الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي – تبسة
Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
معـــــــــهد المـــــناجم
Institut des Mines
قسم المناجم و الجيوتكنولوجيا
Département des Mines Et Géotechnologie

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : **Génie minier**

Option : **Géotechnique**

Étude et optimisation des paramètres caractéristiques pour les géomatériaux locaux.

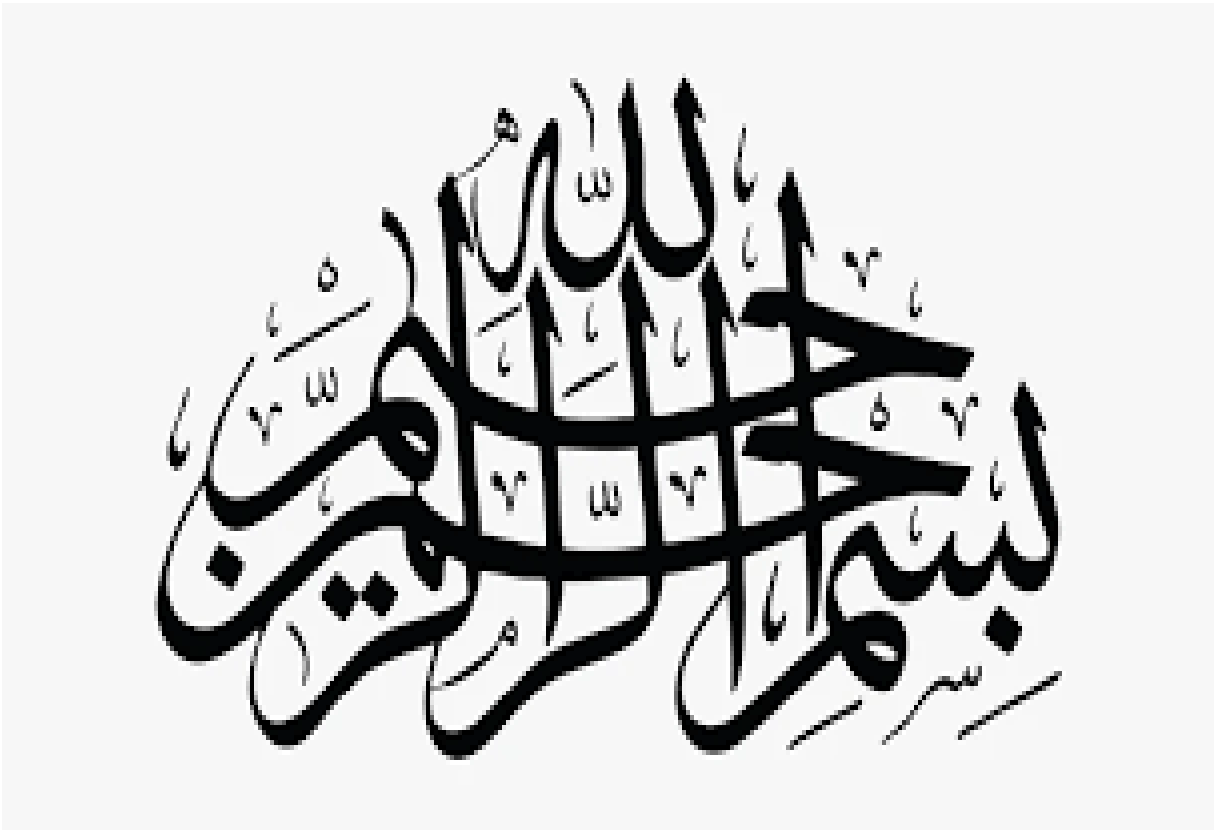
Par

HATI Ghofrane

Devant le jury :

DJELLALI Adel	**Président**	**Pr**	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**
AMRANI Dounia	**Encadreur**	**MAA**	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**
MEBROUK Faouzi	**Examinateur**	**MAA**	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**

Année universitaire 2024/2025


بسم الله الرحمن الرحيم

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Larbi Tebessi – Tébessa
Institut des Mines
Département mines et géotechnologie

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة العربي التبسي – تبسة
معهد المناجم
قسم المناجم و الجيوتكنولوجيا

Année universitaire : 2024/2025 Tébessa le : 08/06/2025

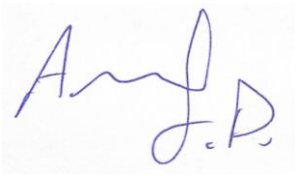
Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants : **HATI Ghofrane**

Niveau : **2eme Années Master** Option : **Géotechnique**

Thème : **Étude et optimisation des paramètres caractéristiques pour les géomatériaux locaux.**

Nom et prénom de l'encadreur : AMRANI Dounia

Chapitres réalisés	**Signature de l'encadreur**
Chapitre I : Généralité sur les géomatériaux	
Chapitre II : Caractéristiques des granulats locaux	
Chapitre III : Analyse de la compacité du mélange granulaire	
Chapitre IV : Etude et optimisation des paramètres caractéristiques	

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي – تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة)..حاتي غفران.....الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : ..طالبة.....

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم ..110020360217.... و الصادرة بتاريخ ..2025-04-23.....

المسجل بمعهد ..... قسم..المناجم والجيوتكنولوجيا.

و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :

.....مذكرة ماستر مذكرة تخرج.....

Étude et Optimisation des paramètres Caractéristiques pour des Géomatériaux locaux.

أصرح بشرفي أني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: ..2025/6/8...

إمضاء المعني (ة)

Hati

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة العربي التبسي- تبسة

مقرر رقم : 195 مؤرخ في : 04 ماي 2025

يتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر

إنّ مدير جامعة العربي التبسي بتبسة،

- بموجب القرار الوزاري رقم 318 والمؤرخ في 05ماي 2021المتضمن تعيين السيد "قواسمية عبد الكريم" مديرا لجامعة العربي التبسي - تبسة،

-و بمقتضى المرسوم التنفيذي رقم : 12- 363 مؤرخ في 8 أكتوبر 2012، يعدل و يتمم المرسوم التنفيذي رقم 09 - 08 المؤرخ في 04 جانفي 2009 و المتضمن إنشاء جامعةالعربي التبّسي بتبسة،

وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي يحدّد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستروشهادة الدّكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،

وبموجب القرارر قم 362 المؤرخ في 09 جوان 2014 الذي يحدّد كيفيات إعداد ومناقشة مذكّرة الماستر، لاسيما المادتان 10 و11 منه،

وبموجب القرارر قم 1380 المؤرخ في 09 أوت 2016 والمتضمّن موامة التكوينات في الماستر بعنوان جامعة تبسة في ميدان "علوم وتكنولوجيا".

وبموجب القرار رقم رقم 921 المؤرخ في 25 أوت 2021 المعدل والمتمم للقرار 1080المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمّن موامة التكوينات في الماستر بعنوان جامعة تبسة في ميدان "علوم وتكنولوجيا"، اختصاص جيولقي

وبعد الاطّلاع على محضر المجلس العلمي لمعهد المناجمرقم 03 المؤرخ في 12 ديسمبر2024،

يقرّر ما يأتي:

المادة الأولى:تُعيّنُ بموجب هذا المقرر لجنة مناقشة مذكّرة الماستر المحضّرة من طرف الطّالب (ة):حاني غفران،

المولود (ة) بتاريخ 2002/06/05 بـ تبسة،

والموسومة بـ **Etude et optimisation des paramètrescaractéristiques pour les géomatériauxlocaux**

والمسجل (ة) بمعهد**المناجم**

المادة 2: تتشكّل اللجنة المشار إليها في المادة الأولى من الأعضاء الآتي ذكرهم:

رقم	الاسم واللّقب	الرتبة	مؤسسة الانتماء	الصّفة
1	عادل جلالي	أستاذ	جامعة العربي التبسي - تبسة	رئيسا
2	عمراني دنيا	أستاذ مساعد – أ-	جامعة العربي التبسي - تبسة	مشرفا
3	مبروك فوزي	أستاذ مساعد – أ-	جامعة العربي التبسي - تبسة	ممتحنا

المادة 3: يكلّف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيابتنفيذ هذا المقرّر الّذي يُسلّم نسخةً عنه إلى كلّ من الطّالب المعني والمشرف على المذكّرة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه.

المادة 4:تحفظ نسخة عن هذا المقرر في الملفّ البيداغوجي للطالب المعني، وينشر في النّشرة الرّسمية لجامعة العربي التبسي.

حُرّر ب تبسة، في 04 ماي 25

عن المدير ، وبتفويض منه

مدير المعهد

مدير معهد المناجم

د.عولمي زوبير

جامعة العربي التبسي تبسة

معهد المناجم

Scanné avec CamScanner

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة الشهيد الشيخ التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة العربي التبسي- تبسة

مقرر رقم: 196 مؤرخ في: 04 جوان 2025

يتضمن الترخيص بمناقشة مذكرة الماستر

إنّ مدير جامعة العربي التبسي بتبسة،

- بموجب القرار الوزاري رقم 318 والمؤرخ في 05ماي 2021المتضمن تعيين السيد "قواسمية عبد الكريم" مديرا لجامعة العربي التبسي - تبسة،

-و بمقتضى المرسوم التنفيذي رقم : 12- 363 مؤرخ في 8 أكتوبر 2012، يعدل و يتمم المرسوم التنفيذي رقم 09 - 08 المؤرخ في : 04 جانفي 2009 و المتضمن إنشاء جامعةالعربي التبّسي بتبسة،

-وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي يحدّد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدّكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،

-وبموجب القرار رقم 362 المؤرّخ في 09 جوان 2014 الذي يحدّد كيفيات إعداد ومناقشة مذكّرة الماستر، لاسيما المادة 7 منه،

-وبموجب القرار رقم 1080 المؤرّخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمّن تأهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة،

-وبموجب القرار رقم 375 المؤرّخ في 15 جوان 2020 المعدل لملحق القرار 1080 المؤرّخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل ماستر الفروع ذات تسجيل وطني بجامعة تبسة، اختصاص جيوتقني

-وبموجب المقرّر رقم196 المؤرّخ في 2025/06/04 والمتضمّن تعيين لجنة مناقشة مذكّرة الماستر،

-وبعد الاطّلاع على مقرر تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر المؤرّخ في 2025/06/04

يقرّر ما يأتي:

المادة الأولى:يُرخّصُ للطالب(ة)حاتي غفران، المولود (ة) بتاريخ 2002/06/05بـ تبسة،بمناقشة مذكّرة الماستر والموسومة بـ

Etude et optimisation des paramètres caractéristiques pour les géomatériaux locaux

المادة 2: يكلّف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيابتنفيذ هذا المقرّر الّذي يسلّم نسخة عنه إلى الطّالب المعني بالمناقشة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه، وبضمان نشره عبر فضاءات المؤسّسة المادية والرقمية.

المادة 3: تُحفظ نسخة عن هذا المقرّر ضمن الملف البيداغوجي للطّالب المعني وينشر في النّشرة الرّسمية لجامعة العربي التبسي.

حُرّر ب تبسة، في: 04 جوان 2025

عن المدير، وبتفويض منه

مدير المعهد

مدير معهد المناجم
د.عولمي زبير

معهد المناجم

Scanné avec CamScanner

الاهداء

"بسم خالقي وميسر أموري وعصمت أمري،لك كل الحمد والامتنان"

أهدي هذا النجاح لنفسي اولا ثم إلا كل من سعى معي لاتمام هذه المسيرة دمتم لي سندا لا عمر له

إلى من كلل العرق جبينه و من علمني ان النجاح لا يأتي إلا بالصبر و الاصرار

إلى من بذل الغالي و النفيس و استمديت منه قوتي و اعتزازي بذاتي ....

... أبي الغالي ...

إلى من جعل الجنة تحت اقدامها و سهلت لي الشدائد بدعائها

إلى الإنسانة العظيمة التي لا طالما تمنت ان تقر عينها في يوم كهذا....

... أمي الحبيبة ...

إلى من بذلوا جهدا في مساعدتي وكانوا عونا وسندا إلى الشموع التي تنير طريقي إلى إخوتي الأعزاء : "قيس، شيماء، حسين، نائلة، إستبرق" هذا التخرج هو ثمرة محبتكم و دعائي ان نبقى معا قلبا واحدا وروحا واحدة.

إلى ابن اختي الغالي سندي الصغير وقار الدين أهديك هذا التخرج عربون حب وأمل بأن تكون كما اسمك وقورا بالدين عاليا بالعلم فمثلك ولد ليضيء المستقبل.

من قال أنا لها نالها و أنا لها وان ابت رغما عنها اتيت بها

فالحمد لله شكرا وحبا وامتنانا على البدء والختام

وأخر دعواهم ان الحمد لله رب العالمين.

...خريجتكم غفران

Remerciements

Avant tout, je remercie Allah Tout-Puissant de m'avoir donné la santé, la patience et la force nécessaires pour mener à bien ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à ***Mme Amrani Dounia****, ma directrice de mémoire, pour son encadrement exemplaire, sa disponibilité constante et ses conseils pertinents tout au long de ce travail. Son accompagnement a été d'un grand soutien sur les plans scientifique et moral, et je lui suis très reconnaissante.*

Je tiens également à adresser mes vifs remerciements à ***Mlle Gharbi Rania****, responsable de stage au sein de l'entreprise SARL SOTRAMA – Tébessa, pour son accueil chaleureux, sa gentillesse, son professionnalisme et sa disponibilité. Elle a su m'encadrer avec rigueur et bienveillance, et a joué un rôle clé dans le bon déroulement de mon stage. Je lui témoigne toute ma reconnaissance pour son soutien et sa confiance.*

Mes remerciements Je tiens à adresser mes sincères remerciements aux professeurs ***Adel Djellali*** *et* ***Mabrouk Fawzi*** *pour avoir accepté de juger ce mémoire, ainsi que pour leurs remarques précieuses que j'estime profondément.*

S'adressent aussi à l'ensemble des enseignants de l'Institut des Mines – Département de Génie Géotechnique, pour la qualité de l'enseignement, leur encadrement et leurs efforts continus tout au long de ma formation.

Enfin, je remercie de tout cœur ma famille et mes amis pour leur soutien moral, leur patience et leurs encouragements constants.



Résumés

Résumé

Les géomatériaux locaux suscitent un intérêt croissant en raison de leur importance dans les applications techniques, notamment en ce qui concerne leurs propriétés fondamentales et leur influence sur le comportement des mélanges granulaires. Cette étude vise à valoriser l'utilisation de ces ressources en mettant l'accent sur le compactage, considéré comme un critère clé pour évaluer la cohésion et la stabilité des mélanges.

Un granulat local provenant du site de Kef Dhebaa (Morsott wilaya de Tébessa) a été sélectionné comme matériau principal. L'étude a examiné l'effet de la teneur de chaque fraction granulaire sur le compactage global du mélange. À travers des essais en laboratoire, l'objectif était d'améliorer la granulométrie afin de produire des mélanges plus cohésifs et plus performants.

Les résultats ont montré qu'un contrôle précis des proportions de chaque classe granulaire a un impact significatif sur le comportement au compactage, en améliorant la structure du mélange par la réduction des vides et l'augmentation de la densité.

Mots-clés : Géomatériaux, caractérisation, compacité, mélanges granulaires, optimisation, Kef dhebaa.

الملخص

يشهد الاهتمام المواد الجيولوجية المحلية اهتمامًا متزايدًا نظرًا لأهميتها في التطبيقات التقنية، خصوصًا فيما يتعلق بخصائصها الأساسية وتأثيرها على سلوك الخلطات الحبيبية. يهدف هذا البحث إلى تعزيز استخدام هذه الموارد من خلال التركيز على خاصية الدمك، التي تُعد معيارًا أساسيًا لتقييم تماسك واستقرار الخلطات.

تم اختيار مادة محلية من موقع كاف الضبع (مرسط ولاية تبسة) كمادة رئيسية للدراسة. وقد تم تحليل تأثير محتوى كل جزء حبيبي على دمك الخلطة ككل. ومن خلال التجارب المخبرية، سعى البحث إلى تحسين توزيع حجم الحبيبات بهدف إنتاج خلطات أكثر تماسكًا وكفاءة.

أظهرت النتائج أن التحكم الدقيق في نسب كل فئة حبيبية له تأثير كبير على سلوك الدمك، حيث يساهم في تحسين بنية الخلطة من خلال تقليل الفراغات وزيادة الكثافة.

الكلمات المفتاحية : المواد الجيولوجية، الخصائص، الكثافة، المزائج الحبيبية، تحسين، كاف الضبع.

Abstract

Local geomaterials are gaining increasing attention due to their significance in technical applications, particularly regarding their fundamental properties and their influence on the behavior of granular mixtures. This study aims to enhance the use of these resources by focusing on compaction, considered a key criterion for evaluating the cohesion and stability of mixtures.

A local aggregate from the KEF DHEBAA site (Morsott Tébessa province) was selected as the main material. The study examined the effect of the content of each granular fraction on the overall compaction of the mixture. Through laboratory testing, the goal was to improve the grain size distribution to produce more cohesive and efficient mixtures.

The results showed that precise control over the proportions of each granular class has a significant impact on the compaction behavior, improving the mixture structure by reducing voids and increasing density.

Keywords: Geomaterials, characterisation, compacity, granular mixtures, optimization, Kef dhebaa.

Sommaire

Remerciements I
Résumé III
Liste des figures I
Liste des tableaux I
Liste des abréviations VI
Introduction générale : 10

Chapitre I : Généralité sur les géomatériaux

I.1. Introduction : 13
I.2. Les géomatériaux : 13
I.3. Propriétés des géomatériaux : 13
I.3.1. Dureté : 13
I.3.2. Homogénéité : 14
I.3.3. Isotropie : 14
I.3.4. Forme cristalline : 14
I.3.5. Masse volumique : 15
I.3.6. Porosité : 16
I.3.7. Propriétés optiques : 17
I.4. Les différents types des géomatériaux : 17
I.4.1. Les géomatériaux naturels : 17
I.4.1.1 Les roches : 18
I.4.1.2. Les différents types des roches : 18
I.4.2 Les sols : 24
I.4.2.1. Définition : 24
I.4.2.2. Les différents types de sols : 25
I.4.2. Les géomatériaux artificiels : 25
I.4.2.1. Les granulats : 25
I.4.2.2. Les ciments : 36
I.4.2.3. Les bétons : 39
I.5. Conclusion : 42

Chapitre II: Caractéristiques des granulats locaux

II.1. Introduction : 45
II.2. Présentation de la région d'étude : 45
II.3. Contexte géographique : 45
II.3.1. Localisation : 45

II.3.2. Situation géographique : 46
II.4. Contexte géologique : 47
II.4.1. Litho stratigraphie régionale : 47
II.5. Aperçu géomorphologique : 50
II.5.1. Les monts septentrionaux: 50
II.5.2. Les monts méridionaux: 50
II.6. Description lithologique et stratigraphique : 50
II.7. Tectonique : 51
II.8. Zone d'échantillonnage des Géomatériaux : 53
II.9. La production des géomatériaux sur carrière Kaf dhebaa : 53
II.9.1. Les etapes d'extraction des granulats : 53
II.9.1.1. Reconnaissance géologique et implantation : 53
II.9.1.2. Décapage : 54
II.9.1.3. Forage de la roche : 54
II.9.1.4. Minage (tir de mine) : 54
II.9.1.5. Abattage : 54
II.9.1.6. Chargement et transport : 54
II.9.2. Étapes de traitement des granulats : 54
II.9.2.1. Concassage (Broyage) : 55
II.9.2.2. Criblage : 55
II.9.2.3. Lavages (si nécessaire) : 56
II.9.2.4. Stockage : 56
II.10. Classification des granulats selon le diamètre de carrière Kef dhebaa : 56
II.11. Essais de caractérisation : 57
II.11.1. La granulométrie : [EN 933-1] 57
II.11.1.1. Définition : 57
II.11.1.2. But de l'essai : 58
II.11.1.3. Principe de l'essai : 58
II.11.1.4. Matériel nécessaire : 59
II.11.1.5. Préparation de l'échantillon : 59
II.11.1.6. Mode opératoire : 59
II.11.1.7. Fuseau de spécification : 60
II.11.1.8. Module de finesse : [NF P 18-304] 61
II.11.2. Propriétés physique 62
II.11.2.1. Masse volumiques : 62
II.11.2.2. Equivalent de sable : [NF EN 933-8] 64

II.11.2.3. La propreté superficielle des graviers : [NF P 18-591] 68
II.11.3. Propriété mécanique : 69
II.11.3.1. Essai Micro-Deval (MDV) : [NF P 18-572] 69
II.11.3.2. Essai Los Angeles (LA) : [NF P 18-573] 71
II.12. Caractérisation des géomatériaux utilisée : 74
II.12.1. Les caractéristiques physiques : 74
II.13. Conclusion : 83

Chapitre III: Analyse de la compacité du mélange granulaire

III.1. Introduction : 85
III.2. Introduction à la compacité : 85
III.2.1. Définitions de la compacité : 85
III.2.2. Facteurs influençant la compacité : 86
III.2.2.1. Granulométrie et distribution des particules : 86
III.2.2.2. Forme et texture des grains : 86
III.2.2.3. Méthodes de compactage : 87
III.3.2.4. Optimisation de la compacité des mélanges granulaires : 87
III.3. Les Essais sur la compacité (Mesure expérimentale) : 87
III.3.1. Méthode des mesures : 87
III.3.2. Procédure des mesures de la compacité : 87
III.3.2.1. Matériel nécessaire : 87
III.3.2.2. Procédure expérimentale : 87
III.3.2.3. Variantes expérimentales : 89
III.4. Influence de la distribution granulométrique : 89
III.4.1. Empilement des granulats sec : 89
III.4.2. Définition de l'empilement : 89
III.4.3. Les types d'empilement : 89
III.4.3.1. Empilement ordonné : 90
III.4.3.2. Empilement aléatoire : 91
III.5. Méthodes expérimentales des mesure de la compacité : 92
III.5.1. Méthode de versement simple : [NF EN 1097-3] 92
III.5.2. Méthode de piquage : 92
III.5.3. Méthode de compacité des fractions (Méthode de vibration): 93
III.5.3.1. Objet : 93
III.5.3.2. Domaine d'application : 93
III.5.3.3. Généralités : 93

III.5.3.4. Appareillage : 94
III.5.3.6. Exécution de l'essai : 96
III.5.3.7. Expression des résultats : 97
III.5.3.8. Rapport d'essai : 98
III.5.4. Méthode de vibration & compression : 98
III.6. Résultats et discussion (Carrier Kef Dhebaa) : 99
II.6.1. Présentation des matériaux : 99
III.7. Méthodes expérimentales de détermination de la compacité des mélanges granulaires : 99
III.7.1. La masse volumique absolue : 100
III.7.2. Méthode de versements simple : 101
III.7.3. Méthode de piquage : 102
III.7.4. Méthode de vibration (Table vibrante) : 103
III.7.5. Méthode de vibration &compression : 104
III.8. Synthèse et Interprétation : 106
III.8.1. Interprétation : 106
III.8.1.1. Effet des méthodes de compactage : 106
III.8.1.2. Comparaison entre les deux mélanges : 106
III.8.1.3. Gains de compacité : 106
III.9. Conclusion : 107

Chapitre IV: Etude et optimisation des paramètres caractéristiques

IV.1. Introduction : 109
IV.2. Optimisation des paramètres caractéristiques des géomatériaux : 109
IV.2.1. Optimisation de la granulométrie (Carrière Kef Dhebba) : 109
IV.2.2. Formulation des mélanges granulaires : 109
IV.2.2.1. Compacité selon le principe de Fuller : 109
IV.3.1. Vérification de la nouvelle équation de compacité : 113
IV.4. Conclusion : 119
Conclusion générale : 121
Référence bibliographique : 123
Annexe : 129

Liste des Figures

Chapitre I : Généralité sur les géomatériaux

Figure I.1 : Formes et combinaisons de formes 15
Figure I.2 : Volume totale des roches 15
Figure I.3 : Structure d'une roche carbonatée 16
Figure I.4 : Porosité dans les grés 17
Figure I.5 : Coulée basaltique qui constitue la croûte océanique 19
Figure I.6 : Détails du granite qui constitue la croûte continentale 19
Figure I.7 : Fente de dessiccation des argiles 20
Figure I.8 : Affleurement de calcaire coquillier 21
Figure I.9 : Carrière de gypse à Cormeilles en Parisis 21
Figure I.10 : Rubanements dans les gneiss 22
Figure I.11 : Contact entre le granite et cornéenne 23
Figure I.12 : Le cycle des roches 23
Figure I.13 : Sable de dune et sable de construction 26
Figure I.14 : Gravier 27
Figure I.15 : Gisement et carrière de la production des agrégats 28
Figure I.16 : Les types des granulats 29
Figure I.17 : Forme des grains 30
Figure I.18 : Grandeurs géométriques des granulats 30
Figure I.19 : Forme d'un granulat 31
Figure I.20 : Essai équivalent de sable 32
Figure I.21 : Série de tamis 33
Figure I.22 : Machine Micro Deval 35
Figure I.23 : Machine Los Angeles 35
Figure I.24 : Etapes de fabrication du ciment 39
Figure I.25 : Durcissement, finition 41

Chapitre II: Caractéristiques des granulats locaux

Figure II.1 : Localisation de la région du site (D'après la carte d'Algérie 1/500.000 TEBESSA NI-32-6-NO). 46

Figure II.3: Carte géologique de la région de Morsott (d'après la carte géologique de Morsott au 1/50 000). 49

Figure II.4 : Cadre géologique du bassin d'effondrement de Tébessa-Morsott 51

Figure II.5 : Extrait de la carte géologique de l'Algérie au 1/500000, montre le fossé de Morsott et de Tébessa (Service de la carte géologique de l'Algérie, 1951). 52

Figure II.6: Zone d'échantillonnage Carrière KAF DEHBAA. 53

Figure II.7: Transport Le matériaux vers l'unité de traitement par chargeuse. 54

Figure II.8 : Zone de concassage primaire (gros blocs). 55

Figure II.9: Schéma de traitement poste primaire carrière KEF DHEBAA. 56

Figure II.10: Classification granulométrique des granulats de la carrière KEF DHEBAA. 57

Figure II.11 : Colonne de tamis 58

Figure II.13 : Courbe d'analyse granulométrique par tamisage 61

Figure II.14 : La masse volumique apparente 62

Figure II.15 : La Méthode de l'éprouvette 63

Figure II.16 : La Méthode du ballon 64

Figure II.17: Détermination de l'équivalent de sable 66

Figure II.18 : Machine d'agitation pour éprouvette d'équivalent de sable 67

Figure II.19 : L'appareil Micro Deval 69

Figure II.20 : Les boulets à mélanger avec l'échantillon 71

Figure II.21 : Appareillage de Los Angeles 71

Figure II.22 : Les étapes d'essais d'analyse granulométrique. 74

Figure II.23 : Courbe d'analyse granulométrique. 76

Figure II.24 : Les étapes d'essai de la masse volumique apparente. 77

Figure II.25: Les étapes d'essai de la masse volumique absolue. 78

Figure II.26 : Préparation de l'échantillon d'équivalent de sable. 79

Figure II.27: Préparation des échantillons de Micro- Deval. 81

Figure II.28 : Préparation de l'échantillon de Los Angeles. 82

Chapitre III: Analyse de la compacité du mélange granulaire

Figure III.1 : Effet de paroi 86

Figure III.2 : Empilements 2D réguliers : a) hexagonal compact ; b) cubique simple 90

Figure III.3 : Empilement de type "boulet de canon" théorie et réalité 91

Figure III.4 : Compacité pour différents modes de mise en place des grains concassés 92

Figure III.5 : Schéma illustrant la notion de compacité 93

Figure III.6 : La table à la secousse 94

Figure III.7 : Schéma de la table à secousses 95

Figue III.8 : Principe de la mesure à la jauge de profondeur 97

Figure III.9 : Dispositif de mesure de la compacité 99

Figure III.10 : La masse volumique absolue (Réelle). 100

Figure III.11: Différentes phases du mode opératoire de la méthode de versement simple. 101

Figure III.12 : Différentes phases du mode opératoire de la méthode de piquage. 102

Figure III.13 : Différentes phases du mode opératoire de la méthode de vibration. 103

Figure III.14 : Différentes phases du mode opératoire de la méthode de vibration & compression. 105

Figure III.15 : Comparative entre les différentes méthodes. 106

Chapitre IV: Etude et optimisation des paramètres caractéristiques

Figure IV.1 : Courbe comparative de chaque classe granulaire avec courbe de Fuller. 110

Figure IV.2 : Courbe comparative du mélange granulaire 1 avec courbe de Fuller. 111

Figure IV.3 : Courbe comparative du mélange granulaire 2 avec courbe de Fuller. 111

Figure IV.4 : Valeurs de compacité mesurées par rapport aux valeurs estime de la classe 0\3 granulaire de la carrière KEF DHBAA- Tébessa. 113

Figure IV.5 : Valeurs de compacité mesurées par rapport aux valeurs estime de la classe 3\8 granulaire du carrière KEF DHBAA- Tébessa. 114

Figure IV.6 : Valeurs de compacité mesurées par rapport aux valeurs estime de la classe 8\15 granulaire du carrière KEF DHBAA- Tébessa. 115

Figure IV.7: Valeurs de compacité mesurées par rapport aux valeurs estime de la classe 15\25 granulaire de la carrière KEF DHBAA- Tébessa 117

Liste des Tableaux

Chapitre I : Généralité sur les Géomatériaux

Tableau I.1 : Dureté de minéraux selon l'échelle de Mohs. 14
Tableau I.2 : Différentes valeurs de porosité des roches 16
Tableau I.3 : Refus cumulés sur tamis 27
Tableau I.4 : Classes granulaires des granulats 33
Tableau I.5 : Catégories des granulats selon la résistance aux chocs et à l'usure 36
Tableau I.6 : Classe de résistances des ciments 37
Tableau I.7 : La teneur des constituants du béton en poids et en volume 39

Chapitre II: Caractéristiques des granulats locaux

Tableau II.1 : Les coordonnés du périmètre de la carrière KEF DHEBAA selon le système U.T.M. 47
Tableaux II.2 : Les classes granulaires dans carrière KEF DHEBAA. 57
Tableau II.3 : Les dimensions nominales des tamis 59
Tableau II.4 : Fuseau de spécification des sables 60
Tableau II.5 : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par DREUX 65
Tableau II.6 : Charges abrasives pour chaque classe granulaire 70
Tableau II.7 : Charge de boulets pour chaque classe granulaire 72
Tableau II.8 : Catégorie et la quantité de la bille d'acier pour l'essai 73
Tableau II.9 : Classification des granulats en fonction du coefficient LA 73
Tableaux II.10 : Analyse granulométrique carrière Kef Dhebaa 75
Tableaux II.11 : Les résultats de l'essai masse volumique apparente de chaque classe. 77
Tableau II.12 : Les résultats de l'essai de la masse volumique réelle (absolue). 78
Tableau II.13 : Les résultats d'essais d'équivalent de sable. 80
Tableau II.14 : Interprétation des résultats de l'équivalent de sable. 80
Tableau II.15 : Les valeurs des Micros Deval des échantillons. 81
Tableau II.16 : Appréciation des résultats de l'essai Micro Deval [NF P18-572]. 81
Tableau II.17: Résultats de l'essai Los-Angeles. 82
Tableau II.18 : Tableau de référence des valeurs de Los Angeles [NF P 18-573]. 83

Chapitre III: Analyse de la compacité du mélange granulaire

Tableau III.1 : Résultats de la masse volumique absolue (Réelle). 100

Tableau III.2 : Résultats de la compacité par la méthode de versement simple..... 101
Tableau III.3 : Résultats de la compacité par la méthode de piquage. 103
Tableau III.4 : Résultats de la compacité par la méthode de vibration (table vibrante)..... 104
Tableau III.5 : Résultats de la compacité par la méthode de vibration & compression. 105
Tableau III.6 : Tableaux comparatif entre les quatre méthodes de mesure de la compacité.106



Liste des abréviations

Liste des abréviations

e : Indice de vides.

n : Porosité.

V_S : Le Volume des Solides.

V_V : Le Volume des vides.

N_T : La porosité totale.

$\boldsymbol{\gamma}$: Est le poids volumique du matériau.

$\boldsymbol{\rho}$: Est la masse volumique du matériau.

β : L'indice d'allongement.

α : L'indice d'aplatissement.

d : Diamètre min de granulat.

D : Diamètre max de granulat.

$\boldsymbol{\rho_{app}}$ **:** La masse volumique apparente.

$\boldsymbol{\rho_{abs}}$ **:** La masse volumique est absolue.

V_T: Le volume total de l'échantillon.

$\boldsymbol{M_{sat}}$ **:** Masse d'échantillon saturée.

$\boldsymbol{M_{sec}}$ **:** Masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105 C°.

MF : Module de finesse.

***f* :** La teneur en fines.

P : matériau du fond de tamis.

ESP : Equivalent de sable visuel.

ESV : Equivalent de sable avec piston.

P : La propreté superficielle des graviers.

MD : coefficient Micro-Deval (%).

LA : est le coefficient Los Angeles (%).

M : masse du matériau soumis à l'essai (g).

m : masse des éléments passants au tamis 1.6 mm (g).

C : Compacité du mélange granulaire (%).

V_S : Volume des particules solides (cm^3).

V_T : Volume total du mélange (cm^3).

M_s : Masse de la matière solide.

Ø : Diamètre du moule.

H : Hauteur de l'échantillon après compression.

MVA : Masse volumique Apparente [g/ cm^3].

MVR : La masse volumique réelle [g/ cm^3].

3D : 3 Dimension.

2D : 2 Dimension.

P(D) : Pourcentage passant (cumulé) à travers un tamis de maille D (en mm).

D_{max} : Diamètre maximal des grains (en mm).

n : Coefficient de Fuller, généralement égal à 0,5 pour une compacité optimale.

Gr : représente un paramètre granulométrique.

max : Maximum.

min : Minimum.

C_{exp} : compacité expérimentale.

$C_{théo}$: compacité théorique.

m : Mètre.

g : Gram.

l : Litre.

mm : Millimètre.

Km : Kilomètre.

NF: Norme Française.

ASTM: American Society for Testing and Materials.

SOTRAMA : Société des Travaux Routiers et Miniers de Tébessa.

SARL : Société à Responsabilité Limitée.

N, S, W, E : North, South, West, East.

U.T.M. : Universal Transverse Mercator (système de coordonnées géographiques).

Introduction Générale :





Introduction Générale :

Les geomatériaux de base tels que les granulats constituent des éléments essentiels dans les différents projets de génie civil, des mines …etc. Il est donc important de contrôler leurs propriétés physiques et mécaniques afin de garantir la qualité et le respect des exigences des normes techniques.
Les géomatériaux locaux représentent l'une des ressources naturelles suscitant un intérêt croissant, en raison de leurs propriétés physiques et minéralogiques qui les rendent adaptés à de nombreuses utilisations techniques, notamment dans les projets de construction et d'aménagement. Cet intérêt est également renforcé par leur abondance à l'échelle locale, ce qui contribue à la réduction des coûts et à la valorisation des ressources naturelles. Toutefois, une exploitation optimale de ces matériaux ne peut être envisagée sans une compréhension approfondie de leur comportement et de leurs caractéristiques, en particulier lorsqu'ils sont intégrés dans des mélanges granulaires utilisés comme base dans diverses applications.

Dans ce contexte, le site de Kef Dhebaa, situé dans la wilaya de Tébessa, a été choisi comme source des géomatériaux étudiés, en raison de sa représentativité des roches et granulats disponibles localement. Ce site présente un intérêt géologique particulier grâce à la diversité de ses formations rocheuses et à leur potentiel d'exploitation dans plusieurs domaines, ce qui offre des opportunités concrètes pour une étude scientifique appliquée.

Ce mémoire vise à étudier le comportement des mélanges granulaires constitués de ces matériaux locaux, en mettant l'accent sur la compacité, considérée comme un critère fondamental dans l'évaluation de la qualité et de la stabilité des mélanges. En effet, la compacité est liée à plusieurs propriétés essentielles telles que le tassement interne, la perméabilité et la résistance aux charges, ce qui en fait un facteur déterminant pour l'amélioration des performances des mélanges granulaires.

Ce travail est structuré en quatre chapitres complémentaires abordant les différents aspects du sujet :

- **Le premier chapitre :** propose une vue d'ensemble sur les géomatériaux locaux, en les définissants, en présentant leurs types, leurs propriétés, ainsi que les facteurs influençant leur comportement, tout en soulignant leur importance en tant que ressource naturelle à valoriser.

- **Le deuxième chapitre :** est consacré au site d'étude, avec une description géographique et géologique de la carrière de Kef Dhebaa, une analyse des matériaux extraits, et une présentation des méthodes adoptées pour leur préparation et leur étude en laboratoire.

- **Le troisième chapitre :** traite de la compacité, tant sur le plan théorique qu'expérimental, en exposant les différentes méthodes de mesure utilisées et en interprétant les résultats afin de comprendre la relation entre la granulométrie et le degré de compacité du mélange.

- **Le quatrième chapitre :** présente l'étude et l'optimisation des paramètres caractéristiques des géomatériaux, notamment la compacité. Il propose des mélanges granulaires optimisés en se basant sur la courbe de Fuller et sur des analyses par

régression. L'objectif est d'améliorer la densité et les performances mécaniques des matériaux en ajustant la répartition des différentes fractions granulaires.

À travers cette démarche, ce mémoire ambitionne d'apporter une contribution scientifique et pratique à la valorisation des ressources locales, en analysant optimiser rigoureusement les paramètres influassent sur les mélanges granulaires utiliser, et en proposant des solutions pour améliorer leurs performances selon des critères scientifiques bien établis.

Chapitre I

Généralité sur les géomatériaux

I.1. Introduction :

La Terre est une planète géologiquement vivante. Presque totalité du globe terrestre est constituée de roches et de minéraux (la montagne, le fond des mers, la terre, l'eau, le sable…). Il en existe de nombreuses sortes et nous en utilisons chaque jour sans même nous en rendre compte. Ces roches et minéraux ont été transformés et ils ont changé de forme et d'aspect. Depuis le commencement de l'histoire de l'humanité, on utilise les roches et les minéraux de façon incontournable pour le développement des sociétés (géomatériaux comme matériaux de construction …) **[1].**

I.2. Les géomatériaux :

Un géomatériau est un nom qui décrit tout matériau d'origine géologique.
Les géomatériaux ce devisent en deux catégories :

- Les géomatériaux naturels (roches, sols…) ;
- Les géomatériaux artificiels (béton de ciment, verre, céramiques…) **[2].**

I.3. Propriétés des géomatériaux :

Toute valeur permettant de déterminer une caractéristique donnée est appelée propriété. La connaissance des propriétés des géomatériaux permet de prévoir leur capacité à résister sous des conditions diverses **[3]**.

I.3.1. Dureté :

La dureté d'un géomatériaux correspond à sa résistance à se laisser rayer. Elle est variable d'un minéral à l'autre. Certains minéraux sont très durs, comme le diamant, d'autres plutôt tendres, comme le talc.
Les minéralogistes ont une échelle relative de dureté qui utilise dix minéraux communs, classés du plus tendre au plus dur, de 1 à 10. Cette échelle a été construite par le minéralogiste autrichien Friedrich Mohs et se nomme par conséquent l'échelle de Mohs **[4]**.

Tableau I.1 : Dureté de minéraux selon l'échelle de Mohs **[3,4].**

Indice de qualité	Dureté	Minerai
1	Rayable facilement à l'ongle	Talc, craie
2	Rayable à l'ongle	Gypse, sel gemme
3	Rayable facilement avec une point en acier	Calcite, anhydrite
4	Rayable avec 1point d'acier avec un faible effort	Fluorine
5	Rayable avec un point d'acier avec un grand effort	Apatite
6,7	Raye facilement le verre	Feldspath, quartz
8,9	Raye facilement le verre	Topaze, corindon
10	Raye facilement le verre	Diamant

I.3.2. Homogénéité :

Le géomatériau est dit homogène, si on découpait ce dernier en morceaux très petits, on devrait retrouver les mêmes constituants **[3]**.

I.3.3. Isotropie :

Si on prend un point défini dans un géomatériau, pour qu'il soit isotrope, il faut qu'autour du point et dans toutes les directions, on ait les mêmes propriétés **[3]**.

I.3.4. Forme cristalline :

Les minéralogistes utilisent le terme *forme* pour désigner un groupe de faces de forme identique sur un cristal. Les faces d'une forme sont liées par symétrie cristalline et ont des propriétés chimiques et physiques identiques. Si un cristal ne contient qu'une seule forme, toutes les faces cristallines ont la même taille et la même forme **[5]**.

Les dessins de la figure I.1 montrent des formes communes pour six minéraux différents.

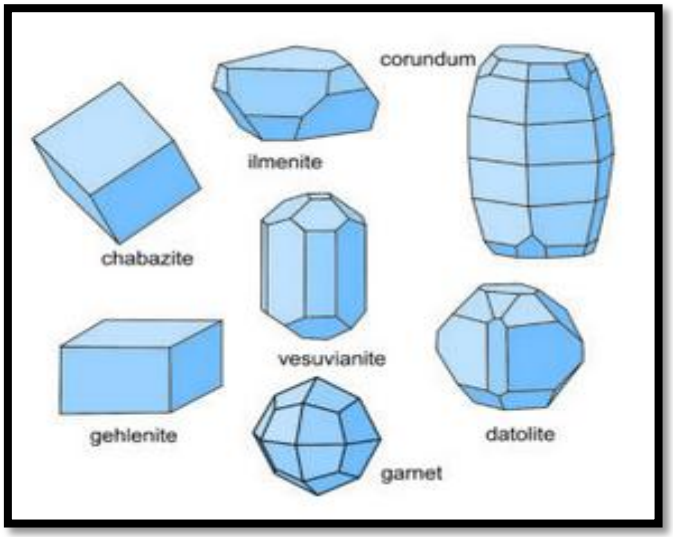


Figure I.1 : Formes et combinaisons de formes **[5].**

I.3.5. Masse volumique :

La masse volumique est dite apparente si le volume du quotient est le volume total de matériau. En revanche, la masse volumique est absolue si le volume du quotient est le volume des grains solides **[3]**.

$$M_{V\,app} = M/V_T \qquad \textbf{(I.1)}$$

$$M_{V\,abs} = M/V_s \qquad \textbf{(I.2)}$$

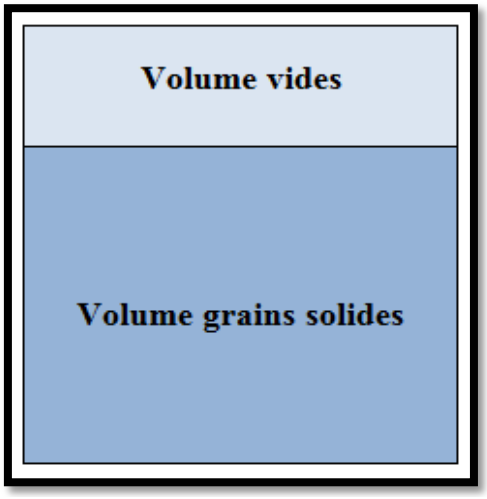


Figure I.2 : Volume totale des roches **[3].**

I.3.6. Porosité :

La porosité d'une roche ou de tout autre corps poreux, est définie comme le rapport entre le volume des vides et le volume total du corps considéré, exprimée en pourcentage **[6]**.

Chaque roche est caractérisée par sa porosité, c'est -à-dire par la taille des interstices (appelés pores) entre les éléments solides de la roche **[7].**

$$N_T = V_V / V_T \qquad \textbf{(I.3)}$$

Avec :

- $\mathbf{N_T}$ **:** porosité totale ;
- $\mathbf{V_V}$ **:** volume vide ;
- $\mathbf{V_T}$ **:** volume total.

On aura :

$$N_{tot} = (M_{sat} - M_{sec})/(M_{sat} - M_{hyd}) \qquad \textbf{(I.4)}$$

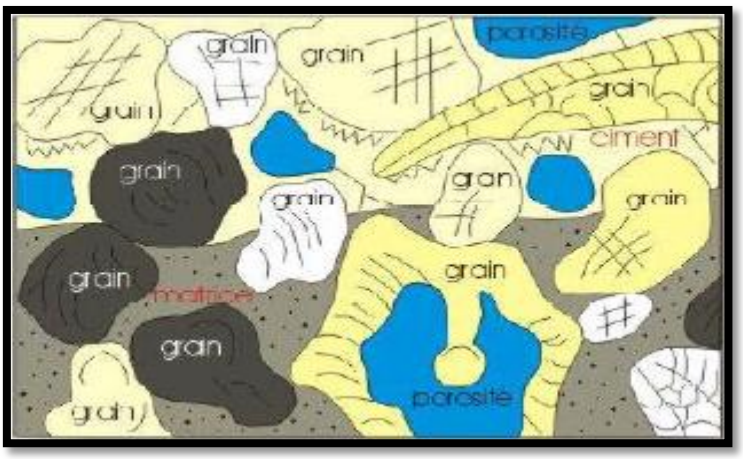


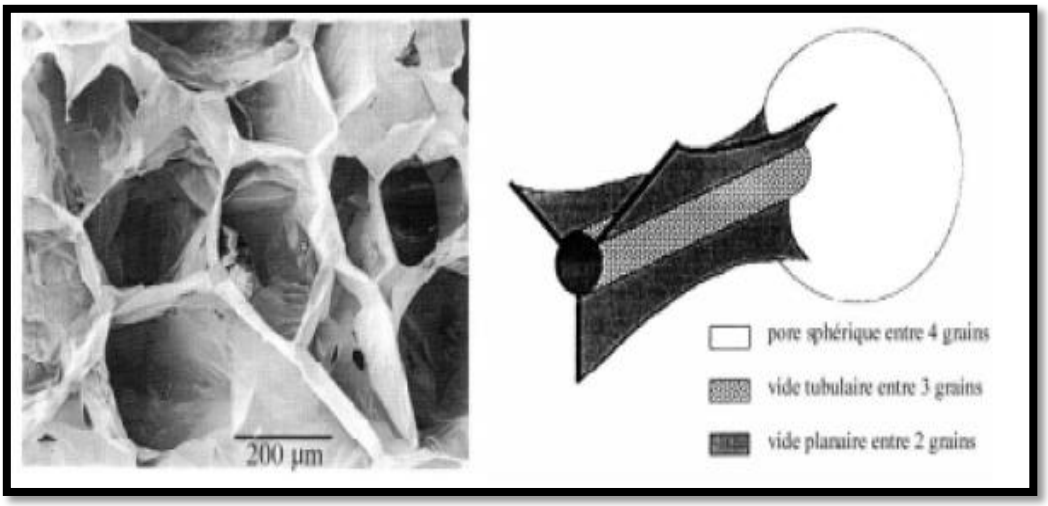
Figure I.3 : Structure d'une roche carbonatée **[8].**

Tableau I.2 : Différentes valeurs de porosité des roches **[3].**

Géomatériaux ou M.D.C	Porosité %
Calcaire	0,8–2,7
Craie	3,0−53
Granit	0,5–2,8
Sable	0−5

Le modèle sur les grés de Fontainebleau, par trois types de vides, organisés en un réseau poreux tridimensionnel (figures a et b). Les "**pores**" sont situés à l'intersection de quatre

grains et dispersés dans la roche. Ils sont hérités de la genèse de la roche et représentent une grande part du volume poreux au sein des roches de type granulaire, mais ne contribuent à la circulation des fluides que s'ils sont connectés entre eux par l'intermédiaire de pores cylindriques plus aplatis, en forme de "**tubes**" ou de "**fentes**" (ou fissures), situés respectivement entre trois ou deux grains (figure I.4) **[9]**.



a) **b)**

Figure I.4 : Porosité dans les grés :
a) image en microscopie électronique du réseau poreux rempli de résine d'un gré de Fontainebleau de porosité 4% après dissolution des grains à l'acide (Guéguen et al, 1986),
b) modèle de la porosité dans un grés d'après Bernabé (1991**) [9]**.

I.3.7. Propriétés optiques :

Les propriétés optiques constituent un élément diagnostique fondamental dans l'identification d'un minéral. Mais la détermination de ces propriétés relève plutôt du spécialiste. En géologie, les moyens techniques permettent d'amincir des tranches de minéraux collées sur des lamelles de verre si minces (30 micromètres) qu'elles deviennent tout à fait transparentes. On peut alors étudier ces minéraux au microscope, comme font les biologistes avec des tissus ou des microorganismes. Chaque groupe de minéraux possède ses propriétés optiques, c'est-à-dire qu'ils transmettent différemment la lumière et qu'ils produisent des couleurs caractéristiques lorsqu'ils sont observés en lumière polarisée, ce qui, en bout de ligne, permet de les identifier **[10]**.

I.4. Les différents types des géomatériaux :

I.4.1. Les géomatériaux naturels :

Les géomatériaux naturels sont des matériaux extraits des natures et utilisés dans des applications techniques et géologiques, que ce soit dans la construction ou dans d'autres projets.

I.4.1.1 Les roches :

Les roches sont formées de minéraux. Les minéraux ou « espèces minérales » sont définis par leurs compositions chimiques et leurs caractères cristallographiques. Un minéral peut s'organiser en deux états différents :

- *L'état amorphe*, dans lequel les molécules sont disposées sans ordre apparent : c'est le cas de l'opale et de la calcédoine pour la silice ;

- *L'état cristallisé,* caractérisé par un arrangement régulier des molécules dans l'espace (axes de symétrie, par exemple). C'est le cas du quartz pour la silice, de même composition chimique que l'opale ou la calcédoine (SiO2).

Les roches peuvent être dures (granites, basaltes), parfois plastiques (argiles) ou meubles (sables). Il existe aussi des roches liquides (pétrole) **[11].**

I.4.1.2. Les différents types des roches :

Les géologues ont coutume de classer les roches constituant le sous-sol en trois grandes catégories :

I.4.1.2.1. Les roches magmatiques :

Elles proviennent de la cristallisation d'un magma, qui est un liquide provenant de la fusion partielle en profondeur de roches préexistantes. Formant l'essentiel des croûtes continentales et océaniques, les roches magmatiques sont endogènes et sont représentées fondamentalement par :

- Les granites et les rhyolites ;
- Les basaltes et les gabbros ;
- Les andésites.

Leur mode de mise en place conditionne en grande partie leur texture. Si le refroidissement est rapide, les cristaux n'ont pas le temps de se former et la roche est surtout vitreuse ; au contraire, si le refroidissement est suffisamment lent, la roche sera formée en totalité de cristaux. On distingue ainsi :

- *Les* **roches volcaniques** (ou roches extrusives) sont mises en place à l'état liquide ou pâteux (laves) en surface. Elles refroidissent à l'air libre ou sous l'eau rapidement.



Figure I.5 : Coulée basaltique qui constitue la croûte océanique **[12].**

- *Les* **roches plutoniques** (ou roches intrusives) refroidissent en profondeur par la remontée très lente du magma **[12].**



Figure I.6 : Détails du granite qui constitue la croûte continentale **[12].**

I.4.1.2.2. Les roches sédimentaires :

Les roches sédimentaires se forment à la surface de la Terre (roches exogènes) et sont très variées car leur genèse dépend de nombreux facteurs (nature initiale des matériaux désagrégés et altérés, type d'altération, mode de transport, zone de dépôt, modalité de la diagénèse). Elles constituent le plus souvent des dépôts stratifiés en lits superposés, appelés *strates*.

La diagenèse est l'ensemble des processus qui interviennent dans la transformation des sédiments en roches sédimentaires. Les sédiments sont par la suite compactés, cimentés et ils vont recristalliser pour donner la roche sédimentaire **[12].**

Les roches sédimentaires ont différentes origines :

a) Les roches détritiques :

Les plus abondantes, sont siliceuses et résultent de l'accumulation de particules issues de l'érosion continentale (la surface de la Terre est en permanence soumise aux contraintes atmosphériques (pluies, gel, vent…) qui provoquent l'érosion des roches). Elles correspondent à des assemblages de débris variés issus de roches préexistantes, en général unis entre eux par un ciment d'origine chimique ou biochimique (exemple : les grès, les sables, les argiles).



Figure I.7 : Fente de dessiccation des argiles **[12].**

Les argiles sont des roches sédimentaires qui proviennent de l'érosion de roche silicatées (granite, gneiss, schistes) **[12].**

b) Les roches biochimiques :

Elles sont siliceuses ou carbonatées et résultent de l'accumulation de fossiles (coquilles, tests, os) (exemple : calcaires, craie, marnes). Dans les océans, lorsque la matière morte se dépose sur les fonds marins, il y a accumulation progressive de squelettes d'animaux, de coquillages ou de coraux. L'accumulation de matière morte va former des roches sédimentaires calcaires **[12].**



Figure I.8 : Affleurement de calcaire coquillier **[12].**

c) Les roches authigènes :

Elles résultent exclusivement de processus chimiques comme l'évaporation (exemple : le gypse, la potasse). Les matériaux sont transportés vers les lacs ou les océans sous forme de sels dissous où ils précipitent.



Figure I.9 : Carrière de gypse à Cormeilles en Parisis **[12].**

Les évaporites ou gypse sont des roches sédimentaires provenant de la précipitation de sel lors de l'évaporation de l'eau en climat aride **[12].**

d) Les roches d'origine biologique :

Elles sont carbonatées et résultent de l'accumulation et de la transformation de la matière organique végétale (exemple : le charbon, le pétrole).

Les roches sédimentaires physico-chimiques ou biogènes (siliceuses, calcareuses…) témoignent d'équilibres chimiques réalisés dans les conditions de température et pressions externes (de la surface des continents au fond des océans).

Quelques critères de détermination pour les roches sédimentaires :

- Roches meubles et perméables : les sables ;
- Roches friables : les marnes ;
- Roches solubles : les gypses ;
- Roches réagissant à l'acide à froid : les roches carbonatées ;
- Roches combustibles : les hydrocarbures **[12].**

I.4.1.2.3. Les roches métamorphiques :

Les roches métamorphiques proviennent de la transformation structurale et/ou minérale, à l'état solide, de roches préexistantes soumises à de nouvelles conditions de pression et température, un processus appelé le métamorphisme.

Le métamorphisme peut être dû à l'enfouissement d'une roche ou aux forces tectoniques de compressions (métamorphisme régional ou général), mais aussi au contact avec un magma ou un fluide chaud (métamorphisme thermique ou de contact) **[12].**

a) Le métamorphisme général ou régional :

Il affecte l'ensemble des roches sur des épaisseurs et des surfaces importantes. Dans les domaines non plissés, la base des séries sédimentaires épaisses de plusieurs kilomètres subit un métamorphisme statique ou d'enfouissement, peu marqué et sans déformations, créé par l'élévation de la température et de la pression. Dans les grandes chaines plissées, le métamorphisme général est responsable de la formation des ensembles de roches métamorphiques cristallophylliennes (schistes, gneiss…) **[12].**



Figure I.10 : Rubanements dans les gneiss **[12].**

b) Le métamorphisme de contact :

Il est localisé au contact des roches magmatiques et il affecte leur enclave et les terrains qu'elles traversent. Lorsque le magma encore très chaud est introduit dans une roches froides, il y a transfert de chaleur et cuisson de la roche encaissante aux bordures. Surtout lié à l'augmentation de la température à pression constante, et à la durée de cette augmentation, il est souvent nommé métamorphisme thermique.



Figure I.11 : Contact entre le granite et cornéenne **[12].**

Les roches cornéennes qui se forme par contraste thermique entre des intrusions magmatiques et leurs encaissants **[12].**

I.4.1.2.4. Le cycle des roches :

Trois grands types de roches forment la croûte terrestre. Le schéma qui suit présente, en un coup d'œil, ces trois grands types, ainsi que les processus qui conduisent à leur formation. Ainsi présenté, il véhicule l'idée de la cyclicité des processus **[13].**

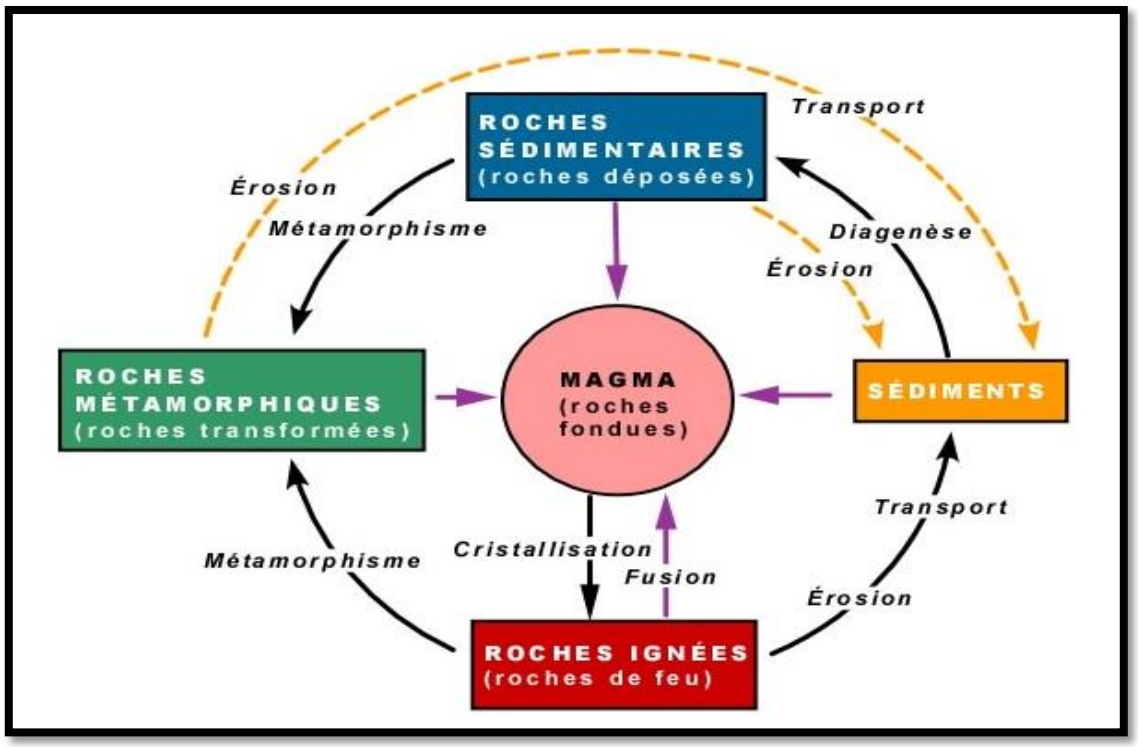


Figure I.12 : Le cycle des roches **[13].**

I.4.2 Les sols :

I.4.2.1. Définition :

Le sol est la formation naturelle de surface, à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche mère sous-jacente sous l'influence de divers processus, physiques, chimiques et biologiques, au contact de l'atmosphère et des êtres vivants.

Les sols varient en fonction du type de climat et de la roche-mère. Des régions froides vers les pays tropicaux humides, nous passons des podzols aux sols bruns riches en matière organique, puis aux croûtes calcaires (pays périméditerranéens) et aux sols ferralitiques à hydroxydes de fer et aluminium qui forment les carapaces latériques **[2].**

Les sols se constituent de deux fractions :

a. La fraction minérale :

La fraction minérale représente l'ensemble des produits de la dégradation physique et chimique de la roche mère.

On peut les classer par diamètres décroissants (granulométrie) :

- Les sables ;
- Les limons ;
- L'argile granulométrique.

Tous ces éléments constituent le « squelette » du sol **[2].**

b. La fraction organique :

La matière organique du sol peut être définie comme une matière carbonée provenant de la décomposition et du métabolisme d'êtres vivants végétaux, animaux, fongiques et microbiens. Elle constitue l'humus.

Elle est composée d'éléments principaux (le carbone-C, l'hydrogène-H, l'oxygène-O et l'azote-N), d'éléments secondaires (le soufre-S, le phosphore-P, le potassium-K, le calcium-Ca et le magnésium-Mg, ainsi que d'oligoéléments).

Elle se répartit en quatre groupes :

- La matière organique vivante, animale, végétale, fongique et microbienne, qui englobe la totalité de la biomasse en activité ;
- Les débris d'origine végétale (résidus végétaux, exsudats), animale (déjections, cadavres), fongique et microbienne (cadavres, exsudats) appelés « matière organique fraîche » ;
- Des composés organiques intermédiaires, appelés matière organique transitoire (évolution de la matière organique fraîche) ;
- Des composés organiques stabilisés, les matières humiques ou humus, provenant de l'évolution des matières précédentes **[2].**

I.4.2.2. Les différents types de sols :

- **Sol argileux :** Avec comme principal composant l'argile, c'est une terre lourde qui retient énormément l'eau. Elle est difficile à travailler mais est généralement assez fertile.
- **Sol calcaire :** Appelé également terre crayeuse, le principal composant est la chaux. Terre peu appréciée des jardiniers, elle est également détestée par de nombreux végétaux.
- **Sol humifère :** C'est une terre très riche en humus qui est le résultat de la décomposition de matières organiques végétales. Facile à travailler elle présente peu d'inconvénients.
- **Sol limoneux :** Avec le limon comme composant principal c'est une terre riche et facile à travailler Par contre elle est instable et fragile.
- **Sol sableux :** Appelé également sol siliceux, c'est une terre principalement constituée par du sable. Si elle est facile à travailler, c'est une terre instable et peu fertile **[14].**

I.4.2. Les Géomatériaux Artificiels :

Les géomatériaux artificiels sont des matériaux fabriqués ou transformés par l'homme pour répondre à des besoins spécifiques dans les applications d'ingénierie et géotechniques.

I.4.2.1. Les granulats :

I.4.2.1.1. Définition :

Les granulats proviennent de carrières où les roches massives sont concassées, ou bien sont d'origine alluvionnaire.
Les granulats sont répartis en différentes classes granulaires normées qui sont définies par le diamètre minimal et le diamètre maximal du granulat **[15].**

I.4.2.1.2. Les types des granulats :

On va citer les principaux :

I.4.2.1.2.1. Les sables :

I.4.2.1.2.1.1. Définition :

Le sable est une masse meuble de matières minérales inorganiques, finement granuleuses (0.08 à 5mm), habituellement composées de quartz (silice), et d'une petite proportion de mica, de feldspath, de magnétite et autres minéraux durs. C'est le résultat de l'érosion, dégradation et abrasion des roches par des processus chimiques et mécaniques.
Quand les grains viennent de se former, ils sont habituellement anguleux et très pointus. Par la suite sous l'action du vent et de l'eau, ils s'usent, s'arrondissent et deviennent de plus en plus petits.
Le sable est un élément très important dans la constitution des bétons et c'est généralement par la médiocre qualité du sable que périssent les bétons **[16].**

I.4.2.1.2.1.2. Classification de sable :

a) Suivant leurs grosseurs : en trois types

- *Sable fin* 0.08 à 0.315 mm ;
- *Sable moyen* 0.315 à 2.00 mm ;

- *Sable gros* 2.00 à 5.00 mm.

b) Suivant leur provenance :

- *Sable de rivière* : absence de grains fins ;
- *Sable de dunes* : uniformité et prédominance de grains fins ;
- *Sable de plaines ou d'alluvions* : absence de gros grains ;
- *Sable résidus de concassage* : prédominance de gros grains et présence de farines, ou fines ou fillers et le sable de mer **[16].**

I.4.2.1.2.1.3. Diverses utilisations :

Les sables sont un élément essentiel du processus sédimentaire et représentent une ressource très importante du point de vue économique : remblais, granulats pour béton, matériaux de construction, sables siliceux pour l'industrie. Ces derniers (appelés autre fois sable industriels) constituent l'essentiel de la matière première de l'industrie du verre, des moules, des noyaux de fonderie ; ils entrent aussi dans la fabrication des céramiques et des mortiers spéciaux. Le sable est aussi le milieu naturel où s'accumulent les minéraux lourds alluvionnaires. Les placers d'ilménite (Oxyde naturel de fer et de titane, que l'on trouve dans certains schistes cristallins), ou « sables noirs », sont importants économiquement pour la fabrication des pigments de la peinture blanche (gisements côtiers en Australie) et comme source du titane métal.
Les sables jouent également un grand rôle comme réservoirs potentiels pour les nappes d'eau (aquifères) ou les hydrocarbures. Il importe que l'exploitation du sable, souvent anarchique, soit réglementée pour éviter de perturber de fragiles équilibres naturels : érosion des plages dont l'alimentation naturelle en sable a été coupée ; destruction à terre de la nappe phréatique **[17]**.



Figure I.13 : Sable de dune et sable de construction **[17].**

I.4.2.1.2.2. Gravier :

I.4.2.1.2.2.1. Définition :

On appelle gravier l'accumulation des grains de 5 à 70 mm provenant de la distraction naturelle des roches. Tandis que la pierre concasser par broyage des roches massives, de gravier pierre artificielle, en morceaux dont les démentions varient de : 5 à 70 mm **[18].**



Figure I.14 : Gravier **[18].**

I.4.2.1.2.2.2. Granularité de gravier :

La granularité conditionne la porosité de mélange, si tous les grains, ont une même grosseur, ont aurais une porosité maximale, donc pour avoir un mélange de volume des vides minimum il faut une composition granulométrique des grains de différentes dimensions qui doit se situer dans les limites appelées (fuseaux de spécifications) :

Tableau I.3 : Refus cumulés sur tamis [18].

Tamis	Limite de refus cumulé (%)
Dmin	90-100
Dmax	0-10
½(Dmin+Dmax)	40-70
5/4 Dmax	0

I.4.2.1.2.2.3. Nature de gravier :

Le gravier provient de roches naturelles ou artificielles, constituées de minéraux chaque roche à sa propre composition chimique minéralogique. Sa résistance, son adhérence avec les ciments.

L'adhérence entre le gravier et la pâte de ciment influe sur la résistance de béton, l'état de la surface lisse. Les grains de gravier concassé (naturel et artificiel) ont des surfaces rugueuses, donc ces derniers s'adhèrent mieux que le gravier naturel au ciment durci dans le béton, en revanche le mélange du béton à base de gravier concassé naturels et artificiels et moins fluide en raison de l'angularité de ces derniers **[18].**



Figure I.15 : Gisement et carrière de la production des agrégats **[15].**

I.4.2.1.3. Caractéristique des granulats :

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.

- ✓ *Caractéristiques de fabrication*, liées aux procédés d'exploitation et de production des granulats telles que, en particulier :

- La granularité ;
- La forme (aplatissement) ;
- La propreté des sables.

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 **[19].**

I.4.2.1.4. Classification des granulats :

Les granulats sont classés selon huit catégories :



Figure I.16 : Les types des granulats **[19].**

I .4.2.1.4.1. Selon la nature minéralogique :

- Roches magmatiques : - Granulat de bonne qualité : exemple le granit, le quartz.
- Roches sédimentaires : - Non recommandé pour le béton : le calcaire.
- Roches métamorphiques : - Non recommandé pour le béton : le schiste ;

  - Bons granulats : le gneiss **[20].**

I.4.2.1.4.2. Selon la forme des grains :

Elle est soit naturelle, soit artificielle.

- *La forme naturelle* est en général roulée. Ces granulats proviennent des mers, dunes, rivières, carrières ;
- *La forme artificielle* est issue du concassage de roches dures (roches mères) **[20].**



Figure I.17 : Forme des grains **[20].**

La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques :

- *La longueur **L***, distance maximale de deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulat ;
- *L'épaisseur **E***, distance minimale de deux plans parallèles tangents au granulat ;
- *La grosseur **G***, dimension de la maille carrée minimale du tamis qui laisse passer le granulat.

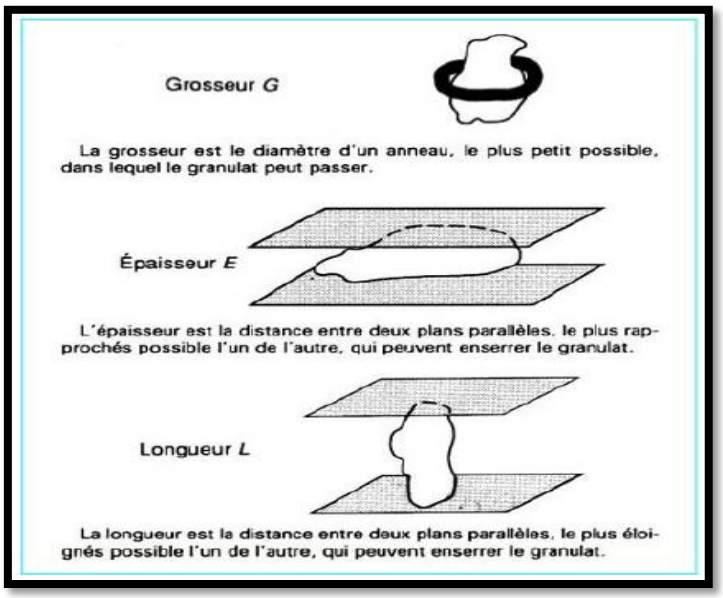


Figure I.18 : Grandeurs géométriques des granulats **[20].**

La forme est définie par le coefficient d'aplatissement A d'un ensemble de granulats qui est le pourcentage d'éléments tels que G/E > 1,58.

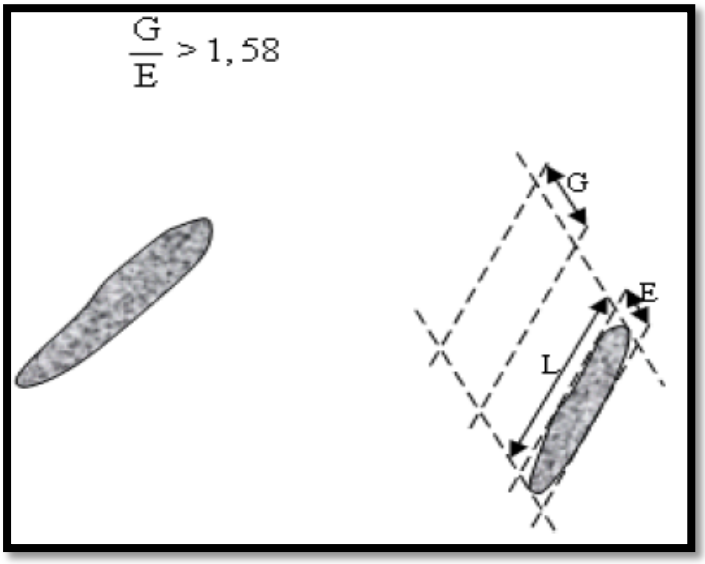


Figure I.19 : Forme d'un granulat **[20].**

Elle est mesurée par un double tamisage sur des tamis à mailles carrées qui trient suivant la grosseur, et sur des cribles à barres parallèles qui trient suivant l'épaisseur. On peut déterminer aussi :

- L'indice d'allongement $\boldsymbol{\beta = \frac{G}{L} \leq 1}$ **(I.5)**
- L'indice d'aplatissement $\boldsymbol{\alpha = \frac{E}{G} \leq 1}$ **(I.6)**

La forme des granulats influence :

- La facilité de mise en œuvre et le compactage du béton ;
- La compacité du mélange, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment.

La forme est d'autant meilleure qu'elle est proche d'une sphère ou d'un cube **[20].**

I.4.2.1.4.3. Selon les caractéristiques physiques :

On va citer quelques caractéristiques

- La masse volumique absolue et apparente ;
- L'absorption d'eau ;
- Teneur en eau ;
- L'humidité ;
- Degré de saturation ;

- Porosité & compacité… **[20].**

I.4.2.1.4.4. Selon la propreté des granulats :

- ✓ ***Dans le cas des sables,*** le degré de propreté est fourni par essai appelé "équivalent de sable piston PS" (norme P 18-597).

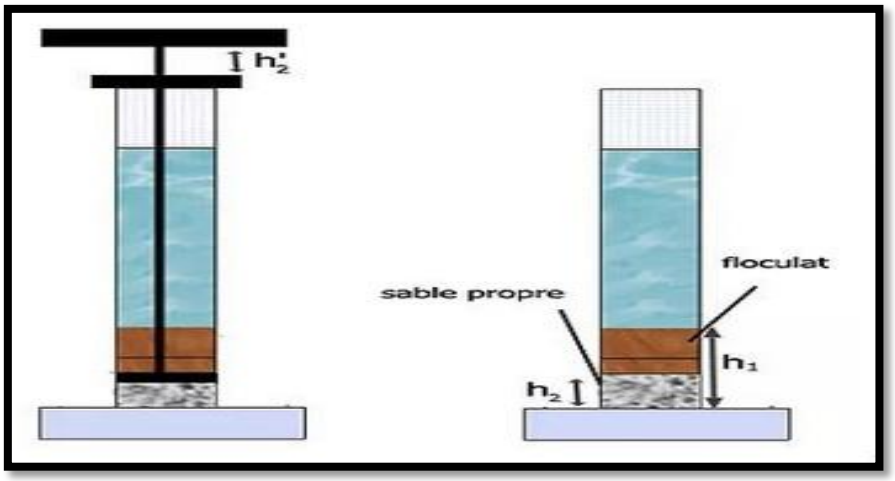


Figure I.20 : Essai équivalent de sable **[20].**

- ✓ ***Dans le cas des graviers*** **(NF P18-591)**

Le gravier est composé majoritairement de particules graveleuses mais il est rarement exempt d'éléments fins.

Suivant son utilisation, une trop grande quantité d'éléments fins dans le gravier entraîne des conséquences néfastes sur le béton ; par exemple (chute des caractéristiques mécaniques, grands risques de fissuration).

L'essai de propreté du gravier met en évidence la présence d'éléments fins dans le gravier **[20].**

I.4.2.1.4.5. Selon la taille des grains des granulats :

- **Analyse granulométrique**

L'analyse granulométrique permet de déterminer la proportion des différents constituants solides d'un granulat en fonction de leur grosseur à l'aide de tamis.

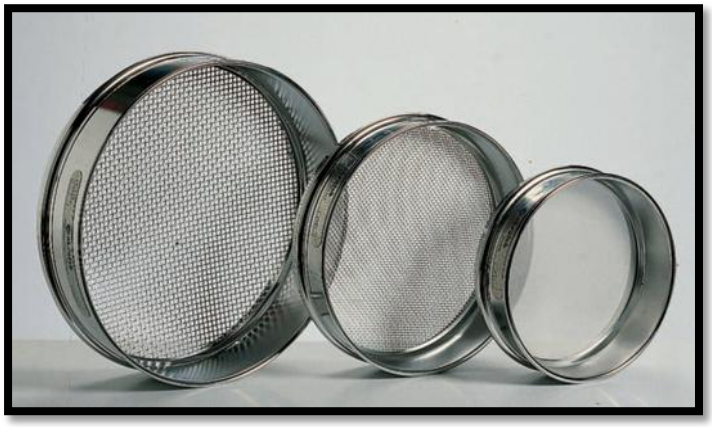


Figure I.21 : Série de tamis **[20].**

Les pourcentages ainsi obtenus sont exprimés sous forme d'une courbe granulométrique. Ainsi en fonction de la dimension des grains, on distingue :

Tableau I.4 : Classes granulaires des granulats **[20].**

APPELLATION		**Dimension de la maille des tamis en (mm)**
Pierres cassées et cailloux	Gros	50 à 80
	Moyens	31,5 à 50
	Petits	20 à 31,5
Gravillons	Gros	12,5 à 20
	Moyens	8 à 12,5
	Petits	5 à 8
Sable	Gros	1,25 à 5
	Moyens	0,31 à 1,25
	Petits	0,08 à 0,31
Fines, farines et fillers		Inférieur à 0,08

Les granulats sont désignés par d/D c'est-à-dire les dimensions s'étalent de « d » pour les petits éléments à « D » pour les gros éléments.

La classe des granulats est définie par tamisage au travers d'une série de tamis dont les mailles ont les dimensions suivantes en mm :

0,063 - 0,08 - **0,125** - 0,16 - 0,2 - **0,25** - 0,315 - 0,4 - **0,5** - 0,63 - 0,8 - **1** - 1,25 - 1,6 – 2 - 3,15 – **4** - 6,3 – **8** - 10 - 12,5 - 14 - **16** - 20 - 25 – **31,5** - 40 - 50 – **63** - 80 - 100 – **125.**

Les tamis dont les dimensions sont soulignées correspondent à la série de base préconisée lors d'une étude granulométrique **[20].**

I.4.2.1.3.6. Selon la nature des granulats :

a) Les granulats courants :

Les granulats courants sont ceux de masse volumique ∈ [2 ; 3 t/m^3].

Ce sont généralement les Basaltes, Quartzites, Grès, Porphyre, Diorite, granites, Schistes.

b) Les granulats lourds :

Essentiellement employés pour la confection des bétons lourds utilisés pour la construction d'ouvrages nécessitant une protection contre les rayonnements produits

c) Les granulats légers :

Utilisés pour la confection de bétons légers. Ces bétons présentent en général des résistances d'autant plus faibles qu'ils sont plus légers, mais cette dernière qualité peut, dans certains cas, être particulièrement intéressante (préfabrication, isolations, gain de poids sur fondations difficiles ou onéreuses, etc.) ; ou sa densité absolue <1.

Ce sont généralement les Argile expansée, Schistes expansés, Pierre ponce, Pouzzolane.

d) Les granulats très durs :

Ce sont généralement les Quartz, corindon, carborundum, paillettes de fonte, etc., sont incorporés au béton pour anti-usure (sols industriels par exemple) **[20].**

I.4.2.1.4.7. Selon la dureté du granulat :

Il s'agit de caractériser la résistance d'une face d'un granulat à la rayure, c'est-à-dire à la destruction mécanique de sa structure cristalline.

La dureté d'un granulat se juge par référence à l'échelle de dureté de MOHS (définie précédemment). Un minéral est dit plus dur qu'un autre s'il raye celui-ci.

- Pratiquement, on compare les duretés des granulats (minéraux) courant à celle de l'acier, le verre et l'ongle **[20].**

I.4.2.1.4.8. Selon les caractéristiques mécaniques :

Les caractéristiques mécaniques des granulats sont déterminées par des essais tentant de reproduire certaines sollicitations propres à des usages spécifiques des granulats **[20].**

a) Essai Micro Deval :

C'est un essai dont le principe est de reproduire, dans un cylindre en rotation, des phénomènes d'usure. Les modalités de cet essai font l'objet de la norme NF P 18-572 **[20].**



Figure I.22 : Machine Micro Deval **[20].**

b) Essai Los Angeles :

Le principe est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. Il fait l'objet de la norme NF P 18-573 **[20].**



Figure I.23 : Machine Los Angeles **[20].**

Les granulats sont classés en 6 catégories allant de **A** à **F**, chacune d'elle devant les conditions suivantes :

Tableau I.5 : Catégories des granulats selon la résistance aux chocs et à l'usure **[20].**

CATEGORIES	$L_A + M_{DE}$	L_A	M_{DE}
A	≤25	≤20	≤15
B	≤35	≤25	≤20
C	≤45	≤30	≤25
D	≤55	≤35	≤30
E	≤80	≤45	≤45
F	>80	>45	>45

L_A - Coefficient Los Angeles.

M_{DE} - Coefficient Micro Duval.

I.4.2.2. Les ciments :

I.4.2.2.1. Définition :

Les ciments sont des poudres fines obtenues par la cuisson à haute température (vers 1450°c) et le serrage d'un mélange minéral (calcaire + agrile en général). Ces poudres constituées de sels minéraux anhydres instables (en particulier silicates et aluminates de chaux) forment avec l'eau une pâte capable par « hydratation » de faire prise et de durcir progressivement (plus au moins rapidement, d'ailleurs) d'où le nom de liants hydrauliques par opposition avec Liants aériens « à base de chaux grosse et maigre » qui ne peuvent durcir qu'au contact de l'air **[21].**

I.4.2.2.2. Les types des ciments :

La nouvelle normalisation comporte cinq types principaux de ciments :

- Type I Ciment Portland ;
- Type II Ciment Portland composé ;
- Type III Ciment de haut fourneau ;
- Type IV Ciment Pouzzolanique ;
- Type V ciment au Laitier et aux cendres.

A titre d'information, nous avons fait dans la suite de ce titre le parallèle entre les éléments des anciennes normes, commercialisés. Jusqu'au fin décembre 1994 et les ciments des nouvelles normes qui leur succèdent **[22].**

I.4.2.3.3. Quelques caractéristiques des principaux ciments :

- **Classe de la résistance :**

Les ciments se caractérisent en fonction de leur classe de résistance à la compression, ces dernières, mesurées à 28 jours d'âge, étant exprimées en MPa pour les ciments fabriqués jusqu'à fin 1994, on distinguait 4 classes de résistances dont les valeurs sont indiquées dans le tableau ci-dessous (les ciments de la classe 35 n'existant pratiquement plus depuis plusieurs années) :

Tableau I.6 : Classe de résistances des ciments **[23].**

Désignation de la classe MPa	Sous classe éventuelle	Résistance à la compressions		
		à 2jours minimaux	à 28 jours	
			minimales	maximales
35	-	-	25.0	45.0
45 45	- R (rapide)	- 15.0	35.0 35.0	55.0 55.0
55 55	- R (rapide)	- 22.5	45.0 45.0	65.0 65.0
THR très hautes performances	- R (rapide)	- 27	55.0 55.0	- -

❖ **Remarque importante :**

Il est très important de noter que les classes de ciments commercialisés jusqu'à la fin de 1994 étaient indiquées en fonction de leur résistance moyenne à la compression à 28 jours, chaque dénomination de classe comportant une limite inférieure de 10 MPa en moins et une limite supérieure de 10Mpa en plus (ex : classe 45, limite inférieure nominale 35 MPa, limite supérieure nominale 55 MPa, valeur minimale garantie 35 MPa **[23].**

I.4.2.2.4. Utilisations des ciments :

a. Le ciment Portland Artificiel (CPA-CEM I) :

- **Composition :** Résulte du broyage du clinker et du sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) pour régulariser la prise, et éventuellement de fillers en faible quantité (<5%). La teneur en clinker est au minimum 95%.
- **Domaines d'emploi principaux :** Les CPA-CEMI conviennent pour des travaux de toute nature ; béton armé ou béton précontraint. Par contre, leurs caractéristiques n'en justifient pas l'emploi pour les travaux de maçonnerie courante et les bétons de grande masse (forte réaction exothermique) ou faiblement armé **[24].**

b. Le ciment Portland Composé (CPJ – CEM II) :

- **Composition :** Résulte du mélange de 80 à 94% de clinker pour les classes II/A et de 65 à 79% pour les classes II/B, le reste pouvant être un ou plusieurs constituants tels que laitiers, cendres volantes, pouzzolanes ou calcaire dans les proportions de 6 à 20% ou 21 à 35% ainsi qu'éventuellement les fillers à moins de 5%.
- **Domaines d'emploi principaux :** Les CPJ - CEMII 32,5 conviennent bien pour les travaux de maçonnerie, les bétons peu sollicités, les travaux routiers et travaux de grande masse. La sous-classe ''R'' est destinée à la préfabrication avec ou sans traitement thermique.

Les CPJ – CEM II 42,5 et 52,5 conviennent pour les travaux de toute nature en béton armé ou précontraint. De façon générale, les CPJ sont bien adaptés pour les travaux massifs exigeant une élévation de température modérée, les routes et le béton manufacturé.

Lorsque l'aspect est important (béton apparent, enduits), il convient d'éviter l'emploi de certains CPJ contenant des proportions importantes de constituants susceptibles d'entraîner des variations de teinte trop marquées, notamment les cendres volantes **[24].**

c. Les ciments de Haut Fourneau CHF et CLK CEMIII :

- **Composition :** Deux types de ciments comportent des pourcentages de laitier assez importants ; il s'agit du ciment de Haut-fourneau (CHF) et du ciment au laitier au clinker (CLK).
- **Domaines d'emploi principaux :** Ces ciments sont bien adaptés aux :

  - Travaux hydrauliques, souterrains, fondations et injection ;
  - Travaux en eaux agressives : eau de Mer, eaux séléniteuses, eaux industrielles, eaux pures ;
  - Ouvrages massifs pour la classe 32,5 et éventuellement 42,5 (52,5 présente une forte chaleur d'hydratation): fondations, piles d'ouvrages d'art, murs de soutènement, barrages ;
  - Les travaux de béton, notamment pour les classes 42,5 et 52,5 à condition de bien protéger le béton après décoffrage ;
  - En traitement de sol et en préfabrication **[24].**

I.4.2.2.5. Fabrication du ciment

La fabrication du ciment Portland se fait à partir de la pierre calcaire et de l'argile. Ces matériaux sont extraits des carrières, concassés et stockés, puis l'analyse chimique est faite pour déterminer le dosage des matières premières. Après avoir été dosées, les matières premières sont broyées et mélangées. La poudre ainsi obtenue est introduite dans l'extrémité supérieure d'un four rotatif légèrement incliné **[25].**

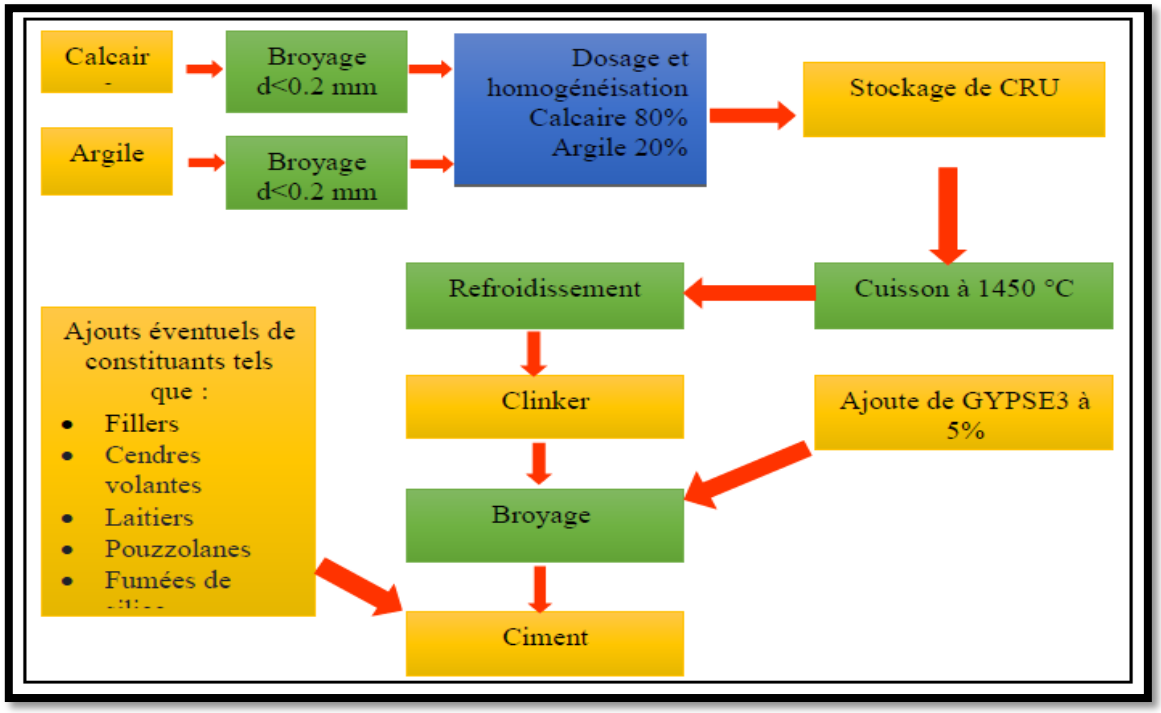


Figure I.24 : Etapes de fabrication du ciment **[25].**

I.4.2.3. Les bétons :

I.4.2.3.1. Définition :

Un béton est un matériau composite résultant du mélange judicieusement dosé d'un squelette granulaire (gravie et sable) et d'une matrice pâteuse durcis sable composée de ciment, d'eau, le plus souvent, parfois d'adjuvants. Après le durcissement il devient un matériau pierreux **[26].**

Tableau I.7 : La teneur des constituants du béton en poids et en volume **[27].**

Constituants	Eau	Air	Ciment	Granulats
Volume (%)	14-22	1-6	7-14	60-78
Poids (%)	5-9	--	9-18	63-85

I.4.2.3.2. Les types de béton :

Le choix du béton dépend des exigences spécifiques du projet. Il existe une grande variété de bétons permettant de répondre à diverses contraintes techniques et esthétiques.
Voici une vue d'ensemble des principaux types de béton utilisés dans le domaine de la construction :

- **Le béton armé :**

Le béton armé reprend les codes du béton pour fondation traditionnelle, mais avec l'ajout d'armatures en acier. Cette combinaison confère une résistance accrue aussi bien en traction qu'en compression, compensant les principales faiblesses du béton conventionnel.
Les coffrages COSMOS, qu'ils soient en aluminium, métalliques, mixtes ou circulaires, sont parfaitement adaptés pour le béton armé. L'utilisation de ce type de coffrage garantit une mise en œuvre optimale et durable.

- **Le béton autoplaçant :**

Le béton autoplaçant est extrêmement fluide, facilitant grandement son utilisation. Il permet un gain de temps considérable lors du coulage sur chantier, car sa mise en œuvre se fait sans vibration.
Ce type de béton est idéal pour les coffrages métalliques COSMOS, offrant une qualité de finition supérieure pour les parements en béton.

- **Le béton haute performance (BHP) :**

Les bétons de haute performance (BHP) possèdent des caractéristiques nettement supérieures à celles des bétons conventionnels. Ils sont plus résistants à la compression, plus fluides, et moins poreux, protégeant ainsi efficacement les armatures intégrées. Utilisés dans les infrastructures critiques, les BHP assurent une durabilité et une robustesse exceptionnelles.

- **Le béton traditionnel :**

Le béton traditionnel est un mélange de ciment, granulats, sable et eau. Il est couramment utilisé pour les ouvrages courants tels que les fondations, les dalles et les murs. Sa simplicité et sa polyvalence en font un choix de base pour de nombreux projets de construction.

- **Le béton léger :**

Ce béton, très malléable et léger, est efficace pour les travaux de rénovation. Il offre une excellente isolation thermique et une bonne résistance aux chocs, idéal pour les murs porteurs et les dalles. Son faible poids le rend également parfait pour les constructions nécessitant une charge réduite.

- **Le béton précontraint :**

Le béton précontraint est conçu pour rester en compression, ce qui améliore sa performance et sa durabilité.
Grâce à des câbles de précontrainte en acier, ce type de béton est idéal pour les structures nécessitant une grande résistance, comme les ponts. La précontrainte peut être appliquée avant ou après le coulage du béton, chaque méthode offrant des avantages spécifiques.

- **Le béton fibré :**

Le béton fibré renforce la solidité générale des structures, limitant les risques de fissuration. Les fibres intégrées dans le béton jouent un rôle similaire à celui des armatures en acier,

assurant une mise en œuvre facile et rapide. Ce type de béton est particulièrement avantageux pour les projets nécessitant une haute résistance.

- **Le béton prêt à l'emploi :**

Le béton prêt à l'emploi est préparé en usine et transporté sur site par camion toupie. Ce type de béton offre une solution pratique et rapide pour les projets de toutes tailles, garantissant une qualité constante et une application efficace grâce à des pompes à béton ou des goulottes.

- **Le béton lourd :**

Utilisé principalement pour des ouvrages spécifiques comme les centrales nucléaires, le béton lourd contient des granulats très denses, empêchant le passage de radiations. Ce type de béton répond à des normes de sécurité très strictes, assurant une protection maximale.

- **Le béton projeté :**

Le béton projeté est appliqué sur des surfaces solides à l'aide d'un projecteur d'air comprimé. Cette méthode limite l'affaissement et assure une application rapide et efficace. Idéal pour les réparations et les constructions complexes, le béton projeté offre des caractéristiques similaires au béton traditionnel.

- **Le béton de ciment alumineux :**

Le béton de ciment alumineux est composé de ciment à base d'aluminate de calcium, offrant une prise rapide et une résistance accrue. Ce type de béton est particulièrement adapté aux travaux nécessitant une résistance élevée aux températures et aux conditions difficiles **[28].**

I.4.2.3.3. Propriétés de bétons :

Le béton doit être considéré sous deux aspects :

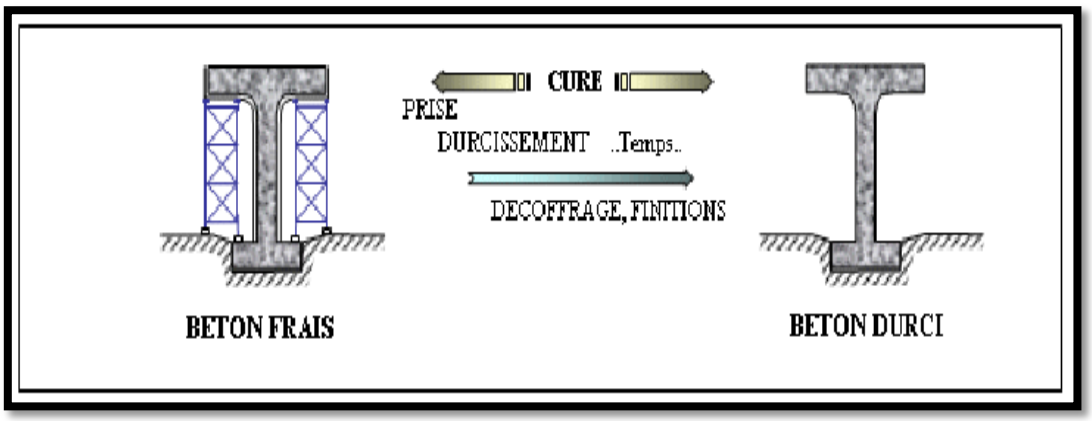


Figure I.25 : Durcissement, finition **[29].**

- **Le béton frais :** mélange de matériaux solides en suspension dans l'eau, se trouve en état foisonné à la sortie des appareils de malaxage et en état compacté après sa mise en œuvre dans son coffrage.

- **Le béton durci :** solide dont les propriétés de résistance mécanique et de durabilité s'acquièrent au cours du déroulement de réactions physico-chimiques entre ses constituants, d'une durée de quelques jours à quelques semaines.

a. Propriétés du béton frais :

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui est la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage complet du ferraillage.

L'ouvrabilité doit être telle que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité. Elle est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais. Dans le cas de béton ordinaire elle est principalement influencée par :

- ❖ La nature et le dosage du liant ;
- ❖ La forme des granulats ;
- ❖ La granularité et la granulométrie ;
- ❖ Le dosage en eau.

L'ouvrabilité peut s'apprécier de diverses façons et en particulier par des mesures de plasticité. Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. Nous n'en citerons que quelques-uns, les plus couramment utilisés dans la pratique **[29].**

b. Propriétés du béton durci :

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois, voire des années.

- ❖ La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité ;
- ❖ Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci ;
- ❖ Les phénomènes de retrait sont une caractéristique prévisible dans l'évolution du béton ;
- ❖ Les caractéristiques de déformations sous charge du béton sont connues et peuvent être mesurées **[29].**

I.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, généralités sur les géomatériaux est abordée comme un élément essentiel dans les domaines de la géotechnique.

Il apparaît clairement que ces matériaux jouent un rôle central dans la stabilité des structures et la réussite des projets. L'importance de l'étude de ces matériaux met en évidence la nécessité d'une compréhension approfondie de leur comportement et de leurs propriétés avec les conditions qui les entourent, qu'elles soient naturelles ou artificielles.

Ce chapitre fournit une base de connaissances qui sera utilisée pour appliquer ces concepts dans les chapitres suivants, où l'accent sera mis sur l'étudie et l'analyse de ces matériaux dans le but d'optimiser les paramètres caractéristiques des mélanges granulaires.

Chapitre II :

Caractéristiques des granulats locaux

II.1. Introduction :

Les géomatériaux de base telle que *les granulats* constituent des éléments essentiels dans les différents projets de génie civil, des mines …etc. Il est donc important de contrôler leurs propriétés physiques et mécaniques afin de garantir la qualité et le respect des exigences des normes techniques.

Depuis le 1er juin 2004, la commercialisation de ces matériaux en Europe est soumise à l'obtention du marquage CE (Conformité Européenne), qui atteste que le produit est conforme aux normes européennes.

Dans ce contexte, la Société des Travaux Routiers, de Transport de Marchandises et d'Hydrocarbures, abrégée SOTRAMA, a été fondée le 5 avril 1992, qui est spécialisée dans la production et la distribution des granulats et des matériaux de base, tout en veillant au contrôle de la qualité à travers des essais en laboratoire rigoureux, afin d'assurer la conformité de ses produits aux normes nationales et internationales, est notre chois comme cas d'étude.

II.2. Présentation de la région d'étude :

Dans le cadre de cette étude, les géomatériaux ont été prélevés à partir de la carrière de KEF DHEBAA Société SOTRAMA, située dans la région de Morsett, wilaya de Tébessa, à l'Est de l'Algérie. Cette zone est caractérisée par une richesse géologique importante, notamment en matériaux calcaires utilisés dans la fabrication des granulats pour les travaux de génie civil.

II.3. Contexte géographique :

II.3.1. Localisation :

Notre site d'étude d'où on a extrait nos granulats qui est un site de calcaire (du lieu-dit KAF DHBAA, exploité par la société SARL SOTRAMAT TEBESSA), est implanté dans la commune de Boulhef Dyr, la daïra d'El Kouif, située à environ 20 km au Nord-Est de Tébessa et 14 km au Sud-Est de Morsott. Ce site est localisé dans une région à fort potentiel minier qui est constituée de formations carbonatées d'âge Crétacé à Éocène appartenant à l'Atlas Saharien Oriental Algérien.

L'entrée sur le site se fait par une voie aménagée d'environ 1 km, à partir de la Route Nationale N°16 (RN16), une artère importante reliant Annaba à Tébessa. La route et la voie ferrée qui traversent la localité de Boulhef Dyr, sont d'une importance capitale pour le transport des matériaux extraits vers les marchés régionaux et nationaux **[31].**

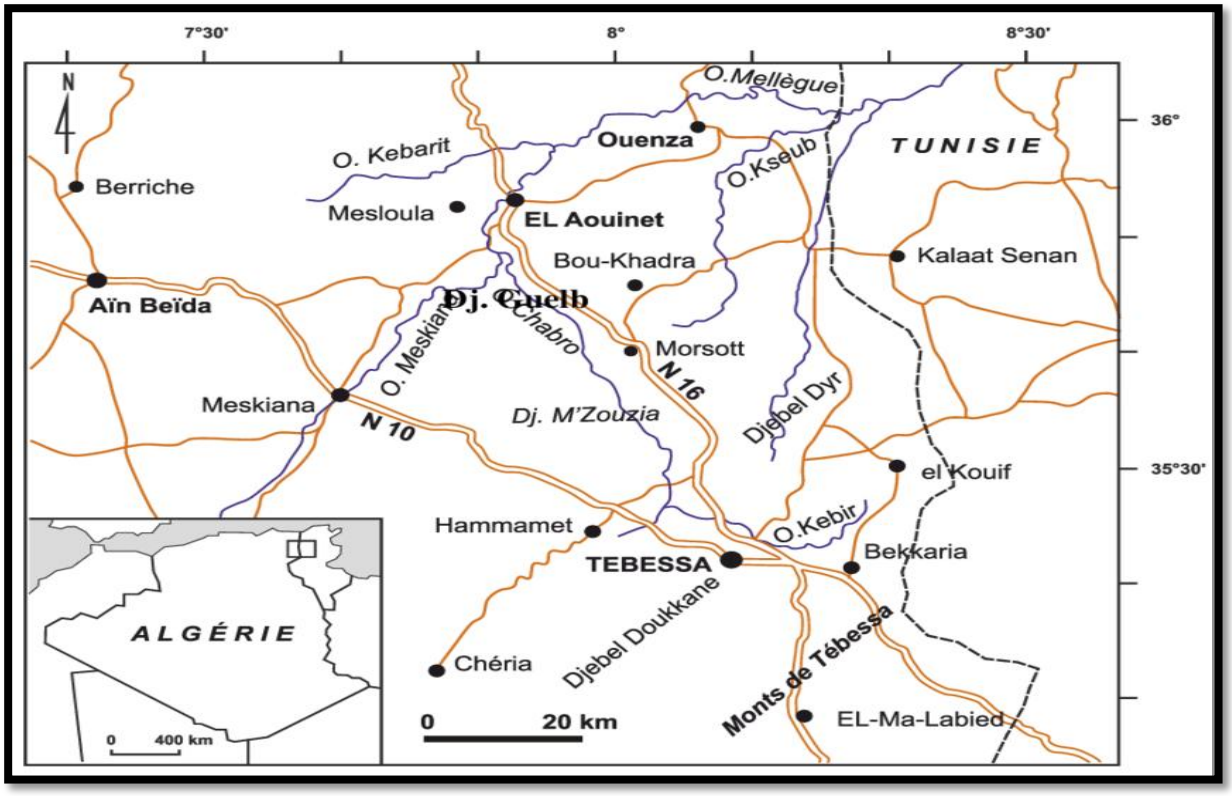


Figure II.1 : Localisation de la région du site (D'après la carte d'Algérie 1/500.000 TEBESSA NI-32-6-NO).

Le bassin versant Tébessa-Morsott fait partie du bassin versant de Medjerda et du sous bassins d'Oued Méllegue. C'est une vaste plaine de forme grossièrement allongée au NW-SE dont les rebords sont constitués de Djebels culminants à 1470 m, son altitude varie entre 780 m et 820 m, ses limites sont définies comme suit :

- **Limite Est :** Dj .Cherab, Dj .Djebissa, Koudiat ELGoussa, Koudiat El-mouhad, Draa Snoubar.
- **Limite Ouest :** Dj boukkane, Dj Tezbent, Dj Belkfif, Dj Snoubar, Dj Matlougue, Dj Serdiess, Dj Draa Snoubar.
- **Limite Nord :** Koudiat Nasla ,Khanguet El Araar ,Dj .Hamzal ,Kef Rokma ,Darraz El-faia ,Dj.Guenifiada ,Dj. Zitouna ,Dj. Koudiat Draa El –Seguir ,Dj .Dyr ,Dj .Mektonba.
- **Limite Sud :** Dj .Bouroummane, Dj Djoua, Dj Anoual, Koudiat El –Douamis, Dj .Osmor, Dj .Tela.

La route nationale N° 16 reliant Annaba à Tébessa et la voie ferrée de même direction traversent la localité de Boulhef Dyr.

II.3.2. Situation géographique :

La plaine de Tebessa-Morsott fait partie du bassin versant de la Medjerda et du sous bassin d'oued Mellègue, dont l'altitude moyenne varie de 750 m au Nord et 900 m au Sud. Elle est allongée grossièrement Nord-West/Sud-Est et correspond à une vaste dépression fermée d'une

superficie d'environ de 600 Km². Elle est délimitée au Nord par Dj. Zitouna, au Sud par Dj.Tazbent, à l'Ouest par Dj. Matloug et à l'Est par Dj. Djébissa et Bouramane **[32].**

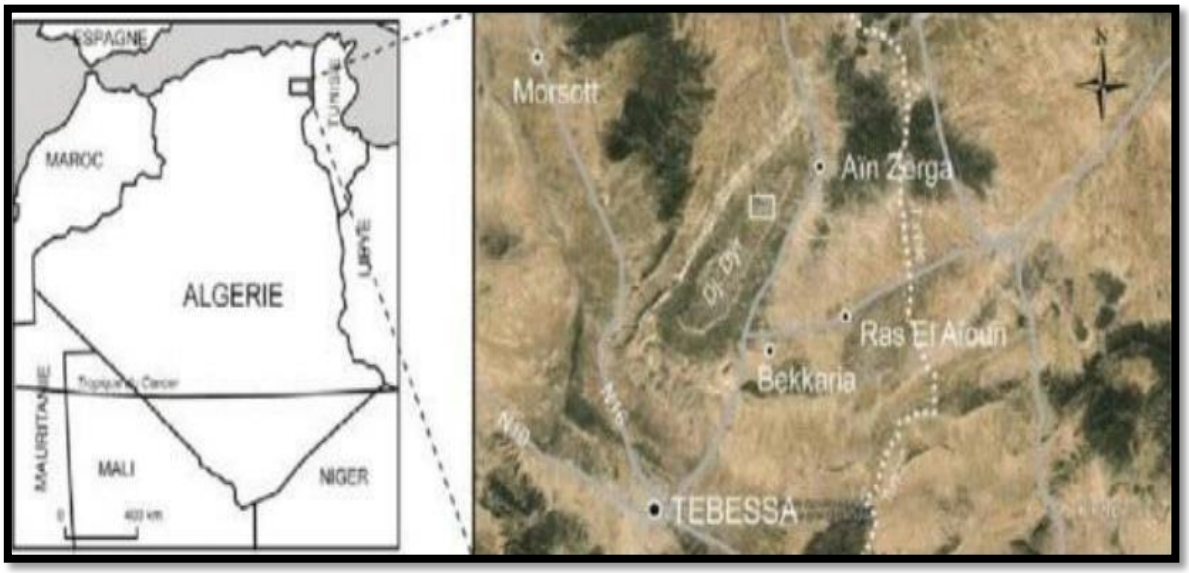


Figure II.2 : Situation géographique et vue satellitaire de la région.

Tableau II.1 : Les coordonnés du périmètre de la carrière KEF DHEBAA selon le système U.T.M.

N°.d'ordre	X	Y
1	418.100	3934.600
2	418.400	3934.600
3	418.400	3934.300
4	418.200	3934.300
5	418.200	3934.400
6	418.100	3934.400

II.4. Contexte géologique :

II.4.1. Litho stratigraphie régionale :

La zone d'étude se trouve dans la région structurale de l'Atlas saharien méridional, plus précisément dans les monts de Tébessa, qui constituent un élément important de l'orogénie atlasique en Algérie orientale. Une analyse lithostratigraphique a été réalisée à partir de la cartographie géologique et des forages effectués dans la région, révélant une séquence sédimentaire allant du Mésozoïque au Quaternaire. Cette séquence présente des variations faciologiques en lien avec les cycles tectono-sédimentaires alpins **[33].**

Elle est formée par les monts de Tébessa dont la litho stratigraphie s'établit comme suit :

a. Quaternaire (qt) :

Le Quaternaire est caractérisé par une composition diversifiée. Cette unité géologique est composée de sédiments fins récents provenant à la fois de l'action éolienne et fluviale, auxquels s'ajoutent des alluvions argileuses et caillouteuses indiquant un dépôt dans un cône alluvial et une plaine d'inondation. De plus, les croûtes calcaires provenant de la pédogenèse dans un climat semi-aride contribuent à la complexité de cette séquence. Ces dépôts recouvrent principalement la plaine de Tébessa, présentant une épaisseur maximale au sud de l'escarpement rocheux de Tenoukla, où ils recouvrent partiellement les formations géologiques sous-jacentes **[34].**

b. Tertiaire :

Le secteur tertiaire est composé de plusieurs sous-ensembles distincts. Pendant la période du Pliocène, la composition lithologique est principalement caractérisée par des sables quartzeux d'origine fluviatile à deltaïque, accompagnés d'argiles rouges témoignant d'une oxydation en milieu continental. On observe également la présence de conglomérats polygéniques constitués de galets de calcaires et de quartzites, pouvant atteindre une épaisseur allant jusqu'à 400 mètres dans les bassins en subsidence. Cette phase correspond à un dépôt molassique post-orogénique associé à la dernière phase de surrection de l'Atlas saharien. Pendant la période du Miocène, les sédiments se distinguent par la présence d'argiles rouges pontiennes qui exhibent des caractéristiques continentales, une plasticité et localement une présence de gypse, ainsi que par des sables peu consolidés provenant de dépôts de chenaux temporaires, atteignant une épaisseur maximale d'environ 250 mètres. Les conditions environnementales du dépôt sont caractérisées par des influences lacustres et palustres, sous l'impact d'un climat allant de aride à semi-aride. Au cours de l'Éocène, la stratigraphie est caractérisée par des calcaires massifs contenant du silex, qui sont des caractéristiques des plateformes carbonatées, ainsi que par des marnes noires gypseuses témoignant d'un environnement laguno-marin réducteur. Par ailleurs, la présence de concentrations de phosphates, en particulier dans la couche appelée la « Phosphatière de Tébessa », présente un intérêt économique, ces dépôts étant liés à une montée marine d'origine téthysienne **[34].**

c. Mésozoïque :

Le Mésozoïque est subdivisé en deux grandes périodes. La première couche, qui est de l'ère du Crétacé, affiche une épaisseur d'environ 2200 mètres. Pendant la période du Maestrichtien, on observe la coexistence de marnes noirâtres contenant une quantité importante de matière organique et de calcaires blancs massifs peuplés d'Inocerames, ce qui indique un environnement de plateforme carbonatée ouverte. Le Campanien est identifiable par la présence de calcaires marneux blancs crayeux, qui sont caractéristiques d'un environnement pélagique. En revanche, au Turonien, la présence de marnes noires gypsifères et de calcaires dolomitiques témoigne d'une diagenèse précoce dans un environnement hypersalin. Pendant la période céno-mannienne, les marnes jaunes et les lumachelles sont des dépôts marins de haut niveau, associés à des bancs calcaires à rudistes qui forment des récifs barrières. À l'Albien, la présence de calcaires gris en plaquettes et de bancs à rudistes témoigne d'un faciès de

plateforme interne. Durant l'Aptien, la présence de calcaires massifs et de dolomies témoigne d'un environnement caractérisé par des hauts-fonds carbonatés. La deuxième unité géologique, datant du Trias, se caractérise par la présence d'argiles rouges gypsifères typiques d'un environnement continental évaporitique, avec des intercalations de lentilles de gypse pur formant des diapirs salins. Ces formations se trouvent sous la forme de diapirs intrusifs au sein des anticlinaux, résultant directement de la tectonique salifère alpine **[34].**

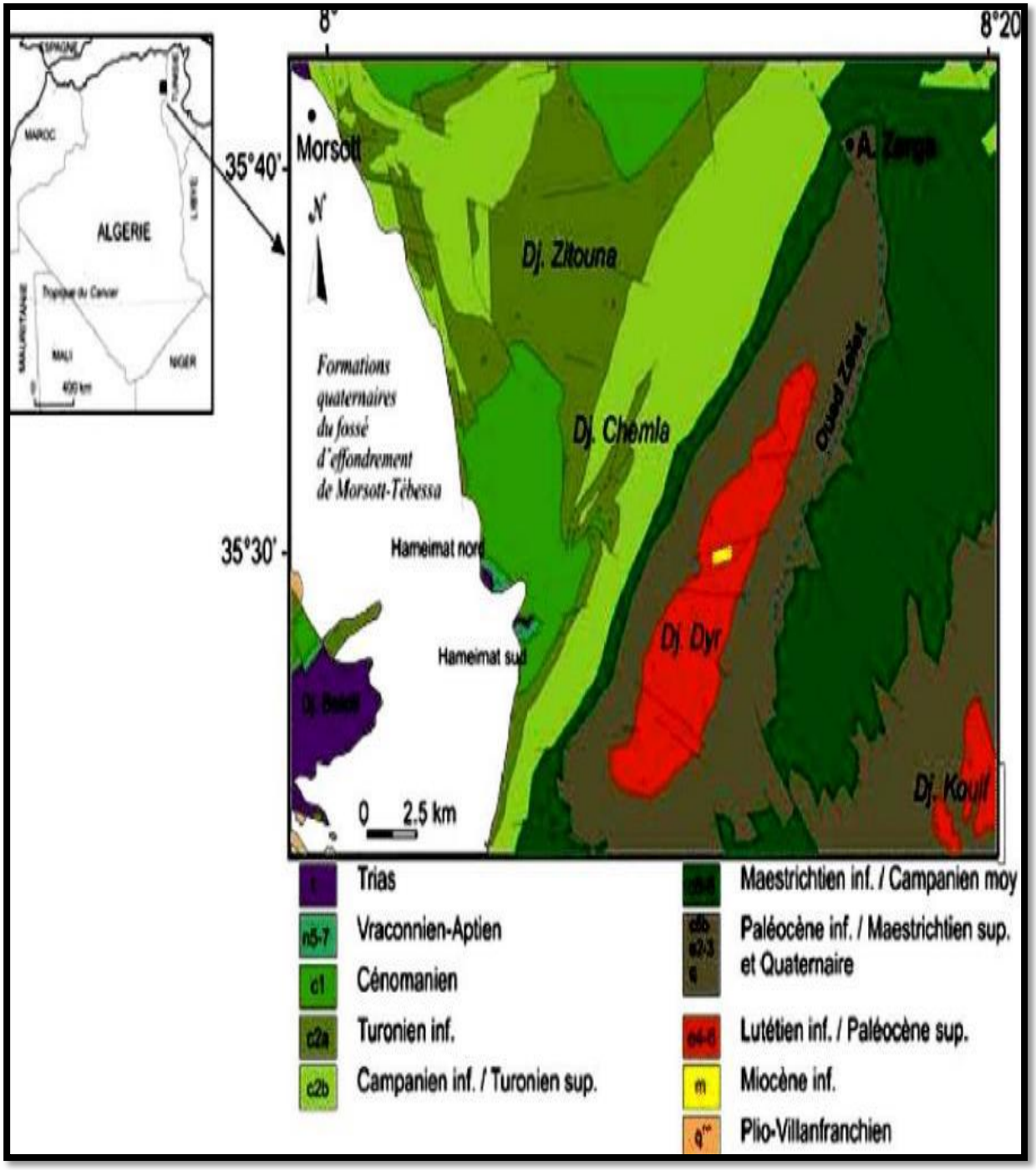


Figure II.3: Carte géologique de la région de Morsott (d'après la carte géologique de Morsott au 1/50 000).

II.5. Aperçu géomorphologique :

La plaine de Tebessa-Morsott correspond à un grand fossé d'effondrement qui s'élève à une alti-tude de 800 m, entourée de part et d'autre par deux grands ensembles de masses calcaires, séparées par des dépressions.

L'évolution morphologique dans cette région a conduit à un façonnement de reliefs typique pour un terrain sédimentaire, caractérisé par un contraste lithologique qui se matérialise par l'opposition des pentes tres faibles au centre de la plaine (2%), et les pentes fortes aux niveaux des bordures (18%). Ces reliefs sont formés d'un ensemble de synclinaux et anticlinaux à faciès prédominants de calcaires et de marnes qui du point de vu stratigraphique datent du Crétacé, de l'Aptien jusqu'au Maestrichtien et paléogène avec la mise en place des formations triasiques.

II.5.1. Les monts septentrionaux:

Le passage des hautes plaines de Mellègue aux monts de Tébessa se manifeste par le resserrement des plaines et par l'agrégation des unités géomorphologiques tel que le val perché de Dyr et celui de Bou Rbaia. La majorité des plis dans cette bordure septentrionale sont tranchés par des failles transversales.

II.5.2. Les monts méridionaux:

Au sud, la fosse de Ain Chabro tranche les monts de Nememcha, interrompant les formes des reliefs qui possédaient, auparavant une certaine symétrie.

Le relief devient de plus en plus complexe à l'Est de Dj.Doukkane, une barrière orientée de l'Ouest vers l'Est avant de s'incliner vers le Nord-Est où elle ferme la plaine de Tebessa. Cette barrière présente en petits massifs tels que Dj Anouel, Dj Azmor. Dj Bouramane et Dj Djebissa **[32].**

II.6. Description lithologique et stratigraphique :

La description lithologique des principaux faciès caractérisant la plaine de Tebessa-Morsott montre :

- Une formation triasique sous forme de diapir disloquant les formations sus-jacentes, affleurant en bordure du bassin et au niveau de la zone de Bekaria (Dj Djebissa), Bir D'heb (Dj Belekfif). Dj. Hameimet et au Nord de Morsott. Cette formation a une grande importance sur la salinité de la nappe.
- Une formation carbonatée représentée par d'importantes couches de calcaires fissurées et des marnes d'age Crétacé. Cette formation est très nette au niveau des bordures de la plaine.
- Un important dépôt alluvionnaire d'age Mio-plio-quaternaire (sables, argiles, limons et gra-viers) qui occupe la surface de toute la plaine et surtout au piedmont des reliefs accidentés en dis-cordance avec les formations précédentes.

Enfin, une carte regroupant les principaux facies géologiques du bassin d'effondrement de Tebessa - Morsott a été produite à partir des cartes géologiques de Tebessa, Morsott et Meskiana **[35].**

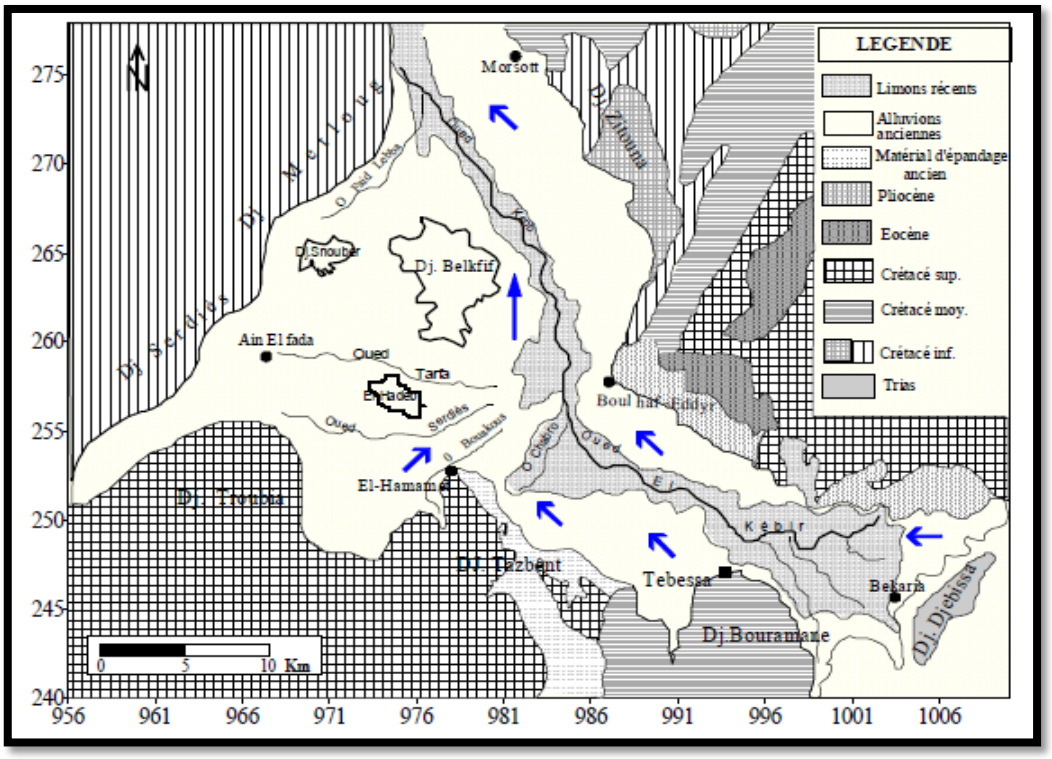


Figure II.4 : Cadre géologique du bassin d'effondrement de Tébessa-Morsott **[32].**

II.7. Tectonique :

L'évolution tectonique dans cette région résulte de nombreuse phases de l'orogenèse alpine ayant été le responsable de la formation des horsts et des grabens, ainsi que des structures plissées. La plaine de Tébessa-Morsott correspond à un bassin de sédimentation modérément subsidient **[36].**

C'est un fossé d'origine tectonique qui s'est formée au tertiaire et au quaternaire dans laquelle sont accumulées des formations détritiques, reposant sur les calcaires aux bordures. Le fossé d'effondrement de Tébessa-Morsott est la conséquence des mouvements tectoniques qui ont subi différentes phases d'origine alpine étant responsables de la formation de bassin et de graben, ainsi que des structures plissées **[37].**

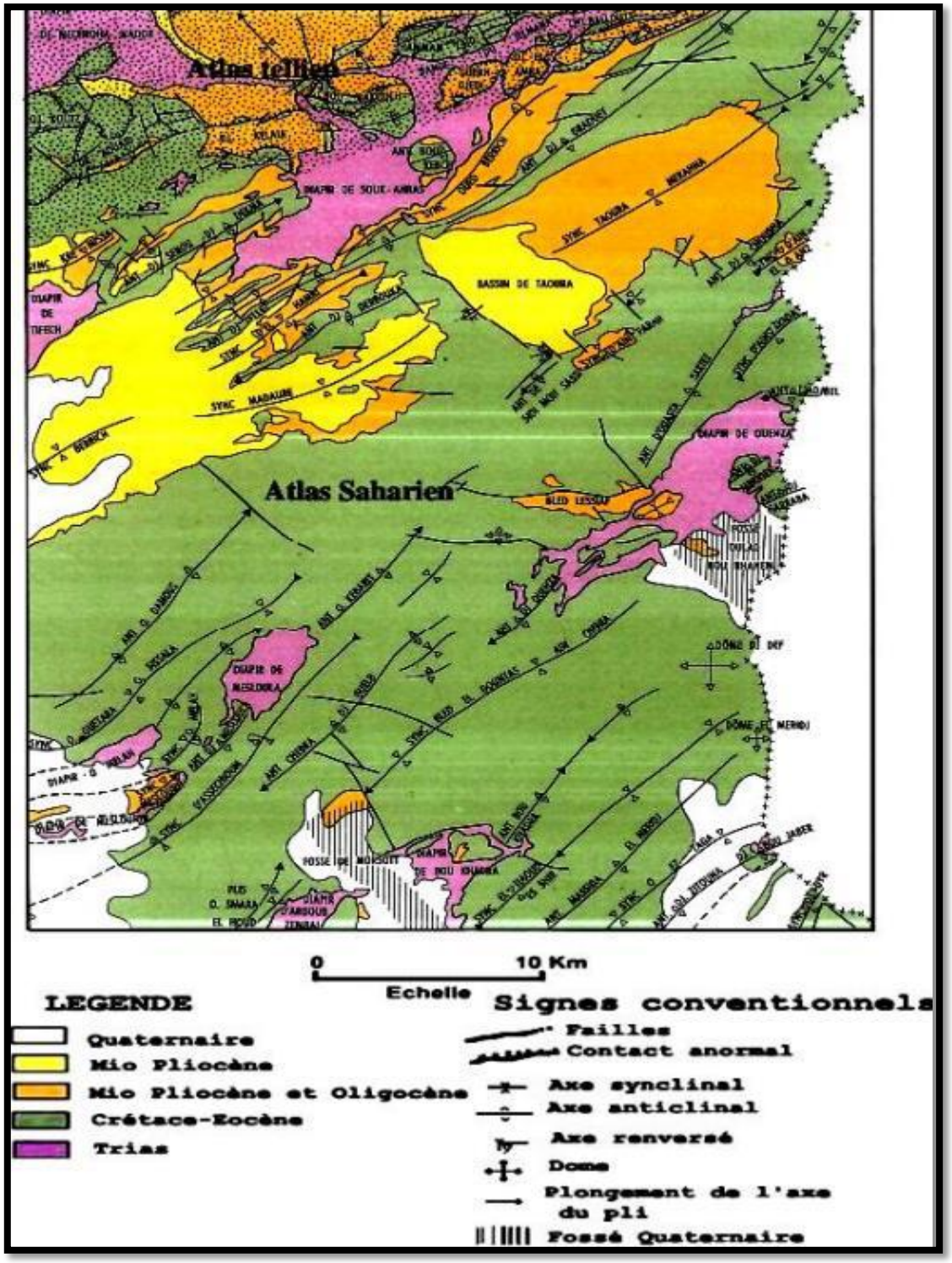


Figure II.5: Extrait de la carte géologique de l'Algérie au 1/500000, montre le fossé de Morsott et de Tébessa (Service de la carte géologique de l'Algérie, 1951).

II.8. Zone d'échantillonnage des Géomatériaux :

Le choix de la zone d'étude s'inscrit dans une démarche d'exploitation des ressources locales et d'optimisation de leurs caractéristiques pour des applications géotechniques.



Figure II.6 : Zone d'échantillonnage Carrière Kaf dehbaa.

II.9. La production des géomatériaux sur carrière Kaf dehbaa :

La production des granulats nécessite deux principaux types d'opérations :

- ***L'extraction :*** s'effectue dans la carrière à l'aide des explosifs. Les tirs de mines provoquent l'abattage d'une grande quantité de matériaux éclatés.
- ***Le traitement :*** est réalisé dans des installations de traitement primaire et secondaire pour réduire les tailles de la roche et sélectionné les déférentes classes granulaires.

II.9.1. Les étapes d'extraction des granulats :

II.9.1.1. Reconnaissance géologique et implantation :

- Identifier les zones riches en matériaux à travers des études géologiques et des levés topographiques ;
- Choisir l'emplacement optimal pour l'exploitation.

II.9.1.2. Décapage :

Enlèvement de la couche superficielle non exploitable (terre végétale, argile, etc.), appelée aussi « découverte ».

II.9.1.3. Forage de la roche :

Réalisation de trous à l'aide de foreuses dans la masse rocheuse afin d'y introduire les explosifs.

II.9.1.4. Minage (tir de mine) :

Chargement des trous avec des explosifs et déclenchement de la mise à feu pour fragmenter la roche.

II.9.1.5. Abattage :

Détachement des matériaux après le tir, avec des blocs de roches de tailles variées.

II.9.1.6. Chargement et transport :

Chargement des blocs extraits à l'aide de chargeuses ou pelles mécaniques, puis transport vers l'unité de traitement (concassage, criblage...).



Figure II.7 : Transport Le matériaux vers l'unité de traitement par chargeuse.

II.9.2. Étapes De Traitement Des Granulats :

Après l'extraction des matériaux bruts de la carrière, ceux-ci subissent plusieurs étapes de traitement pour devenir des granulats utilisables dans les travaux de construction. Ces étapes visent à obtenir des matériaux conformes aux normes en termes de granulométrie, de propreté et de résistance.

Les principales étapes observées au sein de la Carrière KAF DEHBAA sont les suivantes :

II.9.2.1. Concassage (Broyage) :

Les blocs rocheux de grande taille sont réduits en fragments plus petits à l'aide de concasseurs primaires et secondaires.



Figure II.8 : Zone de concassage primaire (gros blocs).

II.9.2.2. Criblage :

Cette opération permet de trier les matériaux selon leur taille. Les tamis vibrants (cribles) séparent les granulats en différentes fractions granulométriques.



Figure II.9: Station de concassage secondaire et tertiaire (réduction plus fine).

II.9.2.3. Lavages (si nécessaire) :

Certains matériaux peuvent être lavés pour éliminer les fines ou les impuretés argileuses qui affectent la qualité.

II.9.2.4. Stockage :

Les granulats traités sont ensuite stockés dans des zones dédiées, prêtes à être chargées ou utilisées pour les analyses de laboratoire.

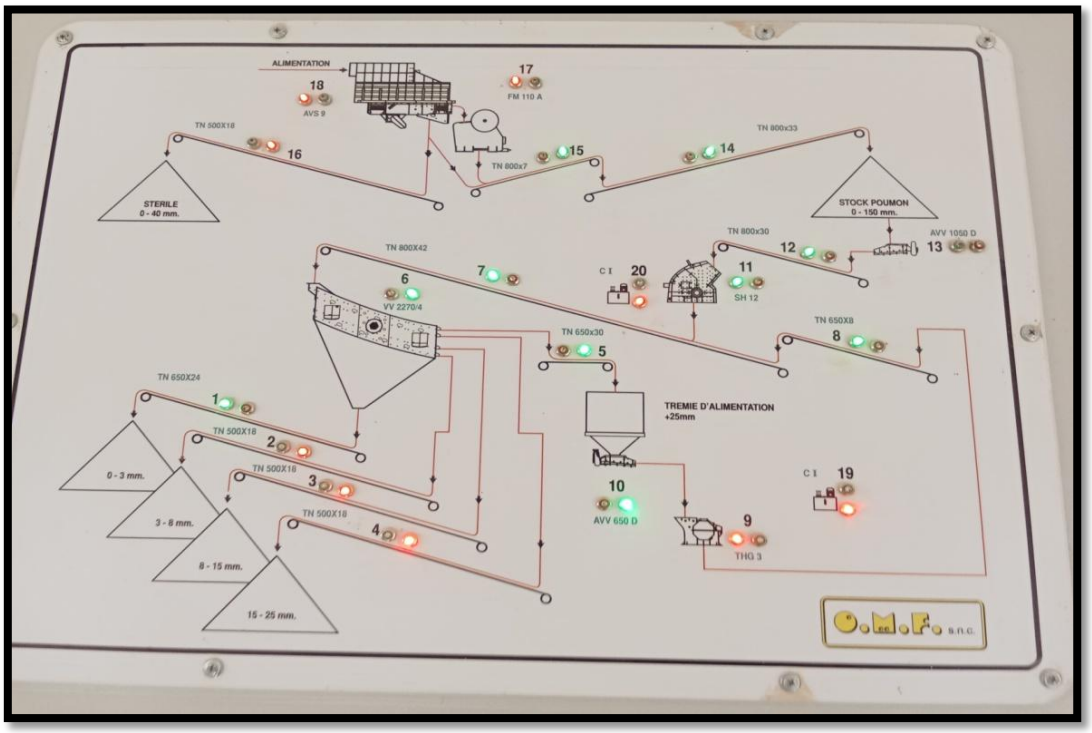


Figure II.10 : Schéma de traitement poste primaire carrière Kef dhebaa.

II.10. Classification des granulats selon le diamètre de carrière kef dhebaa :

Dans la carrière KEF DHEBAA, les granulats sont classés selon leur diamètre à l'aide d'un processus de criblage mécanique, après l'étape de concassage. Cette classification granulométrique permet de séparer les matériaux en différentes fractions normalisées, en fonction de leurs dimensions. Les principales classes obtenues sont généralement : ***0/3 mm (sable), 3/8 mm, 8/15 mm, et 15/25 mm.*** Chaque fraction est destinée à un usage spécifique dans le domaine du génie civil, notamment dans la fabrication du béton, les enrobés routiers ou les remblais. Cette classification respecte les exigences des normes techniques en vigueur, assurant ainsi une qualité et une régularité des produits livrés. Le respect de cette classification est essentiel pour garantir les performances mécaniques et la durabilité des ouvrages réalisés avec ces matériaux.



Figure II.11: Classification granulométrique des granulats de la carrière Kef dhebaa.

Tableaux II.2 : Les classes granulaires dans carrière Kef dhebaa.

Type des granulats selon la classe	Diamètre des granulats en (mm)
Sable Carrière	**0/3**
Grave concassée	**3/8**
Grave concassée	**8/15**
Grave concassée	**15/25**

II.11. Essais de caractérisation :

II.11.1. La granulométrie : [EN 933-1]

II.11.1.1. Définition :

L'analyse granulométrique, définie selon la norme EN 933-1, permet de distinguer les granulats suivant des classes granulaires, commercialisées par les fabricants. Elle rend observable et fournit un grand nombre d'informations sur les caractéristiques granulaires des granulats. L'élaboration d'une composition de béton nécessite une connaissance parfaite de la granulométrie et de la granularité, car la résistance et l'ouvrabilité du béton dépendent essentiellement du sable et gravier.
Cela permet d'observer et de quantifier sa granularité afin de déterminer la qualité granulaire et de répondre à la question de savoir si un granulat à une qualité granulaire suffisante pour produire du béton.

II.11.1.2. But de l'essai :

Le but de l'analyse granulométrique consiste à caractériser les sables, en déterminant la distribution dimensionnelle des grains, la teneur en fines et le module de finesse (Mf).

II.11.1.3. Principe de l'essai :

L'essai consiste à séparer, au moyen d'une série de tamis emboîtés les uns sur les autres dont les ouvertures des mailles de tamis sont décroissantes du haut vers le bas (**Figure II.13)**, un matériau en plusieurs classes granulaires de dimensions décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis, en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision requise.

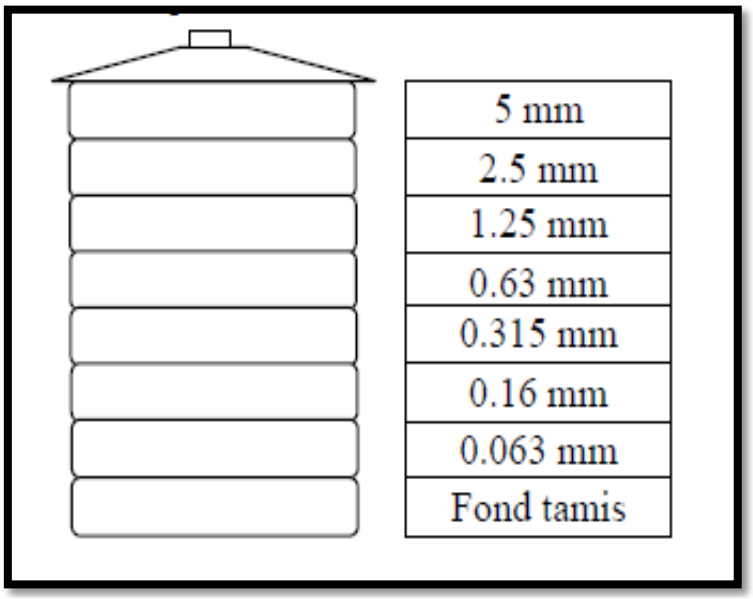


Figure II.12 : Colonne de tamis **[38].**

Le procédé adopté est le tamisage par lavage suivi d'un tamisage à sec.
Les masses de grains retenues sur les différents tamis sont rapportées à la masse initiale de matériau, en considérant que le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient pas de plus de 1% entre deux séquences de vibration de la tamiseuse. Puis on trace la courbe granulométrique sur un graphique, comportant en ordonnée le pourcentage des tamisâtes sous les tamis, dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique.

Tableau II.3 : Les dimensions nominales des tamis **[38].**

Module	Tamis (mm)	Module	Tamis (mm)	Module	Tamis (mm)
20	0.08	**31**	1.00	**42**	12.5
21	0.100	**32**	1.25	**43**	16
22	0.125	**33**	1.60	**44**	20
23	0.160	**34**	2.00	**45**	25
24	0.200	**35**	2.50	**46**	31.5
25	0.250	**36**	3.15	**47**	40
26	0.315	**37**	4.00	**48**	50
27	0.400	**38**	5.00	**49**	63
28	0.500	**39**	6.30	**50**	80
29	0.630	**40**	8.00		
30	0.800	**41**	10		

II.11.1.4. Matériel nécessaire :

- Tamiseuse ;
- Etuve ventilée pour le séchage ;
- Dispositif de lavage ;
- Série de tamis selon la norme EN 933-1 (0,063 ; 0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 4 ; 5 mm) ;
- Couvercle, évitant la perte de matériau pendant le tamisage et un réceptacle de fond pour recueillir le dernier tamisât ;
- Bacs, brosses et pinceaux ;
- Balance de précision à ± 0,1 % de la masse de la prise d'essai.

II.11.1.5. Préparation de l'échantillon :

Il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés et donc inopérants.
On réduit l'échantillon global avec un diviseur ou par quartage, jusqu'à avoir un échantillon supérieur ou égal à 200 g, selon la norme EN 933-1.

II.11.1.6. Mode opératoire :

- Détermination de la masse humide (M_1) de l'échantillon en le pesant ;
- Sécher l'échantillon dans l'étuve ventilée à la température de 110° ± 5° ;
- Déterminer la masse sèche totale (M_{S1}) de l'échantillon en le pesant ;
- Laver l'échantillon jusqu'à ce que l'eau soit claire ;
- Sécher à nouveau l'échantillon à 110° ;
- Déterminer la masse sèche après lavage (M_{S2}) de l'échantillon ;

- Monter la colonne de tamis dans l'ordre décroissant de l'ouverture des mailles en ajoutant le couvercle et le fond ;
- Verser le matériau sec dans la colonne de tamis ;
- Agiter mécaniquement cette colonne ;
- Reprendre un à un les tamis, en commençant par celui qui a la plus grande ouverture, en adaptant un fond et un couvercle ;
- Agiter manuellement chaque tamis, jusqu'à ce que le refus du tamis ne varie pas de plus de 1% en masse par minute de tamisage ;
- Verser le tamisât recueilli dans le fond sur le tamis immédiatement inférieur ;
- Déterminer ainsi la masse du refus de chaque tamis ;
- Poursuivre l'opération jusqu'à déterminer la masse du refus contenu dans le fond de la colonne de tamis ;
- Vérifier la validité de l'analyse granulométrique imposée par la Norme NF EN 933-1.

II.11.1.7. Fuseau de spécification :

Le fuseau de spécification (Tableau II.4) coïncide avec les limites de catégories définies dans les normes européennes des granulats, devant contenir le fuseau de régularité dans son intégralité.

C'est un ensemble de deux courbes granulométriques enveloppes établies pour chaque dimension de tamis à partir des valeurs spécifiées.

Le pourcentage en poids entre deux tamis successifs de la série doit être inférieur à 40%, selon la norme NF P18 541.

Le fuseau de spécifications est déterminé par deux valeurs spécifiées, qui sont définies en pourcentage de tamisât :

- Valeur spécifiée inférieure (Vsi) ;
- Valeur spécifiée supérieure (Vss).

Tableau II.4 : Fuseau de spécification des sables **[38].**

Tamis (mm)	Vsi	Vss
5	95	100
25 **125** **063** **0315**	80	100
	55	90
	30	70
	15	40
016	5	20
0063	0	15

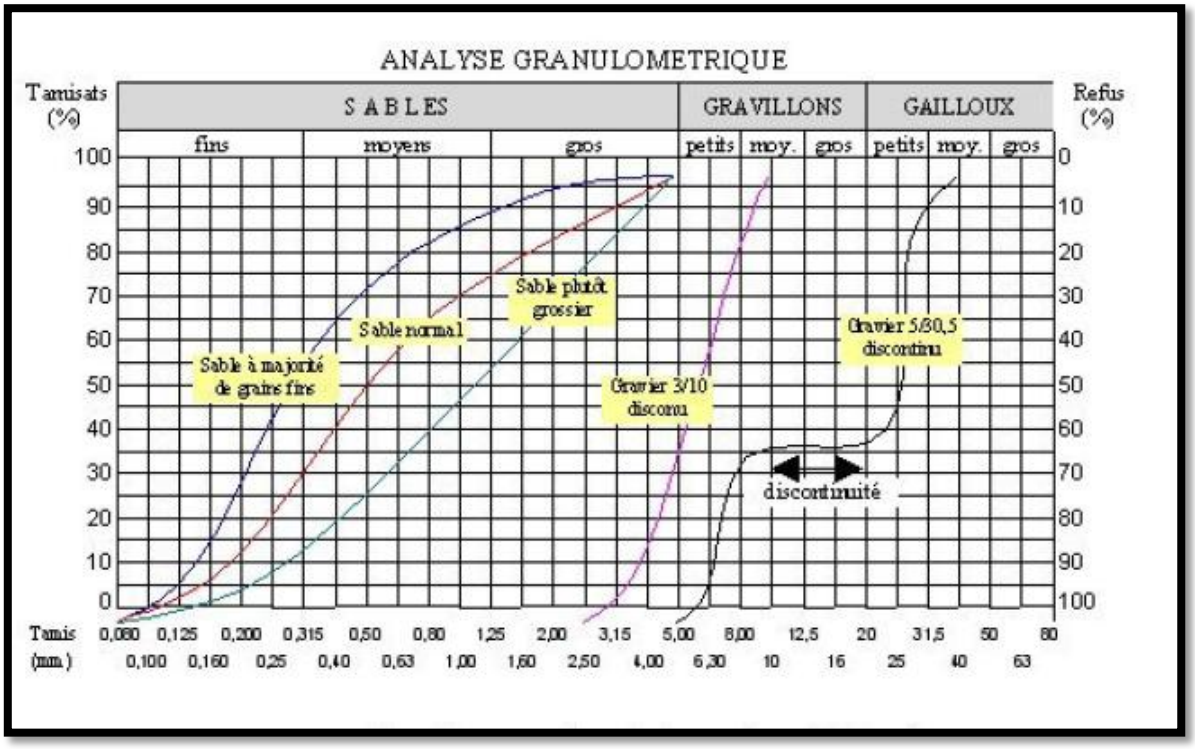


Figure II.13 : Courbe d'analyse granulométrique par tamisage **[38].**

II.11.1.8. Module de finesse : [NF P 18-304]

Les sables doivent présenter une granulométrie telle, que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton, tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile.

La forme de la courbe permet d'observer et d'apprécier la granularité du granulat. Mais, ce n'est pas suffisant, surtout, pour le sable. Le module de finesse permet de fournir une information plus précise en quantifiant la granularité d'un sable. Cette grandeur indique si un granulat comporte plutôt des grains fins, grossiers ou s'il a une granularité régulière. C'est un indicateur important, pour déterminer la capacité d'un granulat de donner une compacité suffisante au béton.

La norme, tenant compte des caractéristiques des gisements, fixe les limites à 1.8 et 3.2, mais l'optimum qui donnera le meilleur compromis résistance-maniabilité-maintien de l'homogénéité se situe à 2.5 ± 0.35 environ.

Le module de finesse d'un sable est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés, exprimé en pourcentage sur les tamis de la série suivante : 0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 – 5 mm.

$$Mf = \frac{1}{100} \sum \text{refus cumulés en \% des tamis } \{0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 - 5\} \quad \text{(II.1)}$$

- Pour **1,8 < Mf < 2,2 :** Le sable est à utiliser, si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance ;
- Pour **2,2 < Mf < 2,8 :** Le sable est à utiliser, si l'on recherche une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités ;

- Pour **2,8 < Mf < 3,2 :** Le sable est à utiliser, si l'on recherche des résistances élevées au détriment de l'ouvrabilité avec des risques de ségrégation ;
- Pour **Mf > 3,2 :** le sable est à rejeter.

II. 11.1.9. La teneur en fines :

La teneur en fines, définie comme étant la fraction granulaire passant au travers du tamis de 0,063 mm, doit être inférieure à 15% pour les bétons de qualité.

Les fines confèrent au béton frais un pouvoir de rétention d'eau, permettant de s'opposer au ressuage et une cohésion assurant le maintien de l'homogénéité (absence de ségrégation).

Leur excès devient défavorable, car il accroit la demande en eau, donc le rapport E/C. leur absence ne permet pas d'obtenir un béton suffisamment compact et réduit les résistances mécaniques.

La teneur en fines est obtenue par la relation suivante :

$$f = \frac{[(\mathbf{Ms1}-\mathbf{Ms2})+\mathbf{P}]}{\mathbf{Ms1}} \times \mathbf{100} \qquad \textbf{(II.2)}$$

Tel que :

P : matériau du fond de tamis **[38].**

II.11.2. Propriétés physique

II.11.2.1. Masse volumiques :

II.11.2.1.1. La masse volumique apparente :

II.11.2.1.1.1. Définition :

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté.

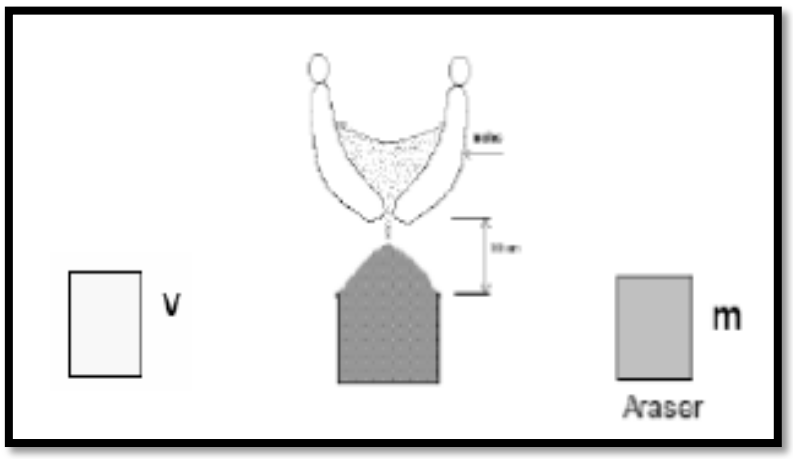


Figure II.14 : La masse volumique apparente **[39].**

La masse volumique apparente est donnée par :

$$\rho_{app} = \frac{m}{V} \qquad \textbf{(II.3)}$$

L'essai est répété 5 fois pour un volume de 1 litre et la moyenne de ces essais donne la valeur de la masse volumique apparente.

II.11.2.1.2. La masse volumique absolue :

II.11.2.1.2.1. Définition :

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains.

a) Méthode de l'éprouvette graduée :

Cette méthode est très simple et très rapide. Elle utilise du matériel très courant de laboratoire. Toutefois sa précision est faible.

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume V1 d'eau.
- Peser un échantillon sec M de granulats (300 g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- Lire le nouveau volume V2.

La masse volumique absolue est :

$$\rho_S = \frac{M}{V2 - V1} \qquad \textbf{(II.4)}$$

Pour opérer dans de bonnes conditions, utiliser une éprouvette graduée en verre de 500 cm3 de volume. La lecture des niveaux V1 et V2 doit se faire en bas du ménisque formé par l'eau. En effet, celle-ci a tendance à remonter sur les bords de l'éprouvette sur une hauteur de 1 à 2 mm, ce qui fausse bien sûr la lecture des volumes si la lecture est effectuée en haut du ménisque.

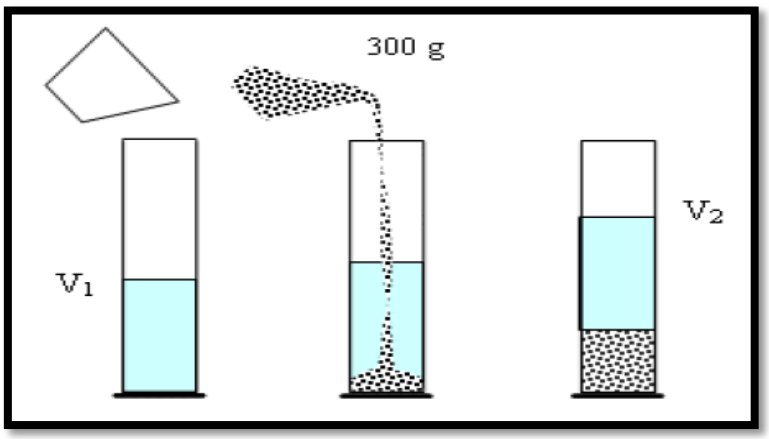


Figure II.15 : La Méthode de l'éprouvette **[39].**

b) Méthode du ballon :

Cette méthode de détermination des masses volumiques est plus précise à condition de prendre un certain nombre de précautions.

- Déterminer avec précision la masse **m1** du ballon rempli d'eau ;
- Déterminer avec précision la masse **m2** d'un échantillon de matériau sec ;
- Introduire la totalité du matériau dans le ballon, remplir d'eau. Vérifier qu'il n'y a aucune bulle d'air ;
- Peser alors avec précision le ballon, soit **m3 [39].**

La masse volumique absolue est alors :

$$\rho_{abs} = \frac{m2}{(m1+m2) - m3} \qquad \textbf{(II.5)}$$

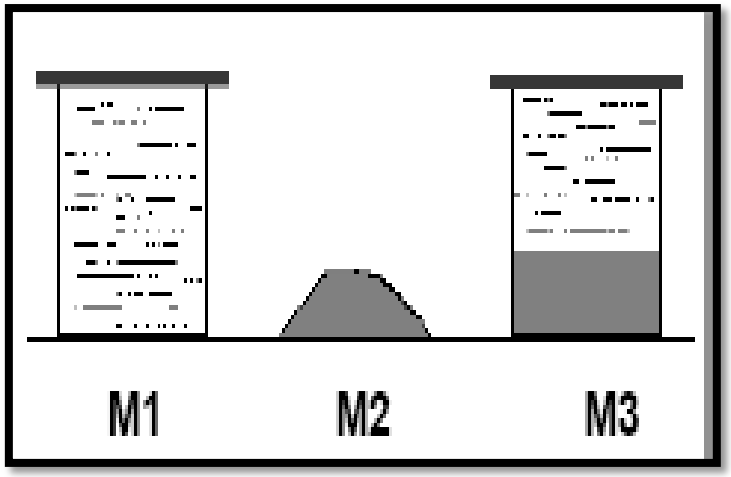


Figure II.16 : La Méthode du ballon **[39].**

II.11.2.2. Equivalent de sable : [NF EN 933-8]

II.11.2.2.1. Définition :

D'une façon générale, la propreté des granulats doit toujours être vérifiée ; l'utilisation de sables pollués provoque une baisse des résistances mécaniques et une augmentation du retrait, sans oublier un dosage en eau dans le béton plus important avec les incidences sur ses caractéristiques.

La propreté désigne principalement :

- La teneur en fines argileuses ou autres particules adhérentes à la surface des grains, ce qui se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent, lorsqu'on frotte les granulats entre les mains.
- Les impuretés susceptibles de nuire à la qualité du béton, parmi lesquelles on peut citer les scories, le charbon, les particules de bois, les feuilles mortes, les fragments de racine.

Le pourcentage des fines, ensemble de grains passant au tamis de 63 µm, peut être important dans les sables broyés ou concassés. En effet, un excès de fines nécessite un dosage en eau plus élevé, mais un manque de fines conduit à des bétons peu maniables, ségrégables et de faibles compacités.

Cette étape est primordiale, pour quantifier la propreté de sable, qui est fourni par l'équivalent de sable (ES), selon la norme EN 933-8.

Tableau II.5 : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par DREUX **[40].**

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

II.11.2.2.2. But de l'essai :
L'équivalent de sable est appliqué principalement pour le choix, le contrôle des sables à béton et évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. Son principal objectif repose sur la détermination d'un coefficient d'équivalence de sable, quantifiant sa propreté.

II.11.2.2.3. Principe de l'essai :
Il permet de mesurer la propreté d'un sable, tout en rendant compte de la quantité des éléments fins contenus dans ce sable : fines de nature siliceuse ou calcaire et fines de nature argileuse, y compris celles qui recouvrent les granulats de dimension supérieure à 63 µm, n'apparaissant pas dans l'analyse granulométrique par voie sèche.
Il est appliqué uniquement sur la fraction de sable 0/2 mm, avec une teneur en humidité inférieure à 2 % et à la température de 23 ± 3°C. Dans certains cas, il peut s'avérer nécessaire de réduire ou d'augmenter la teneur en humidité naturelle, afin d'obtenir une prise d'essai, dont l'humidité est comprise entre 0% et 2%. Le tamisage se fait par voie humide, afin de ne pas perdre d'éléments fins.

L'essai d'équivalent de sable (SE) consiste à faire floculer les éléments fins d'un sable mis en suspension dans une solution lavant, permettant de séparer les éléments fins argileux et provoquant la floculation, puis, après un temps de mise au repos donné, à mesurer la hauteur

des fines floculées, sable propre + floculat = h_1 ; la hauteur de sable propre, h_2 si c'est au piston ou h'_2 si c'est au réglet.

L'équivalent de sable est donné par la formule suivant :

$$ES = \frac{h2}{h1} \times 100 \qquad \textbf{(II.6)}$$

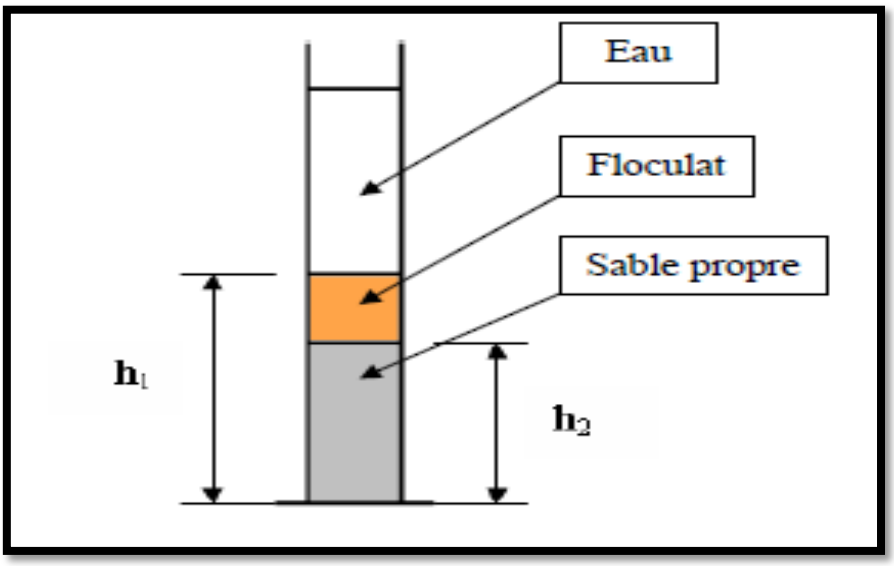


Figure II.17: Détermination de l'équivalent de sable **[40].**

II.11.2.2.4. Préparation de l'échantillon :

L'échantillon de laboratoire doit être réduit par une opération de division ou par quartage, afin d'obtenir une prise d'essai.

Le sable 0/4 mm doit être réduit à la fraction 0/2 mm, à l'aide d'un tamis de mailles carrées de 2 mm, avec une teneur en humidité inférieure à 2%.

Ensuite, on prépare les deux échantillons humides de sable sec, dont la masse humide de chaque échantillon est égal à 120 (1+w) g.

Où w est la teneur en eau de l'échantillon, telle que :

$$w = \frac{Masse\ d'eau}{Masse\ sèche} \qquad \textbf{(II.7)}$$

II.11.2.2.5. Matériel nécessaire :

- Un tamis de mailles 2 mm avec fond et couvercle ;
- Deux éprouvettes cylindriques transparentes en matière plastique, de diamètre intérieur 32 mm, de hauteur 430 mm, munies de deux repères à 100 et 380 mm de la base ;
- Un bouchon en caoutchouc, s'adaptant sur les éprouvettes ;
- Un entonnoir à large ouverture pour transvaser l'échantillon ;
- Un piston taré de 1 kg ;

- Une réglette métallique graduée, de 500 mm de longueur ;
- Un flacon de 5 litres muni d'un siphon (placé à 1 mètre au-dessus de la table de travail), contenant une solution lavante à base de solution concentrée, de chlorure de calcium + glycérine + solution aqueuse de formaldéhyde ;
- Un tube laveur relié au flacon avec un robinet d'arrêt ;
- Une machine agitatrice ;
- Un chronomètre ;
- Une main écope pour le remplissage ;
- Une balance, avec une précision de 0,2 g ;
- Des bacs en plastique pour effectuer les essais.



Figure II.18 : Machine d'agitation pour éprouvette d'équivalent de sable **[40].**

II.11.2.2.6. Mode opératoire :

- Déterminer la teneur en eau de l'échantillon ;
- Préparer deux échantillons de 120+ (1+w) g ;
- Remplir l'éprouvette cylindrique jusqu'au trait inférieur, en utilisant le tube laveur relié au flacon contenant la solution lavant. Amorcer si nécessaire le siphon en soufflant dans le tube court, tout en ouvrant le robinet du tube laveur ;
- Verser progressivement à l'aide de l'entonnoir, l'échantillon humide dans l'éprouvette puis frapper fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main, afin de déloger les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon ;
- Laisser reposer 10 minutes ;
- Boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc et la fixer correctement sur la machine agitatrice de telle sorte que le bouchon soit bloqué ;
- Enclencher la machine, agitant horizontalement l'éprouvette suivant 90 cycles de
- 20 cm en 30 secondes ;
- Rincer le bouchon avec la solution lavant à l'aide du tube laveur au-dessus de l'éprouvette et rincer les parois de l'éprouvette ;

- Faire remonter les éléments fins, tout en maintenant l'éprouvette en position verticale en procédant de la manière suivante : l'éprouvette étant soumise à un lent mouvement de rotation, remonter lentement et régulièrement le tube laveur ;
- Fermer le robinet, lorsque le niveau de la solution atteint le trait repère supérieur (compléter éventuellement le volume déplacé par le tube) ;
- Laisser reposer 20 minutes ;
- Mesurer à l'aide de la réglette, la hauteur h_1 du niveau supérieur du floculat par rapport au fond de l'éprouvette ;
- Descendre doucement le piston dans l'éprouvette, jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, le manchon coulissant prenant appui sur l'éprouvette ;
- Bloquer le manchon coulissant sur la tige du piston ;
- Introduire la réglette dans l'encoche du manchon, amener le zéro contre la face inférieure de la tête du piston et lire la hauteur h_2 du sable propre au niveau de la face supérieure du manchon **[40].**

II.11.2.3. La propreté superficielle des graviers : [NF P 18-591]

II.11.2.3.1. Définition :

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral de particules inférieur à 0,5 mm mélange ou adhérent à la surface des granulats supérieur à 2 mm.

II.11.2.3.2. But de l'essai :

Les graviers doivent être propres avant leur utilisation dans la fabrication des bétons, donc le mais de cet essai est de déterminé la propreté superficielle des granulats supérieurs à 2 mm.

II.11.2.3.3. Principe :

Contrairement aux sables, les graviers présentant des classes granulaires relativement grossières. Ainsi, le principe de séparation des agrégats des éléments fins ne se fera pas par sédimentation mais par lavage.

II.11.2.3.4. Matériel utilisé :

- Un tamis de maille 0,5 mm ;
- Balance.

II.11.2.3.5. Mode opératoire :

1) Peser une masse M_0 (kg) de l'échantillon ;
2) Laver l'échantillon jusqu'à ce que l'eau qui traverse le tamis soit claire ;
3) Essuyer l'excès en eau à l'aide d'un chiffon et peser la nouvelle masse, soit M_1.

II.11.2.3.6. Le calcul :

On remplace M_0 et M_1 dans la formule suivante par leurs valeurs respectives.

$$\mathbf{P(\%) = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100} \qquad \textbf{(II.8)}$$

Le gravier est propre si P (quantité d'éléments fins) ≤5% **[41].**

II.11.3. Propriété mécanique :

II.11.3.1. Essai Micro-Deval (MDV) : [NF P 18-572]

II.11.3.1.1. But de l'essai :

Cet essai a pour but de déterminer la résistance à l'usure à sec ou à l'état humide.



Figure II.19 : L'appareil Micro Deval **[42].**

II.11.3.1.2. Principe de l'essai :

L'essai consiste à appliquer un cycle d'usure par attrition à sec ou en présence d'eau à un échantillon de 500 g, selon la norme NF P 18-572.

On introduit les 500 g de matériau préparé, en ajoutant 2,5 litres d'eau si l'essai est réalisé en présence d'eau, et une charge abrasive correspondante à la classe choisie. Puis, un cycle de 12000 rotations du cylindre autour de son axe est réalisé, avec une vitesse de rotation de 100 ± 5 tr/min durant de 2 heures.

Enfin, on récupère le matériau soigneusement en évitant les pertes. Ensuite, le matériau sera tamisé sur un tamis de 1.6 mm et la charge abrasive sur un tamis de 8 mm, en soumettant l'ensemble à un jet d'eau, jusqu'à ce que l'eau soit claire, puis on sèchera le refus de tamis 1.6 mm à 105°.

La résistance à l'usure est donnée comme étant le coefficient Micro-Deval, exprimé par la formule suivante :

$$\mathbf{MDE} = \frac{\boldsymbol{m}}{\boldsymbol{M}} \times \mathbf{100} \qquad \textbf{(II.9)}$$

Où :

- M : masse du matériau soumis à l'essai (g) ;
- m : masse des éléments passants au tamis 1.6 mm (g) ;
- MD : coefficient Micro-Deval (%).

Et suivant la méthode utilisée, le coefficient Micro-Deval est défini par cette quantité sans dimension, tel que :

- MDS est le coefficient mesuré à sec.
- MDE est le coefficient mesuré en présence d'eau.

L'essai est appliqué aux classes granulaires suivantes : 4/6,3 ; 6,3/10 ; 10/14 mm.

Tableau II.6 : Charges abrasives pour chaque classe granulaire **[42].**

Classes granulaires (mm)	Charge abrasive (g)
4/6,3	2000 ± 5 g
6,3/10	4000 ± 5 g
10/14	5000 ± 5 g

Selon la norme, le coefficient Micro-Deval ne doit pas dépasser 35 %.

II.11.3.1.3. Matériels utilisés :

- Appareil Micro-Deval: C'est un broyeur de forme cylindrique en acier d'axe horizontal, de diamètre intérieur 200 mm et de longueur interne de 154 mm ;
- Charge abrasive, constituée des billes sphériques de 10 mm de diamètre ;
- Série de tamis de : 1,6 ; 4 ; 6,3 ; 10 ; 14 mm.

II.11.3.1.4. Préparation de l'échantillon :

L'échantillon de départ doit être supérieur ou égale à 2 000 g. On réduit l'échantillon global avec un diviseur, jusqu'à obtenir un échantillon de 5 00 g ± 2 g. Ce dernier est tamisé à sec sur chacun des tamis de classe granulaire choisie par ordre de croissance, ensuite lavé et puis séché à l'étuve à 105° ± 5°.

II.11.3.1.5. Mode opératoire :

- Effectuer une prise d'échantillon de 500 g (détermination de la masse initiale) ;
- Laver l'échantillon pour éliminer les particules fines ;
- Sécher le pendant 24 heures ;
- Introduire la masse abrasive dans la cocotte de Micro-Deval, puis ajouter les 500 g de l'échantillon séché pour éviter l'écrasement ;
- Fixer la cocotte sur l'appareil de Micro-Deval ;
- Laisser l'appareil tourner pendant 2 heures, puis enlever le matériau ;
- Laver le matériau dans un tamis de 1,6 mm ;
- Sécher le matériau pendant 24 heures ;
- Peser le matériau après séchage (détermination de la masse finale).



Figure II.20 : Les boulets à mélanger avec l'échantillon **[42].**

II.11.3.2. Essai Los Angeles (LA) : [NF P 18-573]

II.11.3.2.1. But de l'essai :

L'essai Los Angeles a pour but de déterminer la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un granulat.



Figure II.21 : Appareillage de Los Angeles **[43].**

II.11.3.2.2. Principe de l'essai :

L'essai consiste à appliquer un cycle de broyage à sec à un échantillon de 5 000 g, selon la norme NF P 18-573. Une charge abrasive des boulets d'acier est introduite avec l'échantillon de 5 000 g dans la machine Los Angeles. Ensuite, un cycle de 500 rotations du cylindre autour de son axe est réalisé, au rythme de 30 à 33 tr/min. Pendant chaque rotation, les boulets sont remontés par la plaque vers le haut du cylindre puis tombent en chute libre sur les particules restées dans le fond. À l'issue du cycle, l'échantillon est soigneusement récupéré et tamisé à l'aide d'un tamis de 1,6 mm.

Soient **M** la masse de matériau soumis à l'essai et **m** la masse des éléments inférieurs ou passants à 1,6 mm produits au cours de l'essai.
La résistance à la fragmentation par chocs est alors donnée par le coefficient Los Angeles, par la formule suivante :

$$\mathbf{LA} = \frac{\boldsymbol{m}}{\boldsymbol{M}} \times \mathbf{100} \qquad \textbf{(II.10)}$$

Où :
LA : est le coefficient Los Angeles (%)
Les classes, parmi lesquelles est choisie la granularité du matériau soumis à l'essai, sont au nombre de 6 et ceux de la granularité du matériau tel qu'il est utilisé : 4/6,3 ; 6,3/10 ; 10/14 ; 10/25 ; 16/31,5 ; 25/50 mm.

Les conditions que doivent remplir quelques classes sont :

- La classe 10/25 mm doit contenir 60% de 10/16 mm ;
- La classe 16/31,5 mm doit contenir 40% de 16/25 mm ;
- La classe 25/50 mm doit contenir 60% de 25/40 mm.

Tableau II.7 : Charge de boulets pour chaque classe granulaire **[43].**

Classes granulaires (mm)	Nombre de boulets	Masse totale de la charge (g)
4/6,3	7	3080 (à +20 à – 150)
6,3/10	9	3960 (à +20 à – 150)
10/14	11	4840 (à +20 à – 150)
10/25	11	4840 (à +20 à – 150)
16/31,5	12	5280 (à +20 à – 150)
25/50	12	5280 (à +20 à – 150)

Le coefficient Los Angeles est d'autant plus élevé que le granulat est moins bon, la valeur spécifiée par les normes étant 40 %.

Tableau II.8 : Catégorie et la quantité de la bille d'acier pour l'essai **[43].**

Catégories	Quantité de la bille d'acier	La masse totale
A	12	5000
B	11	4584
C	8	3330
D	6	2500

II.11.3.2.3. Matériels utilisés :

- La machine Los Angeles : C'est un broyeur de forme cylindrique en acier d'axe horizontal, de diamètre intérieur de 711 mm et une longueur interne de 508 mm, comportant une plaque fixée sur une génératrice ;
- Une charge abrasive, constituée de boulets sphériques en acier de 47 mm de diamètre et pesants entre 420 et 445 g ;
- Un bac destiné pour recueillir le matériau après essai ;
- Une série de tamis à mailles carrées de : 1,6 ; 4 ; 6,3 ; 10 ; 14 ; 16 ; 25 ; 31,5 ; 50 mm.

II.11.3.2.4. Préparation de l'échantillon :

L'échantillon global doit être supérieur ou égale à 15 000 g. On réduit l'échantillon global avec un diviseur ou par quartage, jusqu'à obtenir un échantillon de 5 000 g, avec un seuil de tolérance de 2 g. Ce dernier est tamisé à sec sur chacun des tamis de classe granulaire choisie par ordre de croissance, ensuite lavé, puis séché à l'étuve à 105° ± 5°, jusqu'à obtention de la masse constante.

Tableau II.9 : Classification des granulats en fonction du coefficient LA **[43].**

Coefficient LA	Nature de los Angeles LA
<20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
<50	Très tendre

II.11.3.2.5. Mode opératoire :

- Effectuer une prise d'échantillon de 5000 g (détermination de la masse initiale) ;
- Laver l'échantillon pour éliminer les particules fines ;
- Sécher le pendant 24 heures ;
- Mettre l'échantillon dans l'appareil Los Angeles ;
- Introduire les boulets ;
- Après 15 minutes de rotation, enlever le matériau ;

- Laver ce dernier dans un tamis de 1,6 mm ;
- Sécher le matériau pendant 24 heures ;
- Peser le matériau après séchage (détermination de la masse finale) **[43].**

II.12. Caractérisation des géomatériaux utilisée :

II.12.1. Les caractéristiques physiques :

II.12.1.1. Analyse granulométrique : [NF EN 933-1]

Comme on a vu précédemment, la granulométrie est la caractéristique physique a pour but de déterminer la répartition des grains suivant leur grosseur.



Figure II.22 : Les étapes d'essais d'analyse granulométrique.

❖ **Expression des résultats :**

Le tableau suivant montre les résultats obtenus :

Tableaux II.10 : Analyse granulométrique carrière Kef Dhebaa.

Diamètre (mm)	Passant cumulé (%) 0/3	Passant cumulé (%) 3/8	Passant cumulé (%) 8/15	Passant cumulé (%) 15/25
31.5	/	/	/	100
25	/	/	/	100
20	/	/	/	74
16	/	/	91	25
14	/	/	74	8
12.5	/	/	48	3
10	/	100	21	1
8	/	96	4	/
6.3	/	95	1	/
4	98	9	/	/
2.5	76	7	/	/
2	68	6	/	/
1	41	2	/	/
0.500	23	1	/	/
0.315	15	/	/	/
0.250	12	/	/	/
0.160	10	/	/	/
0.125	6	/	/	/
0.08	5	/	/	/
0.063	4	/	/	/
Fond P	4	0	0	0

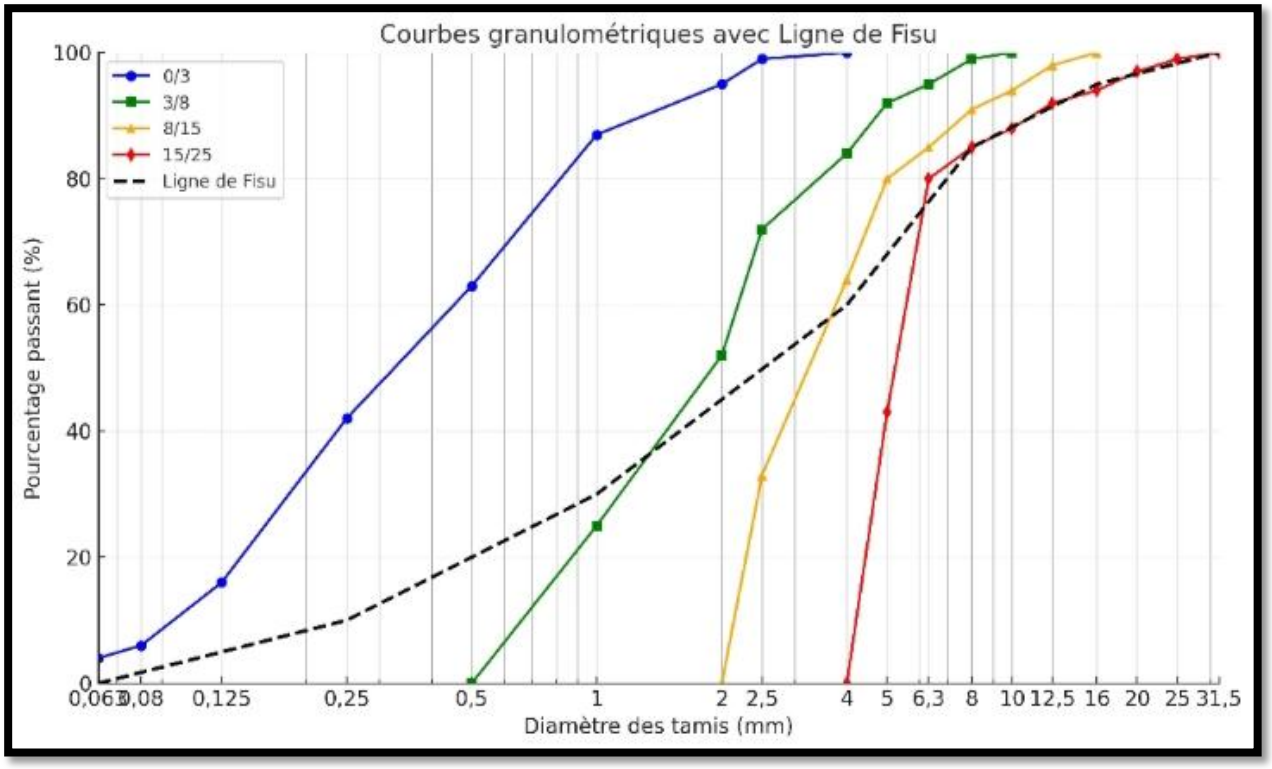


Figure II.23 : Courbe d'analyse granulométrique.

❖ **Interprétation des courbes granulométriques :**

La Ligne de Fisu, elle représente une courbe idéale qui reflète une répartition granulométrique optimale.
Quand les courbes réelles sont proches de cette ligne, cela indique un bon équilibre entre les différentes tailles de grains, ce qui favorise une meilleure compacité et une bonne cohésion du matériau.
En revanche, un écart significatif entre une courbe et la ligne de Fisu peut indiquer un manque ou un excès de certaines fractions granulaires.

II.12.1.2. La masse volumique apparente : [NA 5089-2013]

Comme on a mentionné précédemment, La masse volumique est définir par la relation suivant :

$$\rho = m/v \qquad \textbf{(II.11)}$$



Figure II.24 : Les étapes d'essai de la masse volumique apparente.

❖ **Expression des résultats :**

Les résultats de l'essai masse volumique apparente sont résumés dans le tableau II.11.

Tableaux II.11 : Les résultats de l'essai masse volumique apparente de chaque classe.

Les Classes	Masse de Conteneur Mr (g)	Volume de conteneur V(cm^3)	Masse de conteneur +échantillon (M) (g)	Masse volumique Apparente MVA= (MMr)/ Vr (g/ cm^3)
0/3	1684,6	1177,5	3602	1,63
3/8	3546	3532,5	8934	1,53
8/15	3546	3532,5	8778	1,48
15/25	3546	3532,5	8497	1,40

Interprétation des résultats :

Les résultats de la masse volumique apparente montrent une diminution des valeurs avec l'augmentation de la taille des grains. Cela s'explique par le fait que les fines remplissent mieux les vides, augmentant ainsi la densité, tandis que les grosses particules laissent plus de vides, ce qui réduit leur densité apparente. Ce comportement reflète les propriétés naturelles des matériaux granulaires. D'après les valeurs qui sont représentées dans le tableau II.11 les géomatériaux utilisés sont denses.

II.12.1.3. La masse volumique absolue : [NA 255-2018]

Comme on a vu précédemment, l'essai de la masse volumique réelle a pour objectif de déterminer la masse par unité de volume de la matière solide constituant un matériau granulaire, en excluant tous les vides, qu'ils soient inter granulaires ou internes.



Figure II.25: Les étapes d'essai de la masse volumique absolue**.**

❖ **Expression des résultats**

Le tableau suivant montre les résultats obtenus :

Tableau II.12 : Les résultats de l'essai de la masse volumique réelle (absolue).

Les classes granulaire (mm)	M1 (g)	M2 (g)	M3 (g)	M4 (g)	M5 (g)	M6 (cm^3)	M7 (cm^3)	M8 (cm^3)	MVR (g/ cm^3)
0/3	557,9	977,9	1991,5	1742,3	400	1164,4	1013,6	150,8	2,65
3/8	557,9	1078	2054,9	1742,3	500,1	1164,4	976,9	187,5	2,67
8/15	577,9	977,9	1993,2	1742,3	400	1164,4	1015,3	149,1	2,68
15/25	987,7	1988,1	3938,3	3310,3	1000,4	2322,6	1950,2	372,4	2,69

- Poids de pycnomètre (M1) (g)
- Poids pycnomètre + matériaux (M2) (g)
- Poids pycnomètre +EAU + matériaux (M3) (g)
- Poids du pycnomètre +eau (M4) (g)
- Poids de l'échantillon M5=M2 –M1 (g)

- Volume du pycnomètre M6= M4 –M1 (cm^3)
- Volume de l'eau M7 = M3-M2 (cm^3)
- Volume de l'échantillon M8 =M6-M7 (cm^3)
- La masse volumique réelle de l'échantillon MVR= (M5/M8) (g/ cm^3)

Interprétation des résultats :

Les résultats de la masse volumique réelle montrent des valeurs proches entre les différentes fractions granulaires, avec une légère augmentation selon la taille des grains. Cette variation minime s'explique par la nature minéralogique relativement homogène des échantillons, ce qui engendre peu de différence dans la masse volumique réelle. Cela traduit une certaine homogénéité dans la composition du granulat étudié.

D'après les valeurs qui sont représentées dans le tableau II.12 les géomatériaux utilisés sont denses.

II.12.1.4. L'équivalent de sable : [NF EN 933-8]

Une procédure normalisée Permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantile la propreté de celui-ci.

L'essai consiste à séparer les loculées fins contenues dans le sable.



Figure II.26 : Préparation de l'échantillon d'équivalent de sable.

❖ **Expression des résultats :**

Le tableau suivant montre les résultats obtenus :

Tableau II.13 : Les résultats d'essais d'équivalent de sable.

	H_1 (cm)	H_2 (cm)	H_2' (cm)	$ES_V = H_2/H_1*100$	$ES_P = H_2'/H_1*100$	ESV (moy)	ESP (moy)
Essais 1	11,7	9	8,2	77	70	78	71
Essais 2	11,1	8,7	8	78	72		

- **Interprétation des résultats :**

Tableau II.14 : Interprétation des résultats de l'équivalent de sable.

Carrière	Interprétation de sable carrière (0/3)
Kef Dhebaa	On a **75≤ ESV = 78 < 85** et **65≤ ESP = 71≤ 80** Donc Sable propre à faible pourcentage de fines argileux convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.

II.12.2. Les caractéristiques mécaniques :

II.12.2.1. L'essai Micro- Deval : [NF EN 1097-1]

L objectifs d'essai Micro-Deval permet déterminer la résistance à l'usure par frottements en présence d'eau ou à sec. Cet essai consiste à reproduire dans un cylindre en rotation des phénomènes d'usure par frottement. Cette résistance est caractérisée par le coefficient Micro-Deval qui représente la proportion d'éléments fins produits pendant l'essai (éléments inférieurs à 1.6mm).

Coefficient Micro-Deval :

$$MDE = (M2/M1)\ x100 \qquad (II.12)$$

Les résultats de l'essai sont résumés dans le tableau II.15.



Figure II.27: Préparation des échantillons de Micro- Deval.

❖ **Expression des résultats :**

Le tableau suivant montre les résultats obtenus :

Tableau II.15 : Les valeurs des Micros Deval des échantillons.

La classe (mm)	Les boules(g)	L'eau (l)	Essais	M1(g)	M2(g)	MDE (%)	MDE (moy %)
10-14 (8/15)	5000	2.5	L'essai 1	500	408,3	18,34	18,64
			L'essai 2	500	405,3	18,94	

Interprétation des résultats :

L'essai Micro-Deval effectué sur les échantillons a donné les résultats suivants selon les valeurs du **tableau II .15** et les appréciations du **tableau II.16** ci-dessus**.**

MDE (%) = 18,64<20 le gravier ont été classés comme des matériaux de résistance à l'usure de bonne à moyenne en présence d'eau.

Tableau II.16 : Appréciation des résultats de l'essai Micro Deval [NF P18-572].

Coefficient *MDE*	Appréciation
<10	Très bon à bon
10 à 20	Bon à moyen
20 à 35	Moyen à faible
>35	Médiocre

II.12.2.2. L'essai Los-Angoles : [NF EN 1097-2]

L'objectif de cet essai est de déterminer un coefficient" Los-Angeles" pour évaluer la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. C'est un essai de résistance aux impacts, basé sur la mesure de la dégradation granulométrique des matériaux soumis aux chocs.

Les résultats de l'essai caractéristiques mécaniques des granulats sont résumés dans le tableau II.17.



Figure II.28 : Préparation de l'échantillon de Los Angeles**.**

❖ **Expression des résultats :**

Le tableau suivant montre les résultats obtenus :

Tableau II.17: Résultats de l'essai Los-Angeles.

La classe (mm)	Les boulles	Essais	M_1(g)	M_2(g)	LA(%)	LA (moy%)
10-14 (8/15)	11	L'essai 1	5000	3840	23,20	23,36
		L'essai 2	5000	3824	23,52	

Interprétation des résultats :

Les résultats de Los Angeles selon les valeurs du **tableau II.17** et les appréciations du **tableau II.18** ci-dessus montrent que les échantillons ont une résistance à la fragmentation par choc, *LA (%) = 23.36>20,* le gravier est de bon a moyen qualité.

Tableau II.18 : Tableau de référence des valeurs de Los Angeles [NF P 18-573].

Coefficient LA	Appréciation
<15	Très bon à bon
15 à 25	Bon à moyen
25 à 40	Moyen à faible
>40	Médiocre

II.13. Conclusion :

Il est possible de conclure, les caractéristiques des géomatériaux utilisée de la carrière KEF DHBAA Morsott SARL SOTRAMA -Tébessa ont :

- Une Masse volumique dense ;
- Équivalent de sable est propre à faible pourcentage de fines argileux ;
- Une bonne à moyenne résistance à l'usure en présence d'eau ;
- Une résistance à la fragmentation par choc bonne à moyenne.

Enfin, en se basant sur les résultats obtenus, il est possible de dire que les granulats provenant des géomatériaux utilisée de la carrière KEF DHBAA Morsott entreprise de SARL SOTRAMA –Tébessa sont de bonne qualité.

Ces informations sont essentielles pour la suite de l'étude, qui vise à analyser et optimiser les propriétés de ces géomatériaux en vue de leur valorisation dans des applications géotechniques durables.

Chapitre III :

Analyse de la compacité du Mélange Granulaire

III.1. Introduction :

La prévision de la compacité d'un mélange de grains secs est une vieille question, commune à bien des domaines techniques et scientifiques. Dans le domaine de la formulation des matériaux granulaires, on se restreint généralement à la question de la détermination des granularités conduisant aux compacités les plus fortes. Devant les difficultés théoriques qu'elle soulève, l'approche générale consiste à rechercher, par l'expérience, des distributions granulaires compactes et à tenter de s'en rapprocher en combinant les matériaux dont on dispose.
En reprenant le problème dans son contexte général, plusieurs modèles ont été développés antérieurement et qui permettent de prédire la compacité d'un mélange granulaire. Ils nécessitent pour cela la connaissance de quelques données de bases sur les constituants qui composent le mélange **[44].**

III.2. Introduction a la compacité :

III.2.1. Définitions de la compacité :

Le volume occupe par un matériau granulaire dépend en grande partie de l'arrangement des grains. Ces derniers se mettent en contact les uns avec les autres tout en laissant un espace inoccupé qui constitue les pores entre les grains. Le volume total est donc la somme de deux volumes :

- Le volume occupé par les grains ;
- Le volume des pores.

Le matériau est d'autant plus compact que le volume des pores est réduit. La fraction du volume occupée par les grains par rapport au volume total s'appelle compacité.

La compacité (ou taux de remplissage) est le taux d'occupation réel de l'espace. Elle est le rapport entre le volume des grains et le volume total qui contient ces grains. Elle est donc définie par :

$$C = \frac{V_S}{V_T} \times 100 \qquad \textbf{(III.1)}$$

Avec :

- C : Compacité (%) ;
- V_S : Volume des particules solides (cm^3) ;
- V_T : Volume total du mélange (cm^3).

En cristallographie, la compacité maximale est égale à 0, 74. Elle est obtenue pour un réseau hexagonal compact ou cubique face centrée. Pour un matériau granulaire, il n'y a pas d'ordre à longue portée ; la limite expérimentale (ou celle obtenue par simulation) de la compacité dans un tel matériau est C = 0, 64. Si l'on s'intéresse à de petites billes, cette limite peut être

atteinte en pratique si elles sont versées au travers de grilles croisées. Si l'on verse les billes par l'intermédiaire d'un trou source, la compacité sera de l'ordre de C = 0, 62 **[45].**

L'hypothèse que la compacité des grains est constante est réaliste seulement dans des conditions où le volume dans lequel se trouvent ces grains est infini. Dès que celui-ci est limité, comme c'est le cas dans les moules pour la fabrication de bloc de béton, la présence de paroi diminue le volume réellement occupé par les grains. Celle-ci est comme un obstacle contre lequel la structure, plutôt régulière, des granulats est modifiée, ces derniers ne pouvant faire autrement que de venir se ranger contre la surface du moule rencontré. C'est ce que l'on appelle l'effet de paroi.

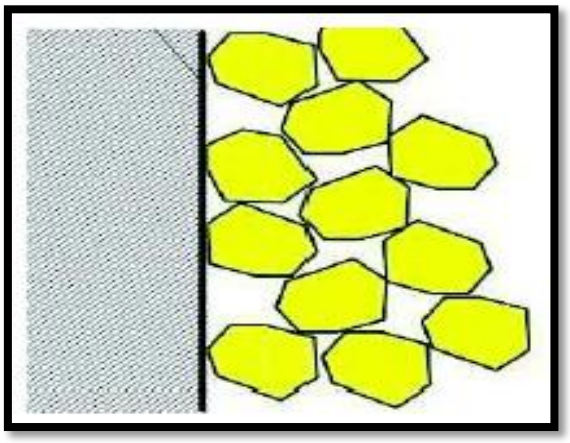


Figure III.1 : Effet de paroi **[46].**

Ce phénomène est particulièrement important dans le cas des blocs. En effet, la géométrie des moules, présentée précédemment, est alvéolaire et donc elle comprend une surface de paroi importante et une épaisseur de paroi faible en comparaison des dimensions des grains.
La figure III.1 illustre l'effet de paroi du moule sur l'empilement des grains. Plusieurs modèles de calcul existent pour simuler l'impact de l'effet de paroi sur la compacité d'un mélange. Ils ont été étudies afin de choisir le plus adapte à l'utilisation du modèle d'empilement compressible pour les blocs **[46].**

III.2.2. Facteurs influençant la compacité :

III.2.2.1. Granulométrie et distribution des particules :

- Une granulométrie bien répartie permet aux grains plus fins de remplir les espaces entre les gros grains, augmentant ainsi la compacité.
- Une granulométrie uniforme (mono granulaire) entraîne une porosité élevée et une faible compacité **[47].**

III.2.2.2. Forme et texture des grains :

- *Grains sphériques :* facilitent l'arrangement et augmentent la compacité.
- *Grains anguleux ou irréguliers :* augmentent la friction et réduisent la compacité **[48].**

III.2.2.3. Méthodes de compactage :

- **Compactage statique :** application de pression sur le matériau.
- **Compactage dynamique :** utilisation de vibrations ou de chocs pour améliorer la densité **[49].**
-

III.3.2.4. Optimisation de la compacité des mélanges granulaires :

- ✓ Utilisation de courbes granulométriques optimales pour améliorer la répartition des tailles ;
- ✓ Contrôle de l'humidité pour optimiser le compactage ;
- ✓ Sélection des méthodes de compactage adaptées aux matériaux et aux applications **[50].**

III.3. Les essais sur la compacité (mesure expérimentale) :

III.3.1. Méthode des mesures :

La compacité des mélanges granulaires peut être évaluée à l'aide de différentes méthodes expérimentales et théoriques.

Ces méthodes permettent d'analyser la distribution des particules, la densité, ainsi que le taux de vides, afin de mieux comprendre l'arrangement granulaire et ses implications sur les propriétés mécaniques du matériau **[50].**

III.3.2. Procédure des mesures de la compacité :

La mesure de la compacité (C) des mélanges granulaires suit une procédure expérimentale rigoureuse afin d'assurer des résultats précis et reproductibles. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées, selon le type de matériau et l'application visée **[50].**

III.3.2.1. Matériel nécessaire :

- ❖ Balance de précision (capable de mesurer au gramme près) ;
- ❖ Cylindre gradué ou récipient volumétrique (de volume connu V_T) ;
- ❖ Entonnoir et trémie pour assurer un remplissage homogène ;
- ❖ Tige de compactage pour tasser le matériau ;
- ❖ Vibrateur de laboratoire (si applicable) **[51].**

III.3.2.2. Procédure expérimentale :

a) Préparation de l'échantillon

- Sélectionner un mélange granulaire sec et homogène ;
- S'assurer que le matériau ne contient pas d'humidité excessive (si nécessaire, sécher à 105°C pendant 24h) **[52].**

b) Mesure de la densité absolue (ρ_s)

- Prendre une quantité de matériau (M_s) et mesurer sa masse ;
- Déterminer le volume réel des particules solides (V_s) à l'aide du pycnomètre ou de l'immersion dans l'eau ;
- Calculer la densité absolue**.**

$$\boldsymbol{\rho_s = \frac{M_s}{V_s}} \qquad \textbf{(III.2)}$$

Avec :

- $\boldsymbol{\rho_s}$ **:** La densité absolue (g/cm^3) ;
- $\boldsymbol{M_s}$ **:** Masse du matériau sec (g) ;
- $\boldsymbol{V_s}$ **:** Le volume réel des particules solides (cm^3) **[52].**

c) Mesure de la densité apparente (ρ_b)

- Remplir un cylindre gradué de volume connu (V_T) avec le matériau sans compaction ;
- Peser l'ensemble et soustraire la masse du récipient ;
- Calculer la densité apparente :

$$\boldsymbol{\rho_b = \frac{M}{V_T}} \qquad \textbf{(III.3)}$$

Avec :

- $\boldsymbol{\rho_b}$ **:** La densité apparente (g/cm^3) ;
- **M :** Masse du matériau sec (g) ;
- $\boldsymbol{V_T}$ **:** Volume total du mélange (cm^3) **[53].**

d) Détermination de la compacité (C)

La compacité est calculée par la relation suivante :

$$\boldsymbol{C = \frac{\rho_b}{\rho_s} \times 100} \qquad \textbf{(III.4)}$$

Avec :

- **C :** Compacité (%) ;
- $\boldsymbol{\rho_b}$ **:** Densité apparente (g/cm^3) ;
- $\boldsymbol{\rho_s}$ **:** Densité absolue (g/cm^3).

A noté

- *Si la compacité est faible*, cela signifie une grande quantité de vides et une mauvaise répartition granulométrique ;
- *Si la compacité est élevée*, le matériau est bien arrangé avec moins de vides **[50].**

III.3.2.3. Variantes expérimentales :

- **Méthode avec compactage mécanique :** On applique des vibrations ou des coups de tige pour tasser les grains et obtenir une densité plus élevée ;
- **Méthode de remplissage en trois couches :** On remplit le récipient en trois étapes, en tassant chaque couche avec une tige métallique ;
- **Méthode d'immersion dans l'eau :** Permet de mesurer directement la porosité et la densité absolue en utilisant la poussée d'Archimède **[54].**

III.4. Influence de la distribution granulométrique :

III.4.1. Empilement des granulats sec :

Dans un milieu granulaire, on peut distinguer deux types d'empilement :

- *Les empilements ordonnés* qui présentent une structure périodique et une compacité élevée, et
- *Les empilements désordonnés* avec des compacités plus faibles qui peuvent évoluer d'une configuration à une autre, si nous utilisons des moyens de serrage (vibration par exemple) **[55].**

Le nombre de coordination « k » est le nombre de points de contact sur chaque particule.
Plus ce nombre est élevé, plus la particule est stable. Une particule est considérée instable dans un empilement en trois dimensions, si son nombre de coordination est inférieur à 4 **[56].**

III.4.2. Définition de l'empilement :

Un empilement est l'opération permettant de trouver les différents arrangements possibles des grains afin d'optimiser le remplissage des vides par des grains.

Le problème de l'empilement d'objets est donc purement géométrique et constitue pourtant une importante source d'études pour les scientifiques.

Comme on l'a évoqué précédemment, dans la pratique la plupart des matériaux granulaires réels présentent une variété des propriétés de grains telles que la forme, ou les tailles des grains. La variété des tailles, identifiée par le terme de granularité, apparaît comme un paramètre fondamental dans la fabrication et l'usage de la matière en grains **[57].**

III.4.3. Les types d'empilement :

Afin de caractériser les empilements réels, il s'avère judicieux de les positionner selon des arrangements modèles, Soit

- ✓ *Parfaitement ordonnés* ou ;
- ✓ *Parfaitement aléatoires*.

III.4.3.1. Empilement ordonné :

Les empilements ordonnés constituent une classe analogue à celle des empilements cristallins, c'est-à-dire celle de l'atome. Le cas des empilements de disques (2D) ou sphères (3D) de même taille est certainement le système le plus facile à étudier.

Ce type d'empilement est obtenu en utilisant des méthodes de compactions par vibration horizontale sans avoir recours à placer les grains manuellement les unes à côté des autres.

- *A deux dimensions 2D,* on distingue deux types d'arrangements mono-disperses ordonnes : l'hexagonal compact et la cubique simple (Figure III.2).

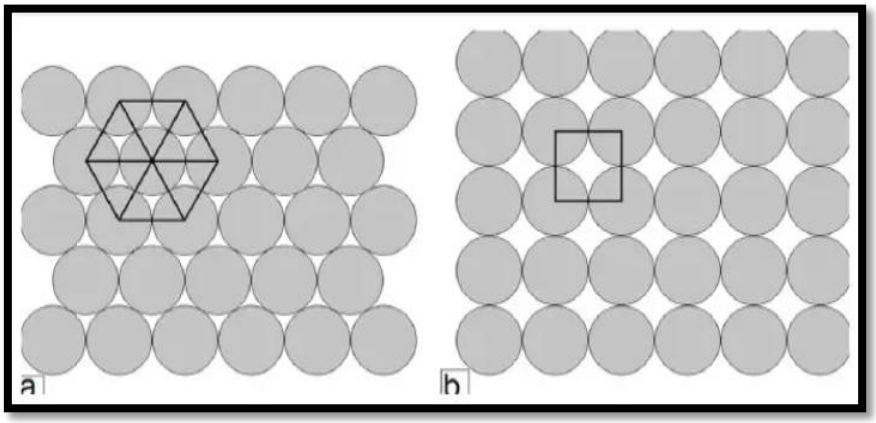


Figure III.2 : Empilements 2D réguliers : a) hexagonal compact ; b) cubique simple **[57].**

Dans le premier cas l'arrangement est construit sur une maille triangulaire, chaque disque est en contact avec 6 voisins.

Dans le second cas, l'arrangement est construit sur une maille carrée, chaque disque est en contact avec 4 voisins.

- *En trois dimensions 3D*, on essaie d'obtenir un nombre d'arrangements réguliers possibles (cubique simple, cubique centré, cubique faces centrées, etc.), qui résultent des différentes possibilités de superpositions de couches de sphères disposées selon les configurations de la (Figure III.2).

Les plus intéressants sont *l'hexagonal compact et la cubique face centrée.* Pour ces réseaux, la maille élémentaire est un tétraèdre régulier et chaque sphère possède 12 contacts avec ses voisines.

Nous constatons donc que l'ordre géométrique représenté dans ce genre d'empilement est généralement une illusion. Pour démontrer qu'un édifice, apparemment le plus simple et le plus ordonné possible, présente une complexité interne, on considère l'empilement de type "boulets de canons" (Figure III.3).

Il s'agit d'un arrangement de type hexagonal sous l'effet de la gravité, auto-stable à condition que les roulements de la rangée inférieure soient bloqués. Si on suppose que les boulets sont parfaitement lisses et identiques, on peut déterminer le réseau théorique des contacts, qui est

parfaitement régulier. On constate d'ailleurs que ce réseau est hyperstatique, puisque le nombre de contacts présents est supérieur à celui qui serait strictement nécessaire à l'équilibre de chaque disque.

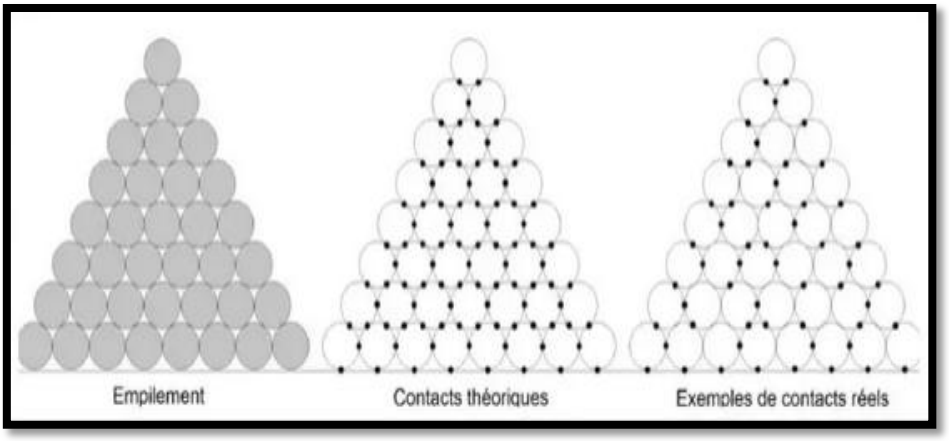


Figure III.3 : Empilement de type "boulet de canon" théorie et réalité **[57].**

En pratique, il est difficile de garantir que les boulets soient tous parfaitement lisses et identiques et une légère dispersion apparait. Il est donc possible de supprimer aléatoirement de nombreux contacts du réseau théorique sans compromettre équilibre global et l'apparence d'un empilement ordonné.

III.4.3.2. Empilement aléatoire :

Dans la pratique, les empilements réguliers de sphères (empilements ordonnés) qui correspondent à *une densité granulaire maximale* sont très difficiles à réaliser, sauf on si positionne manuellement chaque sphère à la bonne place.

Pour mieux comprendre l'empilement aléatoire, on prend l'exemple d'un mélange aléatoire de bille dans un récipient compacté à l'aide d'une vibration verticale. Sous l'action des vibrations, le système semble bloqué dans cet état et ne peut pas atteindre l'état cristallin qui serait pourtant plus dense.

Lorsqu'on est dans le cas de mélanges granulaires constitués principalement par des sphères de tailles différentes, la notion d'ordre n'est plus accessible On définit dans ce cas C la concentration massique de grosses billes :

$$C = \frac{m_p}{m_g + m_p} \qquad \textbf{(III.5)}$$

Avec :

- $\mathbf{m_p}$ **:** Mélange d'une petite particule ;
- $\mathbf{m_g}$ **:** Mélange d'une grosse particule **[57].**

III.5. Méthodes expérimentales de la mesure de la compacité :

La compacité dépend directement du mode de mise en place c'est-à-dire de la façon dont est réalisé l'empilement (comme on a vu précédemment).

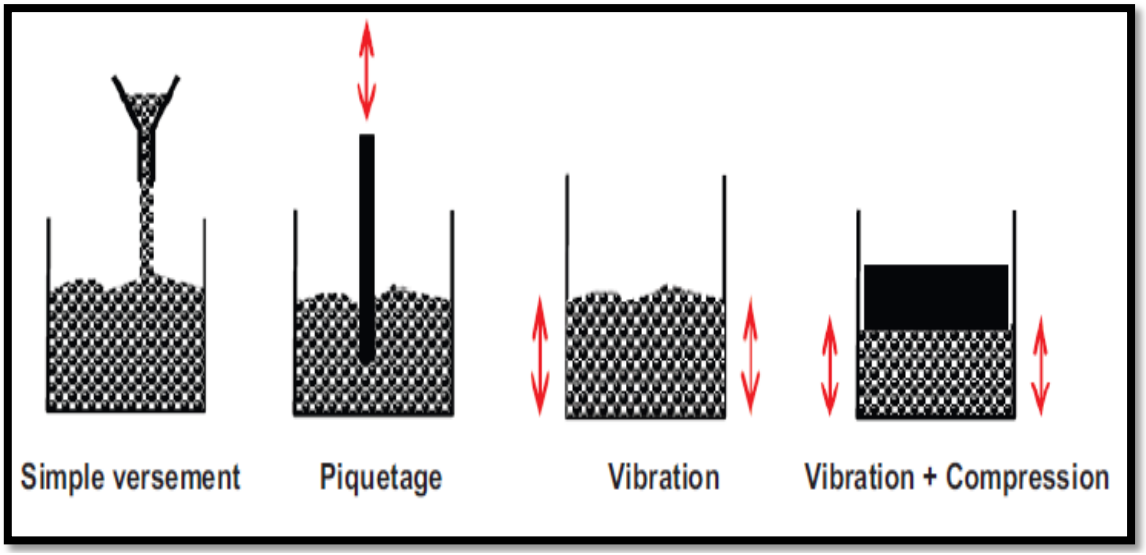


Figure III.4 : Compacité pour différents modes de mise en place des grains concassés **[58].**

III.5.1. Méthode de versement simple : [NF EN 1097-3]

C'est une méthode qui consiste, à remplir un récipient de volume V connu, en laissant s'écouler le matériau sous l'effet de la gravité, sans aucune autre sollicitation, puis en pesant la masse M du récipient après arasement. M_0 étant la masse du récipient à vide, et ρ_{abs} la masse volumique réelle de l'échantillon alors, la compacité C_{exp}, s'écrit :

$$C = \frac{M - M_0}{\rho abs . V} \qquad \textbf{(III.6)}$$

Dans cette méthode décrite dans la norme NF EN 1097-3, le cylindre utilisé est d'une hauteur de 200 mm et d'un volume égal à 3,98l pour les gravillons, tandis que pour les sables, le cylindre utilisé est d'une hauteur de 80 mm et son volume est égal à 0,56 l **[59].**

III.5.2. Méthode de piquage :

Pour cet essai, les cylindres utilisés sont identiques à ceux du précédent mode opératoire.
Pour améliorer le compactage du matériau dans le cylindre, nous utilisons une tige, que nous enfonçons plusieurs fois dans l'échantillon (méthode inspirée de la méthode (ASTM C29-78). Pour les gravillons, la tige utilisée est en acier elle est à tête hémisphérique et à 600 mm de long avec un diamètre de 16 mm. En revanche, pour les sables, la longueur utile est de 130 mm avec un diamètre de 6 mm.

Les cylindres cette fois ci sont remplis en trois couches successives, chacune piquée vingt-cinq fois. L'échantillon fait l'objet d'une première mesure après simple versement, puis nous vidons le cylindre et nous partageons l'échantillon en trois parties égales, et nous appliquons le présent mode opératoire **[60].**

$$C = \frac{M_s}{\rho_{abs}.V} \qquad \textbf{(III.7)}$$

III.5.3. Méthode de compacité des fractions (Méthode de vibration):

III.5.3.1. Objet :

Le présent mode opératoire est utilisé pour la mesure de la compacité des granulats. La compacité d'un ensemble de grains dans un contenant rigide est la somme des volumes enveloppes des grains (en gris sur la figure III.5), rapportée au volume total du contenant (somme gris + blanc de la figure III.5).

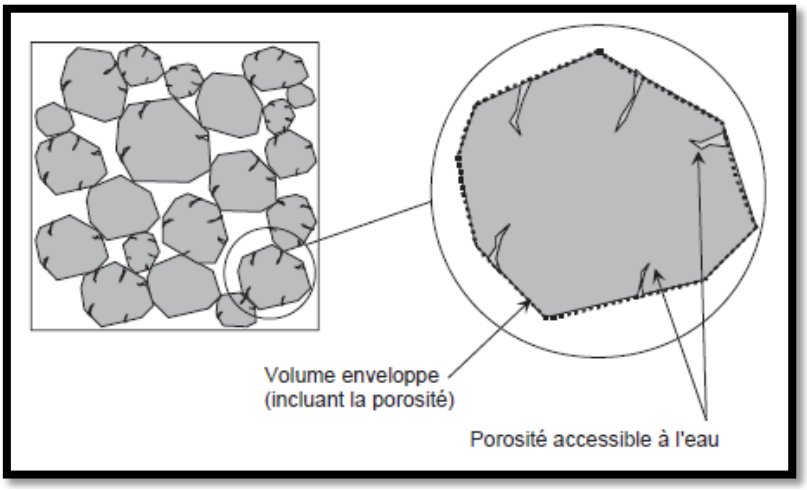


Figure III.5 : Schéma illustrant la notion de compacité **[61].**

III.5.3.2. Domaine d'application :

- Le présent mode opératoire s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie civil
- Toutefois, il ne s'applique ni aux granulats tendres (LA> 50) ni aux granulats grossiers (D31,5 mm).

III.5.3.3. Généralités :

III.5.3.3.1. But de l'essai :

L'essai a pour but de mesurer la compacité d'une fraction granulaire de masse déterminée lorsqu'elle est soumise, dans un cylindre, à une sollicitation mécanique définie conventionnellement. Cette caractéristique est notamment utilisée comme paramètre d'entrée de modèles de formulation des mélanges granulaires.

III.5.3.3.2. Définition de l'essai :

L'essai consiste à placer un échantillon de granulats dans un moule sous la contrainte d'un piston, et à appliquer à l'ensemble des secousses mécaniques provoquant un réarrangement des grains, et donc un compactage de l'échantillon. La mesure réalisée est alors celle de la masse volumique apparente de l'échantillon, qui permet d'en calculer la compacité.

III.5.3.4. Appareillage :

III.5.3.4.1. Appareillage d'usage courant :

- Balance capable de peser des masses allant jusqu'à 10 kg, avec une précision de ±1g ;
- Étuve ventilée, capable de maintenir une température de (110±5) °C ;
- Équipement nécessaire pour effectuer la réduction de l'échantillon de laboratoire en prise d'essai, conformément à la norme NF EN 932-2 ;
- Jauge de profondeur permettant une lecture à ± 0,1 mm.

III.5.3.4.2 Appareillage spécifique :

a) Table à secousses :

La table comprend une partie fixe constituée d'un châssis en acier solidaire d'un socle massif formant un lest (environ 100 kg), et sur lequel sont montées deux parties mobiles qui sont, d'une part, une table plane en acier articulée au châssis sur l'un de ses côtés par l'intermédiaire d'une charnière et, d'autre part, un arbre à came entraîné en rotation par une manivelle.



Figure III.6 : La table à la secousse **[61].**

La came est en acier dur. Sa forme doit permettre une chute libre de la table sur une hauteur de 1 ± 0,05 cm (cf. détail Figure III.7**)**.

Du coté opposé à la charnière, la table prend appui sur le châssis par l'intermédiaire de deux épaulements métalliques supportant l'arbre à came. Une pièce d'usure en laiton, fixée sous la table, assure le contact de cette dernière avec la came.

Afin de garder l'intégrité de la came, et ainsi garantir la hauteur de chute de la table, la pièce d'usure sera changée régulièrement, avant que la came n'entre en contact direct avec la table.

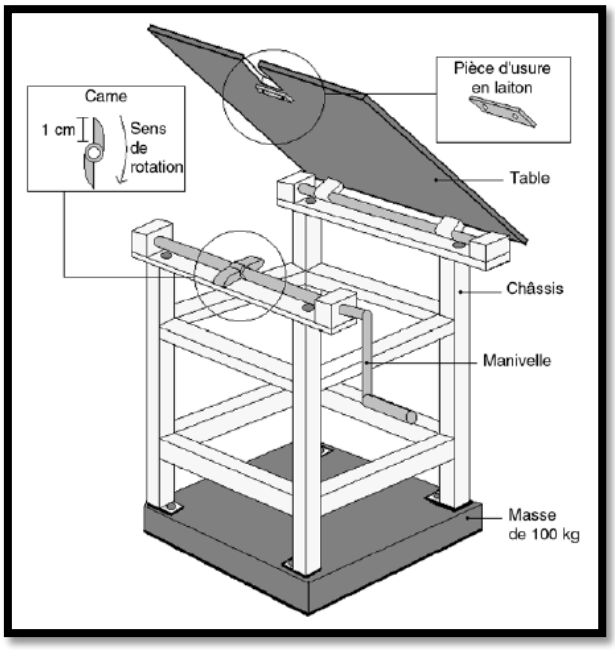


Figure III.7 : Schéma de la table à secousses **[61].**

b) Moule :

Le moule est constitué d'un cylindre en acier creux d'une profondeur de 600 ± 10 mm et d'un diamètre intérieur de 160 ± 2 mm. Afin que la paroi du cylindre puisse être considérée comme indéformable, son épaisseur sera d'au moins 4 mm.

Le moule peut éventuellement être une partie intégrante de la table. À défaut, il devra être équipé d'un socle et d'un système d'attache permettant de le solidariser à la table.

c) Piston :

Le piston est constitué d'un cylindre en acier plein de diamètre extérieur égal au diamètre intérieur du moule moins 1 mm (de façon à assurer son libre coulissement à l'intérieur du moule), et d'une masse qui, calculée en fonction du diamètre intérieur du moule et de la densité du métal, doit permettre d'appliquer sur le matériau une pression de 10 kPa (à titre indicatif, cette masse est normalement égale à 20 kg). Il est conseillé d'équiper ce piston d'une poignée afin d'en faciliter la manipulation (le cas échéant, la masse de cette poignée doit être intégrée dans le calcul de la pression).

d) Cales :

Les cales sont des plaques métalliques rigides à faces planes et parallèles. Leur longueur doit être supérieure au diamètre du moule.

III.5.3.5. Préparation de l'échantillon pour essai :

La masse de l'échantillon envoyé au laboratoire doit être au moins égale à 30 kg.

Dans le cas où la fraction testée serait un 0/D :

- Couper par lavage au tamis de 63 µm ;
- Sécher le matériau à l'étuve à 110 °C, jusqu'à masse constante ;
- Réduire aux dimensions d'une prise d'essai l'échantillon de laboratoire préparé conformément à la norme NF EN 932-2.

La prise d'essai doit consister en deux éprouvettes, d'une masse de (7 kg ± 3 g) chacune.

III.5.3.6. Exécution de l'essai :

III.5.3.6.1. Vérification de la profondeur à vide :

- Fixer le moule sur la table à secousses. Le nettoyer soigneusement à l'air comprimé ;
- Descendre le piston au fond du moule vide en s'assurant que la descente est complète ;
- Positionner les deux cales en haut du moule et, à l'aide de la jauge de profondeur, mesurer la distance entre le sommet des cales et le sommet du piston (Figue III.8). Cette mesure est effectuée en deux points symétriques. Les lectures de profondeurs sont faites à 0,1 mm près. Noter les deux valeurs lues Hv1 et Hv2 ;
- Calculer la profondeur moyenne Hv (en cm) ;
- Retirer la jauge, les cales et le piston.

III.5.3.6.2. Mise en place de l'échantillon :

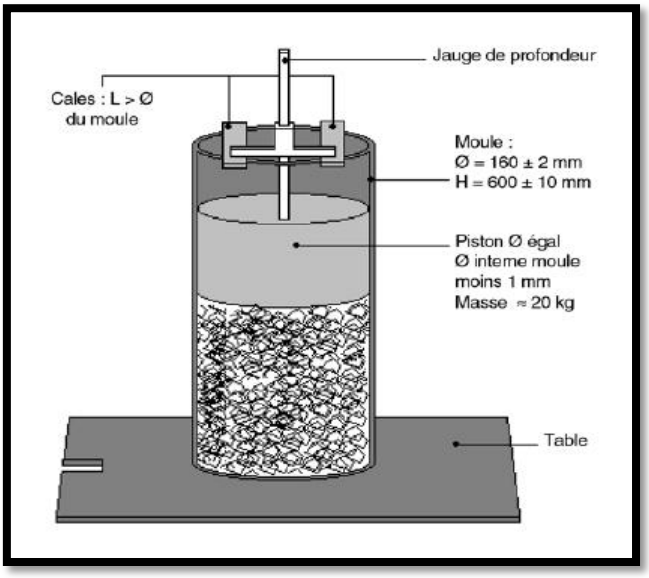
- Couper la première éprouvette en trois parties de masses à peu près équivalentes, que l'on répartit dans des récipients différents ;
- Verser une première fraction dans le moule et appliquer 20 secousses (le rythme des. secousses est d'environ 2 par seconde). Répéter cette opération avec la deuxième, puis la dernière fraction.

III.5.3.6.3. Lecture de la profondeur en charge :

- Positionner les deux cales en haut du moule et, à l'aide de la jauge de profondeur, mesurer la distance entre le sommet des cales et le sommet du piston (Figue III.8). Cette mesure est effectuée en deux points symétriques. Les lectures de profondeurs sont faites à 0,1 mm près ;
- Noter les valeurs lues Hc1 et Hc2, calculer leur moyenne Hc (en cm).

III.5.3.6.4. Mesure sur la deuxième éprouvette :

- Enlever le piston et vider le moule;
- Nettoyer soigneusement l'ensemble à l'air comprimé ;
- Renouveler les opérations 7.2 et 7.3 avec la seconde éprouvette.



Figue III.8 : Principe de la mesure à la jauge de profondeur **[61].**

III.5.3.7. Expression des résultats :

III.5.3.7.1. Calcul du volume apparent du matériau :

Le volume apparent occupé en fin d'essai par le matériau est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\boldsymbol{V = S \times h} \qquad \textbf{(III.8)}$$

Avec : $\boldsymbol{S = \frac{\pi \times D2}{4}}$ (D = diamètre du cylindre en cm)

Et : $\boldsymbol{h = Hv - Hc}$ (en cm).

III.5.3.7.2. Calcul de la compacité : [NF EN 1097-6]

Pour chaque éprouvette, la compacité est calculée selon la formule :

$$\mathbf{C = \frac{\rho_{app}}{\rho_{rd}}} \qquad \textbf{(III.9)}$$

Avec : $\boldsymbol{\rho_{rd}}$ = masse volumique réelle au sens de la norme NF EN 1097-6 (g/cm³),

Et $\boldsymbol{\rho_{app}}$ = masse volumique apparente du matériau, calculée suivant :

$$\boldsymbol{\rho_{app} = \frac{M}{V}} \qquad \textbf{(III.10)}$$

Avec :

- M = masse de l'échantillon (g) ;
- V= volume mesuré (cm³).

Le résultat de l'essai est la valeur moyenne des compacités obtenues sur les deux éprouvettes.

Il sera exprimé avec 3 décimales.

III.5.3.8. Rapport d'essai :

Le rapport d'essai doit déclarer que l'essai a bien été déterminé conformément aux prescriptions du présent mode opératoire.

Il doit contenir au moins les informations suivantes :

- Le nom de l'échantillon ;
- La classe granulaire de l'échantillon soumis à l'essai ;
- Le diamètre du cylindre utilisé ;
- Les résultats de chaque essai, donnant la valeur de compacité obtenue sur chaque éprouvette et la moyenne obtenue ;
- La valeur de h, moyenne des valeurs Hv – Hc mesurées sur les deux éprouvettes ;
- La date de l'essai.

Un exemple de feuille d'essai est donné en annexe I **[61].**

III.5.4. Méthode de vibration & compression :

Dans cette méthode, la masse de l'échantillon Ms prise pour les graviers est de 7.5 kg et pour les sable 3 kg. Le cylindre utilisé à un diamètre de 16 cm et une hauteur de 32 cm. Le cylindre est équipé d'un disque interne de même diamètre et qui permet d'appliquer une charge uniformément répartie sur toute la surface des granulats. L'ensemble est solidarisé à une table vibrante. Un poids (P) est solidarisé avec le cylindre interne, appliquant une pression totale de 10 KPa sur l'échantillon compacté. Une masse Ms de granulats est malaxée à sec de manière à homogénéiser l'ensemble, puis versée dans le cylindre. La vibration est lancée après l'application de la pression (10 KPa) **[62].**

Cet échantillon est soumis à une vibration de 150 Hz pendant une minute et la compacité est donnée par la moyenne (sur un minimum de deux échantillons) selon l'expression (III.11) :

La compacité se calcule par la formule suivante :

$$C = \frac{4.M_S}{\pi.\emptyset^2.H.\rho_S} \qquad \textbf{(III.11)}$$

Où :

- $\mathbf{M_S}$ **:** Masse de la matière solide,
- **Ø:** Diamètre du moule,
- **H :** Hauteur de l'échantillon après compactage,
- $\boldsymbol{\rho_s}$ **:** Masse volumique réelle du granulat utilisé.

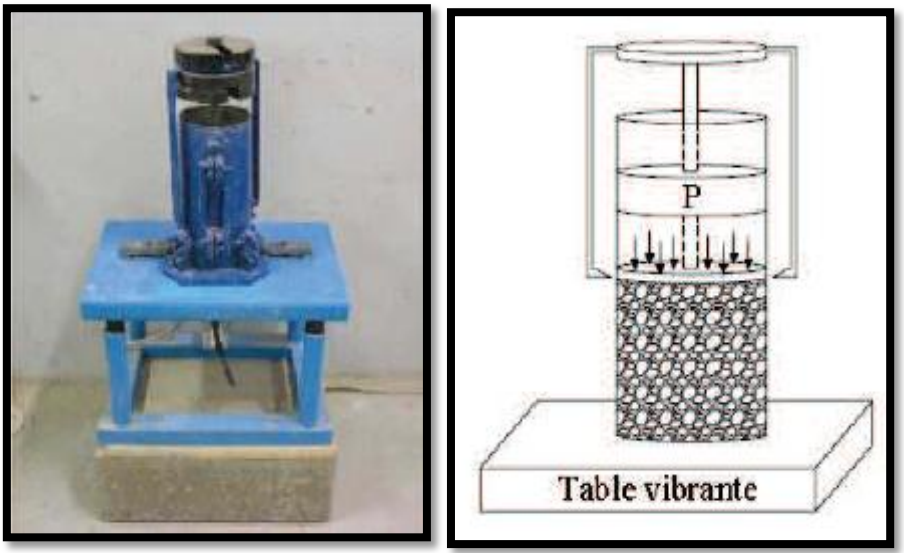


Figure III.9 : Dispositif de mesure de la compacité **[62].**

III.6. Résultats et discussion (carrier kef dhebaa) :

II.6.1. Présentation des matériaux :

Les granulats étudiés qui sont issus de la carrière Kef Dhebaa –Tébessa, sont principalement des granulats calcaires utilisés dans les travaux de construction routière et de béton. Les fractions granulaires considérées dans cette étude sont :

- Sable 0/3 mm ;
- Gravillon 3/8 mm ;
- Gravillon 8/15 mm ;
- Gravillon 15/25 mm.

Des échantillons représentatifs ont été prélevés pour l'analyser en laboratoire.

III.7. Méthodes expérimentales de détermination de la compacité des mélanges granulaires :

Afin d'évaluer le degré de compacité des matériaux granulaires étudiés, quatre méthodes expérimentales ont été appliquées. Ces méthodes permettent d'analyser la densification des matériaux dans différentes conditions simulant les situations réelles d'utilisation.

- **Justification des Mélanges :**

•**M1 :** Mélange complet incluant toutes les fractions disponibles (0/3, 3/8, 8/15, 15/25). Ce mélange suit une courbe granulométrique continue visant à maximiser la compacité : 65% (granulats grossiers 3/8,8/15,15/25) +35% (granulats fins 0/3).

• **M2 :** Mélange estimé optimal, basé sur une hypothèse de répartition pondérée : 0/3 (20%), 3/8 (30%), 8/15 (30%) et 15/25 (20%). C'est un point de départ expérimental pour obtenir une densité optimale.

III.7.1. La masse volumique absolue :

Elle représente la masse volumique de la matière solide, sans tenir compte des vides entre les grains.

Elle est généralement déterminée par la méthode de pycnomètre, en immergeant un échantillon sec et en mesurant le volume déplacé. Cette valeur permet de calculer la densité théorique maximale du matériau.



Figure III.10 : La masse volumique absolue (Réelle).

Tableau III.1 : Résultats de la masse volumique absolue (Réelle).

Mélange granulaire	M (g)	V (cm^3)	ρ_{abs} (g/cm^3)
1	400	147,3	2,72
2	400	149,1	2,68

Avec :

- **M :** Poids de l'échantillon (g) ;
- **V :** Volume de l'échantillon (cm^3) ;
- **ρ_{abs} :** La masse volumique absolue (réelle) (g/cm^3) ;

III.7.2. Méthode de versements simple :

Cette méthode est utilisée pour mesurer la masse volumique apparente du granulat en état lâche, sans vibration ni compactage.

- Le récipient est d'abord pesé à vide ;
- Puis on y verse le mélange granulaire depuis une hauteur constante, sans tasser ;
- La surface est nivelée doucement, puis le récipient est pesé à nouveau.



Figure III.11: Différentes phases du mode opératoire de la méthode de versement simple.

Tableau III.2 : Résultats de la compacité par la méthode de versement simple.

La méthode expérimental pour mesurée la compacité	Mélange granulaire	ρ_{abs} (g/cm^3)	M_1 (g)	V (cm^3)	M_2 (g)	ρ_{app} (g/ cm3)	C (%)
Versement simple	**1**	2,72	5737	3254,67	11404	1,74	0,64
	2	2,68	5737	3254,67	11262	1.70	0,63

Ou:

- **ρ_{abs} :** La masse volumique absolue (g/cm^3) ;
- **M_1 :** Masse de conteneur (g) ;
- **V :** Volume de conteneur (cm^3) ;
- **M_2 :** Masse de conteneur +échantillon (g) ;
- **ρ_{app} :** Masse volumique apparente (g/ cm^3) ;
- **C :** La compacité (%).

III.7.3. Méthode de piquage :

Elle simule un compactage manuel léger.

- Le mélange granulaire est d'abord bien homogénéisé ;
- Puis divisé en trois couches. Chaque couche est introduite successivement dans un récipient de volume connu ;
- Et piquée 25 fois à l'aide d'une tige métallique pour réduire les vides ;
- Après ajout des trois couches, la surface est nivelée et le récipient est pesé.



Figure III.12 : Différentes phases du mode opératoire de la méthode de piquage.

Tableau III.3 : Résultats de la compacité par la méthode de piquage.

La méthode expérimental pour mesurée la compacité	Mélange granulaire	ρ_{abs} (g/cm^3)	M_1 (g)	V (cm^3)	M_2 (g)	ρ_{app} (g/ cm3)	C (%)
Méthode de piquage	**1**	2,72	5737	3254,67	11904	1,89	0,69
	2	2,68	5737	3254	11633	1,81	0,68

III.7.4. Méthode de vibration (Table vibrante) :

Cette méthode permet de simuler l'effet de la vibration sur les matériaux.

- Le mélange homogène est divisé en trois portions égales ;
- Chaque couche est introduite dans le récipient et soumise à une vibration sur une table vibrante pendant 20 secondes ;
- Après l'ajout des trois couches et leur vibration, on mesure la hauteur finale atteinte par le matériau.



Figure III.13 : Différentes phases du mode opératoire de la méthode de vibration.

Tableau III.4 : Résultats de la compacité par la méthode de vibration (table vibrante).

La méthode expérimental pour mesurée la compacité	Mélange granulaire	ρ_{abs} (g/cm^3)	M_s (g)	H_1 (cm)	H2 (cm)	H (cm)	Ø (cm)	C (%)
Méthode de vibration	**1**	2,72	7990	17,5	3,327	14,225	18,5	0,77
	2	2,68	7800	17,5	2,72	14,78	18,5	0,73

Avec :

- **ρ_{abs} :** La masse volumique absolue (g/cm^3) ;
- **M_s :** Masse de la matière solide M_s (g) ;
- **H :** Hauteur de l'échantillon après compactage $H = H_1 - H_2$ (cm) ;
- **Ø :** Diamètre du moule Ø (cm) ;
- **C :** La compacité (%).

III.7.5. Méthode de vibration &compression :

Elle vise à atteindre une compacité maximale en combinant la vibration et l'application d'une charge verticale.

- Une quantité connue de mélange est placée dans un récipient ;
- Recouverte d'un poids, puis soumise à une vibration pendant une minute ;
- Après le test, on retire le poids et on mesure la hauteur finale du matériau.



Figure III.14 : Différentes phases du mode opératoire de la méthode de vibration & compression**.**

Tableau III.5 : Résultats de la compacité par la méthode de vibration & compression.

La méthode expérimental pour mesurée la compacité	Mélange granulaire	ρ_{abs} (g/cm^3)	M_s (g)	H_1 (cm)	H2 (cm)	H (cm)	ø (cm)	C (%)
Méthode de vibration avec compression	**1**	2,72	7876	17,5	4,2	13,3	18,5	0,81
	2	2,68	7250	17,5	4,775	12,725	18,5	0,79

Les résultats obtenus ont été regroupés dans le tableau III.6 ci-dessous afin de faciliter l'analyse comparative entre les différentes méthodes.

III.8. Synthèse et interprétation :

Tableau III.6 : Tableaux comparatif entre les quatre méthodes de mesure de la compacité.

Méthode de compactage	Compacité des Mélanges Granulaires 1 (%)	Compacité des Mélanges Granulaires 2 (%)
Versement simple	0,64	0,63
Piquage	0,69	0,68
Vibration	0,77	0,73
Vibration avec compression	0,81	0,79

III.8.1. Interprétation :

III.8.1.1. Effet des méthodes de compactage :

Pour les deux mélanges, on observe une augmentation progressive de la compacité avec l'intensité du compactage.

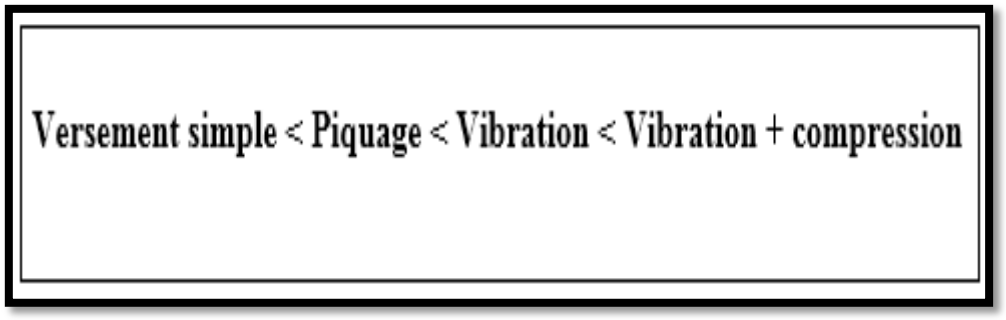


Figure III.15 : Comparative entre les différentes méthodes.

Cela montre que les méthodes de compactage plus dynamiques et combinées améliorent la densité du mélange.

III.8.1.2. Comparaison entre les deux mélanges :

Le *Mélange 1* est systématiquement plus compact que le *Mélange 2*, quelle que soit la méthode.
Cela peut indiquer :

- Une meilleure granulométrie ;
- Moins de vide inter granulaire ;
- Une meilleure distribution de grains fins et grossiers.

III.8.1.3. Gains de compacité :

Comparaison de la compacité entre deux méthodes de mise en œuvre pour un mélange granulaire :

Entre versement simple et vibration avec compression.

- ✓ Pour *Mélange 1* : gain de 0,17 = (0,64– 0,81).

Cela représente une amélioration de 17 % dans la densité du matériau suite au compactage par vibration.

- ✓ Pour *Mélange 2* : gain de 0,16 = (0,63 – 0,79).

Cela représente une amélioration de 16 % dans la densité du matériau suite au compactage par vibration.

Donc on peut dire que les deux mélanges réagissent de façon assez similaire à l'augmentation de l'énergie de compactage, mais avec des valeurs légèrement inférieures pour le *Mélange 2*.

III.9. Conclusion :

On peut conclure que :

- ❖ Le Mélange granulaire 1 présente de meilleures performances de compacité, ce qui peut être favorable pour des applications nécessitant une faible porosité ou une meilleure résistance mécanique ;
- ❖ Le choix de la méthode de compactage a un impact significatif sur la densité finale : pour des ouvrages exigeants, des méthodes actives comme la vibration ou la vibration combinée à la compression sont préférables ;
- ❖ Une analyse granulométrique complémentaire permettrait de comprendre pourquoi le Mélange 1 est plus performant.

Chapitre IV:

Étude et optimisation des paramètres caractéristiques

IV.1. Introduction :

Ce chapitre présente les stratégies d'optimisation des propriétés des granulats, à travers l'analyse des résultats expérimentaux et l'utilisation de méthodes statistiques ou empiriques. L'objectif est de proposer une composition optimale répondant aux exigences mécaniques et économiques pour les applications en génie civil.

IV.2. Optimisation des paramètres caractéristiques des géomatériaux :

IV.2.1. Optimisation de la granulométrie (carrière kef dhebba) :

La compacité qui est influencée par la répartition des tailles de grains et de différents modes de mise en place des grains : un bon mélange de grosses et fines particules permet de combler les vides. Qui a été notre objectif dans le chapitre 3 par :

- ✓ Utilisation de courbes granulométriques optimales pour améliorer la répartition des tailles ;
- ✓ Contrôle de l'humidité pour optimiser le compactage ;
- ✓ Sélection des méthodes de compactage adaptées aux matériaux et aux applications.

IV.2.2. Formulation des mélanges granulaires :

Pour justifier la formulation des mélanges granulaires proposés dans le cadre des essais de compacité pour les matériaux provenant de la carrière Kef Dhebaa avec les fractions granulaires disponibles : 0/3 mm, 3/8 mm, 8/15 mm et 15/25 mm, une Optimisation de la compacité par une courbe granulométrique continue (Principe de Fuller-Thompson) est mené dans ce qui suit :

IV.2.2.1. Compacité selon le principe de Fuller :

La compacité selon le principe de Fuller repose sur une distribution granulométrique idéale qui maximise la densité du mélange granulaire. Elle repose sur cette formule :

$$P(D) = \left(\frac{D}{Dmax} \right)^{n} \times 100 \qquad \text{(IV.1)}$$

Où :

- **P(D)** : Pourcentage passant (cumulé) à travers un tamis de maille D (en mm) ;
- $\mathbf{D_{max}}$: Diamètre maximal des grains (en mm) ;
- **n** : Coefficient de Fuller, généralement égal à 0,5 pour une compacité optimale.

Pour notre cas Dmax = 25 mm et n = 0,5 **[63].**

- ➢ La figure ci-dessus représente une courbe idéale représentative permet de visualiser une distribution granulométrique continue idéale de chaque classe granulaire.

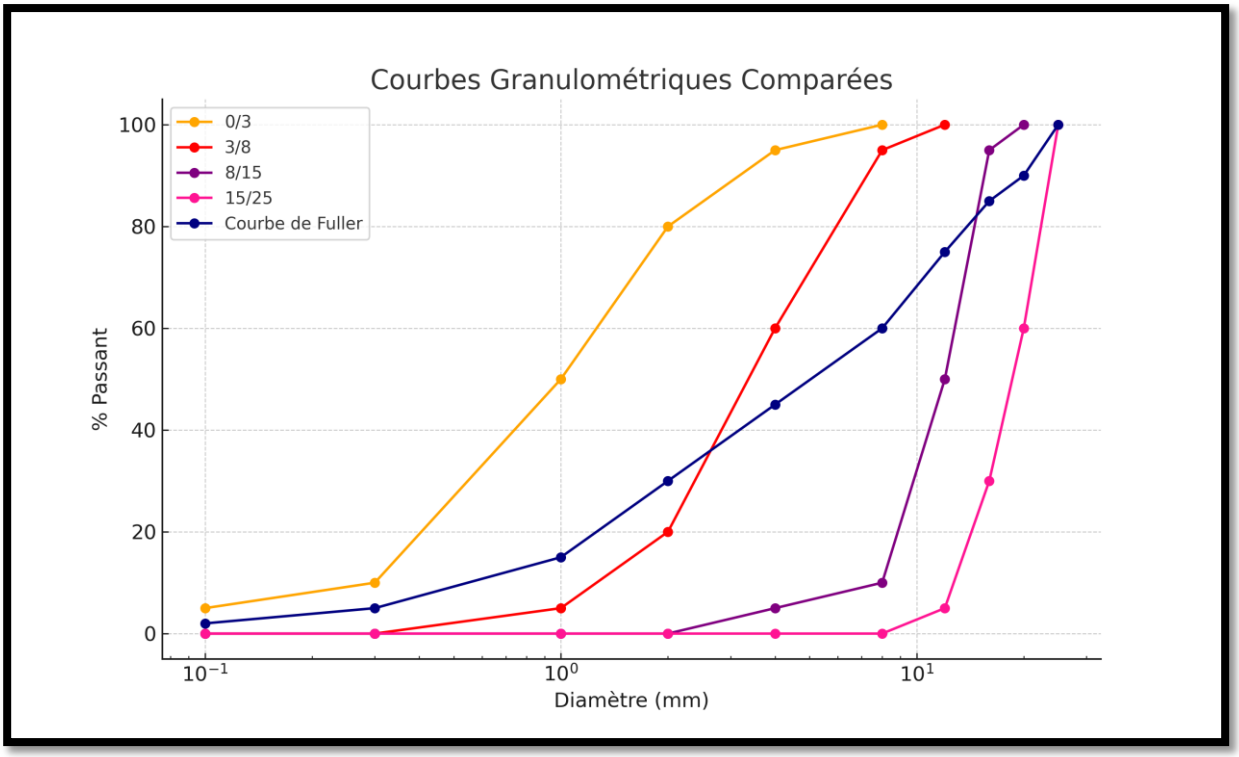


Figure IV.1 : Courbe comparative de chaque classe granulaire avec courbe de Fuller.

❖ **Interprétation :**

- ***Courbe 0/3 mm*** **:** Très bien étalée dans les diamètres inférieurs à 3 mm. Suit une pente régulière mais reste sous la courbe de Fuller. Utilisée comme sable (élément fin).

- ***Courbe 3/8 mm*** **:** Faible pourcentage de passage en dessous de 3 mm, montée rapide entre 3 mm et 8 mm. Utilisée pour compléter les fractions moyennes.

- ***Courbe 8/15 mm*** **:** Courbe similaire à la 3/8 mais pour les gros granulats. Montée rapide de 8 à 15 mm.

- ***Courbe 15/25 mm*** **:** Très peu de passage avant 15 mm. Représente les plus gros granulats du mélange.

➢ Les figures ci-dessus représente des courbes idéals représentative permet de visualiser une distribution granulométrique continue idéale des mélanges granulaires proposes précédemment.

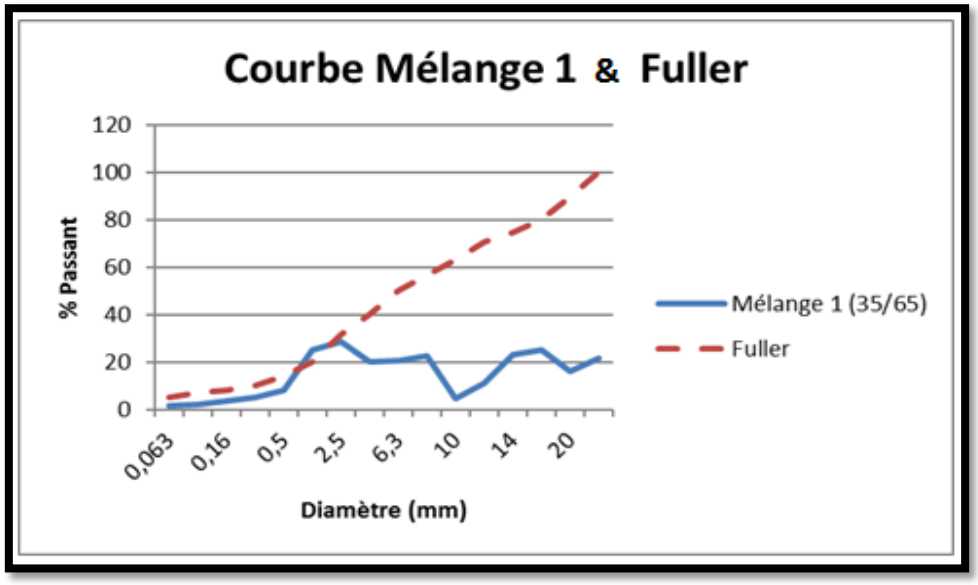


Figure IV.2 : Courbe comparative du mélange granulaire 1 avec courbe de Fuller.

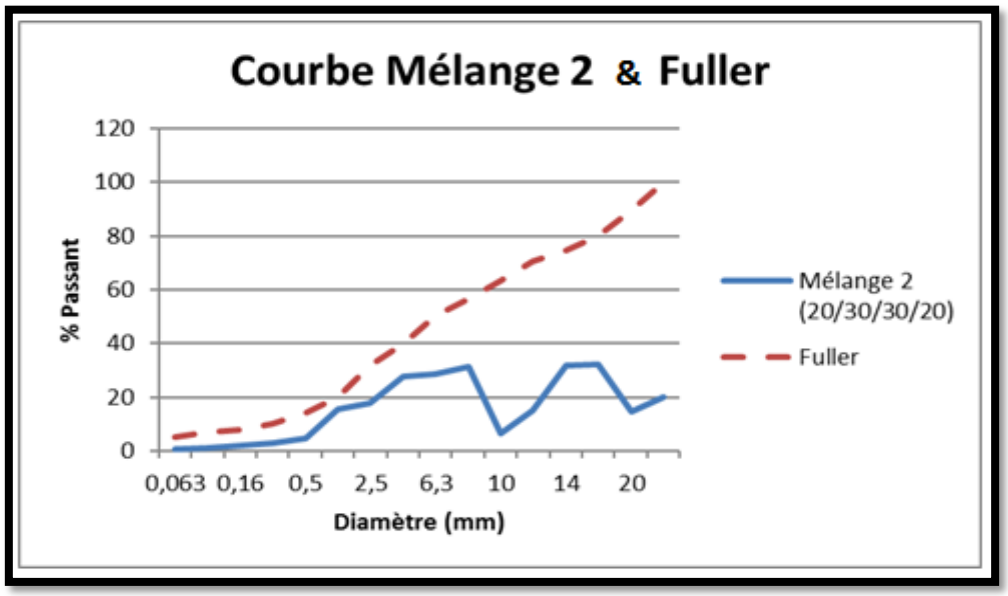


Figure IV.3 : Courbe comparative du mélange granulaire 2 avec courbe de Fuller.

Interprétation :

Mélange 1 :

Le premier mélange est constitué principalement de granulats moyens et grossiers, avec une proportion modérée de fines (0/3). La courbe du mélange obtenu reste en dessous de la courbe de Fuller entre 0.5 mm et 8 mm, indiquant une légère sous-représentassions des fines et particules intermédiaires. Cela peut provoquer une baisse de la compacité et augmenter la

porosité du béton. Il serait utile d'ajuster la proportion de fines pour se rapprocher davantage de la courbe idéale de Fuller.

Mélange 2 :

Ce mélange présente une distribution plus équilibrée entre fines et gros granulats. La courbe obtenue se rapproche mieux de la courbe de Fuller, surtout dans la zone de transition (1 mm à 10 mm). Cela suggère une meilleure compacité potentielle et une distribution granulométrique plus continue. Cependant, une légère augmentation des fines pourrait encore optimiser la courbe pour un béton plus dense et performant.

- **Synthèse :**

La courbe de Fuller représente une distribution granulométrique théorique idéale pour minimiser les vides dans un mélange.

Mélange granulaire 1 :

Ce mélange a été proposé pour le but de se rapprocher de la courbe de Fuller pour obtenir une bonne compacité.

Donc la courbe obtenue est proche de la courbe de Fuller, ce qui montre une bonne continuité granulaire. Elle est adaptée pour les formulations béton ou enrobés performants.

Mélange granulaire 2 :

Ce mélange a été proposé pour une répartition plus homogène des granulats en répartissant les fractions plus grossières de façon équilibrée. Cela permet une meilleure régularité dans le remplissage des vides.

Donc la courbe granulométrique est encore plus lisse et équilibrée que le premier mélange. Elle colle bien à la courbe de Fuller, assurant ainsi :

- Un bon compactage ;
- Moins de vide ;
- Moins de liant nécessaire ;
- Une bonne résistance mécanique.

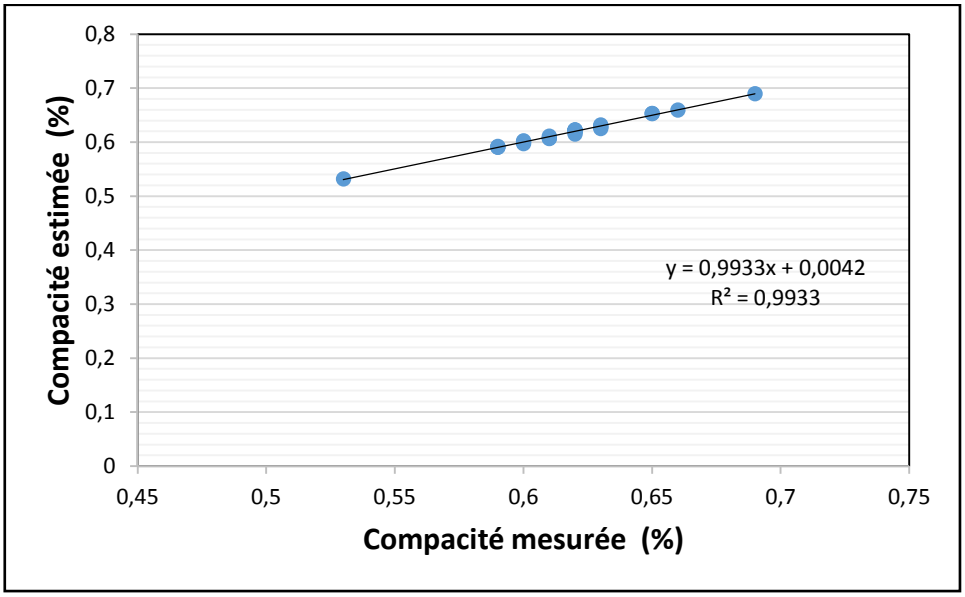
IV.3. Analyse par régression :

De nombreuses méthodes ont été proposées pour caractériser les géomatériaux (Seed et al., 1962 ; Djellali et al., 2019 ; Guerrero et Santamarina, 2024). Ces méthodes peuvent être globalement classées en deux types d'impacts indirects et directs (Palassi et Pirpanahi, 2013). Les approches indirectes reposent statistiquement sur des expressions empiriques ou semi-empiriques reliant des paramètres physiques et mécaniques.

IV.3.1. Vérification de la nouvelle équation de compacité :

Sur la base des données précédente une nouvelle équation de compacité de chaque classe granulaire issue du carrier Kef Dhebaa sera déterminée sur la base des valeurs prédites de la compacité estime en fonction des valeurs mesurées. Les figures ci-dessous montre les valeurs de compacité mesurées au laboratoire par rapport aux valeurs estime pour chaque classe granulaire.

❖ **Classe 0\3**



C = 0,5978 + 0,000016 Gr + 0,36700 Mapp - 0,2194 Mab

Figure IV.4 : Valeurs de compacité mesurées par rapport aux valeurs estime de la classe 0\3 granulaire de la carrière KEF DHBAA- Tébessa**.**

Interprétation de la classe granulométrique 0/3 mm :

Le nuage de points montre une bonne répartition des données le long de la droite de régression. L'équation de cette droite est :

$$y = 0{,}9933x + 0{,}0042 \qquad \text{(IV.2)}$$

Avec un coefficient de détermination très élevé : $R^2 = 0{,}9933$

Cette valeur de R^2 indique une corrélation quasi-parfaite entre les deux variables. Cela signifie que la compacité estimée à l'aide du modèle est très proche des valeurs mesurées expérimentalement, ce qui témoigne de la fiabilité et de la robustesse du modèle mis en place pour cette fraction granulaire.

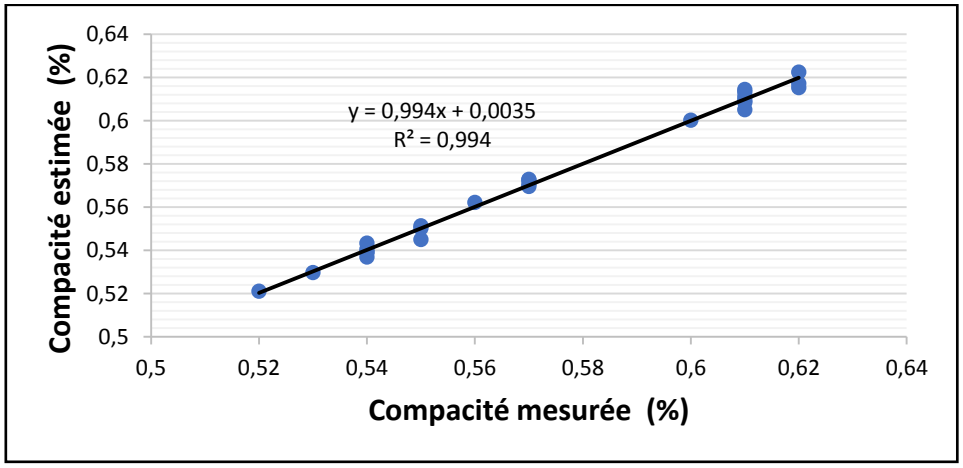
Par ailleurs, la compacité estimée C a été déterminée à l'aide d'un modèle mathématique intégrant plusieurs paramètres caractéristiques des granulats, selon l'équation suivante :

$$\mathbf{C = 0{,}5978 + 0{,}000016 \cdot Gr + 0{,}36700 \cdot Mapp - 0{,}2194 \cdot Mab} \qquad \mathbf{(IV.3)}$$

Où :
Gr : représente un paramètre granulométrique ;
Mapp :est la masse apparente (g/cm³) ;
Mab :est la masse absolue ou réelle (g/cm³).

Cette équation met en évidence l'influence de la densité et de la granulométrie sur la compacité des granulats. L'analyse montre que l'optimisation de ces paramètres permettrait d'améliorer les performances mécaniques des bétons ou enrobés utilisant cette classe de granulats.

- **Classe 3\8**



C = 0,6110 + 0,000478 Gr + 0,37665 Mapp - 0,2303 Mab

Figure IV.5 : Valeurs de compacité mesurées par rapport aux valeurs estime de la classe 3\8 granulaire du carrière KEF DHBAA- Tébessa**.**

Interprétation de la classe granulométrique 3/8 mm :

La droite de régression obtenue est décrite par l'équation suivante :

$$y = 0{,}994x + 0{,}0035 \qquad \text{(IV.4)}$$

Avec un coefficient de détermination : $R^2 = 0{,}994$

La valeur élevée de R^2 témoigne d'un excellent ajustement entre les valeurs mesurées et les valeurs estimées. Cela indique que le modèle utilisé permet une estimation très fiable de la compacité pour cette fraction granulométrique.

La compacité estimée C est obtenue à l'aide de l'équation suivante :

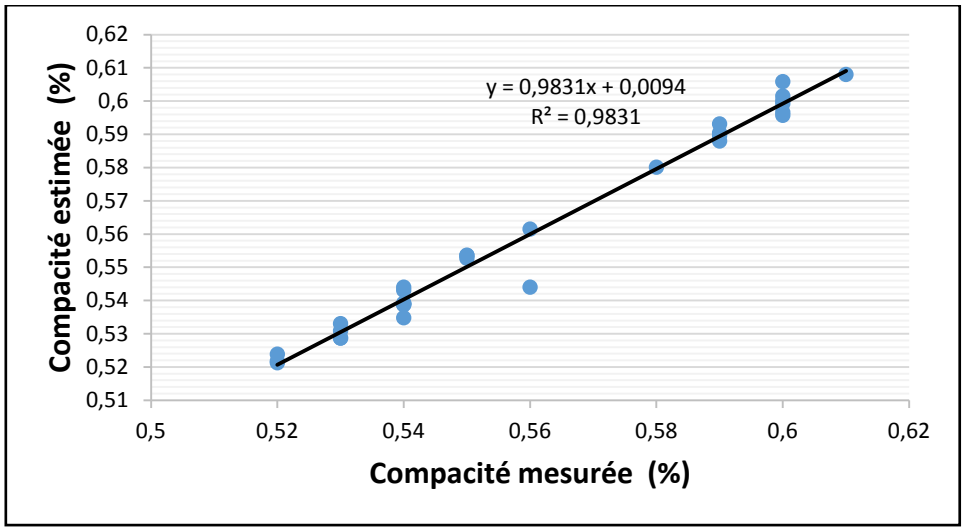
$$C = 0{,}6110 + 0{,}000478 \cdot Gr + 0{,}37665 \cdot Mapp - 0{,}2303 \cdot Mab \qquad \text{(IV.5)}$$

Où :

- **Gr** : représente un paramètre granulométrique ;
- **Mapp :** correspond probablement à la masse apparente (g/cm³) ;
- **Mab** : désigne la masse absolue ou réelle (g/cm³).

Cette formulation met en évidence le rôle prépondérant de la densité et de la granulométrie sur la compacité. Elle confirme également que la maîtrise de ces paramètres permet d'optimiser les propriétés mécaniques et la performance des matériaux à base de granulats de cette classe.

❖ **Classe 8\15**



C = 0,5526 + 0,00094 Gr + 0,3929 Mapp - 0,2173 Mab

Figure IV.6 : Valeurs de compacité mesurées par rapport aux valeurs estime de la classe 8\15 granulaire du carrière KEF DHBAA- Tébessa.

Interprétation de la classe granulométrique 8/15 mm :

La droite de régression associée est :

$$y = 0{,}9831x + 0{,}0094 \qquad \text{(IV.6)}$$

Avec un coefficient de détermination : $R^2 = 0{,}9831$

Cette valeur élevée indique que le modèle est hautement fiable : il reproduit très bien la tendance des données expérimentales. Le faible écart entre la compacité estimée et mesurée montre que le modèle peut être utilisé en toute confiance pour cette classe de granulats.

L'équation de la compacité estimée C est donnée par :

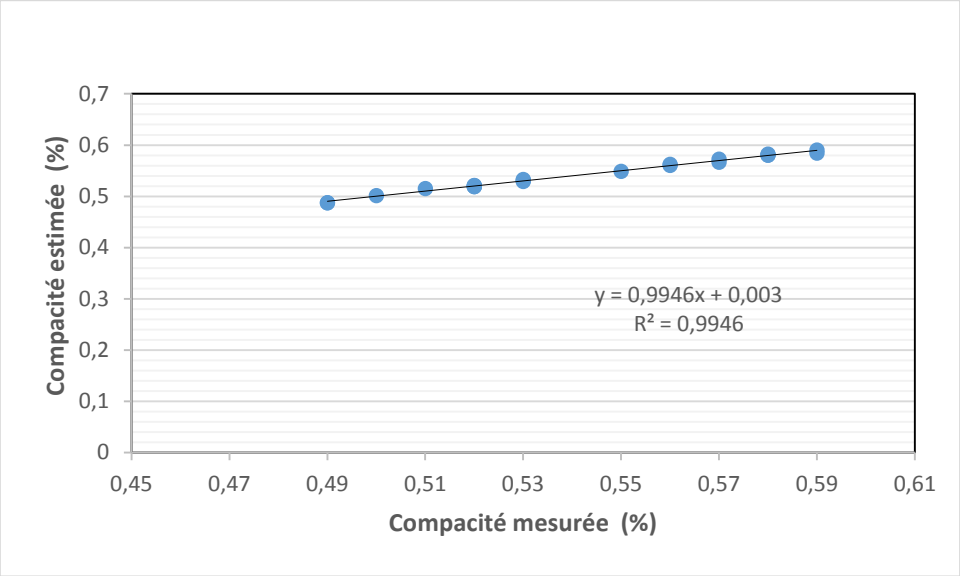
$$C = 0{,}5526 + 0{,}00094 \cdot Gr + 0{,}3929 \cdot Mapp - 0{,}2173 \cdot Mab \qquad \text{(IV.7)}$$

Où :

- **Gr :** désigne un paramètre granulométrique ;
- **Mapp** : est la masse apparente (g/cm^3) ;
- **Mab** est la masse absolue (g/cm^3).

Cette formulation montre que l'augmentation de la masse apparente contribue à une hausse de la compacité, tandis qu'une augmentation de la masse absolue la réduit légèrement. La précision du modèle dans cette gamme de granulat permet de mieux contrôler la formulation des matériaux à base de gravier 8/15 mm (bétons, enrobés…).

- **Classe 15\25**



C = 0,4944 - 0,00008 Gr + 0,3966 Mapp - 0,19646 Mab

Figure IV.7: Valeurs de compacité mesurées par rapport aux valeurs estime de la classe 15\25 granulaire de la carrière KEF DHBAA- Tébessa**.**

Interprétation de la classe granulométrique 15/25 mm :

La droite de régression associée est :

$$y = 0{,}9946x + 0{,}003 \qquad \text{(IV.8)}$$

Avec un coefficient de détermination : $R^2 = 0{,}9946$

Le coefficient de détermination R^2 très proche de 1 (99,46 %) indique que la quasi-totalité des variations observées dans les valeurs estimées peut être expliquée par les valeurs mesurées. Cela témoigne de la fiabilité du modèle d'estimation utilisé, qui permet de prédire la compacité avec une très grande précision.

L'équation de la compacité estimée C est donnée par :

$$C = 0{,}4944 - 0{,}00008 \cdot Gr + 0{,}3966 \cdot Mapp - 0{,}19646 \cdot Mab \qquad \text{(IV.9)}$$

Où :

- **Gr** : granulométrie (probablement moyenne) ;
- **Mapp** : masse apparente ;
- **Mab** : masse absolue.

Par ailleurs, L'équation de calcul de la compacité C, montre que cette dernière dépend de plusieurs paramètres physiques des matériaux :

Cela souligne l'importance des caractéristiques physico-mécaniques dans la détermination de la compacité d'un granulat.

La très bonne corrélation entre les données expérimentales et les données estimées confirme la validité du modèle utilisé pour la prédiction de la compacité des granulats 15/25. Ce modèle peut être utilisé avec confiance dans le cadre d'analyses granulaires ou d'optimisation de formules de béton.

❖ **Synthèse :**

On peut dire que :

- Une **corrélation très forte** entre la compacité mesurée et la compacité estimée. En d'autres termes, le modèle prédictif est très fiable pour chaque classe granulométrique.

- Aucune fraction seule ne suit la courbe de Fuller. Cela montre que chaque fraction ne peut pas répondre à elle seule aux exigences de compacité.

- La combinant des fractions avec des proportions bien choisies (ex. : 35% fines + 65% gros granulats ou 20/30/30/20%), peut nous approcher à la courbe de Fuller, ce qui permet :
  - Un meilleur compactage et remplissage des vides ;
  - Une meilleure résistance mécanique ;
  - Une économie de liant (ciment ou bitume).

- Le deuxième mélange proposé s'en approche davantage que le premier. Il est donc potentiellement plus performant pour des applications nécessitant une haute compacité. Toutefois, un ajustement fin de la proportion des matériaux pourrait encore améliorer les résultats en fonction de l'usage prévu (béton, enrobés, etc.).

- La comparaison des résultats permettra d'identifier la composition granulaire la plus performante en termes de compacité et de minimisation des vides, afin de valider un mélange optimal pour les applications en construction ou en travaux publics.

IV.4. Conclusion :

L'étude approfondie des paramètres caractéristiques des géomatériaux, couplée à des techniques d'optimisation rigoureuses, représente une avancée importante dans le domaine de la géotechnique moderne. L'intégration de données expérimentales, de simulations numériques et d'outils d'analyse statistique permet une meilleure maîtrise des comportements en conditions réelles.

Conclusion Générale :





Conclusion Générale :

Les géomatériaux locaux représentent une ressource naturelle prometteuse en raison de leurs propriétés physiques et minéralogiques qui les rendent adaptés à de nombreuses utilisations techniques, notamment dans les domaines du bâtiment et des travaux publics. Dans ce cadre, cette étude vise à mettre en valeur l'importance de l'amélioration des performances de ces géomatériaux en se concentrant sur la propriété de compacité, considérée comme un critère fondamental pour évaluer la qualité et la stabilité des mélanges granulaires.

Au début de ce travail, nous avons étudié et analysé ces géomatériaux à travers une série d'essais physiques et mécaniques, ce qui nous a permis de mieux comprendre leur composition et leur comportement, ouvrant ainsi la voie à une phase d'optimisation.

Un granulat local extrait du site de Kef Dhebaa, dans la wilaya de Tébessa, a été sélectionné comme matériau représentatif de ces géomatériaux disponibles dans la région. L'étude a porté sur son comportement dans des mélanges granulaires et sur l'effet de certaines variables, notamment la proportion de fines, un facteur clé dans le contrôle du taux de vides et de la densité globale du mélange. Des essais ont été menés selon plusieurs méthodes de mesure de la compacité, dans le but de comparer les résultats et d'identifier la meilleure distribution granulaire.

Les résultats ont clairement montré que plus le niveau de compactage appliqué est élevé, plus la compacité obtenue est importante, grâce à la réduction des vides internes. Les méthodes intégrant de la vibration ou de la compression se sont révélées plus performantes que celles utilisant uniquement le versement libre, ce qui confirme que la qualité du compactage influence fortement la densité et la cohésion du mélange.

Par ailleurs, le contrôle de la granulométrie, s'est avérée essentiel pour améliorer la compacité. Les particules fines comblent les espaces entre les grains plus gros, favorisant ainsi une structure interne plus dense et plus stable.

En conclusion, cette étude a montré que l'optimisation de la compacité constitue une voie efficace pour valoriser les géomatériaux locaux, en améliorant significativement leurs performances techniques dans divers domaines d'application. Elle ouvre également des perspectives pour des recherches futures sur le développement de mélanges granulaires plus efficaces et des procédés de compactage plus adaptés à une exploitation durable des ressources naturelles locales.

Référence Bibliographique



Référence Bibliographique :

[1]- K. Hermans, (1997) : Roche et minéraux, parité de livre « Le monde minéral », éd. Nathan Paris.

[2]- BENGHAZI Zied, (2018) : Cours Technologie des Géomatériaux.

[3]- F. Ghonani, (2008) : « généralité de science des matériaux de construction. Chapitre 1. Propriétés Générales des M.D.C (matériaux de construction) », Tlemcen.

[4]- J. Louis, (2006) : Résumé du Stage de Géologie de Boulouris (Var) par Jean-Louis Roqueirol de Caminà, la rando pugétoise.

[5]- Dexter Perkins, (16 décembre 2022) : formes cristallines-Géosciences libre texts, université du dakota du nord.

[6]- R. Boudchicha, (2010) : Thèse de doctorat, **«** Etude de la cristallisation et des cristallisations et des propriétés mécaniques et diélectriques de céramiques de céramiques préparés à partir de Kaolin-Dolomite », Batna.

[7]- L. Jean-Paul, P. Gilles, G. Lhenry, (2000) : la pierre matériau et production « Séminaire formes architecturels et cultures constructive ».

[8]- W. Gherbi, (2006) : Mémoire de Magistère, **«** Etude de la qualité des calcaires d'exploités : Cas de deux carrières d'agrégats de Ain Smara (environs de Constantine)"Cosider-Sonatiba" », Constantine.

[9]- E. Larive, (2002) : Thèse de doctorat, « Etude expérimentale des roches à faible perméabilité par la mise en ouvre d'un perméamétrie de précision », Montpellier.

[10]- http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s2/ident.mineraux.html , Roches et minéraux, collection Qui, Pourquoi, éd. Chantecler, Anvers (1973).

[11]- R.MOILLOT, (2001) : Mémento technique des granulats. Parles : les presses de l'école des mines.

[12]- Les différentes roches de la Terre https://sigessn.brgm.fr/spip.php?article428.

[13]- http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s2/mineral.roche.html Du Minéral à la roche.

[14]-
http://www.homejardin.com/coup_de_pouce_differents_sols/aide_conseil_assistance_explications.html

[15]- Boukra Bettayeb.O ECO (Formulation et caractéristique d'un béton bitumineux à base des matériaux université Ahmed Draia Adrar https://dspace.univadrar.dz/jspui/bitstream/123456789/2326/1/PFE.BB.BOUKRA%20BETTAYEB%20.ALLAOUI.%20Formulation%20et%20Caract%C3%A9 ristique.pdf

[16]- J.C.Saint – Arroman, R.Dupain « livre : Granulats, Sols, Ciments et Béton » 4e édition actualisée.

[17]- Hazardous Waste, (2017) : Environnemental Protection Agency, United States. https://www.epa.gov/hw.

[18]- Vitruve (traduction), De Architectura, (1852) : (De l'architecture), Edit. Perrault, Édit. Nizard, Paris. www.archi-med.com/pdf/textes/ pouzzolane.pdf.

[19]- Guiraud, P. (Février 2018) : Caractéristiques et types de granulats. Récupéré de https://www.infociments.fr/betons/caracteristiques-et-types-de-granulats.

[20]- Barakat A, Cours Matériaux de carrière et de construction, Département des sciences de la terre, Laboratoire Géoressources et Environnement Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal.

[21]- E. Guillon, (2004) : « Durabilité des matériaux cimentaires –Modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles », thèse de doctorat, ENS Cachan/ CNRS/ Université Paris 6, France.

[22]- J. Baron – JP, (1997) : « Les ciments courants » - « Les bétons, bases et données pour leur formulation » - Edition Eyrolles, 806p.

[23]- M. Regourd, H. Hornain, (1975) : « Applications de la microscopie électronique à balayage » Revue des matériaux de construction, 693p.

[24]- Ghomari Fouad, (2006) : Science des matériaux de construction, Département génie civil.

[25]- Yacine.C, et Zahredine.N, (2006) : Éléments de matériaux de construction et essais. Thèse de doctorat.

[26]- DR. P .Boeraeve, (1994) : «Technologie du béton », Groupement Belge du béton, Edition.

[27]- L. J. Vicat, Traité pratique et théorique de la composition des mortiers, ciments et gangues a pouzzolanes et de leur emploi dans toutes sortes de travaux.

[28]- Coffrages Cosmos, (17 octobre 2023) : Les types de béton et leurs spécificités.

[29]- A. Bouchiba, (2015) : Chapitre I : Les composants et propriétés du béton.

[30]- Proust. S, (2017) : Mélanges granulaires et leur caractérisation mécanique. Université de Liège.

[31]- Ghrieb Lassaad. (2007) : Impact des formations triasiques sur les eaux d'une plaine en zone semi-aride : cas de la plaine Bekkaria-Tébessa (extrême est Algérien). Université Badji Mokhtar- Annaba https://dspace.univ-annaba.dz//handle/123456789/3323.

[32]- KACHI Slimane, (2007) : Vulnérabilité de la nappe alluviale de Tébessa-Morsott face aux polluants. Université Badji Mokhtar-Annaba.

[33]- Benkerrou, N., & AÏt Ouali, R (2011) : Évolution des champs de contraintes depuis le Crétacé dans l'Atlas central et les Aurès-Nememtchas. Bulletin du Service Géologique de l'Algérie, 22(2), 141‑185.

[34]- Benzid, Y., & Halimi, L. (2015) : Étude gîtologique des indices du cuivre gris du quartier Douamis, mine d'El Ouenza, et impact de l'exploitation ferrifère. (Wilaya de Tébessa, Atlas Saharien Oriental), Université Mouloud Mammeri. https://dspace.ummto.dz/handle/ummto/22891

[35]- Kachi Slimane, (2007) : Vulnérabilité de la nappe alluviale de Tébessa-Morsott face aux polluants. Université Badji Mokhtar-Annaba.

[36]- Kowalski W.M. (1997) : Les stades d'effondrement du graben de Tébessa (confins Algéro- Tunisien) et la tectonique plicative plio-quaternaire. Bull. Soc. Hist. Nat. Pays de monbeliard, France.

[37]- Bouzenoune A. (1993) : Minéralisations peridiapiriques de l'aptien calcaire : les carbonates de fer du gisement hématitique de l'Ouenza (Algérie orientale). Doc, Université Pierre et Marie Curie, Paris.

[38]- Norme Française, (Août 1997) : « Granulats – Analyse granulométrique par tamisage », AFNOR, Paris.

[39]- Ghomari F, Bendi-Ouis A, (2008) : Science des matériaux de construction Travaux pratiques**,** Département Ginie Civil, Université Aboubekr Belkaid**.**

[40]- Norme Française, (Août 1999) : « Granulats – Equivalent de sable », AFNOR, Paris.

[41]- Norme Française, (Septembre 1990) : « Granulats – Détermination de la propreté superficielle.», AFNOR, Paris.

[42]- Norme Française, (septembre 1998) : « Granulats – Essai d'usure Micro-Deval », AFNOR, Paris.

[43]- Norme Française, (septembre 1998) : « Granulats – Essai Los Angeles », AFNOR, Paris.

[44]-Sedran.T,(1999) : « Rhéologie et rhéomètrie des bétons : Application à la formulation des bétons autonivelants », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.

[45]-Bauchy,(2007) : Rapport de projet expérimental : étude et contrôle du chaos dans un système mécanique, ENS Cachan, France, p.38.

[46]-Laure Abdul Le Brun, (2018) : « Mise au point d'une méthodologie pour la formulation des bétons secs à démoulage immédiat », Génie civil, Université Montpellier, Français.

[47]- Furnas, C.C, (1 September 1931): Grading Aggregates-I, Mathematical Relations for Maximum Density. Industrial & Engineering Chemistry, American chemical society, USA.

[48]- Ouchiyama.N, Tanaka.T, (1981): Porosity and Packing Density of Powders-II, Binary Mixtures, The Chemical Engineering Journal, USA.

[49]- Lambe, T.W, Whitman, R.V, (1969): Soil Mechanics. John Wiley & Sons, New York.

[50]-De Larrard. F, (4 Mars1999) : Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach, london.

[51]- Norme Française, (1998) : «Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3 : détermination de la densité et de l'absorption d'eau», AFNOR, Paris.

[52]- ASTM C127-12, (2012) : « Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate », USA.

[53]-Norme Française, (2000) : «Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique et de l'absorption d'eau des granulats », AFNOR, Paris.

[54]- ASTM C29/C29M-17, (2017): « Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate », USA.

[55]-German R. M, (Mars 1989): « Particle packing characteristics », Metal Powder Industries Federation France.

[56]-Cumberland D.J, Crawford R.J, (1987): « The packing of particles, Handbook of powder technology », volume 6.

[57]-Mollon .G, (2015) : Mécaniques des matériaux granulaires, Lyon : ENSA de Lyon, 118p.

[58]-De Larrard.F, (2004) : « BétonlabFree3 », Leçons, Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, France.

[59]-HANINI Walid, (2012) : « Étude de l'incidence de la granularité sur la compacité des mélanges granulaires », Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de master, Université aboubekr belkaid de Tlemcen.

[60]- Khanta Rao V.V.L., Krishnamoothys, (1993) : « Mélange de granulats pour une teneur en vides minimale pour une utilisation dans le béton polymère », Ciment, béton et granulats, CCAGDP, vol. 15, n° 2, pp. 97-107.

[61]-V. Ledee, F De Larrard, T Sedran, F Brochu, (2004) : « Essais de compacité de fractions granulaires à la table à secousses », Méthode d'essai N° 61, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, p.13.

[62]-El Barrak M, (2005) : « Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais », Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, Juillet, p. 229.

[63]- Fuller, W. B., & Thompson, S. E. (1907): The laws of proportioning concrete. Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 59, pp. 67–143.

Annexe





Annexe :

Annexe I - Exemple de feuille d'essai

ESSAI DE COMPACITÉ

Selon MODE OPÉRATOIRE LPC n° .....

N° affaire : **Date :**

N° échantillon : **Opérateur :**

Désignation échantillon (nature, d/D) :

Masse volumique réelle (selon NF EN 1097-6) : ρ_{rd} (g/cm³) =

Masse de l'éprouvette A (g) : **Masse de l'éprouvette B (g) :**

Dimensions du cylindre

Diamètre (cm) : Ø =

Surface du cylindre (cm²) : $S = \pi \varnothing^2 / 4$

Profondeur à vide :

Mesure 1 : Hv1 =

} **Moyenne** : Hv (cm) =

Mesure 2 : Hv2 =

Hauteurs de matériau après essai

ÉPROUVETTE A	ÉPROUVETTE B
Mesure 1 : HC1 =	**Mesure 1 : HC1 =**
Mesure 2 : HC2 =	**Mesure 2 : HC2 =**
Moyenne : HC_A (cm) =	**Moyenne : HC_B (cm) =**

h moyenne = Hv - (HC_A+ HC_B / 2) = cm

Calcul de la compacité

ÉPROUVETTE A	ÉPROUVETTE B
Volume (vm³) :	**Volume (cm³) :**
$V_A = S \times (Hv - Hc_A)$ =	$V_B = S \times (Hv - Hc_B)$ =
Masse volumique apparente =	**Masse volumique apparente =**
ρ_a = M (en g) / V_A (en cm³) =	ρ_a = M (en g) / V_B (en cm³) =
Compacité :	**Compacité :**
$C_A = \rho_a / \rho_{rd}$=	$C_B = \rho_a / \rho_{rd}$=

Résultat de l'essai : $C = (C_A + C_B) / 2$ = :
(0,xxx)

Observations	Signature