

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEINEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

N° d'ordre :.....

N° de série :.....

Mémoire de Magister

Filière : Génie Civil

Option : Structures-Matériaux-Sols

THEME

Influence de la granularité (classe granulaire 4/22.4) sur les caractéristiques des granulats et sur les propriétés des bétons ordinaires

Présenté par :

Mr **BOUFEDAH BADISSI** Ahmed

Directeur de Mémoire : Dr **BENTALHA** Malika .Université **MENTOURI** Constantine

Devant le jury :

Président : Professeur **HOUARI** Hacène Université **MENTOURI** Constantine

Examineurs :

Dr **ABDOU** Maitre de Conférences Université **MENTOURI** Constantine

Dr **FERKOUS S.** Maitre de Conférences Université **MENTOURI** Constantine

Janvier 2011

Remerciements

Ils vont directement à toutes les personnes qui ont croisé mon parcours de travail et qui m'ont offert leur aide, leur soutien quand j'en ai eu besoin. Il est important de dire que mon travail de recherche m'a permis de faire des rencontres qui si elles m'ont permis d'avancer et de finir, me permettent de dire que l'aventure sur le plan humain a été aussi, sinon plus importante que celle sur le plan scientifique.

En Algérie, il existe des organismes, des entreprises qui se mettent au service de l'universitaire, il n'y a qu'à demander, parce que pour eux, il est très important que l'on avance ensemble. Je citerai le ENG KHROUB, le CTC Est (agence de Constantine, Tarf et Annaba), le LTPE. Constantine. Je ne remercierai jamais assez tous les techniciens qui m'ont offert leur savoir faire, je leur adresse toute ma sympathie.

Faire de la recherche est une aventure passionnante, pour toutes les difficultés que cela représente, c'est pour cela que je voudrai exprimer toute ma reconnaissance à celui qui m'a beaucoup aidé et m'a permis de vivre cette expérience, mon directeur de Mémoire :

Dr **BENTALHA Malika**

Je voudrai exprimer ma gratitude pour toute l'aide apportée, envers toute l'équipe de laboratoire central des granulats (Entreprise National des Granulats).

Je remercie le Président de jury, le professeur **HOUARI Hacène** et les membres de jury mes respectueux enseignants le docteur **ABDOU.K** et le docteur **FERKOUS S.**

Je terminerai en disant que si l'on se retrouve seul devant le jury, c'est que derrière soi une famille, des amis nous servent de soutien et il est très agréable de leur offrir ce travail en guise de reconnaissance.

ملخص:

كما هو معروف أن أساس إنشاء و بلورة المعايير و المواصفات هو المعارف و الخبرات المكتسبة من خلال البحوث و التجارب المنجزة من طرف ذوي الاختصاص، ذلك ما هي عليه المواصفة الجزائرية الخاصة بالركام التي هي في طور الأعداد و التحضير المستمر قصد تحسينها و الرفع من مستواها الهادف إلى مواكبة الاحتياجات الحالية الخاصة بالمعطيات الجزائرية، و عليه قمنا بالتعاون مع المؤسسة الوطنية للحصى بتسطير بحث أولي هو بمثابة التمهيدي لبحوث لاحقة فعلية، وذلك قصد جمع المعطيات اللازمة و تسليط الضوء عليها من أجل التحضير لمعالجتها و دراستها بشكل أعمق و أنجع.

البحث يتركز أساسا على إظهار مدى تأثير حذف الفئة الجزئية 25/22.4 مم قصد إنقاص حجم الحبيبة الاعتبارية على مقاومة الضغط.

لأجل الشروع في البحث قصد الوصول للأهداف المسطرة ، باشرنا بإنجاز تحاليل التمييز و دراسة الخصائص لكل فئات الركام المستعمل لإنجاز خرسانة التجارب حيث أخضعنا خمس خلائط خرسانة للدراسة ؛ خرسانة الدليل ، خرسانة الركام المعادة التركيب ،خرسانة الفئة 25/0 مم(م) ناتجة عن استعمال الركام 22.4/4 مم المنتج من خلال إعادة تعديل ركام الفئة 25/0 مم).وأتومنا بانجاز مقارنة لمختلف الخرسانة المدروسة مع أخرى استعملت في انجاز مشاريع حديثا.

الطريقة المستعملة لصياغة نسب مكونات الخرسانة هي طريقة Dreux-Gorisse. عمدنا إلى توحيد المعطيات الأساسية لتكوين الخرسانة و بعض الخصائص قصد تفعيل المقارنة و جعلها أكثر واقعية بتوفير نفس الشروط لأجل الحصول على قراءة جيدة و تجنب إلى أقصى حد ممكن التأثيرات الجانبية غير المرغوب فيها أو غير المسطرة في البحث.فيما عمدنا إلى تركيز المقارنة على ما يلي :

التحاليل المنجزة على مختلف فئات الركام المنفصلة و المعاد تركيبها الداخلة في تكوين جميع خلطات الخرسانة المنجزة خصت كل من منحني لتدرج الحبيبي ،معامل الحبيبات المسطحة ،المسامية ما بين الحبيبات ،متانة الركام ،نسبة الحبيبات الناعمة.

فيما يخص الخرسانة قمنا بإجراء التجارب على الخرسانة الطرية(فحص الهبوط ،الكثافة) كما على الخرسانة الصلبة (مقاومة الضغط لكل من عمري 7 أيام و 28 يوم ، مقاومة الانحناء لعمر 28 يوم)

دراسة تأثير استعمال فئة ركام واحدة المسماة الفئة الممتدة أو الفئة المبسطة d/D المصنوعة على دفعة واحدة عبر كامل مراحل التصنيع حتى التسويق و التي تمتد أبعاد حبيباتها من d أصغر بعد لحبيبات الركام الخشن و D أكبر بعد ، بدلا من استعمال عدة فئات متفرقة تسوق كل منها على حدا حيث تجمع فيما بينها أثناء تكوين الخرسانة في نسب معينة ناتجة عن حسابات خاضعة لطرق صياغة مكوناتها، وذلك على خصائص و ميزات الخرسانة.

الركام الخاضع للبحث (ركام المؤسسة الوطنية للحصى)يتجاوب مع متطلبات الجودة اللازمة لصنع الخرسانة كما نسجل تطابقها مع ما تقره المواصفات الجزائرية و الأوروبية.

الفئات المقترحة أعطت نتائج طيبة تبشر بإمكانية استعمال الفئة المبسطة أو الممتدة في صنع الخرسانة مع تسجيل إمكانية تحسين مقاومة الانحناء بتحسين التدرج الحبيبي للخرسانة عن طريق استعمال الفئة المبسطة أو الممتدة.

كلمات المفتاح:

الخرسانة، مقاومة، ركام، مواصفة.

Résumé

Les granulats utilisés dans les travaux de bâtiment et de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage.

L'application d'une nouvelle norme algérienne concernant les granulats, étant en pleine élaboration, nous avons, en collaboration avec l'E.N.G (Entreprise Nationale des Granulats), axé notre recherche sur l'influence de l'élimination d'une classe granulaire 22,4 – 25, sur la résistance des bétons. Il est nécessaire d'en établir les différentes caractéristiques par différents essais de laboratoire. Pour ce faire, nous avons procédé à la caractérisation des granulats entrant dans la composition de cinq mélanges : un béton témoin, trois bétons recomposés (pourcentage de classes granulaires variable) et un béton de graves commercialisés. Ce travail est complété par une étude comparative avec trois bétons analysés et confectionnés sur chantiers, pour la réalisation de projets.

La méthode de formulation utilisée est celle de Dreux – Gorisse. Nous avons deux paramètres constants $E/C = 0,61$, $G/S = 1,57$. Nous avons obtenu les caractéristiques suivantes pour des classes granulaires étalées comme : le coefficient d'aplatissement, de Micro Deval, de Los Angeles, le pourcentage de fines etc. Nous avons effectué des essais sur bétons frais comme l'affaissement et sur bétons durcis, la détermination des résistances à la compression (7 et 28 jours) et les résistances à la traction par flexion à 28 jours.

Les résultats obtenus démontrent que les granulats de L'E.N.G, se conforment aux normes européennes en vigueur et donc aux normes algériennes mises en place par les expérimentations faites au laboratoire de l'entreprise. Les résistances obtenues sont supérieures à celles visées 20 MPA, elles dépassent 25 MPA pour presque tous les mélanges.

.....
Mots clés :

Norme – caractérisation – granulats – bétons – résistances

Abstract

Aggregates used in the work of building and civil engineering must meet quality requirements and characteristics of each use. The application of a new standard of Algeria concerning aggregates, being in full development, we, in collaboration with the ENG (National Aggregates Enterprise), focused our research on the influence of the elimination of a granular class 22.4 to 25, on the strength of concrete. It is necessary to establish the different characteristics by different laboratory tests. To do this, we conducted the characterization of aggregates in the composition of five blends: a control concrete, three concrete recomposed (granular variable percentage of classes) and a concrete grave marketed. This work is complemented by a comparative study with three concretes tested and made on sites for the projects. The design method used is that of Dreux - Gorisse. We have two constant parameters $W / C = 0.61$, $G / S = 1.57$. We obtained the following characteristics for spreading granular classes such as: kurtosis, Micro-Deval, Los Angeles, the percentage of fines etc.. We conducted tests on fresh concrete such as slump and concrete hardened, the determination of compressive strength (7 and 28 days) and tensile strength in bending to 28 days. The results show that aggregates of the FRE, comply with European standards and thus to Algerian standards established by the experiments made in the laboratory of the company. The resistors are superior to those obtained under 20 MPa, they exceed 25 MPa for almost all mixtures.

.....

Keywords:

Standard - characterization - aggregates - concrete - Resistors
...

Liste des symboles

Description	Symbole
Module de finesse	MF
Teneur en eau	W
Pourcentage des fines	f
Valeur de bleu de méthylène	MB
Equivalent de sable	ES
Aplatissement	A
Micro-Deval en présence d'eau	MDE
Los-Angeles	LA
Masse volumique en vrac	ρ_b
Masse volumique réelle	ρ_{rd}
Porosité inter-granulaire	v
Coefficient granulaire	G
Dosage en ciment	C
Classe vraie du ciment	σ_c
Résistance nominale demandée	σ_n
Résistance moyenne à viser à vingt huit jours	σ_{28}
Dosage en eau	E
Volume absolu des grains de ciment	C
Terme correcteur	K
Terme correcteur tenant compte la valeur de module de finesse	Ks
Terme correcteur tenant compte le béton pompable.	Kp
Coefficients D'uniformité	Cu
Coefficients De courbure	Cc
Rapport eau sur ciment	E/C
Rapport gros granulats sur sable	G/S
Diamètre maximum d'un granulat	Dmax
Classe de consistance	S _i
Classe d'exposition	XCi
Résistance à la traction	ft
Résistance en compression	fc
la résistance caractéristique mesurée sur cylindres	f _{ck-cyl}
la résistance caractéristique mesurée sur cubes.	f _{ck-cube}

SOMMAIRE

Titres	Pages
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : ETAT DE CONNAISSANCES	
1. Le béton.....	3
1.1. Définition	3
1.2. Types de bétons	4
1.2.1. Leur destination	4
1.2.2. Leur masse volumique.....	4
1.2.3. Leur granularité.....	5
1.2.4. Leur consistance (cône d'Abrams).....	5
1.2.5. Leur résistance à la compression sur cylindre fck.....	5
1.3. Propriétés du béton	6
1.3.1. Propriétés du béton frais.....	6
1.3.1.1. Affaissement au cône d'Abrams.....	6
1.3.1.2. La masse volumique du béton frais.....	7
1.3.2. Propriétés du béton durci	8
1.3.2.1. Résistance à la compression	8
1.3.2.2. Résistance à la traction par flexion.....	8
2. Les constituants du béton	9
2.1 Introduction.....	9
2.1.1 Eau de gâchage.....	9
2.1.2 Aptitude à l'emploi.....	9
2.2 Les granulats.....	10
2.2.1 Définition.....	10
2.2.2 Caractéristiques.....	10
2.2.2.1 Caractéristiques intrinsèques	10
2.2.2.2 Caractéristiques de fabrication	14
2.2.3 Classification des granulats.....	17
2.2.4 Les types des granulats.....	17
2.2.4.1 En fonction de leur masse volumique réelle.....	17
2.2.4.2 En fonction de leur origine.....	18
2.2.4.3 En fonction de la forme de leurs grains.....	18
2.2.5 Production des granulats.....	18
2.2.5.1 Le décapage	19
2.2.5.2 L'extraction.....	19
2.2.5.3 Concassage et broyage.....	19
2.2.5.4 Le criblage.....	21
2.2.5.5 Le lavage.....	21
2.2.5.6 Le définage.....	21
2.2.5.7 Classification granulométrique des produits.....	22
2.2.5.8 Stockage et livraison.....	22
2.2.5.9 Contrôle et assurance de la qualité.....	22

2.3	Le ciment.....	22
2.3.1	Introduction.....	22
2.3.2	Principe de fabrication ciment portland.....	23
2.3.3	Constituants principaux et additions.....	23
2.3.3.1	Constituants du clinker.....	23
2.3.3.2	Les autres constituants des ciments.....	24
2.3.4	Catégories de ciment.....	25
2.3.4.1	En fonction de leur composition.....	25
2.3.4.2	En fonction de leur résistance normale.....	25
3	Formulation du béton.....	26
3.1	Essai en laboratoire.....	26
3.2	Méthodes de formulation	26
3.2.1	Méthode de Bolomey.....	27
3.2.2	Méthode d'Abrams.....	27
3.2.3	Méthode de Faury	28
3.2.4	Méthode de Valette.....	28
3.2.5	Méthode Dreux-Gorisse	29
3.3	Étude de la composition du béton.....	29
3.4	La composition de béton à l'aide de la méthode Dreux-Gorisse	30
3.4.1	Dosage en ciment.....	30
3.4.2	Dosage en eau.....	30
3.4.3	Dosage en granulat	31
3.4.4	Corrections.....	32
3.5	Présentation de la carrière E.N.G unité d'ELKHROUB.....	33
3.5.1	Entreprise nationale des granulats	33
3.5.2	Unité d'ELKHROUB.....	33
3.5.2.1	Localisation.....	33
3.5.2.2	Aperçu géologique	34
3.5.2.3	Condition d'exploitation minière.....	34

CHAPITRE 2 : PROGRAMME EXPERIMENTAL	
2. Programme expérimental.....	35
2.1. Introduction	35
2.2. Caractérisation des constituants.....	35
2.2.1. Le ciment.....	35
2.2.2. L'eau de gâchage.....	35
2.2.3. Caractérisations des granulats.....	36
2.2.3.1 Courbes granulométriques.....	36
a/ Sable concassé 0/4.....	36
b/ Gravillon 4/8.....	37
c/ Gravillon 8/16.....	38
d/ Gravillon 16/22.4.....	40
e/ Gravillon de grave (Gg) 4/22.4.....	41
2.2.3.2 Analyses complémentaires.....	42
a/ Granulat fin sable.....	42
b/ Gros granulats.....	43
2.3 Méthodologie d'étude et méthode de formulation des bétons.....	43
2.3.1 Méthodologie d'étude.....	43
2.3.1.1 Béton témoin (béton T).....	43
2.3.1.2. Béton de grave (béton G).....	43
2.3.1.3 Béton recomposé (béton R)	44
2.3.2 Formulation des bétons d'études.....	44
2.3.2.1 Choix d'une méthode de formulation.....	44
2.3.2.2 La partie normative pour les bétons d'étude.....	45
a/ Classe d'exposition du béton.....	45
b/ Classe de résistance du béton.....	45
c/ Classe de consistance du béton.....	45
d/ Classe de masse volumique du béton.....	46
e/ Valeurs limites spécifiées applicables à la composition et aux propriétés des bétons.....	46
2.4 Calcul de la proportion des constituants.....	46
2.4.1 Formulation du béton témoin : Bt.....	46
2.4.2 Propriétés de Bt.....	47
2.4.2.1 La résistance	47
2.4.2.2 Dimension maximale des granulats D_{max}	47
2.4.2.3 La consistance	47
2.4.2.4 Dosage en ciment.....	47
2.4.2.5 Le rapport E/C.....	47
2.4.3 Application numérique.....	48
2.4.3.1. Données de base	48
2.4.3.2 Résistance moyenne et rapport E/C.....	48
2.4.3.3 Dosage en ciment	48
2.4.3.4 Dosage en eau	49
2.4.3.5 Dosage des granulats.....	49
2.5 Performances du béton à l'état frais comme durci.....	51

2.5.1 Affaissement au cône d'Abrams.....	51
2.5.1.1 Principe de l'essai.....	51
2.5.1.2 Appareillage	51
2.5.1.3 Mode opératoire	52
2.5.2 Résistance à la compression.....	53
2.5.3 Résistance à la traction par flexion.....	55
2.6 Conclusion	56

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS	
3. Résultats et discussions.....	57
3.1. Introduction	57
3.2. Résultats des essais effectués sur granulats à sec.....	57
3.2.1 Granulométrie.....	57
3.2.2 Aplatissement.....	60
3.2.3 Masse volumique en vrac.....	61
3.2.4 Porosité inter-granulaire.....	62
3.3. Les résultats des essais effectués sur bétons.....	63
3.3.1. Essais sur béton frais.....	63
3.3.1.1 Masses volumiques	63
3.3.1.1 Affaissement.....	64
3.3.2 Essais sur bétons durcis.....	65
3.3.2.1 La résistance.....	65
a/ Résistance à la compression à 7 et 28 jours	65
b/ Traction à 28 jours.....	67
3.4 Etude comparative.....	67
3.4.1 Présentation des bétons à comparer	68
3.4.1.1 Béton B _{LTPE} . Constantine	68
3.4.1.2 Béton B _{CTC} . Annaba	68
3.4.1.3 Béton B _{sarl.L.V.B}	68
3.4.2 Analyse des granulats	68
3.4.2.1 Sable	68
a/ Granulométrie	68
b/ Module de finesse MF	69
c/Pourcentage de fine f.....	69
d/Equivalent de sable	70
e/Valeur au bleu	70
3.4.2.2 Gros granulats.....	70
a/ Pourcentage des fines	70
b/ Aplatissement	71
c/ Los Angeles.....	72
3.4.3 Propriétés des bétons.....	72
3.4.3.1 Affaissement.....	72
3.4.3.2 Résistances.....	73
3.4.4 Valorisation des résultats.....	74
3.4.4.1 Utilisation de la classe granulaire étalée 4/22.4.....	74
a/ Influence sur la résistance	74
b/ Influence sur l'ouvrabilité.....	75
c/ Influence sur l'économie	75
3.4.4.2 L'effet de l'élimination de la fraction 22.4/25.....	75
a/ Influence sur la résistance à la compression	75
b/ Sur la mise en œuvre	76
	76

c/ Sur l'économie	76
3.5 Conclusion.....	76
CONCLUSION GENERALE.....	77
REFERENCES.....	79
ANNEXES.....	81

N°	F IGURES	Pages
1	Structure hétérogène du béton.....	3
2	Essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	6
3	Mesure de l'affaissement.....	7
4	Béton frais.....	7
5	Essai de traction par flexion.....	9
6	Détermination des pourcentages en volume absolu de matériau.....	32
7	Sable concassé 0/4 (carrière ENG).....	36
8	Courbe granulométrique pour sable concassé 0/4.....	37
9	Gravillon 4/8 (carrière ENG).....	37
10	Courbe granulométrique pour granulat 4/8.....	38
11	Granulat 8/16.....	38
12	Courbe granulométrique pour granulat 8/16.....	39
13	Gravillon 16/22.4.....	40
14	Courbe granulométrique pour granulat 16/22.4.....	41
15	Courbe granulométrique pour granulat Gg.....	42
16	Essai d'affaissement.....	52
17	Les différentes classes de consistance de l'essai d'affaissement.....	53
18	Machine d'essai d'écrasement (essai à la compression).....	54
19	Eprouvettes pour l'essai d'écrasement (compression).....	55
20	Essai de traction par flexion.....	55
21	Machine d'essai de traction par flexion.....	56
22	Eprouvette 7x7x28 cm.....	56
23	Eprouvettes coulées.....	56
24	Courbe granulométrique pour granulat témoins Gt.....	58
25	Courbe granulométrique pour granulat Gr1.....	58
26	Courbe granulométrique pour granulat Gr2.....	59
27	Courbe granulométrique pour granulat Gr3.....	59
28	Variation de l'aplatissement.....	61
29	Masses volumiques en vrac.....	62
30	Porosité.....	63
31	Masses volumiques des bétons frais.....	64
32	Affaissements.....	65
33	Résistance à la compression à 7 jours.....	66
34	Résistance à la compression à 28 jours.....	66
35	Résistance à la traction à 28 jours.....	67
36	Mauvais surfaçage des éprouvettes.....	74

N°	TABLEAUX	Pages
1.	Types de béton en fonction de leur destination.....	4
2.	Types de béton en fonction de leur masse volumique.....	4
3.	Types de béton en fonction de D_{max}	5
4.	Types de béton en fonction de leur consistance.....	5
5.	Classes de résistance à la compression.....	5
6.	Ajouts cimentaires.....	24
7.	Résistances à la compression.....	25
8.	Valeurs optimales d'après Abrams du module de finesse des compositions.....	27
9.	Caractéristiques du ciment.....	35
10.	Résultat de l'analyse granulométrique de sable.....	36
11.	Résultat de l'analyse granulométrique de Granulat 4/8.....	38
12.	Résultat de l'analyse granulométrique de gravillon 8/16.....	39
13.	Résultats de l'analyse granulométrique des granulats 16/22.4.....	40
14.	Résultat de l'analyse granulométrique de Granulat 4/22.4 de grave.....	41
15.	Caractéristiques physico-chimiques du sable 0/4.....	42
16.	Analyses complémentaires pour gravillons.....	43
17.	Pourcentage des granulats élémentaires.....	44
18.	Classe de consistance en fonction de l'affaissement.....	46
19.	Valeurs limites spécifiées applicables à la composition et aux propriétés des bétons.....	46
20.	Donnés de bases pour la formulation.....	48
21.	Valeurs de G coefficient granulaire.....	48
22.	Valeurs de la correction sur le dosage en eau.....	49
23.	Valeurs du terme correcteur k.....	49
24.	Valeurs du coefficient de compacité γ	50
25.	Résultats de l'analyse granulométrique.....	57
26.	Coefficients C_u et C_c	60
27.	Aplatissement.....	60
28.	Masses volumiques en vrac.....	61
29.	Porosité inter-granulaire.....	62
30.	Densité du béton.....	63
31.	Affaissements.....	64
32.	Résistances à la compression.....	65
33.	Résistance à la traction à 28 jours.....	67
34.	Caractéristiques des sables étudiés.....	69
35.	Coefficients d'aplatissement.....	71
36.	Coefficients Los Angeles.....	72
37.	Affaissements et rapports E/C.....	73
38.	Résistances, E/C, D_{max} et G/S.....	73
39.	Cause des pertes de résistances.....	75
40.	Variation de la résistance théorique en fonction du rapport E/C.....	76

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Une société moderne compte de plus en plus d'activités liées à la construction. Cette perpétuelle évolution fait que l'on construit tous les jours des routes, des autoroutes, des ponts, des voies de chemin de fer, des habitations, des barrages etc. L'activité de construction est immanquablement liée à la notion de développement d'un pays.

L'évolution historique des techniques de construction a vu l'utilisation de divers matériaux parmi lesquels on pourra citer le torchis, le bois, la pierre de taille, l'acier et le verre pour les bâtiments, la terre battue, les dalles ou les pavés pour les infrastructures de transport. Chacun de ces matériaux trouve toujours son utilité pour des besoins spécifiques. Mais les méthodes de construction qui répondent aujourd'hui le mieux aux attentes de nos sociétés sont celles qui passent par la mise en œuvre de granulats, qui répondent à la définition de « matériaux granulaires utilisés dans la construction ». Ces matériaux sont issus d'une ressource pratiquement universelle, leur élaboration est relativement simple, leur transport facile, leur mise en œuvre rapide. Aujourd'hui, les mélanges granulaires, bétons, mortiers, graves traitées ou non traitées, enrobés, représentent la solution la plus logique et la plus économique pour la construction des infrastructures.

Ainsi, à l'heure où la préservation de l'environnement est devenue une exigence sociétale, l'exploitation des granulats naturels en carrières permet de s'assurer de la pérennité des approvisionnements, avec une volonté affichée de concilier les impératifs économiques et environnementaux dans une perspective de développement durable.

Les granulats de part l'importance de leur utilisation à travers le monde constituent après l'air et l'eau, la troisième substance consommée par l'homme. A titre d'information, on consommerait en moyenne par nature d'ouvrage et de granulats :

- 2 tonnes pour 1 mètre cube de béton
- 200 à 300 tonnes pour un logement
- 20000 à 40000 tonnes pour un hôpital ou un lycée
- 10000 tonnes pour 1 kilomètre de voie ferrée
- 30000 tonnes pour 1 kilomètre d'autoroute.

Les granulats font l'objet d'études de plus en plus poussées pour définir leurs propriétés et leurs caractéristiques. La technologie des bétons s'est développée de telle manière à obtenir des bétons de plus en plus performants avec un degré de technicité induisant des niveaux de performances et de sécurité requis pour la construction des ouvrages, ce qui a imposé une normalisation et une optimisation de la qualité des granulats. Il faut avoir une connaissance précise de ces matériaux utilisés en génie civil. Ils doivent répondre à des critères précis de qualité et de régularité, définis par des normes.

La recherche concernant la validation sur le béton a pour objectif de mettre en évidence l'influence des constituants, notamment leur dosage sur les différents paramètres (propreté, masse volumique, coefficient d'aplatissement.....).

Dans ce travail de recherche, nous proposons un sujet défini conjointement avec l'entreprise nationale des granulats de Constantine, sur la proposition de formuler des bétons en éliminant une classe granulaire et d'analyser l'influence de l'introduction de différents pourcentages des granulats de diamètre variant de 4 à 22,4.

Le mémoire est constitué de trois chapitres. Le premier chapitre concerne l'état de l'art. Nous avons fait une synthèse bibliographique sur le matériau béton, sur les composants granulaires. Nous donnons les différentes caractéristiques à prendre en compte dans les formulations.

Le deuxième chapitre expose le programme expérimental effectué. Nous avons défini toutes les caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques des différents granulats, du ciment et de l'eau comme le module de finesse, le pourcentage en fines, la valeur du bleu de méthylène, l'équivalent de sable, la teneur en eau, les coefficients d'aplatissement, de micro Deval, Los Angeles, les masses volumiques en vrac, la valeur de la porosité inter granulaire. Les analyses granulométriques de chacune des classes granulaires 0/4, 4/8, 8/16, 16/22,4 ont été établies.

La troisième et dernière partie du mémoire donne les résultats et l'interprétation de l'étude expérimentale menée sur cinq bétons, formules par la méthode Dreux Gorisse. Les cinq mélanges sont un béton témoin, un béton de graves et trois recomposes permettant de définir différents pourcentages des classes granulaires utilisées dans la composition des bétons. Les expérimentations consistent en la détermination des résistances mécaniques comme la résistance à la compression à 7 et 28 jours et la résistance à la traction à 28 jours. Pour donner un sens pratique à ce travail, une étude comparative a été faite, en prenant les résultats d'analyse et de résistance de bétons réalisés et utilisés sur chantier en 2010.

CHAPITRE 1

ETAT DE CONNAISSANCE

1. Le béton

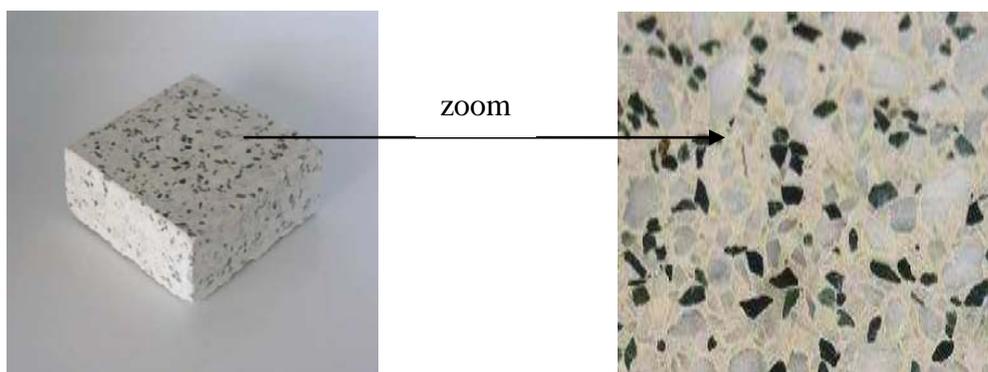
1.1. Définition

Le béton est un matériau composite. Il est constitué de plusieurs matériaux 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, la consistance, la durabilité, l'aspect architectural (formes, teintes, textures), la résistance au feu, l'isolation thermique et phonique, et ceci en utilisant des méthodes spécialisées dites « méthodes de formulation du béton »

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde pour les réalisations des ouvrages de génie civil. Il est caractérisé essentiellement par une bonne résistance à la compression. Ses inconvénients résident dans sa mauvaise résistance à la traction ainsi que sa masse volumique relativement élevée.

La structure du béton est composée de deux principaux constituants : les granulats et la matrice :

- Les granulats représentent en moyenne 70% à 80% du volume du béton, on les trouve sous forme de sables, de graviers ou de cailloux. Ils sont considérés comme un renfort mécanique, et ils sont traités comme des inclusions. Les granulats sont obtenus à partir des carrières de roches massives, de gisements alluvionnaires et artificiels tels que les laitiers expansés, les argiles expansées et les schistes expansés. Ils conditionnent la compacité du matériau ainsi que ses caractéristiques mécaniques.
- La matrice liante enrobe et lie les granulats entre eux. Elle est formée d'une structure complexe poreuse source d'échanges internes et externes. Il existe plusieurs types de matrice parmi lesquelles on trouve : la pâte de ciment, la résine et l'hydrocarbure. Un examen plus approfondi, montre que la structure du béton présente un caractère hétérogène sur un domaine de dimensions extrêmement étendu. La figure 1 montre la texture d'un même matériau granulaire à différents grossissements. [1]



a) Image originale

b) Détail agrandi.

Figure 1. Structure hétérogène du béton : [1]

1.2. Types de bétons

La classification des bétons se fait suivant différents critères, comme :

1.2.1. Leur destination [2]

Types de béton	Destination
Bétons compactés au rouleau	bétons spéciaux pour réaliser certain type de barrage (barrages poids).
Bétons projetés	Pour réaliser les travaux miniers et souterrains, pour la réparation des ouvrages détériorés
Bétons de construction	destinés à la construction courante des bâtiments ou des ouvrages de faible importance
Bétons autonivelants (autoplaçants)	Pour les ouvrages présentant un ferrailage vraiment dense ou d'une forme variable difficile à mouler (courbures multiples).
Bétons coulables sous l'eau	Pour la construction ou la réparation des barrages, les structures portuaires, les tunnels
Bétons fibrés	Pour les dallages (fibres métalliques), piste d'aéroport ou des pièces techniques telles que les tuyaux, gaines (fibres de verre).

Tableau 1:Types de béton en fonction de leur destination [2]

1.2.2. Leur masse volumique

Selon la classification européenne, il y a trois classes de béton qui sont représentées ci-dessous dans le tableau suivant :

Types de béton	Béton léger	Béton normal	Béton lourd
Masse volumique (kg/m ³)	De 800 à 2000	De 2000 à 2600.	Supérieure à 2600

Tableau 2. Types de béton en fonction de leur masse volumique [3]

1.2.3. Leur granularité

La classification se fait en fonction de la dimension maximale des granulats D_{max} :

Classes du béton	Béton fin	Béton moyen	Béton gros
Dimension maximale des granulats D_{max}	$8 \leq D_{max} < 16\text{mm}$	$16 \leq D_{max} < 31.5 \text{ mm.}$	$31.5 \leq D_{max} < 63$

Tableau 3: Types de béton en fonction de D_{max} [4]

1.2.4. Leur consistance (cône d'Abrams)

Elle est définie en utilisant le cône d'Abrams, et on obtient les cinq classes suivantes :

Affaissement (Aff.) en cm	Classe des bétons
0 à 2	Très ferme
3 à 5	ferme
6 à 9	plastique
10 à 13	mou
>14	Très mou

Tableau 4: Types de béton en fonction de leur consistance [5]

1.2.5. Leur résistance à la compression sur cylindre f_{ck}

La norme EN-206 classe les bétons en fonction de leur résistance caractéristique à la compression conformément au tableau 5. Dans ce tableau f_{ck-cyl} est la résistance caractéristique mesurée sur cylindres (c'est cette résistance qui correspond à la résistance caractéristique à laquelle il est fait référence dans l'Eurocode 2) ; $f_{ck-cube}$ est la résistance caractéristique mesurée sur cubes.

Classes	C 8/10	C 12/15	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 45/55
f_{ck-cyl} (N/mm^2)	8	12	16	20	25	30	35	45
$f_{ck-cube}$ (N/mm^2)	10	15	20	25	30	37	45	55

Tableau 5: Classes de résistance à la compression [6]

1.3. Propriétés du béton

Le béton doit être considéré sous deux aspects :

- **le béton frais** : mélange de matériaux solides en suspension dans l'eau, se trouve en état foisonné à la sortie des appareils de malaxage et en état compacté après sa mise en œuvre dans son coffrage ;
- **le béton durci** : solide dont les propriétés de résistance mécanique et de durabilité s'acquièrent au cours du déroulement de réactions physico-chimiques entre ses constituants, d'une durée de quelques jours à quelques semaines.

1.3.1. Propriétés du béton frais

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui est la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage complet du ferrailage[7]. L'ouvrabilité doit être telle que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité. Elle est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais. Dans le cas de béton ordinaire elle est principalement influencée par :

- La nature et le dosage du liant.
- La forme des granulats.
- La granularité et la granulométrie.
- Le dosage en eau. [8]

L'ouvrabilité peut s'apprécier de diverses façon et en particulier par des mesures de plasticité. Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. Nous n'en citerons que quelques uns, les plus couramment utilisés dans la pratique. [9], [10]

1.3.1.1. Affaissement au cône d'Abrams

Cet essai consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais où ce dernier est compacté dans un moule ayant la forme d'un tronc de cône. Lorsque le cône est soulevé verticalement, l'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance. [11]

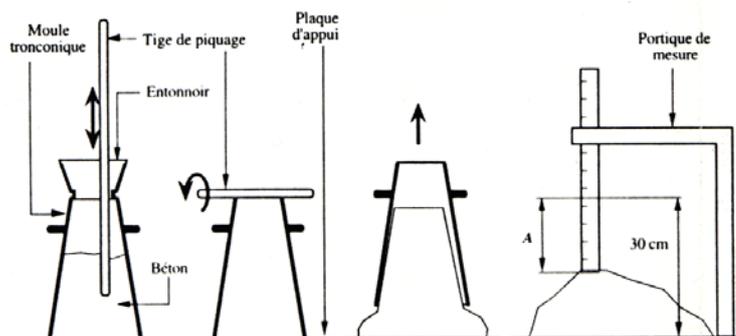


Figure 2 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams [11]



Figure 3 : Mesure de l'affaissement. [11]

1.3.1.2. La masse volumique du béton frais

On mesure la masse volumique du béton frais à l'aide d'un récipient étanche à l'eau et suffisamment rigide. 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 volumique qui sera calculée en utilisant la formule suivante :

$$D = m_2 - m_1 / V$$

D : est la masse volumique du béton frais (kg/m^3).

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).

V : est le volume du récipient en mètre cube (m^3)

La masse volumique du béton est arrondie aux $10 \text{ kg}/\text{m}^3$ les plus proches.



Figure 4 : Béton frais [12]

1.3.2. Propriétés du béton durci

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

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

1.3.2.1. Résistance à la compression [13]

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression uni-axiale a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée. De plus, la résistance du béton en compression est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité.

Un béton est défini par la valeur de sa résistance caractéristique à la compression à 28 jours, f_{c28} . La résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale d'une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur. 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 :

$$f_c = F/A_c$$

où :

- f_c : résistance en compression, exprimée en mégapascal (Newton par millimètres carrés) ;
- F : charge maximale, exprimée en Newtons ;
- A_c : 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.

La résistance à la compression doit être exprimée à 0,5 MPa (N/mm^2) près.

1.3.2.2. Resistance à la traction par flexion [14]

Des éprouvettes prismatiques de dimensions 7 x 7 x 28 cm sont soumises à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale enregistrée au cours de l'essai est notée et la résistance à la flexion est calculée.

[15] Les mesures sont faites sur une presse qui répond aux normes NF P 18-407 (NA 428), munie d'un banc de flexion à 4 points.

Pour une charge totale P , le moment de flexion constant entre les deux points d'application de la charge est : $M = P \times a / 2$ et la contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure est $f_{tj} = 6M / a^3$, la relation suivante permet de calculer la résistance :

$$f_{tj} = 1.8P / a^2$$

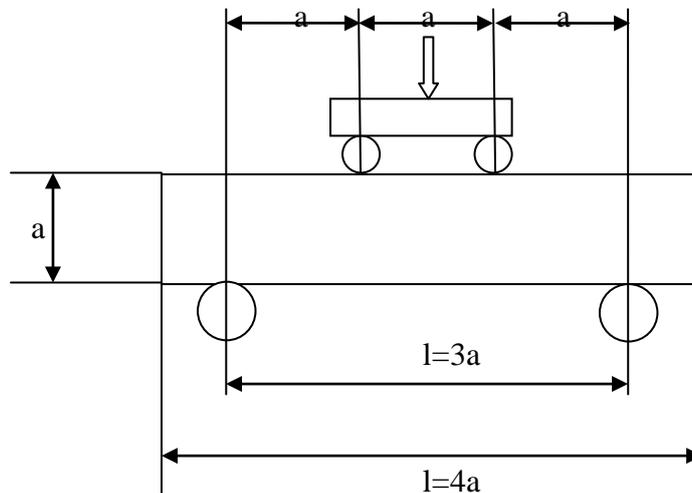


Figure 5. Essai de traction par flexion

2. Les constituants du béton

2.1 Introduction

2.1.1 Eau de gâchage

Pour gâcher le béton, l'eau potable est toujours utilisable mais de plus en plus souvent, nous sommes placés devant la nécessité d'avoir recours à une eau non potable.

Une eau de gâchage non adéquate va ralentir la prise, réduire la résistance mécanique, favoriser la corrosion des armatures.

Les impuretés, telles que les composés chimiques relativement réactifs ou les particules en suspension, indésirables du fait de leur quantité ou de leur qualité, vont influencer négativement sur les propriétés du béton et des armatures.

2.1.2 Aptitude à l'emploi

Pour évaluer l'aptitude à l'emploi d'une eau de gâchage on doit vérifier les critères suivants :

- Les critères sensoriels (l'odeur, la vue)

- Les critères chimiques (matières en suspension, huiles et matières grasses, valeur de PH, teneurs en sulfates, sucre, chlorures, phosphates, nitrates, zinc, sulfures, sodium, potassium.)

Les critères mécaniques (un essai de prise sur mortier et un essai de résistance mécanique à sept jours sur mortier ou béton.)

Remarque

La norme en cours, ne tient compte que de deux critères pour caractériser l'eau de gâchage qui sont :

- La teneur en matières premières en suspension.
- La teneur en sels dissous.

Mais ces critères sont insuffisants car toutes les matières en suspension ne sont pas également nocives, pas plus d'ailleurs que tous les sels solubles ne le sont. C'est la raison pour laquelle cette norme, qui est toujours en vigueur, sera remplacée à terme par la norme européenne. Dans cette norme toute eau non potable sera jugée sur la base d'analyses chimiques et éventuellement physiques.

2.2 Les granulats

2.2.1 Définition

On appelle granulat un matériau granulaire utilisé dans le domaine de construction, soit lié à d'autres substances (liant, bitume) pour obtenir mortier, bétons, bétons routiers ...etc., soit non lié comme les ballasts des voies ferrées, les granulats pour le système de drainage. Il est constitué de plusieurs grains minéraux de différentes dimensions comprises entre 0 et 125 mm le plus fréquemment mais peuvent être allé jusqu'à 150 mm par exemple pour des exigences d'utilisations (Cas des barrages). Le granulat peut être de provenance naturelle ou artificielle.

2.2.2 Caractéristiques

Les granulats sont caractérisés par des spécificités qu'ils doivent satisfaire pour réaliser une bonne utilisation dans différents domaines. Ces spécifications dites caractéristiques des granulats sont bornées par des normes et des exigences. Elles servent à prendre en compte l'utilisation, la fiabilité, l'économie en se basant sur les recherches et les expériences scientifiques. On distingue :

2.2.2.1 Caractéristiques intrinsèques :

Ce sont les propriétés appartenant au granulat lui-même et qui sont inhérentes au temps. Elles sont liées à l'origine des roches ou des produits constituant le granulat. Parmi ces caractéristiques on cite les suivantes :

a. **Caractéristiques physiques et mécaniques**

• **Résistance à l'usure des gravillons :**

Elle est déterminée par l'essai Micro-Deval en présence d'eau ou à sec. Cet essai consiste à reproduire dans un cylindre en rotation des phénomènes d'usure par frottement.

Cette résistance est caractérisée par le coefficient Micro-Deval qui représente la proportion d'éléments fins produits pendant l'essai (éléments inférieurs à 1.6mm). Plus le coefficient MD est faible, plus la résistance à l'usure des gravillons, est élevée. [15]

On peut aussi exploiter un autre coefficient pour évaluer la résistance à l'usure des gravillons et aussi des cailloux, c'est le coefficient Deval " D ", il est déterminée à partir d'un essai Deval qui a pour objet de définir la résistance à l'usure des gravillons et des cailloux par frottement mutuel dans un cylindre à sec ou en présence d'eau.

Il est donné par la formule suivante :

$$\text{MDE} = \frac{500 - m}{5}$$

Où m : la masse des éléments fins inférieurs à 1.6 mm produits lors de l'essai.

• **Résistance à la fragmentation des gravillons :**

Elle est déterminée par le coefficient Los-Angeles. Le principe de cet essai est la détermination du coefficient dit " Los-Angeles " pour évaluer la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques.

Il consiste à faire tourner les granulats dans un tambour fermé contenant des boulets métalliques. Le coefficient LA représente la proportion d'éléments fins produits au cours de l'essai. Plus le coefficient, est faible plus la résistance des gravillons, est élevée.

A l'aide d'un autre coefficient on peut également évaluer la résistance d'un granulat à la fragmentation, c'est le coefficient de fragmentation dynamique.

Il est déterminé à partir d'un essai qui consiste à mesurer la quantité d'éléments fins inférieurs à 1.6 mm produits en soumettant le matériau aux chocs d'une masse normalisée. La formule qui sert à calculer le coefficient de fragmentation dynamique est la même que celle du coefficient Los-Angeles.

• **Résistance au polissage des gravillons :**

Cette résistance est évaluée à partir d'un coefficient de polissage accéléré des gravillons, ce dernier se calcule à partir d'un essai qui fournit une mesure relative caractérisant l'aptitude des gravillons à se polir. Plus le coefficient de polissage accéléré est élevé, plus la résistance au polissage est importante. [16]

- **Résistance des gravillons au gel-dégel :**

La vulnérabilité du granulat dans le béton à l'action du gel-dégel est en fonction de sa nature, de son utilisation, des conditions climatiques et de la formulation du béton (utilisation par exemple d'air entraîné). Concernant le granulat lui-même la vulnérabilité est en fonction de trois critères, l'absorption d'eau, la résistance à la fragmentation après l'essai gel-dégel et sa sensibilité au gel. [17]

- **La masse volumique**

On appelle masse volumique d'un corps, la masse de l'unité de volume de ce corps. On distingue :

- **Masse volumique apparente :** masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.
- **Masse volumique absolue :** masse de l'unité de volume d'un corps sans tenir compte des vides qu'elle contient.
- **Masse volumique réelle :** masse de l'unité de volume absolue de corps, c'est-à-dire de la matière qui constitue le corps sans tenir compte du volume des vides inter-granulaires.

- **La porosité**

La porosité est le rapport du volume des vides contenus dans les grains au volume des grains, exprimé en pourcentage. Elle influe sur l'aptitude de résister aux sollicitations mécaniques (compression statique, usure, abrasion...etc.), chimiques (attaque en ions solvants) et surtout à la tenue au gel-dégel ; c'est pour ça que la porosité est un critère important et sert à améliorer les performances des bétons notamment leur durabilité.

- **Teneur en eau**

Elle est égale au rapport de la masse d'eau contenue dans l'échantillon sur la masse sèche de l'échantillon, exprimée en pourcentage. La teneur en eau est un facteur important pour adapter les proportions des constituants lors de la formulation des bétons afin d'éviter le phénomène de foisonnement ou la perturbation de la consistance des bétons.

- **Coefficient d'absorption d'eau**

Il est défini comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon entraînée par imbibition partielle en eau à la masse de matériau sec.

b. Caractéristiques chimiques et diverses**• Réaction alcali-silice (alcali-réaction)**

Sous ce terme se regroupent toutes les réactions qui peuvent se produire entre les granulats du béton et les alcalins de la pâte de ciment. [18] Les granulats doivent être inertes vis à vis de l'alcali-réaction lorsqu'il y a un risque identifié pour l'ouvrage ou un élément d'ouvrage en béton. Il doit être possible de connaître la teneur en alcalins actifs afin de pouvoir établir un bilan pour une formulation de béton et déterminer la présence de granulats partiellement réactifs ou non qualifiés. Les désordres occasionnés par l'alcali-réaction se présentent sous forme de faïençage ou d'éclatement du béton. [19]

• Teneur en chlorure

Les ions de chlorure modifient la cinétique d'hydratation du liant et favorisent la corrosion des armatures ou des câbles de précontrainte. Les normes fixent les limites de la teneur en chlorure des bétons en différenciant les bétons non armés, armés, ou précontraints. Dans le cas où la valeur de la teneur en chlorure dépasse la limite recommandée, le producteur doit communiquer cette valeur pour permettre l'établissement du bilan des chlorures dans la formulation des bétons. [20]

• Friabilité des sables

La friabilité des sables est une mesure globale d'homogénéité appliquée aux sables alluvionnaires et aux produits de démolition. Une valeur élevée indique une forte proportion d'élément tendres ou friables nuisibles à l'aspect des parements et à la durabilité des bétons surtout des dallages et des chaussées.

Le coefficient de friabilité des sables est le rapport de la masse m , des éléments inférieurs à 0.1 mm, produits au cours de l'essai de fragmentation du sable dans un cylindre en rotation à l'aide d'une charge et en présence d'eau, sur la masse de matériau soumis à l'essai. Le rapport est exprimé en pourcentage. [21]

• Teneur en matière organique

La présence de la matière organique peut perturber la prise des bétons, faire chuter les résistances surtout au jeune âge et donner lieu à des taches sur les parements. Pour les sables un test calorimétrique est réalisé et pour les sables non conformes, on fait des essais complémentaires : comparatifs de résistance sur mortiers.

• Teneur en sulfates (SO_3)

Les sulfates solubles (gypse, plâtre) en faible proportion peuvent perturber la prise et modifier les effets des adjuvants (réducteur d'eau). Cette action dépend en fait de la qualité de SO_3 présente dans le béton.

- **Teneur en soufre**

Les sulfures (pyrites) présents dans certains granulats (calcaires primaires notamment) peuvent s'oxyder et se transformer en sulfates pouvant donner lieu à des réactions expansives (formation d'ettringite) avec le ciment. Cette oxydation s'accompagne souvent de la production de taches de rouille sur les parements, et lorsque les grains de pyrites sont assez gros (millimétriques), on obtient des pustules et des éclatements.

- **Résistance au choc thermique**

Les granulats doivent être résistants à la chaleur.

2.2.2.2 Caractéristiques de fabrication

Ces caractéristiques résultent des conditions de fabrication, du processus d'élaboration (extraction, fragmentation, séparation granitaire, lavage, criblage ...etc.), de la performance et l'aptitude de travailler correctement au niveau du lieu de fabrication (capacités humaines et matérielles). Ce sont :

a. La granularité

C'est la distribution dimensionnelle des grains contenus dans le granulat, elle sert à classer le granulat.

b. Classe granulaire

La classe granulaire désigne un granulat selon son plus petit diamètre de grain représentatif et son plus grand diamètre de grain représentatif. Cela permet ainsi de différencier les granulats entre eux et de les classer. Cela indique aussi la plage des diamètres de grains couverte par un granulat. Elle est définie par le terme d/D , réservée à la désignation des granulats dont les dimensions s'étalant de d à D où d est la dimension la plus petite et D la dimension la plus grande des grains. L'appellation d/D doit satisfaire aux conditions sur les refus de tamis de maille de diamètre D et les tamis de tamis de maille de diamètre d .

c. Courbe granulométrique

C'est la distribution pondérale des granulats. On trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamis sous les tamis dont les mailles sont indiqués en abscisse selon une graduation semi logarithmique. La série des diamètres de mailles des tamis utilisés est une progression géométrique de raison $^{10}\sqrt{10} \approx 1,25$

L'intérêt de la courbe granulométrique est de donner des informations concernant :

→ La courbure (granulométrie bien graduée ou mal graduée) à l'aide du coefficient de courbure C_c .

- L'uniformité (granulométrie serrée ou étalée) à l'aide du coefficient d'uniformité Cu.
- La continuité ou la discontinuité. [22]

d. Forme des granulats

- **Coefficient volumétrique**

Pour un grain, c'est le rapport entre le volume v du grain considéré et la sphère circonscrite de diamètre d , d étant la plus grande dimension du grain.

Pour un grain
$$C = \frac{v}{\pi \frac{d^3}{6}}$$

Pour un granulat constitué d'un ensemble de grains.

$$C = \frac{\sum v}{\sum \pi \frac{d^3}{6}} = \frac{V}{\frac{\pi}{6} \sum d^3}$$

Un coefficient faible correspond à un granulat présentant un certain nombre d'éclats et d'aiguilles. Un coefficient élevé correspond à un granulat dit : "cubique" ou "arrondi".

- **Coefficient d'aplatissement**

L'effet négatif des éléments plats, sur l'ouvrabilité et le degré de compactage pour les bétons, et sur les performances des couches de roulement est connu. Il se crée le problème de manque de rugosité nécessaire et on est face à des couches de roulement trop glissantes. Les méthodes de fabrication des granulats, malheureusement, impose l'existence des plats et ne nous permet que de limiter le pourcentage de ces derniers afin d'obtenir un bon granulat. Pour cela le coefficient d'aplatissement sert comme test permettant d'évaluer la forme des granulats. [22]

Le coefficient d'aplatissement A est le rapport de la somme des masses de passant sur les grilles à fentes correspondantes d'écartement $D_i/2$ en gramme à la somme des masse des granulats élémentaires d_i/D_i en grammes. Ce rapport représenté ci-dessous est exprimé en pourcentage et arrondi au nombre entier le plus proche.

Plus A est élevée, plus le gravillon contient d'éléments plats. Une mauvaise forme a une incidence sur la maniabilité et favorise la ségrégation. On le note :

$$A = \frac{M_2}{M_1} * 100$$

Où

M_2 : la somme des masses des granulats élémentaires d_i/D_i en grammes

M_1 : la somme des masses de passant sur les grilles à fentes correspondantes d'écartement $D_i/2$ en gramme.

- **L'indice de forme**

L'indice de forme est défini comme étant la masse de grains dont le rapport des dimensions L/E est supérieure à 3, exprimé en pourcentage de la masse sèche totale des grains soumis à l'essai, où L est la longueur de grains de granulats et E son épaisseur.

- e. **Propreté des granulats** : [23]

L'appréciation de la propreté des granulats selon leur type, s'établit d'après les essais suivants :

- **Équivalent de sable**

Il permet de mesurer la propreté de la quantité d'éléments fins contenus dans le matériau sans aucune distinction de nature. L'équivalent de sable est le rapport conventionnel volumétrique entre les grains fins et les autres, il permet donc de caractériser l'importance des fines par une valeur numérique.

Plus l'équivalent de sable est élevé, moins le matériau contient des éléments fins nuisibles. Il s'applique assez bien aux sols faiblement plastiques et peut s'appliquer à tous les matériaux grenus, il s'effectue sur les fractions inférieures à 5 mm. Pour calculer l'équivalent de sable il existe deux types d'essais : visuel ou au piston. Cet essai est effectué sur la fraction du sable passant au tamis à mailles carrées de 2 mm, mais il peut être réalisé sur la fraction 0/4.

- **Essai au bleu de Méthylène**

À cause de la nature des résultats du test d'équivalent de sable qui est quantitative et non qualitative on a besoin de connaître la nature des fines signalées par l'équivalent de sable. Pour cela on a recourt à l'essai au bleu de Méthylène, il nous permet de déterminer la présence d'argiles ou de matières organiques.

L'essai au bleu de Méthylène est pratiqué sur la fraction 0/2mm des sables courants ou sur les fillers de fraction 0/0.125mm contenus dans un sable fillerisé, un gravillon ou tout venant.

Il a pour but de révéler la présence de fines de nature argileuse et d'en déterminer la concentration. Il est généralement effectué après un essai de propreté des sables ou des gravillons lorsque le résultat de celui-ci est inférieur aux spécifications exigées.

On appelle valeur de bleu d'un sable ou des fillers la quantité en gramme de bleu de Méthylène adsorbée par 1 kg de fraction 0/2mm pour les sables et de fraction 0/0.125mm pour les fillers.

- **Propreté superficielle des gravillons**

Un granulat doit présenter une propreté satisfaisante, en effet si les grains des granulats sont enrobés par une quantité excessive d'éléments fins, généralement argileux, ceux-ci empêchent une bonne adhérence de la pâte liante, entraînant ainsi une chute des résistances mécaniques et des variations de propriétés rhéologique des mélanges.

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral de particules de dimensions inférieures à 0.5mm adhérente à la surface ou mélangée dans un granulat de dimension supérieure à 2 mm. Les éléments fins contenus dans le granulat à tester sont séparés par lavage sur un tamis d'ouverture 0.5mm. Leur pourcentage est déterminé par pesées après séchage du refus.

f. Module de finesse [22]

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat, ce module est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimé en pourcentage sur les tamis d'une série bien déterminée et normalisée. Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en élément fins.

2.2.3 Classification des granulats [23]

On peut classer les granulats en fonction de leur granularité déterminée par analyse granulométrique sur des tamis de contrôle à maille carrées dans une série normalisée. On distingue plusieurs familles de granulats

- Fillers 0/D où $D \leq 2$ mm et contenant au moins 70% de passant à 0.063mm.
- Sablons 0/D où $D \leq 1$ mm et contenant moins de 10% de passant à 0.063mm.
- Sable 0/D où $D \leq 6.3$ mm sauf les sables pour béton où $D \leq 4$ mm.
- Graves 0/D où $D > 6.3$ mm.
- Gravillons d/D où $d \geq 1$ mm et $D \leq 31.5$ mm.
- Cailloux d/D où $d \geq 20$ mm et $D \leq 125$ mm.

Remarque

La famille dite ballast d/D où $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm est complètement contenu e dans la famille dite cailloux d/D où $d \geq 20$ mm et $D \leq 125$ mm, c'est pour cela qu'elle n'est pas citée dans la classification précédente.

2.2.4 Les types des granulats :

On peut citer plusieurs types en fonction de plusieurs critères concernant le granulat lui-même.

2.2.4.1 En fonction de leur masse volumique réelle :

a. Granulats légers

Ce sont les granulats dont la masse volumique réelle est inférieure à 2 t/m^3 , comme les argiles, les schistes, les laitiers expansés ou encore les pouzzolanes. Ils sont destinés à la préparation des bétons légers.

b. Granulats courants

Ce sont les granulats dont la masse volumique réelle est entre 2 et 3 t/m³, comme les matériaux naturels, alluvionnaires (silex, calcaire dur silico-calcaire) de densité entre 2.5 et 2.7, éruptifs ou sédimentaires (grés, porphyres, diorite, basaltes, ...etc.) de densité entre 2.6 et 3.

c. Granulats lourds

Ce sont les granulats dont la masse volumique réelle est supérieure à 3 t/m³. Ils sont essentiellement employés pour la confection des bétons lourds utilisés pour construire des ouvrages nécessitant une protection biologique contre le rayonnement. On utilise en particulier les barytines, les magnétites qui ont une densité entre 3.4 et 5.1, aussi les riblons et les grenailles de fonte qui ont une densité entre 7.6 et 7.8.

2.2.4.2 En fonction de leur origine :**a. Les granulats naturels**

Ce sont des matériaux purement naturels, ne subissant aucun traitement autre que mécanique tel qu'extraction, concassage, broyage, criblage, lavage...etc.

b. Les granulats artificiels

Ce sont les granulats qui proviennent de la transformation thermique de roches, de minerais ou de sous produits industriels (laitiers, scories), ou encore de la démolition d'ouvrages ou de bâtiments divers en béton souvent appelés granulats recyclés.

2.2.4.3 En fonction de la forme de leurs grains :**a. Les granulats concassés**

Ce sont des granulats provenant du concassage des pierres et dont les grains ont une certaine angularité. Ils sont issus du concassage des roches de porphyres, grés, calcaires, quartzites, de galets concassés et de laitiers.

b. Les granulats roulés

Ils représentent les granulats ayant subis une altération naturelle mécanique due à l'eau, au vent, à l'usure réciproque des granulats lors de leur transportation dans la nature. Il résulte que plus de 90% des surfaces des grains sont arrondies et de provenance alluvionnaire.

2.2.5 Production des granulats

La production des granulats nécessite plusieurs opérations successives sur le même site ou non, selon le site lui-même ou la roche est exploitée. On distingue les opérations suivantes :

2.2.5.1 Le décapage

Décaper, c'est retirer les couches de sol situées au dessus des niveaux à exploiter :

- Terre végétale.
- Roches plus ou moins altérées.
- Niveaux stériles.

Les matériaux de découverte doivent être stockés indépendamment, de façon à pouvoir être réutilisés lors du réaménagement de la carrière. La prise en compte de la quantité des terrains à découvrir importe dans l'étude d'un gisement.

La découverte s'effectue avec une découpeuse automotrice qui peut en assurer le transport sur 1 km environ, ou avec une pelle associée à des tombereaux.

2.2.5.2 L'extraction

Elle est en fonction de la nature de la roche exploitée.

a. Roche meuble :

Cette roche d'origine alluvionnaire se situe près de l'eau ou dans l'eau. On distingue :

- En site terrestre (milieu sec) : c'est le cas des gisements des granulats alluvionnaires qui se situent au dessus du niveau de l'eau. L'exploitation se fait à l'aide des engins traditionnels des travaux publics tels que des pelles ou des chargeuses (bulldozers munis d'un large godet basculant).
- En site émergé (milieu hydraulique) : on utilise des engins flottants tels que drague à godets, à grappin ou drague suceuse.
Si le site émergé est peu profond, on utilise des pelles à câble équipées en draglines, des pelles hydrauliques ou des excavateurs à godets. Le dragage ramène à la surface le tout venant qui est ensuite chargé sur bateaux, sur camions ou sur bandes transporteuses en bord de rive.

b. Roche massive :

C'est une roche dure, dans ce cas les gisements sont assez compacts et donc l'extraction nécessite l'emploi d'explosifs. On utilise les tirs de mines provoquant l'abattage des roches en éclats (éléments de plusieurs décimètres cubes) qui sont ensuite chargés et transportés au centre de traitement. Procéder à un tir nécessite :

- Le forage de trous (disposition, nombre)
- Choix de l'explosif.
- Le déclenchement du tir.

2.2.5.3 Concassage et broyage

a. Définition

La fragmentation des matériaux se fait par concassage et broyage, le concassage étant la fragmentation grossière et le broyage l'élaboration des sables, petits gravillons et fillers. C'est

une opération purement mécanique à l'aide des différents appareils, fonction des différents types de concassage.

b. L'intervention

Cette opération est obligatoire pour les roches massives à cause des grandes dimensions des éléments éclatés (de 0 à 2000 mm). Mais pour les alluvions, elle est exceptionnelle en cas d'utilisation des éléments supérieurs à 40 mm, pour corriger la granularité ou produire des granulats pour assises de chaussées.

c. Le rôle

Le concassage a pour objet de réduire les dimensions pour obtenir la granularité souhaitée et pour améliorer la forme des granulats

d. Principe de concassage

Les concasseurs utilisés se basent sur trois principes de rupture :

- Rupture par écrasement : se fait entre deux pièces métalliques dont l'une est mobile, soit par translation c'est le cas des mâchoires, soit par rotation c'est le cas des giratoires.
Ce processus est destiné à traiter les produits grossiers sortant du primaire, à élaborer des gravillons gros ou fins ou à produire du sable.
- Rupture par chocs : se fait contre des pièces mobiles en rotation, soit des marteaux, percussions ou soles tournantes, soit par projection centrifuge mais cette dernière travaille essentiellement par auto broyage. Ce processus est très intéressant du point de vue de la forme des grains. On utilise essentiellement des ruptures par chocs, ce qui donne un excellent affinage de la forme des grains.
- Rupture sous l'action de charges libres : il s'agit des broyeurs à barres, c'est un appareil uniquement producteur de sable, ces broyeurs sont des appareils travaillant essentiellement par gravité des charges libres (boulets, barres) ce qui génère des écrasements et des petits chocs qui créent un affinage très favorable à la forme des grains.

Remarque

La granularité produite par un concasseur est en fonction de la granularité des produits d'entrée, débit d'alimentation et d'usure des pièces broyeuses. L'ouverture d'entrée (largeur et prise) conditionne la taille des plus gros éléments admis à l'alimentation et l'ouverture de sortie (appelée quelque fois réglage), la granularité du produit sortant.

2.2.5.4 Le criblage

C'est l'opération permettant de séparer et de classer un ensemble des grains 0/D en sous ensemble 0/D_i ou d_i/D_i. Cette opération est principale et indispensable puisqu'elle va donner les produits finaux commercialisés tels que : sable, gravillons, graves, etc. avec une dénomination précise comme : sable 0/4, sable 0/2, gravillon 6/10, etc.

Le criblage est commun à toutes les installations quelque soit le type de roche exploitée. Pour les roches massives un aspect particulier du criblage est l'élimination de 0/D qui se pratique en amont (grille de scalpage à barres parallèles) ou après le débiteur (crible à maille carrées) ou des deux dans le but d'éliminer le maximum de produits argileux.

Pour les roches meubles, il ya souvent un crêtage des plus gros éléments inutilisables.

Le criblage se fait généralement au moyen des cribles vibrants inclinés, qui sont constitués d'un caisson équipé de grilles mises en vibration. Les grilles subissent un mouvement vibratoire imposé aux matériaux qui sont ainsi secoués et avancent par gravité. L'intensité des secousses varie en fonction du type de criblage, la surface de crible conditionne son débit qui est aussi influencé par la granularité de l'alimentation et un éventuel arrosage. La maille effective de crible D est inférieure à la dimension géométrique D₀ de la maille de l'équipement du crible. En général, D est de l'ordre de 0.85 à 0.9 D₀.

2.2.5.5 Le lavage

Il a pour but d'éliminer les éléments de pollution et l'excès de fines. On peut suivant le degré et le type de pollution faire :

- Un lavage après extraction (sur gros appareils débourbeurs).
- Un lavage sur crible le tout-venant ou les gravillons ou les deux ensemble.
- Un lavage du sable en fin de parcours.

Le lavage des alluvions se fait en partie naturellement par l'extraction sous l'eau, mais il permet aussi une classification des sables en réalisant des séparations impossibles à effectuer par criblage classique, entre 10 et 150µm.

Des modes de traitement utilisent des courants d'eau entraînant, par gravité, par centrifugation, par courants de surface ou ascendant, ou par vibration, la séparation sable-eau polluée.

Les eaux de lavage nécessitent une récupération (bassins de décantation) voir un traitement pour concentrer les boues et pour qu'elles occupent moins de place.

Dans tous les cas, les eaux de lavage sont ensuite décantées dans des bassins spéciaux, de façon à resservir ou à être restituées propres à la rivière ou au lac.

Remarque

Les opérations de criblage et de lavage sont souvent réalisées conjointement, une rampe de jets d'eau étant disposée au-dessus du crible.

2.2.5.6 Le définage

Il a pour but d'éliminer par voie sèche l'excès de fines de broyage des sables. Il ne peut se faire que sur des produits très peu pollués par l'argile (valeur de bleu inférieure à 1) et secs

(humidité inférieure à 0.6 ou 0.8% en forte prévision) .dans le cas où l'humidité est plus élevée, il faut sécher le produit avant le définage.

Le rejet d'air chargé de poussière est interdit, ce qui nécessite toujours l'installation d'un système de dépoussiérage complexe.

2.2.5.7 Classification granulométrique des produits

Les granulats sont classés en fonction de leur granulométrie déterminée par analyse granulométrique sur des tamis de contrôle à mailles carrées dans une série normalisée.

Ils sont désignés par d et D qui représentent respectivement la plus petite et la plus grande des dimensions des grains constituant le granulat.ils sont appelés fillers, sables, sablons, gravillons, cailloux, ou graves selon leur classe granulaire d/D ou 0/D lorsque d est inférieur à 1 mm. C'est l'appellation commerciale des produits.

2.2.5.8 Stockage et livraison

En fin de traitement, une fois réduits, traités et classés, les granulats sont acheminés vers les aires de stockage, soit sous forme de tas individualisés, soit en trémies ou silos. Différents moyens de transports (trains, camions, ou péniche) permettent ensuite de les livrer à la clientèle.ils peuvent être travaillés sur place dans le cas de centrale à béton ou d'une centrale d'enrobage au bitume, sur le site même de la carrière.

2.2.5.9 Contrôle et assurance de la qualité

Tout au long du processus de fabrication, on procède à des opérations régulières de contrôle de qualité portant sur différents paramètres (dureté, calibrage, propreté, respect des normes.....etc.)

Le contrôle qualité est la vérification de la conformité aux spécifications faites par le producteur, ces règles permettent au fournisseur de vérifier la conformité de ses produits aux spécifications, et permettent à l'acquéreur de vérifier la conformité d'un lot aux spécifications. L'assurance qualité peut être apportée par la certification.

2.3 Le ciment

2.3.1 Introduction

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté de 1450 à 1550 °C, température de fusion.

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau. Cette hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium, transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau.

2.3.2 Principe de fabrication ciment portland

La fabrication de ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes:

- préparation du cru
- cuisson
- broyage et conditionnement

Il existe 4 méthodes de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement du matériau:

- Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne).
- Fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide).
- Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée).
- Fabrication du ciment par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche).

Le composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃), et l'oxyde de fer (Fe₂O₃). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier Fe₂O₃, l'oxyde ferrique.

Le principe de la fabrication du ciment est le suivant: calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker.

Un mélange d'argile et de calcaire est chauffé. Au début, on provoque le départ de l'eau de mouillage, puis au delà de 100 °C, le départ d'eau d'avantage liée. A partir de 400°C commence la composition en gaz carbonique (CO₂) et en chaux (CaO), du calcaire qui est le carbonate de calcium (CaCO₃).

Le mélange est porté à 1450-1550 °C, température de fusion. Le liquide ainsi obtenu permet l'obtention des différentes réactions. On suppose que les composants du ciment sont formés de la façon suivante: une partie de CaO est retenue par Al₂O₃ et Fe₂O₃ en formant une masse liquide. SiO₂ et CaO restants, réagissent pour donner le silicate bicalcique dont une partie se transforme en silicate tricalcique dans la mesure où il reste encore du CaO non combiné.

2.3.3 Constituants principaux et additions

2.3.3.1 Constituants du clinker

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker sont:

- Le silicate tricalcique $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C₃S) (50-70% du clinker).
- Le silicate bicalcique $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C₂S) (10-30% du clinker).
- L'aluminate tricalcique $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C₃A) (2-15% du clinker).
- L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tétracalcique) $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C₄AF) (5-15% du clinker).

Le clinker contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis (Na_2O , K_2O), de la magnésie (MgO), et diverses traces de métaux. La teneur en alcalis et magnésie doit rester faible, car ces matières peuvent influencer défavorablement la stabilité du ciment durci. A l'aide du microscope, on peut distinguer la structure minéralogique du clinker en trois phases, auxquelles les chercheurs donnent les noms suivants:

- A = alite (phase cristallisée), se présente sous la forme de cristaux polygonaux assez grands (grains anguleux foncés) de l'ordre de 50μ .
- B = bélite (phase vitreuse), se trouve sous forme impure dans le clinker (grains légèrement arrondis et rayés).
- C = célite (phase vitreuse légèrement foncée et claire), se trouve dans le clinker sous forme impure et de phase vitreuse.

2.3.3.2 Les autres constituants des ciments

Le ciment portland est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse, destiné à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute d'autres constituants associés au clinker pour leurs caractéristiques chimiques ou physiques spécifiques. Les constituants les plus utilisés sont:

Constituants	Observations
Calcaires	- considérés comme les constituants principaux du ciment. Ils doivent présenter une proportion de carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75% en masse.
Laitier granulé de haut fourneau	- sous-produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques, obtenu par refroidissement rapide (trempe) de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.
Cendres volantes (V ou W)	- produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques. On distingue : Les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés pouzzolaniques et les cendres volantes calciques (W)
Schistes calcinés	- schistes portés à une température d'environ $800\text{ }^\circ\text{C}$ dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques.
Fumée de silice:	- sous-produit de l'industrie du silicium et de ses alliages. - formées de particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de $0,1\ \mu\text{m}$). Elles ont des propriétés pouzzolaniques.
Fillers:	- "constituants secondaires" des ciments, donc ils ne peuvent jamais excéder 5 % en masse dans la composition du ciment. - matières minérales, naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau).

Tableau 6 : Ajouts cimentaires.

2.3.4 Catégories de ciment

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale.

2.3.4.1 En fonction de leur composition

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV 197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse):

- CEM I: Ciment portland (CPA)
- CEM II: Ciment portland composé (CPJ),
- CEM III: Ciment de haut fourneau (CHF),
- CEM IV: Ciment pouzzolanique (CPZ),
- CEM V: Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

2.3.4.2 En fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours; des sous classes "R" sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées.

Désignation de la classe	Sous classe éventuelle	Résistance à la compression (bars)		
		à 2 jours minimaux	à 28 jours	
			Minimales	maximales
350	-----	-----	250	450
450	-----	-----	350	550
	R (rapide)	150	350	550
550	-----	-----	450	650
	R (rapide)	225	450	650
THR Très hautes performances	-----	300	550	-----

Tableau 7. Résistances à la compression.

3 Formulation du béton

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents composants du béton (granulat, eau, ciment) afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées (résistance, consistance).

On a recours, dans ce cas aux méthodes de détermination des proportions des différents composants ou on trouve soit :

- Les méthodes semi-empiriques (Faury, Bolomey, Vallette).
- Les méthodes graphiques (Joisel, Dreux-gorisse).

3.1 Essai en laboratoire

En plus de l'optimisation expérimentale de la formule qui ne couvre que le squelette granulaire et la pâte du ciment on a recours à un autre outil complémentaire qui va donner plusieurs informations sur le ressuage et la ségrégation, sur la simulation d'effets particuliers (mise en œuvre du béton, la durabilité, traitement thermique, la détermination de la maturité du béton, évaluation de la durabilité par des mesures telles que la perméabilité, la carbonatation ,pénétration des ions(Cl⁻) ,alcali réaction, etc.) sur le rendement de la formule, et sur le bilan économique. Pour cela on fait des essais en laboratoire pour affiner les différentes estimations.

Remarque

Il y a lieu de parler de :

- l'épreuve d'étude : c'est-à-dire de tester la sensibilité de la formule à une variation possible de l'un des composants.
- l'épreuve de convenance : permet de vérifier avec les outils de fabrication et de transport, sur chantier, la conformité de la formule nominale avec le cahier des charges du maître d'œuvre.

3.2 Méthodes de formulation [24]

Il existe plusieurs méthodes pour la composition du béton. Elles aboutissent à des dosages volumétriques ou de préférence pondéraux, mais le passage de l'une à l'autre peut toujours se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac.

On distingue en fonction de la granularité du mélange constituant le béton deux types de méthodes de composition du béton :

- **à granularité continue** : lorsque l'analyse du mélange constituant le béton donne sur le graphique granulométrique une courbe s'élevant d'une façon continue du plus petit grain de ciment au plus gros grain des graviers, toutes les grosseurs intermédiaires sont représentées.
- **à granularité discontinue** : lorsque la courbe granulométrique correspondante présente un palier qui équivaut à un manque d'éléments intermédiaires.

3.2.1 Méthode de Bolomey

Par une formule appropriée on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser avec les granulats dont on dispose une composition granulaire totale (ciment compris) dont la courbe granulométrique soit aussi proche que possible de la courbe de référence théorique.

La formule de base est la suivante : $P=A+(100-A)\sqrt{d/D}$

P : est le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d

D : est le diamètre du plus gros granulat

A : coefficient varie entre 8 et 16 en fonction du dosage en ciment, 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.

3.2.2 Méthode d'Abrams

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

Les modules optimaux pour béton de granulats roulés sont déterminés expérimentalement par Abrams et sont indiqués dans des valeurs tabulées en fonction du dosage en ciment et de la dimension D du plus gros granulat.

Dosage en ciment kg/m ³	Dimension maximale 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	4.25	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

Tableau 8 : Valeurs optimales d'après Abrams du module de finesse des compositions

La règle du mélange d'Abrams permet de calculer les pourcentages relatifs de granulats de module de finesse MF_S et MF_G pour obtenir un module de finesse MF choisi pour le mélange.

$$S_s = MF_G - MF \quad \text{et} \quad S_g = MF - MF_s$$

La proportion de gravier est : % gravier = $(S_g / S) * 100$

La proportion de sable est : % sable = $(S_s / S) * 100$

Où $S = S_s + S_g$

3.2.3 Méthode de Faury

Faury proposa une nouvelle loi de granulation de type continu, il s'est inspiré pour cela de la théorie de Caquot relative 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 courbe granulométrique idéale 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 deux catégories. On trace pour l'ensemble du mélange, ciment compris une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites si l'on opère sur un graphique gradué, en abscisse, en $\sqrt[5]{d}$. L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixé à $D/2$ et son ordonnée Y est donnée par une formule tenant compte de la grosseur D du granulat et comportant certains paramètres dont la valeur est une valeur tabulée en fonction de types des granulats (roulés ou concassés) et de la puissance du serrage (simple piquage ou vibration plus ou moins intense).

Y, se calcule par la formule suivante :

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0.75}$$

A : valeur tabulée

B : varie de 1 à 2 selon que le béton ferme ou mou.

D : est exprimé en dimension de passoire.

R : est le rayon moyen du moule

3.2.4 Méthode de Valette

R. Valette a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite cependant un certain nombre de calculs préparatoires. Cette méthode est souvent désignée par « dosage des bétons à compacité maximale » ou « dosage des bétons à minimum de sable » ou « dosage des bétons à granularité discontinue ».

La méthode Valette proprement dite est quelquefois utilisée avec certaines variantes. Dans les cas les plus courants on parlera en général d'un béton binaire: un sable et un gravier présentant le plus souvent une certaine discontinuité (par exemple : sable 0/5 et gravier 16/25). On calcule d'abord le dosage de sable et de ciment devant donner en principe le mortier plein avec un minimum de ciment ; ce dosage s'obtient en mesurant les vides du sable mouillé et en

calculant le dosage en ciment permettant de remplir le volume des vides du sable par un volume égal de pâte pure de ciment.

On ajoute en suite le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier. On obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé en ciment.

3.2.5 Méthode Dreux-Gorisse

C'est une méthode pratique qui simplifie et rend la formulation du béton plus pragmatique. Elle consiste à rechercher conjointement la résistance à la compression et l'ouvrabilité désirée à partir des données de base essentielles pour la formulation du béton telles que la dimension des granulats(D). La méthode de formulation de Dreux-Gorisse permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges. Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton. Il faut déterminer au préalable le rapport C/E, C et E, le mélange optimal à minimum de vides, la compacité du béton et les masses des granulats.

3.3 Étude de la composition du béton

En général il n'existe pas de méthode de composition du béton qui soit universellement reconnue comme étant la meilleure. La composition du béton est toujours le résultat d'un compromis entre une série d'exigences généralement contradictoires.

De nombreuses méthodes de composition du béton plus ou moins compliquées et ingénieuses ont été élaborées. On notera qu'une étude de composition de béton doit toujours être contrôlée expérimentalement et qu'une étude effectuée en laboratoire doit généralement être adaptée ultérieurement aux conditions réelles du chantier.

Une méthode de composition du béton pourra être considérée comme satisfaisante si elle permet de réaliser un béton répondant aux exigences suivantes :

- Le béton doit présenter, après durcissement une certaine résistance à la compression.
- Le béton frais doit pouvoir facilement être mis en œuvre avec les moyens et méthodes utilisés sur le chantier.
- Le béton doit présenter un faible retrait et un fluage peu important.
- Le coût du béton doit rester le plus bas possible.

Dans le passé, pour la composition du béton, on prescrivait des proportions théoriques de ciment, d'agrégat fin et d'agrégat grossier. Mais l'élaboration des ciments ayant fait des progrès considérables, de nombreux chercheurs ont exprimé des formules en rapport avec les qualités recherchées :

- minimum de vides internes déterminant une résistance élevée ;
- bonne étanchéité améliorant la durabilité ;
- résistance chimique ;
- résistance aux agents extérieurs tels que le gel, l'abrasion, la dessiccation.

Le béton peut varier en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface, et peut ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect. La composition d'un béton et le dosage de ses constituants sont fortement influencés par l'emploi auquel est destiné le béton et par les moyens de mise en œuvre utilisés.

3.4 La composition de béton à l'aide de la méthode Dreux-Gorisse [25]

Pour permettre une mise en œuvre correcte du béton, il est important que la taille des plus gros granulats D_{\max} ne s'oppose pas au déplacement des grains entre les armatures métalliques du ferrailage. Il existe une borne supérieure de D_{\max} à respecter en fonction de la densité du ferrailage, des dimensions de la pièce à réaliser, et de la valeur de l'enrobage des armatures. D_{\max} est le diamètre du plus gros granulat entrant dans la composition du béton. Sa valeur peut être lue sur la feuille d'analyse granulométrique des granulats correspondants.

3.4.1 Dosage en ciment

Selon Dreux-Gorisse, on utilise la formule $\sigma'_{28} = G \sigma'_c (C/E - 0.5)$

On en déduit une valeur approximative du rapport E/C ; puis par des abaques on détermine C et E en fonction de C/E, de la résistance, et de la plasticité désirée.

σ'_{28} : Résistance moyenne à viser $\sigma'_{28} = \sigma'_n + 15\%$

σ'_n : Résistance nominale en compression à 28jours.

G : Coefficient granulaire : valeur tabulée en fonction de la qualité des granulats (bonne ou courant, excellente, passable) et de la dimension D des gros granulats ; les valeurs approximatives de G supposent que le serrage du béton sera effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principe).

σ'_c : Classe vraie du ciment à 28jours en bars.

C : Dosage en ciment (kg/m³).

E : Dosage en eau totale sur matériaux secs (l/m³).

Remarque

Les abaques d'où sont déduits les très nombreux résultats expérimentaux, donnent des valeurs approximatives et il convient de les vérifier ou de les modifier par des essais dits « d'étude et de convenance »

3.4.2 Dosage en eau

L'eau est dans la composition d'un béton le facteur qu'il convient de régler avec le plus de minutie. Or, c'est justement celui, qui, compte tenu de la précision nécessaire, est le plus difficile à calculer préalablement et à mettre en exécution.

La quantité d'eau dans un mètre cube de béton, sert pour une partie à l'hydratation et à la prise du ciment tandis que l'autre partie confère, sous forme d'eau de mouillage et

interstitielle, au béton ses qualités de plasticité et d'ouvrabilité, une autre partie de l'eau pouvant d'ailleurs être absorbée par les granulats plus ou moins poreux.

3.4.3 Dosage en granulat

C'est le pourcentage de sable et de gravier exprimé à partir de la courbe granulaire de référence construite par l'une des méthodes de composition de béton, figure ci-dessous courbe OAB. La courbe OAB, où B à l'ordonnée 100% correspond à la dimension D du plus gros granulat et le point de brisure A à des coordonnées ainsi définies comme suit:

En abscisse : si $D \leq 20$ mm l'abscisse est $D/2$, si $D \geq 20$ mm l'abscisse est située au milieu du segment, gravier limité par le module 38(5mm) et le module correspond à D.

En ordonnée : Y donnée par la formule suivante : $Y = 50 - \sqrt{D+k}$

K est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés (surtout le sable, dont l'influence est prépondérante) et également du module de finesse du sable.

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants. On trace alors les lignes de partage entre chacun des granulats en joignant le point à 95% de la courbe du granulat suivant, et ainsi de suite. On lira alors sur la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de partage le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats g_1, g_2, g_3 par exemple.

Si c est le dosage en ciment, le volume absolu des grains de ciment est : $c = C/3.1$ ou 3.1 C'est la masse spécifique pour les grains du ciment (valeur moyenne habituellement admise). Le

volume absolu de l'ensemble des granulats est $V = 1000\gamma - c$

C: le volume absolu de ciment.

γ : coefficient de compacité : valeur tabulée en fonction de la consistance, le serrage et la dimension maximale des grains de granulat D et en fonction de terme correctif sur le type de granulats (concassés, roulés) et le dosage en ciment différent de 350 kg/m^3 .

Les valeurs absolues de chacun des granulats sont : $v_1 \geq g_1 V, v_2 \geq g_2 V, v_3 \geq g_3 V$ et si les masses spécifiques de chacun des granulats sont d_1, d_2, d_3 ; les masses de chacun d'eux sont : $p_1 = v_1 d_1; p_2 = v_2 d_2; p_3 = v_3 d_3$.

La masse totale de granulat G où $G = \sum_{i=1}^n p_i$, ou n le nombre de granulat dans un mélange de béton.

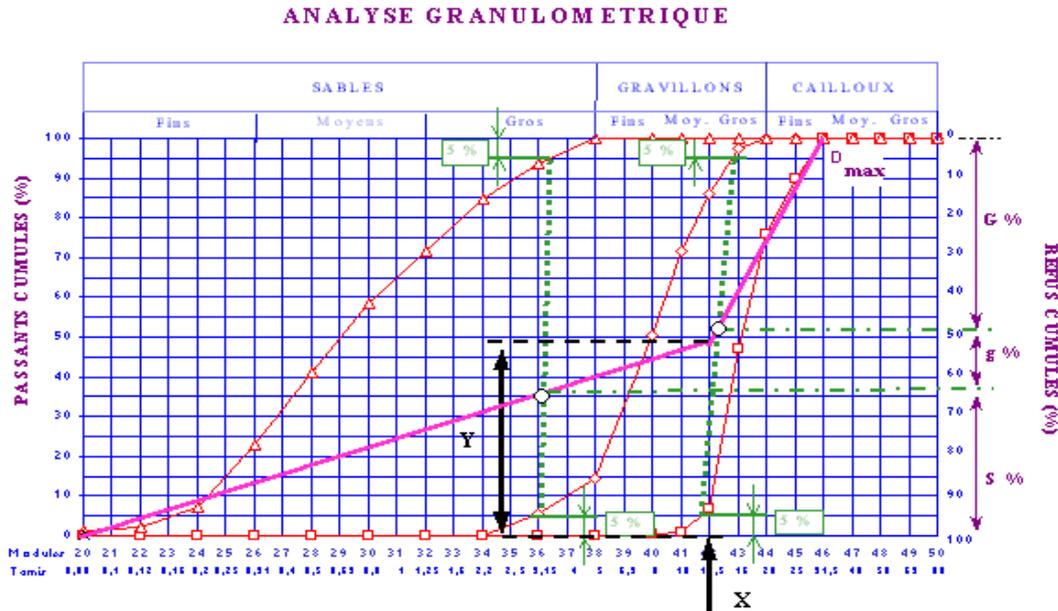


Figure 6: Détermination des pourcentages en volume absolu de matériau.

3.4.4 Corrections

En fonction des observations, des mesures faites lors de l'essai de gâchage et des résistances mécaniques obtenues, il sera nécessaire d'effectuer des corrections.

- **Consistance** : Lors de l'essai de gâchage, il est recommandé de ne pas ajouter tout de suite la quantité d'eau totale E prévue. Il est préférable d'ajouter seulement 95 % de E, de mesurer la consistance, puis d'ajouter de l'eau jusqu'à obtention de la consistance prescrite. On devra en tous les cas toujours veiller à ce que la consistance du béton permette une mise en œuvre correcte.
- **Dosage en ciment** : Si le dosage en ciment effectivement réalisé est erroné, on devra le corriger. S'il faut rajouter (ou enlever) un poids ΔC de ciment pour obtenir le dosage désiré, on devra enlever (ou rajouter) un volume absolu équivalent de sable. Si ΔC est important, il faudra aussi corriger la quantité d'eau.
- **Résistances mécaniques** : Si les résistances mécaniques sont insuffisantes, il faudra avoir recours à l'une ou plusieurs des possibilités suivantes :
 - Augmenter le dosage en ciment (au-delà de 400 kg/m^3 , une augmentation de dosage en ciment n'a plus qu'une très faible influence sur l'accroissement de résistance).
 - Diminuer le dosage en eau sans changer la granulométrie.
 - Corriger la granulométrie et réduire la quantité d'eau. Utiliser un autre type de granulats.
 - Utiliser un adjuvant et réduire la quantité d'eau.
 - Utiliser un ciment à durcissement plus rapide.

Remarque

Des corrections éventuelles peuvent être effectuées sur la formulation du béton après réalisation de plusieurs essais d'études. La correction peut être faite au niveau du dosage en eau, de la consistance, de l'ouvrabilité, du risque de ségrégation éventuelle, de l'ajustement au mètre cube, de la résistance.....etc.

Ces essais d'études sont complétés par des essais de convenance afin de terminer par quelques dernières et petites corrections éventuellement apportées si nécessaire.

3.5. Présentation de la carrière E.N.G unité d'ELKHROUB**3.5.1. Entreprise nationale des granulats**

L'Entreprise Nationale des Granulats "ENG" issue de la restructuration de la SNMC (Société Nationale des Matériaux de Construction) a été créée par décret N° 86.270 du 04 novembre 1986, avec effet à partir du 1er Janvier 1987.

L'Entreprise Nationale des Granulats est passée à l'autonomie et est devenue une société par actions. le capital social de la société est de 3 milliards de dinars en 2007.

Le siège de l'entreprise est implanté au Gué de Constantine - Alger.

L'Entreprise Nationale des Granulats "ENG" est chargée de la gestion des activités de production, de commercialisation et de développement des granulats, du carbonate de calcium et des pierres ornementales.

A compter de l'année 2000, la relance de l'activité économique est ressentie, ce qui a permis à l'ENG de renforcer davantage son activité en confortant sa présence sur le marché national et en réalisant des performances en matière de production et de résultats financiers.

Le patrimoine de l'ENG est constitué de :

- dix (10) carrières de granulats.
- une usine de carbonate de calcium mise en service en 1994,
- une filiale chargée des pierres ornementales opérationnelle depuis le 1er janvier 2004.

L'ENG produit du sable de concassage et des différentes classes de gros granulats destiné au béton hydraulique et aux travaux publics de qualité et qui est conforme aux Normes Européennes et Algériennes.

3.5.2. Unité d'ELKHROUB**3.5.2.1. Localisation**

La carrière se situe dans la wilaya de Constantine, daïra d'El Khroub, commune d'Ouled Rahmoune au lieu dit Ain El Beida. Elle fait partie des unités productrices de granulats, on peut y accéder par :

- la RN10 sur 18 km
- la RN 20 vers Guelma sur 5,96 km
- le chemin d'exploitation de la zone industrielle sur 387 m.

3.5.2.2. Aperçu géologique

Le gisement exploité est situé sur le versant Nord du Djebel Ain El Beida. Il est constitué par des calcaires très massifs, sans aucune stratification apparente. De couleur beige clair, ces calcaires présentent des fissures subverticales qui découpent le front de taille en d'énormes blocs prismatiques. Le massif est assez homogène (même faciès sur le front de taille), il montre cependant une épaisseur de deux mètres de roche altérée en surface. La découverte est de nature argileuse, de couleur rouge brunâtre et son épaisseur varie de 30 à 40 cm. Cette découverte pollue la roche dans la partie terminale du gisement, au niveau du gradin supérieur ou elle colmate les fissures superficielles.

3.5.2.3. Condition d'exploitation minière

L'excavation présente un front de taille de forme circulaire, largement déployé. Il comprend un ensemble de trois gradins. Le premier en découverte, a une hauteur d'environ 20 mètres. Le deuxième a une hauteur d'environ 15 mètres, le troisième une hauteur neuf mètres. L'ouverture a débute par le bas du gisement, lors de la mise en exploitation de cette carrière en 1978. Un nouveau plan d'exploitation reprend les travaux par le haut du gisement.

CHAPITRE 2

PROGRAMME EXPERIMENTAL

2. Programme expérimental

2.1. Introduction

Nous traiterons dans ce chapitre de la caractérisation des matériaux utilisés dans la fabrication des différents mélanges de béton. Nous avons comme objectif commun avec l'E.N.G, de travailler avec des granulats définis 4/22,4 par l'entreprise.

Nous allons aussi décider de la méthode de composition qui nous permettra d'établir les différentes formulations des mélanges des bétons.

Il est fait une description la plus précise des essais réalisés pour caractériser les granulats utilisés. Cela pour nous permettre d'étudier différentes formulations des mélanges dont nous déterminerons les résistances en compression et en traction par flexion.

2.2. Caractérisation des constituants

2.2.1. Le ciment

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment portland composé obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts. Le sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise. Le ciment provient de l'usine ERCE (Hamma Bouziane) Le produit a comme identification CPJ-CEM II/A 42,5 et il a les caractéristiques suivantes :

Caractéristiques	Description
physiques	<ul style="list-style-type: none"> • Le temps de début de prise mesuré sur pate pure est 60 minutes. • Le retrait à 28 jours d'âge du mortier normal est 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$. • La stabilité mesurée sur éprouvette de pate pure est 10mm.
mécaniques	<ul style="list-style-type: none"> • Les résistances mécaniques à la compression font apparaitre une valeur moyenne des résultats à 28 jours d'âge, voisine de 52.5 N/mm². c'est ce qu'on appelle la classe vraie du ciment.
chimiques	<ul style="list-style-type: none"> • La teneur en sulfates (SO₃) dans le ciment est de 3.5 %. • La teneur en chlorures (Cl⁻) est de 0.1 %.

Tableau 9. Caractéristiques du ciment

En conclusion, le produit se présente comme suit :

- **Désignation** : Ciment Portland Composé
- **Identification** : CPJ-CEM II/A 42,5
- **Composition** : 80 à 94 % de Clinker et 6 à 20 % d'ajouts
-

2.2.2. L'eau de gâchage

On a utilisé une eau potable du robinet, ce qui est considéré comme appropriée pour la fabrication du béton et ne nécessite aucun essai spécifique. [24]

2.2.3. Caractérisations des granulats

2.2.3.1. Courbes granulométriques

a/ Sable concassé 0/4



Figure 7 : Sable concassé 0/4 (carrière ENG)

Le sable utilisé est un granulat fin de classe granulaire s'étendant entre 0 et 4 mm. C'est un produit, de la carrière géante ENG (Entreprise Nationale des Granulats, unité d'El khroub), résultant du concassage de roche d'une pétrographie calcaire massif.

Selon l'analyse faite au laboratoire central de chimie au niveau de la carrière, on a obtenu les résultats des passants cumulés et la courbe granulométrique correspondante représentés dans le tableau suivant :

Ouvertures des tamis (mm)	Pourcentages cumulés des passants %
8	100
5.6	99
4	97
2	57
1	40
0.5	28
0.25	22
0.125	16
0.063	13

Tableau 10. Résultat de l'analyse granulométrique de sable

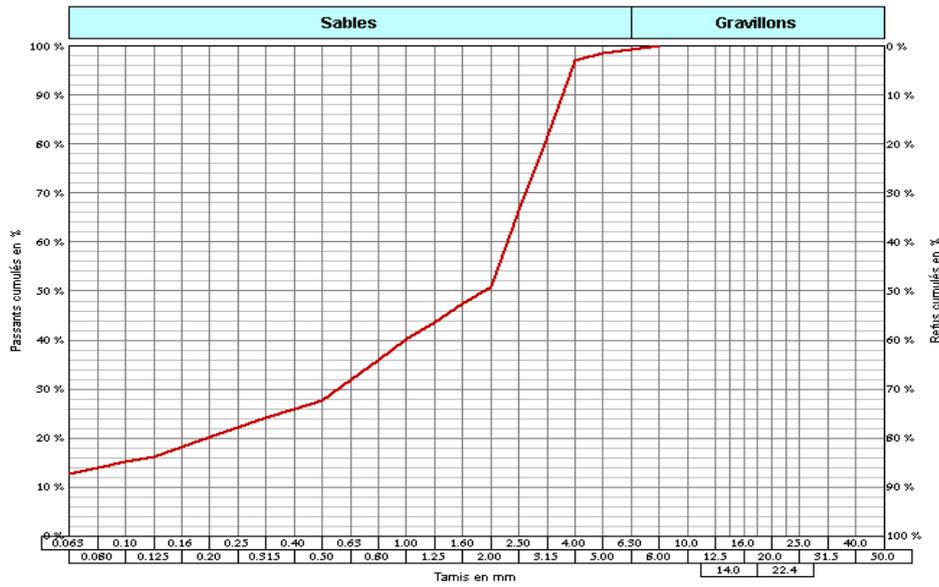


Figure 8. Courbe granulométrique pour sable concassé 0/4

Concernant la granularité du sable utilisée, on constate qu'elle est étalée et régulière.

b/ Gravillon 4/8



Figure 9 : Gravillon4/8 (carrière ENG)

Le gravillon utilisé est un granulat de classe granulaire s'étendant entre 4 et 8 mm, produit concassé de la carrière géante ENG (Entreprise Nationale des Granulats), unité d'EL KHROUB, résultant du concassage de la même roche utilisée pour produire le sable 0/4. L'analyse granulométrique effectuée au niveau du laboratoire a donné les résultats suivants :

Ouvertures des tamis (mm)	Pourcentages cumulés des passants %
16	100
11.2	100
8	98
5.6	50
4	11
2	05

Tableau 11. Résultat de l'analyse granulométrique de Granulat 4/8

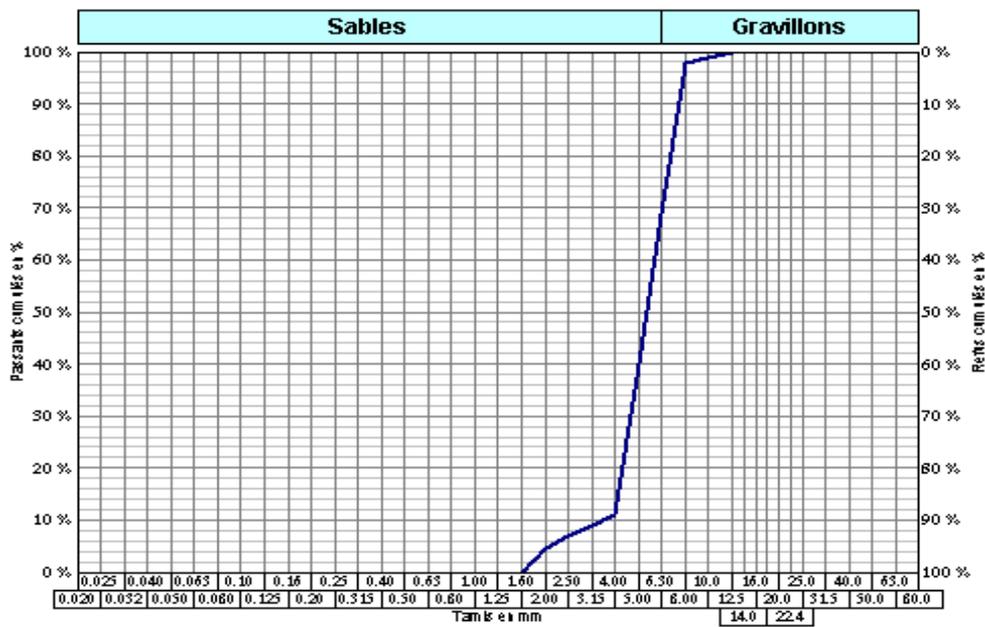


Figure 10 : Courbe granulométrique pour granulat 4/8

c/ Gravillon 8/16



Figure 11 : Granulat 8/16

Le gravillon utilisé est un granulat de classe granulaire comprise entre 8 et 16 mm, produit concassé de la carrière géante ENG (Entreprise Nationale des Granulats), unité d'EL KHROUB , résultant du concassage de la même roche qu'on a utilisé pour produire le sable 0/4 et le gravillon 4/8. L'analyse granulométrique effectuée au niveau du laboratoire a donné les résultats suivants :

Ouvertures des tamis (mm)	Pourcentages cumulés des passants %
31,50	100
22,40	100
16,00	99
11,20	55
8,00	14
4,00	02

Tableau 12. Résultat de l'analyse granulométrique de gravillon 8/16

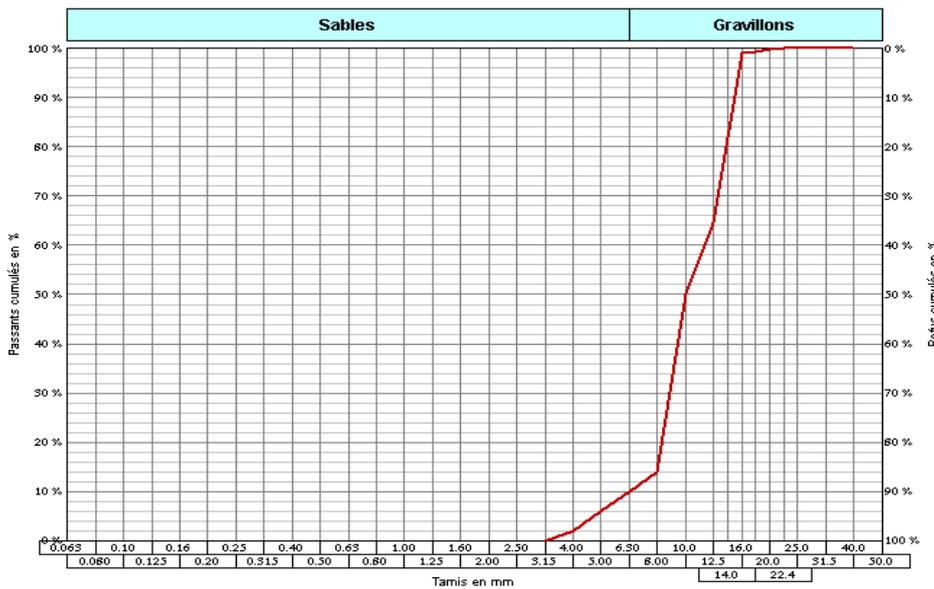


Figure 12. Courbe granulométrique pour granulat 8/16

d/ Gravillon 16/22.4

Figure 13. Gravillon 16/22.4

Le gravillon utilisé est un granulats de classe granulaire allant de 16 à 22.4 mm, produit concassé de la carrière géante ENG (Entreprise Nationale des Granulats), unité d'ELKHROUB , résultant du concassage de la même roche qu'on ait utilisé pour produire le sable 0/4, 4/8, et 8/16 . L'analyse granulométrique effectuée au niveau du laboratoire, a donné les résultats suivants :

Ouvertures des tamis (mm)	Pourcentages cumulés des passants %
45	100
31.5	100
22.4	98
16	18
8	02

Tableau 13. Résultats de l'analyse granulométrique des granulats 16/22.4

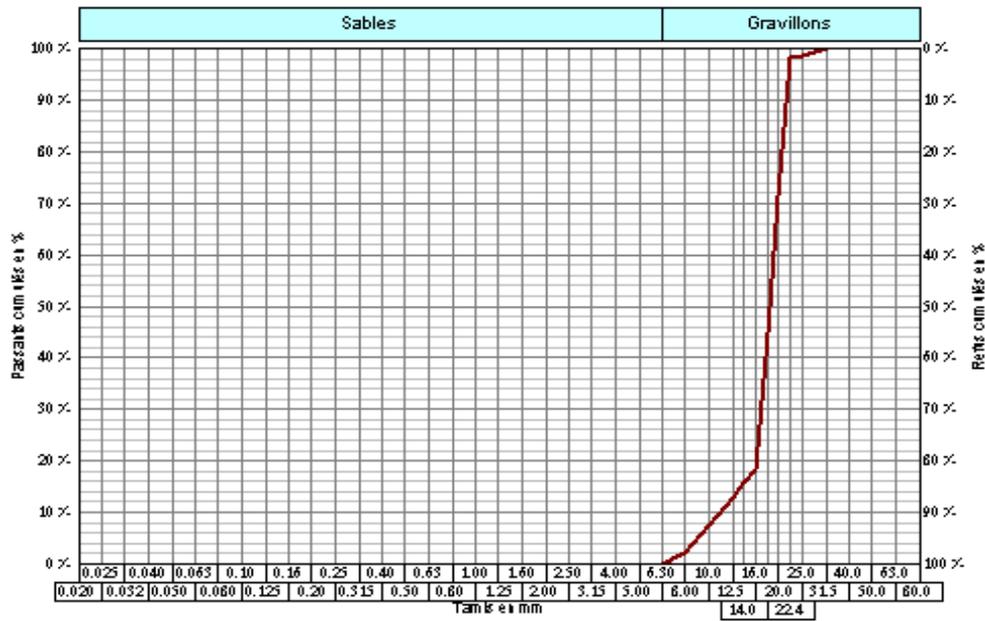


Figure 14. Courbe granulométrique pour granulat 16/22.4

e/ Gravillon de grave (Gg) 4/22.4

Ouvertures des tamis (mm)	Pourcentages cumulés des passants %
45	100
31.5	100
22.4	99
16	71
11.2	37
4	06
2	05

Tableau 14 .Résultat de l'analyse granulométrique de Granulat 4/22.4 de grave

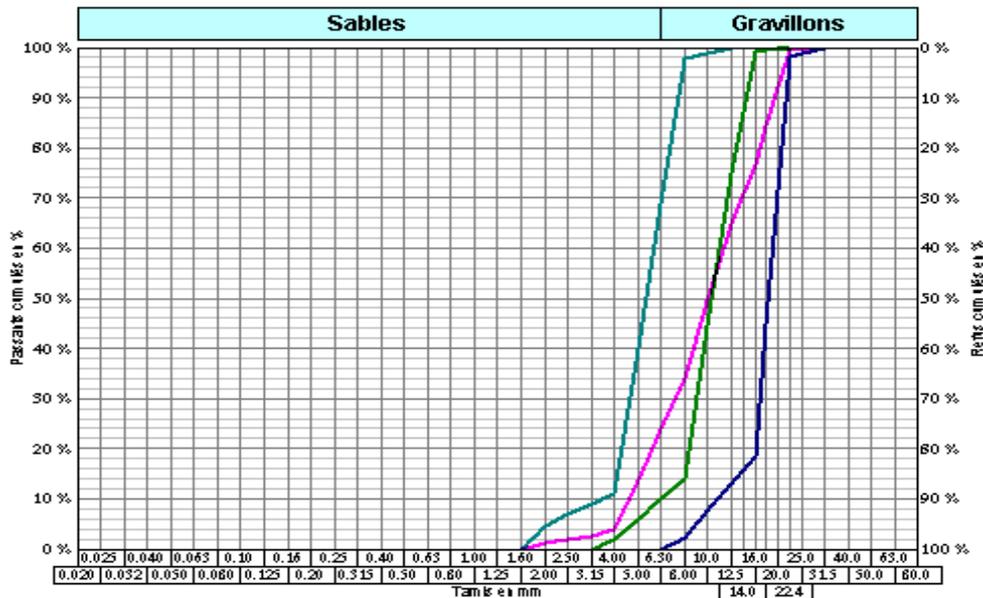


Figure 15. Courbe granulométrique pour granulat Gg

2.2.3.2 Analyses complémentaires

a/ Granulat fin sable

Concernant les autres caractéristiques géométrique et physique de ce sable, les analyses ont été réalisées au niveau de laboratoire central de l'ENG et les résultats suivants ont été obtenus :

Caractéristiques	symbole	valeur	Unité
Module de finesse	Mf	3.4	-
Teneur en eau	W	1.1	%
% des fines	F	12.87	%
Valeur de bleu de méthylène	MB	0.42	
Equivalent de sable	ES	53	%

Tableau 15. Caractéristiques physico-chimiques du sable 0/4

On observera que pour ce sable, le pourcentage des fines est un peu élevé et que l'équivalent de sable est inférieur à 60%. Un module de finesse MF élevé d'une valeur supérieure à 2.8, ce qui fait de ce sable un sable grossier [25].

b/ Gros granulats

Caractéristiques	symbole	4/8	8/16	16/22,4	Gg 4/22,4	Unité
% des fines	F	1.63	0.99	0.75	4.23	%
aplatissement	A	15	12	6.3	11	-
Micro-deval	MDE	23	23	23	23	
Los-Angeles	LA	34	34	34	34	
Masse volumique réelle	ρ_b	2.6	2.6	2.6	2.6	Mg/m ³
Masse volumique en vrac	ρ_{rd}	1.31	1.36	1.35	1.41	Mg/m ³
Porosité inter-granulaire	v	0.49	0.48	0.479	0.46	-

Tableau 16. Analyses complémentaires pour gravillons

2.3. Méthodologie d'étude et méthode de formulation des bétons

L'objectif de notre étude est de connaître les performances d'une classe granulaire étalée 4/22.4 faisant varier les pourcentages des différents constituants granulaires.

2.3.1. Méthodologie d'étude

Les besoins de notre étude nous amènent à préparer cinq bétons à partir de classe granulaire étalée 4/22.4 de gravillon ; Béton G, béton R, de ce dernier nous avons trois types béton R1, béton R2 et béton R3 et un béton témoin BT qui est formulé à partir de trois classes granulaires séparées.

Dans ce qui suit nous donnons la définition et la composition de chaque type de béton.

2.3.1.1. Béton témoin (béton T)

Le béton témoin est un mélange ordinaire préparé à partir de trois classes séparées de gravillons concassés 4/8, 8/16 et 16/22.4, d'un sable concassé 0/4, de ciment portland composé et de l'eau. La méthode de composition utilisée est la méthode Dreux Gorisse.

2.3.1.2. Béton de grave (béton G)

C'est un béton ordinaire composé à partir d'une seule classe granulaire étalée 4/22.4 qui est préparée au niveau de laboratoire à partir d'un grave 0/25 en éliminant les deux fractions 0/4 en dessous et 22.4 au dessus de ce grave. On y ajoute un ciment portland composé CPJ-CEM II/A 42,5, un sable concassé 0/4 et de l'eau.

2.3.1.3. Béton recomposé (béton R)

Ce béton est aussi un béton ordinaire, se composant d'une seule classe granulaire étalée 4/22.4. Mais cette fois la classe granulaire est réalisée à partir d'un recomposé préparé au niveau du laboratoire à partir de trois classes séparées 4/8, 8/16 et 16/22.4. Ces dernières sont utilisées dans la préparation du béton témoin.

Suivant des pourcentages choisis au préalable, nous obtenons trois types de béton présentés dans le tableau suivant :

bétons	granulats		
	4/8	8/16	16/22,4
Br1	30%	30%	40%
Br2	40%	30%	30%
Br3	50%	30%	20%

Tableau 17. Pourcentage des granulats élémentaires

2.3.2. Formulation des bétons d'études

2.3.2.1. Choix d'une méthode de formulation

Le choix de la méthode de formulation s'est fait en fonction des critères suivants :

- Une méthode assez simple et facile à utiliser.
- C'est une méthode appliquée au niveau des laboratoires de l'est algérien comme ceux du C.T.C.Est, le L.T.P.Est et autres laboratoires privés
- pour pouvoir comparer les résultats à ceux des autres organismes de contrôle.

Donc on travaillera avec la méthode DREUX – GORISSE.[7]

Remarque

Les trois mélanges ont des caractéristiques constantes qui sont les suivantes :

- Dimension maximale des granulats D_{max}
- résistance nominale demandée $\delta'n=250$ bars (Classe de résistance C25/30)
- Classe de consistance S_3
- Dosage en ciment C

- Dosage en eau E
- Le rapport G/S

2.3.2.2. La partie normative pour les bétons d'étude

Ce sont des bétons coulés sur place, sur chantier destinés au bâtiment et ouvrage de génie civil selon les prescriptions de la norme européenne, version française NF EN 206-1, où cette dernière couvre, les bétons de masse volumique normale (entre 2000 et 2600 kg/m³). [6]

a/ Classe d'exposition du béton [6]

La classe d'exposition est donnée en fonction des actions dues à l'environnement auxquelles les bétons de l'ouvrage ou de la partie de l'ouvrage vont être soumis pendant leur durée de service.

La norme NF EN 206-1 définit dix-huit sous-classes d'exposition regroupées en six classes par risque de corrosion, d'attaques ou d'agressions dépendant des actions et conditions environnementales.

Nous retenons la classe XC qui comporte quatre sous classes qui sont :

- XC₁ : sec et humide en permanence.
- XC₂ : humide, rarement sec.
- XC₃ : humidité modérée.
- XC₄ : alternance d'humidité et de séchage.

Nous prendrons en compte la sous classe XC4 pour notre étude.

Remarque

Actions dues à l'environnement c'est-à-dire action physiques et chimiques auxquelles le béton est exposé, entraînant des effets sur le béton et les armatures et n'étant pas considérées comme des charges pour la composition de la structure.

b/ Classe de résistance du béton [6]

Nous appliquons la norme NF EN 206-1 qui définit la classe de résistance à la compression. Sa valeur de 25 MPa est une résistance ciblée, satisfaisante, donc on a opté pour la classe C 25/30. Ce qui nous amène à prendre comme résistance nominale demandée 250 bars (25 MPa) pour l'application de la méthode de formulation de béton Dreux-Gorisse. Ce choix repose aussi sur la réalité rencontrée sur plusieurs chantiers nationaux de réalisation.

c/ Classe de consistance du béton [6]

La norme NF EN 206-1 définit d'après l'affaissement, cinq classes de consistance des bétons qui sont représentées ci-dessous dans le tableau suivant :

Classes de consistance					
Classe	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
Affaissement (mm)	10÷40	40÷90	100÷150	160÷210	≥210

Tableau 18. Classe de consistance en fonction de l'affaissement [6]

Pour notre étude on a utilisé comme un moyen de spécification de consistance le cône d'Abrams qui reste le moyen le plus utilisé car il est le plus simple. Il nécessite un matériel peu coûteux et peut être exécuté par un personnel moyennement qualifié.

Pour la consistance on se place dans la deuxième case où la valeur d'affaissement est comprise entre 100 et 150 mm, c'est-à-dire la classe S₃, ce qui suppose un béton plastique.

d/ Classe de masse volumique du béton [6]

Les bétons étudiés ont une masse volumique comprise entre 2300 à 2500 kg/m³.

e/ Valeurs limites spécifiées applicables à la composition et aux propriétés des bétons.

Ces valeurs sont déterminées en fonction de la classe d'exposition selon le contexte normatif de la norme NF EN 206-1 où on a abouti aux différents résultats représentés ci-dessous dans le tableau suivant :

Classes d'exposition	Sous classe d'exposition	Rapport Eeff/Liant éq maximal	Classe de résistance minimale	Teneur minimale en liant éq (kg/m ³)	Teneur minimale en air (%)
Carbonatation	XC1	0.65	C20/25	260	Non spécifié

Tableau 19. Valeurs limites spécifiées applicables à la composition et aux propriétés des bétons.

2.4 Calcul de la proportion des constituants

2.4.1 Formulation du béton témoin : Bt

Le béton témoin étudié est un béton à propriétés spécifiées (BPS) qui d'après la norme NF EN 206-1, est désigné par: BPS NF EN 206-1 C25/30 XC1 D_{max}22.4 S₃.

Conformité à la norme NF EN 206-1.

- Classe de résistance C25/30.
- Classe d'exposition XC1.
- Dimension maximale des granulats $D_{\max} = 22.4$ mm.

- Classe de consistance S_3 .

Remarque

La désignation peut aussi comprendre le type et la classe de ciment si celle-ci est spécifiée, conformément à la norme, soit par exemple CEM II/A 42,5 CPJ NA.

2.4.2 Propriétés de Bt

2.4.2.1 La résistance

$f_{ck-cyl} = 25$ MPa car c'est la valeur exigée dans presque tous les projets, pour un béton ordinaire.

2.4.2.2 Dimension maximale des granulats $D_{max} = 22.4$ mm

D'après la réalité du chantier, rencontrée sur le territoire de la wilaya de Constantine on a vu que presque toutes les formulations utilisent la même dimension maximale des granulats qui est de 25 mm, où c'est le maçon qui impose en général, le diamètre maximal en se basant sur l'expérience, sans aucune base scientifique. Ce qui influe sur le marché des granulats où on a vu que toutes les demandes se font pour un granulats de $D_{max} = 25$ mm.

Le contexte normatif représenté par la norme NF EN 12620, granulats pour béton spécifie qu'il n'existe plus dans les séries des tamis, ni la série de base ni les deux séries 1 et 2 qui sont seules les séries spécifiées par la norme, la dimension qui donne un D_{max} de 25 mm. [27]

2.4.2.3 La consistance

On a obtenu la valeur d'affaissement $A = 110$ mm. Avec une tolérance relative aux valeurs cibles de consistance comme suit :

Selon la norme EN 206-1 pour $A = 100$ mm la tolérance est ± 30 mm ce qui nous guide à un affaissement acceptable entre 70 mm et 130 mm. [6]

2.4.2.4 Dosage en ciment

On a dosé les bétons préparés à un dosage en ciment vaut 350 kg/m^3 qui est clairement supérieur au dosage minimal prescrit par la norme européenne où elle exige 260 kg/m^3 au minimum. [6]

2.4.2.5 Le rapport E/C

Lors du calcul de la formulation du béton à l'aide de la méthode Dreux-Gorisse, on obtient un dosage en eau de 217.21 litres et un dosage en ciment de 350 kg/m^3 . Ce qui nous a donné un rapport eau sur ciment (E/C) égal à 0.61. En comparant la valeur obtenue avec la valeur spécifiée dans la norme européenne $E/C = 0.65$ (cité ci-avant dans le tableau), on trouve que la condition $0.61 \leq 0.65$ est satisfaite. [6]

2.4.3 Application numérique

2.4.3.1. Données de base

Données de base	Description (valeur)
Béton normal de classe	C25/30.
Consistance	béton plastique.
Dimension maximale de granulat	D= 22,4 mm ($\sqrt{D} = 4,73$ mm)
Forme des granulats	Granulats concassés.
Qualité des granulats	Bonne (courante).
Serrage	vibration normale (courante).
Dosage en ciment	C = 350kg/m ³
Classe vraie du ciment σ'_c (bars)	525 bars
Module de finesse MF	3.4
Coefficient granulaire G	0,486

Tableau 20. Donnés de bases pour la formulation

valeurs de G coefficient granulaire			
qualité des granulats	dimension des granulats D (mm)		
	fins D≤16mm	moyens 25≤D≤40	gros D≥63
Excellente	0,55	0,6	0,65
bonne, courante	0,45	0,5	0,55
passable	0,35	0,4	0,45

Tableau 21. Valeurs de G coefficient granulaire. [7]

Après interpolation, on obtient la valeur de G= 0.486.

2.4.3.2 Résistance moyenne et rapport E/C

Si l'on admet un coefficient de variation moyen de l'ordre de 20%, on pourra adopter la règle approximative pour la résistance moyenne à viser à vingt huit jours de $\sigma'_{28} = \sigma'_n + 15\%$

Avec une résistance nominale σ'_n (bars) pour un C25/30, on a une valeur de $\sigma'_n = 250$ bars.

D'où $\sigma'_{28} = \sigma'_n + 15\% = 250 + (15 \times 250)/100 = 287,5$

On obtient un $(C/E) = (\sigma'_{28} / G \times \sigma'_c) + 0,5 = 1,63$ et donc un E/C = 0,61

2.4.3.3 Dosage en ciment

$C = 350\text{kg/m}^3$ valeur prescrite.

2.4.3.4 Dosage en eau

$$E/C = 0,61 \implies E = 0.61 C = 0.61 \times 350 = 215.15$$

Dosage en eau = 215,15

Correction du dosage en eau selon le diamètre maximal D du mélange granulaire

Diamètre en mm	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50
Correction en %	9	6	4	2	0	-2	-4	-6

Tableau 22. Valeurs de la correction sur le dosage en eau [7]

On a un $D_{\max} = 22.4$ mm qui se place entre 20 et 25 mm ce qui correspond à une correction comprise entre 2 et 0 %. La correction est de 0.96 % en plus de la quantité d'eau calculée donc on obtient : $E = E_{\text{calculée}} + 0.96 \times E_{\text{calculée}} = 215.15 + 0.96 (215.15) = 217.21$

E après correction = 217,21 litres.

2.4.3.5 Dosage des granulats

D'après la courbe granulaire de référence on obtient les résultats suivants :

$Y = 50 - \sqrt{D+k} = 49,49$: ordonnée de référence avec :

vibration forme(s,t,sabl)	faible		normale		puissante	
	roulé	concassé	roulé	concassé	roulé	concassé
400+fluidifiant	(-)2	0	(-)4	(-)2	(-)6	(-)4
400	0	(+)2	(-)2	0	(-)4	(-)2
350	(+)2	(+)4	0	(+)2	(-)2	0
300	(+)4	(+)6	(+)2	(+)4	0	(+)2
250	(+)6	(+)8	(+)4	(+)6	(+)2	(+)4
200	(+)8	(+)10	(+)6	(+)8	(+)4	(+)6

Tableau 23. Valeurs du terme correcteur k

La valeur trouvée est $k = 2,6$

consistance	serrage	coefficient de compacité γ						
		D=5	D=10	D=12,5	D=20	D=31,5	D=50	D=80
Molle	piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Tableau 24. Valeurs du coefficient de compacité γ

Les corrections effectuées, on trouve $\gamma = 0,796$.

Béton témoin

$$(\%)S=40, (\%)S / 100 = 0,4$$

$$(\%)g_{1(4/8)} = 7 \longrightarrow (\%)g_{1(4/8)} / 100 = 0,07$$

$$(\%)g_{2(8/16)} = 33 \longrightarrow (\%)g_{2(8/16)} / 100 = 0,3$$

$$(\%)g_{3(16/22,4)} = 20 \longrightarrow (\%)g_{3(16/22,4)} / 100 = 0,2$$

$$c = C/3,1 = 112,90$$

$$\text{volume absolu de l'ensemble des granulats } V = (1000 * \gamma) - c = 683,14$$

Dosage des granulats en kg

gravier 4/8 [kg] =125,10

gravier 8/16 [kg] =589,74

gravier 16/22,4[kg] =357,42

sable [kg] = 682,59

On obtient $G/S = 1072,26 / 682,59 = 1,57$

2.5 Performances du béton à l'état frais comme durci

2.5.1 Affaissement au cône d'Abrams

2.5.1.1 Principe de l'essai

Cet essai consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais. Ce dernier est compacté dans un moule ayant la forme d'un tronc de cône. Lorsque le cône est soulevé verticalement, l'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance.

2.5.1.2 Appareillage

- Moule pour former l'éprouvette : en métal non directement attaquant par la pâte de ciment, d'une épaisseur minimale de 1,5 mm. La paroi intérieure du moule doit être lisse, sans aspérités. Le moule doit avoir la forme d'un tronc de cône creux aux dimensions intérieures suivantes :
- diamètre de la base : (200 ± 2) mm ;
- diamètre du haut : (100 ± 2) mm ;
- hauteur : (300 ± 2) mm ;

Le moule doit être muni, à sa partie supérieure, de deux poignées et, à sa partie inférieure, de pattes de fixation ou d'appui, afin de l'immobiliser.

- Tige de piquage : de section circulaire, rectiligne, en acier, de (16 ± 1) mm de diamètre, et de (600 ± 5) mm de longueur, dont les extrémités sont arrondies.
- Entonnoir (facultatif) : en matériau non absorbant et non directement attaquant par la pâte de ciment, ayant un dispositif permettant à l'entonnoir d'être placé correctement sur le moule spécifié ci-dessus.
- Règle : graduée de 0 mm à 300 mm, avec des graduations de 5 mm, le zéro étant situé à une extrémité de la règle.
- Surface ou plateau de base : plateau ou autre surface, rigide, plat, non absorbant, sur lequel le moule sera posé.
- Récipient de ré-homogénéisation : plateau plat de structure rigide, en matériau non absorbant et non directement attaquant par la pâte de ciment. Ses dimensions doivent être appropriées de sorte que le béton puisse être facilement regâché, à l'aide de la pelle carrée.
- Pelle carrée : La pelle de forme carrée est nécessaire pour assurer un mélange correct du matériau sur le récipient de ré-homogénéisation
- Minuterie ou horloge : capable de mesurer le temps à 1 seconde près.

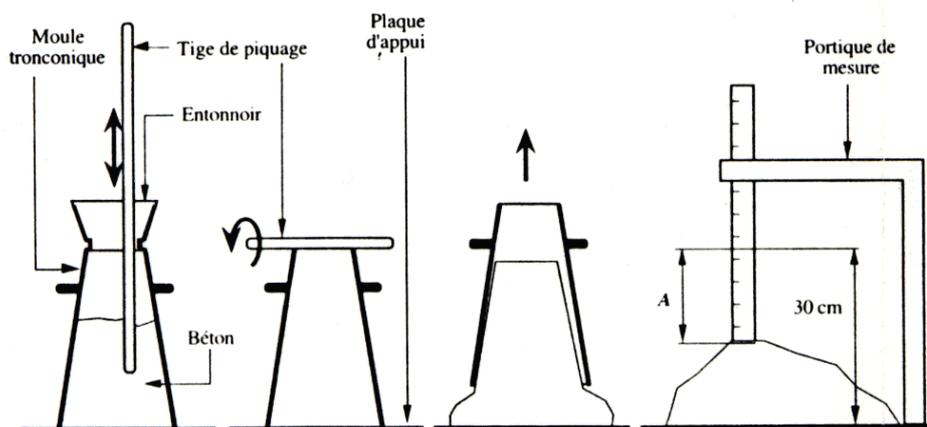


Figure 16. Essai d'affaissement

2.5.1.3 Mode opératoire

—Humidifier le moule et le plateau de base, puis placer le moule sur le plateau

—Maintenir fermement le moule en place pendant le remplissage, en le solidarissant par les deux pattes de fixation.

—Remplir le moule en trois couches, chacune correspondant approximativement, après serrage, au tiers de la hauteur du moule. Piquer chaque couche 25 fois avec la tige de piquage. Répartir les coups uniformément sur la section de chaque couche. Pour la couche inférieure, il est nécessaire d'incliner légèrement la tige et de donner approximativement la moitié des piquages avec des coups en spirale jusqu'au centre. Piquer la deuxième couche et la couche supérieure, chacune sur toute son épaisseur, de sorte que la tige pénètre légèrement dans la couche sous-jacente. Lors du remplissage et du compactage de la couche supérieure, mettre un excès de béton au-dessus du moule avant de commencer le piquage. Si lors du piquage de la couche supérieure apparaît un manque de béton au-dessous du bord supérieur du moule. Ajouter du béton pour avoir toujours un excès. Après avoir piqué correctement la couche supérieure, araser le béton suivant le bord supérieur du moule en effectuant un mouvement de sciage et de roulage à l'aide de la tige de piquage.

—Enlever le béton qui s'est écoulé sur le plateau de base. Démouler le béton en soulevant verticalement le moule avec précaution.

—Immédiatement après avoir retiré le moule, mesurer l'affaissement (h) en déterminant la différence entre la hauteur du moule et le point le plus haut du corps d'épreuve affaissé.

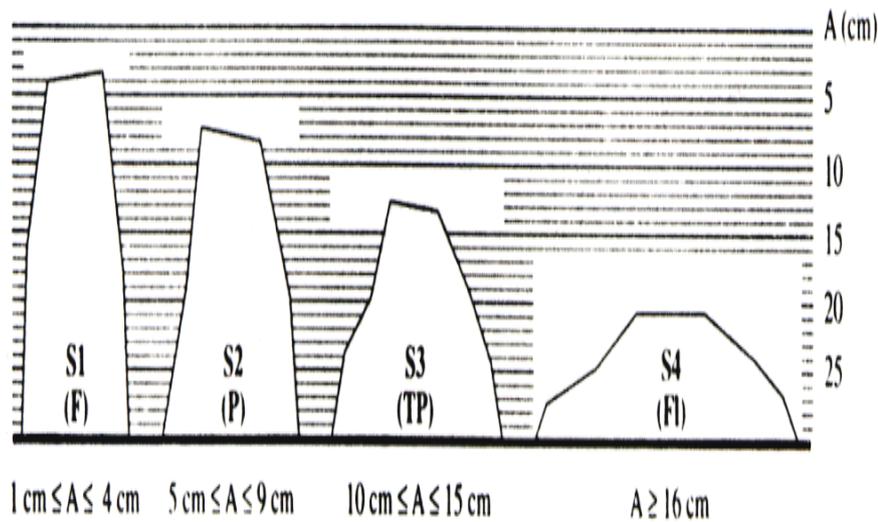


Figure 17. Les différentes classes de consistance de l'essai d'affaissement [25]

Remarque

- l'essai d'affaissement est sensible aux modifications de la consistance du béton correspondant à des affaissements compris entre 10mm et 200 mm. En dehors de ces limites, la mesure de l'affaissement peut être inadaptée et il convient d'envisager d'autres méthodes de détermination de la consistance.
- cet essai ne s'applique pas si la dimension maximale du plus gros granulat est supérieure à 40 mm.
- L'enlèvement du moule doit se faire en 5 s à 10 s, par une remontée verticale régulière sans imprimer au béton un mouvement latéral ou de torsion.
- L'ensemble des opérations, depuis le début du remplissage jusqu'à l'enlèvement du moule, doit être réalisé sans interruption et terminé en moins de 150 s.
- L'essai n'est valable que s'il conduit à un affaissement normal réel, c'est-à-dire un affaissement pour lequel le béton reste, dans l'ensemble, intact et symétrique. Si l'éprouvette se cisaille, un autre échantillon doit être pris et la procédure recommencée. Si deux essais consécutifs montrent un cisaillement du béton dans la masse de l'éprouvette, cela signifie que le béton ne présente pas la plasticité ni la cohésion nécessaires pour que l'essai soit applicable. [NF.EN 12350-2]

2.5.2 Résistance à la compression

L'essai de compression est mené sur des éprouvettes de forme cylindrique normalisée et d'élanement 2 (16x32 cm ; norme NF P 18-406, NA 427). La vitesse de chargement est constante. La machine d'essai est une presse de force de classe « B » et d'une capacité maximale de 1500 KN conforme à la norme NF P 18-412 (NA 2832).

Les éprouvettes (photo 5) sont conservées sans être déplacées pendant 24 heures. Après démoulage, les éprouvettes sont conservées jusqu'à réalisation des essais dans le même milieu ambiant. L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression. L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture.

La conduite de l'essai est la suivante : l'éprouvette, une fois rectifiée doit être centrée sur la presse d'essai avec une erreur inférieure à 1% de son diamètre. La mise en charge doit être effectuée à raison de 0.5 MPa avec une tolérance de ± 0.2 MPa. Pour des éprouvettes de 16x32 cm, cela signifie une montée en charge de 10 KN /s ± 4 KN / s. La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette. [10]



Figure 18. Machine d'essai d'écrasement (essai à la compression)



Figure 19. Epreuves pour l'essai d'écrasement (compression)

2.5.3 Résistance à la traction par flexion

Des éprouvettes prismatiques de dimensions 7 x 7 x 28 cm sont soumises à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale enregistrée au cours de l'essai est notée et la résistance à la flexion est calculée. [15] Les mesures sont faites sur une presse qui répond aux normes NF P 18-407 (NA 428), munie d'un banc de flexion à 4 points.

Pour une charge totale P , le moment de flexion constant entre les deux points d'application de la charge est : $M = P \times a / 2$ et la contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure est $f_t = 6M / a^3$ où on trouve la relation finale permet de calculer la résistance : **$f_t = 3P / a^2$**



Figure 20. Essai de traction par flexion



Figure 21. Machine d'essai de traction par flexion



Figure 22. Epreuve 7x7x28 cm



Figure 23. Epreuves coulées

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, les différentes caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des composants ont été établies. Les courbes granulométriques de toutes les classes granulaires sont présentées. Il était important de définir la partie normative à laquelle doivent répondre les différents mélanges. La méthode de formulation a été développée et le calcul de la proportion des constituants a été fait. Nous avons fixé quelques paramètres comme le rapport eau – ciment, le rapport granulats – sable. L'essai au cône d'Abrams nous a permis de déterminer la consistance des bétons étudiés. Les essais à la compression et à la traction par flexion sont décrits. Ils seront utilisés pour obtenir les valeurs des résistances à la compression et à la traction de tous les mélanges.

CHAPITRE 3

RESULTATS & DISCUSSIONS

3. Résultats et discussions

3.1. Introduction

Les résultats des essais vont nous permettre de générer un ensemble de données qui vont servir à valider le choix des classes granulaires spécifiques. Pour cela, la formulation de plusieurs mélanges de béton a été élaborée. L'étude s'est faite sur les caractéristiques des granulats, des classes granulaires et des bétons.

Les essais réalisés sont les suivants :

Sur granulat,

- granulométrie
- aplatissement
- masse volumique en vrac
- porosité

Sur béton,

- résistance à la compression à 7 jours
- résistance à la compression à 28 jours
- résistance à la traction à 28 jours
- densité du béton à l'état frais
- affaissement

3.2. Résultats des essais effectués sur granulats à sec

3.2.1. Granulométrie

Nous avons présenté l'analyse granulométrique des granulats des différentes classes granulaires : le sable 0/4, les granulats 4/8, 8/16 et 16/22.4 et le gravillon Gg dans le chapitre précédent et nous procédons à l'analyse granulométrique, dans ce qui suit, des quatre mélanges avec :

- le granulat témoin Gt
- les trois recomposés Gr1, Gr 2, Gr 3.

Ouvertures des tamis (mm)	Pourcentages cumulés des passants %			
	Gr1	Gr2	Gr3	Gt
40	100	100	100	100
31.5	100	100	100	100
22.4	99	99.5	98.82	87.5
16	71	67.7	78.33	72.44
11.2	52	45.7	61.84	42.4
4	04	2.3	3.68	2.4
2	01	0.7	1,14	0.6

Tableau 25. Résultats de l'analyse granulométrique

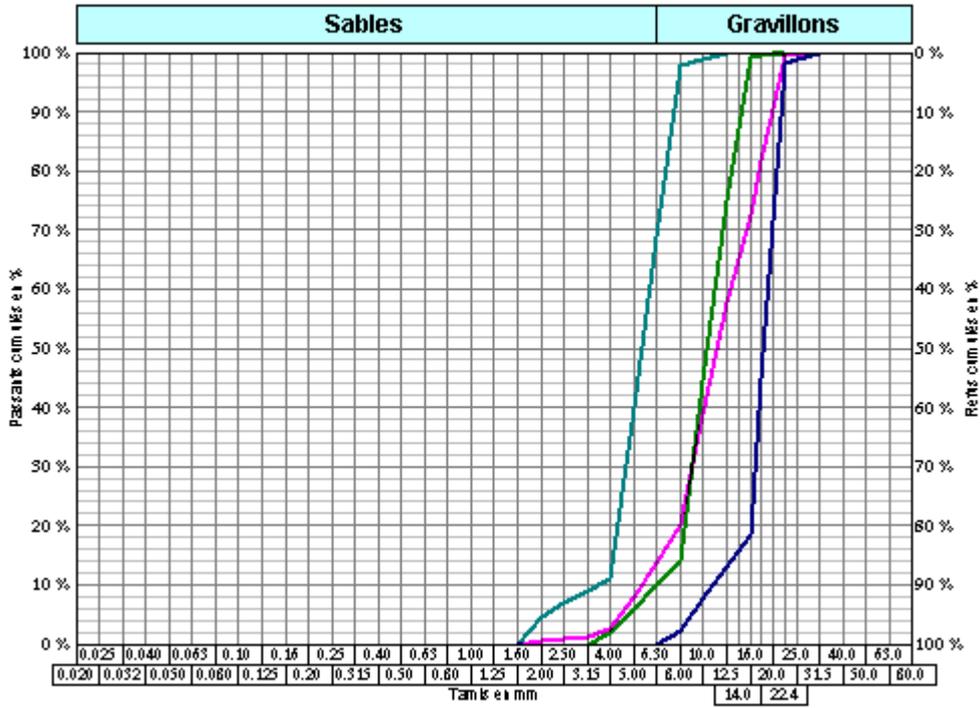


Figure 24. Courbe granulométrique pour granulat témoins Gt

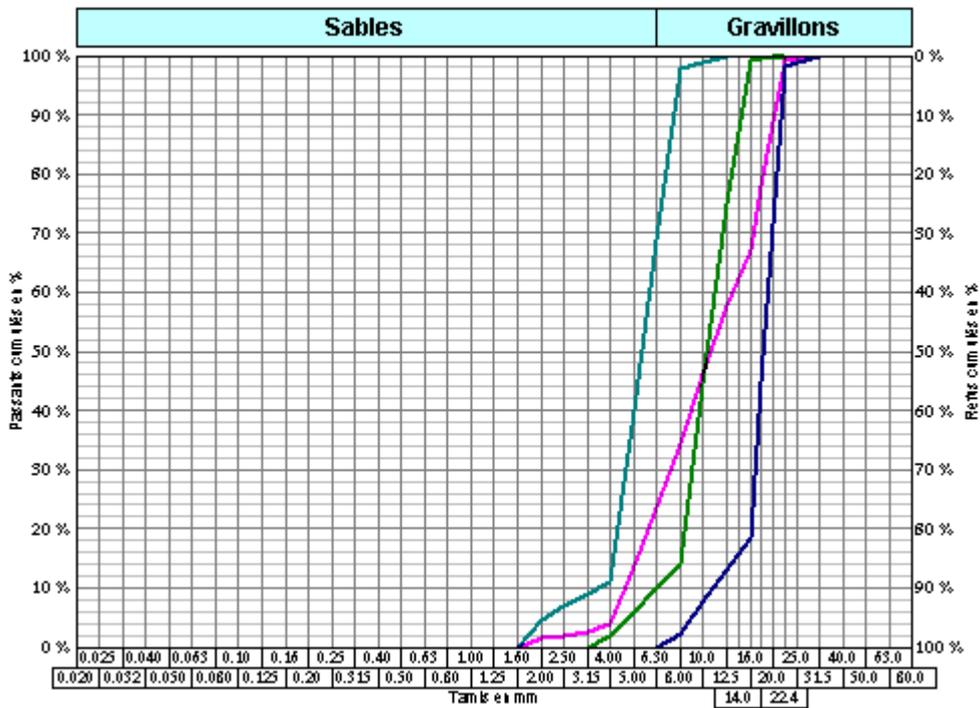


Figure 25. Courbe granulométrique pour granulat Gr1

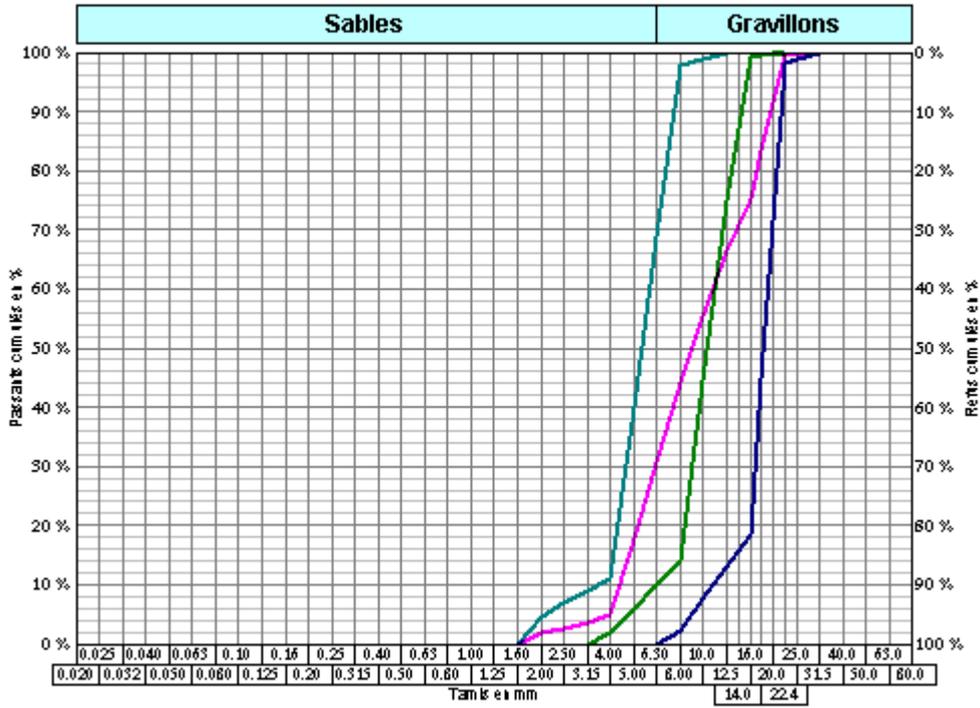


Figure 26. Courbe granulométrique pour granulat Gr2

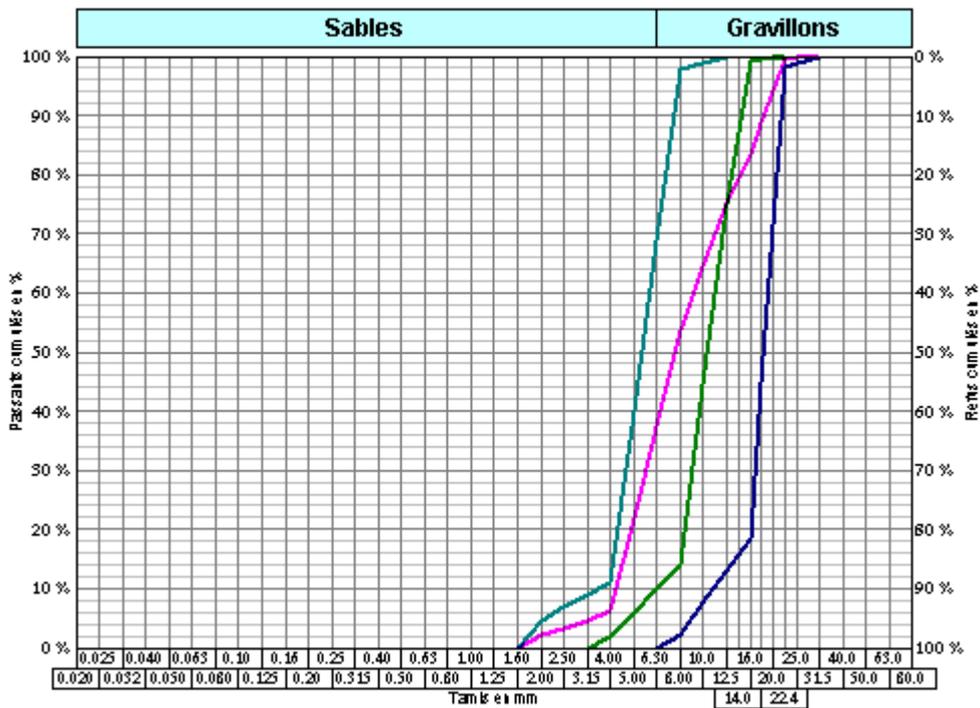


Figure 27. Courbe granulométrique pour granulat Gr3

Toutes les courbes granulométriques établies sont étalées et continues, ce que confirment le coefficient d'uniformité $C_U=2.5$ et le coefficient de courbure C_C ayant des valeurs de 1 à 1,6. Les coefficients ont été calculés pour tous les mélanges.

coefficients	Mélanges			
	Gr1	Gr2	Gr3	Gt
D'uniformité C_U	2,5	2,5	2,5	2,5
De courbure C_C	1	1	1	1,6

Tableau 26. Coefficients C_U et C_C

La forme des courbes apporte les renseignements suivants :

- Les limites d et D du granulat en question
- La plus ou moins grande proportion d'éléments fins
- La continuité de la granularité.

3.2.2. Aplatissement

Les valeurs obtenues des mesures du coefficient d'aplatissement pour les différents granulats de classe granulaire étalée étudiés Gr1, Gr2, Gr3, Gt et Gg sont données dans le tableau ci-dessous :

Mélanges	% de 4/ 8	% de 8/ 16	% de 16/ 22,4	Valeur d'aplatissement
Gg	28	44	28	11
Gt	12	55	33	10
Gr1	30	30	40	10
Gr2	40	30	30	11
Gr3	50	30	20	12

Tableau 27. Aplatissement

La régularité des valeurs des coefficients d'aplatissement obtenus s'explique par le mode d'élaboration identique fournie par la carrière, et par les mêmes propriétés physico-mécaniques. Les valeurs d'aplatissement indiquent que ces gravillons ont une forme plutôt trapue, favorable à une mise en œuvre dans les bétons hydrauliques (bonne maniabilité et bonne compacité)

Le recomposé 3 présente le coefficient d'aplatissement le plus élevé, ce qui laisse à entendre que c'est le mélange qui contient le plus d'éléments fins. On sait de surcroît qu'une mauvaise forme a une incidence certaine sur la maniabilité et favorise la ségrégation.

La forme des granulats influe sur la facilité de mise en œuvre et de compactage des bétons, sur la compacité des mélanges, donc sur le volume des vides à remplir par la pâte

de ciment. L'état de surface a quand à lui, une influence sur la compacité des mélanges et sur l'adhérence du granulat sur la pâte de ciment.

Les résultats ci-dessus, sont représentés sous forme d'un graphique barre afin de bien montrer la variation des valeurs d'aplatissement d'un granulat à un autre.

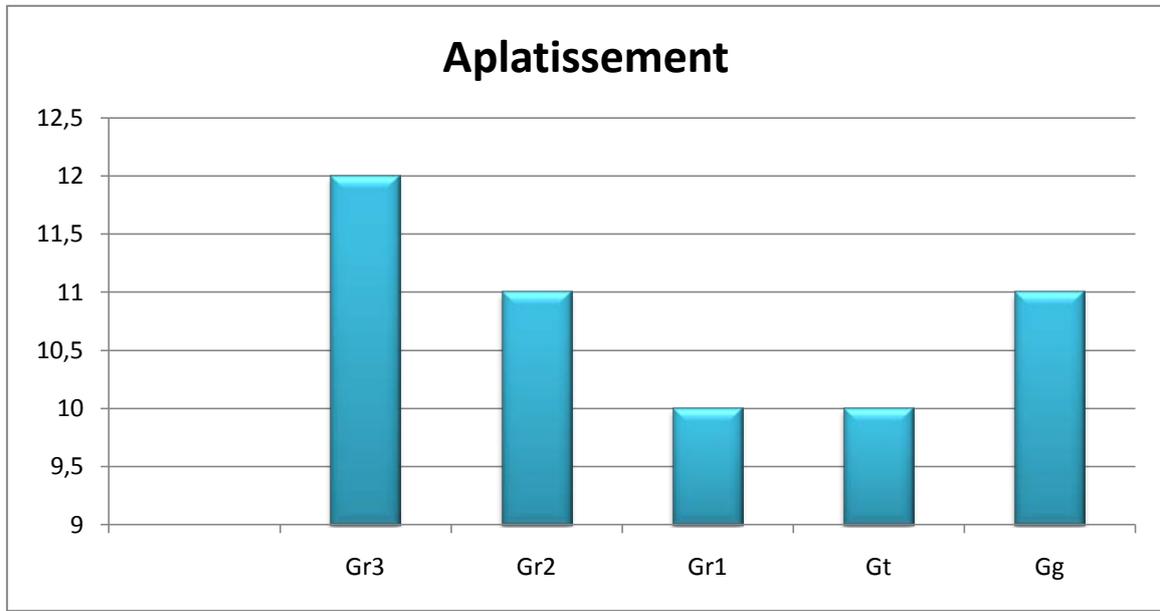


Figure 28. Variation de l'aplatissement

On peut conclure d'après les résultats obtenus et concernant les trois recomposés où le pourcentage de granulat moyen 8/16 est fixé à 30 %, que le granulat fin diminue pour Gr1 et on peut noter que le coefficient d'aplatissement diminue avec l'augmentation du pourcentage de gros granulat et par conséquent avec la diminution des granulats fins.

3.2.3. Masse volumique en vrac

Le tableau 27 rappelle les valeurs des masses obtenues après essai.

Mélanges	% de 4/ 8	% de 8/ 16	% de 16/ 22,4	Masses volumiques en vrac (Mg/m ³)
Gg	28	44	28	1.35
Gt	12	55	33	1.41
Gr1	30	30	40	1.43
Gr2	40	30	30	1.45
Gr3	50	30	20	1.45

Tableau 28. Masses volumiques en vrac

La masse volumique en vrac augmente avec l'augmentation du pourcentage des granulats 4/8. Cependant elle reste à peu près constante pour les recomposés. Elle reste

supérieure à celles du granulat témoin et du granulat de grave qui contiennent les pourcentages les plus faibles de granulats 4/8.

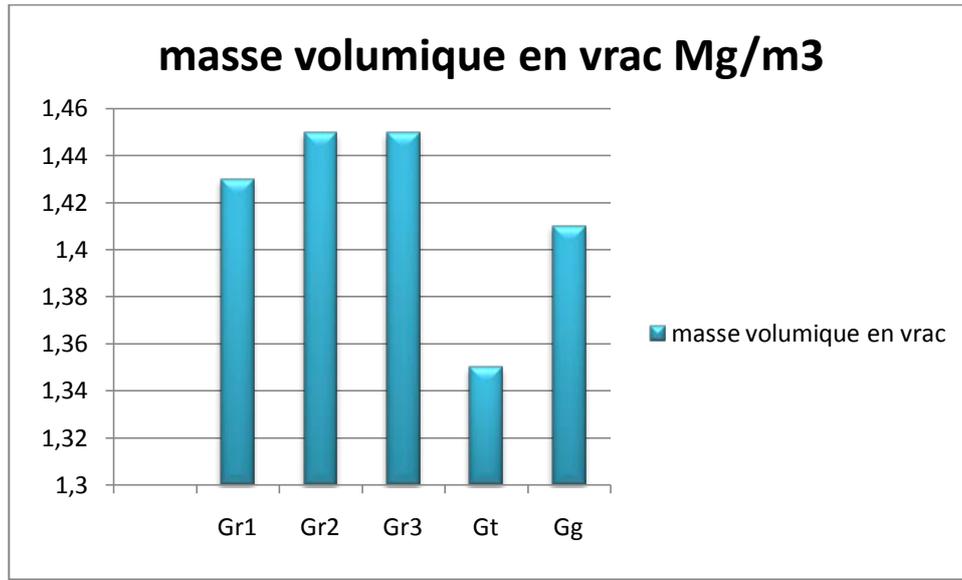


Figure 29. Masses volumiques en vrac

3.2.4. Porosité inter-granulaire

On présente dans le tableau 29 les résultats de la porosité inter-granulaire obtenue par analyse des différents granulats testés.

Mélanges	% de 4/ 8	% de 8/ 16	% de 16/ 22,4	Valeur de porosité inter-granulaire
Gg	28	44	28	0.49
Gt	12	55	33	0.46
Gr1	30	30	40	0.45
Gr2	40	30	30	0.44
Gr3	50	30	20	0.44

Tableau 29. Porosité inter-granulaire

Le tableau montre que la porosité diminue avec l'augmentation de pourcentage des granulats 4/8, comme on peut le voir pour Gr1 (30%), Gr2 (40%) et Gr3 (50%).

De nombreuses dégradations sont fonctions de la pénétration de l'eau dans la roche, la porosité est donc un facteur essentiel pour estimer la durabilité en œuvre d'un calcaire. Pourtant, si l'importance de la porosité totale est un facteur déterminant, la taille des pores, leur interconnexion ainsi que leur distribution dans le calcaire sont aussi d'une importance capitale.

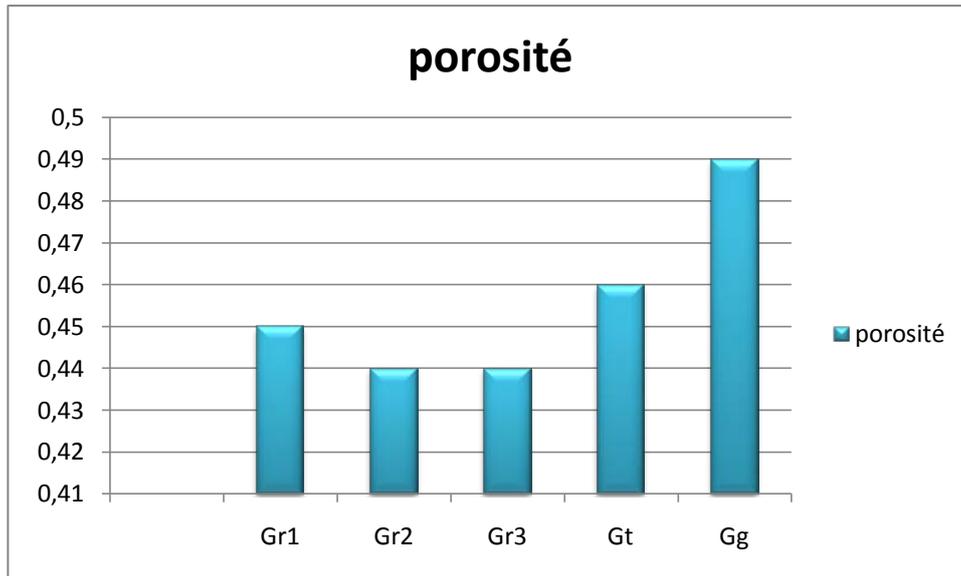


Figure 30. Porosité

On constate que la porosité augmente avec la diminution du pourcentage des granulats 4/8. Cela s'explique par le fait que plus les granulats ont un petit diamètre, plus ils occupent les vides inter granulaires.

3.3. Les résultats des essais effectués sur bétons

3.3.1. Essais sur béton frais

3.3.1.1 Masses volumiques

Dans le tableau 30, on a présenté les résultats des mesures de la masse volumique à l'état frais des bétons Br1, Br2, Br3, Bt, Bg.

mélanges	% de 4/8	% de 8/16	% de 16/22,4	Masse volumique (kg/m ³)
Bg	28	44	28	2383
Bt	12	55	33	2364
Br1	30	30	40	2387
Br2	40	30	30	2418
Br3	50	30	20	2465

Tableau 30. Masse volumique du béton frais

On constate d'après les résultats qu'il n'y a pas de variation avérée de la masse volumique des mélanges. Les valeurs obtenues sont celles d'un béton ordinaire, elle est en général comprise entre 2400 et 2800. On constate une légère augmentation pour les trois recomposés.

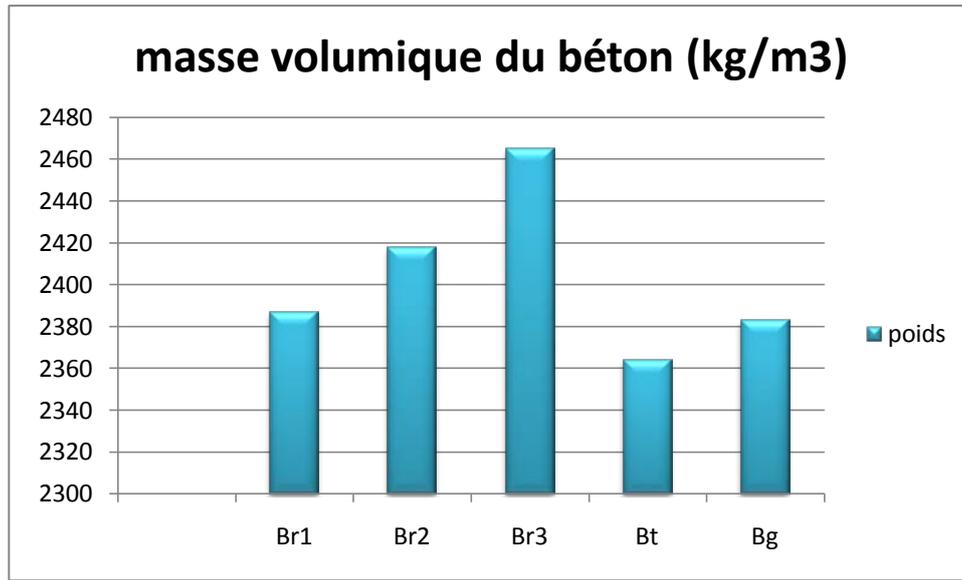


Figure 31. masses volumiques des bétons frais

3.3.1.2 Affaissement

Mélanges	% de 16/22,4	Affaissement (cm)
Bg	28	8,5
Bt	33	7,5
Br1	40	13
Br2	30	11.5
Br3	20	10

Tableau 31. Affaissements

Les valeurs des affaissements obtenues, correspondent à un béton de consistance très plastique. Celles -ci varient de 10 à 15 cm avec une tolérance de ± 3 cm. Le mélange qui serait le plus ouvrable est le recomposé qui contient le plus de granulats de classe granulaire 16/ 22,4.

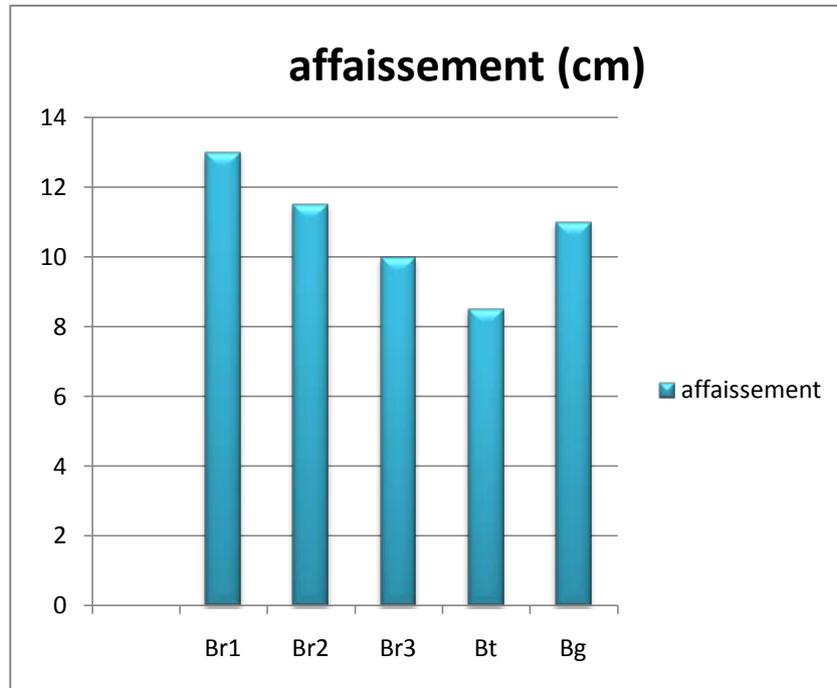


Figure 32. Affaissements

3.3.2 Essais sur bétons durcis

3.3.2.1 La résistance

a/ Résistance à la compression à 7 et 28 jours

Mélanges	% de 4/ 8	% de 8/ 16	% de 16/ 22,4	Résistances à la compression (MPa)	
				à 7 jours	à 28 jours
Bg	28	44	28	19,25	26,3
Bt	12	55	33	21,75	25,5
Br1	30	30	40	18,5	23
Br2	40	30	30	17,5	25
Br3	50	30	20	17,25	23

Tableau 32. Résistances à la compression

La résistance à la compression enregistrée à 7 jours diminue avec l'augmentation du pourcentage de gros granulats pour les bétons de recomposés, mais reste inférieure à celle des bétons de grave Bg et témoin Bt. Pour ce dernier, on a obtenu la plus grande résistance.

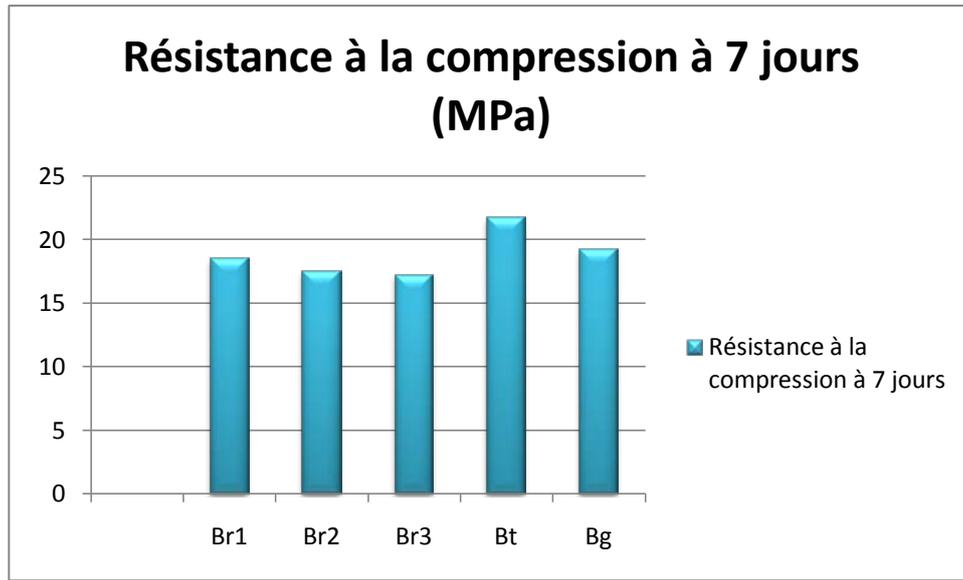


Figure 33. Résistance à la compression à 7 jours

La résistance à la compression à 28 jours augmente avec l'augmentation du pourcentage de gros granulat constituant le béton Br1 (20%) à Br2 (30%) puis diminue de la même valeurs pour Br2 (30%) à Br3(40%), mais les valeurs des résistances pour les différents bétons constitués à partir des recomposés restent inférieur à ceux des béton Bt et Bg où on a enregistré la plus grande valeur pour le béton témoin (26.6 MPa).

La résistance a augmenté entre 7 et 28 jours pour tous les mélanges avec une résistance pratiquement équivalente pour les recomposés, de 7,5 MPa ; il est intéressant de voir que l'augmentation de pourcentages de 10 en 10% n'influe pas sur la valeur de la résistance.

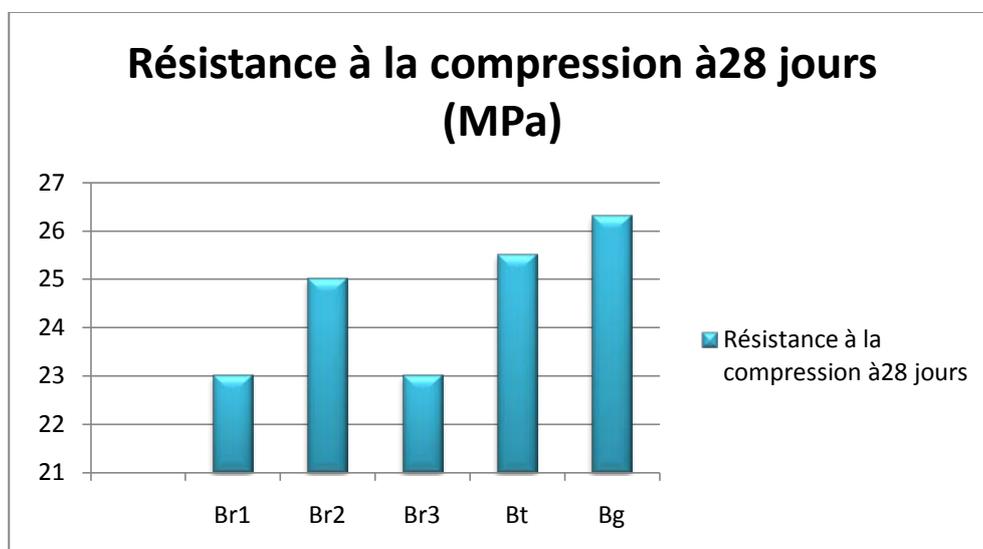


Figure 34. Résistance à la compression à 28 jours

b/ Traction à 28 jours

Les résultats présentés dans le tableau 33 sont obtenus à partir d'un test de résistance à la traction par flexion.

Mélanges	Resistance a la traction à 28 jours (MPa)
Bg	3
Bt	2
Br1	3.5
Br2	4
Br3	4.5

Tableau 33. Résistance à la traction à 28 jours

La résistance à la traction enregistrée à 28 jours diminue avec l'augmentation du pourcentage de gros granulat de recomposé Gr1, Gr2, et Gr3, elle reste supérieure à celle des bétons Bt et Bg.

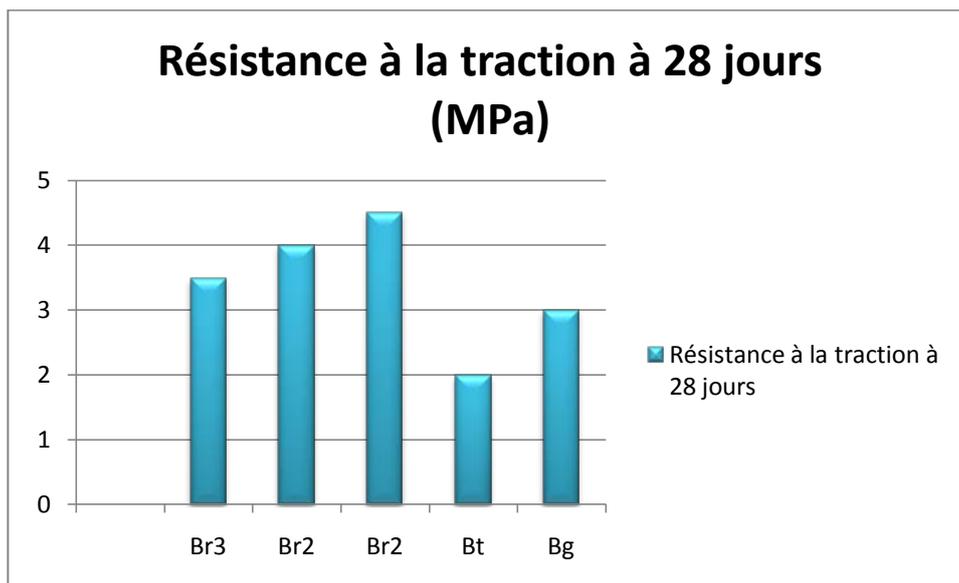


Figure 35. Résistance à la traction à 28 jours

3.4. Etude comparative

Pour valoriser les résultats obtenus et essayer de citer les points nécessaires à analyser et à étudier dans l'avenir afin de rendre la recherche utile et efficace dans le milieu de travail, pour ce faire on a utilisé des résultats obtenus pour trois formulations de béton, effectuées au niveau de trois laboratoires différents, le béton

$B_{LTPE. Constantine}$ au niveau de laboratoire de travaux public EST de Constantine, le béton $B_{CTC. Annaba}$ au niveau de laboratoire d'agence de contrôle technique de construction de Annaba et le béton $B_{sarl.L.V.B}$ au niveau de laboratoire voies et bétons qui est un laboratoire privé, et on a les comparer avec les résultats obtenus lors de notre étude.

3.4.1 Présentation des bétons à comparer

Trois bétons vont être comparés:

3.4.1.1. Béton $B_{LTPE. Constantine}$:

C'est un béton hydraulique continu et ordinaire, composé à partir de trois classes granulaires : 3/8,8/16 et 16/25, avec un sable 0/4, un ciment portland CPJ-CEM II/A 42,5 dosé à 350 kg/m³ et un rapport E/C=0.55. Les granulats utilisés sont des produits commercialisés au niveau de la carrière EL GROUZE, AIN MLOUK, wilaya de Mila. Ce béton est destiné à la réalisation du projet GAZODUC GK3 48'' HASSI RMEL SKIKDA EL KALA LOT 3. [31]

3.4.1.2. Béton $B_{CTC. Annaba}$:

C'est un béton hydraulique continu et ordinaire, composé de trois classes granulaires : 3/8,8/15 et 15/25 avec un sable 0/4, un ciment portland CPJ-CEM II/A 42,5 dosé à 350 kg/m³ et un rapport E/C=0.5. Les granulats utilisés sont des produits commercialisés au niveau de la carrière BEN BRAHIM. Ce béton est destiné à la réalisation du projet CECC COUDIAT DRAOUCHE W.EL TARF. [32]

3.4.1.3. Béton $B_{sarl.L.V.B}$:

C'est un béton continu et ordinaire, composé de trois classes granulaires : 3/8,8/15 et 15/25 avec un sable 0/4, un ciment portland CPJ-CEM II/A 42,5 dosé à 350 kg/m³ et un rapport E/C=0.5. Les granulats utilisés sont des produits commercialisés au niveau de la carrière ARRIS KHOUDJA. Ce béton est destiné à la réalisation du projet d'un PONT SUR OUED BOUCEKOUM BORDJ SABAT CW33. [30]

3.4.2. Analyse des granulats

3.4.2.1. Sable

a. Granulométrie

Les courbes granulométriques des sables sont toutes continues et plus ou moins bien graduées, et les pourcentages des passants sur chaque tamis d'analyse sont acceptables avec des différences introduites dans la fourchette de la tolérance exigée par la norme. [27] [28] [29]

Provenance du sable	% des fines	Module de finesse	Équivalent de sable (%)	Valeur au bleu
Carrière ENG	12.87	3.4	53	0.42
Carrière 1(B _{CTC. Annaba})	×	1.84	75	×
Carrière 2(B _{LTPE. Constantine})	×	3	74	×
Carrière 3(B _{sar1.L.V.B_2})	×	2.91	67	×

Tableau 34. Caractéristiques des sables étudiés [30] [31] [32]

b. Module de finesse MF :

Pour le sable de la carrière ENG, MF=3.4 est un module de finesse assez élevé ce qui nous donne un sable grossier. Ceci peut avoir une influence sur l'ouvrabilité du béton où la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. On remarque des valeurs similaires pour le sable des carrières 2 et 3. [25]

La norme européenne des granulats pour béton classe les sables en fonction de leur module de finesse dans la catégorie CF ou la valeur de MF varie entre 2.4 et 4. Nous avons la même classification pour la norme algérienne et la norme française. [27] [28] [29]

Mais en fonction des passants au tamis 0.5mm, la même norme classe ce sable dans la catégorie MP où le pourcentage des passants au tamis de 0.5mm varie entre 30 et 70 % cependant ce sable a un pourcentage de 51 %. [27]

Pour le module de finesse du sable de la carrière 1 qui est égal à 1.81, les trois normes le classent dans la catégorie MF. C'est à dire que c'est un sable moyen mais assez fin car il est à la limite inférieure de la fourchette de la catégorie(MF). [27] [28] [29]

On sait que s'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton, ce qui entraîne une diminution de la résistance. Donc, ce sable est de qualité insuffisante pour confectionner un bon béton. [25]

c. Pourcentage de fine f:

Selon la norme algérienne et la norme française ce sable sera dans la catégorie f_{16} où on peut le classer au deuxième ou troisième place si en parlant de leur qualité. [28] [29]

Si on considère la norme européenne, on parle d'un sable de troisième place, mais de catégorie f_{16}

Ce qu'on a noté ci-dessus concerne le sable de la carrière ENG, pour les autres carrières on a plus de résultats car les rapports d'analyse sont incomplets et ont des manques.

d. Equivalent de sable :

ES=53 c'est une valeur faible inférieure à 60 donc le sable est argileux où on le risque de retrait ou de gonflement. Ce genre de sable à rejeter pour des bétons de qualité. [25]

ES=67 entre 60 et 70 % présente un sable légèrement argileux de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait. [25]

ES=74 et ES=75 sont situés entre 70 et 80 % présentent un sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité. [25]

e. Valeur au bleu :

La valeur au bleu obtenue $MB=0.42$ pour le sable de la carrière ENG qui est inférieur à la valeur limite spécifiée pour les bétons hydrauliques (1%) montre que le sable est propre malgré la valeur élevée de l'équivalent de sable qui indique la présence de fines non argileuses, ce sont des fines d'origine minérale due à la friabilité de la roche. Ceci confirme les valeurs plus ou moins élevées du coefficient Los Angeles $LA= 34$ et du coefficient Micro Deval $MDE= 23$. [27] [28] [29]

3.4.2.2. Gros granulats**a. Pourcentage des fines :**

Pour les granulats de la carrière ENG et d'après les différents résultats obtenus on peut constater que les différents granulats ont un pourcentage de fines acceptable qui varie entre 0.75 et 1.63 pour les différentes classes granulaires élémentaires sauf pour le granulat 4/22.4 issu de grave 0/25 où on a une valeur élevée de 4.23. Cette dernière doit être déclarée lors de la livraison des résultats d'analyse, pour prendre en compte les effets secondaires non désirés, qui pourraient dégrader la qualité des granulats. On peut exiger des essais supplémentaires comme l'essai au bleu pour confirmer la qualité. [27]

Pour les autres granulats, nous ne possédons pas les rapports d'analyses pour le pourcentage des fines ni les interprétations qui les concerne.

Selon la norme algérienne, le gravillon qui a un pourcentage de fine supérieure à 4 sera hors norme et ça peut poser un problème de qualité, lors du choix des matériaux ou pour assurer une qualité suffisante pour les propriétés du béton. [28] [29]

toujours, ce qui va diminuer la qualité du béton. [27]

b. Aplatissement :

Mélange granulaire pour béton	Granulats utilisés						
	3/8	4/8	8/15	8/16	15/25	16/22.4	4/22.4
Bg(ENG)	×	×	×	×	×	×	11
Bt(ENG)	×	15	×	12	×	6	10
Br1(ENG)	×	15	×	12	×	6	10
Br2(ENG)	×	15	×	12	×	6	11
Br3(ENG)	×	15	×	12	×	6	12
B _{CTC} . Annaba	22	×	14	×	10	×	13.62
B _{sarl.L.V.B}	12	×	12	×	9	×	10.3
B _{LTPE} . Constantine	29	×	21	×	15	×	19.3

Tableau 35. Coefficients d'aplatissement [30] [31] [32]

La forme des granulats influence la mise en œuvre donc la compacité du mélange (le volume des vides à remplir par la pâte de ciment). La forme des granulats est d'autant meilleure si elle est proche d'une sphère ou d'un cube. Et au contraire, l'existence des plats [25], donnera une mauvaise compacité au mélange. L'utilisation des granulats ayant la plus faible valeur du coefficient d'aplatissement assure l'obtention de bétons de bonne qualité.

Dans notre cas, en comparant les différents granulats cités dans le tableau ci-dessus on constate que les granulats de la carrière ENG sont ceux qui peuvent le mieux favoriser la confection d'un béton de qualité. On peut déduire que les formes des grains sont adéquates.

Concernant les coefficients d'aplatissement des différents mélanges granulaires on peut déduire ce qui suit :

Pour tous les granulats de la carrière ENG, recomposés préparés au laboratoire pour les besoins de la recherche ou mélange résultant de la formulation du béton à partir des granulats déjà commercialisés, on a obtenu un très bon coefficient d'aplatissement qui varie entre 10 et 12 au plus et qui rentre dans la catégorie FI₂₀ selon la norme française et celle algérienne, et dans la catégorie FI₁₅ selon la classification de la norme européenne. Pour les mélanges des granulats analysés par les laboratoires Sarl L.V.B et CTC Annaba, on obtient un résultat similaire. Par contre, le granulat restant est classé dans la catégorie FI₂₀ selon les trois normes : européennes, algériennes et françaises. [27] [28] [29]

Les résultats montrent la qualité de fabrication liée aux produits de la carrière ENG par rapport aux autres produits analysés.

c. Los Angeles

Les analyses effectuées ont fournis les résultats de résistance à la fragmentation suivante :

Bétons	Coefficient Los Angeles
Bg(ENG)	34
Bt(ENG)	34
Br1(ENG)	34
Br2(ENG)	34
Br3(ENG)	34
B _{CTC} . Annaba	×
B _{sarl.L.V.B}	22
B _{LTPE} . Constantine	25

Tableau.36. Coefficients Los Angeles [30] [31] [32]

La valeur de coefficient de résistance à la fragmentation des gravillons Los Angeles est plus élevée, LA=34, pour les gravillons appartenant à la carrière ENG et cela dénote une certaine fragilité de la roche ce qui nous donne une mauvaise qualité de résistance des gravillons comparativement aux granulats analysés au niveau du laboratoire L.V.B : LA=22 et les autres laboratoires le résultat est LA=25.

La norme européenne classe les granulats de la carrière ENG dans la catégorie LA₃₅ (cinquième place pour la qualité) et les autres granulats dans la catégorie LA₂₅ (troisième place). [27] La norme algérienne et française classent les granulats de la carrière ENG dans la catégorie LA₄₀ et les autres dans la catégorie LA₃₀. [28] [29]

On note que les granulats de la carrière ENG ont un défaut de résistance par rapport aux autres granulats existants sur le marché. Ceci revient à des caractéristiques intrinsèques liées à la qualité de la roche mère du gisement de la carrière.

3.4.3. Propriétés des bétons

3.4.3.1. Affaissement

À partir des différentes analyses faites nous avons obtenus les résultats suivants :

Mélange granulaire du Béton	Affaissement(cm)	E/C
Bg	8,5	0.61
Bt	7,5	0.61
Br1	13	0.61
Br2	11.5	0.61
Br3	10	0.61
B _{CTC. Annaba}	11	0.5
B _{sarl.L.V.B}	9	0.5
B _{LTPE. Constantine}	10	0.55

Tableau 37. Affaissements et rapports E/C. [30] [31] [32]

Les valeurs d'affaissement enregistrées sont autour de la valeur visée lors du calcul des proportions des constituants du béton sauf pour les différents recomposés. On peut voir que l'effet de la variation des pourcentages des granulats élémentaires constituant le recomposé est créé par la variation de la quantité des plats. En comparant les différents recomposés entre eux, on remarque l'influence du coefficient d'aplatissement, la diminution de ce dernier augmente l'affaissement ce qui va améliorer l'ouvrabilité du béton.

3.4.3.2. Résistances

Mélanges	Resistances à la compression (MPa)		Resistance à la traction à 28 jours (MPa)	E/C	Dmax (mm)	G/S
	à 7 jours	à 28 jours				
Bg	19,25	26,3	6,7	0.61	22.4	1.57
Bt	21,75	25,5	4,7	0.61	22.4	1.57
Br1	18,5	23	7,9	0.61	22.4	1.57
Br2	17,5	25	9,12	0.61	22.4	1.57
Br3	17,25	23	10,1	0.61	22.4	1.57
B _{CTC. Annaba}	18	27	3.7	0.5	25	1.7
B _{sarl.L.V.B}	17	28.5	3.9	0.5	25	1.7
B _{LTPE. Constantine}	19.5	28	4.5	0.55	25	1.7

Tableau 38. Résistances, E/C, Dmax et G/S [30] [31] [32]

Il est très intéressant de remarquer que les mélanges étudiés avec un choix de granulat bien déterminé, permettent d'obtenir des résultats très satisfaisants pour les valeurs des résistances à 7 et 28 jours pour la compression et à 28 jours pour la traction. En tirant la conclusion qu'il faut repenser le rapport E/C, nous pouvons espérer améliorer les performances mécaniques de tous les mélanges.

3.4.4. Valorisation des résultats

3.4.4.1. Utilisation de la classe granulaire étalée 4/22.4

a. Influence sur la résistance

L'étude réalisée montre qu'on peut utiliser la classe granulaire dite étalée comme gros granulat pour la confection du béton en une seule classe granulaire car elle nous a donnée des résultats acceptables concernant la résistance du béton à la compression où on a enregistré des valeurs variant entre 17.25 et 19.25 à 7 jours et entre 23 et 26.3 à 28 jours pour une résistance de 25Mpa visée à 28 jours malgré les inconvénients enregistrés tels que :

- Un sable grossier de module de finesse MF= 3.4
- Un rapport E/C assez élevé égal à 0.61
- Un rapport G/S égal à 1.57
- une mauvaise finition des surfaces d'éprouvettes qui va diminuer la valeur réelle de la résistance.
- Une conservation non appropriée (à l'air libre).

Des résultats assez satisfaisants de la résistance à la traction ont été obtenus avec des valeurs allant de 3.5 à 4.5MPa.



Figure 36. Mauvais surfaçage des éprouvettes

Lorsque l'on utilise des éprouvettes cylindriques il est nécessaire de surfaçer les faces d'appuis. Cela peut se faire de différentes manières, rectification mécanique et surfaçage à l'aide d'un mélange de sable de soufre chauffé sont les méthodes les plus courantes. L'utilisation de la technique de surfaçage des éprouvettes cylindriques est déterminante. [33]

Paramètres	Perte de résistance
Faces convexes, pas de surfaçage	Jusqu'à 75%
Matériaux de surfaçage de résistance insuffisante	43%
Faces concaves, pas de surfaçage	30%
Mauvaise planéité des surfaces avant surfaçage	27%
Faces convexes avec surfaçage	12%

Tableau 39. Cause des pertes de résistances

b. Influence sur l'ouvrabilité

Les valeurs obtenues sont dans une fourchette acceptable par rapport aux besoins des chantiers ou aux valeurs visés préalablement dans le calcul des proportions.

c. Influence sur l'économie

Réduire les étapes lors de processus de fabrication (séparation des classes granulaires) et donc gagner plus de temps ce qui nous va donner un gain d'argent.

Réduire le nombre des voyages lors du transport des granulats.

3.4.4.2. L'effet de l'élimination de la fraction 22.4/25

a. Influence sur la résistance à la compression

En comparant les résultats présentés, on peut faire les remarques suivantes :

- Malgré les valeurs élevées, du rapport G/S et de Dmax, qui ont un effet favorable sur l'augmentation de la résistance à la compression du béton, on a enregistré une faible baisse de résistance de 4% à 15%.

Selon une représentation de la variation de la résistance en compression à 28jours en fonction de G/S pour un béton à 350kg/m³ de ciment, de granularité continue avec Dmax= 25mm et un affaissement de 10 cm, on peut évaluer la variation de la résistance. Quand le rapport G/S varie entre 1.56 et 1.7, ce qui équivaut à 1MPa, ce qui entraîne une chute de résistance de 11 % au maximum. [7]

- On peut parler de l'influence de E/C à partir de la formule théorique $\delta'_{28}=G*\delta'c(C/E - 0,5)$ afin d'explicitier la variation de la résistance d'un mélange à un autre par rapport à la variation de la valeur de E/C.

C/E	1,64	1,82	2
E/C	0,61	0,55	0,5
σ'_{28} (MPa)	29,1	33,7	38,3

Tableau 40 .Variation de la résistance théorique en fonction du rapport E/C

On remarque que l'augmentation du rapport E/C va faire perdre plus de 4 MPa de résistance. Pour augmenter la résistance, il faut diminuer la valeur de E/C et prendre la même que celle des mélanges utilisés pour les projets exécutés.

b. Sur la mise en œuvre

Le choix du diamètre maximum $D_{max} = 22,4\text{mm}$, permet d'améliorer la mise en œuvre dans les coffrages. On sait que le diamètre du plus gros granulat doit mesurer moins de 1/5 de la taille de la pièce. Et comme il s'agit ici de béton armé, il faut être plus restrictif, le diamètre doit être plus petit que la distance entre la cage d'armature et les côtés du coffrage. Si les granulats sont trop grands, il est vraiment difficile de mettre en place le béton dans les coffrages, ce qui peut produire des vides importants dans les bords puisqu'il n'y a pas une bonne compacité. Il faut éviter la ségrégation.

c. Sur l'économie

Le dosage de ciment augmente avec la valeur de D_{max} . Plus la taille des granulats croit, plus on a des vides entre les grains, qu'il faut remplir avec un volume de pâte de ciment plus important.

La quantité de ciment peut être réduite en ajoutant plus de grains fins, qui vont augmenter la compacité. Un mélange de sable, gravillon et gravier donne la meilleure compacité, parce que les grains fins peuvent remplir les vides entre les plus grands granulats.

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons deux grandes parties, les résultats des essais et analyses des granulats testés et les résultats des essais et analyses des bétons testés. Une caractérisation des classes granulaires et des mélanges choisis pour notre étude, est définie. Ainsi une étude comparative a pu être entreprise entre les bétons étudiés et des bétons utilisés pour la réalisation de projets réels. De cette comparaison nous pouvons tirer les conclusions suivantes, que malgré une roche de gisement relativement tendre, les produits de la carrière ENG, granulats pour béton, présentent les qualités suffisantes pour confectionner un béton ordinaire. Cela montre l'influence de la qualité de fabrication et l'application des normes en vigueur, en sachant qu'elle est la seule entreprise qui prend en compte la norme européenne des granulats, ce qui reflète les grands efforts effectués pour améliorer la qualité des granulats en Algérie.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans cette recherche nous avons travaillé, pour l'application d'une nouvelle norme algérienne concernant les granulats, en collaboration avec l'E.N.G (Entreprise Nationale des Granulats), sur l'influence de l'élimination d'une classe granulaire 22,4 – 25, sur la résistance des bétons. Pour ce faire, nous avons procédé à la caractérisation des granulats entrant dans la composition de cinq mélanges : un béton témoin, trois bétons recomposés (pourcentage de classes granulaires variable) et un béton de graves commercialisés.

La méthode de formulation utilisée est celle de Dreux – Gorisse. Nous avons deux paramètres constants $E/C = 0,61$, $G/S = 1,57$. Nous avons obtenu les caractéristiques suivantes pour des classes granulaires étalées comme : le coefficient d'aplatissement, de Micro Deval, de Los Angeles, le pourcentage de fines etc. Nous avons effectué des essais sur bétons frais comme l'affaissement et sur bétons durcis, la détermination des résistances à la compression (7 et 28 jours) et les résistances à la traction par flexion à 28 jours.

Nous avons travaillé avec des classes granulaires qui donnent des courbes granulométriques continues et étalées. La quantité d'éléments fins dans les matériaux utilisés n'est pas très importante. La régularité des valeurs des coefficients d'aplatissement obtenus s'explique par le mode d'élaboration identique fournie par la carrière, et les mêmes propriétés physico- mécaniques. Les valeurs d'aplatissement indiquent que ces gravillons ont une forme plutôt trapue, favorable à une mise en œuvre dans les bétons hydrauliques (bonne maniabilité et bonne compacité). Nous avons obtenu un béton très plastique

Les résultats obtenus démontrent que les granulats de L'E.N.G, se conforment aux normes européennes en vigueur et donc aux normes algériennes mises en place par les expérimentations faites au laboratoire de l'entreprise. Les résistances obtenues sont supérieures à celles visées 25 MPA, elles dépassent 25 MPA pour presque tous les mélanges pour la compression et varient de 2 à 4.5 pour la traction

Les résistances mécaniques des bétons obtenues sont similaires à celles que l'on aurait obtenues avec des classes de 0/25, et ce quelque soient les paramètres d'identification des granulats. Le niveau d'exigence sur les granulats étant aligné sur le niveau des performances des bétons, il faut que les spécifications soient bien fondées et répondent à des normes bien établies. On peut dire qu'une granulométrie continue et étalée, telle que nous l'avons établie, signifie que nous avons obtenu un "squelette" pierreux qui entraîne un minimum de vides dans le mélange, en d'autres termes une bonne gradation des grains, du plus petit au plus grand.

Notre travail permet d'apporter de nouvelles données pour l'application d'une nouvelle norme sur les granulats tout en sachant que l'approche scientifique du béton s'appuie principalement sur une analyse de la structure granulaire du matériau qui se résume en trois étapes successives :

- l'empilement sec dont on cherche à prévoir la compacité et la ségréabilité
- l'empilement humide (béton frais) intéressant par ses propriétés rhéologiques

– l'empilement constitué du squelette du granulat

Les études portant sur l'influence de la teneur en granulats sur la résistance des bétons, pour une qualité de pâte de ciment donnée, indiquent que, lorsque le volume des granulats (exprimé en pourcentage du volume total) augmente de 0 à 20 %, il y a une diminution graduelle de la résistance à la compression alors que, entre 40 et 80 %, on constate une augmentation. L'influence du volume des granulats sur la résistance à la traction est pratiquement identique à celle observée sur la résistance à la compression.

Cette étude permet d'avancer que la maîtrise des matériaux est un atout décisif dans l'innovation et dans l'établissement de nouvelles normes.

Pour les granulats de l'entreprise E.N.G, nous pouvons tirer les conclusions suivantes, que malgré une roche de gisement relativement tendre, ils présentent les qualités suffisantes pour confectionner un béton ordinaire. Cela montre l'influence de la qualité de fabrication et l'application des normes en vigueur, en sachant qu'elle est la seule entreprise qui prend en compte la norme européenne des granulats, ce qui reflète les grands efforts effectués pour améliorer la qualité des granulats en Algérie.

Les perspectives pour la poursuite de ce travail peuvent se formuler comme suit:

- Vérifier le retrait : car on sait que pour limiter le retrait, il convient d'utiliser les granulats les plus gros possibles, compatibles avec le ferrailage et le coffrage des bétons.
- Vérifier le fluage indissociable du retrait, on sait que les granulats ne fluent pas pour les contraintes auxquelles sont soumis les bétons, mais une augmentation du volume du squelette granulaire permet la diminution du fluage, d'où le choix d'un diamètre du granulat adéquat.

REFERENCES

Références Bibliographiques

- [1] **BERBAOUL.R.** : « Identification et analyse de l'endommagement par fatigue des matériaux granulaires a base polymère. » Soutenue le 21 janvier 2010 à l'université de Cergy Pontoise. Spécialité génie mécanique.
- [2] **BARON. J et OLLIVIER.J** : « Les bétons : bases et données pour leur formulation » Edition Eyrolles. 1999
- [3] **OLLIVIER. J.P et VICHOT A. pour l'ATILH** : « La durabilité du béton.»- Presses de l'école des Ponts et Chaussées - Paris - 2008.
- [4] **Collection CIM béton .Fiches techniques. Tome 1** : 71 pages. Réf. G10. Editeur Cimbéton. Septembre 2005.
- [5] **DREUX G., FESTA J.** : 1995, "Nouveau guide du béton et de ses constituants", Huitième édition, Eyrolles.
- [6] **Contexte normatif des bétons** : Mise en page et réalisation : Amprincipe Paris (édition septembre 2005)
- [7] **DREUX. G 1979** : « Nouveau guide du béton. »
- [8] **GABRYSIA. F**: Matériaux. (Chapitre 2 les granulats et chapitre 4 bétons). 2007
- [9] **ADAMM.N** : « Propriétés des bétons. »Edition Eyrolles. 2000
- [10] **VENANT.M** : « Ciment et bétons. » 2ème édition. 1973
- [11] **Groupe Eyrolles** : « Cône d'Abrams. » Edition Eyrolles.2010
- [12] **EN-12350-6** : masse volumique du béton frais.
- [13] **EN-12390-3** : résistance à la compression des éprouvettes.
- [14] **EN-12390-5** : résistance à la flexion sur éprouvettes.
- [15] **THIBAUT. B, BOUFFARD.M, HORLAIT.C, LACROIX.R** : Projet IFIPS(2008)
- [16] **DONGMO.E et BERTHE.J** : « Caractérisation des déformations d'ornièrage des chaussées bitumineuses. » Thèse : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005 [17/01/2006]
- [17] **BRUNO.S** : « Etude des mouvements d'eau dans les matériaux poreux appliquée à la résistance au gel et au comportement des crépis sur la maçonnerie. » Thèse No 848 (1990). Département des matériaux. Ecole Polytechnique Fédérale de LAUSANNE pour l'obtention du grade de docteur es sciences techniques.
- [18] **Fascicule de documentation de FD P 18-542** : « Granulats - Critères de qualification des granulats naturels pour béton hydraulique vis-à-vis de l'alcali-réaction. » Février 2004.
- [19] **GUIDE METHODOLOGIQUE** : Aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne, LCPC (2003).
- [20] **GSM. ITALCEMENTI Group** : Aide- mémoire qualité des granulats. 05/2009. www.gsm-granulats.fr
- [21] **Norme NA 2608- 1992**. Granulats - Mesure du coefficient de fiabilité des sables.
- [22] **GHOMARI. F., BENDI – OUIS A** : « Sciences des matériaux. » Université Aboubekr Belkaid. Département de génie civil.
- [23] **LIBRAIRIE TECHNIQUE TECHNOLOGIQUES** : « Granulats sols ciments bétons. Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire. 03 / 2009. 344 pages.

- [24] **DREUX G.** « Composition des bétons. », Réf. C2220. 10/05/1982.
- [25] **Cours en ligne** Matériaux de Construction. Chapitre 6: Le béton www.la.Refer.org
- [26] **KOMAR A.** « Matériaux et éléments de composition. », Edition mir Moscou.
- [27] **EN-12620** Granulats pour béton, août 2003, AFNOR 2003.
- [28] **XP P 18-545** Norme française Éléments de définition, conformité et codification, février 2004, AFNOR 2004.
- [29] **NA5043** Norme algérienne Granulats, Éléments de définition, conformité et codification. IANOR 2007.
- [30] **L.V.B** (Laboratoire Voies et Bétons) : Rapport d'étude de formulation béton hydraulique ,33/FBH.25/SLVB.2009
- [31] **L.T.P.E Constantine** (laboratoire de travaux publics de l'Est) : Rapport d'étude de formulation béton hydraulique. DC/SM/460/10/206 .juin2010
- [32] **CTC Annaba** (laboratoire de l'agence de contrôle technique de la construction de l'Est, wilaya de Annaba) : Rapport d'étude de formulation béton hydraulique, .1997BA/LABO/ANNABA/2009.
- [34] **TAHENNI.T** : Algérie - Magister en Génie Civil. « Facteurs influençant la résistance à la traction du béton. »

ANNEXES

Annexes

ENTREPRISE NATIONALE DES GRANULATS LABORATOIRE CENTRAL				
RAPPORT D'ESSAIS				
Analyse granulométrique EN 933-1				
produit analysé:			gravillon 4/8	
Echantillonnage			Exécution d'essai	
N° d'échantillon:	001/02/2009		Date de réception d'échantillon:	09/02/2009
Date:	09/02/2009		Date d'essai:	15/02/2010
Lieu:	stock		Procédé:	par tamisage
Procédé:	à la pelle			
Opérateur:	Boufedah Badissi		Opérateur:	Boufedah Badissi
masse sèche totale M1 (kg)			3,384	
masse sèche après lavage M2 (kg)			3,261	
masse sèche des fines retirées par lavage M1-M2 (kg)			0,123	
ouverture des tamis (mm)	(ri) masses des refus partiels (kg)	(Ri) masses des refus cumulés (kg)	pourcentage des refus cumulés (%)	pourcentage cumulés des passants (%)
16	0,000	0,00	0,00	100
11,2	0,002	0,00	0,06	99,94
8	0,074	0,08	2,25	97,75
5,6	1,615	1,69	49,97	50
4	1,319	3,01	88,95	11,05
2	0,220	3,23	95,45	4,55
	3,230			
(P) Matériau resté au fond (kg) P=		0,009		
pourcentage des fines $f = ((M1 - M2 + p) / M1) * 100$ (%)			3,90	
pour la vérification $[(M2 - (\sum ri + P)) / M2] * 100$			0,67	< 1 %

**ENTREPRISE NATIONALE DES GRANULATS
LABORATOIRE CENTRAL**

RAPPORT D'ESSAIS

**la teneur en eau
EN 1097-5**

produit analysé:	gravillon 4/8		
Echantillonnage	Exécution d'essai		
N°d'échantillon:	001-02/2009	Date de réception d'échantillon:	09/02/2009
Date:	09/02/2009	Date d'essai:	15/02/2010
Lieu:	stock	Procédé:	séchage en étuve ventilée
Procédé:	à la pelle		
Opérateur:	Boufedah Badissi	Opérateur:	Boufedah Badissi

masse de la prise d'essai (g)

M1=

3851

masse de la prise d'essai séchée(g)

M3=

3795

la teneur en eau (%)

W=

1,48

ENTREPRISE NATIONALE DES GRANULATS
LABORATOIRE CENTRAL

RAPPORT D'ESSAIS

**Détermination de la masse volumique en vrac
et la porosité inter-granulaire
EN 1097-3**

produit analysé:	gravillon 4/8
Echantillonnage	Exécution d'essai
N°d'échantillon: 001-02/2009	Date de réception d'échantillon: 09/02/2010
Date: 09/02/2009	Date d'essai: 15/02/2010
Lieu: stock	Procédé:
Procédé: à la pelle	
Opérateur: Boufedah Badissi	Opérateur: Boufedah Badissi

masse du conteneur vide (kg)		M1=	4,25
masse du conteneur et l'éprouvette (kg)		M2=	11,03
capacité du conteneur (l)		V=	5,15
masse volumique en vrac (Mg/m ³)	$\frac{M2-M1}{v}$	$\rho_b=$	1,31
masse volumique réelle (Mg/m ³)		$\rho_p=$	2,60
porosité inter-granulaire	$\frac{\rho_p-\rho_b}{\rho_p}$	v=	0,49

ENTREPRISE NATIONALE DES GRANULATS LABORATOIRE CENTRAL RAPPORT D'ESSAIS				
DETERMINATION DE COEFFICIENT D'APLATISSEMENT EN 933-3				
produit analysé:		gravillon 4/8		
Echantillonnage		Exécution d'essai		
N° d'échantillon:	001-02/2009	Date de réception d'échantillon:	09/02/2009	
Date:	09/02/2009	Date d'essai:	15/02/2010	
Lieu:	stock	Procédé:		
Procédé:	à la pelle			
Opérateur:	Boufedah Badissi	Opérateur:	Boufedah Badissi	
Masse de prise d'essai(g) M0=	3261	Refus sur tamis de 80 mm (g)=	0	
		passant sur tamis de 4 mm (g)=	245	
		Somme des masses éliminées (g)=	245	
Tamisage sure tamis d'essai		Tamisage sur grilles à fentes		
Granulats élémentaires di/Di mm	Masse (Ri) du granulats élémentaire di/Di g	Ecartement des fentes de grille mm	passant sur une grille à fente (mi) g	coefficient d'aplatissement partiel Ai=(mi/Ri)*100
63/80	0	40	0	/
50/63	0	31,5	0	/
40/50	0	25	0	/
31,5/40	0	40	0	/
25/31,5	0	16	0	/
20/25	0	12,5	0	/
16/20	0	10	0	/
12,5/16	0	8	0	/
10/12,5	7	6,3	0	0,0
8/10	69	5	11	15,9
6,3/8	894	4	128	14,3
5/6,3	1319	3,15	184	13,9
4/5	722	2,5	125	17,3
M1=ΣRi=	3011	M2=Σmi=	448	
A=(M2/M1)*100		A=		15
[M0-(M1+masses éliminées)]*100 M0		0,2	<1%	vérifié

**UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE
LABORATOIRE MATERIAUX**

RAPPORT D'ESSAIS

Essai pour béton frais

**Essai d'affaissement
NF EN 12350-2**

produit analysé:	BPS NF EN 206-1 C25/30 XC1 Dmax22.4 S3 C10.4 (Bg)
-------------------------	--

Identification de l'échantillon

Exécution de l'essai

N°d'échantillon:	001-21-02-2009	Date de réalisation	21/02/2010
température	18 °C	Lieu de réalisation	laboratoire UVC
Heure de l'essai	11h00	Type d'affaissement	réel
consistance du béton	S3 (plastique)		
Rapport E/C	0,61	Opérateur:	boufedah badissi

Affaissement réel mesuré

Aff=	8,5 cm
-------------	---------------

Observation

visa de l'opérateur