



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
Et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draia Adrar
Faculté Des Sciences et de Technologies
Département Des Sciences et Technologie



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER EN GENIE CIVIL**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux en Génie Civil

THEME

**CALCULE DE LA COMPACITE DES MELANGES GRANULAIRES DES
MATERIAUX LOCAUX**

**(UTILISATION DE 05 CARRIERES LOCALES: AOUGROUT, AOULEF, CHAROUINE ET
KOUSSANE)**

Présenté Par :

MESBAH Djalal Eddine

TIGANE Bilal

Soutenu le : Octobre 2020 Devant le jury composé de :

Pr. KHELAFI.H

Univ. Adrar

Examineur

Pr. SEMCHA.A

Univ. Adrar

Examineur

Mr. ABDELDJALIL.M

Univ. Adrar

Encadreur

Année Universitaire 2019-2020

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier Allah, le Clément et le Miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

*Nous voudrions exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Monsieur **Abdeljalil M'hammed** pour les orientations et les conseils qu'il a su nous prodiguer durant l'évolution de notre projet.*

Nous voudrions remercier tous nos professeurs qui ont contribué à notre formation.

Que tous les membres du jury trouvent ici l'expression de nos profonds respects pour avoir pris la peine d'examiner le manuscrit.

Nos remerciements vont également à tous ceux et celles qui de près ou de loin nous ont apporté aide et encouragement. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude

RÉSUMÉ

N'importe quelle étude de formulation de béton est basée sur la recherche en son sein d'un arrangement optimal des composantes en vue de fournir au mélange les meilleures performances.

Un squelette granulaire plus compact réduit le volume de vides dans le béton et laisse moins d'espace à remplir par la pâte de ciment, ce qui conduit à une augmentation de résistance et diminue le retrait et le fluage,

La compacité optimale du squelette granulaire joue alors un rôle essentiel sur les propriétés du béton, à l'état frais en particulier sur l'ouvrabilité comme à l'état durci notamment sur la résistance mécanique.

Dans ce mémoire, nous présentons un calcul de la compacité des mélanges granulaires des matériaux locaux (Granulats d' Adrar) des carrières de : Aoulef, Aougrou, Charouine et Koussane. À l'aide de logiciel **BétonLab free3** développé par **François de Larrard** et **Thierry Sedran**.

Mots clés : granulats, compacité, mélange, béton, squelette granulaire, BétonLab free3.

ABSTRACT

Any concrete mix design is based on research within it an optimal arrangement of the ingredients in order to provide the mixture with the best performance.

A more compact granular skeleton reduces the volume of voids in concrete and leave less space to fill with cement paste, which increased resistance and decreases shrinkage and creep.

The optimal compactness of the granular skeleton then plays an essential role on the properties of concrete, in the fresh state, especially on workability as in the hardened state notably in mechanical strength.

In this paper, we present a calculation of the compactness of the granular mixtures of local materials (Adrar aggregates) of the quarries of: Aoulef, Aougrou, Charouine and Koussane. Using **BétonLab free3** software developed by **François de Larrard** and **Thierry Sedran**.

Keywords: aggregates, compactness, mixing, concrete, granular skeleton, BétonLab free3.

ملخص

تستند اي دراسة لصياغة الخرسانة على البحث عن تراصٍ مثالي للحصى من اجل تحسين اداء الخليط. كلما كان الهيكل الحبيبي مرصوفاً بشكل أفضل، ينقص حجم الفراغات في الخرسانة ويترك مجال اقل ليتم ملؤه بعجينة الاسمنت مما يؤدي الى تحسين المقاومة وإنقاص نسبة الانكماش والزحف على المدى الطويل. يلعب التراص الامثل للهيكل الحبيبي دوراً اساسياً في خصائص الخرسانة في الحالة الطازجة، لاسيما فيما يتعلق بقابلية التشكيل كما في الحالة الصلبة ولا سيما المقاومة الميكانيكية. نقدم في هذا العمل حساب تراصية المخاليط الحبيبية للمواد المحلية (حصى أدرار) من محاجر اولف، أوقروت، شروين و كوسان، باستخدام برنامج **BétonLab 3 free** الذي طوره **Thierry Sedran** و **François de Larrard**.

الكلمات المفتاحية: الحصى، التراصية، المخاليط، الخرسانة، الهيكل الحبيبي، **BétonLab 3 free**

TABLE DES MATIERES

Remerciement	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Listes de notation	
Introduction générale	01
<i>Chapitre I : Synthèse bibliographique</i>	
I.1. Introduction	03
I.2. Généralités sur les propriétés de béton	03
I.2.1. Définition	03
I.2.2. Propriétés des bétons frais	03
I.2.2.1. Masse volumique du béton frais	04
I.2.2.2. Ouvrabilité	04
I.2.2.3. Affaissement au cône d'Abrams.....	04
I.2.3. Propriétés du béton durcissant	05
I.2.3.1. Masse Volumique	05
I.2.3.2. La résistance mécanique	06
I.2.3.3. Compacité	06
I.2.3.4. Porosité	06
I.2.3.5. La durabilité	07
I.2.3.6. Imperméabilité	07
I.2.3.7. Tenure au feu	07
I.2.3.8. La capacité d'isolation acoustique	07
I.2.3.9. La capacité d'isolation thermique	07
I.2.3.10. Retrait	08
I.2.3.11. Fluage	08
I.2.3.12. Absorption	08
I.3. Méthodes de formulation de béton	08
I.3.1. Méthode de Féret (1892).....	09
I.3.2. Méthode de Fuller et Thompson (1907)	09
I.3.3. Méthode d'Abrams (1918)	10
I.3.4. Méthode de Bolomy (1925)	10
I.3.5. Méthode de Caquot (1937).....	11
I.3.6. Méthode de Faury (1944)	11
I.3.7. Méthode de Joisel (1952)	12
I.3.8. Méthode de Baron et Lesage (1976)	13

I.3.9.	Méthode de Dreux –Gorisse (1995)	13
I.3.10.	Méthode de Baron et Ollivier (1996).....	14
I.3.11.	Méthode de plans d'expériences	14
I.3.12.	Méthode de (Sedran, 1999 ; de Larrard 2000)	15
I.4.	Etude de la formulation de béton à base de matériaux locaux	15
I.5.	Compacité : paramètres pertinents	17
I.5.1.	Définition	17
I.5.2.	Méthodes de mesure de la compacité	20
I.5.2.1.	Méthode de versement simple.....	20
I.5.2.2.	Méthode de piquage.....	20
I.5.2.3.	Méthode de vibration avec compression	20
I.5.2.4.	Méthode de compacité des fractions granulaires à la table à secousse.....	21
I.5.3.	Facteurs influant sur l'empilement granulaire	22
I.5.3.1.	Effet de forme des grains	22
I.5.3.2.	Effet du mode de mise en place (l'indice de serrage)	23
I.5.3.3.	Effet de taille des grains	23
I.5.4.	Modèles de prévision de la compacité des milieux granulaires	24
I.5.4.1.	Le modèle linéaire de compacité (MLC).....	24
I.5.4.2.	Mélanges binaires sans interactions.....	24
I.5.4.3.	Modèle d'empilement virtuel.....	25
I.5.4.4.	Modèle de suspension solide (MSS).....	25
I.5.4.5.	Modèle d'empilement compressible (MEC).....	26
I.5.5.	Modèle d'analyse fractale	27
I.6.	Calcul de la compacité virtuelle par Bétonlabfree 3	28
I.6.1.	Fonctionnement du logiciel.....	29
I.7.	Conclusion	33
<i>Chapitre II : Caractérisation des matériaux utilisés</i>		
II.1.	Introduction	34
II.2.	Présentation de l'origine des carrières des granulats locaux utilisées.....	34
II.2.1.	Aperçu géographique de la région	34
II.2.2.	Aspect géomorphologique et topographique	35
II.2.2.1.	Le Plateau	35
II.2.2.2.	L'Erg	35
II.2.2.3.	Le Reg	35
II.2.2.4.	Terrasses d'apport éolien	35

II.2.2.5. Les Sebkhas.....	36
II.2.3. L'origine des carrières des granulats locaux utilisés	36
II.2.3.1. Koussane	37
II.2.3.2. Charouine	37
II.2.3.3. Aougrouit	37
II.2.3.4. Aoulef	37
II.3. Essais sur les granulats	37
II.2.1. Caractéristiques des granulats.....	38
II.2.2. Propriétés dimensionnelles	38
II.2.3. Propriétés physiques	38
II.2.4. Propriétés mécaniques	39
II.4. La masse volumique apparente.....	40
II.5. La masse volumique absolue.....	41
II.6. Analyse granulométrique.....	44
II.7. Essai d'aplatissement.....	47
II.8. Essai de propreté des granulats	50
II.8.1. Equivalent de sable.....	50
II.8.2. Essai de propreté des graviers.....	54
II.9. Essai d'absorption.....	55
II.10. Essai Los Angeles.....	56
II.11. Essai de micro Deval.....	58
II.12. Carrière de Koussane	60
II.13. Carrière de Charouine	62
II.14. Carrière d'Aougrouit	63
II.15. Carrière d'Aoulef	65
II.16. Caractéristiques du ciment utilisé	66
II.17. Interprétation des résultats	67
II.8.1. Interprétation des résultats de l'essai de la masse volumique	67
II.8.2. Interprétation des résultats de l'essai de propreté de granulat	67
II.8.3. Interprétation des résultats de l'essai d'absorption d'eau	68
II.8.4. Interprétation des résultats des essais mécaniques des granulats	68
II.8.5. Interprétation des résultats des essais d'équivalent de sable	68
II.18. Conclusion	68

Chapitre III : Collection des données

III.1. Introduction	69
III.2. Adaptation des résultats des formulations des bétons à bases des matériaux locaux.	69
III.2.1. Travaux de F. Yousfi (2015).....	69
III.2.2. Travaux de M. Belhadj et A. Mounir.....	70
III.2.3. Travaux de R. Zouini (2018).....	70
III.2.4. Travaux de N. Laroussi et A. Dehmani (2018).....	71
III.2.5. Travaux d'ABBOU Zahra et MESSAUDI Safia (2019).....	71
III.3. Calcul de la compacité théorique des mélanges granulaires	73
III.3.1. Travaux de F. Yousfi (2015).....	73
III.3.2. Travaux de M. Belhadj et A. Mounir.....	73
III.3.3. Travaux de R. Zouini (2018).....	74
III.3.4. Travaux de N. Laroussi et A. Dehmani (2018).....	74
III.3.5. Travaux d'ABBOU Zahra et MESSAUDI Safia (2019).....	76
III.4. Conclusion	77

Chapitre IV: Simulation, Résultats et Interprétation

IV.1. Introduction	78
IV.2. Calcul de la compacité virtuelle par Bétonlabfree 3	78
IV.2.1. Aperçu sur la méthode de calcul de la compacité	78
IV.2.2. Résultats de la compacité virtuelle des classes granulaires.....	82
IV.2.3. Compacité virtuelle des mélanges granulaires.....	83
IV.3. Conclusion	95

Conclusion Générale.....

Référence bibliographiques.....

LISTE DES FIGURES

Chapitre 01

Figure I.1: Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.....	5
Figure I.2: Courbe optimale type selon la méthode de Dreux-Gorisse	13
Figure I.3: Notions de compacité et de porosité [de Larrard, 2004]	19
Figure I.4: Dispositif de mesure de la compacité [El Barrak, 2005]	21
Figure I.5: Schéma de la table à secousses [Méthode d'essai des lpc n°61, 2004].....	22
Figure I.6: Valeur des compacités pour des grains roulé et concassé [de Larrard, 2000].....	22
Figure I.7: Compacités expérimentales des classes élémentaires en fonction de la taille des grains [de Larrard ; 2000].....	22
Figure I.8: Indices de serrages pour les différents modes de mise en place des grains [de Larrard ; 2004].	23
Figure I.9: Mélange binaire sans interaction gros grains dominants [Sedran, 1999].....	24
Figure I.10: Mélange binaire sans interaction grains fins dominants [Sedran, 1999]	24
Figure I.11: Deux classes ont le même diamètre [T. SEDRAN 2000]	25
Figure I.12: L'évolution de la compacité en fonction du dosage en fins particulières MGC (0/3)	28
Figure I.13: L'évolution de la compacité en fonction du dosage en fins particulières MGC (0/5)	28
Figure I.14: Les étapes d'introduction des matériaux dans Bétonlabfree 3 ; étape1.	30
Figure I.15: Les étapes d'introduction des matériaux dans Bétonlabfree 3 ; étape2.	30
Figure I.16: Les étapes d'introduction des matériaux dans Bétonlabfree 3 ; étape3.	31
Figure I.17: Les étapes d'introduction des matériaux dans Bétonlabfree 3 ; étape 4.	31
Figure I.18: Les étapes d'introduction des matériaux dans Bétonlabfree 3 ; étape 5.	32
Figure I.19: Les étapes d'introduction des matériaux dans Bétonlabfree 3 ; étape 6.	32
Figure I.20: Les étapes d'introduction des matériaux dans Bétonlabfree 3 ; étape 7.	33

Chapitre 02

Figure II.1: Traits morphologiques en 3D de la zone d'étude (ZAGHTOU, 2011).....	35
Figure II.2: Les Concasseurs de la wilaya d'Adrar.....	36
Figure II.3: Versement des granulats	41
Figure II.4: Peser la masse du récipient rempli	41
Figure II.5: Les pores dans un grain.....	41
Figure II.6: Mesure de la masse volumique par la méthode des éprouvettes.....	42
Figure II.7: La masse volumique par la méthode des éprouvettes	43
Figure II.8: Tamis utilisés selon les classes granulaires.....	45
Figure II.9: Phasage de l'analyse granulométrique.....	46
Figure II.10: Dimensions d'un granulat... ..	48
Figure II.11: Des grilles à fentes parallèles.....	49
Figure II.12: Des tamis à mailles carrées.	49
Figure II.13: Les granulats plats.....	49
Figure II.14: Essai d'équivalent de sable.. ..	51
Figure II.15: Méthode de mesure h1 et h2.	53

Figure II.16: Séchage de l'échantillon à l'aide d'un chiffon.....	55
Figure II.17: La machine Los Angeles.....	56
Figure II.18: Les boulets.	56
Figure II.19: La machine micro-Deval.....	59
Figure II.20: Billes inoxydables.	59
Figure II.21: Courbe granulométrique Carrière de KOUSSANE..	61
Figure II.22: Courbe granulométrique Carrière de CHAROUINE.	62
Figure II.23: Courbe granulométrique Carrière d'AOUGROUT.....	64
Figure II.24: Courbe granulométrique Carrière d'Aoulef.....	65

Chapitre 04

Figure IV.1: Méthode de calcul de la compacité virtuelle de chaque fraction granulaire par Béton lab free3..	79
Figure IV.2: Méthode de calcul de la compacité virtuelle d'un mélange granulaire par Béton lab free3.....	81
Figure IV.3: Compacité virtuelle du mélange granulaire de Koussane en SD et SC.....	85
Figure IV.4: Compacité virtuelle du mélange granulaire d'Aougrouit en SD et SC.....	88
Figure IV.5: Compacité virtuelle du mélange granulaire de Charouine SD et SC.	91
Figure IV.6: Compacité virtuelle du mélange granulaire d'Aoulef SD et SC..	94

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 01

Tableau I.1: Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams	5
Tableau I.2: Valeurs optimales du module de finesse des composantes granulaires des bétons courants [Abrams, 1923].	10
Tableau I.3: Dosage des composants du béton témoin avec sable normalisé.	16
Tableau I.4: Dosage des composants du béton avec SD de Métarfa.....	16
Tableau I.5: Dosage des composants du béton avec SD de Ksar Kadour	16
Tableau I.6: Dosage des composants du béton avec SD de Nefiss.	17
Tableau I.7: Dosage des composants du béton avec SD de Métarfa et SC.....	17
Tableau I.8: Dosage des composants du béton avec SD de Ksar Kadour et SC.....	17
Tableau I.9: Dosage des composants du béton avec SD de Nefisset SC.	18
Tableau I.10: Dosage des composants du béton avec SC.	18
Tableau I.11: Résultats des compacités expérimentales des mélanges granulaires secs (0/3). ..	27
Tableau I.12: Résultats des compacités expérimentales des mélanges granulaires secs (0/5). ..	28
Tableau II.13: Résultats de la masse volumique absolue et apparente 3/8 d'Aougrout.	28

Chapitre 02

Tableau II.1: Correspondance entre classe granulaire et écartement.. ..	48
Tableau II.2: Interprétation des résultats de Es.. ..	53
Tableau II.3: Nombre des boulets pour essai Los Angeles	57
Tableau II.4: Spécifications LA pour bétons hydrauliques	58
Tableau II.5: Nombre des billes pour essai micro-Deval.....	59
Tableau II.6: Spécifications MDE pour bétons hydrauliques.	60
Tableau II.7: Tableau d'analyse granulométrique carrière de Koussane.	60
Tableau II.8: Tableau d'Identification des propriétés des granulats, carrière de Koussane....	61
Tableau II.9: Tableau d'analyse granulométrique carrière de Charouine.	62
Tableau II.10: Tableau d'Identification des propriétés des granulats, carrière de CHAROUINE.	63
Tableau II.11: Tableau d'analyse granulométrique carrière d'Aougrout.....	63
Tableau II.12: Tableau d'Identification des propriétés des granulats, carrière d'AOUGROUT.. ..	64
Tableau II.13: Tableau d'analyse granulométrique carrière d'Aoulef.....	65
Tableau II.14: Tableau d'Identification des propriétés des granulats, carrière d'AOULEF. ...	66
Tableau II.15: Composition chimique du CEM II/A- 42,5.....	66
Tableau II.16: Caractéristiques minéralogique du CEM II/A- 42,5.....	66
Tableau II.17: Propriétés physiques du ciment	67
Tableau II.18: Tableau d'Interprétation des résultats de l'essai de la masse volumique.....	67
Tableau II.19: Tableau d'Interprétation des résultats de l'essai de propreté de granulats.....	67
Tableau II.20: Tableau d'Interprétation des résultats de l'essai d'absorption des granulats... ..	68
Tableau II.21: Tableau d'Interprétation des résultats des essais mécaniques des granulats. ...	68
Tableau II.22: Tableau d'Interprétation des résultats des essais d'équivalent de sable.....	68

Chapitre 03

Tableau III.1: Tableau des constituants du Béton selon les travaux de F. Yousfi.	69
Tableau III.2: Tableau des constituants du Béton selon les travaux de M. Belhadj et A. Mounir.	70
Tableau III.3: Tableau des constituants du Béton selon les travaux de R. Zouini.	70
Tableau III.4: Tableau des constituants du Béton selon les travaux de N. Aroussi et A. Dehmani.	71
Tableau III.5: Tableau des constituants du Béton selon les travaux d'Abbou et Messaudi.	72
Tableau III.6: Compacité des mélanges réalisés par F. Yousfi.	73
Tableau III.7: Compacité des mélanges réalisés par M. Belhadj et A. Mounir.	73
Tableau III.8: Compacité des mélanges réalisés par R. Zouini.	74
Tableau III.9: Compacité des mélanges réalisés par N. Aroussi et A. Dehmani.	75
Tableau III.10: Compacité des mélanges réalisés par Abbou Zahra et Messaudi Safia.	76

Chapitre 04

Tableau IV.1: Tableau d'analyse granulométrique su mélange gravier 8/15 + 15/+25 + sable des dunes du Carrière de Koussane.	80
Tableau IV.2: Tableau des compacités virtuelles des classes granulaires de carrière de Koussane.	82
Tableau IV.3: Tableau des compacités virtuelles des classes granulaires de carrière d'Aougrou.	82
Tableau IV.4: Tableau des compacités virtuelles des classes granulaires de carrière de Charouine.	82
Tableau IV.5: Tableau des compacités virtuelles des classes granulaires de carrière d'Aoulef.	82
Tableau IV.6: Tableau des compacités virtuelles du mélange granulaire de Koussane avec du sable des dunes.	83
Tableau IV.7: Tableau des compacités virtuelles du mélange granulaire de Koussane avec du sable concassé.	84
Tableau IV.8: Tableau des compacités virtuelles du mélange granulaire de d'Aougrou avec du sable des dunes.	86
Tableau IV.9: Tableau des compacités virtuelles du mélange granulaire d'Aougrou avec du sable concassé.	87
Tableau IV.10: Tableau des compacités virtuelles du mélange granulaire de Charouine avec du sable des dunes.	89
Tableau IV.11: Tableau des compacités virtuelles du mélange granulaire de Charouine avec du sable concassé.	90
Tableau IV.12: Tableau des compacités virtuelles du mélange granulaire d'Aoulef avec du sable des dunes.	92
Tableau IV.13: Compacité Tableau des compacités virtuelles du mélange granulaire d'Aoulef avec du sable concassé.	93

LISTE DES NOTATIONS

C	Compacité du mélange granulaire.
ρ	Masse volumique réelle des granulats.
A	Constante de Bolomey.
G	coefficient caractérisant la qualité des granulats selon Dreux.
m	indice de consistance (Pa.s)
k_{Abrams}	coefficient d'Abrams relatif à la nature du ciment et de l'âge du mortier.
k_{Bolomey}	coefficient de Bolomey relatif à la nature du ciment et de l'âge du mortier.
$k_{\text{Féret}}$	coefficient de Féret relatif à la nature du ciment et de l'âge du mortier.
p_{Bolomey}	porosité du mélange granulaire selon Bolomey.
p_{Fuller}	porosité du mélange granulaire selon Fuller Thompson.
d, D	diamètre min et diamètre max de granulat.
v_0	constante définie expérimentalement selon Caquot.
v	volume des vides d'une classe granulaire d/ D.
E	masse d'eau (kg/m^3).
c	masse de ciment (kg/m^3).
σ_{c28}	classe vraie du ciment relatif à Dreux (MPa.)
n	nombre de classes granulaires
d_i	diamètre moyen de la classe i prise isolément.

α_i	compacité expérimentale de la classe " i " prise isolément.
β_i	compacité virtuelle de la classe i prise isolément.
C_{MLC_i}	compacité virtuelle du mélange pour la classe " i " dominante.
C_{MLC}	compacité virtuelle du mélange.
$F(i, j)$	fonction d'interaction " effet d'interférence "
$g(i, j)$	fonction d'interaction " effet de paroi "
γ_i	compacité virtuelle du mélange pour la classe" i" dominante.
γ	compacité virtuelle du mélange.
a_{ij}	effet de desserrement exercé par la classe j sur la classe i dominante.
b_{ij}	effet de paroi exercé par la classe j sur la classe I dominante.
$\varnothing_1, \varnothing_2$	Volumes partiels de chaque classe dans un volume unité.
Y_i	proportions volumiques de la classe i (par rapport au volume solide total).
C_{MSS}	compacité réelle (modèle de suspension solide).
C_{MEC}	compacité réelle (modèle d'empilement compressible).
K	indice de serrage.
η_r^*	viscosité de référence.
C_{exp}	compacité expérimentale.
$C_{théo}$	compacité théorique.
f_c	résistance en compression du matériau (MPa).
y_1, y_2	proportions volumiques de la classe 1 et 2.
d_1, d_2	diamètre moyen de la classe 1 et la classe 2.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

MF : Module de finesse

SC : Sable concassée

SD : Sable de dune

C : Compacité

MG : Mélange granulaire

P% : Pourcentage de chaque composant du mélange

MV : Masse volumique absolu

MDE : Coefficient micro-deval

LA : Coefficient Los Angeles

ESV : Equivalent de sable visuel

ESP : Equivalent de sable avec piston

Vs : Volume solide par composant

Vt : Volume total

C.V : Compacité Virtuelle

C.T : Compacité Théorique

B : Béton

BSD : Béton avec sable des dunes

BSC : Béton avec sable concassé

G : Gravier

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde à cause de la simplicité de sa fabrication, de sa maniabilité à l'état frais, de sa résistance mécanique et de sa durabilité à l'état durci.

La formulation de béton se fait le plus souvent dans le but d'aboutir à trois souhaitées: l'ouvrabilité, la résistance mécanique et la durabilité. Les granulats représentent plus de 70 % du volume total du béton, par conséquent un squelette granulaire, plus compact réduit le volume de vides dans le béton ce qui améliore l'ouvrabilité du béton et laisse moins d'espace à remplir par la pâte de ciment ce qui conduit à une augmentation de résistance et diminue le retrait et le fluage. Le béton formulé donc est moins cher, car le ciment est la fraction coûteuse du matériau.

Au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées F. de Larrard et ses collages ont développé une approche scientifique originale pour formuler les bétons. Elle focalisait en particulier à optimiser sur l'ordinateur la compacité d'un mélange granulaire en tenant compte des interactions réelles entre grains. Le modèle, dans sa forme actuelle, est appelé « Modèle d'empilement compressible ». Les calculs itératifs réalisés par ces outils utilisent principalement la granularité des matériaux à disposition et la compacité de leurs tranches élémentaires.

Dans ce mémoire, nous présentons un calcul de la compacité des mélanges granulaires des matériaux locaux (granulats d'Adrar) des carrières de: Aoulef, Aougrou, Charouine et Koussane. A l'aide de logiciel BétonLab free 3 développé par : François de Larrard et Thierry Sedran.

Le mémoire est composé de 4 chapitres :

La première étape de la recherche, objet du chapitre I, consisté à réaliser une synthèse bibliographique concernant le matériau béton, ses propriétés et les différentes méthodes de formulation du béton.

Nous présentons aussi par la suite les différents bancs d'essais utilisés pour la mesure de la compacité des mélanges granulaires et ces paramètres pertinents, ainsi une présentation du

logiciel BétonLab Free 3. Enfin, nous avons présenté les essais d'identification des granulats, aussi l'origine des carrières des granulats locales utilisées.

Le deuxième chapitre, est consacré à l'identification des caractéristiques physiques et mécaniques (la masse volumique apparente et absolue, analyse granulométrique, propreté, forme, dureté, etc.) des granulats utilisés de différentes carrières (Aougrout, Aoulef, Charouine et Koussane) .Nous avons par conséquent, donné des interprétations sur les résultats obtenus.

Concernant le troisième chapitre, est dédié à présenté les résultats des travaux précédents concernant la formulation des bétons à base des matériaux locaux et les dosages déterminés ainsi de mesurer la compacité théorique de ces mélanges.

Dans le dernier chapitre, nous présentons la compacité virtuelle des mélanges granulaires calculés par le modèle d'empilement compressible par simulation à l'aide du logiciel Bétonlab Free 3.

Finalement, nous avons terminé le mémoire par une conclusion générale qui présente les résultats obtenus ainsi que des perspectives.

Chapitre 01:

Synthèse Bibliographique

I.1. Introduction :

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans les domaines du bâtiment et des travaux publics à cause de ses nombreuses qualités mécaniques et de durabilité. Toutefois, la confection d'une bonne composition de béton est conditionnée par plusieurs paramètres et notamment par un choix judicieux de la phase inerte c à d sable + gravier. Puisque cette dernière constitue plus de 70% du volume totale du béton et affecte fortement les caractéristiques de ce matériau. Un squelette granulaire plus compacte diminue le volume des vides dans le béton et laisse moins d'espace à occupé par la pate du ciment ce qui conduit à une amélioration de la performance du béton.[W.Hanini & al, 2015]

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique Dédit des travaux précédents concernant le béton et ses propriétés. Et en particulier celle qui étudie de la compacité des mélanges granulaire et les paramètres qui pertinents.

Enfin, nous avons présenté le logiciel Bétonlab Free 3, aussi l'origine des carrières des granulats locales utilisées.

I.2. Généralités sur les propriétés de béton :

2.1 Définition : [1]

Le béton est un matériau composite. Il est constitué de plusieurs constituants différents, qui deviennent homogènes entre eux, soit à la mise en œuvre (béton frais), soit après durcissement (béton durci). Ses composants sont déterminés dans des proportions étudiées afin d'obtenir des propriétés souhaitées telles que la résistance mécanique et la consistance et la durabilité. [G. Dreux. Festa, 1998]

Nous pouvons identifier le béton en deux phases, la première à l'état frais et le second durci, et par conséquent nous distinguer les types des propriétés selon les deux états du béton.

2.2 Propriétés des bétons frais:

Le béton est dit frais lorsqu'il n'a pas entamé son processus de prise et de durcissement. Lors du malaxage, l'eau est l'élément qui va donner une capacité d'écoulement au squelette compact formé par l'empilement des grains solides.

Ceci signifie que l'eau va venir desserrer le squelette compact afin de donner une mobilité aux grains suffisant pour permettre la mise en œuvre souhaitée [Chanvillard, 1999].

Le béton frais présente deux propriétés fondamentales :

2.2.1 Masse volumique du béton frais: [1]

On mesure la masse volumique du béton frais à l'aide d'un récipient étanche à l'eau et suffisamment rigide. Elle est calculée en kg/m³ lors de chaque coulage conformément à la réglementation en vigueur [NF EN 12350-6 1999]. On mesure la masse volumique du béton frais. Le béton est mis en place dans le récipient et vibré à l'aide d'une aiguille vibrante, une table vibrante ou un serrage manuel en utilisant une barre ou tige de piquage, après un arasement approprié. Le récipient et son contenu doivent être pesés afin de déterminer la masse.

Formule de masse volumique du béton frais :

$$\rho = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (\text{I. 1})$$

- ρ : est la masse volumique du béton frais (kg/m³).
- M_1 : est la masse du récipient (kg).
- M_2 : est la masse du récipient plus la masse du béton contenu dans le récipient (kg).

2.2.2 Ouvrabilité : [1]

L'ouvrabilité est désignée sous les termes de maniabilité ou consistance du mélange. [Dreux et Festa, 1998] écrivent que « l'ouvrabilité du béton peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage du ferrailage ».

Elle caractérise, avant que le matériau ne durcisse, la fluidité du béton, De nombreux paramètres influent sur la maniabilité: nature et dosage en ciment, forme des granulats, dosage en eau et emploi des adjuvants. Elle peut être mesurée facilement par un essai d'affaissement en utilisant le cône d'Abrams.

2.2.3 Affaissement au cône d'Abrams: [1]

Cet essai (slump-test) est incontestablement un des plus simples et des plus fréquemment utilisés, car il est très facile à mettre en œuvre. Il ne nécessite qu'un matériel peu coûteux et peut être effectué directement sur chantier par un personnel non hautement qualifié mais ayant reçu simplement les instructions nécessaires au cours de quelques séances de démonstration. L'appareillage est complètement décrit dans la [norme NF P 18-451] et est schématisé sur la (figure I.1). Il se compose de 4 éléments: un moule tronconique sans fond de 30 cm de haut,

de 20 cm de diamètre en sa partie inférieure et de 10 cm de diamètre en sa partie supérieure; une plaque d'appui; une tige de piquage; un portique de mesure.

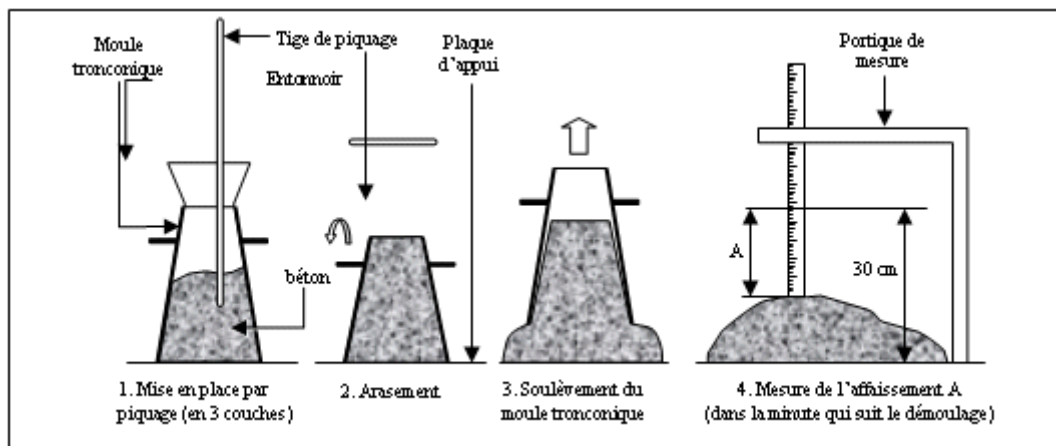


Figure I.1: Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.

Les mesures sont évidemment quelques peu dispersées et il ne faut pas accorder à cet essai un caractère trop rigoureux, mais on peut admettre qu'il caractérise bien la consistance d'un béton et permet le classement approximatif indiqué au tableau I.1

Tableau I.1: Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams [norme NF EN 206-1]

Classe	Consistance du béton	Affaissement (en mm) au cône d'Abrams
S1	Ferme	10 – 40
S2	Plastique	50 – 90
S3	Très plastique	100 – 150
S4	Fluide	160 – 210
S5	Très fluide	≥ 220

2.3 Propriétés du béton durcissant:

Le béton durci se caractérise par plusieurs propriétés, en particulier :

2.3.1 Masse Volumique : [1]

Elle varie entre 2300 et 2400 (kg/m³) pour les bétons ordinaires ; il atteint 2500 (kg/m³) pour les BHP. La présence d'armatures dans le béton armé ou précontraint conduit à prendre en compte dans les calculs un poids volumique de 2500 (kg/m³) pour les bétons courants.

2.3.2 La résistance mécanique : [1]

Le béton a une résistance en traction très faible, qui n'est que rarement mise en valeur dans les structures. C'est donc en général la résistance en compression à 28 jours f_{c28} qui sert de caractérisation de base du béton durci. Cette résistance en compression est déterminée suivant la norme européenne [NF EN 12390-3].

La résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale d'un échantillon de béton. La norme [EN 206-3] définit différentes classes sous la forme CX/Y (ex: C25/30).

X est la résistance caractéristique mesurée sur cylindre 16x32 cm, tandis que Y est la résistance (du même béton) mesurée sur cube 15x15 cm. Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression, La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée.

La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante : $= F/Ac$

- **f_c** :résistance en compression, exprimée en méga pascal (N/mm²).
- **F** : charge maximale, exprimée en(N).
- **Ac**: l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée, calculée à partir de la dimension nominale de l'éprouvette.

2.3.3 Compacité : [1]

La compacité une fraction de volume de solide sur le volume totale d'un mélange granulaire et est un paramètre important pour le béton mais aussi pour de nombreuses applications dans le Génie Civil, en effet beaucoup de matériaux composites sont fabriqués par des inclusions granulaires noyées dans une matrice liante. Cette dernière il ya une grande influence sur le béton tel que il ya une relation direct avec les caractéristiques de béton soit à l'état frais ou à l'état durci.

2.3.4 Porosité : [1]

La porosité est une fraction de volume de vide sur le volume totale et par rapport la compacité c'est l'inverse de sorte que le volume de vide petit la compacité est grande.

2.3.5 La durabilité : [1]

Le béton offre une grande pérennité face aux agressions physico-chimiques du milieu environnant (gel, pluie et pollution atmosphérique...). Il est particulièrement adapté pour la réalisation d'ouvrages devant résister à des conditions difficiles et extrêmes.

La porosité et la compacité. Ces propriétés conditionnent les deux premières. Plus un béton est compact (ou moins, il est poreux), plus ses performances seront élevées et sa durabilité importante. On améliore la compacité du béton en optimisant la dimension et l'empilement des granulats et en réduisant la quantité d'eau.

2.3.6 Imperméabilité : [1]

Le béton est d'autant plus imperméable que la porosité est plus faible. Les bétons dont le rapport E/C est inférieur à 0,40 sont pratiquement imperméables à l'eau : leur perméabilité ne peut plus être mesurée.

2.3.7 Tenure au feu : [1]

La résistance du béton aux incendies est excellente.

2.3.8 La capacité d'isolation acoustique : [1]

Le béton possède une importante capacité isolante, Ce qu'il faut donc retenir sur le béton c'est que naturellement, ce n'est pas le meilleur matériau pour l'isolation phonique. Son épaisseur lui permet de réduire fortement les bruits jusqu'à 50 dB. Mais il sera très peu performant face aux impacts directs sur le sol (des bruits de pas par exemple), ainsi que vis-à-vis de certaines fréquences. On va donc parfois doubler le béton par d'autres matières isolantes pour renforcer son isolation.

2.3.9 La capacité d'isolation thermique : [1]

Tout comme pour l'isolation acoustique, la masse du béton va induire une relative inertie dans les échanges thermiques. Par des phénomènes de conduction, les pièces vont donc rester globalement fraîches en été et a contrario, la chaleur se dissipera plus doucement en hiver.

2.3.10 Retrait : [1]

Le retrait du béton correspond à des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant ou après la prise du béton. Lorsqu'elles ne sont pas

maîtrisées par un ferrailage approprié et par des joints, ces variations dimensionnelles engendrent l'apparition de fissures.

2.3.11 Fluage : [1]

Noté (ϵ_f), est une déformation différée supplémentaire à la déformation élastique provoquée par l'application d'un chargement à une pièce en béton, Le fluage du béton dû à l'action d'une contrainte continue consiste dans une augmentation graduelle de déformation avec le temps. Comme les effets du fluage se font sentir alors que dans le même temps le matériau est soumis à des échanges hydriques avec son environnement, le fluage est décomposé en deux mécanismes :

- Le fluage propre
- Le fluage de dessiccation

2.3.12 Absorption : [1]

L'absorption d'eau est un coefficient qui entre dans les caractéristiques des compositions de béton pour qu'ils existent une relation directe entre la compacité et l'absorption d'eau.

I.3. Méthodes de formulation de béton :

La composition du béton a pour but de déterminer les proportions des divers constituants (ciment, eau, sable et gravier ou pierres concassées) conduisant à des bétons dont l'ouvrabilité est compatible avec les moyens de mise en œuvre et qui possédera, après durcissement, les meilleures caractéristiques (résistance mécanique élevée, faible retrait, etc....).

Plusieurs méthodes de composition sont proposées par des spécialistes de renom, tels que Bolomey, Faury, Valette, Dreux Gorisse, etc.

Quelle que soit la méthode utilisée, la composition du mélange calculée ne peut correspondre parfaitement au béton désiré, car il n'est pas possible d'appréhender avec précision la composition du béton, ceci peut être dû à la qualité des constituants qui influent sur la qualité du béton : forme, angularité, compacité, types de granulats, finesse de mouture et classe de résistance vraie du ciment, etc.

La détermination de la composition du mélange de béton n'est qu'une première approche de préparation de mélanges d'essais qui permettront de corriger expérimentalement la composition calculée pour aboutir au béton désiré.

Méthodes de formulation du béton :

L'étude de la composition du béton a pour but de déterminer le dosage en ciment, granulats (agrégats fins : sable et gros agrégats : gravier ou pierres concassées) et en eau pour un dosage de 1 m³ de béton frais, afin d'obtenir un mélange homogène et d'une compacité élevée, ainsi qu'une résistance mécanique voulue (exigée).

Plusieurs auteurs Féret (1892), Fuller et Thompson (1907), Abrams (1918), Bolomey (1925), Caquot (1937), Valette (1940), Faury (1942), Joisel (1952), cités dans la référence [Dreux et Festa, 1998] ont développé des méthodes de formulation de bétons. Selon le pays et l'école de pensée, la méthode française [Dreux, 1970], la méthode Barron Lesage (France, 1976), la méthode basée sur le modèle d'empilement compressible (France, 2000), la méthode des plans d'expériences (Louvet F.) cité dans [Baron et Ollivier, 1996].

3.1. Méthode de Féret (1892) : [2]

En 1892, Féret [FERET, 1892] auquel on attribue les premières recherches, travaille sur un principe de compacité optimale. Initialement, une compacité est déterminée sur un mélange ternaire de sables puis une matrice cimentaire y est insérée. Cette méthode donne un mortier avec une granularité discontinue sans obtenir le matériau le plus compact à l'état durci. Au travers de l'équation (I.2), Féret relie une résistance en compression aux proportions volumiques et notamment en utilisant le rapport volumique E/C.

$$f_c = K_{féret} \left(\frac{c}{e+v+c} \right)^2 \quad (\text{I. 2})$$

3.2. Méthode de Fuller et Thompson (1907): [3]

En 1907, [Fuller et Thompson, 1907] basent aussi leur méthode sur une compacité maximale mais sur un mélange à granulométrie continue. L'aspect novateur de la méthode se situe dans la prise en compte du ciment mais aussi des dimensions extrêmes des grains d (plus petite dimension) et D (plus grande dimension) l'équation(I.2). En revanche, la forme des grains n'intervient pas dans la méthode.

$$P_{\text{Fuller Thompson}} = \frac{100 \times 5\sqrt{d}}{D} \quad (\text{I. 3})$$

3.3. Méthode d'Abrams (1918) : [4]

En 1918, Abrams définit empiriquement une méthode dans laquelle le dosage en ciment et la dimension maximale des granulats sont les paramètres prépondérants

(équation I.3) et fait intervenir au travers du coefficient k Abrams (k Féret amélioré) la nature et la forme des granulats.

C'est une règle de mélange basée sur l'obtention d'un certain module de finesse global pour le mélange de granulats à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à utiliser. Le module de finesse du mélange est choisi de telle manière que les vides dans ce mélange sont, en principe, réduits au minimum selon la formule suivante :

$$f_c = K_{Abrams} \frac{1}{7.5 \left(\frac{1.5E}{c}\right)} \quad (\text{I.4})$$

Les modules optimaux pour béton de granulat roulés, déterminés expérimentalement par **Abrams**, sont indiqués dans le **tableau I.2** en fonction du dosage en ciment et de la dimension D du granulat le plus gros.

Tableau I.2: Valeurs optimales du module de finesse des composantes granulaires des bétons courants [Abrams, 1923].

Dosage en ciment (kg/m ³)	Dimension maximale de D des granulats						
	10	15	20	25	30	40	60
275	4.05	4.45	4.85	5.25	5.60	5.80	6.00
300	4.20	4.60	5.00	5.40	5.65	5.85	6.20
350	4.30	4.70	5.10	5.50	5.73	5.88	6.30
400	4.40	4.80	5.20	5.60	5.80	5.90	6.40

La règle de mélange d'**Abrams**, permet de calculer les pourcentages relatifs des granulats de modules de finesse Mf_1 et Mf_2 , choisis pour obtenir un module de finesse Mf choisi pour le mélange. [Abrams, 1923].

3.4. Méthode de Bolomy (1925) : [5]

En 1925, [Bolomey, 1925] propose une courbe granulométrique continue de référence incluant le ciment (l'équation I.5) ,Par cette formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et on s'efforce de réaliser avec des granulats dont on dispose une composition granulaire totale (ciment compris), dont la courbe soit aussi proche que possible de la courbe de référence théorique.

La formule de base est la suivante :

$$P = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (\text{I.5})$$

D'ou :

- P : est le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d,
- D : est le diamètre du plus gros grain,
- A : varie de 8 à 16, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort.

Cette méthode aboutit théoriquement tout au moins à une granularité continue.

3.5. Méthode de Caquot (1937) : [6]

En 1937, [Caquot, 1937] généralisée par sa recherche de compacité maximale a un nombre infini de classes granulaires à partir de la courbe de l'indice des vides d'un mélange de deux granulats différents ; il définit expérimentalement une relation en prenant comme principe que le volume des vides dépend essentiellement des diamètres d et D il obtient donc une granulométrie optimale infinie. Mais en réalité, les dimensions des grains sont bornées ce qui entraîne une correction sur la proportion des plus petits granulats. De plus, il introduit l'effet de paroi engendré par les granulats de grosses dimensions.

$$V = v_0^5 \frac{\sqrt{d}}{D} \quad (\text{I. 6})$$

3.6. Méthode de Faury (1944): [7]

En 1944 [Faury, 1944] proposa, suite à une étude générale du béton, une nouvelle loi de granulation du type "continu ". Il s'inspire des travaux de **Caquot** relatifs à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen.

La loi de granulation qui en découle est une loi fonction de $\sqrt[5]{d}$ (la racine 5ème de diamètre minimale) ; c'est pourquoi Faury adopta une échelle des abscisses graduées en $\sqrt[5]{d}$. Les courbes granulométriques idéales conduisant à la compacité maximale est alors théoriquement une droite, cependant Faury a distingué les grains fins et moyens ($<D/2$) des gros grains ($>D/2$) et la pente de la droite n'est pas la même pour chacune de ces 02 catégories.

On trace donc pour l'ensemble du mélange, ciment compris une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites si l'on pose sur un graphique gradué, en abscisse en $\sqrt[5]{d}$. L'abscisse du point de rencontre de ces 02 droites est fixée à $D/2$ est son ordonnée Y est donnée par la formule suivante :

$$Y = A + 17.5\sqrt{D} + \frac{B}{\left(\frac{R}{D}\right)^{-0.75}} \quad (\text{I. 7})$$

Donc cette méthode est basée sur :

- Nature de l'ouvrage
- Consistance désirée
- Dosage des granulats

Dans le but de déterminer la quantité de chaque composant de béton.

3.7. Méthode de Joisel (1952) : [8]

S'inspirant comme Faury de la théorie de Caquot mais en la généralisant, Joisel propose de considérer que la loi de granulation conduisant à la compacité maximale, est fonction de $\sqrt[m]{d}$, m dépend de la compacité avec laquelle se serre un granulat de dimension uniforme selon les moyens de serrage ; m peut alors varier de 3 à 10.

Joisel prend comme échelle en abscisse, la $\sqrt[m]{d}$ au lieu de $\sqrt[5]{d}$ (Faury) ou m variant avec le serrage des matériaux.

Comme dans la méthode de Faury, on aboutit donc en principe à une granularité continue sauf, bien entendu, si les granulats dont on dispose en pratique présentent une discontinuité. Toutefois, pour éviter la cassure de la droite de référence au point d'abscisse $D/2$, Joisel a déterminé l'échelle de l'intervalle $\frac{D}{2} / D$ de façon à n'avoir qu'une simple et unique droite, c'est l'avantage de cette méthode. En revanche, il faut employer un graphique dont l'échelle des abscisses est variable d'une échelle à l'autre, d'un type de granulat à un autre. C'est ensuite par une méthode graphique dont nous nous inspirons que se déterminent les pourcentages des divers granulats.

3.8. Méthode de Baron et Lesage (1976) : [9]

En 1976, [Baron et Lesage, 1976] proposent une technique d'optimisation du squelette granulaire selon le principe liant un temps d'écoulement minimum déterminé au maniabilimètre LCL (selon [Norme 18-452]) avec une quantité optimale de granulat pour des proportions de ciment et d'eau fixée.

Cette méthode n'est pas en soi une méthode de formulation, mais plus une technique pour optimiser le squelette granulaire d'un béton. L'essai utilisé pour caractériser la maniabilité est le maniabilimètre LCL (ou essai d'écoulement). Le principe est de mesurer le temps mis par un échantillon de béton pour s'écouler sous vibration jusqu'à un certain repère. Les proportions optimales des granulats sont supposées donner le temps d'écoulement minimum, pour une quantité donnée de ciment et d'eau. Une fois les proportions granulaires

repérées, les dosages en eau et ciment sont ajustés expérimentalement, de sorte que le mélange présente la maniabilité et la résistance souhaitées. Nous supposons, dans cette méthode, que les proportions optimales de granulats ne dépendent pas de la quantité de ciment.

Enfin, nous pouvons dire que, la variation des nombreux paramètres liés à la géométrie des grains, leurs natures, leurs granulométries etc. a toujours été prise en compte par l'introduction dans les formules d'un coefficient d'une manière empirique. Toutefois, La méthode Baron-Lesage, comparée aux autres méthodes, suppose des manipulations relativement nombreuses (de quelques gâchées jusqu'à une trentaine, lorsqu'on a quatre classes de granulats). Son emploi est cependant justifié pour les chantiers importants (gros volumes de béton à mettre en place), et/ou lorsqu'on exige un béton de grande qualité. C'est le cas dans la plupart des applications de béton à hautes performances

3.9. Méthode de Dreux –Gorisse (1995) : [10]

En 1970, [Dreux et Gorisse, 1995] mettent en œuvre une méthode basée sur l'optimum granulaire encore couramment utilisée pour des bétons ordinaires. C'est une approche empirique basée sur une courbe granulaire de référence (2 segments de droite dans un diagramme semi logarithmique).

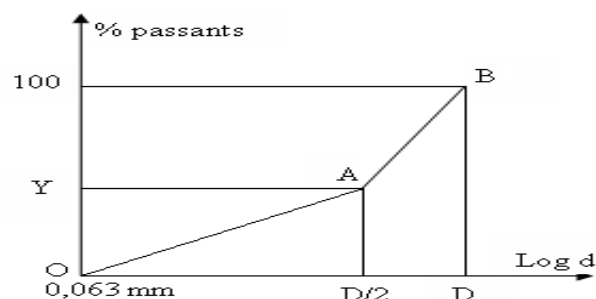


Figure (I.2): Courbe optimale type selon la méthode de Dreux-Gorisse.

Les deux segments [OA] et [AB] appelés le tracé de la "courbe granulométrique de référence" et les trois points sont déterminés comme suit :

O : est l'origine de la courbe avec ses coordonnées (0 ; 0).

En abscisse : $A = D/2$ si $D \leq 20$ mm ; et au milieu de l'intervalle [5;D] si $D > 20$ mm

En ordonné : $B = 50 - \sqrt{D} + K$.

Contrairement à Faury, le ciment ne fait pas partie de la courbe de référence du mélange, sa quantité massique C étant déterminée séparément.

Il s'agit d'une méthode complète dans le sens où elle prend en compte un grand nombre de paramètres (équation I.8) : la géométrie de la pièce à couler, le type et le dosage du ciment, la finesse, la forme, la qualité et les dimensions de granulats, la consistance et la résistance du béton, etc.

$$f_c = G \times \sigma_{c28} \times \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad (\text{I.8})$$

3.10. Méthode de Baron et Ollivier (1996) : [11]

Cette méthode est dérivée de celle de **Dreux-Gorisse** avec des modifications pour une adaptation aux bétons actuels. Elle permet d'englober un grand nombre de paramètres déjà cités avec, en plus, la prise en compte du volume d'air, l'adjuvantation et l'incorporation d'additions minérales.

3.11. Méthode de plans d'expériences : [12]

Les plans d'expériences sont un instrument bien adapté à la recherche développement chaque fois qu'intervient un grand nombre de paramètres (Aïtcin 1994, Louvet 1996). Bien utilisés, ils permettent de réduire fortement le nombre d'essais, de gagner du temps et de l'argent, tout en parvenant à un résultat encore mieux assuré. Leur application au béton s'impose chaque fois que l'on veut concilier au mieux de nombreuses exigences différentes. Trois éléments sont indispensables pour réussir cette démarche :

D'abord, la planification des essais et la qualité de l'expérience, ensuite, la maîtrise d'outils mathématiques tels que la régression linéaire multiple et enfin, l'apport des statistiques pour la validation globale des modèles et la détermination des effets significatifs.

3.12. Méthode de (Sedran, 1999 ; de Larrard 2000) : [13]

Des méthodes de formulation novatrices utilisant des modèles numériques émergent : René LCPC, BétonLab et BétonLab Pro2, etc.

Les premières théories traitant d'une compacité maximale des mélanges granulaires [FER, 1892, CAQ, 1937] ne prennent pas en compte explicitement les interactions des grains entre eux et de leurs tailles. De Larrard (2000) au travers du Modèle d'Empilement Compressible (MEC) fait intervenir des notions nouvelles comme le serrage, l'effet de paroi et l'effet de desserrement.

Historiquement, le MEC est le résultat de plusieurs années de recherche au LCPC. Il s'agit de l'évolution du Modèle de Suspension Solide (MSS) lui-même dérivé du Modèle

Linéaire de Compacité (MLC). Le MLC [STOVAL, 1986] décrit des surfaces d'iso compacité; mais, l'existence de limites de performance dans les zones de mélange optimum, apparaissent lors de la validation expérimentale. Le MSS [de LAR, 1994a & b] est un modèle lié à la notion de viscosité d'un mélange sec et il n'est pas validé par des séries expérimentales de vérification. Finalement, le MEC est développé avec les équations revues du MSS. La notion d'indice de serrage remplace celle de viscosité. La dépendance entre la compacité et l'énergie de serrage fournie au système est introduite.

Le logiciel BétonLab Pro2 est basé sur le MEC. Son intérêt réside dans sa configuration entrée/sortie. En effet, les paramètres d'entrée sont des caractéristiques qualifiant les constituants de base (ciments, granulats, adjuvants...) qui peuvent être soit mesurées en laboratoire, soit obtenues auprès des fournisseurs ou dans la littérature. Par ailleurs, le logiciel se des modèles analytiques relativement sophistiqués sur une interface de type tableur pour présenter les résultats. En aval, les valeurs de sortie sont associées à certaines caractéristiques du béton.

I.4. Etude de la formulation de béton à base de matériaux locaux : [14]

L'objectif de toutes les méthodes de formulation de béton est de déterminer la combinaison des matériaux à utiliser pour produire le béton qui aura les propriétés désirées et qui sera le plus économique possible.

En règle générale, une méthode de formulation permet aussi de calculer un mélange de départ que l'on pourra plus ou moins modifier pour obtenir les propriétés désirées partir de quelques gâchées d'essai.

On va présenter des résultats d'un béton selon la méthode de Dreux-Gorisse ainsi une synthèse des dosages de chaque béton a étudié :

Cette étude consiste a préparé septé béton à partir de trois régions de sable de dune : un béton à partir de sable concassé et un béton témoin à partir de sable normalisé :

Tableau I.3: Dosage des composants du béton témoin avec sable normalisé.

Constituant	Description	Origine	Dosage (Kg) en 1m ³
Ciment	CEM I -42,5	LAFARG	350
Eau	Gâchage	Adrar	199.48
Adjuvant	Superplastifiant	Sika	3.50
Sable 1	Normalisé	France	624.83
Sable 2	-	-	-
Gravier 1	3\8	Reggane	164.53
Gravier 2	8\15	Reggane	394.40
Gravier 3	15\25	Reggane	457.33

Tableau I.4: Dosage des composants du béton avec SD de Métarfa.

Constituant	Description	Origine	Dosage en 1m ³
Ciment	CEM I -42,5	LAFARG	350
Eau	Gâchage	Adrar	199.48
Adjuvant	Superplastifiant	Sika	350
Sable 1	Dune	Métarfa	624.3
Sable 2	-	-	-
Gravier 1	3\8	Reggane	237.65
Gravier 2	8\15	Reggane	375.61
Gravier 3	15\25	Reggane	668.47

Tableau I.5: Dosage des composants du béton avec SD de Ksar Kadour

Constituant	Description	Origine	Dosage en 1m ³
Ciment	CEM I -42,5	LAFARG	350
Eau	Gâchage	Adrar	199.48
Adjuvant	Superplastifiant	Sika	3.50
Sable 1	Dune	Ksar Kadour	624.83
Sable 2	-	-	-
Gravier 1	3\8	Reggane	164.53
Gravier 2	8\15	Reggane	375.61
Gravier 3	15\25	Reggane	686.53

Tableau I.6: Dosage des composants du béton avec SD de Nefiss.

Constituant	Description	Origine	Dosage en 1m ³
Ciment	CEM I -42,5	LAFARG	350
Eau	Gâchage	Adrar	199.48
Adjuvant	Superplastifiant	Sika	3.50
Sable 1	Dune	Reggane	535.57
Sable 2	-	-	-
Gravier 1	3\8	Reggane	255.93
Gravier 2	8\15	Reggane	300.49
Gravier 3	15\25	Reggane	751.23

Tableau I.7: Dosage des composants du béton avec SD de Métarfa et SC.

Constituant	Description	Origine	Dosage en 1m ³
Ciment	CEM I -42,5	LAFARG	350
Eau	Gâchage	Adrar	199.48
Adjuvant	Superplastifiant	Sika	3.50
Sable 1	Dune	Métaefa	167.74
Sable 2	Concassé	Reggane	575.56
Gravier 1	3\8	Reggane	91.40
Gravier 2	8\15	Reggane	375.61
Gravier 3	15\25	Reggane	632.33

Tableau I.8: Dosage des composants du béton avec SD de Ksar Kadour et SC.

Constituant	Description	Origine	Dosage en 1m ³
Ciment	CEM I -42,5	LAFARG	350
Eau	Gâchage	Adrar	199.48
Adjuvant	Superplastifiant	Sika	3.50
Sable 1	Dune	Ksar Kadour	213.66
Sable 2	Concassé	Reggane	538.43
Gravier 1	3\8	Reggane	109.69
Gravier 2	8\15	Reggane	375.61
Gravier 3	15\25	Reggane	614.28

Tableau I.9: Dosage des composants du béton avec SD de Nefisset SC.

Constituant	Description	Origine	Dosage en 1m ³
Ciment	CEM I -42,5	LAFARG	350
Eau	Gâchage	Adrar	199.48
Adjuvant	Superplastifiant	Sika	3.50
Sable 1	Dune	Nefiss	178.52
Sable 2	Concassé	Reggane	557.00
Gravier 1	3\8	Reggane	91.40
Gravier 2	8\15	Reggane	375.61
Gravier 3	15\25	Reggane	657.33

Tableau I.10: Dosage des composants du béton avec SC.

Constituant	Description	Origine	Dosage en 1m ³
Ciment	CEM I -42,5	LAFARG	350
Eau	Gâchage	Adrar	199.48
Adjuvant	Superplastifiant	Sika	3.50
Sable 1	Dune	-	-
Sable 2	Concassé	Reggane	816.93
Gravier 1	3\8	Reggane	109.69
Gravier 2	8\15	Reggane	356.83
Gravier 3	15\25	Reggane	582.20

I.5. Compacité : paramètres pertinents.

5.1 Définition : [15]

Le volume occupé 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.

1- 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 :

$$C = \frac{V_s}{V_t} \quad (\text{I. 9})$$

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 $C = 0,62$ [BAUCHY, 2007].

2- La porosité est le rapport entre le volume des vides et le volume total qui contient les grains.

Elle est donc définie par :

$$P = \frac{V_v}{V_t} \quad (\text{I. 10})$$

La figure I.3 montre respectivement la proportion du volume solide/volume total (compacité), la proportion du volume des vides/volume total (porosité) ainsi que la relation entre ces deux propriétés.

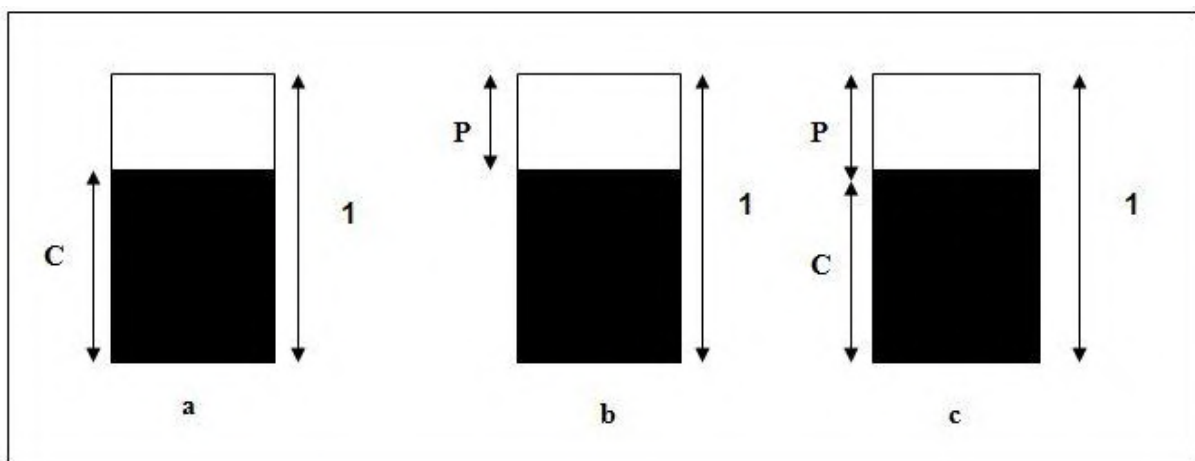


Figure I.3. Notions de compacité et de porosité [de Larrard, 2004].

Lorsque le volume d'une certaine quantité d'un matériau granulaire augmente, c'est principalement la porosité qui augmente. Le volume propre de chaque grain peut également changer sous l'action des forces qui agissent sur un matériau granulaire, mais, ces variations sont souvent très faibles devant les variations du volume des pores.

5.2 Méthodes de mesure de la compacité :

5.2.1 Méthode de versement simple : [Norme NF EN 1097-3 Août 1998]

Cette méthode, décrite dans la norme [NF EN 1097-3], 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 la masse volumique réelle de l'échantillon alors, la compacité C_{exp} s'écrit :

$$C_{exp} = \frac{M - M_0}{\rho \cdot V} \quad (I. 11)$$

Dans cette méthode, le cylindre est d'une hauteur de 200 mm et d'un volume égal à 3,98 l 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.

5.2.2 Méthode de piquage : [16]

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. [Kanta et Krishnamoorthy, 1993]

5.2.3 Méthode de vibration avec compression : [17]

Dans cette méthode, la masse de l'échantillon M_s prise pour les graviers est de 7.5 kg et pour les sables 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 M_s 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) [El Barrak, 2005]. 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 suivante, [de Larrard, 2000] :

$$C_{exp} = \frac{M_s}{\rho} \cdot V \quad (\text{I. 12})$$

Avec :

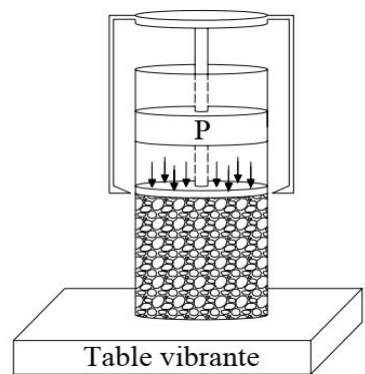


Figure I.4. Dispositif de mesure de la compacité [El Barrak, 2005].

5.2.4 Méthode de compacité des fractions granulaires à la table à secousses : [18]

C'est un nouveau mode opératoire apparu en juillet 2004 développé par François de Larrard et son équipe dans le but de mesurer la compacité des fractions granulaires. La seule différence entre cet essai et l'essai précédent, est le mode de vibration qui est modifié par des secousses sans alimentation électrique.

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 cotés par l'intermédiaire d'une charnière et, d'autre part, un arbre à came entraîné en rotation par une manivelle. La came est en acier dur. Sa forme permet une chute libre de la table sur une hauteur de $1 \pm 0,05$ cm. Du côté 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 (fig. I.5). 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.

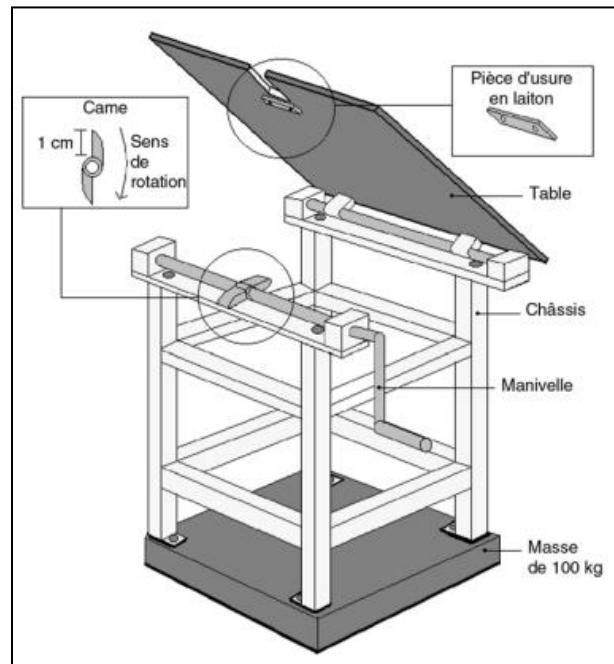


Figure I.5. Schéma de la table à secousses [Méthode d'essai des lpc n°61, 2004].

5.3 Facteurs influant sur l'empilement granulaire :

5.3.1 Effet de la forme des grains : [13]

Si on a des mélanges de grains de taille similaire alors, la compacité dépend de la forme et de la rugosité de ces grains. La figure I.6 montre que pour les grains roulés, l'indice de serrage est compris entre 0,6 et 0,64 ; en revanche, il est plus faible pour les grains concassés et varie entre 0,53 et 0,58.

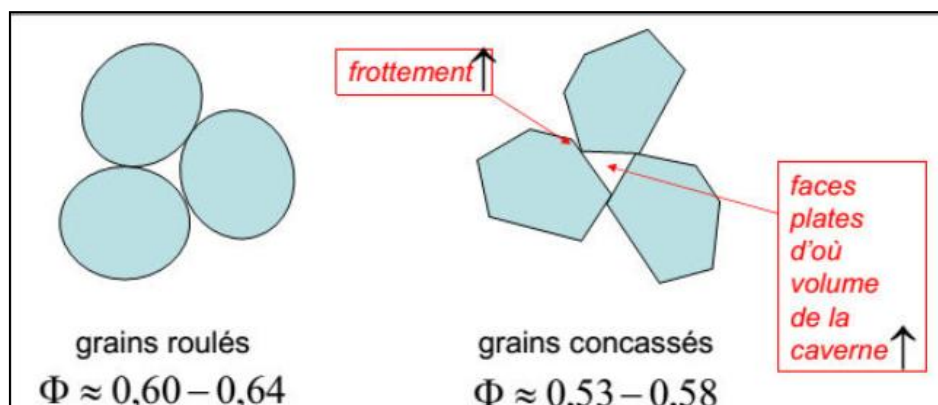


Figure I.6: Valeur des compacités pour des grains roulés et concassés [F DE LARRARD, 2000]

De Larrard [de Larrard ; 2000] montre sur la figure I.7, qu'à taille égale, les grains arrondis sont plus compacts que les grains concassés. En outre, il ne semble pas qu'une loi générale gouverne les relations entre la taille et la compacité des granulats.

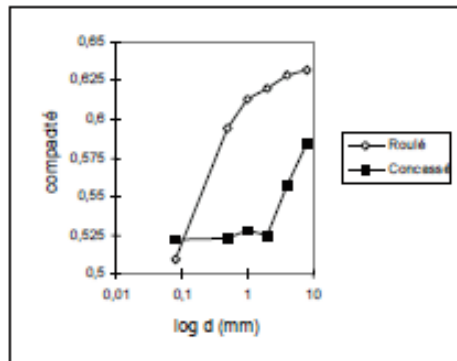


Figure I.7: Compacités expérimentales des classes élémentaires en fonction de la taille des grains [de Larrard ; 2000].

5.3.2 Effet du mode de mis en place – Indice de serrage : [13]

La compacité dépend directement du mode de mise en place c'est-à-dire de la façon dont est réalisé l'empilement. La figure I.8 montre que pour un simple versement, l'indice de serrage est égal à 0,56, s'il s'agit d'une vibration il vaut 0,58, pour un piquage il est de 0,57 et enfin pour une vibration et une compression simultanément il est de 0,63.

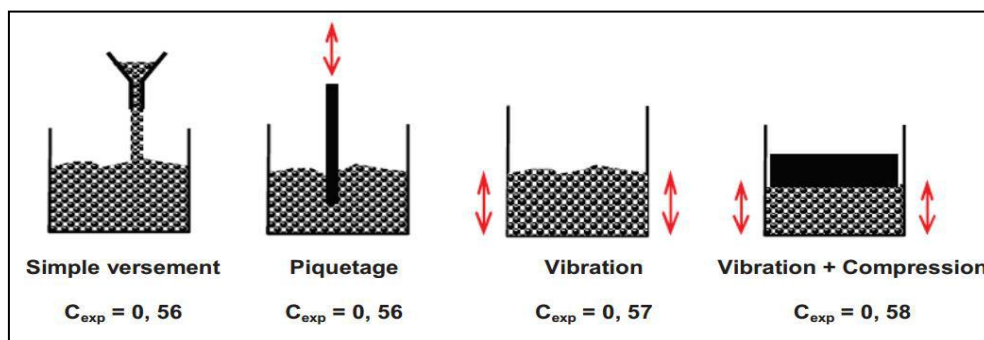


Figure I.8: Indices de serrages pour les différents modes de mise en place des grains [de Larrard ; 2004]

5.3.3 Effet de taille des grains : [13]

La figure I.7 montre aussi que pour les deux familles, les compacités augmentent avec la grosseur des grains. Ce comportement peut s'expliquer par des différences de forme selon la taille. Mais ; c'est surtout la vibration qui est en cause car, malgré nos efforts, elle a été probablement plus efficace pour les gros grains que pour les petits grains. En effet, ces

derniers présentent un plus grand nombre de points de contacts dans le volume unité, ce qui pénalise l'efficacité de la vibration

5.4 Modèles de prévision de la compacité des milieux granulaires :

5.4.1 Le modèle linéaire de compacité (MLC): [19]

La prévision de la compacité maximale des mélanges granulaires a occupé plusieurs générations de chercheurs et devant la complexité de ce problème un modèle théorique fondé sur une approche essentiellement géométrique a été développé au laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) appelé « modèle linéaire de compacité », dont l'objectif est de prévoir la compacité d'un mélange de grains sec d'étendu fini à partir des données suivantes [Stovall et col. 1986] :

- La granularité du mélange et les compacités propres des tranches monodimensionnelles.
- Les fonctions d'interactions entre grains (effets de paroi et d'interférence).

5.4.2 Mélanges binaires sans interactions : [20] [21]

Dans un empilement de grains 1 et 2 de diamètres d_1 et d_2 , les deux classes de grains sont dites sans interaction si $d_1 \gg d_2$, c-à-d que l'arrangement local d'un ensemble des grains n'est pas perturbé par la présence des grains de l'autre taille (Stovall et col, 1986).

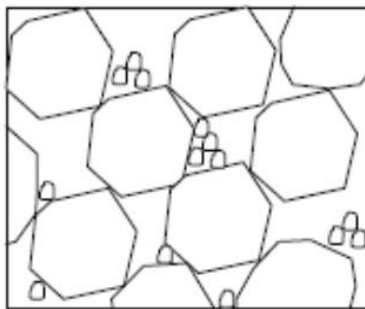


Figure 1.9: Mélange binaire sans interaction gros grains dominants (Sedran, 1999).

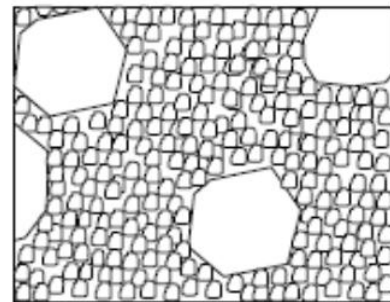


Figure 1.10: Mélange binaire sans interaction grains fins dominants (Sedran, 1999).

Le cas général est donné par :

$$C_{MLC} = \inf (C_{MLC} i); 0 \leq i \leq 1$$

Avec:

$$C_{MLC} = \inf (C_{MLC} 1 ; C_{MLC} 2) \quad (\text{I. 13})$$

5.4.3 Modèle d'empilement virtuel : [22] [23]

Le modèle d'empilement virtuel est une version raffinée du modèle de compacité linéaire. Il est développé au LCPC par F. DE LARRARD (1988). La différence entre ce modèle et le modèle linéaire est la prise en compte dans les calculs, le cas d'un mélange de grain de même taille mais de compacités propres différentes (Fig. I.11), il est utilisé pour prédire les compacités virtuelles.

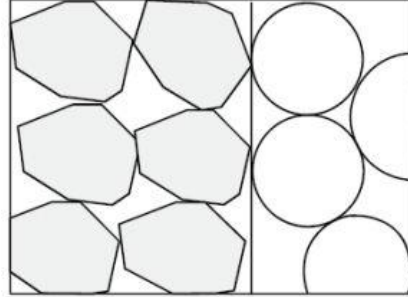


Figure I.11: Deux classes ont le même diamètre [T. SEDRAN 2000]

Finalement, pour le cas d'un mélange de n classes, l'expression de la compacité virtuelle d'un empilement s'écrit comme suit :

$$\gamma = \min(\gamma_i) \quad \text{avec } 1 \leq i \leq n \quad (\text{I. 14})$$

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} y_j \left(1 - a_{ij} \frac{\beta_i}{\beta_j}\right) - \sum_{j=i+1}^n y_j \left(1 - \beta_j + b_{ij} \beta_i \left(1 - \frac{1}{\beta_j}\right)\right)} \quad (\text{I. 15})$$

Avec :

- γ_i : compacité virtuelle du mélange pour la classe « i » dominante.
- n : nombre de classes granulaires.
- β_i : compacité propre virtuel de la « i ».
- y_i : proportions volumiques (par rapport au volume solide total).
- a_{ij} : effet de desserrement.
- b_{ij} : effet de paroi.

Ce modèle doit donc être complété par la détermination des fonction $a_{i,j}$ et $b_{i,j}$.

5.4.4 Modèle de suspension solide (MSS) : [24] [25]

Le Modèle de Suspension Solide est une première tentative de prédiction de compacités réelles (expérimentales) [Sedran et col, 1994]. Il est dérivé des travaux de Mooney, sur la viscosité de suspensions concentrées de particules solides [Mooney, 1951].

Ce modèle s'appuie sur l'hypothèse que la viscosité relative de référence (η_r^*) d'un arrangement de grains consolidé est une valeur finie.

La viscosité de référence est définie comme étant l'indice de l'énergie requise pour bien consolider le béton. Plus la technique de mise en place est énergétique, plus la viscosité de référence du béton est grande. Pour un arrangement uni modal de grains de diamètre d_i , la viscosité de référence peut être calculée par l'équation suivante :

$$\eta_r^* = \exp\left(\frac{2,5}{\frac{1}{\alpha_i} - \frac{1}{\beta_i}}\right) \quad (\text{I. 16})$$

Avec :

- β_i : représente la compacité virtuelle d'une classe de grains (i).
- α_i : compacité propre de la classe « i ».

Pour des sphères, en prenant $\alpha_i=0.64$ et $\beta_i=0.74$, on trouve $\eta_r^*=1,36 \cdot 10^5$.

La compacité d'un empilement multimodal est alors donnée par l'équation implicite suivante :

$$\eta_r^* = \exp\left(\sum_{i=1}^n \frac{2,5 y_i}{\frac{1}{C_{MMS}} - \frac{1}{\gamma_i}}\right) \quad (\text{I. 17})$$

Ou, γ_i est la compacité virtuelle du mélange atteinte lorsque la classe i, de compacité propre virtuelle β_i , est dominante et C_{MMS} est la compacité réelle de l'empilement.

5.4.5 Le modèle d'empilement compressible (MEC) : [13]

Le modèle d'empilement compressible (MEC), est la troisième génération des modèles développés au LCPC. Grâce à ce modèle, la compacité réelle d'un mélange (noté CMEC) à plusieurs classes est prédite à partir de la connaissance des compacités de chaque classe unidimensionnelle, de la distribution granulaire du système et de l'énergie de la mise en place. Il s'appuie sur les notions de compacité virtuelle (γ) et d'indice de serrage (K).

La compacité virtuelle (γ) est inaccessible à l'expérience. Donc, la formule (I.17) ne peut pas être utilisée directement pour la prédiction de la compacité réelle du mélange granulaire. Il est nécessaire de compléter cette formule. A partir de la formule théorique de compacité virtuelle, on constate que la compacité virtuelle ne dépend que de la caractéristique propre du matériau dans le mélange.

En réalité, la compacité dépend non seulement du matériau mais également du mode de mise en place. Pour décrire la corrélation entre la compacité et le protocole de compaction, e Larrard a introduit un paramètre appelé : indice de serrage « K » et développé un nouveau modèle appelé « modèle d'empilement compressible ».

Ce modèle permet de déterminer la compacité réelle d'un mélange connaissant sa compacité virtuelle et l'indice associé au protocole de compaction. L'expression du modèle est présentée par l'équation suivante :

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i/\beta_i}{C_{MEC} - \gamma_i} \quad (\text{I.18})$$

Avec :

- C_{MEC} : compacité réelle du mélange.
- K : indice de serrage pour le mélange.
- γ_i : compacité virtuelle lorsque la classe i est dominante.
- n : nombre de classes dans le mélange.
- β_i : compacité virtuel de classe i.

5.5 Modèle d'analyse fractale : [25]

Selon les travaux de BENARBA. M et BOUREGBA. A, le modèle consiste à faire une comparaison entre la compacité et le pourcentage (Ciment/Fines) et de déduire la relation entre les deux afin d'avoir le mélange qui présente la compacité optimale.

Ils ont travaillé sur deux cas, mélange avec du sable 0/3 et l'autre avec du sable 0/5, les résultats peuvent être résumés dans les tableaux et les graphes suivants :

Tableau I.11: Résultats des compacités expérimentales des mélanges granulaires secs (0/3)

Appellation	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11
% S (0/3)	85	80	80	75	65	65	60	60	55	50	45
% C	10	15	10	10	15	25	15	20	25	25	30
% F	5	5	10	15	20	10	25	20	20	25	25
% (C+F)	15	20	20	25	35	35	40	40	45	50	55
Compacité	0,78	0,79	0,8	0,78	0,75	0,75	0,73	0,72	0,71	0,69	0,67

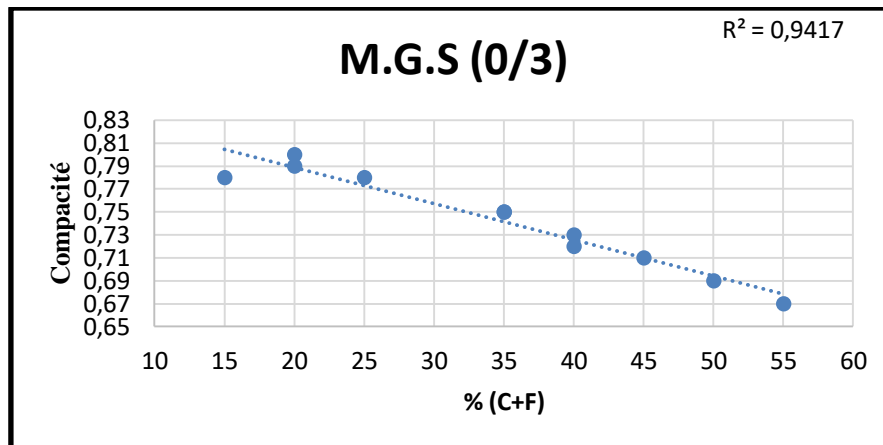


Figure I.12: L'évolution de la compacité en fonction du dosage en fins particulières MGC (0/3)

Tableau I.12 : Résultats des compacités expérimentales des mélanges granulaires secs (0/5)

Appellation	M1	M2	M31	M32	M33	M34	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
% S (0/3)	45	40	30	40	50	65	40	35	35	30	30	30	25	25
% S(3/5)	40	40	50	40	30	15	35	30	30	30	30	25	25	20
% C	10	15	10	10	10	10	15	20	10	25	20	20	25	25
% F	5	5	10	10	10	10	15	20	10	25	20	20	25	25
% (C+F)	15	20	20	20	20	20	30	40	20	50	40	40	50	50
Compacité	0,81	0,82	0,81	0,82	0,82	0,8	0,81	0,77	0,76	0,76	0,74	0,73	0,72	0,69

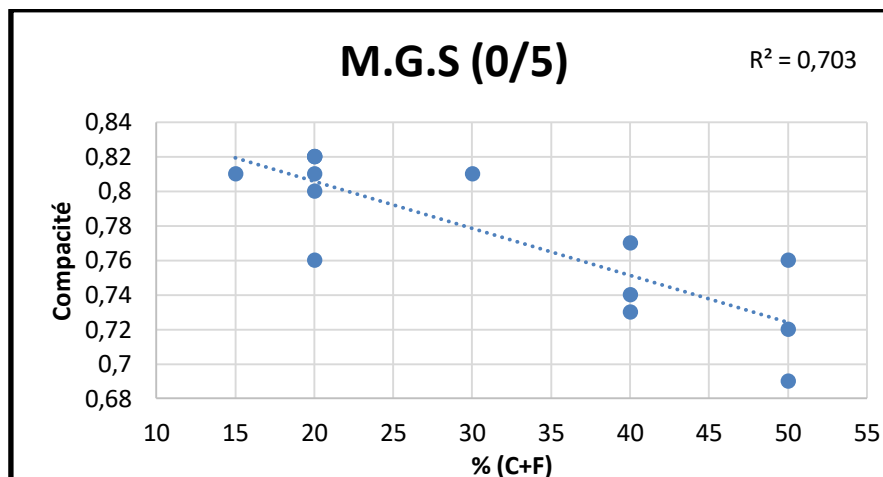


Figure I.13: L'évolution de la compacité en fonction du dosage en fins particulières MGC (0/5)

I.6. Calcul de la compacité virtuelle par Bétonlabfree 3 : [26]

BétonlabPro est un logiciel d'aide à la formulation des bétons, développé par François de Larrard et Thierry Sedran disponible depuis 1999. Il permet de mettre en œuvre une méthode scientifique de composition, fondée sur une vingtaine d'années de recherche des auteurs et de leurs collaborateurs au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

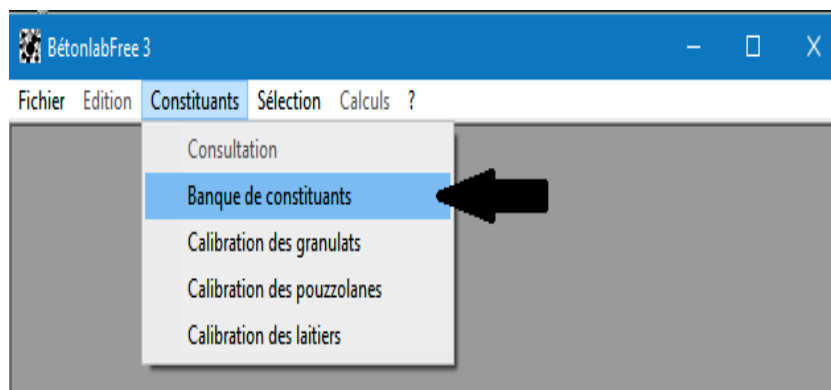
Bétonlabfree 3 est une version allégée de BétonlabPro 3 (3^{ème} version cde BétonlabPro), diffusée librement en 2008. Il est alimenté par les mêmes données de constituants que celles du logiciel original. A partir de ces données, il peut simuler toute composition proposée par l'utilisateur. La liste des propriétés des bétons simulées est réduite à celles qui sont le plus souvent utilisées, pour les formulations de bétons courants. En utilisant le logiciel comme un laboratoire automatique, l'utilisateur pourra simuler rapidement une grande quantité de formules, et pourra converger ainsi vers une composition acceptable, correspondant à son cahier des charges. Ce faisant, il acquerra une expérience « numérique », et deviendra plus familier du comportement du système béton. Ainsi, Bétonlabfree peut également s'avérer utile comme outil pédagogique.

6.1 Fonctionnement du logiciel:

Lors de l'installation du logiciel, la fenêtre «Constituants » puis banque de constituants contient un dossier appelé « matériaux génériques.cst » avec quelques constituants et pour préciser le fonctionnement de ce dernier, nous avons ajouté un nouveau constituant nommé (Koussane 0/3).

Étape 1 :

- On clic sur "Menu constituants"
- Puis sur "Banque de constituants"
- Cliquer sur " Matériaux génériques"
- Cliquer sur "Nouveau"



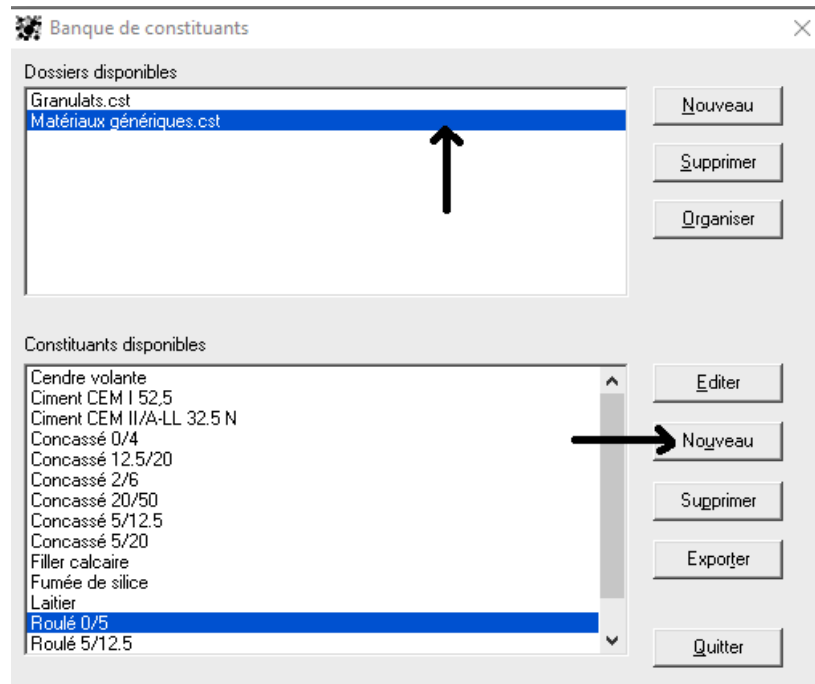


Figure I.14 : Les étapes d'introduction des matériaux dans Bétonlabfree 3 ; étape1.

Étape 2 :

- Puis sur la fenêtre affichée on choisit le type de constituant
- On précise le D_{\min} et D_{\max}
- Et puis cliquer sur OK.

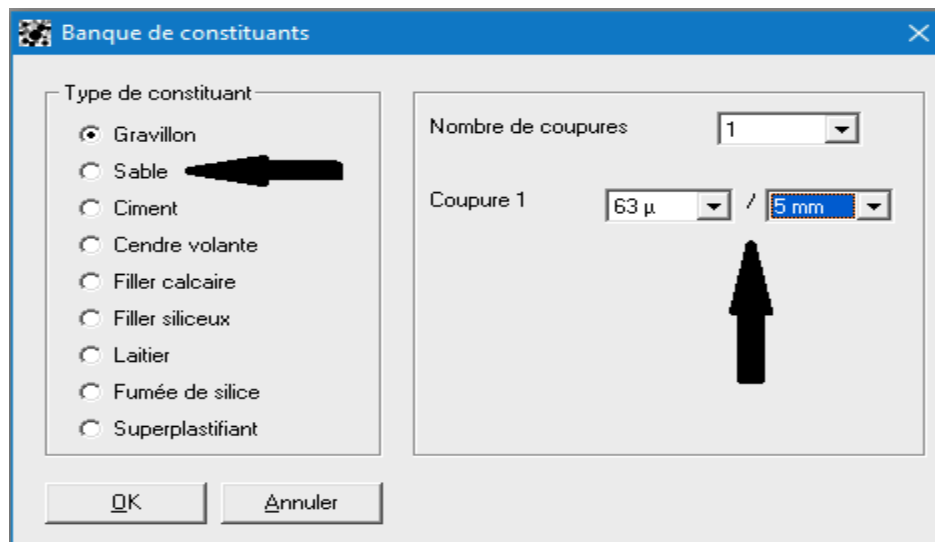


Figure I.15 : Les étapes d'introduction des matériaux dans Bétonlabfree 3 ; étape2.

Étape 3 :

- Entrer le nouveau nom du constituant
- Cliquer sur " enregistrer"

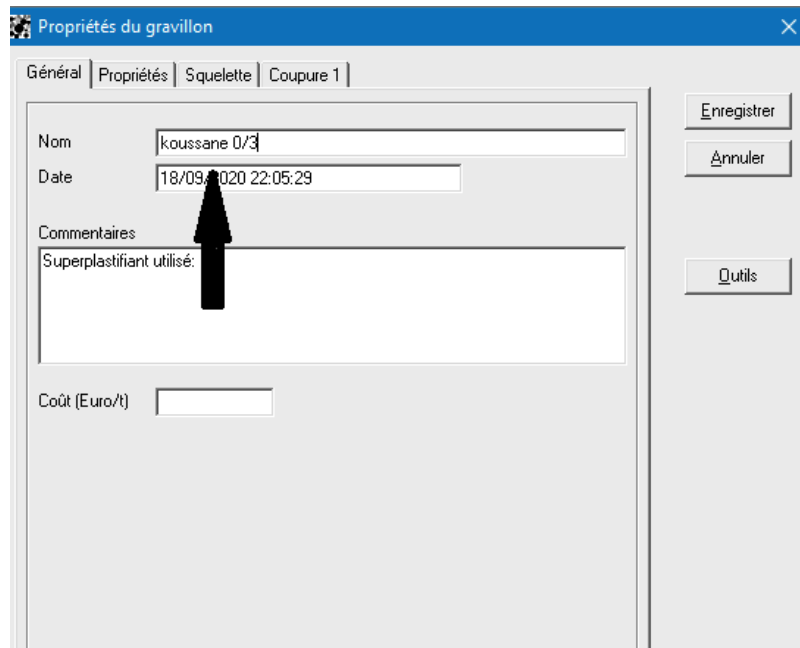


Figure I.16: Les étapes d'introduction des matériaux dans Bétonlabfree 3 ; étape 3.

Étape 4 :

- Sur la fenêtre " propriétés», enter les valeurs de masse volumique absolue et le coefficient d'absorption du constituant.
- Cliquer sur " enregistrer"

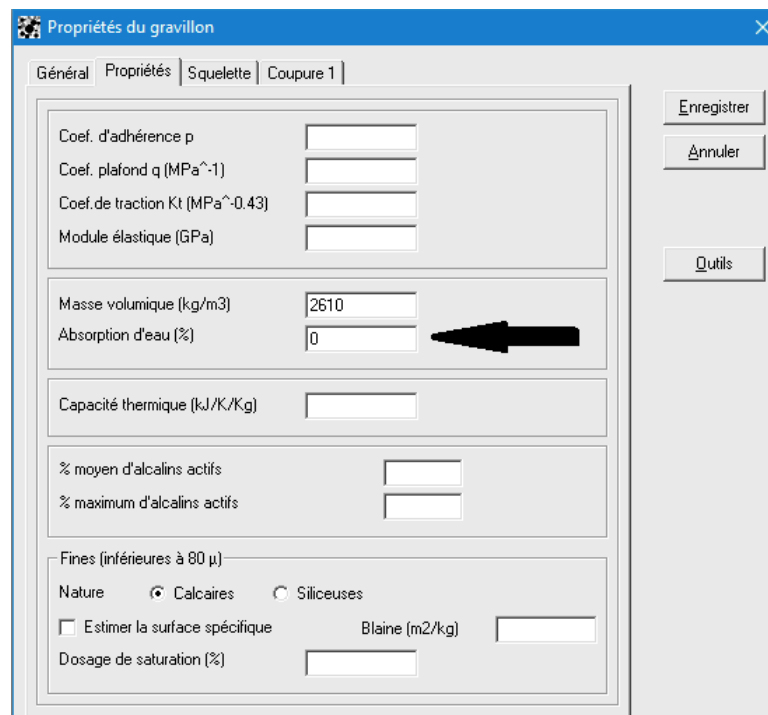


Figure I.17: Les étapes d'introduction des matériaux dans Bétonlabfree 3 ; étape 4.

Étape 5 :

- Sur la fenêtre " squelette», enter les valeurs de l'analyse granulométrique du constituant
- Cliquer sur " enregistrer"

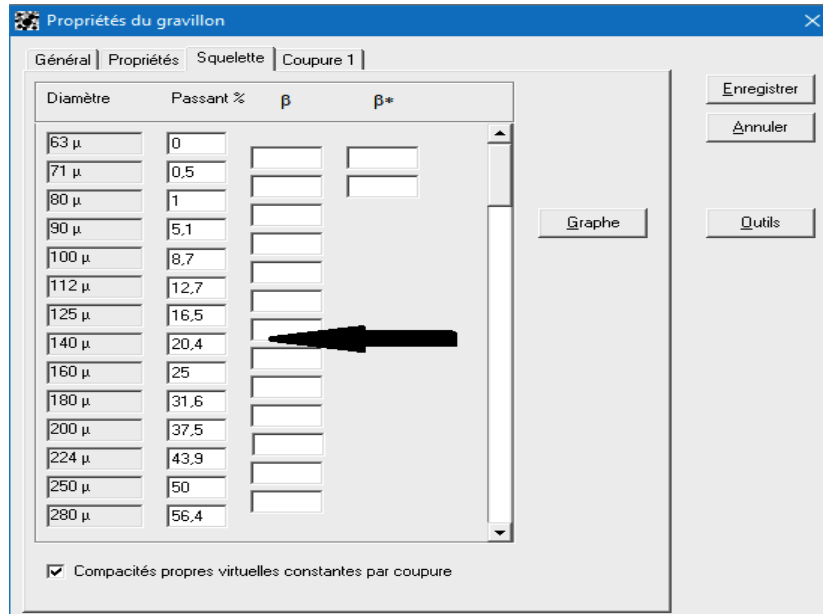


Figure I.18: Les étapes d'introduction des matériaux dans Bétonlabfree 3 ; étape 5.

Étape 6 :

- Cliquer sur " coupure 1 "
- Cliquer sur " outils "

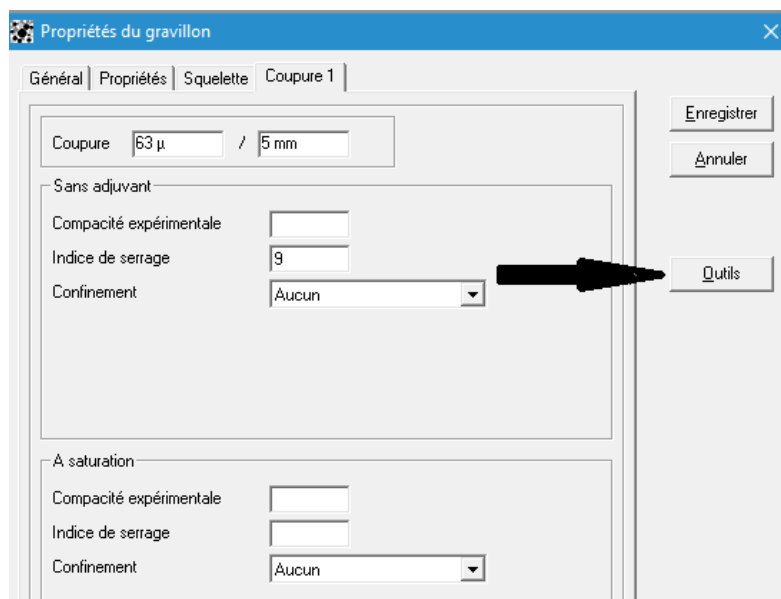


Figure I.19: Les étapes d'introduction des matériaux dans Bétonlabfree 3 ; étape 6.

Étape 7 :

- Cliquer sur " compacité 3 "
- Introduire les données
- La compacité s'affiche

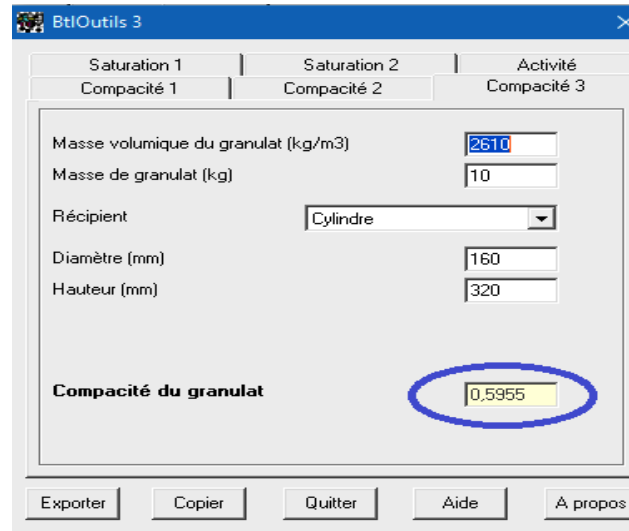


Figure I.20: Les étapes d'introduction des matériaux dans Bétonlabfree 3 ; étape 7.

I.7. Conclusion :

Pour aboutir l'objectif de ce travail, il était nécessaire d'avoir une synthèse bibliographique sur les travaux précédents, concernant la compacité des mélanges granulaires et ses paramètres pertinents et la formulation du béton. Ainsi une présentation du logiciel Bétonlab free3 que nous utilisons pour la simulation et calcule de la compacité virtuelle afin d'avoir accumulé les informations nécessaires qui servent la base de l'étude faite dans ce projet.

Les projets de la formulation de béton à base des matériaux locaux seront la base de l'étude simulatrice de la compacité des mélanges granulaires choisis.

Chapitre 02:

Caractérisation des matériaux utilisés

II.1. Introduction:

La qualité du béton est profondément liée à celle de ses composants et surtout les granulats car ils occupent presque les trois quarts de son volume, il n'est pas étonnant que la qualité de ces derniers ait une grande importance.

Pas exclusivement les granulats peuvent réduire la résistance du béton, mais, selon leurs propriétés, ils peuvent influencer la durabilité et les performances du béton.

Les granulats sont par conséquent, un constituant indispensable des bétons qui conditionne à la fois leurs caractéristiques.

Dans ce chapitre, intitulé "caractérisation des matériaux utilisés" nous allons déterminer les caractéristiques essentielles des différents constituants du béton, ces essais sont réalisés au sein de laboratoire des travaux publics au sud LTPS, antenne Adrar.

II.2. Présentation de l'origine des carrières des granulats locaux utilisées. [27]

2.1 Aperçu géographique de la région :

. La région d'Adrar est située au sud-ouest de l'Algérie. Elle est située entre le méridien 2°E et 6° W, et les parallèles : 20° et 32° Nord. Sa superficie totale est de 427.948km², soit environ 18 % de la superficie globale de l'Algérie.

Aspect géomorphologique et topographique :

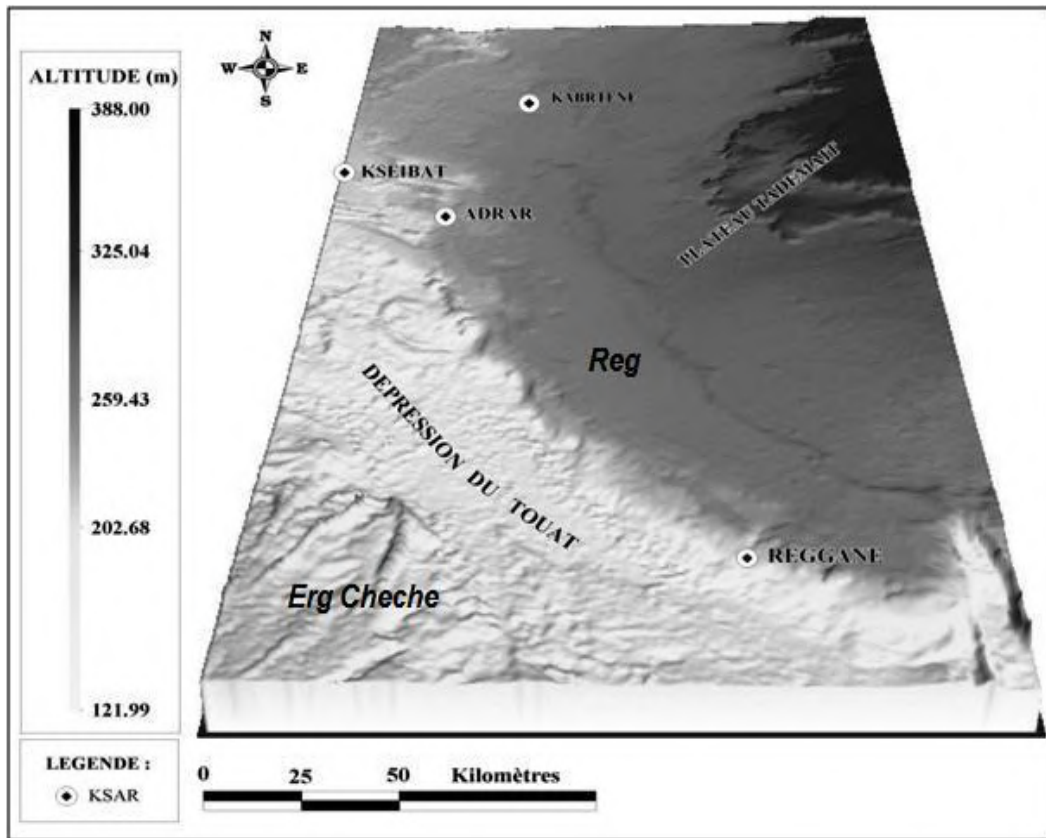


Figure II.1: Traits morphologiques en 3D de la zone d'étude (ZAGHTOU, 2011).

La région d'Adrar fait partie d'une grande zone allongée, sensiblement orientée Est-Ouest, il s'agit du grand bassin occidental et qui renferme quelques traits morphologiques où, on peut trouver :

Le Plateau : [30]

Il est d'une forme tabulaire rocheuse.

L'Erg : [30]

L'Erg est représenté par de massives dunes de sable.

Le Reg : [30]

C'est une surface plane couverte de gravier, sable et des débris de roches.

Terrasses d'apport éolien : [30]

Elles se sont formées durant le Quaternaire à l'actuel à la faveur de rupture de pente située entre les terrasses d'érosion et les sebkhas

Les Sebkhass : [30]

Ce sont des dépressions peu profondes renfermant de l'eau salée qui se tarissent pendant les fortes canicules. Les sebkhass se situent au niveau des points les plus bas de ces régions elles se localisent généralement au niveau des anciens lits d'oued et les zones basses. Elles traînent les eaux d'une partie de la nappe phréatique et celles des crues des oueds. Elles sont occupées par des dépôts gypso-salins, par exemple la Sebkhass du «Koussane».

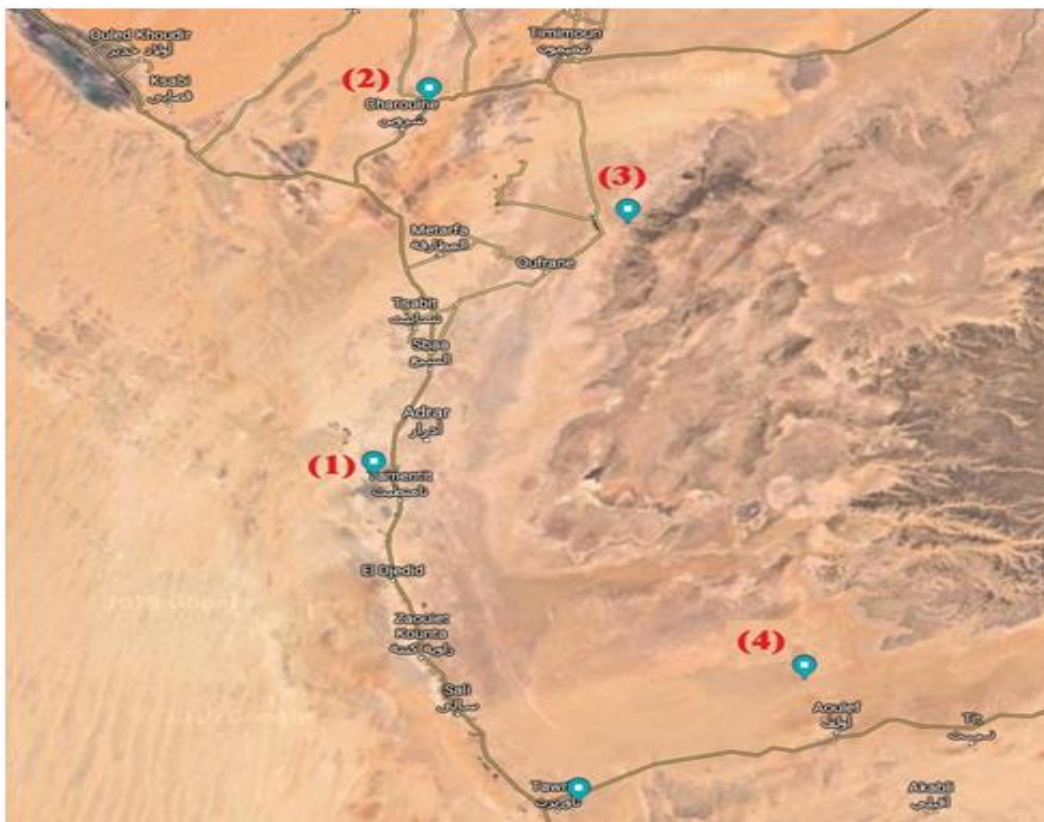
L'origine des carrières des granulats locaux utilisés :

Figure II.2: Les Concasseurs de la wilaya d'Adrar.

Pour cette étude, les granulats seront collectés à partir des quatre carrières de gravier réparties comme suite :

Koussan (1) :

Le concasseur est situé environ 10 km au sud-ouest du siège de la wilaya

Charouine (2) :

A 165km au nord du siège de la wilaya, sur la route nationale N51A

Aougrouit (3) :

A 140km au nord-est du siège de la wilaya, à travers la route nationale N51. Ils existent trois concasseurs dans cette région, deux parmi eux sont localisés à 8km de part et d'autre la route à Hassi Barouda.

Aoulef (4) :

Sur la route Aoulef-Ain Belbel-Adrar, environ 8km à Timokten (CW3).

2.3. Essais sur les granulats :

Les propriétés principales des matériaux de construction peuvent être divisées en plusieurs groupes tels que :

- Propriétés physiques : la dimension, la densité, la masse volumique de différentes conditions, la porosité, l'humidité ... etc.
- Propriétés mécaniques : la résistance en compression, en traction, en torsion ... etc.
- Propriétés chimiques : l'alcalinité, l'acidité ... etc.
- Propriétés physico-chimiques : l'absorption, la perméabilité, le retrait et le gonflement ...etc.
- Propriétés thermiques : la dilatation, la résistance et le comportement au feu ... etc.

Caractéristiques des granulats :

Comme il était mentionné dans le chapitre 01, au cadre de notre étude nous allons utilisés des granulats locaux qui sont collectés à partir des quatre carrières de gravier réparties comme suite :

- 1) Carrière de Koussane.
- 2) Carrière de Charouine.
- 3) Carrière d'Aougrouit.
- 4) Carrière d'Aoulef.

Propriétés dimensionnelles :**Granularité :**

Les échantillons ont été préparés suivant les prescriptions de la norme (EN 932-1) et les analyses granulométriques faites conformément à la norme (EN 933-2). Les courbes granulométriques des gravillons sont présentées sur la figure (II.1).

Forme des granulats : coefficient d'aplatissement :

Le tableau II.2 récapitule les coefficients de forme des différents graviers. Des spécifications exigées par la norme (NF P18-541), précisent que le coefficient d'aplatissement doit être $\leq 30\%$.

Propriétés physiques:**▪ Masses volumiques apparentes et absolues (EN 18-554)**

Nous avons déterminé les masses volumiques apparentes et absolues des graviers conformément à la norme (EN 18-554). Pour la détermination de la masse volumique absolue des graviers, nous avons utilisé la méthode du ballon graduée, qui est une méthode simple et rapide.

▪ Propreté des granulats:

Les granulats utilisés doivent être propre car la présence des impuretés peuvent perturber l'hydratation du ciment ou entraîner des défauts d'adhérence granulats-pâte, ce qui provoque une incidence sur la résistance du béton. La propreté traduit l'absence d'éléments fins indésirables dans les granulats. Elle désigne essentiellement la teneur en fines argileuses, dont la valeur doit être limitée.

• Essai de propreté des graviers :

Les graviers de carrière présentent une propreté satisfaisante puisque, selon les spécifications exigées par la norme (P 18-541), le pourcentage d'éléments inférieurs à 0.5 mm doit être inférieur à 3 % dans le cas des granulats concassés.

• Essai d'équivalent de sable :

La détermination de la caractéristique « équivalent de sable » faite sur la fraction de granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm, permet d'avoir une idée globale de la quantité et de la qualité des éléments fins contenus dans cette fraction en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments fins (argile,

impuretés...). L'équivalent de sable est le rapport multiplié par 100, de la hauteur de la partie sédimentée à la hauteur totale du flocculat et de la partie sédimentée et ceci conformément à la norme (NF P 18-597 Décembre 1990).

- **Coefficient d'absorption des granulats :**

L'absorption de l'eau par les granulats a été déterminée conformément à la norme (NF P 18-591). Les graviers doivent donner des coefficients d'absorption qui répondent aux exigences de la norme (NF P 18-591) ($\leq 5\%$). Les coefficients d'absorption des différents graviers sont récapitulés dans le tableau II.2.

Propriétés Mécaniques :

- **Essai Micro-Deval : (NF P 18-572)**

L'essai permet de déterminer la résistance à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Cette résistance est caractérisée par le coefficient Micro-Deval qui représente la proportion d'éléments fins produits pendant l'essai. Plus le coefficient n'est faible, plus la résistance à l'usure des graviers sont élevée. L'essai ainsi que le calcul du coefficient Micro-Deval ont été effectués conformément à la norme (NF P 18-572). Les graviers présentent une bonne résistance à l'usure, sachant que, en fonction des usages, la norme (NF P 18-572) exige des valeurs maximales tolérées inférieures à 35 %.

- **Essai Los Angeles : (NF P 18-573)**

La résistance à la fragmentation est déterminée par le coefficient Los Angeles. L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets métalliques normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles pendant 15 minutes. L'essai ainsi que le calcul du coefficient Los Angeles ont été effectués conformément à la norme (NF P 18-573). Cette norme exige des valeurs maximales tolérées inférieures à 40 %.

2.4. La masse volumique apparente (NF P 18-554 et NF P 18-555) :**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.

La masse volumique apparente sèche ρ_a est la masse de granulats secs (M_s) occupant un volume apparent (volume des solides : V_s + volume des vides V_v)

Matériel nécessaire :

- Un récipient cubique ou cylindrique de volume connu et dont la taille est adaptée aux granulats :

D Granulats de dimension maximale $D \sim 20$ mm : récipient de capacité 1 L

D Granulats de dimension maximale $D > 20$ mm : récipient de capacité > 1 L

- Une règle à araser métallique.
- Une main écope pour le remplissage
- Une balance de portée ≥ 5 kg, précision 1 g

Matériaux utilisés :

- Un échantillon de 15 kg de gravillons secs
- Un échantillon de 6 kg de sable sec

Remarque : Utiliser des granulats échantillonnés et séchés préalablement à l'étuve

Mode opératoire :

- Déterminer le volume du récipient = V
- Noter la masse du récipient propre et vide = M_0
- Placer le récipient dans le bac en plastique
- Verser les granulats secs, par couches successives et sans tassement : utiliser les mains comme entonnoir naturel
- Araser à l'aide de la règle métallique par un mouvement horizontal de va et vient
- Noter la masse du récipient rempli = M_1
- Vider les granulats dans un autre bac en plastique
- Renouveler l'opération au moins deux (3) fois avec un autre échantillon du même type.



Figure II.3: Versement des granulats



Figure II.4: Peser la masse du récipient rempli

Résultat :

La masse volumique apparente est donnée par :

$$\rho_d = \frac{M1 - M2}{v} \quad (\text{II} . 1)$$

Remarque : L'essai est répété au minimum 3 fois et la moyenne de ces essais donne la valeur de la masse volumique apparente.

2.5. Masse volumique absolue (masse spécifique) NF P 18-554 et NF P 18-555) :**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.

La masse spécifique est la masse de granulats secs (M_s) rapportée au volume absolu (uniquement volume de solides V_s)

La mesure du volume des solides ne tient pas compte des pores fermés contenus par les granulats.

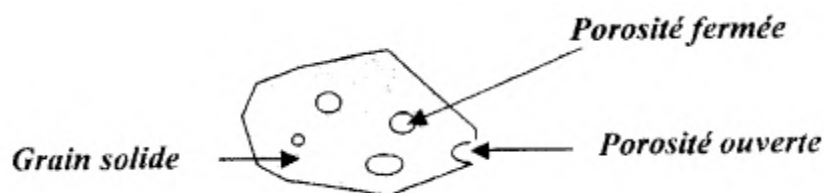


Figure II.5: Les pores dans un grain.

Matériel nécessaire :

- Des éprouvettes graduées en plastique.
- Une tige agitatrice
- Un entonnoir pour le remplissage
- Une balance de portée ≥ 5 kg, précision 1g
- Des bacs en plastique pour effectuer les essais.

Remarque : Utiliser des granulats échantillonnés et séchés préalablement à l'étuve.

Mode opératoire :**Méthode de l'éprouvette graduée**

1. Placer l'éprouvette dans le bac en plastique
2. Verser de l'eau dans l'éprouvette et noter V_1
3. Préparer un échantillon de granulats secs de masse M (environ 300 g)
4. Verser l'échantillon dans l'éprouvette à l'aide d'un entonnoir et provoquer le départ des vides (air) en remuant le mélange avec la tige agitateur
5. Noter le nouveau volume d'eau dans l'éprouvette V_2
6. Vider les granulats dans un bac en plastique et jeter son contenu
7. Renouveler l'opération au minimum 3 fois.

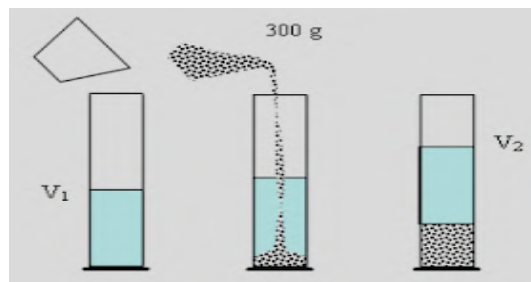


Figure II.6: Mesure de la masse volumique par la méthode des éprouvettes.

Résultat :

La masse volumique absolue est donnée par :

$$\rho_s = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (\text{II.2})$$

Remarque : L'essai est répété au minimum 3 fois et la moyenne de ces essais donne la valeur de la masse volumique absolue.

Méthode du ballon :

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

1. Déterminer avec précision la masse M_1 du ballon rempli d'eau.
2. Déterminer avec précision la masse M_2 d'un échantillon de matériau sec.
3. Introduire la totalité du matériau dans le ballon, remplir d'eau.
4. Vérifier qu'il n'y a aucune bulle d'air.
5. Peser alors avec précision le ballon, soit M_3 .

La masse volumique absolue est alors :

$$\rho_s = \frac{M_2}{(M_1 + M_2) - M_3} \quad (\text{II.3})$$



Figure II.7: La masse volumique par la méthode des éprouvettes

2.6. Analyse granulométrique d'un sable et d'un gravier (NF P 18-554 Décembre 1990) :

Principe :

L'analyse granulométrique a trois buts :

- Déterminer les dimensions des grains.
- Déterminer les proportions de grains de même dimension (% pondéral).
- Déduire le module de finesse (Mi).

Les granulats utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie civil sont des matériaux roulés ou concassés d'origine naturelle ou artificielle. De dimensions comprises entre 0 et 80 mm. Ils ne sont généralement pas constitués par des éléments de tailles égales mais par un ensemble de grains dont les tailles variées se répartissent entre deux limites : la plus petite (d) et la plus grande (D) dimension en mm.

La granulométrie ou analyse granulométrique s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granulométrie concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

Elle consiste donc à fractionner des granulats au moyen d'une colonne des tamis dont les dimensions des mailles sont normalisées et décroissantes du haut vers le bas entre 80 mm et 0.063 mm.

On appelle tamisât ou passant l'ensemble des grains qui passent à travers le tamis. Et refus l'ensemble des grains qui sont retenus sur le tamis.

Matérielles utilisées :

Les dimensions de mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

Dans ce stage on s'intéresse sur trois classes granulaires sont « 0/3 – 3/8 – 8/15 »
Les tamis utilisés pour ces trois classes sont comme c'est de suite :

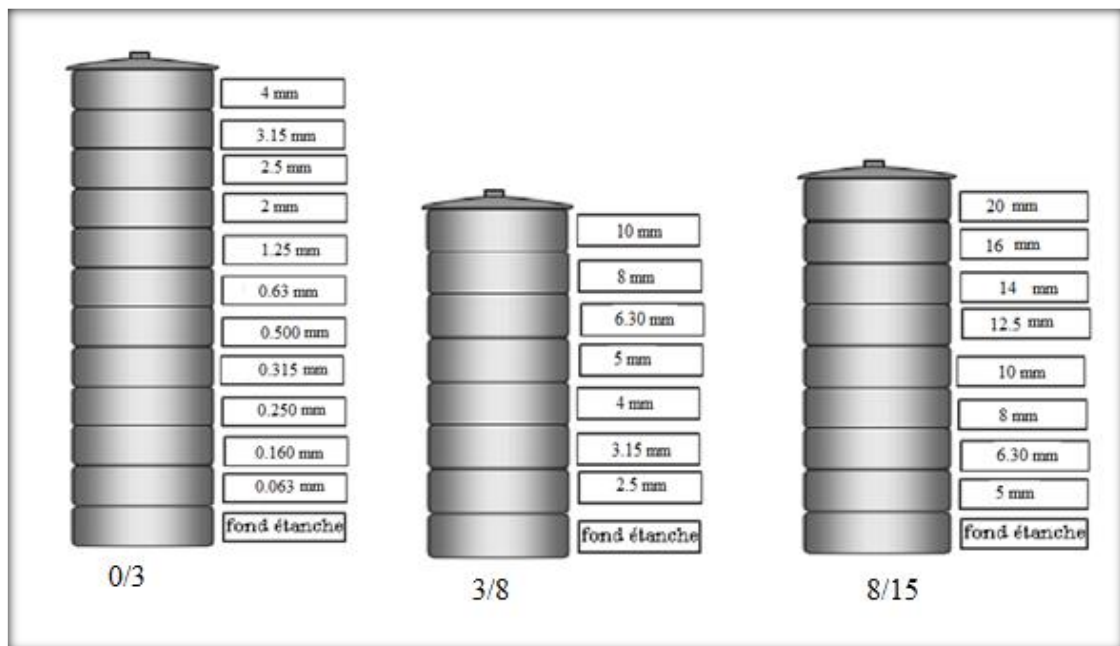


Figure II.8: Tamis utilisés selon les classes granulaires.

Préparation de l'échantillon :

La masse à utiliser sera telle que : $0,2D \leq M \leq 0,6D$

Avec

D : le diamètre du plus gros granulat exprime en millimètres.

M : la masse de l'échantillon, exprimée en kg.

Mode opératoire :

1. Le tamisage peut être effectué soit manuellement soit à l'aide d'un vibro- tamis
2. Peser l'échantillon.
3. Tamiser l'échantillon en versant ce dernier au sommet d'une série de tamis et en les agitant.
4. Recueillir le refus de chaque tamis et le peser dans une balance de portée pesant au gramme près.
5. Rapporter les poids des différents refus aux poids initiaux du matériau.
6. Calculer le pourcentage des tamisa.
7. Établissent la courbe granulométrique.

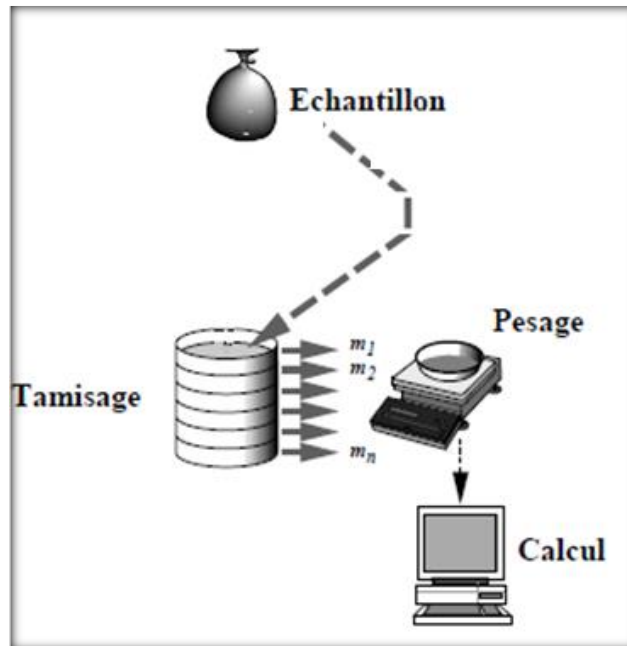


Figure II.9: Phasage de l'analyse granulométrique.

Le Calcul :

On note les masses des refus partiels (R_i), on calcule les pourcentages des refus partiels donné par la relation suivante :

$$\text{refus}(i) \% = \frac{R_i}{M} * 100 \quad (\text{II.3})$$

M: la masse totale de l'échantillon

On trace la courbe granulométrique après le calcul du pourcentage des tamisât partiels par la formule suivante :

$$\text{Tamisas (i)\%} = 100 - \text{refus (i) \%}$$

Tracé de la courbe granulométrique :

Il suffit de porter les divers pourcentages des tamisât partiels sur une feuille semi-logarithmique :

- En abscisse : les dimensions des mailles, échelle logarithmique
- En ordonnée : les pourcentages sur une échelle arithmétique.
- La courbe doit être tracée de manière continue.

Module de finesse :

Le module de finesse d'un sable «**MF**» selon la norme «**NF P 18-540**»

$$MF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{ 0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.50 - 5 \}$$

Le module de finesse **Mf** est une caractéristique importante surtout en ce qui concerne les sables. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse **Mf** compris entre **2,2** et **2,8** :

- Au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins. Ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau.
- Au-dessus, le sable manque de fins et le béton y perd en ouvrabilité.
- Pour $1,8 < \mathbf{Mf} < 2,2$ le sable est à utiliser si in recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.
- Pour $2,2 < \mathbf{Mf} < 2,8$ le sable est à utiliser si l'on recherche une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.
- Pour $2,8 < \mathbf{Mf} < 3,2$ le sable est à utiliser si l'on recherche des résistances élevées au détriment de l'ouvrabilité et avec des risques de ségrégation.
- Pour $\mathbf{Mf} > 3,2$ le sable est à rejeter.

2.7. Coefficient d'aplatissement des granulats (NF P 18-561 septembre 1990) :

Définition :

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

L : distance minimale du deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulat.

E : distance minimale du deux plans parallèles tangents au granulat.

G : dimension de la maille carrée minimale du tamis qui laisse passer le granulat.

Le coefficient d'aplatissement **A** d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondéral des éléments qui vérifient la relation suivante :

$$\frac{G}{E} > 1,58 \quad (\text{II.4})$$

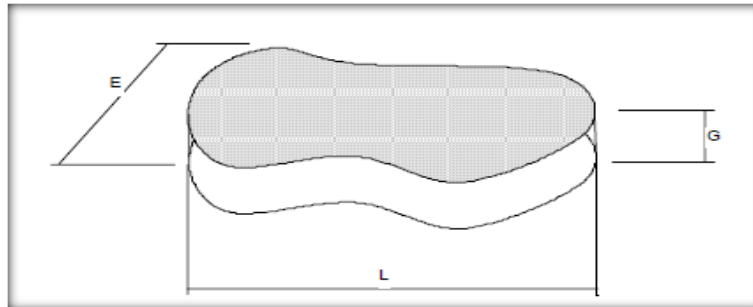


Figure II.10: Dimensions d'un granulat.

Principe d'essai :

L'essai consiste en une double opération de tamisage :

Le tamisage classique sur une colonne de tamis normalisés à mailles carrées afin de séparer les granulats en une succession de classes granulaires d/D dont les dimensions sont telles que $D = 1,25d$.

De ce fait, les classes de grosseurs G ainsi définies sont telles qu'elles suivent la progression géométrique des ouvertures des tamis utilisés au cours de l'analyse granulométrique.

Les différentes classes granulaires d/D ainsi isolées sont tamisées une à une sur une grille à fentes parallèles d'écartement $e=d/1,58$ (ce qui correspond aussi à : $E=d/2$).

Matériel utilisé :

Le coefficient d'aplatissement s'obtient en faisant une double analyse granulométrique, en utilisant successivement, et pour le même échantillon de granulat.

- Une série de tamis normalisés à mailles carrées.
- Une série de tamis à fentes de largeurs normalisées :

Tableau II.1: Correspondance entre classe granulaire et écartement.

Classe granulaires d/D (mm)	31,5/40	25/31,5	20/25	16/20	12,5/16	10/12	8/10	6,3/8	5/6,3	4/5
Ecartement E des grilles à fentes (mm)	20	16	12,5	10	8	6,3	5	4	3,15	2,5



Figure II.11: Des grilles à fentes parallèles.



Figure II.12: Des tamis à mailles carrées.



Figure II.13: Les granulats plats.

Mode opératoire :

1. Tamiser l'échantillon sur les tamis,
2. Peser et éliminer tous les grains passant au tamis de 4 mm et retenus sur celui de 80 mm,
3. Peser et retenir séparément tous les grains de fraction d_i/D_i comprise entre 4 mm et 80 mm
4. Puis le refus de chaque classe granulaire est tamisé sur le tamis à fente d'écartement E correspondant.
5. Le passant à travers chaque grille est pesé.

Le calcul :

Pour une classe granulaire d/D donnée, on peut définir un coefficient d'aplatissement partiel.

$$A_i = \frac{M_{ei}}{M_{gi}} \times 100 \quad (\text{II.5})$$

M_{gi} = masse de la classe granulaire d/D

M_{ei} = masse passant à travers le tamis à fentes d'écartement E correspondant.

- Le coefficient d'aplatissement global A s'exprime en intégrant les valeurs partielles déterminées sur chaque classe granulaire :

$$A = \frac{\sum_i^j M_{ei}}{\sum_i^j M_{gi}} \times 100 \quad (\text{II.6})$$

2.8. Essais de propreté sur granulats :

La propreté désigne : d'une part, 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.

D'autre part, 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.

Les granulats employés pour le béton doivent être propres, car les impuretés perturbent l'hydratation du ciment.

Essai d'équivalent de sable à 10 % des fines (NF P 18-597 Décembre 1990) :

Définition et But de l'essai :

L'essai permet de mettre en évidence la proportion relative de poussière fine nuisible ou d'éléments argileux dans les sols ou agrégats fins. Pour un béton, ces fines risquent d'inhiber l'hydratation du liant et gênent l'adhérence avec les agrégats.

Principe :

Dans le cas des sables, le degré de propreté est fourni par un essai appelé "équivalent de sable piston (Esp) qui consiste à séparer le sable des particules très fines qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage. L'essai est fait uniquement sur la fraction de sable 0/2 mm.

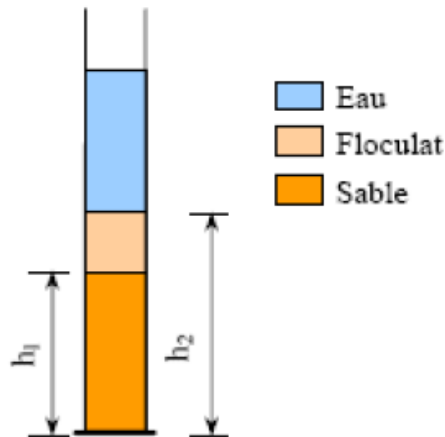


Figure II.14: Essai d'équivalent de sable.

Matériel utilisé :

- Eprouvettes, en matière plastique, avec 2 traits repères (\varnothing int = 32 mm; h=430mm).
- Entonnoir, tamis, spatule, balance, récipients.
- Machine agitatrice électrique ou manuelle.
- Réglet de mesure et piston taré comporte 3 vis formant des butées (masse 1 kg)

Préparation de l'échantillon :

1. Si l'échantillon pour laboratoire n'est pas humide, il faut l'humidifier afin d'éviter les pertes de fines.
2. Tamiser le sable sur le tamis de 2 mm, et laver le refus en utilisant le moins d'eau possible.
3. Sécher le passant 0 / 2 mm obtenu sans atteindre l'état sec.
4. La masse de l'échantillon doit être de 1,500 kg environ.
5. Préparer quatre échantillons :
6. Le premier pour déterminer rapidement la teneur en eau « w » de l'échantillon.
7. La deuxième pour la préparation du sable correcteur et la détermination de la teneur en fines.
8. Les deux restants pour la préparation des échantillons pour essai.

Le pourcentage de filler « f » est déterminé sur le deuxième échantillon 0/2mm par tamisage sous l'eau sur un tamis de 0.08mm d'ouverture :

$$f = 100 - \frac{m_s(100+w)}{m_{h2}} \quad (\text{II.7})$$

- m_s est la masse de ce refus à 0,08 mm.
- m_{h2} masse du deuxième échantillon.
- Si $f \leq 10\%$ on exécute directement le mode opératoire
- Si $f > 10\%$ on procède une augmentation du pourcentage de la fraction sableuse 0.08/2mm, afin de ramener la teneur en filler du sable à 10%.
- Pour ce faire on introduit une masse sèche de sable correcteur prise dans la fraction sèche « 0.08/2 mm » du sable étudié.

La masse de sable correcteur sec nécessaire à cet ajustement est calculé, pour un échantillon de 120 g, par la relation suivante :

$$m_{s_c} = \frac{f \times 120}{10} - 120 \quad (\text{II.8})$$

Ensuite on applique le mode opératoire suivant sur les deux échantillons restant « Sable 0/2 mm corrigé ».

Mode opératoire :

1. Remplir les 2 éprouvettes de solution lavante jusqu'au 1^{er} repère, ensuite verser la quantité de $(120 + m_{sc})$ g de sable sec tarée.
2. Eliminer les bulles d'air en frappant chaque éprouvette contre la paume de la main et laisser reposer 10 minutes,
3. Boucher les éprouvettes et les agiter d'un mouvement rectiligne, horizontal, sinusoïdal de 20 cm d'amplitude à l'aide d'une machine à secouer (90 allers et retours en 30 secondes).
4. Laver et remplir les éprouvettes avec le tube laveur en rinçant le bouchon, lavant les parois intérieures de toutes les éprouvettes et laver la masse du sable en y faisant remonter et descendre lentement le tube ainsi les fines remontent en surface, on ferme le robinet lorsque la solution atteint le 2^{eme} trait (supérieur) et on sort le tube laveur.
5. On laisse reposer 20 minutes en évitant toute vibration,
6. On mesure à vue les hauteurs h_1 et h_2 (h_2 est entachée d'incertitude) pour effectuer la mesure de façon plus précise, on introduit le piston taré à travers le flocculat, le manchon prenant appui sur le bord supérieur de l'éprouvette et on l'immobilise au contact du sable,
7. On mesure h_2 .
8. Recommencer les mêmes opérations à la deuxième prise d'essais.

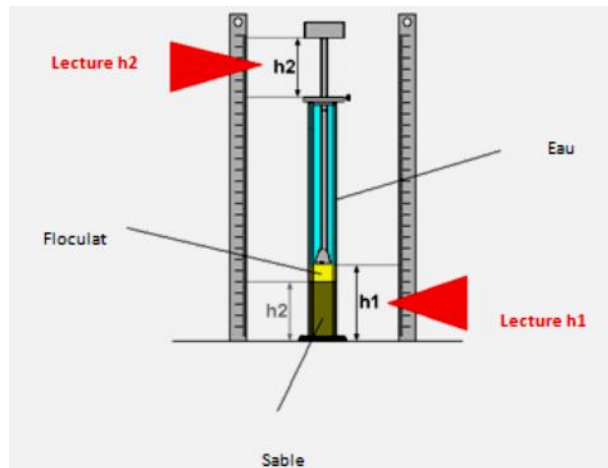


Figure II.15: Méthode de mesure h1 et h2.

Le Calcul de « ES » :

On remplace h_1 et h_2 dans la formule suivante par leurs valeurs respectives.

$$ES = \left(\frac{h_2}{h_1} \right) * 100 \quad (\text{II. 9})$$

Interprétation des résultats et qualité de sable :

Les valeurs de l'équivalent de sable indiquent la nature du sable en fonction du moyen de mesure et permettent d'en apprécier la qualité pour composer un béton.

Tableau II.2: Interprétation des résultats de Es.

ES	Nature et qualité du 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 de retrait
70 ≤ ES < 80	Sable propre - à faible pourcentage de fines argileuses Convenant Parfaitement pour les 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.

Limites :

- $h_2 = 0$, argile pure donc ES = 0
- $h_2 = h_1$, sable parfaitement propre donc ES = 100 %
- Pour les bétons, le ES est compris entre 70 et 90.
- Pour les bétons de ciment, ES > 80 (70 avec du ciment portland).

Essai de la propreté superficielle des graviers (NF P 18-591 septembre 1990) :**Définition :**

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral de particule inférieur à 0.5 mm mélange ou adhérent à la surface des granulats supérieur à 2mm.

But de l'essai :

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

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.

Matériel utilisé :

- Un tamis de maille 0.5 mm.
- Balance.

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

Le calcul :

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

$$P(\%) = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100 \quad (\text{II. 10})$$

Le gravier est propre si P (quantité d'éléments fins) $\leq 5\%$.

2.9. Essai d'absorption d'eau d'un gravillon (NF P 18-554 Décembre 1990) :

But d'essai :

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable, en particulier, à la résistance au gel des bétons.

En effet, l'eau incluse dans le granulats provoque l'éclatement du béton lorsque celui-ci est soumis de manière prolongée à des basses températures.

Principe de l'essai :

On détermine un coefficient d'absorption, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20 °C

Matériel utilisé :

- Une balance portée 5 kg, précision 1 g.
- Un torchon.
- Une étuve.

Mode opératoire :

- 1) Prendre un échantillon de gravillon d'environ 1000g le laver au tamis de 4mm, puis le sécher à l'étuve jusqu'à masse constante. Soit M_s sa masse
- 2) Immerger l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures.
- 3) Eponger soigneusement l'échantillon avec un chiffon absorbant, les gros éléments étant essuyés individuellement.
- 4) Peser l'échantillon ainsi épongé, soit M_a sa masse.



Figure II.16: Séchage de l'échantillon à l'aide d'un chiffon.

Le calcul :

Le coefficient d'absorption du gravillon noté A_b a pour expression :

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\text{II.11})$$

**2.10. Essai de Los Angeles (résistance à l'abrasion) NF EN 1097-2 (1998) :
But d'essai :**

Cet essai permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat.

Il s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des assises de chaussée, y compris les couches de roulement.

Le matériau évolue pendant l'essai, d'une part par suite du choc des boulets sur le granulat (rupture fragile des éléments), d'autre part par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine et sur les boulets.

Principe d'essai :

L'essai consiste à introduire des gravillons dans le cylindre de ans une machine cylindrique de Los Angeles en 500 rotations. Lors de sa rotation, les granulats sont heurtés par des boulets plus lourds que les gravillons.



Figure II.17: La machine Los Angeles



Figure II.18: Les boulets

Ce qui permet de mesurer la masse m d'éléments inférieurs à 1.6mm, produits par la fragmentation du matériau testé et que l'on soumet aux chocs provoqués par la chute de boulets normalisés.

Matériel utilisé :

- L'appareil Los Angeles.
- Un bac, balance, tamis.
- Des boulets sphériques de $47 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de diamètre et pesant 420 à 445 g.

Mode opératoire :

- 1) Prendre une masse minimale de 15 Kg pour les granulats de la classe entre 10 mm et 14 mm de façon que 60% à 70% des granulats passent au travers le tamis de 12.5 mm.
- 2) Tamiser l'échantillon sur la classe granulaire choisie.
- 3) Laver le matériau tamisé et le sécher à l'étuve et prendre une masse $5000 \text{ g} \pm 5\text{g}$.
- 4) Introduire la charge de boulets correspondant à la classe granulaire de l'échantillon.
- 5) Mettre la machine en marche durant le nombre 500 rotations à une vitesse de 30 à 33tr/min
- 6) Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil.
- 7) Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis 1,6 mm, Laver le refus au tamis, égoutter et sécher à l'étuve à $105 \text{ }^\circ\text{C}$, puis le peser, Soit m le résultat de la pesée.

Tableau II.3: Nombre des boulets pour essai Los Angeles

Classe granulaire (mm)	Nombre de boulets	Masse de la charge de boulets (g)
4 - 8	8	3450 à 3540
6,3 - 10	9	3840 à 3980
8- 12.5	10	4260 à 4420
10-14	11	4700 à 4860
12.5-16	12	5120 à 5300

Calcul du « LA » :

Le coefficient Los Angeles LA est déterminé par la formule suivante :

$$LA = \frac{(5000-m)}{5000} \times 100 \quad (\text{II.12})$$

Avec m masses du refus à 1.6 mm.

Interprétation des résultats :

LA est l'un des indicateurs permettant de juger la résistance au trafic de chantier des matériaux granulaires non traités utilisés en couche de forme. La limite supérieure préconisée pour cet usage est LA=45.

Tableau II.4 : Spécifications LA pour bétons hydrauliques

Trafic (essieux de 13 t)	Spécification	Couche de liaison	Couche de roulement
T4 (<25/j)	LA	≤30	≤25
T3 (25 à 150/j)	LA	≤25	≤20
T2 (150 à 300/j)	LA	≤25	≤20
T1 (300 à 750/j)	LA	≤25	≤20
T0 (> 750/j)	LA	≤25	≤20

2.11. Essai Micro-Deval (résistance à l'usure) (NF EN 1097-1 (1996)) :**But d'essai :**

Détermination du coefficient d'usure par attrition (frottements mutuels) des granulats en présence d'eau à l'aide de l'appareil MICRO DEVAL.

Principe d'essai :

L'essai consiste à introduire des granulats dans le cylindre de la machine MDE, avec de l'eau et des billes de taille normalisée équivalente à celle des gravillons. Lors de la rotation du cylindre, les gravillons frottent sur les billes. La masse des éléments inférieurs à 1.6 mm à la fin de l'essai donne la résistance à l'usure du granulat. Plus le résultat est faible, plus le granulat est résistant à l'usure.

Matériel utilisé :

- L'appareil Micro Deval.

- Balance
- Tamis de 1.6 mm ; 8 mm ; 10 mm ; 12.5 mm et 14 mm.
- Charge abrasive : billes sphériques de diamètre 10 mm±0.5 mm.



Figure II.19: La machine micro-Deval



Figure II.20: Billes inoxydables

Mode opératoire :

- 1) Pour cet essai, préparer par lavage et tamisage les masses des fractions suivantes, en rajoutant la masse de bille indiquée :

Tableau II.5: Nombre des billes pour essai micro-Deval

Classe granulaire	350 grammes de la fraction	150 grammes de la fraction	Masse de bille
10/14	10/12.5	12.5/14	5000
11.2/16	11.2/14	14/16	5400
8/11.2	8/10	10/11.2	4400
6.3/10	8/10	6.3/8	4000
4/6.3	5/6.3	4/5	2000

- 2) Mettre la prise d'essai, la masse de bille et compléter avec 2.5 litres d'eau par cylindre.
- 3) Mettre à tourner pendant 1200 tours à la vitesse de 100 tours/minute.
- 4) Séparer l'échantillon obtenu des billes d'acier.
- 5) Laver les granulats restant au tamis de 1.6 mm en éliminant tous le passant à ce tamis.
- 6) Sécher à l'étuve à 105 °C et peser le refus à 1.6 mm soit m.

Calcul du MDE :

$$M_{DE} = \frac{(500-m)}{500} \times 100 \quad (\text{II.13})$$

Avec :

- **MDE** : Micro Deval en présence d'eau.
- **m** masses du refus à 1.6 mm.

Interprétation des résultats :

Le coefficient Micro Deval MDE en présence d'eau intéresse surtout les granulats pour les techniques routières et les bétons hydrauliques.

Tableau II.6: Spécifications MDE pour bétons hydrauliques

Catégorie	Valeur spécifique supérieur
A	25
B et C	30
D	40

2.12. Carrière de Koussane :

Tableau II.7: Tableau d'analyse granulométrique carrière de Koussane

Diamètre	3\8	8\15	15\25	Sable Dunes	Sable 0\3
31,50			100		
25,00			100		
20,00		100	81		
16,00		97	16		
12,50		57	1		
10,00	100	23	0		
8,00	93	4			
6,30	70	1			
5,00	50	0		100	100
2,50	4			88	100
1,25	1			70	100
0,63	0			59	100
0,315				51	63
0,16				31	25
0,08				11	1

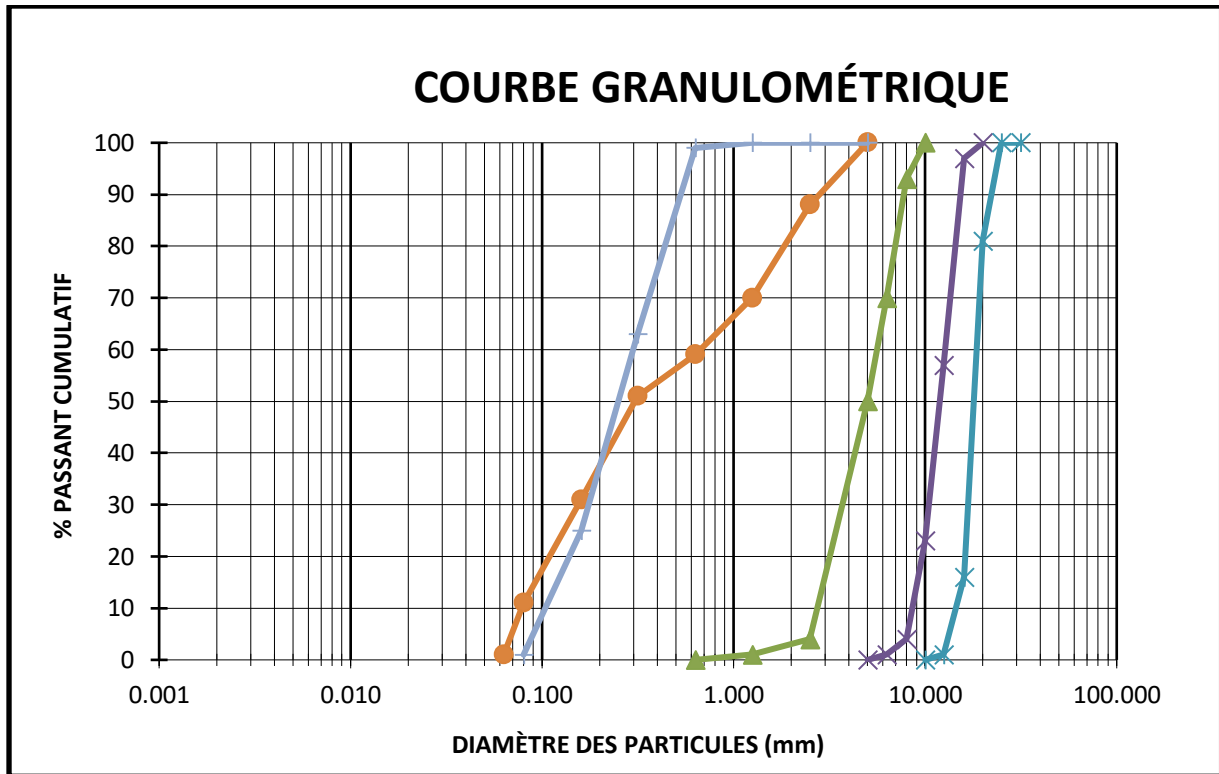


Figure II.21: Courbe granulométrique Carrière de KOUSSANE.

Tableau II.8 Tableau d'Identification des propriétés des granulats, carrière de Koussane.

Caractéristiques des granulats :	S.des dunes	Classes granulaires			
		0/3	3/8	8/15	15/25
Masse volumique apparente (kg/m3)	1630	1450	1370	1550	1590
Masse volumique absolue (kg/m3)	2610	2700	2670	2650	2700
Equivalent de sable (%)	86.61	66.20	-	-	-
Essai de propreté (impuretés) (%)	-	-	3.09	3.1	1.27
Coefficient d'aplatissement (%)	-	-	18.28	12.10	7.23
Module de finesse	1.13	2.01	-	-	-
Coefficient d'absorption (%)	-	-	2.62	2.26	0.90
Essai Los Angeles (%)	-	-	$\frac{4}{6.3}$ 20.86	$\frac{6.3}{10}$ 22.60	$\frac{10}{14}$ 14.74
Essai Micro Deval (%)	-	-	$\frac{4}{6.3}$ 39.80	$\frac{4}{10}$ 20.80	$\frac{10}{14}$ 16.20

2.13. Carrière de Charouine :

Tableau II.9: Tableau d'analyse granulométrique carrière de Charouine.

Diamètre	3\8	8\15	15\25
31,50			100
25,00			97
20,00		100	68
16,00		100	21
12,50		98	3
10,00	100,0	14	0
8,00	89,0	2	
6,30	60,0	0	
5,00	36,0		
2,50	2,0		
1,25	0,0		
0,63			
0,32			
0,16			
0,08			

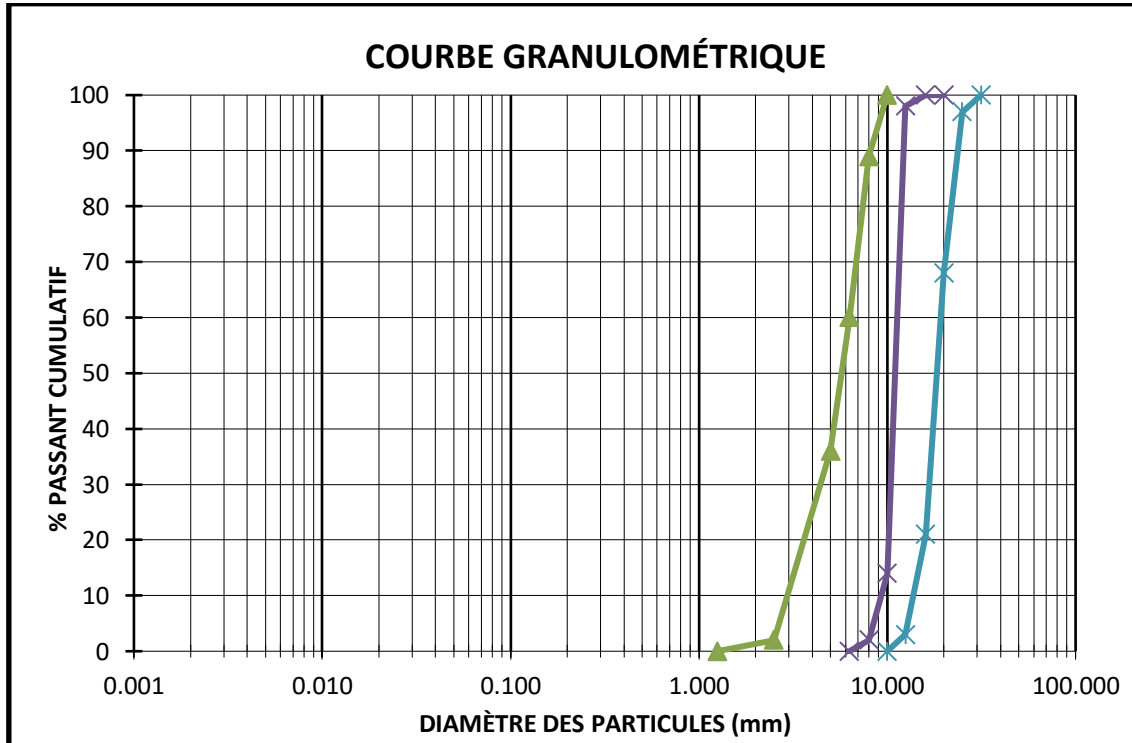


Figure II.22: Courbe granulométrique Carrière de CHAROUINE.

Tableau II.10: Tableau d'Identification des propriétés des granulats, carrière de CHAROUINE.

Caractéristiques des granulats :	Classes granulaires		
	3/8	8/15	15/25
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1470	1500	1510
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2650	2630	2650
Essai de propreté (impuretés) (%)	0.4	0.6	0.28
Coefficient d'aplatissement (%)	19.97	10.8	7.34
Coefficient d'absorption (%)	2.14	1.68	1.71
Essai Los Angeles (%)	$\frac{4}{6.3}$ 14.87	$\frac{6.3}{10}$ 12.22	$\frac{10}{14}$ 11.87
Essai Micro Deval (%)	$\frac{4}{6.3}$ 9.23	$\frac{4}{10}$ 10.07	$\frac{10}{14}$ 10.33

2.14. Carrière d'Aougrou :

Tableau II.11: Tableau d'analyse granulométrique carrière d'Aougrou.

Diamètre	3\8	8\15	15\25
31,50			100
25,00			100
20,00		100	62
16,00		95	29
12,50		54	4
10,00	100,0	22	0
8,00	100,0	6	
6,30	87,0	1	
5,00	57,0	0	
2,50	28,0		
1,25	12,0		
0,63	3,0		
0,32	2,0		
0,16	1,0		
0,08			

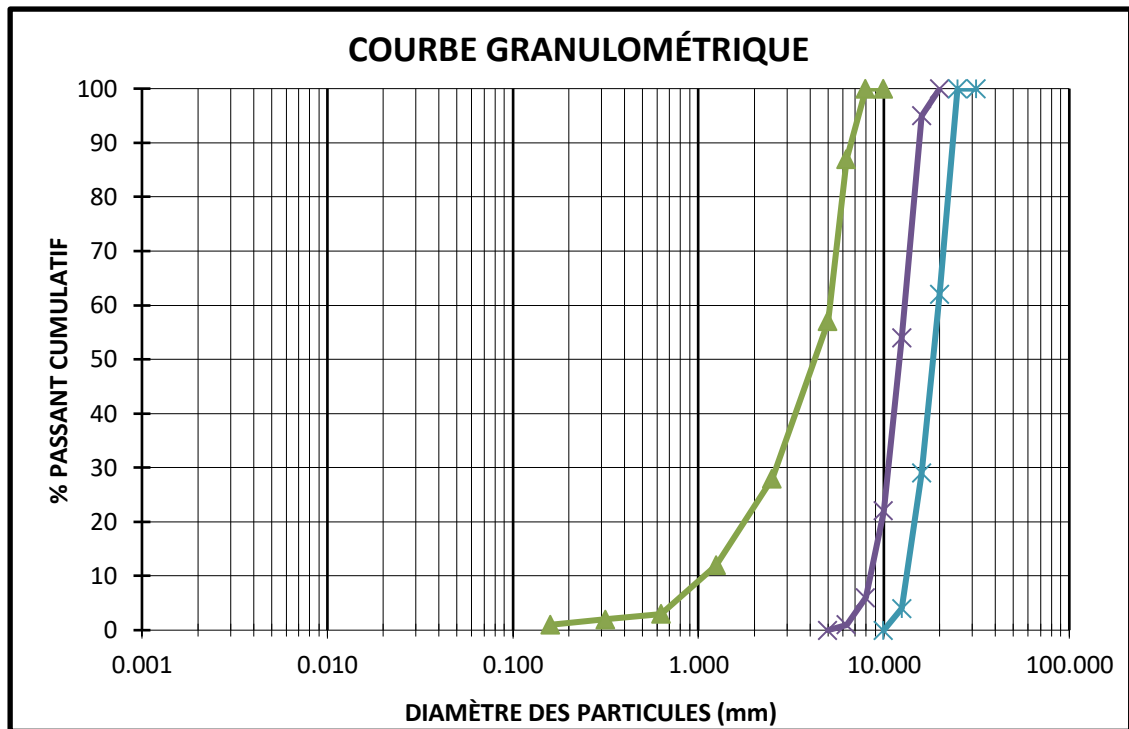


Figure II.23: Courbe granulométrique Carrière d'AOUGROUT.

Tableau II.12: Tableau d'Identification des propriétés des granulats, carrière d'AOUGROUT.

Caractéristiques des granulats :	Classes granulaires		
	3/8	8/15	15/25
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1400	1540	1500
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2610	2610	2630
Essai de propreté (impuretés) (%)	0.63	0.40	0.60
Coefficient d'aplatissement (%)	18.07	6.0	7.95
Coefficient d'absorption (%)	0.8	1.88	3.89
Essai Los Angeles (%)	$\frac{4}{6.3}$ 20.38	$\frac{6.3}{10}$ 20.58	$\frac{10}{14}$ 21.58
Essai Micro Deval (%)	$\frac{4}{6.3}$ 7.42	$\frac{4}{10}$ 12.77	$\frac{10}{14}$ 15.13

2.15. Carrière d'Aoulef:

Tableau II.13: Tableau d'analyse granulométrique carrière d'Aoulef.

Diamètre	3/8	8\15	15\25
31,50			100
25,00			100
20,00		100	86
16,00		99	38
12,50		82	5
10,00		56	1
8,00		29	0
6,30		9	
5,00		0	
2,50			
1,25			
0,63			
0,32			
0,16			
0,08			

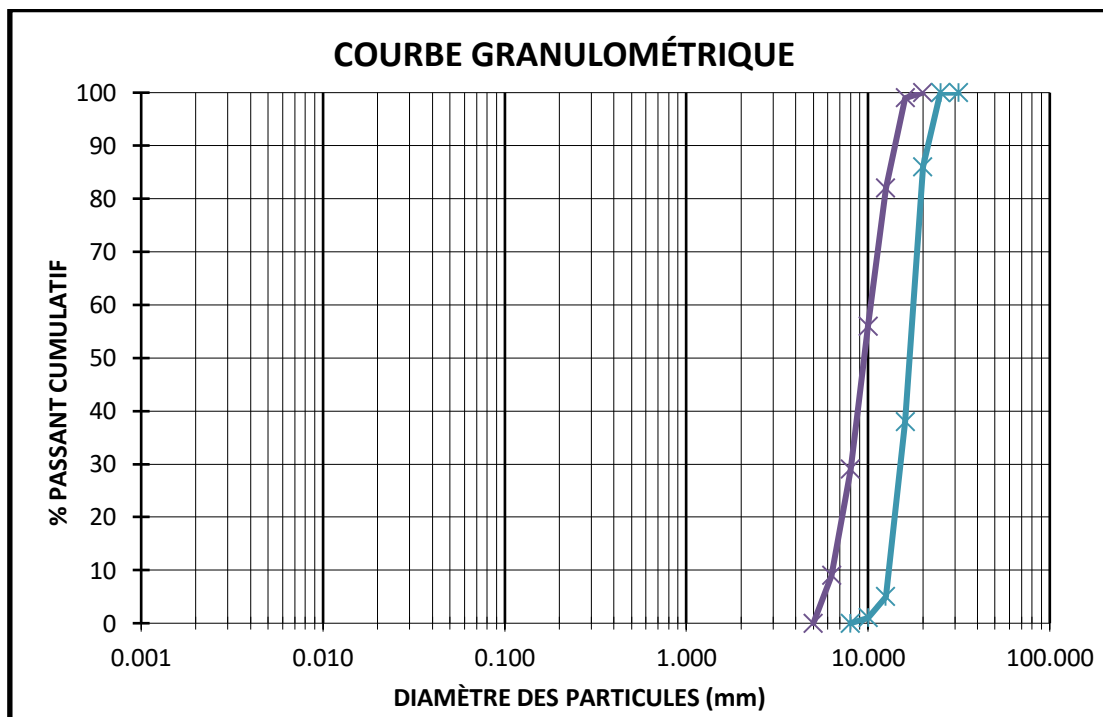


Figure II.24: Courbe granulométrique Carrière d'Aoulef.

Tableau II.14 Tableau d'Identification des propriétés des granulats, carrière d'AOULEF.

Caractéristiques des granulats :	Classes granulaires	
	8/15	15/25
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1560	1550
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2720	2700
Essai de propreté (impuretés) (%)	2.04	0.24
Coefficient d'aplatissement (%)	18.20	7.95
Coefficient d'absorption (%)	1.69	2.24
Essai Los Angeles (%)	$\frac{6.3}{10}$ 31.25	$\frac{10}{14}$ 34.8
Essai Micro Deval (%)	$\frac{4}{10}$ 30.04	$\frac{10}{14}$ 30.0

2.16. Caractéristiques du ciment utilisé :

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment de classe CEM II/A-L 42,5 N de la cimenterie d'Aoulef- wilaya d'Adrar.

Les analyses chimiques et physiques fournies par le producteur sont données respectivement par les tableaux II.27 et II.28

Tableau II.15: Composition chimique du CEM II/A- 42,5.

Éléments (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	CL
	24,17	5,98	3,41	68,8	1,72	0,052

Tableau II.16: Caractéristiques minéralogique du CEM II/A- 42,5.

Éléments	C3S	C2S	C3A	C4AF
$3CaOSiO_2$	$2CaOSiO_2$	$3CaAl_2O_3$	$4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$	
Teneur (%)	10,02	31,74	49,76	8,48

Tableau II.17: Propriétés physiques du ciment

Caractéristique physique	Valeur
Masse volumique apparente (kg/m ³)	990
Masse volumique absolue (kg/m ³)	3000
Consistance normale (%)	26
Début de prise	2 h 44 min
Fin de prise	5h 50 min

2.17. Interprétation des résultats:

Interprétation des résultats de l'essai de la masse volumique :

On peut résumer les résultats dans le tableau suivant :

Tableau II.18: Tableau d'Interprétation des résultats de l'essai de la masse volumique.

Les carrières	MV _{ab}		MV _{app}	
	Sable	Gravier	Sable	Gravier
Koussane	Comprise entre 2700 kg/m ³ et 2610 kg/m ³	Comprise entre 2700 kg/m ³ et 2650 kg/m ³	Comprise entre 1610 kg/m ³ et 1450 kg/m ³	Comprise entre 1590 kg/m ³ et 1370 kg/m ³
Charouine	-	Comprise entre 2650 kg/m ³ et 2630 kg/m ³	-	Comprise entre 1510 kg/m ³ et 1470 kg/m ³
Aougrout	-	Comprise entre 2630 kg/m ³ et 2610 kg/m ³	-	Comprise entre 1540 kg/m ³ et 1400 kg/m ³
Aoulef	-	Comprise entre 2720 kg/m ³ et 2700 kg/m ³	-	Comprise entre 1560 kg/m ³ et 1550 kg/m ³

Interprétation des résultats de l'essai de propreté de granulats:

Selon les résultats des essais et selon la norme on constate que :

Tableau II.19: Tableau d'Interprétation des résultats de l'essai de propreté de granulats.

Les carriers	Interprétation de résultats
Aoulef	La propreté de granulats >3 donc le granulats est non propre
Charouine	La propreté physique <3, le gravier est propre
Aougrout	P(%) <3 le gravier est propre
Koussane	P(%) (15/25) <3 le gravier est propre P(%) (3/8 ; 8/15) >3 donc le gravier est non propre

Interprétation des résultats de l'essai d'absorption d'eau:

Tableau II.20: Tableau d'Interprétation des résultats de l'essai d'absorption des granulats.

Les carrières	Interprétation de résultats
Aoulef	Ab(%) (8/15) >2, le granulat est non absorbant Ab(%) (15/25) >2, le granulat est absorbant
Charouine	Ab(%) (8/15 ; 15/25) >2, le granulat est non absorbant Ab(%) (3/8) >2, le granulat est absorbant
Aougrouit	Ab(%) (3/8 ; 8/15) >2, le granulat est non absorbant Ab(%) (15/25) >2, le granulat est absorbant
Koussane	Ab(%) (15/25) >2, le granulat est non absorbant Ab(%) (3/8 ; 8/15) >2, le granulat est absorbant

Interprétation des résultats des essais mécaniques des granulats:

Tableau II.21: Tableau d'Interprétation des résultats des essais mécaniques des granulats.

Les carrières	LA	MDV
Aoulef	LA (%) >20 le gravier est dure	MDE(%) >20 le gravier est de moyen à faible
Charouine	LA (%) >20 le gravier est très dure	MDE(%) <20 le gravier est de bon à moyen
Aougrouit	LA (%) >20 le gravier est dure	MDE(%) <20 le gravier est de bon à moyen
Koussane	LA(%)>20 le gravier est dure	MDE(%) >20 le gravier est de moyen à faible

Interprétation des résultats des essais d'équivalent de sable:

Tableau II.22: Tableau d'Interprétation des résultats des essais d'équivalent de sable.

Origine de sable	Interprétation
Sable de dunes (Bouda)	On a $ES = 86,61 > 80$ donc le sable est très propre
Sable concassé Koussane	On a $ES = 66,20 ; 60 < ES < 70$ donc le sable légèrement argileux de propreté admissible

2.18. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons caractérisé les différents matériaux utilisés (granulats et ciment).

Cependant Les essais réalisés, sur les granulats des carrières choisies, ont permis d'apprécier leurs qualités vis-à-vis les aux spécifications exigées par la norme (NF P 18-541) pour l'usage dans les bétons.

Qui ont présenté de bonnes propriétés physiques et mécaniques, l'utilisation donc de ces granulats présentant de bonnes caractéristiques permettra l'obtention de bétons de qualité, satisfaisant les critères de maniabilité, d'aspect des parements, de résistances et de durabilité.

Chapitre 03:

Collection des données

III.1. Introduction:

Ce chapitre présente tout d'abord des résultats des travaux précédents concernant la formulation des bétons à base des matériaux locaux réalisés par des collègues à l'université d'Adrar. On peut citer à titre d'exemples les travaux de : « F. Yousfi (2015) », « M. Belhadj et A. Mounir (2015) », « R. Zouini (2018) », « Z. Abbou et S. Messaoudi (2019) », et « N. Aroussi et A. Dehmani (2018) »

Notre travail est basé sur les résultats de ses travaux, en particulier le dosage des différentes constituantes du béton, afin de mieux comprendre le comportement de la compacité selon l'origine et la nature et la méthode de la mise en œuvre des bétons étudiés.

Enfin, nous fournirons ci-après les résultats de formulation de béton à base des matériaux locaux ainsi que les résultats de compacité théorique.

III.2. Adaptation des résultats des formulations des bétons à bases des matériaux locaux :

III.2.1. Travaux de F. Yousfi (2015) : [28]

En 2015, une étude de l'influence de la granularité sur la résistance mécanique du béton à base des matériaux locaux de la wilaya d'Adrar, a été effectuée. Les résultats de dosages des différentes constituantes du béton sont donnés par le tableau III.1.

Tableau III.1: Tableau des constituants du Béton selon les travaux de F. Yousfi

Bétons (kg)	Ciment	Eau	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25
B1	350	197.36	709.8	/	529.88	540.3
B2	350	199	608	/	813	426
B3	350	183	679	/	443	772
B4	350	170.76	699.06	/	1037.38	/
B5	350	213	699.87	/	997.55	/
B6	350	206	581	413	339	/

III.2.2. Travaux de M. Belhadj et A. Mounir (2015) : [29]

En 2015, Mounir et Belhadj ont été exécuté une étude sur l'influence de l'utilisation de ciment de haut fourneau sur la résistance mécanique de béton à base des matériaux locaux de la wilaya d'Adrar. Les résultats de dosages des différentes constituantes du béton sont donnés par le tableau III.2.

Tableau III.2: Tableau des constituants du Béton selon les travaux de M. Belhadj et A. Mounir

Bétons (kg)	Ciment	Eau	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25
B1	400	184.33	582.72	156.44	101.07	845.79
B2	400	173.91	715.92	295.84	673.96	/
B3	400	183.33	482.83	290.91	356.62	572.87
B4	400	183.33	428.73	262.16	384.82	676.85

III.2.3. Travaux de R. Zouini (2018) : [30]

En 2018, une étude de formulation du béton à base des matériaux locaux (Granulat d'Aougrou Z. Sidi Abdallah) a été effectuée. Les résultats de dosages des différentes constituantes du béton sont donnés par le tableau III.3.

Tableau III.3 : Tableau des constituants du Béton selon les travaux de R. Zouini

Bétons (kg)	Ciment	Eau	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25
BSD1	391.29	179.73	474.08	258.59	215.49	775.77
BSD2	391.29	179.73	451.96	262.32	273.85	594.62
BSD3	391.29	179.73	472.20	251.09	262.32	728.16
BSD4	391.29	179.73	645.59	217.61	242.72	602.61
BSD5	391.29	179.73	617.09	617.09	234.35	568.37
BSD6	391.29	179.73	619.35	654.59	211.11	760.77
BSC1	391.29	179.73	645,59	237,85	220,86	594,62
BSC2	391.29	179.73	645,59	237,85	220,86	594,62
BSC3	391.29	179.73	619,35	217,61	234,35	602,61
BSC4	391.29	179.73	619,35	217,61	234,35	602,61
BSC5	391.29	179.73	617,09	227,35	211,11	568,37
BSC6	391.29	179.73	617,09	227,35	211,11	568,37

III.2.4. Travaux de N. Aroussi et A. Dehmani (2018) : [31]

En 2018, Aroussi et Dahmani ont étudié la formulation du béton à base de granulat local de la région de Charouine de la wilaya d'Adrar. Les résultats de dosages des différentes constituantes du béton sont donnés par le tableau III.4.

Tableau III.4: Tableau des constituants du Béton selon les travaux de N. Aroussi et A. Dehmani

Bétons (kg)	Ciment	Eau	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25
BSD1	400	183.73	416.67	258.3	473.4	627.87
BSD2	400	177.73	416.67	258.3	473.4	627.87
BSD3	389	177.73	416.67	258.3	473.4	627.87
BSD4	378	177.73	416.67	258.3	473.4	627.87
BSD5	367	177.73	416.67	258.3	473.4	627.87
BSD6	365	177.73	416.67	258.3	473.4	627.87
BSD7	400	183,73	416.67	258.3	473.4	627.87
BSD8	400	177,73	416.67	258.3	473.4	627.87
BSD9	389	177,73	416.67	258.3	473.4	627.87
BSD10	378	177,73	416.67	258.3	473.4	627.87
BSD11	367	177,73	416.67	258.3	473.4	627.87
BSD12	356	177,73	416.67	258.3	473.4	627.87
BSC1	400	177,73	698,13	304,7	388,57	479,87
BSC2	400	177,73	698,13	304,7	388,57	479,87
BSC3	389	177,73	698,13	304,7	388,57	479,87
BSC4	378	177,73	698,13	304,7	388,57	479,87
BSC5	367	177,73	698,13	304,7	388,57	479,87
BSC6	356	177,73	698,13	304,7	388,57	479,87
BSC7	400	177,73	687,73	318,32	354,04	436,55
BSC8	400	177,73	687,73	318,32	354,04	436,55
BSC9	389	177,73	687,73	318,32	354,04	436,55
BSC10	378	177,73	687,73	318,32	354,04	436,55
BSC11	367	177,73	687,73	318,32	354,04	436,55
BSC12	356	177,73	687,73	318,32	354,04	436,55

III.2.5. Travaux d'ABBOU Zahra et MESSAUDI Safia (2019) : [32]

En 2014, une étude de formulation du béton à base de matériaux locaux d'Adrar (la région de Koussane), a été effectuée. Les résultats de dosages des différentes constituantes du béton sont donnés par le tableau III.5.

Tableau III.5: Tableau des constituants du Béton selon les travaux d'Abbou et Messaudi

Bétons (kg)	Ciment	Eau	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25
B1	350	197,36	709,8	/	529,8	540,3
B2	350	199	608	/	813	426
B3	350	183	679	/	433	772
B4	350	170,76	699,06	/	1037,38	/
B5	350	213	699,87	/	997,55	/
B6	350	206	581	413	339	486
B7	350	185	710	/	211	1046
B8	350	195	439	417	410	555
B9	350	194	520	421	406	475
B10	350	203	867	930	/	203
B11	400	184,33	582,72	156,44	101,07	845,79
B12	400	173,91	715,92	295,48	673,96	/
B13	400	183,33	482,83	290,91	356,62	572,87
B14	400	183,33	428,73	261,16	384,82	676,85
B15	350	197,36	709,8	/	529,8	540,3
B16	350	199	608	/	813	426
B17	350	183	679	/	433	772
B18	350	170,76	699,06	/	1037,38	/
B19	350	213	699,87	/	997,55	/
B20	350	206	581	413	339	486
B21	350	185	710	/	211	1046
B22	350	195	439	417	410	555
B23	350	194	520	421	406	475
B24	400	183,73	416,67	258,53	437,4	627,87
B25	400	183,73	435,42	289,46	494,7	636,82
B26	400	183,73	416,67	258,53	437,4	627,87
B27	400	183,73	698,13	304,7	385,73	479,87
B28	400	183,73	699,87	318,32	354,04	436,55

III.3. Calcule de la compacité théorique des mélanges granulaires :

A partir des données de formulation accumulées des précédents travaux, on va calculer la compacité théorique des mélanges granulaires par la formule suivante :

$$C = \frac{V_s}{V_t} \quad (\text{III.1})$$

- Dans un premier temps, on va convertir les masses des constituants de chaque projet à des volumes en utilisant la masse volumique mesurées par les auteurs des travaux mentionnés.
- Puis on va considérer que le volume des vides est représenté par le volume d'eau, tandis que le volume des particules solide sera calculé par la somme des volumes des granulats et le ciment.
- On calcul la compacité de chaque béton des projets mentionnés par la formule citée ci-dessus.

III.3.1. Travaux de F. Yousfi (2015) :

Tableau III.6: Compacité des mélanges réalisés par F. Yousfi

Bétons (L)	Ciment	Eau	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25	Compacité
M.V Ab (kg/m ³)	3	1	2.53	2.76	2.58	2.68	
B1	116,67	197,36	280,55	/	205,38	201,60	0,803
B2	116,67	199	240,32	/	315,12	158,96	0,807
B3	116,67	183	268,38	/	171,71	288,06	0,822
B4	116,67	170,76	276,31	/	402,09	/	0,823
B5	116,67	213	276,63	/	386,65	/	0,785
B6	116,67	206	229,64	149,64	131,40	/	0,753

III.3.2. Travaux de M. Belhadj et A. Mounir (2015) :

Tableau III.7: Compacité des mélanges réalisés par M. Belhadj et A. Mounir

Bétons (L)	Ciment	Eau	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25	Compacité
M.V Ab (kg/m ³)	3	1	2.5	2.73	2.55	2.53	
B1	133,33	184,33	233,09	57,30	39,64	334,30	0,812
B2	133,33	173,91	286,37	108,37	264,30	/	0,820
B3	133,33	183,33	193,13	106,56	139,85	226,43	0,813
B4	133,33	183,33	171,49	96,03	150,91	267,53	0,817

III.3.3. Travaux de R. Zouini (2018) :

Tableau III.8 : Compacité des mélanges réalisés par R. Zouini

Bétons (L) M.V Ab (kg/m ³)	Ciment	Eau	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25	Compacité
	3	1	2.5	2.5	2.5	2.5	
B1	391,29	179,73	474,08	258,59	215,49	775,77	0,820
B2	391,29	179,73	451,96	262,32	273,85	594,62	0,809
B3	391,29	179,73	472,20	251,09	262,32	728,16	0,819
B4	391,29	179,73	645,59	217,61	242,72	602,61	0,819
B5	391,29	179,73	617,09	617,09	234,35	568,37	0,840
B6	391,29	179,73	619,35	654,59	211,11	760,77	0,851
B7	130,43	179,73	258,24	95,14	88,34	237,85	0,818
B8	130,43	179,73	258,24	95,14	88,34	237,85	0,818
B9	130,43	179,73	247,74	87,04	93,74	241,04	0,817
B10	130,43	179,73	247,74	87,04	93,74	241,04	0,817
B11	130,43	179,73	246,84	90,94	84,44	227,35	0,813
B12	130,43	179,73	246,84	90,94	84,44	227,35	0,813

III.3.4. Travaux de N. Aroussi et A. Dehmani (2018) :

Tableau III.9 : Compacité des mélanges réalisés par N. Aroussi et A. Dehmani

Bétons (L)	Ciment	Eau	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25	Compacité
M.V Ab (kg/m ³)	3	1	2.72	2.77	2.65	2.77	
B1	133,33	183,73	153,19	93,25	178,64	226,67	0,810
B2	133,33	177,73	153,19	93,25	178,64	226,67	0,815
B3	129,67	177,73	153,19	93,25	178,64	226,67	0,815
B4	126,00	177,73	153,19	93,25	178,64	226,67	0,814
B5	122,33	177,73	153,19	93,25	178,64	226,67	0,813
B6	121,67	177,73	153,19	93,25	178,64	226,67	0,813
B7	133,33	177,73	153,19	93,25	178,64	226,67	0,815
B8	133,33	177,73	153,19	93,25	178,64	226,67	0,815
B9	129,67	177,73	153,19	93,25	178,64	226,67	0,815
B10	126,00	177,73	153,19	93,25	178,64	226,67	0,814
B11	122,33	177,73	153,19	93,25	178,64	226,67	0,813
B12	118,67	177,73	153,19	93,25	178,64	226,67	0,813
B13	133,33	177,73	256,67	110,00	178,64	173,24	0,827
B14	133,33	177,73	256,67	110,00	178,64	173,24	0,827
B15	129,67	177,73	256,67	110,00	178,64	173,24	0,827
B16	126,00	177,73	256,67	110,00	178,64	173,24	0,826
B17	122,33	177,73	256,67	110,00	178,64	173,24	0,826
B18	118,67	177,73	256,67	110,00	178,64	173,24	0,825
B19	133,33	177,73	252,84	114,92	178,64	157,60	0,825
B20	133,33	177,73	252,84	114,92	178,64	157,60	0,825
B21	129,67	177,73	252,84	114,92	178,64	157,60	0,824
B22	126,00	177,73	252,84	114,92	178,64	157,60	0,824
B23	122,33	177,73	252,84	114,92	178,64	157,60	0,823
B24	118,67	177,73	252,84	114,92	178,64	157,60	0,822

III.3.5. Travaux d'ABBOU Zahra et MESSAUDI Safia (2019) :

Tableau III.10 : Compacité des mélanges réalisés par Abbou Zahra et Messaudi Safia.

Bétons (L)	Ciment	Eau	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25	Compacité
MV Ab (kg/m ³)	3,00	1,00	2,53	2,62	2,50	2,56	
B1	116,67	197,36	280,55	0,00	211,92	211,05	0,806
B2	116,67	199,00	240,32	0,00	325,20	166,41	0,810
B3	116,67	183,00	268,38	0,00	173,20	301,56	0,825
B4	116,67	170,76	276,31	0,00	414,95	0,00	0,826
B5	116,67	213,00	276,63	0,00	399,02	0,00	0,788
B6	116,67	206,00	229,64	157,63	135,60	189,84	0,801
B7	116,67	185,00	280,63	0,00	84,40	408,59	0,828
B8	116,67	195,00	173,52	159,16	164,00	216,80	0,810
B9	116,67	194,00	205,53	160,69	162,40	185,55	0,811
B10	116,67	203,00	342,69	354,96	0,00	79,30	0,815
B11	133,33	184,33	230,32	59,71	40,43	330,39	0,812
B12	133,33	173,91	282,97	112,78	269,58	0,00	0,821
B13	133,33	183,33	190,84	111,03	142,65	223,78	0,814
B14	133,33	183,33	169,46	99,68	153,93	264,39	0,817
B15	116,67	197,36	280,55	0,00	211,92	211,05	0,806
B16	116,67	199,00	240,32	0,00	325,20	166,41	0,810
B17	116,67	183,00	268,38	0,00	173,20	301,56	0,825
B18	116,67	170,76	276,31	0,00	414,95	0,00	0,826
B19	116,67	213,00	276,63	0,00	399,02	0,00	0,788
B20	116,67	206,00	229,64	157,63	135,60	189,84	0,801
B21	116,67	185,00	280,63	0,00	84,40	408,59	0,828
B22	116,67	195,00	173,52	159,16	164,00	216,80	0,810
B23	116,67	194,00	205,53	160,69	162,40	185,55	0,811
B24	133,33	183,73	164,69	98,68	174,96	245,26	0,816
B25	133,33	183,73	172,10	110,48	197,88	248,76	0,824
B26	133,33	183,73	164,69	98,68	174,96	245,26	0,816
B27	133,33	183,73	275,94	116,30	154,29	187,45	0,825
B28	133,33	183,73	276,63	121,50	141,62	170,53	0,821

Commentaire :

Les résultats de compacité théoriques des mélanges granulaires des projets précédents (5 projets et 74 mélanges), montrent bien qu'elle est comprise en générale dans l'intervalle de **0,750 à 0,851**.

Par contre, la compacité supérieure à **0,800** fait presque **95 %** des mélanges, qui signifié que les granulats locaux de la wilaya d'Adrar présente une bon compacité théorique (arrangement maximale)

III.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons montré les résultats des travaux précédents concernant la formulation des bétons à base des matériaux locaux et après nous avons calculé la compacité théorique de ces mélanges.

D'après les résultats des calculs de compacité théorique des projets précédents, On peut déduire que les mélanges réalisés à base des matériaux locaux possèdent une bonne compacité théorique.

Chapitre 04:
Simulation, Résultats
et Interprétation

IV.1. Introduction :

Vu à la situation inhabituelle à cause de la propagation de la pandémie du COVID-19, le confinement et la fermeture des établissements universitaires particulièrement les laboratoires, on était obligé à utiliser la méthode numérique pour le calcul de la compacité des mélanges granulaires par le logiciel Bétonlabfree 3 développés par François de Larrard et Thierry Sedran sous Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – Centre de Nantes.

Dans ce chapitre, nous présentons une étude de la compacité optimale des mélanges granulaires des matériaux locaux (granulats d'Adrar de D_{max} 12.5, 20 et 31.5 mm) des carrières de : Aoulef, Aougrou, Charouine et Koussane. A l'aide de logiciel BétonLab free 3 .

Une introduction sur le logiciel BétonLab3 free et son mode de fonctionnement a été mentionner dans le premier chapitre.

IV.2. Calcul de la compacité virtuelle par Bétonlabfree 3 :

2.1.Aperçu sur la méthode de calcul de la compacité :

On va calculer la compacité de chaque fraction granulaire à l'aide de logiciel BétonLab free3, les étapes sont résumées ci-dessus :

Données nécessaires à fournir pour le calcul :

- Le D_{min} et D_{max} .
- La masse volumique absolue du matériau.
- Le coefficient d'absorption du matériau.
- L'analyse granulométrique.

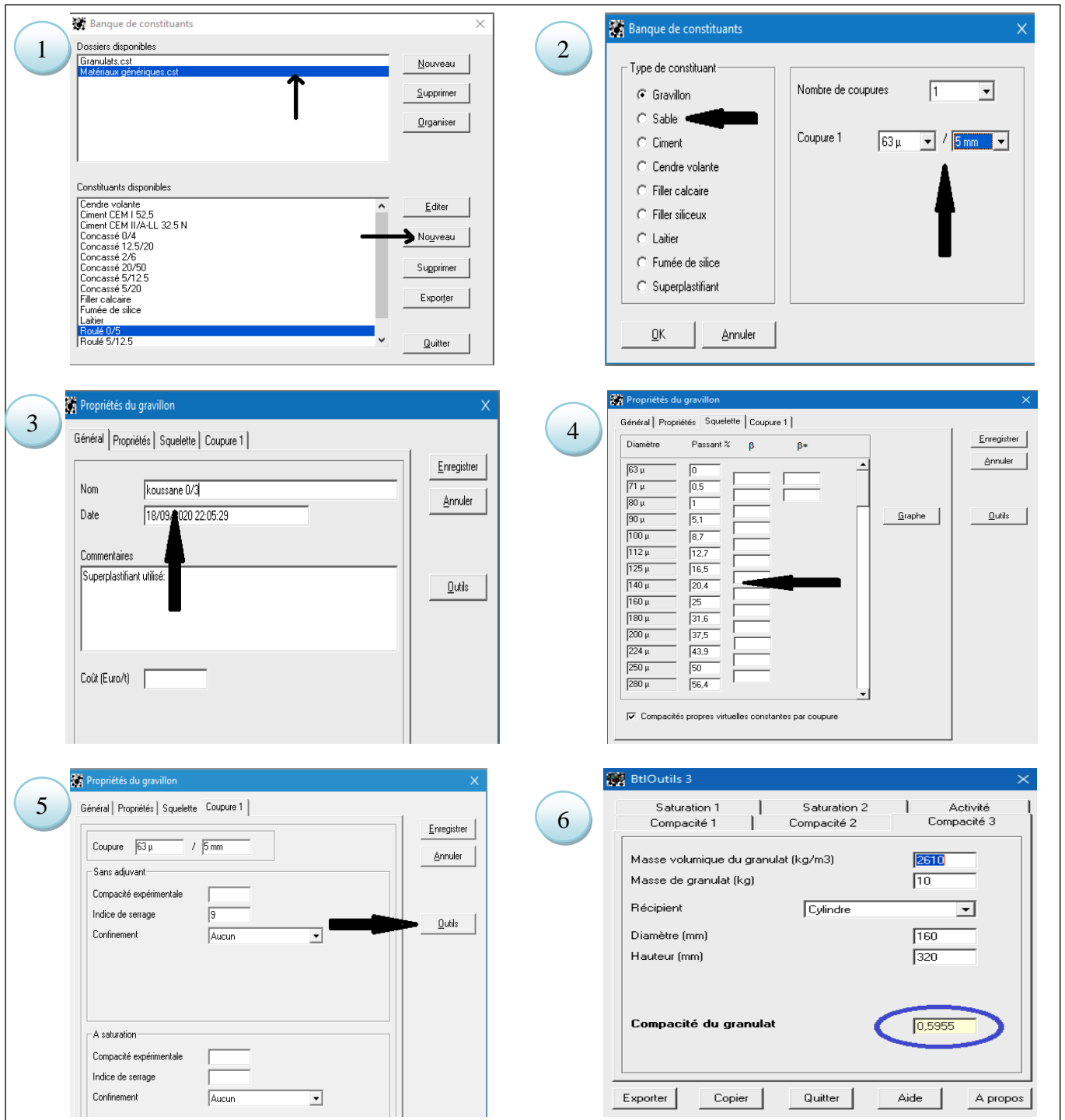


Figure IV.1: Méthode de calcul de la compacité virtuelle de chaque fraction granulaire par Béton lab free3.

Les étapes illustré ci-dessous sont pour le calcule de compacité de chaque fraction granulaire.

Pour le calcul de compacité d'un mélange granulaire il faut fournir tout d'abord pour chaque fraction granulaire :

- Le D_{\min} et D_{\max} .
- La masse volumique absolue du matériau.
- Le coefficient d'absorption du matériau.
- L'analyse granulométrique.

Et après sur Excel on introduire tout les résultats d'analyse granulométrique de chaque fraction dans un seul tableau afin d'obtenir la granulométrie du mélange, comme il est montré ci-dessus :

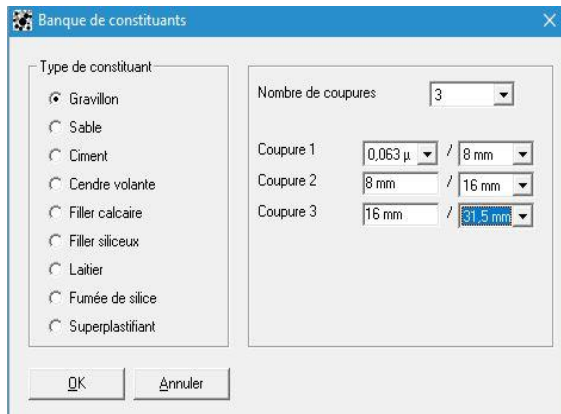
Tableau IV.1 : Tableau d'analyse granulométrique su mélange gravier 8/15 + 15/+25 + sable des dunes du Carrière de Koussane.

Ouverture Tamis	Refus partiel	Refus cumulés	% refus	% passant
31,5	0	0	0,00%	100,00%
25	0	0	0,00%	100,00%
20	974	974	9,74%	90,26%
16	3341	4315	43,15%	56,85%
12,5	2365	6680	66,80%	33,20%
10	1396	8076	80,76%	19,24%
8	744	8820	88,20%	11,80%
6,3	148	8968	89,68%	10,32%
5	11	8979	89,79%	10,21%
2,5	0	8979	89,79%	10,21%
1,25	0	8979	89,79%	10,21%
0,63	5	8984	89,84%	10,16%
0,315	367	9351	93,51%	6,49%
0,16	376	9727	97,27%	2,73%
0,08	245	9972	99,72%	0,28%

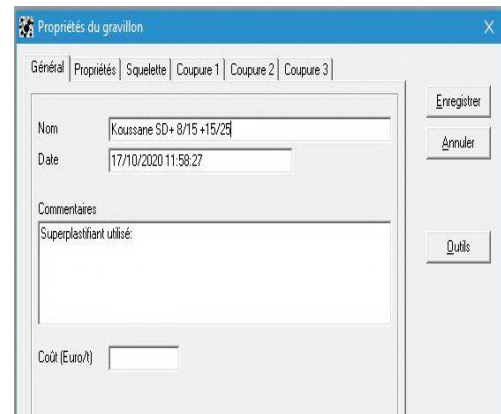
Aussi on calcul le moyen de la masse volumique absolue et le coefficient d'absorption de toutes les fractions afin d'introduire au logiciel.

Maintenant, on va calculer la compacité des mélanges granulaires, les étapes sont résumées ci-dessus :

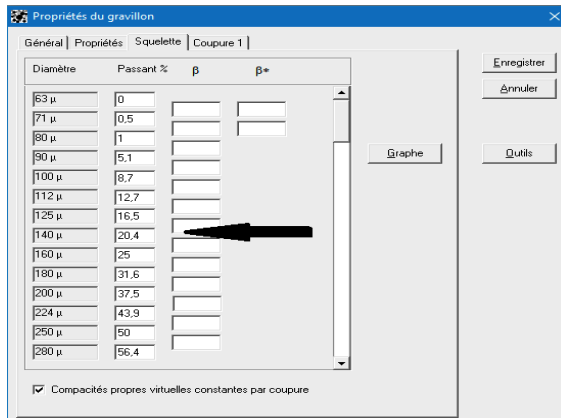
On introduit les coupures de chaque fraction



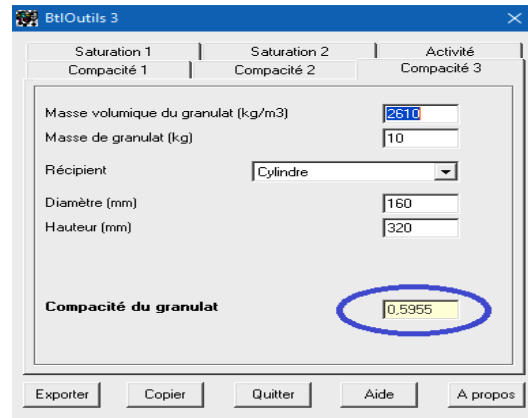
puis on nomme le fichier



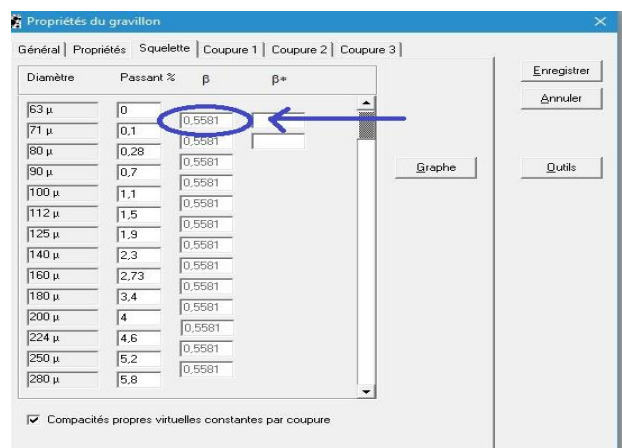
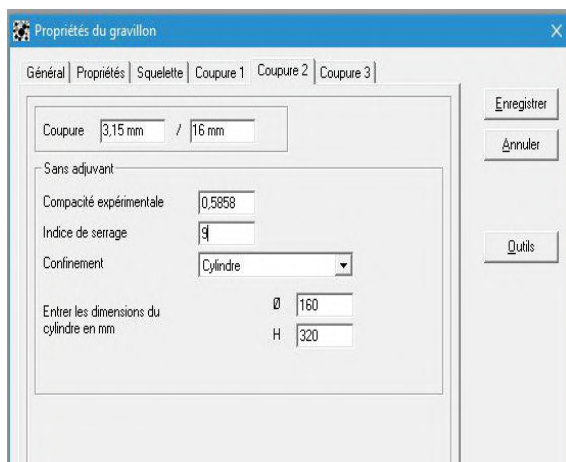
On introduit les résultats de granulométrie



puis sur outils on ajoute les valeurs suivantes



On ajoute la valeur de la compacité de chaque fraction et on fixe l'indice de serrage, après on sauvegarde les données ; et on revient à la fenêtre de granulométrie on trouve la valeur de compacité virtuelle de mélange.



Ensuite, nous répétons la même manière avec le changement de l'indice de serrage et enfin, remplissons le tableau.

Figure IV.2: Méthode de calcul de la compacité virtuelle d'un mélange granulaire par Béton lab free3.

2.2. Résultats de la compacité virtuelle des classes granulaires :

2.2.1. Koussane :

Tableau IV.2: Tableau des compacités virtuelles des classes granulaires de carrière de Koussane.

Diamètre	Masse Volumique (g/cm ³)	Compacité Virtuelle
Sable des Dunes	2,61	0,5955
0/3	2,7	0,5756
3/8	2,67	0,5821
8/15	2,65	0,5865
15/25	2,7	0,5756

2.2.2. Aougrouit :

Tableau IV.3 : Tableau des compacités virtuelles des classes granulaires de carrière d'Aougrouit.

Diamètre	Masse Volumique (g/cm ³)	Compacité Virtuelle
3/8	2,61	0,5955
8/15	2,61	0,5955
15/25	2,63	0,591

2.2.3. Charouine :

Tableau IV.4 : Tableau des compacités virtuelles des classes granulaires de carrière de Charouine.

Diamètre	Masse Volumique (g/cm ³)	Compacité Virtuelle
3/8	2,65	0,5865
8/15	2,63	0,591
15/25	2,65	0,5865

2.2.4. Aoulef :

Tableau IV.5: Tableau des compacités virtuelles des classes granulaires de carrière d'Aoulef.

Diamètre	Masse Volumique (g/cm ³)	Compacité Virtuelle
8/15	2,72	0,5714
15/25	2,70	0,5865

2.3. Compacité virtuelle des mélanges granulaires :

2.3.1. Compacité virtuelle du mélange granulaire de Koussane avec du sable des dunes :

Tableau IV.6: Tableau des compacités virtuelles du mélange granulaire de Koussane avec du sable des dunes.

Dmax (mm)	Indice de serrage K	Masse (kg)	Volume (l)	Compacité virtuelle SD
12,5	4,1	10	6,5	0,465
	4,5			0,4731
	4,75			0,4839
	5			0,4988
	6			0,5201
	7			0,527
	8			0,5347
	9			0,5491
20	4,1	10	6,5	0,6467
	4,5			0,6552
	4,75			0,6664
	5			0,6813
	6			0,7022
	7			0,7088
	8			0,7162
	9			0,7299
31,5	4,1	10	6,5	0,6901
	4,5			0,6988
	4,75			0,7101
	5			0,7251
	6			0,7463
	7			0,753
	8			0,7605
	9			0,7743

2.3.2. Compacité virtuelle du mélange granulaire de Koussane avec du sable concassé :

Tableau IV.7: Tableau des compacités virtuelles du mélange granulaire de Koussane avec du sable concassé.

Dmax (mm)	Indice de serrage K	Masse (kg)	Volume (l)	Compacité virtuelle SC
12,5	4,1	10	6,5	0,5095
	4,5			0,5173
	4,75			0,5276
	5			0,5416
	6			0,5616
	7			0,5681
	8			0,5753
	9			0,5887
20	4,1	10	6,5	0,6375
	4,5			0,646
	4,75			0,657
	5			0,6717
	6			0,6924
	7			0,699
	8			0,7063
	9			0,7198
31,5	4,1	10	6,5	0,6782
	4,5			0,6868
	4,75			0,6978
	5			0,7127
	6			0,7336
	7			0,7402
	8			0,7476
	9			0,7613

Présentation graphique :

La figure ci-dessous présente la compacité virtuelle du mélange granulaire de Koussane en Sable des dunes SD (x) et Sable concassé SC (y)

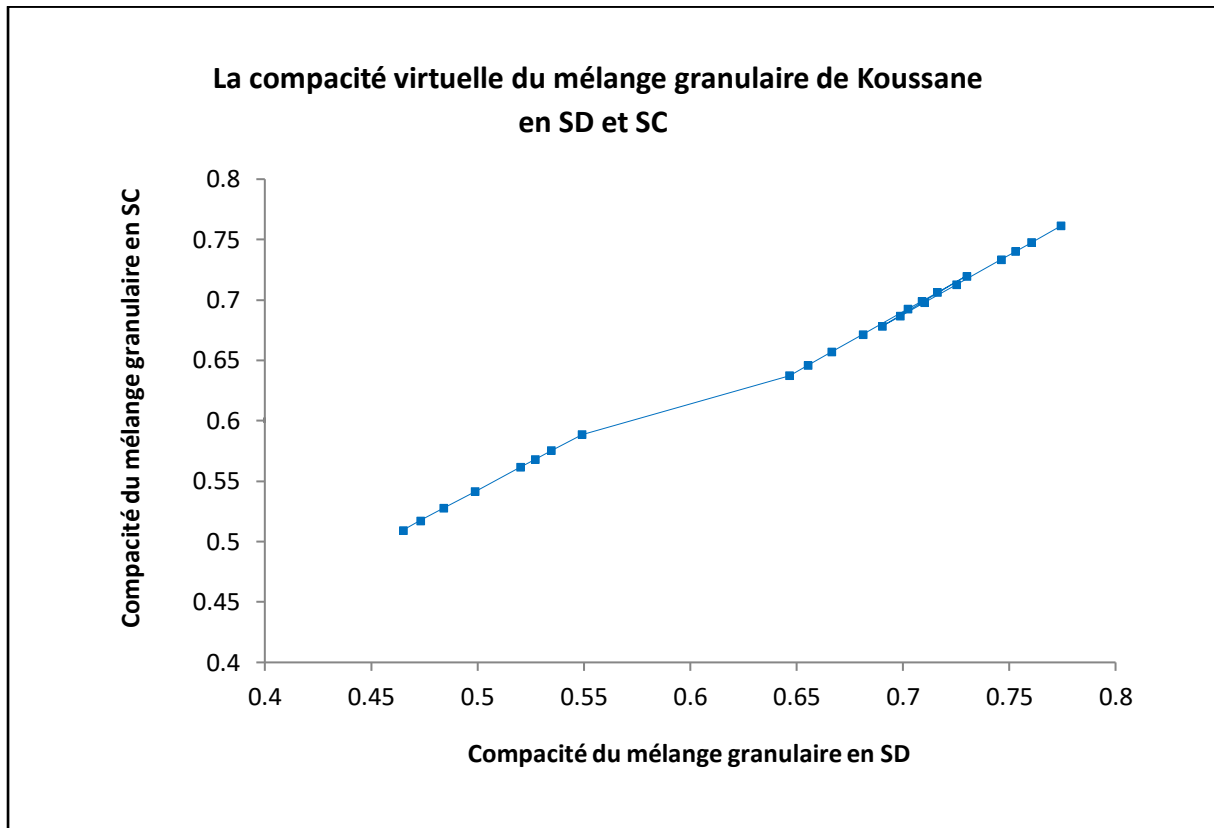


Figure IV.3: Compacité virtuelle du mélange granulaire de Koussane en SD et SC.

Interprétation :

Sur la figure IV.1 ci-dessus, nous présentons les résultats de compacités obtenus pour les différents mélanges granulaires de la carrière de Koussane avec le sable des dunes et le sable concassé.

Le courbe obtenue présente une relation linéaire entre la compacité virtuelle du mélange granulaire en sable des dunes (SD) et en sable concassé (SC), avec un accroissement en faveur du deuxième mélange, ce qui signifie que le mélange à base du sable concassé présente une meilleure compacité.

2.3.3. Compacité virtuelle du mélange granulaire d'Aougrouit avec du sable des dunes :

Tableau IV.8: Tableau des compacités virtuelles du mélange granulaire de d'Aougrouit avec du sable des dunes.

Dmax (mm)	Indice de serrage K	Masse (kg)	Volume (l)	Compacité virtuelle
12,5	4,1	10	6,5	0,4584
	4,5			0,4673
	4,75			0,479
	5			0,495
	6			0,5177
	7			0,525
	8			0,5331
	9			0,5483
20	4,1	10	6,5	0,6586
	4,5			0,6673
	4,75			0,6787
	5			0,6939
	6			0,7152
	7			0,722
	8			0,7295
	9			0,7434
31,5	4,1	10	6,5	0,6877
	4,5			0,6966
	4,75			0,7082
	5			0,7237
	6			0,7456
	7			0,7525
	8			0,7603
	9			0,7746

2.3.4. Compacité virtuelle du mélange granulaire d'Aougrouit avec du sable concassé :

Tableau IV.9: Tableau des compacités virtuelles du mélange granulaire d'Aougrouit avec du sable concassé.

Dmax (mm)	Indice de serrage K	Masse (kg)	Volume (l)	Compacité virtuelle
12,5	4,1	10	6,5	0,5462
	4,5			0,5544
	4,75			0,5652
	5			0,5798
	6			0,6006
	7			0,6072
	8			0,6146
	9			0,6283
20	4,1	10	6,5	0,6509
	4,5			0,6596
	4,75			0,6708
	5			0,6858
	6			0,7069
	7			0,7136
	8			0,721
	9			0,7348
31,5	4,1	10	6,5	0,6796
	4,5			0,6884
	4,75			0,6998
	5			0,7152
	6			0,7369
	7			0,7437
	8			0,7514
	9			0,7656

Présentation graphique :

La figure ci-dessous présente la compacité virtuelle du mélange granulaire d'Aougrouit en Sable des dunes SD (x) et Sable concassé SC (y)

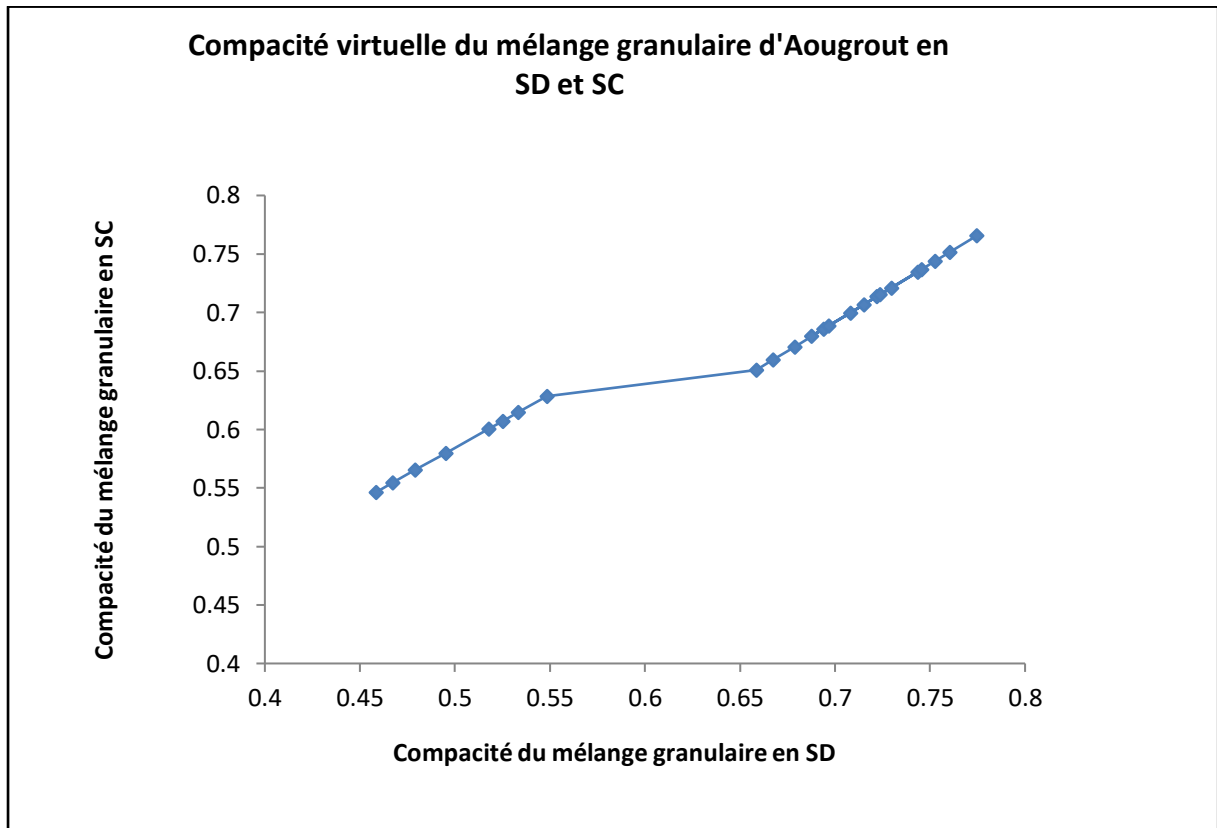


Figure IV. 4: Compacité virtuelle du mélange granulaire d'Aougrouit en SD et SC.

Interprétation :

Sur la figure IV.2 ci-dessus, nous présentons les résultats de compacités obtenus pour les différents mélanges granulaires de la carrière d'Aougrouit avec le sable des dunes et le sable concassé.

Le courbe obtenue présente que le mélange de sable concassé a une compacité meilleur que le mélange de sable des dunes.

2.3.5. Compacité virtuelle du mélange granulaire de Charouine avec du sable des dunes :

Tableau IV.10: Tableau des compacités virtuelles du mélange granulaire de Charouine avec du sable des dunes.

Dmax (mm)	Indice de serrage K	Masse (kg)	Volume (l)	Compacité virtuelle
12,5	4,1	10	6,5	0,4504
	4,5			0,4592
	4,75			0,4708
	5			0,4866
	6			0,5091
	7			0,5163
	8			0,5244
	9			0,5394
20	4,1	10	6,5	0,6619
	4,5			0,6704
	4,75			0,6814
	5			0,6962
	6			0,717
	7			0,7236
	8			0,7309
	9			0,7445
31,5	4,1	10	6,5	0,6887
	4,5			0,6975
	4,75			0,7089
	5			0,7242
	6			0,7456
	7			0,7524
	8			0,76
	9			0,774

2.3.6. Compacité virtuelle du mélange granulaire de Charouine avec du sable concassé :

Tableau IV.11: tableau des compacités virtuelles du mélange granulaire de Charouine avec du sable concassé.

Dmax (mm)	Indice de serrage K	Masse (kg)	Volume (l)	Compacité virtuelle
12,5	4,1	10	6,5	0,5429
	4,5			0,5511
	4,75			0,5618
	5			0,5763
	6			0,597
	7			0,6036
	8			0,6109
	9			0,6246
20	4,1	10	6,5	0,6548
	4,5			0,6634
	4,75			0,6744
	5			0,6891
	6			0,7099
	7			0,7165
	8			0,7238
	9			0,7374
31,5	4,1	10	6,5	0,6831
	4,5			0,6919
	4,75			0,7033
	5			0,7185
	6			0,7399
	7			0,7467
	8			0,7543
	9			0,7683

Présentation graphique :

La figure ci-dessous présente la compacité virtuelle du mélange granulaire de Charouine en Sable des dunes SD (x) et Sable concassé SC (y)

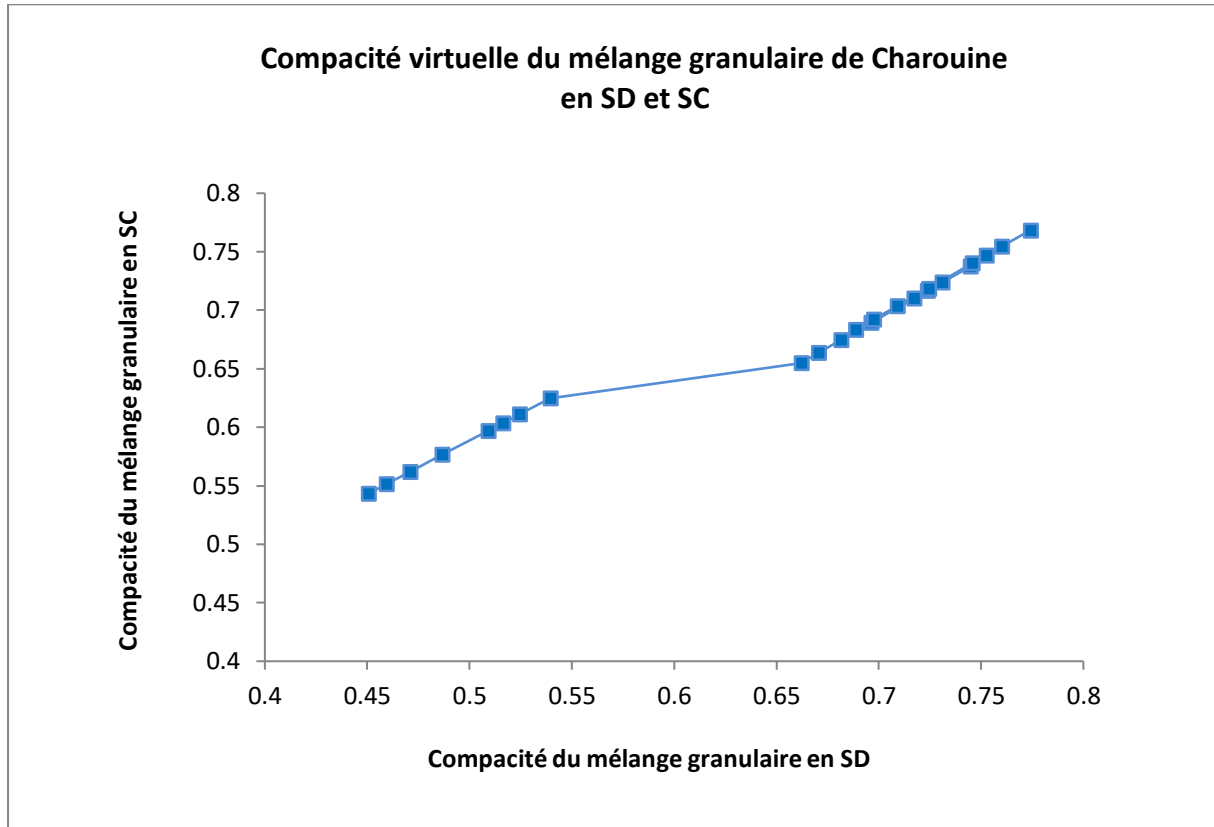


Figure IV.5: Compacité virtuelle du mélange granulaire de Charouine SD et SC.

Interprétation :

Sur la figure IV.3 ci-dessus, nous présentons les résultats de compacités obtenus pour les différents mélanges granulaires de la carrière de Charouine avec le sable des dunes et le sable concassé.

Le courbe obtenue présente une relation linéaire entre la compacité virtuelle du mélange granulaire en sable des dunes (SD) et en sable concassé (SC), avec un accroissement en faveur du deuxième mélange, ce qui signifie que le mélange à base du sable concassé présente une meilleure compacité.

2.3.7. Compacité virtuelle du mélange granulaire d'Aoulef avec du sable des dunes :

Tableau IV.12: Tableau des compacités virtuelles du mélange granulaire d'Aoulef avec du sable des dunes.

Dmax (mm)	Indice de serrage K	Masse (kg)	Volume (l)	Compacité virtuelle
12,5	4,1	10	6,5	0.4449
	4,5			0.4536
	4,75			0.465
	5			0.4805
	6			0.5027
	7			0.509
	8			0.5176
	9			0.5324
20	4,1	10	6,5	0.6199
	4,5			0.6285
	4,75			0.6396
	5			0.6545
	6			0.6756
	7			0.6823
	8			0.6897
	9			0.7034
31,5	4,1	10	6,5	0.6833
	4,5			0.692
	4,75			0.7031
	5			0.7181
	6			0.7391
	7			0.7458
	8			0.7532
	9			0.7669

2.3.8. Compacité virtuelle du mélange granulaire d'Aoulef avec du sable concassé :

Tableau IV.13: tableau des compacités virtuelles du mélange granulaire d'Aoulef avec du sable concassé.

Dmax (mm)	Indice de serrage K	Masse (kg)	Volume (l)	Compacité virtuelle
12,5	4,1	10	6,5	0.5327
	4,5			0.5407
	4,75			0.5512
	5			0.5655
	6			0.5857
	7			0.5922
	8			0.5993
	9			0.6128
20	4,1	10	6,5	0.6128
	4,5			0.6213
	4,75			0.6322
	5			0.647
	6			0.6678
	7			0.6744
	8			0.6817
	9			0.6953
31,5	4,1	10	6,5	0.6757
	4,5			0.6843
	4,75			0.6953
	5			0.7101
	6			0.7309
	7			0.7375
	8			0.7448
	9			0.7584

Présentation graphique :

La figure ci-dessous présente la compacité virtuelle du mélange granulaire d'Aoulef en Sable des dunes SD (x) et Sable concassé SC (y)

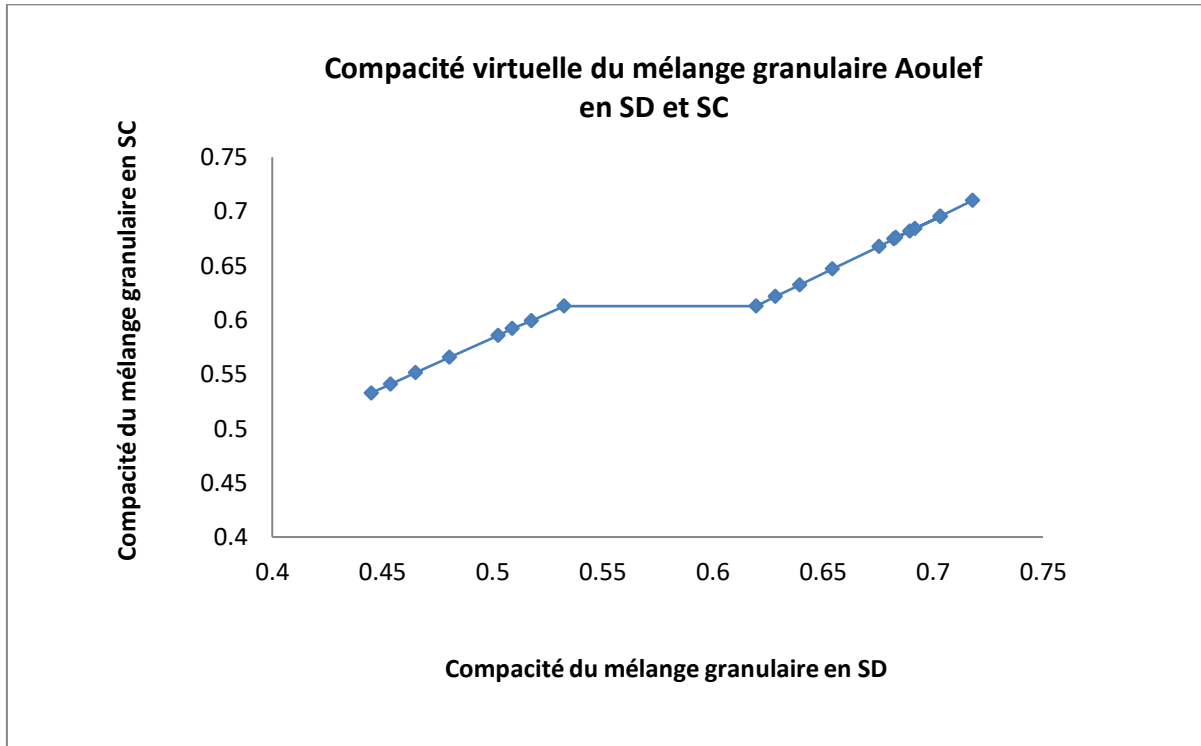


Figure IV.6: Compacité virtuelle du mélange granulaire d'Aoulef SD et SC.

Interprétation :

Sur la figure IV.4 ci-dessus, nous présentons les résultats de compacités obtenus pour les différents mélanges granulaires de la carrière d'Aoulef avec le sable des dunes et le sable concassé.

Le courbe obtenue présente une relation linéaire entre la compacité virtuelle du mélange granulaire en sable des dunes (SD) et en sable concassé (SC), avec un accroissement en faveur du deuxième mélange, ce qui signifie que le mélange à base du sable concassé présente une meilleure compacité.

IV.3. Conclusion :

Suite des résultats obtenue de calcul de la compacité virtuelle des mélanges granulaires des différents gisements locaux, il est clair que l'indice de serrage « K » ainsi que la nature du sable utilisé (sable des dunes généralement fines et sable concassé grossier) influent directement sur la compacité. Les échantillons prélevés à partir des gisements locaux après passer une toute série d'essais ont présenté des caractéristiques physiques et mécaniques trop près, ce qui affecté automatiquement sur les résultats de compacité virtuelle qui sont presque identiques.

CONCLUSION GENERALE

La formulation des bétons exige une compacité optimale du squelette granulaire, vu que les granulats représentent trois quarts du volume de béton. En effet, le problème que les chercheurs ont toujours tenté de résoudre, c'est l'obtention d'un arrangement maximale des grains.

De Larrad et ses collages ont permis de développer un modèle qui permet de déterminer théoriquement la compacité des mélanges granulaires. Appelé « le modèle d'empilement compressible (MEC) », qui été validé et a fait l'objet d'un logiciel de calcul nommé « BétonLab 3 free ». Ce dernier permet d'effectuer des mesures de compacités réelles de mélanges granulaires.

Vu à la situation inhabituelle à cause de la propagation de la pandémie du COVID-19, le confinement et la fermeture des établissements universitaires particulièrement les laboratoires, on était obligé à utiliser la méthode numérique pour le calcul de la compacité des mélanges granulaires par le logiciel Bétonlabfree 3.

Nous avons utilisés ce logiciel afin d'élaborer un calcul de la compacité des mélanges granulaires, à base de granulats locaux particulièrement celle de Aougrou, Aoulef, Charouine et Koussane.

Les résultats obtenus montrent bien que la compacité des mélanges granulaires atteint une valeur maximale de $C = 0,775$.

Les résultats obtenus restent à valider par une étude expérimentale et ne servent jamais à évaluer la fiabilité des travaux précédents présentée dans ce travail.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. Jean-Pierre Ollivier (2012), Propriétés physiques du béton et de ses constituants, Hermès – Lavoisier.
- [2]. Féret R. (1892), Sur la compacité des mortiers hydrauliques, Annales des Ponts et Chaussées, série 7, Volume 4, pp. 5-164.
- [3]. Fuller W.B. et Thompson S. (1907), The laws of proportioning concrete, Transactions of ASCE, ASCE, Volume 59, pp.67-143.
- [4]. Abrams D.A. (1923), Scientific method of making concrete, Journal of the Society of Chemical Industry, Vol. 42, Issue 46, 16 November, pp. 1094–1098.
- [5]. Bolomey J.C. (1925), Durcissement des mortiers et bétons, Paris : Rouge et Cie.
- [6]. Caquot (1937), Le rôle des matériaux inertes dans le béton, Mémoires de la Société des Ingénieur Civils de France, pp. 562-582, Juillet-Août.
- [7]. Faury J. (1944), Le béton : Influence de ses constituants inertes - Règles à adopter pour sa meilleure composition, sa confection et son transport sur les chantiers, 3ième édition, Dunod, Paris, France.
- [8]. Joisel A. (1952), Composition des bétons hydrauliques, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, 5ième année, N° 58, Série : Béton, béton armé, Octobre, France.
- [9]. Baron J. et Lesage R. (1976), « La composition du béton hydraulique, du laboratoire au chantier », Rapport de Recherche des Laboratoires des Ponts et Chaussées N°64, Décembre.
- [10]. Dreux G. et Festa J. (1995), Nouveau guide du béton et ses constituants, Editions Eyrolles, Paris, France, 409 p.
- [11]. BARON J., OLLIVIER J.P. (1996); Les bétons bases et données pour leur formulation, Edition Eyrolles, Paris, 522 p
- [12]. GOUPY Jacques. " Introduction aux Plans d'expériences : plans des doehlerte ". Dunod. Paris. 281pages. (2000). ISBN 2 10 004218 1.
- [13]. De Larrard F. (2000), Structures granulaires et formulation des bétons, Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, France, p. 414.
- [14]. Arroussi N. et Dahmani A. « Formulation de béton à base de granulats locaux et addition minérale (Fumée de silice) », Mémoire de Master en Matériaux en Génie Civil, Université Ahmed Draïa Adrar, 2018.

- [15]. Bauchy (2007), Rapport de projet expérimental : étude et contrôle du chaos dans un système mécanique, ENS Cachan, France, p. 38
- [16]. KHANTA RAO V.V.L., KRISHNAMOOTHYS. (1993), "Aggregate Mixture for Least Void Content for Use in Polymer Concrete", Cement, Concrete and Aggregates, CCAGDP, Vol. 15, N° 2, pp. 97-107.
- [17]. M. EL BARRAK 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.
- [18]. MM. Vincent Lédée, François de Larrard, Thierry Sedran, Frédéric Brochu [Méthode d'essai des lpc n°61, 2004].
- [19]. Stovall.T, de Larrard F., Buil.M. (1986) "Linear Packing Density Model of Grain Mixtures", Powder Technology", vol 48
- [20]. Sedran T. (1999), « Rhéologie et rhéométrie des bétons : Application à la formulation des bétons autonivelants », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, Mars.
- [21]. De Larrard F. (1988), « Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances », Rapports de recherche des LPC, N° 149, Paris, Mars.
- [22]. Sedran.T et de Larrard.F. (2000) « Manuel d'utilisation de René-LCPCversion 6.1d Logiciel d'optimisation granulaire », Septembre, p. 20.
- [23]. Sedran T. et de Larrard F. (1994), « RENE-LCPC – Un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux du génie civil », Note technique, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 194, Novembre-Décembre pp. 71-86.
- [24]. Mooney.M. (1951) « The Viscosity of concentrated Suspension of Spherical Particles », Journal of Colloids and Interfaces Science, vol 6, p.162.
- [25]. BOUREGBA. A et BENARBA. M 1998 « Analyse Fractale et Compacité des Mélanges Granulaires Sècs » Mémoire d'Ingéniorat, Université des Sciences et de la technologie d'Oran.
- [26]. Ifsttar « betonlabpro » (<https://betonlabpro.ifsttar.fr/betonlabfree/telecharger-betonlabfree/>) [En ligne] (consulté le 18 septembre 2020).
- [27]. BAALLAOUI Ahmed. MEHDI Mohamed 2017 « L'importance Et L'utilisation De La Géologie Dans L'exploitation Des Carrières (Cas Du Gisement De Koussan Wilaya D'Adrar) » Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.
- [28]. F. Yousfi. 2015 « L'influence Du Granularité Sur La Resistance Mécanique Du Béton » Mémoire de Master, Université d'ADRAR.
- [29]. A. Mounir, M. Belhadj 2015 « L'influence des matériaux locaux et de ciment de haut fourneau sur la résistance mécanique de béton » Mémoire de Master, Université d'ADRAR.

- [30].** Zouini Rokia 2018 « formulation de béton à base de granulats locaux (Zaouit Sidi Abdelah) » Mémoire de Master, Université d'ADRAR.
- [31].** N. Aroussi, A. Dahmani 2018 « formulation de béton à base de granulats locaux et addition minérale (fumé de silice) » Mémoire de Master, Université d'ADRAR.
- [32].** ABBOU. Z et MESSAOUDI. S 2019 « Formulation du Béton à base de matériaux locaux d'Adrar (Koussane) » Mémoire de Master, Université Ahmed Draia d'Adrar.

RÉSUMÉ

N'importe quelle étude de formulation de béton est basée sur la recherche en son sein d'un arrangement optimal des composantes en vue de fournir au mélange les meilleures performances.

Un squelette granulaire plus compact réduit le volume de vides dans le béton et laisse moins d'espace à remplir par la pâte de ciment, ce qui conduit à une augmentation de résistance et diminue le retrait et le fluage,

La compacité optimale du squelette granulaire joue alors un rôle essentiel sur les propriétés du béton, à l'état frais en particulier sur l'ouvrabilité comme à l'état durci notamment sur la résistance mécanique.

Dans ce mémoire, nous présentons un calcul de la compacité des mélanges granulaires des matériaux locaux (Granulats d' Adrar) des carrières de : Aoulef, Aougrou, Charouine et Koussane. À l'aide de logiciel **BétonLab free3** développé par **François de Larrard** et **Thierry Sedran**.

Mots clés : granulats, compacité, mélange, béton, squelette granulaire, BétonLab free3.

ABSTRACT

Any concrete mix design is based on research within it an optimal arrangement of the ingredients in order to provide the mixture with the best performance.

A more compact granular skeleton reduces the volume of voids in concrete and leave less space to fill with cement paste, which increased resistance and decreases shrinkage and creep.

The optimal compactness of the granular skeleton then plays an essential role on the properties of concrete, in the fresh state, especially on workability as in the hardened state notably in mechanical strength.

In this paper, we present a calculation of the compactness of the granular mixtures of local materials (Adrar aggregates) of the quarries of: Aoulef, Aougrou, Charouine and Koussane. Using **BétonLab free3** software developed by **François de Larrard** and **Thierry Sedran**.

Keywords: aggregates, compactness, mixing, concrete, granular skeleton, BétonLab free3.

ملخص:

تستند اي دراسة لصياغة الخرسانة على البحث عن تراص مثالي للحصى من اجل تحسين اداء الخليط. كلما كان الهيكل الحبيبي مرصوفا بشكل أفضل، ينقص حجم الفراغات في الخرسانة ويترك مجال اقل ليتم ملؤه بعجينة الاسمنت مما يؤدي الى تحسين المقاومة وإنقاص نسبة الانكماش والزحف على المدى الطويل. يلعب التراص الامثل للهيكل الحبيبي دورا اساسيا في خصائص الخرسانة في الحالة الطازجة، لاسيما فيما يتعلق بقابلية التشكيل كما في الحالة الصلبة ولا سيما المقاومة الميكانيكية. نقدم في هذا العمل حساب تراصية المخاليط الحبيبية للمواد المحلية (حصى أدرار) من محاجر اولف، أوقروت ، شروين و كوسان ، باستخدام برنامج **BétonLab 3 free** الذي طوره **François de Larrard** و **Thierry Sedran**.

الكلمات المفتاحية : الحصى، التراصية، المخاليط، الخرسانة، الهيكل الحبيبي، BétonLab 3 free