mer (bancs de sable au large) ou puisé dans les falaises.
- Un vent de mer dominant et de vitesse suffisante pour déplacer les grains de sable.
- Des obstacles aptes à piéger le sable : laisse de mer (débris divers et algues échoués sur la plage - photographie), végétation, topographie de la plage, etc.

I.5.3. Physique des dunes :

Nous connaissons tous, au moins par des photos ou les images de télévision, les étendues majestueuses de dunes ressemblant à une mer de sable dans le désert.

Leurs formes répétitives modelées par le vent couvrent d'immenses surfaces et leurs déplacements menacent aussi bien les zones de cultures que les routes ou même les villes. Malgré cela, le mouvement des dunes était encore très mal compris faute d'équations rendant compte des mouvements superficiels des grains de sable sous l'action hydrodynamique du vent. En effet, il est hors de question de suivre les trajectoires de chacun de 10^{10} à 10^{12} grains d'une dune. Pourtant, grâce à une meilleure compréhension de la physique des milieux granulaires et grâce à la puissance des moyens informatiques actuels.

Une barkhane est une dune la plus étudiée à cause de sa simplicité par rapport à l'entière forme dunaire et à cause de sa vitesse de déplacement (jusqu'à 50-60 mètres par an) ,de la forme d'un croissant allongé dans le sens du vent. Elle naît là où l'apport de sable est faible et sous des vents unidirectionnels.



Figure I.18 : La barkhane (Sud-Marocain) [7].

Le vent fait rouler le sable pour qu'il remonte la pente du dos de la dune jusqu'à la crête et vienne former de petites avalanches sur le versant plus pentu du front. Ce phénomène fait avancer la dune. Les dunes les plus simples ont une forme de croissant et portent le nom arabe de barkhane.

Elles se forment dans des conditions particulières avec des volumes de sable limités et se déplacent sur un substrat stable sous l'action d'un vent qui vient toujours de la même direction. Leur crête sépare le dos de la dune, incliné de 5 à 20° et le front nettement plus raide (32 à 35°) qui se prolonge par deux cornes dans la direction du vent.

L'évolution et la forme d'une dune, de connaître celle du champ de vent correspondant. Celui-ci est en général dans un régime turbulent en trois dimensions développé à toutes les échelles autour de la topographie dunaire. Mais en moyenne, le profil de vitesse en fonction de la hauteur suit une loi logarithmique établie depuis Prandtl en 1925, avec, à sa base, une "couche-limite" dans laquelle l'écoulement est essentiellement laminaire où les grains sont arrachés et transportés [7].

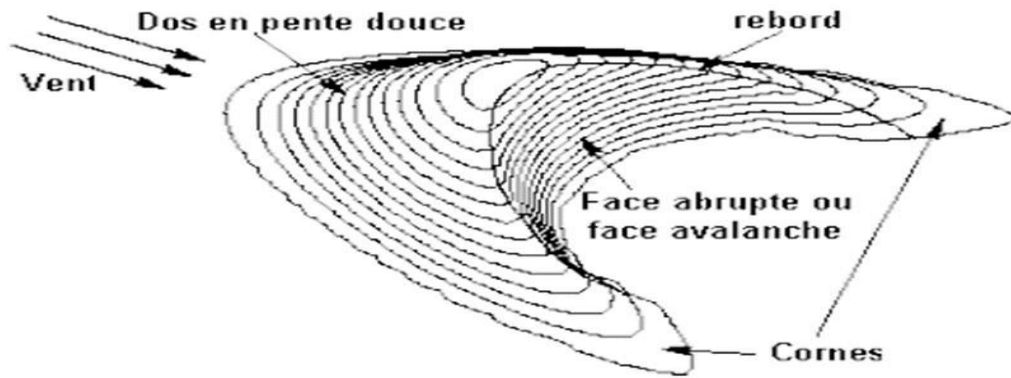


Figure I.19 : La morphologie de la barkhane [7].

I.5.4. Propriétés des sables de dune :

Le sable dunaire est en abondance dans près de 60% de la superficie du territoire algérien. L'épaisseur moyenne de la couche sableuse est de 6m. Cette énorme quantité a amené les ingénieurs à s'interroger sur les propriétés physico-chimiques de ces sables pour une investigation visant la valorisation des matériaux locaux dans ces lieux.

Le sable forme naturellement des pentes stables jusqu'à environ 30°, au-delà de cet angle, il s'écoule par avalanches successives pour retrouver cette pente stable. Cette propriété peut être exploitée pour étudier des formes parfaites générées par l'écoulement du sable sur des plaques de formes différentes. Par exemple, en faisant couler du sable sur un socle de forme carrée, le sable va former une pyramide parfaite avec des pentes de 30°.

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 lest ou pour protéger (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 [7].

I.5.5. Le sable des plages :

Définition :

Ces petits grains que l'on retrouve plus ou moins fins sur nos plages proviennent des roches sédimentaires détritiques. Fragilisées par l'eau, les changements de températures et les intempéries, elles se décomposent petit à petit pour former ce qu'on appelle le sable. Acheminé dans les océans par les rivières, les fleuves et le vent, il finit son périple sur les côtes du littoral déposé par la houle. Celui que l'on trouve aujourd'hui sur nos plages a des origines multiples. Il peut être issu de la désagrégation des roches qui datent d'il y a plusieurs millions d'années, elles-mêmes mélangées à des fragments plus récents. Il est principalement composé de minéraux tels que le quartz, de grenat et de mica allant de 68 micromètres à 2 millimètres. Parfois, tel le sable blanc des atolls, sa composition est organique et contient des fragments de coraux. Bien que faisant partie intégrante de notre environnement, ce matériau est une ressource précieuse qui se raréfie. Les plages se dégarnissent avec l'industrie du bâtiment et l'aménagement du littoral qui puisent dans les réserves plus vite qu'il ne faut de temps au sable pour se former [19].

I.5.5.1. La formation de sables des plages :

Pour comprendre comment se sont formées les plages, il faut savoir de quoi elles sont aujourd'hui composées. Une plage est tout simplement une accumulation de sédiments formés par l'action des vagues. Elle est constituée de trois zones successives : la zone supérieure, qui s'étend jusqu'à la limite des vagues et des marées ; la zone moyenne (ou zone d'estran), soumise au flux et au reflux des vagues ; et la zone basse (avant-côte), peu profonde et submergée, qui s'étend vers le large, jusqu'à des profondeurs de plus de dix mètres [20].

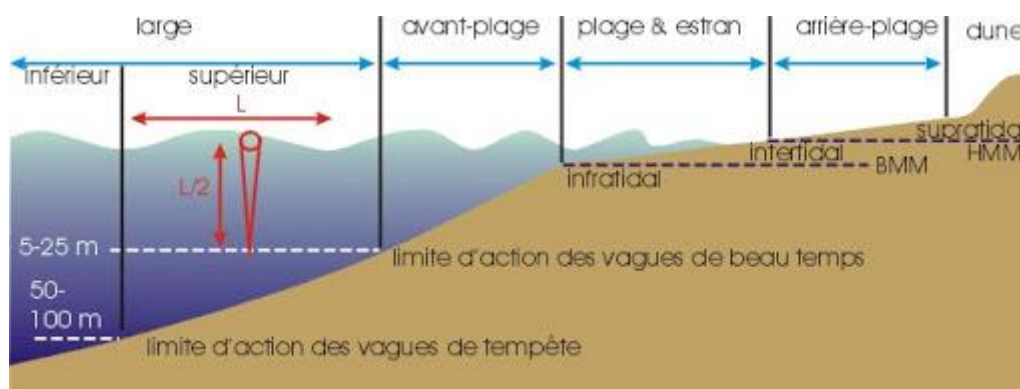


Figure I.20 : Zonation bathymétrique du littoral et de la plate-forme [21].
continentale. HMM=hautes mers moyennes; BMM=basses mers moyennes

I.5.5.2. L'origine des matériaux et le budget sédimentaire des plages :

Les plages ont commencé à se former à la fin de la transgression postglaciaire, il y a environ 5 ou 6000 ans [22], lorsque le niveau de la mer s'est fixé, à peu près dans sa position d'aujourd'hui. L'époque était caractérisée par une grande disponibilité en sédiments sur les littoraux. En effet, lors de sa remontée, concomitante de la déglaciation commencée il y a 15 000 ans, à partir d'un niveau situé à plus de 100 m au-dessous de l'actuel, la mer a balayé et entraîné avec elle des sédiments détritiques, d'origines diverses, qui s'étaient accumulés sur les plates-formes continentales alors que celles-ci étaient émergées. Quand le niveau marin s'est stabilisé, les sables et les galets se sont entassés sur des rivages. Des plages se sont formées et, éventuellement, des champs de dunes étendus se sont constitués en arrière d'elles. Cette période d'abondance a duré jusqu'à ce que l'accumulation des sédiments soit telle que l'absorption de l'énergie des vagues soit maximale et que le déplacement des matériaux soit minimal. [22], Dès lors, l'alimentation des plages en sédiments provient de plusieurs origines.

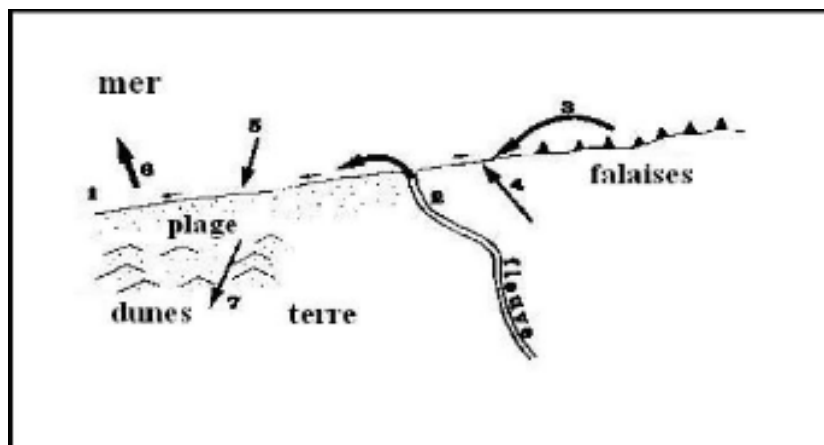


Figure I.21 : Gain et perte de sédiments par une plage [22].

- (1) apport par dérive littorale.
- (2) de sédiments provenant d'un cours d'eau.
- (3) de l'érosion de falaises par les vagues.
- (4) d'un vent de terre.
- (5) de sédiments par les vagues à partir de l'avant côte.
- (6) perte de sédiments emportés par les courants d'arrachement.
- (7) par un vent de mer édificateur de champs de dunes.

Les sédiments d'origine marine, mais ce ne sont pas les plus abondants, l'érosion côtière ne fournit en général que peu de débris, sauf où de hautes falaises, taillées dans des roches tendres et qui reculent rapidement. Ces débris sont pris en charge par la dérive littorale [22].

Les matériaux dominants sur les plages sont d'origine terrigène et proviennent essentiellement des apports des oueds. Les débits solides sont élevés et des volumes importants de sédiments se déversent dans la mer.

La plage n'est pas uniquement un réceptacle des différents types sédiments qui s'y accumulent, mais, elle est aussi le siège de prélèvement et de dépôts souvent massifs de sédiments. Les vents du large parviennent à mobiliser les sables sur les plages et à les exporter même à l'intérieur des terres, ces sables vont s'accumuler en arrière de la plage et parviennent à édifier une bordière associée à la plage. Il arrive souvent que les sables soient exportés au-delà du littoral pour former des champs de dunes qui envahissent les terres [22].

Mais d'où vient ce sable ?

Il provient en majeure partie de l'érosion glaciaire. Les forces d'érosion ont brisé les roches en petites particules. Pendant la glaciation, les rivières glaciaires ont transporté le sable sur la côte.

Depuis, les littoraux continuent de se transformer à cause de la sédimentation mais aussi en raison de l'érosion. En effet, les marées ainsi que les vagues produites par le vent sont à l'origine d'un mouvement des eaux qui, en déferlant puis en se retirant, érodent les caps et les falaises et forment à nouveau du sable. Les courants marins agissent ainsi sur la plage comme des agents d'érosion et de reconstruction.

Deux paramètres influencent directement le profil de la plage. Le type de sédiments, d'une part, qui va influencer sa pente : celle-ci augmente avec la grosseur de grain des sédiments. C'est pourquoi les plages de galets sont souvent plus abruptes que les plages de sable, plus plates, car elles résistent aux vagues et aux vents violents. D'autre part, les caractéristiques au large des côtes vont modifier le littoral : par exemple, une zone d'eaux peu profondes absorbera une partie de l'énergie des vagues avant qu'elles ne déferlent sur le rivage [20].

I.5.5.3. Propriétés des plages :

Une plage est une zone d'accumulation de sédiments (sables, graviers, galets) se produisant en partie haute de l'estran. C'est un corps sédimentaire relativement instable, à cause :

- de l'absence de cohésion entre les éléments constitutifs,
- de la variabilité des forces qui s'exercent sur eux au cours du temps

Lorsque ces forces restent stables, la plage tend à acquérir un profil d'équilibre. Lorsque ces forces changent, la plage évolue vers un autre profil d'équilibre. Le profil instantané correspond à un emboîtement de profils successifs, les profils hérités étant plus ou moins conservés ou dégradés. Le façonnement de la pente d'équilibre dépend des caractéristiques de la houle principalement et du marnage.

Les matériaux des plages sont essentiellement des formations meubles constituées par :

- Des sables fins à grossiers (0,2 à 2 mm),
- Des graviers (2 mm à 2 cm),
- Des galets (2 à 20 cm),
- Des blocs (plus de 20 cm).

Les sédiments des plages sont caractérisés par leur mobilité perpendiculairement au rivage sous l'action des vagues et parallèlement au rivage sous celle de la dérive littorale engendrée par l'obliquité de la houle par rapport au trait de côte [22].

Le mouvement de va et vient des vagues, le jet de rive et la nappe de retrait, donne aux sédiments des plages un façonnement spécifique, grain de sable aux contours de forme sphérique au discoïde.

I.5.5.4. Les types des plages :

La plage se forme lorsque la quantité de matériaux disponibles sur un rivage surpasse le volume de sédiments que les vagues et les courants littoraux sont capables de déplacer. L'accumulation l'emporte alors sur l'érosion.

La forme des plages varie en fonction de la configuration de la morphologie de la côte [23].

Des plages en arc de cercle se forment souvent dans le fond des baies et golfes grâce à l'apport des cours d'eau qui déversent à la mer une charge solide importante, mais aussi parce que la réfraction de la houle s'y traduit par un affaiblissement de l'énergie des vagues.

Quand une dérive littorale charrie en abondance des sédiments, il se produit un dépôt partiel de ces sédiments en constituant de longues plages au tracé Concave largement ouvert vers la mer et qui s'appuie sur des époinçements rocheux

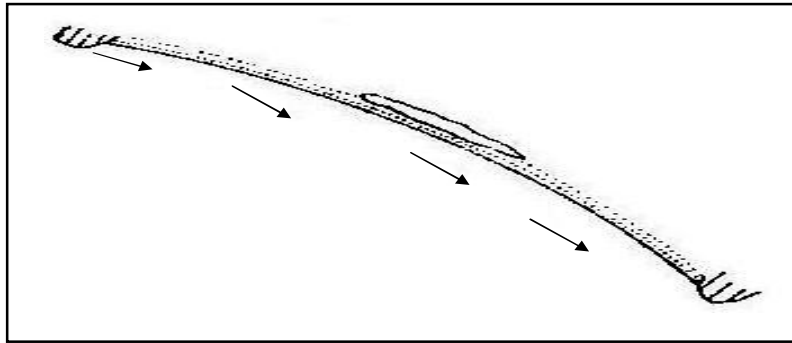


Figure I.22 : Schéma illustrant la forme d'une plage ouverte [22].
(Les flèches indiquent le sens de la dérive littoral).

I.5.5.5. Les caractéristiques morphologiques des plages :

Généralement, les plages présentent un profil transversal plus au moins concave. La pente varie en fonction du calibre des sédiments qui les constituent et les caractéristiques des vagues qui y déferlent. La pente est forte quand les sédiments sont grossiers [22], En effet, le jet de rive apporte dans ce cas davantage de matériaux que la nappe de retrait n'en emporte car celle-ci est affaiblie par l'infiltration de l'eau plus importante sur un estran de galets que sur un estran de sable fin. L'équilibre est établi lorsque le profil est suffisamment raide pour que les effets du jet de rive, freiné par la pente, et ceux de la nappe de retrait, renforcée par elles s'annulent. Les plages abritées frappées par les vagues courtes et peu cambrées, sont plus pentues que celle exposées aux larges et atteintes par des houles longues. Les premières tendent à réfléchir les vagues, tandis que les secondes favorisent la dissipation de leur énergie [22], a proposé un profil transversal qui comporte (Figure I.20)

I.5.5.5.1. Le haut de plage :

Le haut de plage prend la forme d'un bourrelet dû à l'accumulation de matériaux par les mers les plus hautes. La partie la plus élevée de ce bourrelet constitue la crête de plage édifiée par les vagues des tempêtes et présente des gradins traduisant des apports d'importance décroissante.

I.5.5.5.2. Le bas de plage :

En contrebas du haut de plage, la pente diminue indiquant une diminution du calibre des sédiments et se traduisant par une ligne de flexion qui matérialise le bas de plage submergé à chaque marée.

I.5.5.5.3. L'estran :

Étendue de plage qui est couverte à haute mer, et découverte à basse mer.

I.5.5.5.4.L'avant plage :

La topographie de l'avant plage est toujours submergée et peut être accidentée par des accumulations désignées sous le nom de barres de crêtes ou de rides pré littorales. Celles-ci se forment quand la pente est douce et les sédiments sont abondants. Elles sont séparées par des sillons. Certaines sont parallèles, d'autres obliquent par rapport au trait de côte. Leur hauteur est d'ordre métrique, leur longueur variable se mesure généralement en centaine de mètre du fait de leur nombre, de leur taille, de leur forme et leur position qui varient considérablement dans le temps.

I.5.5.6. Techniques d'extraction :

L'extraction de granulats marins est, principalement réalisée grâce à des navires dédiés à cette activité et appelés des dragues aspiratrices en marche ; il n'y a donc aucune plate-forme permanente d'exploitation en mer.

Ces dragues sont généralement équipées pour extraire à environ 30 mètres de profondeur. La capacité de chargement des navires sabliers est comprise entre 1 000 et 8 500 m³ et il faut en moyenne deux heures de présence sur la zone pour extraire et remplir la cale.

Quand le navire sablier arrive dans le périmètre autorisé à l'extraction, il ralentit et déploie son élinde (conduite permettant d'aspirer les granulats), tout en poursuivant sa route à faible allure (2 à 4 km/h), jusqu'à ce qu'elle atteigne le fond marin. L'élinde racle le fond et aspire, grâce à un système de pompage, un mélange d'eau, de sable et de graviers appelé « tout-venant », qui remonte et se déverse dans la cale du bateau. L'eau contenue dans le « tout-venant » s'évacue de la cale par le fond du navire (c'est la déverse) ou par débordement (c'est la surverse). Déverse ou surverse entraînent avec elle de fines particules (sables fins et argiles) qui retournent à la mer, formant le "panache turbide". Le passage de la tête d'élinde en continu sur le fond marin crée des sillons réguliers parallèles ou sub-parallèles plus ou moins profonds, selon le type de bec et les conditions de dragage (en général 1 à 2 mètres de large pour 0,3 à 0,5 mètre de profondeur).



Figure I.23 : Une dragueuse de sable.

Figure I.24 : Extraction du sable des plages.

À quai, le contenu des cales est déchargé, majoritairement par la drague elle-même, soit par voie hydraulique soit par voie sèche. Dans le premier cas, la cargaison est remobilisée sous forme de pulpe pour être refoulée par la pompe du navire dans des bassins aménagés à proximité des installations de traitement. Cette méthode de déchargement, la plus rapide (2 à 3 heures pour 1 500 à 3 000 m³ est réservée aux sédiments sableux. Dans le second cas, les matériaux sont déchargés par convoyeurs à bandes chargés par bennes situés a bord du navire. [23].

I.5.5.7.Traitement :

Dans le cas du sable de plage propres, il n'y a pas de traitement à effectuer. Pour la limite inférieure de la granulométrie, le tamisage a été effectué naturellement sous l'action des courants côtiers et des vagues. Or que le sédiment marin subit a un processus de traitement.

Le traitement des sédiments sont des technologies permettant, soit de rendre aux sédiments contaminés des teneurs en polluants acceptables pour qu'ils puissent éventuellement être réutilisés, soit simplement de réduire la quantité de matériau à mettre en décharge si aucune voie de valorisation n'a été trouvée. En général, la contamination est concentrée dans la fraction fine des sédiments et la première opération du traitement consiste à l'isoler par des techniques appropriées.

Ces techniques ont pour objectif de conditionner le sédiment en vue de son traitement ultérieur. Les techniques de déshydratation permettent de réduire les volumes à traiter en éliminant jusqu'à 50% de l'eau interstitielle contenue dans les sédiments qui en renferment de 50 à 90% selon la technique de dragage utilisée. Il existe différentes techniques utilisant par exemple la consolidation sous vide, les bassins de décantation, les centrifugeuses, les évaporateurs, ou encore les filtres presse et filtres bande.

Les techniques de séparation permettent de séparer les sables de fractions fines contaminées. On peut citer l'attrition, les bassins de séparation, la coagulation / floculation, le criblage, les hydrocyclones, les lits fluidisés, les séparateurs magnétiques, les vis et les méthodes électrostatique et électrodynamique [24].

I.5.5.7.1. Traitement Physico-chimique :

Ce type de traitement s'appuie sur des interactions physico-chimiques (adsorption/désorption, oxydation/réduction, échange ionique) pour détruire, transformer ou immobiliser les contaminants.

I.5.5.7.2. Les traitements biologiques :

Ils consistent à utiliser la capacité de certains micro-organismes à dégrader les substances organiques et les polluants. L'efficacité de ces méthodes dépend des conditions du milieu (température, oxygène, teneurs en nutriments) et de l'adaptation des micro-organismes à utiliser les polluants à éliminer comme substrat pour leur propre développement.

I.5.5.7.3. Les techniques d'inertage :

L'objectif de ces techniques de traitement est de fixer les contaminants dans la matière afin qu'ils ne soient plus mobiles. Les produits traités sont alors envoyés en décharge ou revalorisés en matériaux de construction (selon les réglementations en vigueur). Le contaminant (organique ou inorganique) n'est pas détruit, il est donc nécessaire d'effectuer des études à long terme afin d'appréhender les risques de ce type de stabilisation [24].

I.5.5.8. Conclusion sur le sable des plages :

Outre les plages et les fonds marins, nos terres aussi regorgent de sable. Les bassins sédimentaires renferment sous nos pieds de vastes formations sableuses. Cette présence sur le continent, en surface ou en sous-sol, provient d'un environnement passé où le transport et le dépôt de sédiments sableux étaient possibles.

Des centaines de milliers d'années sont nécessaires pour que la nature produise du sable en grande quantité. Deux conditions doivent être réunies : un climat favorable à l'érosion des sols et une zone propice au dépôt de sédiments. Cet appauvrissement au cours des derniers millénaires induit que le stock de sable présent sur nos côtes n'est plus renouvelé. Malgré cela, il demeure largement mobilisé par les activités humaines.

Comme évoqué antérieurement, le secteur de la construction est le plus gourmand en sable. Celui-ci entre en effet dans la composition du béton et du verre, mais est également utilisé

dans les remblais maritimes. Or, tous les sables ne sont pas adaptés à ces usages. Les grains du désert, par exemple, sont trop petits et trop ronds pour fabriquer du béton. Raison pour laquelle les sables continentaux, des plages subissent une telle pression [25].

I.5.6. Les sables d'oueds (rivières) :

Définition :

Les sables d'oueds (rivières) il s'agit de dépôts alluvionnaires actuels le long des rives des fleuves, ils constituent des "flat" en lentilles, interstratifiées parfois dans des alluvions plus fines (argile), dont les dimensions peuvent être importantes et justifier leur exploitation, Comme les sables de rivière résultent de la dégradation des roches par les eaux de ruissellement, leur nature dépend des terrains que le réseau hydrographique de ces rivières traverse, il peut s'agir de sable volcanique, quartzeux, calcaire, schisteux, gypseux, suivant que l'on se trouve en pays volcanique, granitique, calcaire, schisteux ou de gypse. Le long des rivières à caractère torrentiel, les sables de rivière sont peu étendus et mélangés à des galets plus ou moins grossiers (absence de classification naturelle lors de la sédimentation en raison de la brièveté du transport) [8].



Figure I.25 : Les sables d'oueds.



Figure I.26 : Granulats alluvionnaires [26].

I.5.6.1. Différentes morphologies des oueds :

Les réseaux hydrographiques constituent un ensemble de cours d'eau, oueds, fleuves à la surface des continents. Plusieurs types d'écoulement sont présents, des torrents rectilignes à forte pente, aux fleuves méandriformes des plaines. Quel que soit leur style, on différencie les écoulements progressant directement sur le substratum rocheux des écoulements sur fond meuble, qu'on appelle oueds (rivières) alluviales. Ces oueds au fort pouvoir érosif, sont capables de changer de morphologie au cours d'un événement hydrologique mineur. On peut

distinguer deux catégories d'écoulement : ceux à chenal unique et ceux à chenaux multiples : les anabranches. Dans cette dernière catégorie, on peut encore différencier plusieurs types de morphologies, en fonction de leur variabilité latérale et de leur pente [27].

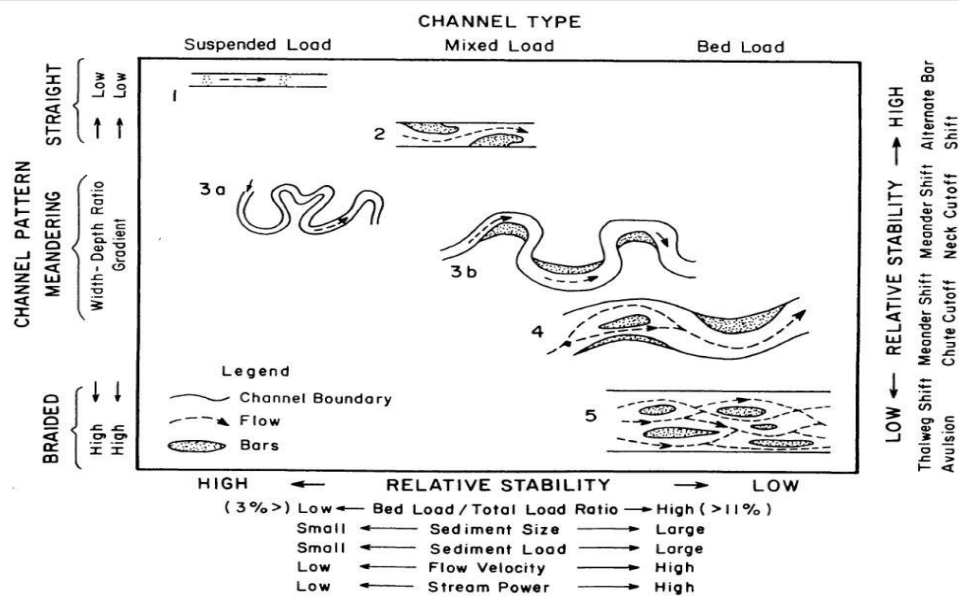
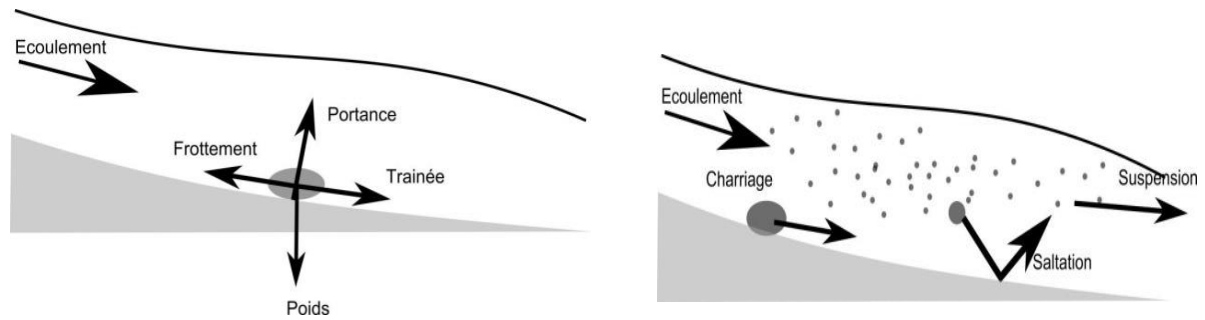


Figure I.27 : Différents types de morphologie des oueds selon écoulements à plusieurs chenaux [27].

- Les rivières en tresses : sont constituées de plusieurs chenaux s'entremêlant et laissant apparaître de nombreuses îles, Constituées principalement de matériaux non cohésifs, leur mobilité est importante (dessin 5 Fig : I.27).
- Les rivières à méandre : ne sont généralement faites que d'un seul chenal d'écoulement, présentant de fortes sinuosités (dessin 3 et 4 Fig : I.27).
- Les bancs alternés : en grand nombre, et peu ou pas de bancs centraux. Ces morphologies sont perçues comme les formes les plus stables, (dessin 1 et 2 Fig : I.27).

I.5.6.2. Transport granulat en oued :

On distingue trois types de transport solide différents en rivière : la suspension, la saltation et le charriage. Une particule transportée en suspension est la plupart du temps dans l'écoulement. Une particule charriée roule sur le fond, son parcours est discontinu, marqué par des phases d'arrêt. La saltation est à mi-chemin entre le charriage et la suspension. La particule est transportée par l'écoulement en effectuant des bonds. Les contacts avec le fond sont ponctuels mais fréquents. Pour un même écoulement, les particules fines sont en suspension alors que les gros grains sont charriés [27].



a) Bilan des forces s'appliquant sur un grain du lit

b) Différents modes de transport

Figure I.28 : Le transport sédimentaire en rivière - La déstabilisation des particules et les différents modes de transfert.

I.5.6.3. Le tri granulométrique en oued - Lien avec la morphologie :

Les sédiments des oueds sont de tailles différentes. On observe alors différentes manifestations de tri granulométrique. Dans une couche sédimentaire, sous l'effet de la gravité, de la percolation, les particules fines s'infiltrent dans les interstices laissés vides par les sédiments grossiers. On obtient alors une couche de sédiments fins en dessous d'une couche de surface qui n'est plus constituée que de sédiments grossiers. On parle alors de lit pavé et c'est un tri granulométrique vertical (Fig. I.29a). Dans un système à bancs (tresses, méandre, bancs alternés...), des bancs forment des obstacles à l'écoulement, et sont contournés. Sous l'impulsion du courant, les sédiments grossiers ont tendance à venir se déposer en tête de banc [27]. Ainsi l'amont des bancs ne se trouve généralement constitué que de sédiments grossiers alors que la surface restante présente une granulométrie plus fine (Fig. I.29c). Cette hétérogénéité de surface est un exemple manifeste d'un tri granulométrique longitudinal (Fig. I.29b).



a) Tri vertical



b) Tri horizontal



C) Tri horizontal sur un banc.

Figure. I.29 : Différentes manifestations du tri granulométrique dans le milieu naturel.

I.5.6.4. L'extraction :

De ce fait, il existe deux méthodes principales d'extraction reposant sur la présence ou non d'eau au sein du gisement.

En premier lieu lorsque le gisement à exploiter se situe au-dessus de la nappe phréatique (Fig I.30). L'extraction s'effectue directement à la surface du gisement à l'aide d'engins de travaux publics (pelleteuse ou chargeurs) [28].

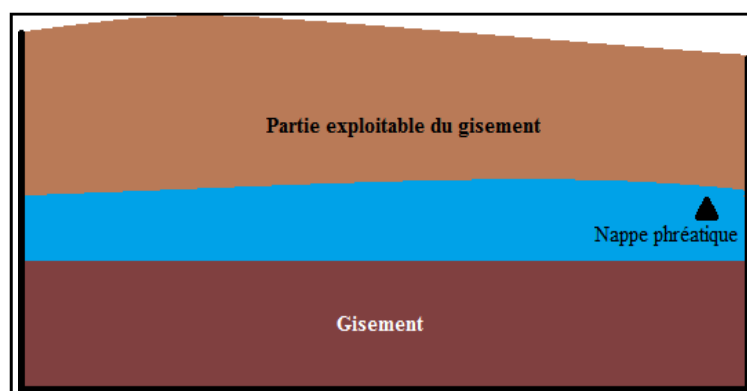


Figure I.30 : Gisement au-dessus de la nappe phréatique.

En second lieu, lorsqu'une partie du gisement est située sous le niveau d'eau (Fig I.31), dans ce cas l'extraction se fait à l'aide d'engins qui peuvent s'adapter à la situation : dragues à godets, drague à benne, dragues suceuses, drague à pelle [28].

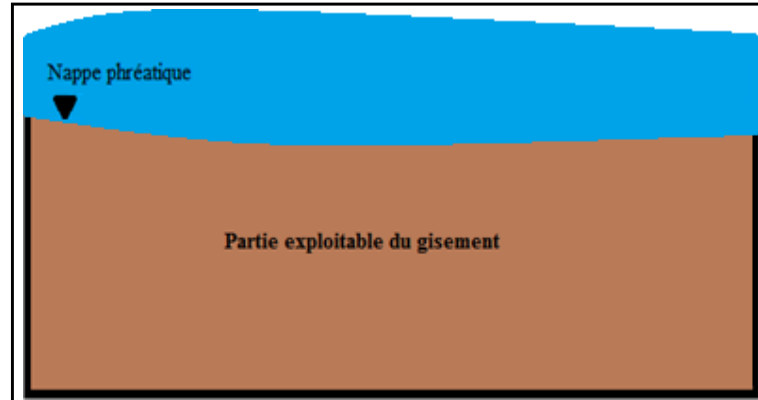


Figure I.31 : Gisement sous la nappe phréatique.

I.5.6.5. Le transfert aux lieux de traitement :

La manutention des matériaux extraits entre le lieu d'extraction et le lieu de traitement est réalisée en discontinu, c'est-à-dire que la manutention est effectuée par des camions, dumpers et chargeuses, ou en transporteur à bandes [29].



a) transporteur à bandes.



b) transport à dumpers.

Figure I.32 : Les différents types de transport.

I.5.6.6. Le traitement :

Le traitement comprend plusieurs installations pour différentes étapes de fabrication : le scalpage, le criblage de matériaux roulés – lavés, le concassage et le criblage des concassés. Tout d'abord, les matériaux sont extraits et passent dans une trémie afin de scalper les éléments supérieurs à 150 mm. Ceux-ci sont alors déstockés et passent au recyclage. S'en suit

ensuite le criblage-sous-eau, Cette étape permet de séparer et donc orienter les granulats en fonction de leur taille. Cette opération mécanique s'effectue par des cribles équipés de grilles perforées aux ouvertures déterminées en fonction des granulométries recherchées. De ce 1^{er} criblage sort du sable fines lavé, moyens roulés lavés, grossier roulés lavés, graviers lavés et des galets lavés.

Pour les matériaux non traités lors de la première phase, viens l'étape du concassage, qui est essentielle dans le traitement des granulats car il consiste à broyer les matériaux alluvionnaires, dans un concasseur, et donc à réduire leur taille. S'enchaîne à cette étape, le criblage qui ressortira du sable moyens concassé et grossiers concassé. Ces matériaux partiront ensuite approvisionner des postes d'enrobés [29].

I.6. Conclusion :

Notre recherche nous a permis de montrer que l'ensemble du sable est d'une provenance naturelle, en effet, sa répartition dans la nature permette de le rendre approprié à son exploitation. Cette dernière repose sur plusieurs paramètres, (extraction, chargement et transport, traitement...etc.), Il existe quatre principales catégories de sables.

- Le sable de carrières : extrait des sablonnières et à la forme angulaire. est soit retiré du sol en masse, soit fabriqué par concassage de roches extraites en carrière. et traité selon un processus de plusieurs phases (Le concassage / broyage, Le criblage, Le lavage)
- Le sable de dunes : ou de désert, abondant, est un sable fin, son grain rond, fortement usé par le vent,
- Le sable de plages : est généralement pur, il est parfois trop fin et trop régulier. La nature des sables de plage dépend, bien entendu, des roches dont ils dérivent, il s'agit généralement, soit de sables volcaniques (noirs), soit de sables calcaires (blancs) soit de sables quartzeux (blancs à roux).
- Le sable d'oueds : Les sables naturels peuvent être issus des oueds. Également appelé « sable des rivières » ou « sable alluvionnaire », il se caractérise par sa forme arrondie et sa dureté, et il provient de l'action de l'eau sur les rochers.

Chapitre II :
Etudes comparatives
des différents types
de sables

II. Etude comparative des différents types des sables :

II.1.Introduction :

Le sable est un matériau granulaire constitué de petites particules provenant de la désagrégation de matériaux d'origine minérale en générale (des roches) ou rarement organique (coquilles, squelettes de coraux, etc.) dont la dimension est comprise entre 0,063 mm (limon) et 2 mm (gravier) selon la définition des matériaux granulaires en géologie. Sa composition peut révéler jusqu'à 180 minéraux différents (quartz, micas, feldspaths) ainsi que des débris calcaires, une particule individuelle est appelée grain de sable. Les sables sont identifiés généralement grâce à la granulométrie (la grosseur des grains) [30].

Dans ce chapitre on va faire une étude entre les différents type de sable selon la granulométrie, les caractéristiques physique et chimique, la minéralogie... a la base des résultats des études réalisés la littérature.

II.2.Sable de plage :

II.2.1.Les caractéristiques physique de sable de plage :

Les sables de mer se forment sur le long des côtes basses où les vents et l'apport de sédiments par la dérive littorale permettent l'accumulation de sable sur les plages.

La composition d'une plage dépend avant tout de la formation géologique de la région. En effet, la plage est essentiellement le résultat de l'érosion des roches environnantes (l'activité biologique des organismes marins contribue également à la formation des plages mais dans une moindre mesure) [31].

Sur la côte méditerranéenne, la profondeur du sable sur la plage et au fond des mers varierait entre 1,50 m et 4 m. Ces valeurs changent en fonction des courants et du temps qui passe. Sous l'eau, la plage se caractérise par une alternance de bancs de sable et de cuvettes [32].

II.2.1.1Analyse granulométrique Norme (EN 933-2) :

De très nombreuses classifications granulométriques ont été proposées, notamment par A. Atterberg, F. Rinne, J. Bourcart. Les limites entre les catégories distinguées correspondent en général à des changements des propriétés mécaniques et physiques des grains. La plupart des auteurs admettent la limite de 2 mm, et celles de 1 μm , 2 μm , 20 μm , 40 μm , 50 μm ,

200 μm , 2 cm, La granulométrie a pour objet la mesure de la taille des particules élémentaires qui constituent les ensembles de grains de substances diverses, telles que les farines, les poudres, les sables, etc., et la définition des fréquences statistiques des différentes tailles de grains dans l'ensemble étudié [33].

Pour une analyse granulométrique d'un échantillon (un échantillon représentatif) il est nécessaire d'abord effectuer une série d'opérations comme suite :

- ✓ **L'Homogénéisation** : dans cette opération on doit bien mélanger l'échantillon (sable) et le mettre sous forme de cône.
- ✓ **L'Aplatissement** : consiste à aplatir à une épaisseur homogène le sable préalablement homogénéisé.



Figure II.1 : Homogénéisation du sable



Figure II.2 : l'aplatissement du sable

- ✓ **Le Quartage** : dans cette opération On divise le sable en quatre (04) parties égales et on prend les deux (02) parties opposées.

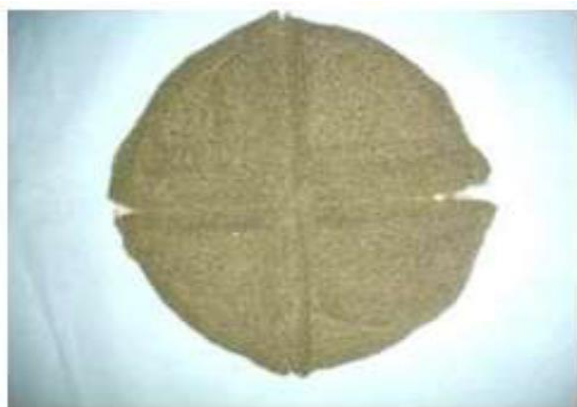


Figure II.3 : Opération du quartage

- ✓ **Le Séchage** : Il s'effectue dans une étuve à une température de 100°C, pendant 24heures.

L'échantillon est considéré comme sec, lorsque la différence de poids après deux essais est constante.

- ✓ **Tamisage** : Dans cette étape on prépare une série de tamis sur l'ordre A.F.N.O.R.



Figure II.4 : Tamiseuse électrique

L'analyse granulométrique a été effectuée au niveau du laboratoire (LMDC) de l'université d'Adrar.

Tableau II.1 : Analyse granulométrique du sable de plage (Oran) [33]. Refus

Tamis	Refus partiel	Refus cumulé	cumulé (%)	Tamisat (%)
(mm)	(g)	(g)	(%)	(%)
2	13.7	13.7	1.14	98.86
1	346	353.7	29.48	70.53
0.5	436	783.7	65.31	34.69
0.25	118.1	899.8	74.98	25.02
0.125	131.1	1034.9	86.24	13.76
0.0625	41.8	1076.6	89.72	10.28

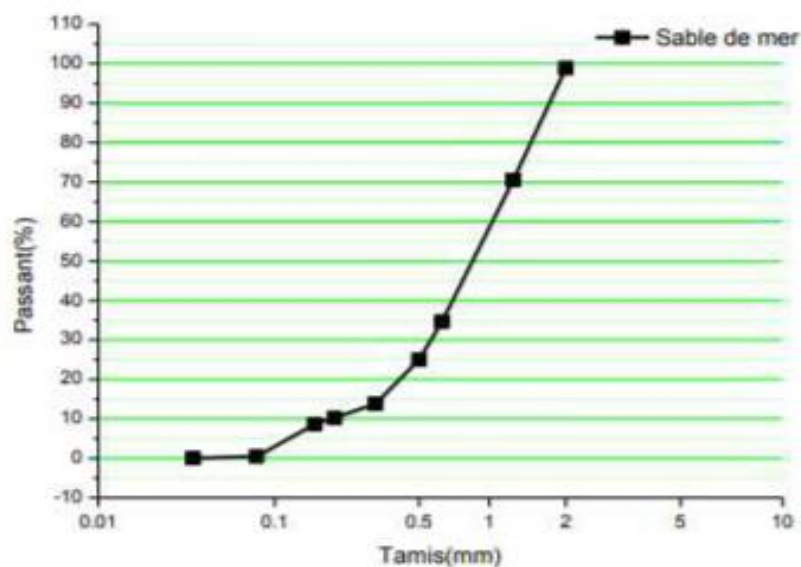


Figure II.5 : Courbes granulométriques de sable de mer (Oran) [33].

Commentaire :

La courbe granulométrique du sable de plage est continue.

Moyenne (Mz) : cet indice caractérise la taille des éléments :

$$Mz \text{ (en Phi)} = (Q16 + Q50 + Q84) / 3$$

Où :

Q16 : point de la courbe pour lequel 16% du matériel est d'une taille inférieure à celle de la taille considérée (abscisse correspondant à l'ordonnée 16%).

Q50 ou médiane Md : point de la courbe pour lequel 50% du matériel est d'une taille inférieure à celle de la taille considérée (abscisse correspondant à l'ordonnée 50%).

Q84 : point de la courbe pour lequel 84% du matériel est d'une taille inférieure à celle de la taille considérée (abscisse correspondant à l'ordonnée 84%).

Tableau II.2 : Interprétation des valeurs de la moyenne granulométrique [34].

Valeur	Interprétation
$Mz < 1$	Sable grossier
$1 < Mz < 2$	Sable moyen
$2 < Mz < 3$	Sable fin
$Mz > 3$	Sable très fin

Coefficient d'uniformité : permet d'exprimer l'étalement de la courbe granulométrique:

$$C_u = D_{60}/D_{10}$$

Où :

D60 = diamètre effectif des particules qui correspond à 60% du passant.

D10 = diamètre effectif des particules qui correspond à 10% du passant.

Selon la valeur du coefficient d'uniformité, on reconnaît cinq classes de granulométrie. **Tableau II.3** : Classes de granulométrie des sols

coefficient d'uniformité	classes de granulométrie
$2 < C_u \leq 5$	granulométrie très serrée.
$5 < C_u \leq 20$	granulométrie serrée.
$20 < C_u \leq 200$	granulométrie semi-étalée.
$C_u \leq 2$	granulométrie étalée.
$200 < C_u$	granulométrie très étalée.

II.2.1.2. Module de finesse : [35]

L'objectif d'essai d'Analyse granulométrique c'est de déterminer le Module de finesse qui est une caractéristique intéressant, surtout en ce qui concerne les sables.

Expression du Module de finesse :

Norme européen (EN 13139) : $MF = \sum (\text{Refus cumulés tamis } 0.125-0.25-0.5-1-2-4) / 100$

Tableau II.4 : Grosseur ou finesse en fonction du pourcentage de passant au tamis de 0,5[36].

Sable Fin	Sable Moyens	Sable Grossier
0,6 à 2,1	1,5 à 2,8	2,4 à 3,6

Le Résultat et Interprétation d l'essai module de finesse de sable de plage (Oran) sont donner dans le tableau suivant :

Tableau II.5 : Résultats de l'essai module de finesse.

Sable	MF(%)	Interprétation
Sable de plage (Oran)	2.83	Sable grossier

D'après les résultats le sable de plage (Oran) est grossier.

II.2.1.3. Masse volumique apparente Norme (EN 18-554) :

La masse volumique du sable est une propriété importante. Elle est utilisée par exemple pour définir les dosages des constituants d'une formule de béton, ou bien plus simplement pour s'assurer qu'on respecte le poids maximum du véhicule (PTAC) lorsqu'on transporte du sable. Comportant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

C'est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un corps par unité de volume.

Elle est calculée en divisant la masse de ce corps par son volume.

Elle s'exprime en kilogramme par mètre cube (kg/m^3) ou en tonne par mètre cube (t/m^3)

L'objectif d'essai pour déterminer la masse volumique apparente de sable [33].



Figure II.6 : Etapes d'essai de la masse volumique apparente.



Figure II.7 : Méthode de mesure de la masse volumique apparente.

Les étapes d'essai de la masse volumique apparente

La masse volumique apparente calculé comme suivant :

$$\rho_{app} = (g/cm^3) \text{ ou } (Kg/cm^3).$$

Les résultats de l'essai massent volumique apparente résumés dans le tableau qui suit :

Tableau II.6 : Masse volumique apparente de sable de plage.

Essais	Masse(g)	Volume (cm ³)	MVapp(g/cm ³)
Essai	1675.93	1000	1.67593

II.2.1.4.Masse volumique absolu, Norme (NF P18-555) :

La masse volumique absolue (ou masse spécifique) est le rapport entre la masse du matériau et le volume de matière pleine sans aucun vide entre dans les grains (volume absolu de la matière) [37].

Le poids volumique des particules solides ρ_s est déterminé à l'aide d'un pycnomètre à eau conformément à la norme NF NF P18-555. Elle est définie par le quotient du poids W_s de ces particules solides par leur volume V_s .



Figure II.8 : Méthode de mesure de la masse volumique absolue.

Avec : $\rho_{\text{abs}} = M_s / V_s$

ρ_{abs} : Masse volumique absolue des particules solides ;

M_s : Masse du sable sec ; V_s : volume des particules solides.

D'après les résultats obtenus de l'essai, la valeur de la masse volumique absolue (ρ_{abs}) est donnée par la formule avec :

- (g) : poids du pycnomètre vide ;
- (cm³) : volume du pycnomètre + liquide + matière ;
- (cm³) : poids de liquide ;
- (p_w): poids volumique de l'eau à 20°C. $\rho_w = 0.9882$



Figure II.9 : les différentes étapes expérimentales pour la détermination du poids volumique sec.

Les résultats de l'essai du poids volumique des grains solides des sables de plage sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II.7 : Le poids volumique des grains solides sable de plage.

Essais	M1(g)	M3(g)	M4(g)	M2(g)	ρ_w	Vs(cm ³)	Ms(g)	γ_s g/cm ³
Essai	34.1477	59.0713	99.3826	84.0311	0.9882	9.5893	25	2.6070

II.2.1.5. Equivalent de sable (NF P 18-598) [35] :

Cet essai effectué selon la norme (NF P 18-598), il est utilisé pour évaluer la propreté des sables, il est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers. Une procédure normalisée permet de définir un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté du sable des dunes.

ESv : (équivalent de sable visuel).

Esp : (équivalent de sable au piston).



Figure II.10 : l'essai d'Equivalent de sable.

Les classes de propreté d'après les valeurs de l'équivalent des sables sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau II.8 : Classes de propreté d'après les valeurs de l'équivalent de sable[36].

ESV (%)	ESP (%)	Interprétations
ESV < 65	Esp < 60	Sable argileux ; non convenable pour des bétons de qualité
65 ≤ Esv < 75	60 ≤ Esp < 70	Sable légèrement argileux ; convenable pour des bétons Courants
75 ≤ Esv < 85	70 ≤ Esp < 80	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses ; parfaitement convenable pour des bétons de qualité.
Esv ≥ 85	Esp ≥ 80	Sable très propre : risque d'un défaut de plasticité du béton

Les résultats d'équivalent du sable de plage sont résumés dans le tableau II.9 :

Tableau II.9 : Résultats d'équivalent du sable de plage.

	H ₁	H ₂	H ₂	ESV=H ₂ /H ₁ *100	ESp=H ₂ '/H ₁ *100
Essai	8.8	8.51	8.43	96.79	95.85

Commentaires :

D'après les résultats obtenus par les études faites : le sable de plage est un sable très propre

II.2.1.6. Absorption d'eau :

L'absorption d'eau est déterminée selon la norme EN 1097-6. Lorsqu'elle est exigée, l'absorption d'eau maximum est renseignée au niveau de la fiche technique.

L'absorption de l'eau par les granulats est déterminée en mesurant l'augmentation de masse d'un échantillon séché au four après avoir été immergé dans l'eau pendant 24 heures et séché superficiellement. Le rapport entre l'augmentation de la masse immergée et la masse de l'échantillon sec, exprimé en pourcentage, est défini comme étant l'absorption ou coefficient d'absorption.

Le coefficient d'absorption d'eau du sable est calculé comme la suite :

$$CA = (M_H - M_S) / M_S \times 100 \%$$

M_h = la masse du sable humide

M_{sec} = la masse du sable après le séchage



Figure II.11 : Les étapes d'essai de l'absorption

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau II.10 : Le coefficient d'absorption du sable de plage[36].

sable	M humide(g)	M sec(g)	CA = $(M_H - M_S) / M_S \times 100 \%$
Sable de plage(Oran)	629.6	628.1	0.23

II.2.1.7.La Teneur en eau :

Les résultats de cet essai sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II.11 : Résultats de la teneur en eau de sable de plage.

Sable	M humide(g)	M sec(g)	CA = $(M_H - M_S) / M_S \times 100 \%$
Sable de plage(Oran)	2425.6	1928.3	25.78

II.2.1.8. Classe Granulaire de Sable de plage [38] :

L'analyse granulométrique et fractale de sable de plage est représenté dans le tableau suivant :

Tableau II.12 : Analyses granulométriques et Analyse fractal de sable de plage.

Analyse Granulométrique					Analyse Fractale			
Tamis	Masse des refus		% Cumulé		MV	V G	Effectifs	
	Partiel	Cumulé	Refus	Tamisât	Pr	$(\pi/6)*G3$	Partiel	Cumulés(Ec)
(mm)	(kg)	(kg)	%	%	kg/m ³	m ₃	Ep	EC
1.600	0.00	0.00	1.14	98.86	2633.000	2.14E-09	0.00E+00	0.00E+00
1.250	0.35	0.35	29.47	70.53		1.02E-09	1.31E+05	1.31E+05
0.630	0.43	0.78	65.31	34.69		1.31E-10	1.25E+06	1.38E+06
0.500	0.12	0.90	74.98	25.02		6.54E-11	6.74E+05	2.05E+06
0.315	0.14	1.03	86.24	13.76		1.64E-11	3.14E+06	5.19E+06
0.200	0.04	1.08	89.72	10.28		4.19E-12	3.79E+06	8.98E+06
0.160	0.02	1.10	91.35	8.65		2.14E-12	3.47E+06	1.24E+07
0.080	0.10	1.19	99.56	0.44		2.68E-13	1.40E+08	1.52E+08
0.063	0.00	1.20	99.94	0.06	1.31E-13	1.32E+07	1.65E+08	

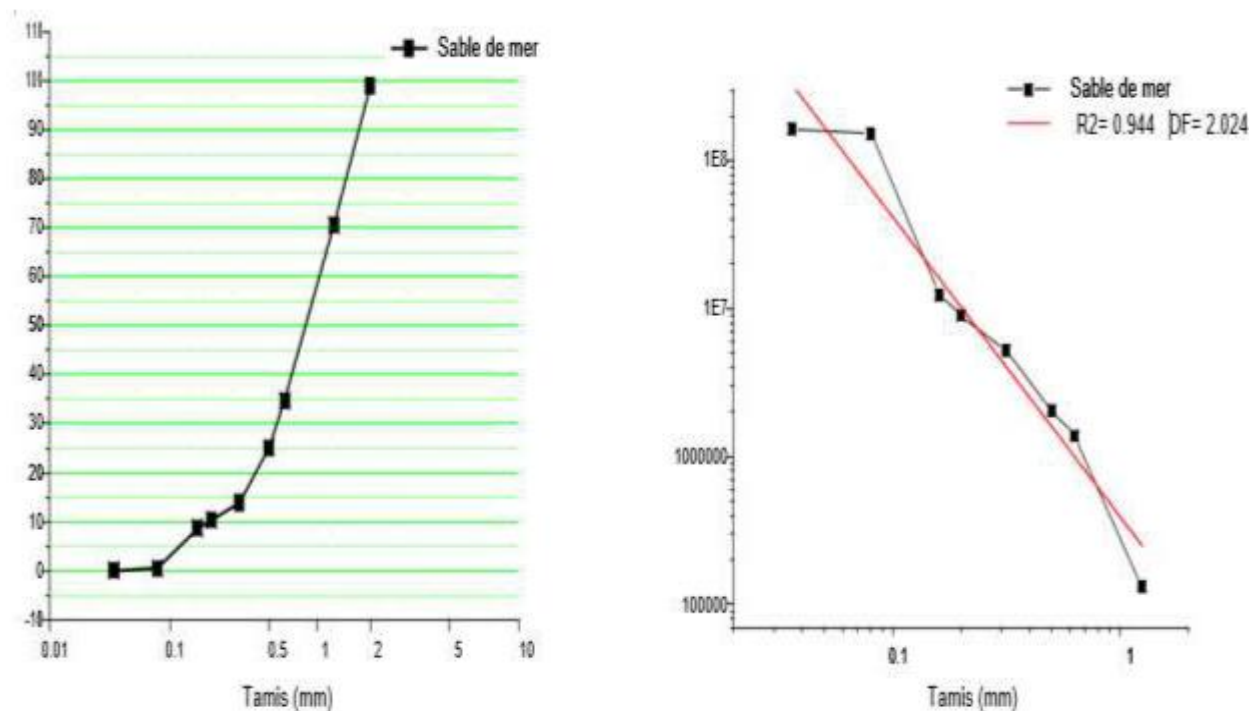


Figure II.12 : Transformation de la courbe granulométriques de plage (Oran) à la droite fractale de sable[38].

Interprétation :

D'après la droite fractale la courbe granulométrique est continue.

Identification de cette distribution est de $DF=2,02$ et de coefficient de corrélation $R^2 = 0,944$, et étendu granulaire de d_{min} est $0.036mm$, et D_{max} est $1.6mm$.

II.2.2. Caractérisation minéralogique des sables de plage (Ain achire) :

Cette étape consiste à déterminer la composition minéralogique des différents échantillons de sable. Plusieurs méthodes ont été utilisées et chacune d'elles tient compte de la nature de la roche.

II.2.2.1. Minéraux argileux :

Essai au bleu de méthylène : Détermination de la présence d'argile dans le sable. L'essai au bleu de méthylène, développé par TranNgoc Lan (1977), permet de déterminer le degré argileux d'une roche ou d'un sédiment. Il s'agit de mesurer la capacité d'adsorption des phases argileuses de la roche ou du sédiment en introduisant des quantités croissantes de bleu de méthylène jusqu'à ce que les particules argileuses en soient saturées.



Figure II.13 : Agitateur contenant la solution de bleu de méthylène (GLOBAL CONCEPT /Laboratoire & Engineering à El Bouni/Annaba).

Le principe de l'essai consiste à introduire des quantités croissantes de bleu de méthylène par petites doses successives jusqu'à l'observation d'un excès de bleu qui marque la fin de l'expérience que l'on détermine par le test dit à la tâche. L'excès de bleu et la fin de l'expérience se traduit par l'apparition de cette auréole. Si la tâche est sans auréole le test est négatif, indiquant l'absence de minéraux argileux dans l'échantillon. Si la tache bleue est entourée d'une auréole le test est dit positif et cela traduit la présence de minéraux argileux dans l'échantillon[34].

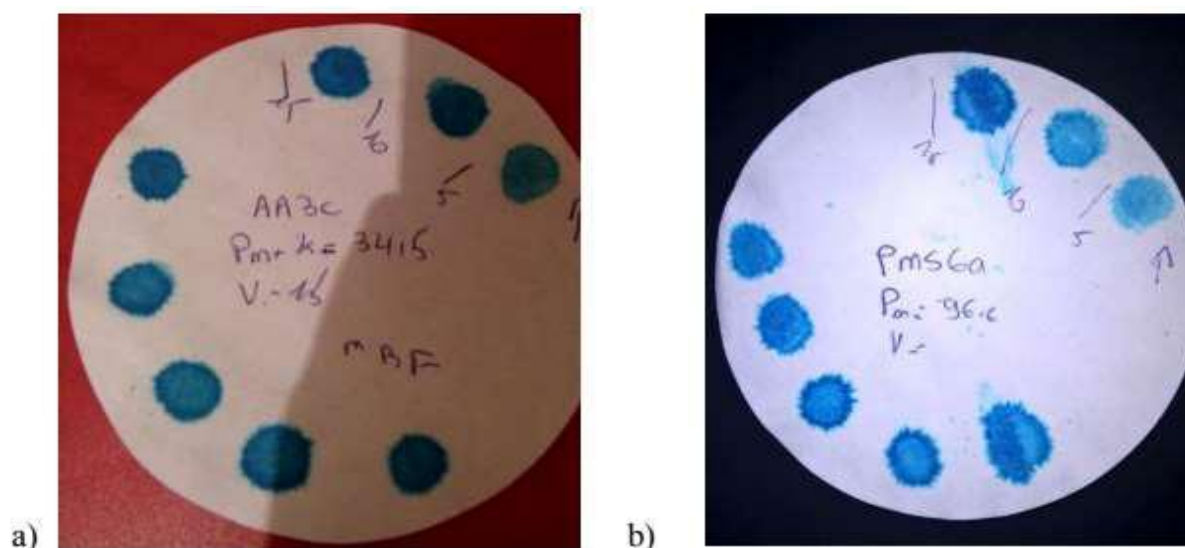


Figure II.14 : Test de la tache positif indiquant la présence de minéraux argileux dans lesable d'Ain Achire (AA3c) et dans celui de la Plage-Militaire (PMS 6a).

Cet essai a été réalisé selon les normes NF EN 933-9 et selon la feuille d'essai au laboratoire de GLOBAL CONCEPT / Laboratoire & Engineering à El Bouni/Annaba[46].

II.2.2.2. Minéraux carbonatés :

Essai calcimétriques : détermination du taux de carbonates dans les échantillons de sable.



Figure II.15 : Calcimètre de Bernard du Département de Géologie de la Faculté des Sciences de la Terre /Université Badji-Mokhtar/Annaba.

Le calcul du pourcentage de CaCO_3 dans les échantillons étudiés se fait en comparaison avec un échantillon témoin de carbonate pur (100 % CaCO_3).

Exemple de détermination du taux de carbonate d'un échantillon de sable prélevé à la plage d'Ain Achir : - Echantillon témoin ($\text{VCO}_2\%$) :

Le poids initial de notre échantillon témoin de carbonate est de 0.3g. Pour l'échantillon témoin (carbonate pur) le volume de CO_2 dégagé est :

$$\text{VCO}_2\text{t} = \text{V}_2 - \text{V}_{1\text{t}} = 261 - 65 = 196 \text{ ml de } \text{CO}_2 \text{ dégagé.}$$

Où :

VCO_2t : Volume de CO_2 dégagé par l'échantillon témoin, en ml.

V_2 : Volume final de la solution saline, en ml.

$\text{V}_{1\text{t}}$: Volume initial de la solution saline.

Sachant que le carbonate pur témoin, contient 100 % de CaCO_3 et a libéré 196 ml de

CO₂. Une simple règle de trois permet de calculer le taux de CO₂ (%) libéré par l'échantillon de sable :

Taux de CO₂ (%) libéré par l'échantillon = $(100 \times 30) / 196 = 15.31\%$

D'où le taux de carbonate (Tot CaCO₃Ech (%)) dans l'échantillon AA1a est = 15.31 %

II.2.2.3. Minéraux non argileux :

A. Etude au microscope binoculaire :

Détermination des minéraux non argileux du sable. Une première détermination de la composition minéralogique a été effectuée à la loupe binoculaire. Cette étape a permis de distinguer deux groupes de minéraux : un premier groupe dominant, constitué de minéraux transparents et de couleur sombre, un second groupe constitué de quelques rares minéraux clairs. Cette étude a été effectuée au sein du Département de Géologie de la Faculté des Sciences de la Terre de l'Université Badji-Mokhtar /Annaba.

Dans le but de faciliter l'observation minéralogique des sables, ces derniers ont été montés sur du film adhésif.



Figure II.16 : Exemple de montage des échantillons de sable sur film adhésif,

(Échantillons du sable mixte de la plage Ain Achire).

B. Etude au microscope polarisant : Des lames minces des échantillons de sable.

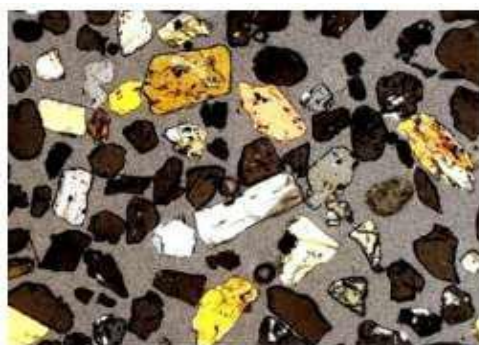


Figure II.17 : Exemple d'une lame mince d'un échantillon de sable (Plage-Militaire).

C. Etude minéralogique par diffractométrie (DRX) :

Cette étape a été effectuée avant les observations effectuées au microscope polarisant et à la loupe binoculaire. L'analyse DRX a été réalisée au laboratoire de l'Institut des Sciences de la Terre et de l'Environnement de Potsdam, Allemagne. Les échantillons ont été réduits en poudre et placés dans un porte-échantillon puis placé dans le diffractomètres de type EMPYREAN. La composition minéralogique est obtenue sous forme d'un diffractogramme[34].

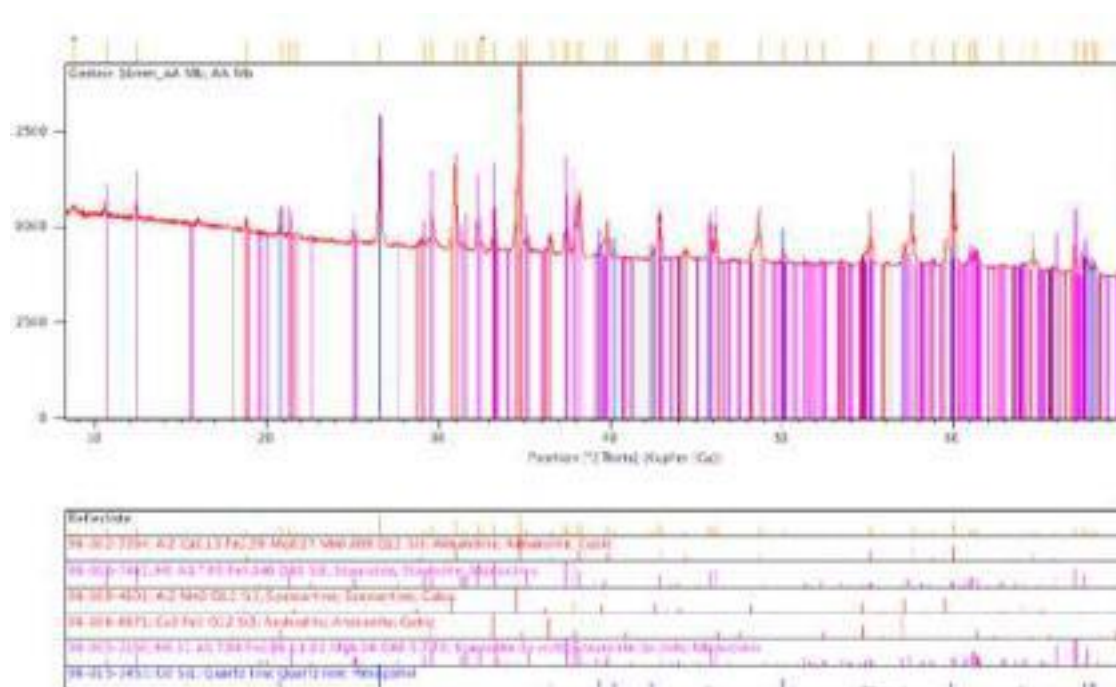


Figure II.18 : Exemple de composition minéralogique du sable sombre de la plage d'AinAchire.

II.3. Sable de carrières ou Concassée:

Le sable de carrière est le matériau de base des sols équestres. Il est exploité dans des carrières à ciel ouvert, résulte du découpage et broyage de grande pierre de carrière.

II.3.1. Analyse granulométrique :

En dessous d'une certaine taille de grains, les sables humides présentent des propriétés de thixotropie. C'est-à-dire que leur viscosité évolue en fonction de la contrainte qui leur est appliquée. C'est typiquement les propriétés physiques des sables mouvants dans lesquels plus on se débat, plus on s'enfonce. Ces propriétés s'expriment de façon intéressante pour les sols équestres pour des grains dont la taille est inférieure à 400 μm . En pratique, les sols équestres de qualité satisfaisante sont tous composés de sables de granulométrie inférieure à 0/1 [38].

Les analyses granulométriques du sable concassé (koussane) est représenté dans le tableau suivant :

Tableau II.13 : Analyse granulométrique du sable concassé (Koussane) [38].

Tamis (mm)	Refus partiels(g)	Refus Cumulées		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
6.3	0.4	0.4	0.03	99.97
5	2.2	2.6	0.22	99.78
4	2.4	5	0.42	99.58
3.15	24.3	29.3	2.44	97.56
2.5	133	162.3	13.53	86.48
2	182.4	344.7	28.73	71.28
1.6	104.3	449	37.42	62.58
1.25	85.1	534.1	44.51	55.49
0.63	242.5	776.6	64.72	35.28
0.5	61.4	838	69.83	30.17
0.315	154.1	992.1	82.68	17.33
0.2	132.8	1124.9	93.74	6.26
0.16	30.6	1155.5	96.29	3.71
0.08	41.5	1197	99.75	0.25

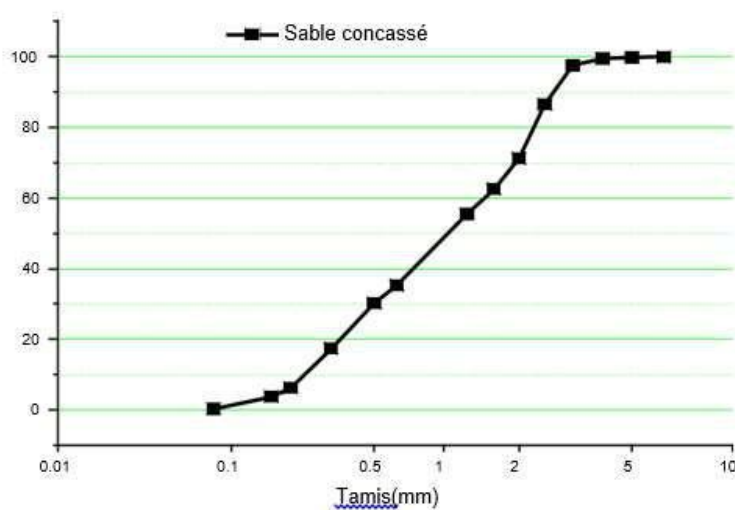


Figure II.19 : Courbes granulométriques du sable concassé(Koussane) [38].

Commentaire :

La courbe granulométrique du sable concassé est continue et séré.

II.3.2. Caractéristiques physiques du Sable Concassée (Koussane) [38].

Les résultats sont représenté dans le tableau suivant :

Tableau II.14 : Caractéristiques physiques du Sable concassée (Koussane).

Masse volumique apparente (g/cm^3)	1.48
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.6100
Equivalent de sable visuellement (ESV)	97.6
Equivalent de sable par piston (Esp)	89.34
Module de Finesse (%)	3.82
Coefficient d'Absorption (%)	3.43
Teneur en eau (%)	21.25

II.3.3. Caractéristiques chimiques :

-Cas de sable de carrière ain belbel situe dans la commune de Timokten Aoulef wilaya d'Adrar :

Tableau II.15 : Les taux des minéraux, carrières Ain belbel [39].

Désignation	Carbonates %	Chlorure %	Sulfates %	Insolubles%
	CO ₃	Cl	SO ₄	SiO ₂ +CaO + MgO + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃
Prélèvement 1	8.06 %	0.11 %	Nul	91.69 %
Prélèvement 2	10 %	0.25 %	0.21 %	88 %

Les Composition chimique des sables de carrière d'Ain belbel et d'Ain chebbi sont représenté dans le tableau suivant :

Tableau II.16 : Les compositions chimiques des sables de carrière [40].

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Ain belbel	1.66 %	0.25 %	0.62 %	42.72 %	9.79 %	0.63 %	0.17%	0.09 %
Ain chebbi	0,23 %	1.4 %	0,5 %	29.75 %	19.25 %	0,10 %	0,01 %	0,10 %

II.3.4.Caractéristiques mécaniques :

Les caractéristiques mécaniques des sables sont déterminées par rapport au coefficient de Los Angeles (L.A) et Micro Duval (M.D).

Ces caractéristiques sont résumés dans le tableau II.16 relatif au sables Ain belbel et Ain chebbi respectivement.

Tableau II.17 : Coefficient Los-Angeles et Micro-Deval,(carrière Ain belbel) [39].

N° Ech.	Type de roche	L.A%	M.D%
1	Calcaire dolomitique	18	15
2	Calcaire dolomitique	19	15.5

Les résultats de coefficient de los-angeles et micro-duval du carrière Ain chebbi sont représenté dans le tableau II.18 :

Tableau II.18 : Coéf Los-Angeles et Micro-Deval (carrière Ain chebbi) [40].

Désignation	ECH 1	ECH 2	ECH 3	ECH 4	ECH 5
Dureté essai Los-Angeles (LA)%	De 26 à 22,5	De 28.3 à 25,4	De 27.6à 23,3	De 25.6 à 21,3	De 29.8à 25,3
Attrition essai Micro-Deval(MDE)%	De 23.6 à 21,2	De 25.5 à 22,1	De 23.8à 21,9	De 23.4 à 20,2	De 27.5à 23,9

II.4. les sables des dunes [38] :

Le sable des dunes est le résultant d'une érosion et d'une sédimentation des différentes roches suivie d'un transport fluviatile et parfois éolienne.

II.4.1. Caractéristiques physiques des sables des dunes :

Les caractéristiques physiques des sables de dune sont résumés dans le tableau II.19 et II.20 :

Tableau II.19 : Caractéristiques physiques des Sable de dune de la région d'Adrar[38].

	MVapp(g/cm^3)	MVabs(g/cm^3)	ESV	ESP	CA(%)	MF	W(%)
Ouaina	1.55	2.5228	74.29	67.11	0.29	1.80	26.65
Bakhala	1.51	2.4831	96.30	94.52	0.19	1.51	26.04
Mimoun	1.64	2.5695	86.73	86.53	0.29	1.91	25.72
Ben draou	1.57	2.6085	94.18	94.23	0.18	2.40	25.98
Benoumer	1.65	2.6255	94.30	90.36	0.14	2.58	25.96
Hassilatou	1.69	2.3286	96.36	81.29	0.56	1.61	25.24
Mansouria	1.53	2.5988	92.82	90.88	0.58	2.28	25.73

Tableau II.20 : Propriétés physiques des sables du sud Algérien.

Région	Humidité naturelle en %	Masse volumique apparente (Kg/m^3)	Masse volumique absolue (Kg/m^3)
EL Golea	0.34	1590	2500
EL Oued	2.60	1420	-
Biskra	1.40	1510	-
Hassibahbah	2.62	1550	-
Ain Safra	0.50	1485	2650

II.4.2. Caractéristiques chimiques et minéralogiques des sables des dunes :

Afin de définir les caractéristiques des composants du sable, il faut réalisé les essais suivants :



La réserve minérale :

- Dosage de calcaire total (Calcimètre de BERNARD) (CaCO_3)
- Dosage de calcaire actif (CaCO_3) (%) ;
- Dosage de gypse (Dosage par attaque puis précipitation dans le chlorure de baryum) (BaCl_2) (%) ;



Solution du sol :

- Réaction du sol (pH) ;
- Conductivité électrique (CE) ;
- Dosage des sulfates (SO_4^{2-}) (még/l) ;
- Dosage des chlorures (Cl^-) (még/l) ;

Dosage des carbonates (CO_3^{2-}) et bicarbonates (HCO_3^-) (még/l).

Les résultats des analyses chimique des sables de dune sont résumé dans les tableaux II.21 et II.22 suivant :

Tableau II.21 : Caractéristiques chimique du Sable de dune.

	Symboles	Unité	Sable de dune
Teneur en Sulfates	SO_3	%	0.91
Teneur en Chlorures	Cl^-	%	0.63
Carbonate de Calcium	CaCO_3	%	-

Tableau II.22 : Analyses chimique de sable de dune d'AIN EL-BEIDA, 5 km d'Ouargla.

Type de sable	SO_3	$\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$	CaCO_3	Insolubles
Sable de dune	0.39 %	2.10 %	1.30 %	93.80 %

Les compositions chimiques et minéralogiques des sables de dune de Tamantit et Hassi latou sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau II.23 : Composition chimique et minéralogique du sable de dune de Tamantit et Hassi latou.

Composition		Symbol	Unité	Sable de dune de Tamantit	Sable de dune de Hassilatou
Minéralogique	Calcaire total	CaCO ₃	%	8.31	7.06
	Calcaire actif	CaCO ₃	%	2.5	2.5
	Gypse total	CaSO ₄	%	0.553	0.159
Chimique	pH (1/2.5)	pH	-	8.47	9.01
	Conductivité électrique	CE	ms/cm	1.48	1.94
	Sulfate	SO ₄ ⁻²	még/l	0.646	0.262
	Chlorure	Cl ⁻	még/l	0.0201	0.0271
	Carbonate	CO ₃ ⁻²	még/l	-	-
	Bicarbonate	HCO ₃ ⁻	még/l	0.0106	0.001

II.4.3. Caractéristique physico-chimiques des sables des dunes :

Les résultats des propriétés physico-chimiques des sables des dunes des différentes régions du sud algérien sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II.24 : Les résultats des propriétés physico-chimiques de sable de dune des différentes régions du sud algérien [38].

	Hassi bahbah	Djelfa	Laghouat	Ghardaia	Ouargla	El Golea
Granulométrie continue	Continue 3% de fins	Continue 1.3 % de Fins	Continue 1.8 % de fins	Continue 2.4 % de fins	/	/
Classe (0/D) en mm	0/0.425	0/0.63	0/0.63	0/0.425	0/0.425	0/0.5
Module de finesse	1.13	1.11	1.20	1.10	0.93	1.47
Densité absolue (Kg/m ³)	2549	2655	2630	2764	2627	2570
Densité apparente (Km/m ³)	1459	1540	1480	1520	1644	1774

propreté	ESv	92	94	93	88	94	93
	ESp	81	89	89	80	84	88
Eléments nocifs (%)	Matiere organiques	/	1.14	/	/	/	/
	Sulfates et sulfures	/	0.55	0.91	0.69	/	/
	Chlorures	/	0.00035	0.0007	0.00053	/	/

II.4.4. Analyse granulométrique :

Les résultats de l'analyse granulométrique des sables de dunes de déférente région d'Algérie sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau II.25 : analyse granulométriques des sables de dunes de déférente région.

Tamis (mm)	5.0	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	0.125	0.08
EL Goléa	100	100	99.76	27.13	18.27	9.57	1.46	/
EL Oued	100	100	99.46	91.24	65.59	9.12	0.65	/
Biskra	100	100	99.37	83.84	/	6.89	1.58	/
HassiBahbah	100	99.98	99.91	99.30	92.71	68.67	4.34	0.57
Ain Safra	100	99.99	99.97	99.95	95.86	54.23	2.72	0.01

II.4.5. Classe Granulaire de Sable de la dune de Bakhala :

Les résultats d'analyse granulométrique et analyses fractale des sables de dunes de bakhala sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau II.26 : Analyses granulométriques et Analyse fractal de sable de la dune de bakhala.

Analyse Granulométrique				Analyse Fractale			
Tamis	Masse des refus	Pourcentage		Masse Volumique	Volume de Graine		
		Cumulé					
Ouverture	1.2	Refus	Tamisât	Pr	$(\pi/6)*G3$	1.2	Cumulés (Ec)

(mm)	Partiel (Kg)	Cumulé (Kg)	%	%	kg/m ³	m ₃		
1.250	0.00	0.00	0.00	166	2483.100	1.02E-09	0.00E+00	0.00E+00
0.630	0.00	0.00	0.00	166		1.31E-10	0.00E+00	0.00E+00
0.500	0.00	0.00	0.19	...61		6.54E-11	1.40E+04	1.40E+04
0.315	0.76	0.76	63.30	38.8		1.64E-11	1.86E+07	1.87E+07
0.200	0.31	1.07	89.40	16.8		4.19E-12	3.01E+07	4.88E+07
0.160	0.03	1.10	91.80	6.2		2.14E-12	5.41E+06	5.42E+07
0.080	0.10	1.20	99.80	6.2		2.68E-13	1.44E+08	1.98E+08
0.063	0.00	1.20	99.94	6.68		1.31E-13	5.17E+06	2.04E+08

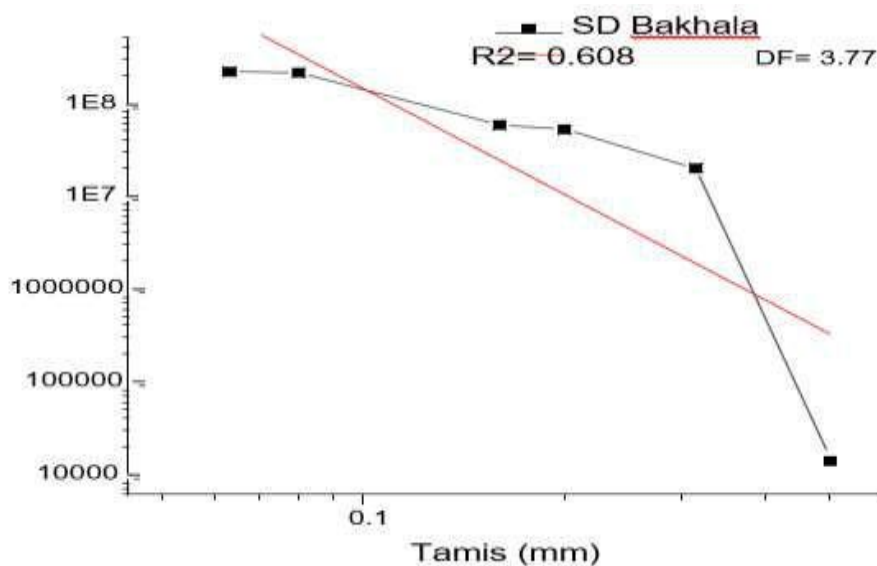


Figure II.20 : Courbe fractal de sable de la dune de bakhala.

Interprétation :

D'après la droite fractale la courbe granulométrique est continue.

Identification de cette distribution est de $DF= 3,77$ et coefficient de corrélation

$R^2 = 0.608$, et étendu granulaire de d_{min} est $0.036mm$, et D_{max} est $1,25mm$

II.5.les sable alluvionnaire :

C'est un sable qui se trouve tout le long des oueds et des rivières , un Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.

Les études (physiques, chimiques et granulométriques) de deux types de sable sable alluvionnaire et sable de dune de la wilaya d'ouargla

- sable de dune d'AIN EL-BEIDA, 5 km d'Ouargla.
- sable alluvionnaire de H.ESSAYEH, 30km d'Ouargla.

II.5.1. Caractéristiques physiques des sables alluvionnaires :

Les résultats des caractéristiques physiques des sables alluvionnaires et sables de dunes étudié sont représentées dans le tableau II.27 :

Tableau II.27 : Caractéristiques physiques du différent sable utilisée.

Caractéristiques	Granulats fin		
	Volumique	Sable alluvionnaire	25% (S.D.D) +75% (S.A)
Masse volumique apparente (kg/m^3)	1.40	1.41	1.41
Masse volumique absolue (kg/m^3)	2.52	2.45	2.48
E_{tot} (Eau totale) %	0.058	0.314	0.226
E_h (Eau humide) %	0.234	0.638	0.453
ESV(%) Equivalent de sable visuellement	- 0.176	- 0.324	- 0.227
ES (%) Equivalent de sable par piston	96.7	78.76	81
Mf Module de finesse	1.02	2.40	2.36

II.5.2. les compositions chimiques :

D'après l'analyse chimique réalisée au laboratoire d'OUARGLA (LTPS), le tableau ci-après présente les pourcentages des éléments rentant dans les compositions chimiques de chacun de ces sables.

Tableau II.28 : Analyse chimiques des sables utilisés.

Type de sable	SO3	CaSO4,2H2O	CaCO3	insolubles
Sable alluvionnaire	0.00 %	0.03 %	3.04 %	90.48 %
Sable de dune	0.39 %	2.10 %	1.30 %	93.80 %

II.5.3. Analyse granulométrique :

Les résultats des essais des analyses granulométriques des différents sables sont présentés dans le tableau suivant :

Les résultats de fusion entre un sable alluvionnaire et un sable de dune

Tableau II.29 : Analyse granulométrique des différents sables utilisée.

	Tamis	5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.160	0.08
Sable de dune	Tamisât (%)	100	100	100	99.84	78.32	10.62	0.7
Sable alluvionnaire		99.18	96.46	88.36	63.34	16.40	2.15	0.
25 % SDD +75 % SA		99.59	97.97	92.77	75.98	30.76	3.98	0.57

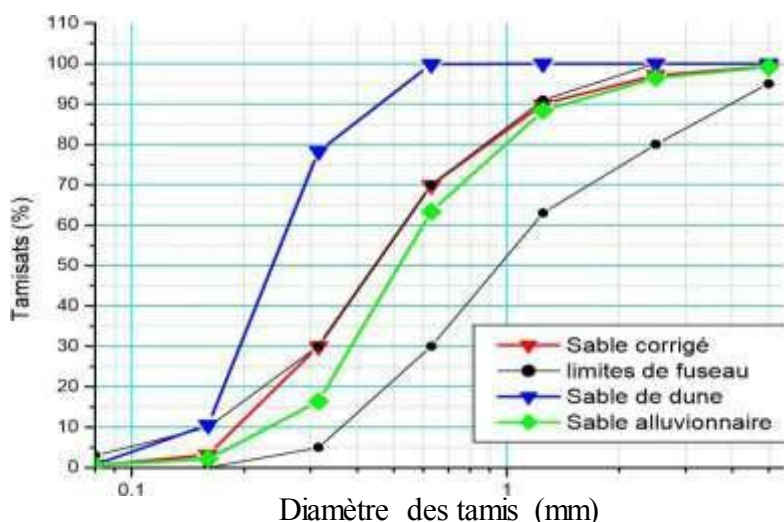


Figure II.21: Courbe granulométrique des différents sables avec le fuseau granulaire.

Conclusion :

Les ensembles d'études effectuées sur les différents types de sables (sable de plage, sable de carrière, sable des dunes et sable d'oueds) de différentes régions d'Algérie ont mené aux résultats suivants :

- Les sables de plages : D'après les résultats obtenus des études, le sable de plage est généralement grossier.
- Les sables de carrières : d'après les résultats obtenus le sable de carrière est un sable grossier, riche en calcaire et dolomite.
- Les sables des dunes : les résultats obtenus sur les sables de dune montrent qu'ils sont considérés comme des sables fins.
- Les sables d'oueds : les résultats obtenus montrent que les sables des oueds sont grossiers, et c'est un sable propre.

Chapitre III :
Domaines d'usage
industriel de chaque
type de sables

III. Domaines d'usage industriel de chaque type de sables :

III.1.Introduction :

Les sables qui ont un usage industriels sont des sables extra-siliceux, avec plus de 98 % de silice, ou des sables silico-argileux contenant jusqu'à 30 % d'argile. Entre ces deux extrêmes, tous les sables (de carrières, dunaires, plages et oueds) avec 70 à 98 % de silice sous forme de quartz, trouvent des applications diverses dans les domaines d'industries.

Outre les teneurs en silice, alumine et fer, ce dernier composant ayant une très grande importance en verrerie, la granularité est également un facteur déterminant pour l'utilisation du sable. Dans la plupart des cas on utilise des sables de granularité inférieure à 500 μm , avec une majorité des grains de diamètre compris entre 150 et 300 μm [41].

Les applications essentielles pour les sables extra-siliceux sont la verrerie, la fonderie (noyautage), la céramique (dégraissant), et pour les sables silico-argileux la fonderie (moulage), la céramique (fondant). Les sables siliceux trouvent d'autres applications dans divers domaines avec les abrasifs, la filtration, les produits réfractaires, les bétons cellulaires....

III.2.Caractéristiques des matières premières :

Les formations géologiques potentiellement utilisables comme sources de matières premières pour la production de sables à teneur en $\text{SiO}_2 > 95\%$ sont de trois types [41] :

- ✚ **formations détritiques meubles** : très recherchées et constituant le tonnage principal exploité, il s'agit de :
 - sables siliceux : grains de quartz.
 - sables kaoliniques : quartz + kaolin.
 - sables feldspathiques : quartz + feldspaths plus ou moins altérés.
- ✚ **formations détritiques plus ou moins consolidées** : recherchées lorsqu'elles sont peu cohérentes ou faciles à exploiter :
 - grès siliceux : quartz $> 95\%$.
 - grès quartzitique : fortement cimenté.
 - Quartzite : massif, dépourvu de structure granulaire.

✚ **produits d'altération** : sur place de roches cristallines ; ce sont certaines arènes, des arkoses kaolinisées..., qui prennent parfois, localement, un faciès de sables siliceux kaoliniques ou feldspathiques.

Les formations les plus sollicitées sont celles qui n'impliquent pas de traitement sophistiqué et qui présentent par ailleurs une bonne homogénéité et un bon tri granulométrique ($D^{\circ} < 1 \text{ mm}$). Il s'agit des sables siliceux fins, marins ou continentaux (fluviaux ou éoliens).

Les sables concassés ou semi-concassés (grains anguleux abondants) sont généralement proscrits en fonderie, ce qui limite les possibilités d'utilisation des formations cimentées et massives.

Les sables kaoliniques et feldspathiques sont exploités en priorité pour le kaolin et les feldspaths.

Les sables siliceux obtenus comme "sous-produits" à l'issue du traitement, possèdent généralement des caractéristiques qui les destinent préférentiellement aux marchés de la fonderie et divers (abrasifs, filtration, charges, ...)

Les sables de moulage naturels ($\text{SiO}_2 = 80 \text{ à } 92 \%$, argile = 8 à 20 %), ne posent généralement pas de problèmes de ressource, étant donné la relative abondance des formations sablo-argileuses possédant des caractéristiques adéquates et l'abandon progressif de leur emploi.

III.2.1.Sables extra-siliceux : Leurs caractères communs principaux sont leur richesse en silice ($\text{SiO}_2 > 98 \%$), leur grande pureté et leur finesse [41].

- $\text{SiO}_2 > 99 \%$
 - Verrerie (cristallerie, miroiterie, verre ordinaire). Le pourcentage admis de Fe_2O_3 varie de 0,015 à 1 % selon la qualité du verre désiré.
 - Céramique fine : (grès émaillés, grès-cérame, grès fin, porcelaine, porcelaine électrotechnique, produits sanitaires, meules et corps abrasifs.)
- $\text{SiO}_2 > 98 \%$ avec $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,4 \text{ à } 0,5 \%$ et $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,2 \%$
 - Fonderie : sable de noyautage et sables synthétiques de moulage.
 - Céramique ordinaire : dégraissant.
 - Abrasifs : égrisage du verre, décapage, sciage, polissage.
 - Filtration.
 - Construction : bétons cellulaires.

- SiO₂ > 98 % avec Al₂O₃ < 0,4 % et Fe₂O₃ < 0,2 %.
 - Métallurgie : préparation de certains alliages,

III.2.2.Sables siliceux [41] :

- SiO₂ compris entre 95 et 98 %
 - Fonderie : sables de moulage "synthétiques".

III.2.3.Sables silico-argileux et argileux [41] :

- SiO₂ compris entre 80 et 95 %
 - Fonderie : sables de moulage "naturels" .

III.3.L'usage du sables dans la verrerie :

III.3.1.La matière première :

Le verre est un matériau, composé de nombreux oxydes, mais le plus souvent élaboré à partir des trois constituants de base : l'oxyde de silicium (SiO₂), l'oxyde de sodium (Na₂O) et l'oxyde de calcium (CaO). Pour des nombreux verres industriels (verre d'emballage et verre plat) ces trois éléments représentent environ 95 % de leur composition pondérale, ce qui permet de définir le verre sur un plan chimique comme un silicate de sodium et de calcium. La silice trouvée abondamment dans la nature sous forme de sable (quartz), ces derniers sont à l'exception du sable composés à plus 99 % de SiO₂ (les sables quartzeux riches en SiO₂). Bien que les verres usuels soient constitués entre 60 et 80 % de son poids ; c'est le principal élément dit d'oxyde formateur de réseau « vitrifiant »

Les caractéristiques d'une matière première verrerie contiennent obligatoirement des spécifications techniques [42]. Il s'agit essentiellement des niveaux de la granulométrie, de l'humidité et du seuil des impuretés surtout l'oxyde de fer, responsable de la coloration verte.

Le verre flotté standard contient près de 0,1 % de Fe₂O₃, le verre de flaconnage 5 fois moins et certains verres de couleur 5 fois plus. L'alumine est un constituant mineur du verre sodocalcique dont elle améliore la résistance hydrolytique, lorsque sa teneur est moins de 0,6 %. Chaque usine sélectionne elle-même ses matières premières afin de produire un verre de qualité voulue au meilleur prix de revient.

Le verre se décline en plusieurs classes dont le (tableau III.1) résume quelques compositions chimiques caractéristiques. On peut citer, par exemple et les verres sodocalciques, les verres borosilicates [42].

Tableau III.1 : Composition chimique de quelques verres.

Composants (%)	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃
Verre plat	72,5	00,0	1,5	13	0,3	9,3	3,00	0,00
Verre à bouteilles	73,0	00,0	1,0	15	0,0	10	0,00	0,05
Pyrex (borosilicates)	80,6	12,6	2,2	4,2	0,0	0,1	0,05	0,05

La composition chimique conditionne la qualité du verre ainsi que le processus d'élaboration et de mise en forme. Car l'aptitude à la vitrification, est fonction de la proportion des oxydes formateurs et modificateurs dans le mélange initial.

III.3.2. Elaboration du verre:

L'élaboration du verre est l'ensemble des opérations au cours desquelles le mélange vitrifiable des matières premières est transformé en une masse liquide homogène de viscosité convenable pour être ensuite mise en forme. Pour fabriquer un verre ayant des propriétés spécifiques on fait appel à des considérations physico-chimiques pour le choix des constituants. En effet, hormis les traitements post-fabrication, c'est essentiellement la proportion des divers constituants chimiques dans le mélange initial qui détermine les propriétés du verre [43].

On distingue traditionnellement trois étapes dans le processus d'élaboration du verre : la fusion, l'homogénéisation avec l'affinage et le conditionnement thermique.

a. Stade de fusion :

stade de dissolution de la matière première et stade de formation du verre. Dans cette première phase, les réactions démarrent rapidement au dessous de 800°C. Lorsque les matières sont plus fusibles tels que les carbonates et les sulfates de sodium ainsi que la dolomie et le calcaire, ils commencent à fondre, il y a attaque du sable et dégagement de CO₂ résultant de la décomposition des carbonates. Mais si la

température reste relativement basse au dessous de 1000 °C, la réaction se ralentit très vite car au fur et à la mesure de la dissolution du sable dans les carbonates, le liquide devient de plus en plus visqueux, dans cette première phase la dissolution du sable est de 70 % [42].

b. Stade de formation du verre :

Dans cette phase la température augmente jusqu'à 1400°C. Le verre devient plus liquide à ce niveau, et la réaction peut se poursuivre jusqu'à la dissolution complète du sable. La couche superficielle étant fondue, les couches sous adjacentes s'échauffent à leur tour et la fusion se poursuit progressivement. Il reste des grains de sable rassemblés à la surface du verre, ils sont attaqués ensuite par le sulfate de soude qui réagit à haute température que les carbonates.

c. L'affinage et l'homogénéisation :

De nombreuses réactions chimiques se produisent au cours de la fusion formées par des quantités importantes de CO₂, N₂ et SO₂ dans le bain de verre fondu et en partie s'éliminent sous formes de bulles gazeuses en mouvement ascensionnel à l'intérieur du bain de verre : c'est la phase d'affinage du verre. Pour accélérer cette phase, les bulles n'atteignent pas la surface du bain de verre à cause de la viscosité du verre fondu élevée, afin de remédier à ce problème, la température du verre est légèrement augmentée afin de diminuer sa viscosité. Pour faciliter l'élimination des bulles, on peut introduire dans ce bain des agents d'affinage (essentiellement du sulfate de sodium ou calcium). Pour obtenir une bonne qualité de verre, il est nécessaire d'avoir une phase d'agitation mécanique du bain de verre. Cette opération ne peut se faire que par des courants de convection naturels, générés par l'existence de gradients thermiques à l'intérieur du four et en particulier par les écarts de température entre le fond du four plus froid et la surface plus chaude. Cette opération de brassage est indispensable pour homogénéiser le verre en cours d'élaboration, et terminer les opérations de dissolutions des matières premières encore existantes [44].

d. Le conditionnement thermique :

Au début de l'opération de mise en forme, la viscosité du liquide doit être au moins dix fois plus élevée que pendant l'affinage, il faut donc obligatoirement abaisser la température du verre. En pratique, on le laisse se refroidir et, pour éviter les forts gradients de viscosité, on fait en sorte que ce refroidissement soit très lent [2].

III.4.L'usage du sables dans l'industrie Céramique fine : (grès émaillés, grès-cérame, grès fin, porcelaine électrotechnique, produits sanitaires, meules et corps abrasifs.) [45].

III.4.1. Procédé de fabrication des céramiques fine :

III.4.1.1. Procédés de fabrication : L'organigramme général de fabrication d'une céramique comporte plusieurs étapes comme le montre la (figure III.1.) :

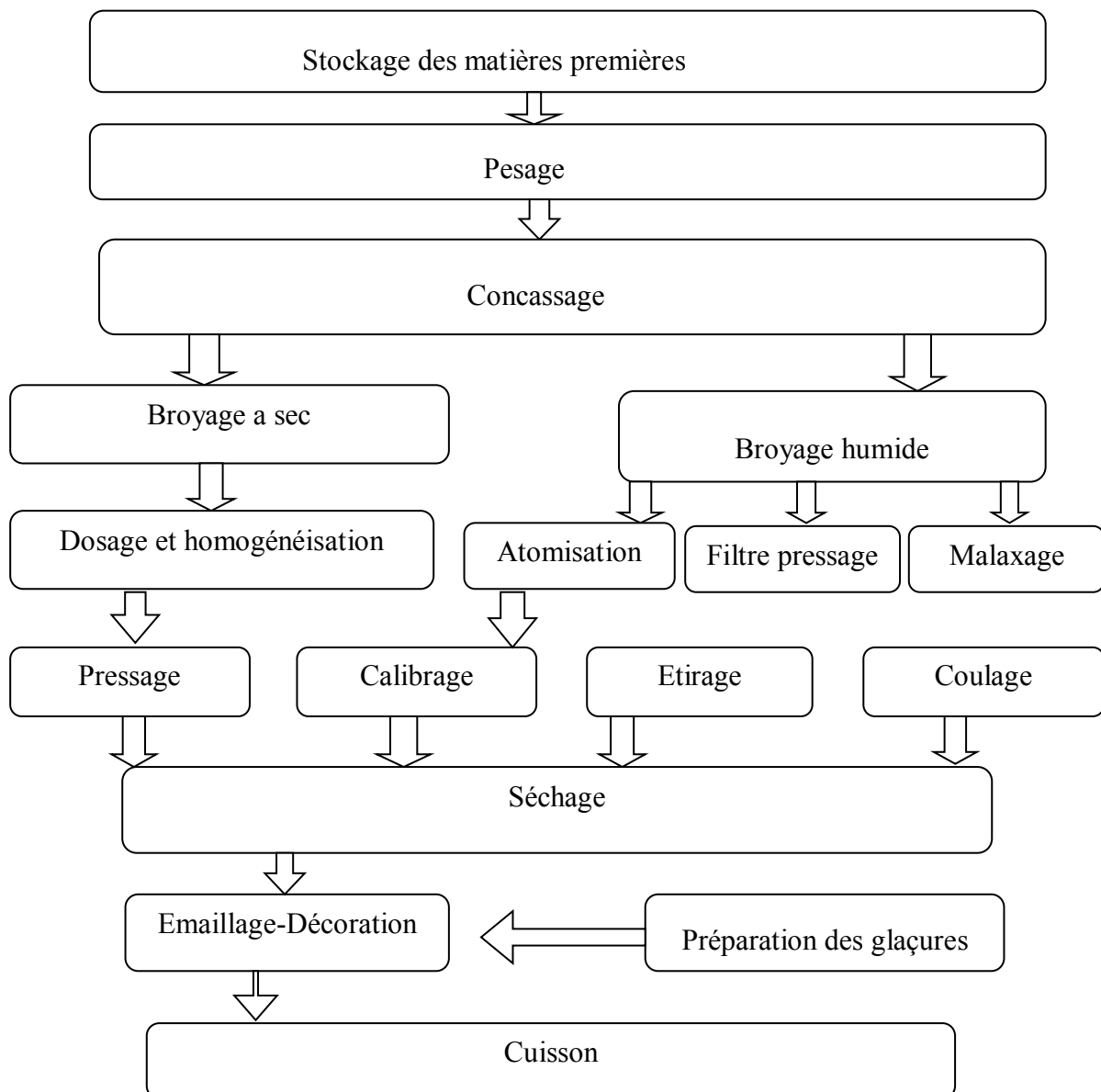


Figure III.1: Procédé de fabrication des céramiques et porcelaines.

III.4.1.2. Préparation de la poudre :

Définition : La poudre est définie comme étant un système dispersé ou concentré de particules argileuses qui ne possèdent pas de cohésion entre elles, mais cette poudre pulvérisée doit avoir l'aptitude à être travaillée [46].

La poudre est caractérisée par [46]:

- ✓ La granulométrie.
- ✓ L'humidité.
- ✓ L'homogénéité de l'humidité c'est-à-dire la répartition de l'humidité dans la masse de la poudre.
- ✓ La densité.

Il existe deux méthodes pour parvenir à la synthèse des matières premières :

La première est une préparation par voie solide pour laquelle on utilise des matières premières de base pulvérulentes (oxydes, carbonates, nitrates). Celles-ci sont ensuite mélangées et broyées avant de subir l'opération de chamottage ou calcination. Cette dernière consiste à faire subir aux matériaux pulvérulents un cycle thermique au cours duquel ils vont, par des phénomènes de diffusion en phase solide, réagir et former la phase cristalline recherchée. A l'issue du chamottage, le matériau constituant de base de la céramique est disponible [47].

La seconde est une préparation par voie chimique. La préparation par voies chimiques sous pression atmosphérique normale regroupe un ensemble de techniques de synthèse dont l'idée consiste à former des précipités ou des gels à partir d'une solution homogène contenant les cations désirés, puis à calciner ces précipités pour former la phase et la microstructure recherchées. Par exemple, le titanate de baryum, matériau particulièrement important dans l'industrie, des composants électroniques céramiques, peut être synthétisé par de telles techniques. Dans la majorité des cas, ces méthodes de synthèse permettent d'obtenir des poudres dont les caractéristiques (finesse, homogénéité...) sont nettement supérieures à celles obtenues par chamottage [47].

La synthèse hydrothermale diffère des autres voies « chimiques » d'élaboration d'oxydes métalliques par les conditions de température et de pression mises en œuvre. Cette élaboration

se fait par dissolution des précurseurs suivie d'une précipitation. L'influence des facteurs pression et température est de favoriser la cristallinité des particules solides [47] [48].

Une fois cette synthèse réalisée, il faut préparer et activer les poudres. L'étape suivante est l'étape de mise en forme, suivie de l'étape de frittage. La dernière opération est l'étape de finition et de contrôle.

III.4.1.3. Préparation de la composition :

A. Calcule de la composition de la pâte : calculer la composition d'une pâte de la porcelaine, consiste à indiquer les quantités pondérales des matières premières entrant dans la formulation. Ce mode de représentation est couramment utilisé dans la fabrication. On distingue :

- **Composition représentée par la formulation stœchiométrique (moléculaire) :** utilisé plus particulièrement dans la composition des émaux.
- **Composition représentée par la formulation rationnelle :** celle-ci donnera les pourcentages des différents minéraux qui la composent.
- **Composition représentée par l'analyse chimique centésimale :** elle fait apparaître le pourcentage de différent oxyde constituant la pâte ou l'émail et ainsi donner une meilleure idée de la composition étudiée. Elle nécessite, donc, la connaissance de l'analyse chimique de chacun des constituants [49].

B. Analyse granulométrique : les matières premières qui sont livrées dans des conditions granulométriques satisfaisantes (cas de l'argile) sont mises en suspension (délayage) alors que les matières dures (quartz, alumine) exigent un broyage. Ce traitement peut être effectué à sec ou par voie humide, ce dernier est souvent le plus réalisé :

- Broyage par voie humide : la réduction des dimensions des particules (quartz) se fait en présence d'eau dans des broyeurs cylindriques à axe horizontal comportant un tambour métallique, avec revêtement interne en céramique, et charge de corps broyeurs (billes, cylindres....) [50].

C. préparation des mélanges (la pâte) :

La technique de préparation dépend du procédé de façonnage utilisé. Ainsi, pour étirage, les mélanges sont préparés sous forme de pâtes plastiques.

Pour le coulage les argiles sont mises en suspension dans l'eau puis des dégraissants et des fondants sont ajoutés pour former une barbotine.

En calibrage, des galettes sont préparées par étirage d'une pâte résultant du filtre pressage

d'une barbotine.

Pour le pressage, les poudres sont obtenues, soit par atomisation (séchage par pulvérisation) d'une barbotine, soit par granulation en voie semi humide.

D'autres méthodes de préparation plus récemment développées, pour les céramiques techniques méritent d'être signalées comme l'obtention de poudres par méthodes chimiques (procédés sol gel...) par laser dans un plasma [45].

III.4.1.4. Façonnages (mise en forme) : différents procédés sont utilisés :

a) **Etirage** : après avoir été désaérée, la pâte est propulsée à travers une filière dans une étireuse.

Un coupeur assure la mise à longueur des produits qui sont ensuite séchés (fabrication de tubes, carreaux...).

b) **Coulage** : la barbotine est versée dans un moule en plâtre, réplique en négatif de la forme à façonner. En aspirant l'eau de la barbotine grâce à son réseau de capillaire. Le plâtre assure la formation d'un dépôt.

Après l'élimination du surplus de barbotine et raffermissement du dépôt, le moule est ouvert et la pièce extraite est mise à sécher (fabrication des sanitaires, de certaines pièces en faïence ou en porcelaine). De nouvelles installations très sophistiquées de coulage sous pression, dans des moules en résines, commencent à remplacer cette technique.

c) **Calibrage** : la galette de pâte, plaquée contre un moule qui donne la forme intérieure de l'objet, est soumise à l'action d'un outil profilé dont la rotation confère la géométrie extérieure (fabrication des assiettes...).

d) **Pressage** : il peut être effectué à froid ou à chaud et être :

- **Unidirectionnel** : la poudre granulée qui remplit la cavité d'un moule métallique est soumise à une pression verticale (fabrication de carreaux, de briques réfractaires etc.).
- **Isostatique** : la poudre granulée est soumise à une pression identique dans toutes les directions (fabrication de certains réfractaires et céramiques techniques, d'assiettes etc.).

Parmi les méthodes récemment développées, nous citons aussi :

- **Le coulage en bande** : pour le façonnage de feuilles minces pour l'électronique.
- **L'estampage** : pour les pièces décoratives et diélectriques de condensateurs céramiques et porcelaines.
- **Le moulage par injection**, pour le façonnage de céramique de formes compliquées [45].

III.4.1.5. Traitement thermique : Ils comprennent le séchage dans le cas du façonnage par coulage ou à l'aide de pâte plastique (extrusion, calibrage), et en outre, la cuisson céramique quand le traitement thermique entraîne la formation d'une phase vitreuse pour lier les cristaux dispersés ou le **frittage** quand la densification s'effectue par liaison directe des grains cristallins entre eux. Ces deux derniers traitements constituent la phase essentielle de la technologie céramique [51] [52].

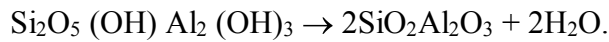
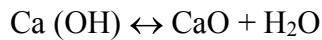
L'eau contenue dans les matières peut être de plusieurs types [47] :

- a- L'eau d'interposition ou d'imbibition :** Elle est retenue par simple entraînement mécanique. On l'extrait facilement par un chauffage à 100°C, ou par le vide, ou par exposition dans une atmosphère desséchante sur P_2O_5 , ou SO_4H_2 . Cette eau peut être reprise facilement.
- b- L'eau d'absorption ou eau liée :** Cette eau est retenue par l'action de surface ou les ions du réseau cristallin
Elle dépend de la surface spécifique de l'échantillon, c'est-à-dire de son état de finesse et non pas de sa constitution, et la tension de vapeur du milieu, son élimination demande généralement une énergie très basse.
- c- L'eau zéolithique :** Elle est insérée entre les feuillets ou dans les lacunes de réseaux des composés cristallisés. Ces corps constituent des hydrates non stœchiométriques dans lequel les molécules d'eaux sont distribuées de façon variable à travers un réseau permanent. Pour son élimination, il faut une énergie supplémentaire pour vaincre les forces de liaison (van der Waals). Le départ de ces sortes d'eau ne détruit pas la structure cristalline.
- d- L'eau de cristallisation :** Qui constitue l'eau des hydrates stœchiométriques. Les molécules d'eau entrent dans la composition de la structure du cristal. L'élimination de cette eau détruit le cristal sans la destruction de la molécule du corps. L'exemple type est le gypse $SO_4Ca, 2H_2O$.
- e- L'eau de constitution :** Ce n'est pas une molécule d'eau à proprement dite mais des groupements de OH intégrés dans la structure cristalline et liés à la composition chimique du composé. L'élimination de deux OH donne lieu à la formation d'une molécule d'eau et à la libération d'un atome d'oxygène qui reste lié à l'ensemble de la molécule $2H= H_2O + O$, ce qui entraîne la formation d'un nouveau corps.

La destruction de la molécule primitive, conduit soit à un équilibre mono variant,

ou bien à une réaction irréversible (cas de la Kaolinite).

Exemple:



III.4.1.6. Le séchage :

A. principe et utilité du séchage : Quel que soit le mode de façonnage utilisé, les pâtes céramiques contiennent toujours une quantité d'eau ayant servi à son façonnage qui doit être évacuée afin d'éviter les fentes, la casse des pièces due à un échauffement rapide lors de la cuisson [51] [45].

B. Effet du séchage :

- ❖ **Durcissement :** Au fur et à mesure que les pâtes perdent leur eau, elles perdent leur plasticité et deviennent plus rigides, ce qui permet leur manipulation.
- ❖ **Retrait et perte de poids :** l'eau qui s'évapore provoque une perte de poids et une diminution de volume due au rapprochement des particules argileuses. On distingue deux phases :
 - **Première phase :** le retrait est proportion au poids d'eau éliminée. C'est le départ de l'eau libre (l'eau colloïdale).
 - **Deuxième phase :** l'eau s'évapore sans retrait de la pâte, celle-ci devient poreuse, le volume des pores correspond au poids éliminé dans cette phase. C'est le départ de l'eau liée.

L'évaporation de l'eau se fait à partir de la surface de la pièce, l'eau contenue dans la pièce doit pour être éliminée, migrer de l'intérieur vers l'extérieur de la pièce pour éviter les différences de retrait dans la masse de la pièce pendant la phase dangereuse (retrait) il faut :

- ralentir l'évaporation superficielle de l'eau.
- Accélérer le cheminement de l'eau à travers les pièces [51].

III.4.1.7. La cuisson :

La cuisson est l'ultime étape de fabrication des produits céramiques. Elle vise à donner aux produits les qualités propres à l'utilisation projetée (invariabilité, résistance solidité, de la forme) [53].

Lors de cuisson la température varie selon un processus fixé, le produit subit un cycle thermique formé par trois zones principales [54] :

A. Zone de préchauffage : Elle est composée de sous-zones suivantes :

- Température ambiante à 200 °C.
- De 200 à 400 °C.
- De 400 à 600 °C.
- De 600 à T° maximale.

B. Zone de cuisson : proprement dite : c'est un palier.

C. Zone de refroidissement : Elle est composée de 3 sous-zones :

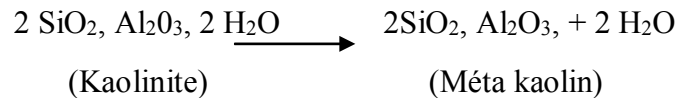
- Refroidissement brusque (rapide) : de la température de cuisson à 700 °C.
- Refroidissement lent : de 700 °C à 400 °C.
- Refroidissement accéléré de 400 °C à 50 °C.

La cuisson proprement dite se déroule en deux phases durant les quelles plusieurs transformations physiques (dilatation thermique simple, transformation allotropique, fusion de certaines compositions) et chimiques (départ de l'eau résiduelle, décarbonatation, transformation des silicates d'alumine) se produisent et qui sont conditionnées par trois facteurs fondamentaux : la température, le temps et l'atmosphère dans le four. Pour aboutir finalement à un produit à texture consolidée par rapport à l'état initial. Ce processus de modification de texture (microstructure) est appelé (céramisation).

La première phase : de la température ambiante à T = 975 °C environ :

- Au début, les roches constituent l'ossature et le fondant ne réagissent pas et évoluent suivant leur courbe de dilatation propre ; l'élimination de l'eau zéolitique se fait d'une manière continue (sans modifier la structure) au cours de la chauffe entre T= 100 °C à 180 °C.
- A partir de T ≈ 400 °C, commence la décarbonatation (la décomposition des carbonates) pour donner l'oxyde correspond et le gaz carbonique.
- Le phénomène le plus important est la transformation allotropique à T = 573 °C du quartz α en quartz β , est accompagné d'un gonflement brusque du quartz (augmentation du volume du matériau de 3 à 7%).
- Par contre, les aluminosilicates subissent une transformation irréversible, en perdant leur eau de constitution entre 400 et 700 °C. Dans le cas des matières argileuses, à T =

700 °C est pratiquement déshydratées, pour donner le méta kaolins (silice libre et l'alumine) à partir de la kaolinite (minéral essentiel de l'argile) :



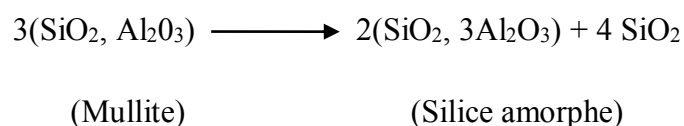
Cette perte d'eau est accompagnée de deux phénomènes importants ; le retrait qui modifie profondément la structure des silicates en formant un réseau cristallin désordonné, beaucoup plus réactif vis-à-vis des agents chimiques et l'absorption de chaleur qui peut provoquer un gradient de température qui, par conséquent, est susceptible de causer des fissurations dans les pièces surtout celles qui sont massives.

- De 800 °C à 950 °C : le réseau du méta kaolin se désorganise de plus en plus pour permettre à la silice et alumine de se combiner en partie à l'état solide et se recristallisent pour donner une phase amorphe appelée (pro-promullite) vers T = 975 °C, cette dernière développerait une phase spinelle formée d'alumine γ et de germes de Mullite, nommée (promullite) ou mullite primaire. Ainsi les argiles et kaolins se trouvent sous forme de Mullite et silice.

La deuxième phase : de T = 975 °C a la température maximale :

Dans cette deuxième phase il y aura essentiellement formation d'une seconde génération de la mullite avec élimination de la porosité. Selon le fondant utilisé on a :

- **Le fondant est du feldspath :** les fondants feldspathique (potassiques, sodiques...) se fondent pour donner une phase liquide. Cette dernière peut, avec l'augmentation de la température jusqu'à T = 1200 à 1220 °C. Dissoudre le quartz en donnant un verre (phase vitreuse liquide) qui dissout à son tour la mullite primaire. Le verre s'enrichit alors en silice et en alumine d'où saturation et recristallisation de mullite secondaire avec séparation de la silice amorphe ;



Le moulage par injection, pour le façonnage de céramique de formes compliquées.

Une quantité du verre résultant de la fusion des feldspaths, enrobe les cristaux solides restants. Par conséquent se produit l'élimination de la porosité sous l'action conjuguée des forces capillaires et de la tension superficielle de la phase vitreuse.

- **Les fondant est un carbonate** : dans ce cas la silice de la première phase se combine avec les oxydes résultant de sa décarbonatation et d'autres impuretés pour former le verre liquide qui assure la formation de la deuxième génération de la mullite et l'élimination de la porosité fermée. Alors que la porosité ouverte reste encore. C'est pour cette raison on fait le frittage [49] [50].

III.4.1.8. Le frittage :

Définition du frittage : le mot frittage peut prendre les définitions suivantes :

- ❖ Le frittage est l'ensemble des phénomènes de consolidation, densification et compactage des mélanges à cause des réactions chimiques et la dissolution des phases entre elles.
- ❖ Le frittage est une opération effectuée dans la métallurgie des poudres pour réaliser par cuisson (fours) une agglomération des produits traités afin de leur donner une cohésion et une rigidité suffisante [45] [54].

Contrairement à la cuisson céramique, le frittage ne fait pas intervenir, en principe, une liaison des particules par une phase vitreuse la cohésion et la densification des poudres pressées se produisent par suite de transformations affectant la surface des particules et conduisant à des interfaces solide-solide appelées joints de grains [45][50][54].

Dans l'industrie, le but pratique du frittage est l'obtention, à la température basse, possible d'un matériau poly cristallins ayant des dimensions géométriques et une microstructure contrôlée. Les changements de géométries et de microstructures au cours du frittage s'effectuent en trois stades :

- Des liaisons ou ponts s'établissent rapidement entre les particules et les soudent entre elles ; ces ponts donneront naissance aux joints de grains ; à ce stade la porosité reste importante.
- La porosité évolue : le rayon du pore diminue et la compacité augmente ; la porosité prend l'aspect de pores isolés sensiblement sphériques ; des joints de grains disparaissent et on observe un grandissement des cristaux (jusqu'à 10 fois la dimension de la poudre initiale) : La structure poly cristalline commence à se dessiner.

- Les pores isolés sont progressivement éliminés et la structure prend son aspect définitif ; on admet en général que l'élimination des pores isolés s'effectue par transport de matières (diffusion et migration) aux interfaces pores joints de grains.

Le processus de frittage peut être influencé (de façon favorable) par la présence, au sein du matériau traité ou de son environnement, d'espèces chimiques ayant un rôle déterminant, se qui conduit à la pratique du dopage des pâtes au choix des atmosphères du frittage et de tout autre moyens auxiliaire, qui est souvent propre à chaque fabrication [45].

Il y a plusieurs techniques de frittage. Le plus courant est le frittage naturel. Il est effectué par simple chauffage à haute température d'une poudre comprimée. La teneur en ajouts de frittage est assez élevée et la pièce garde une porosité assez importante. Pour avoir une porosité nulle, on a recours au frittage sous charge. Il existe aussi le frittage réactif. Ce procédé exploite les réactions chimiques au sein d'un comprimé poreux porté à une température donnée. La porosité de la pièce ainsi obtenue est très importante [55].

III.4.1.9. Emaillage :

Les isolateurs céramiques ou porcelaines sont toujours recouverts d'un émail déposé soit par trempage dans une barbotine, soit par une pulvérisation à peinture. L'émail est composé de silice, alumine et de fondants alcalin ou alcalino-terreux (feldspath et carbonates essentiellement), d'opacifiants (zircon, oxyde de titane et d'étain, etc.) et de colorants. Il est le plus souvent déposé à une température moins élevée il doit former, lors d'une deuxième cuisson, un verre régulier et lisse dont le rôle est double :

- amélioration de l'état de surface de l'isolateur pour empêcher la fixation de poussières atmosphériques et autres polluants ;
- amélioration de la résistance mécanique de l'isolateur si le verre formé possède un coefficient de dilatation linéique inférieur à celui de la céramique, mettant ainsi la surface en compression, et pouvant produire des fissurations de l'émail [45].

III.4.1.10. Contrôle de qualité :

La dernière étape entrant dans l'élaboration des céramiques est essentiellement un contrôle de qualité de la pièce qui a acquis ses propriétés définitives après la cuisson. Pour évaluer ses performances, la céramique subira des contrôles dimensionnels et microstructuraux (taille de grains, structure des joints de grains, porosité) ainsi qu'une détection des défauts éventuels (hétérogénéités, microfissures, impuretés...) [55].

III.5.L'usage du sables dans la fonderie :

III.5.1.La fonderie :

La fonderie est l'un des procédés de formage des métaux qui consiste à couler un métal ou un alliage liquide dans un moule pour reproduire, après refroidissement, une pièce donnée (forme intérieure et extérieure) en limitant autant que possible les travaux ultérieurs de finition.

Les techniques employées dépendent de l'alliage fondu, des dimensions, des caractéristiques et des quantités de pièces à produire. C'est le plus souvent une industrie de sous-traitance très dépendante des secteurs acquéreurs : automobile, sidérurgie, matériel de manutention, équipement industriel, matériel électrique, aéronautique, armement, etc [56].

III.5.2.Le moulage :

Le moulage est l'action de prendre une empreinte qui servira ensuite de moule dans lequel sera placé un matériau et qui permettra le tirage ou la production en plusieurs exemplaires d'un modèle. Le moulage consiste donc à placer un matériau (liquide, pâte, poudre, feuille, plaque, paraison, préforme, pastille, etc.) dans un moule dont il prendra la forme.

On a plusieurs types de moulage :

- Moulage en sable.
- Moulage métallique ou moulage permanent.
- Procédés spéciaux de moulage [57].

III.5.2.1. Le moulage en sable : Le moulage en sable consiste à réaliser une empreinte dans un matériau plastique - du sable - à partir d'un modèle aux formes de la pièce. Deux châssis métalliques, parfaitement repérés entre eux, servent à maintenir le sable utilisé pour prendre l'empreinte du modèle [58].

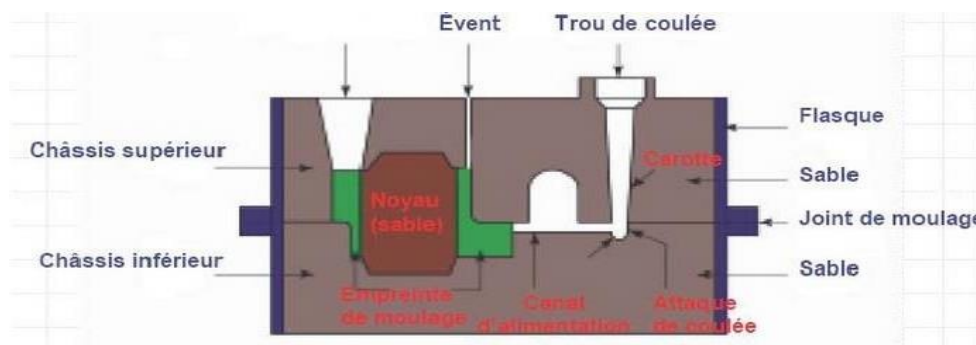


Figure III.2 : le moulage en sable.

III.5.2.2. Le moule :

Le moule, en sable, est réalisé à partir de l'outillage décrit. Il se compose d'un fond de moule, d'un dessus de moule, et suivant les cas, d'un ou plusieurs noyaux.

Si l'outillage de fonderie (le modèle) est permanent, il n'en est pas de même du moule qui sera cassé pour en extraire la pièce réalisée. On fabriquera donc autant de moules que de pièces à produire.

Deux types de sable peuvent être utilisés :

III.5.2.2.1. Moulage au sable Silico-argileux dit sable noir ou «sable vert »:

Elle s'applique principalement aux modèles montés sur plaques et peut être aussi utilisée pour les modèles nature, en bois ou en résine.

Le sable est principalement composé de silice cristallisée sous forme de quartz et d'argile sous la forme de bentonite, il est directement réutilisable après avoir été convenablement humidifié, aéré et tamisé. L'argile humidifiée sert de liant entre les grains de silice de granulométrie bien précise, par enrobage de ces grains. Il est de couleur brun-jaune lorsqu'il est neuf, mais il se colore très rapidement en noir au contact du métal chaud, d'où l'appellation de sable noir.

Les deux parties principales du moule, le fond et le dessus, sont maintenues par des châssis, généralement en aluminium, qui comportent des douilles de centrage dans lesquelles on introduit des broches afin d'assurer le positionnement des deux demi moules.

III.5.2.2.2. Moulage au sable à prise chimique :

La technique du sable à prise chimique permet plus de précision que le sable noir et donne un meilleur aspect de peau de pièce. On peut obtenir, avec ce procédé, des toiles beaucoup plus fines.

Elle s'applique principalement aux modèles montés en caissons et peut être aussi utilisée pour certains modèles nature en bois ou en résine ainsi que pour les modèles en stéréolithographie et en polystyrène qui, eux, ne sont pas moulables au sable noir. Il s'agit, cette fois, d'un sable siliceux, tamisé, lavé et séché. On y adjoint, peu de temps avant la réalisation

du moule, des résines et un catalyseur destinés à former un polyuréthane (désigné couramment «PEP-SET») par exemple ou bien d'autres types de liant, comme la (Furannique).

La durée de vie de ce sable (durée pendant laquelle on peut le travailler pour réaliser le moule) varie en fonction de la température ambiante et de la concentration en catalyseur [58].

II.6. Conclusion :

Les sables dit industriels quelque soit leurs provenance des plages, dunes ou d'oueds, aient une teneur importante en silice allons jusqu'à 98 %, servent principalement aux industries du verre, de la fonderie et du céramique fine. Les sables extraits de carrières ne sont pas utilisables en l'état et doivent être traités pour augmenter la teneur en silice, réduire le contenu d'impuretés (matière organique, oxydes, argiles, autres minéraux) et obtenir un produit marchand correspondant aux normes des utilisateurs industriels (pour les verres blancs par exemple $\text{SiO}_2 > 99\%$ et $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,015$ a 1 %).

Les autres utilisations sont partagées entre la céramique ordinaire, la chimie et la filtration, et la construction. Les galets de quartz pour électrométallurgie sont criblés, lavés, triés et concassés, tout comme les quartzites, pour obtenir 99 % de produit blanc à très faibles teneurs en Ti, Al, etc. Les principales filières industrielles utilisant le sable sont :

- la verrerie (verres creux, verres plats, verres techniques pour optique, ampoules, fibre de verre, cristallerie).
- les céramiques fines, céramiques techniques, composants électriques, céramiques sanitaires...cet.
- la fonderie (réalisation de moules de toutes tailles pour couler les métaux).

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La consommation de sable est devenue en quelques années un problème planétaire très sensible. La pénurie guette et les extractions maritimes menacent les côtes comme les écosystèmes, tandis que des mafias du sable se développent à des échelles disproportionnées. L'exploitation du sable est devenue un enjeu majeur qui pourrait vite tourner au désastre, Ou au conflit.

Les ressources en sable, longtemps considérées comme illimitées, sont en réalité de plus en plus réduites. La population mondiale a quasiment triplé en 60 ans et le sable est la deuxième ressource la plus utilisée après l'eau. Il faut 30 000 tonnes de sable pour faire un kilomètre de route, 12 millions de tonnes de sable pour une centrale nucléaire (soit 60 000 maisons individuelles qui demandent 200 tonnes de sable chacune pour leur construction), en se rappelant que le sable rentre dans la composition du verre, des composants électroniques donc des ordinateurs, tablettes, smartphones, mais aussi dans la composition des plastiques, des panneaux solaires et même dans l'agro-industrie.

Le sable est prélevé de terre dans des carrières, aspiré par des dragues au fond de l'océan, ou raclé à la pelle mécanique dans les rivières et sur le littoral. Autant de méthodes qui affectent la qualité de l'eau de l'air et du sol. Elles bouleversent les paysages et les écosystèmes, affectant la biodiversité.

Ces prélèvements en milieu naturel sont par ailleurs susceptibles de modifier le fonctionnement hydrologique des cours d'eau, la morphologie des côtes et les courants marins, et tout particulièrement de provoquer l'érosion des sols et du littoral. Au risque d'exposer les populations à des risques accrus d'inondation, de submersion marine et d'érosion.

Les conséquences potentielles de l'exploitation du sable ne sont donc pas qu'environnementales, mais aussi économiques, humaines, sociales et culturelles. À titre d'exemple, l'appauvrissement des sols et la disparition des plages affectent les secteurs de l'agriculture et du tourisme. Afin d'encourager le déploiement de ces solutions, il apparaît indispensable d'homogénéiser les pratiques et les réglementations en matière d'extraction du sable.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. DELESTRAC DENIS, « Le sable, Enquête sur une disparition », Documentaire, 2013.
- [2]. NICOLAS BERNON, ingénieur risques naturels - littoral, BRGM, article « Pourquoi le sable risque de manquer sur la planète ».
- [3]. Norme Française XP P 18-540 : Granulats - Définitions, conformité, spécifications, indice de classement, 1997, P 15-540.
- [4]. PATRICK GUIRAUD, « Caractéristiques et types de granulats », PDF.
- [5]. C. TAYEB HAMMANI 2018, « Influence des effets de température et de conservation sur la résistance mécanique du béton », Mémoire de Master, Université d'ADRAR.
- [6]. LAZAR KHALED, « caractérisation et valorisation du sable du grand erg oriental », thèse doctorat, U.S.T.H.B. Alger, Algérie, 2012.
- [7]. H. AZOUZ 2009, « Etude de bétons à base des sables de dune », Mémoire de Magister, Université Mohamed Kheider Biskra.
- [8]. G. DENEUFBOURG, ingénieur géologue, « Étude géologique des sables de Martinique », bureau de recherches géologique et minières, juin 1969.
- [9]. GUENNOUN. R, « Etude et formulation d'un béton de sable de dune », Alger, juin 2003.
- [10]. KHETAB. R, « valorisation du sable de dune » thèse de doctorat, Alger, année 2006.
- [11]. SADHOUARI, F. GOUFI, N & GUEZZOULI, A. « Valorisation de l'utilisation des sables concassés par analyse des propriétés des mortiers et des bétons », SBEIDCO-1st. In: International conference on sustainable built environment infrastructures in developing countries, ENSET Oran (Algeria). 2009. p. 247-54.
- [12]. COLLECTION TECHNIQUE CIMBETON, « Les constituants des bétons et des mortiers », Tome 1. Centre d'information sur le ciment et ses applications (France). CIMbéton, 2005, p.32-49.
- [13]. COLLECTION TECHNIQUE CIMBETON. « Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre », Tome 2. Centre d'information sur le ciment et ses applications (France). CIMbéton, 2005, p.36-94.
- [14]. MOHAMED LYES KAMEL KHOUADJIA. « Étude des propriétés physico mécaniques et rhéologiques des bétons à base des sables de carrières : expérimentation et modélisation », Thèse Doctorat, P- 20.
- [15]. MARTAUD, T. « Evaluation environnementale de la production de granulats naturels en

exploitation de carrière: indicateurs, modèles et outils », Thèse de doctorat de l'université D'ORLEANS, spécialité: sciences de l'univers, 2008.

[16]. NORMAN, S.H. « Sand solutions replacing natural sand in concrete », Nordberg AC-series Air Classifiers, Metso Minerals, 2008, p, 17-20.

[17]. A. FOUCAULT et J.-F. RAOULT, Dictionnaire de géologie, Masson, 3^{em} éd., 1988
Antoine Da Lage et Georges Métaillé, Dictionnaire de Biogéographie végétale, SNRSE, éditions, 2015, p 143-144.

[18]. YASSINE SENHADJI, « L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques (acides et sulfates) » thèse doctorat. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Mohamed Boudiaf

[19]. MARIE LESBATS, « D'où vient le sable ? », article, avril 2020.

[20]. GUILLAUME DAVELUY, « L'érosion : causes et conséquences », article, publié le 01-01-1970.

[21]. A. BRONGNIART, « Lexique de géologie sédimentaire, pierre de touche », article, Université de Liège.

[22]. BELMEDREK SONIA, « Granulométrie et minéraux lourds des sables dunaires et de plage des secteurs de Oued Zhou et de Béni Bélaid (Jijel, Algérie nord orientale) », Université Mentouri Constantine.

[23]. AUGRIS & CRESSARD ; SORNIN-PETIT, « Géosciences Marines, Techniques d'extraction » article scientifique.

[24]. FRANCK AGOSTINI, « Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins », thèse doctorat, l'Université des Sciences et Techniques de Lille, p 34-37.

[25]. NICOLAS BERNON, ingénieur risques naturels - littoral, BRGM, « Le sable, une ressource essentielle en voie de disparition », article.

[26]. LE GUENNEC B. ET TANGUY J.M., 2009, « Modèles de transport solide et d'évolution des fonds », Traité d'hydraulique environnementale - Ed. Jean-Michel Tanguy, Hermes-Lavoisier Vol. 4, pp 161-191.

[27]. PAULINE LEDUC, « Étude expérimentale de la dynamique sédimentaire des rivières en tresses », grade de docteur de L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE.

[28]. COLLECTION TECHNIQUE CIMBETON. « Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre ». Tome 2. Centre d'information sur le ciment et ses applications (France). CIMbéton, 2005, p.36-94.

[29]. MARTEL Groupe, « ZOOM SUR le fonctionnement d'une carrière alluvionnaire », SEEM Carrière de la Picardière, article.

- [30]. PATRICK DE WEVER ET FRANCIS DURANTHON, «Voyage d'un grain de sable», EDP Sciences, 2015.
- [31]. GROUPE MADEINFUTURA, «Pourquoi y a-t-il des plages de sable et d'autres de galets », futura-science, article scientifique, 2001-2020.
- [32]. PHILIPPE MARCHETTI ,«Quelle est la profondeur du sable sur la plage et au fond des mers ?»2015 CAMINTERESSE.FR
- [33]. FERNAND VERGER, « GRANULOMÉTRIE », EncyclopædiaUniversalis, consulté le 25 août 2020.
- [34]. A.CHEMAM 2018, « les sables sombres côtiers a minéraux lourds de la région de Annaba/Algérie : caractéristiques et provenance »These doctorat-université badji-mokhtarannaba.
- [35]. N E. LAAROUSI, A. DAHMANI, 2018 «Formulation de béton à base de granulats locaux et addition minéral (Fumée de silices)» Mémoire de master, Université d'ADRAR.
- [36]. I. JOUDI-BAHRI, 2012 «Influence des sables fillérisés calcaires sur les propriétés des bétons courants et superplastifiés. Un exemple tunisien. »Thèse de doctorat, Université de lorraine.
- [37]. L'EQUIPES TOUTSURLEBETON.FR, 17 mai 2019« masse-volumique-du-beton-et-de-ses constituants ». article n°8.
- [38]. SOUILMIS BEN MOUSSAI, 2019, «Etude des caractéristiques physico-chimiques du sable des dunes (cas sites d'Adrar) » MASTER ACADEMIQUE, Université Ahmed Draïa Adrar.
- [39]. Rapport EPTRC Ain Dehba Médéa 2012,«Etudes Géologiques. Carrière Ain BelbelAoulef Adrar » Algérie.
- [40]. Rapport ORGM Béchar 2006,«Etudes Géologiques. Carrière Ain Chebbi Reggan Adrar » Algérie.
- [41]. A. M. MALATRAIT, « Inventaire des ressources en sables industriels de la région RHONE-ALPES », bureau de recherches géologiques et minières, document publique . p- 6
- [42]. BOUABDALLAH Soufiane, « caracterisation-enrichissement des gres pauvresd'el-aouana : cas de l'usine de verre (africaver) / jijel », thèse doctorat 2016, p-49.
- [43]. AYADI A., 2007. « Technologie du verre » ,2émeédition, place centrale de Ben-Aknoun (Alger).
- [44]. GERARD P., 2007. « L'élaboration du verre », Une petite encyclopédie du verre, document public.(Vol113, N°5).
- [45]. Confédération des industries de céramiques de France, « l'industrie céramique en

France » N° 872, volume 6, 1992

[46]. S. Kanazaki, K. Kurihara, S. Iwai M. Ohachi and H.Tabata, « sintering of mullite silica-ceramics and some properties for insulating substrate material. » Yogyo-Kyukai-Shi, (vol 95), 1987.

[47]. F. Jean-Marie Haussonne, Traité Electronique, « Céramiques pour composants électroniques» Techniques de l'ingénieur- E1820, Paris 2002

[48]. J-P/ BOILOT ET F. Chaput, « les voies humides sous la pression atmosphérique normal on voie chimiques », Septima Paris 1994.

[49]. H.Benane; N.Bouchrite « Contribution à la formation d'une porcelaine électrotechnique pour moyenne et basse tension » Jijel 2001.

[50]. D. Dumora; L. Minjolle « Matériaux isolants céramiques en électrotechnique de l'ingénieur » Paris 1996

[51]. R. Bourgois; H.Chauvel ; J.Kessler « Mémotech génie des matériaux » édition Casteilla, Paris 2001

[52]. BOUSSOUF Lila, « Synthèse et Caractérisations d'une Céramique Electrotechnique du type : $CAO Al_2O_3 6SiO_2 - Al_2O_3 2SiO_2.H_2O - SiO_2$ », mémoire MAGESTER, 2009.

[53]. D. Merabet, « les kaolins d'El-Milia-caractérisation et valorisation », rapport de recherche, laboratoire LGERM, Ecole des mines d'Alès 1996.

[54]. D. Kahiou « Incorporation d'une argile locale dans une barbotine de céramique sanitaire», technologie de la céramique, thèse doctorat, Boumerdes 1989

[55]. JEAN DENAPE « Céramiques à usages mécaniques et thermomécaniques » Traité Matériaux non métalliques - Techniques de l'ingénieur A2010 et A 2011 Paris, 1996.

[56]. Paul Le Blanc, « Une fonderie de canons », au XVI^{ème} siècle à Brioude : in Tablettes historiques de la Haute-Loire 1870-1871,

[57]. DJEMILI LOTFI, « etude de fabrication d'une pièce (jumelle) ; et modélisation sous solidworks », memoire master, universite badji mokhtar annaba.

[58]. S. BENZAADA, « fonderie et soudage », recherche scientifique, Université de Biskra.