

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ABDERAHMANE MIRA - BEJAIA
FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DES MINES ET GEOLOGIE

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Mines
Option : Valorisation des Ressources Minérales

Thème

*Étude et caractérisation des granulats recyclés de
démolition*

Réalisé par :

MANSEUR Nabil

ZIANI Sifax

Encadré par :

M^r. ARKOUB Hamid Pr UAMB

Soutenu le 26/06 /2014 devant le jury composé de:

Président: M^r. MAZA Mustapha Pr UAMB

Examineurs: M^{me}. BOUZIDI Nedjima Dr UAMB

M^{me}. KICHER Kahina MAB UAMB

Année Universitaire: 2013-2014

Remerciements

Remerciements

Ce travail a été réalisé à l'université A.Mira de Béjaia, sous la direction du professeur ARKOUB HAMID, au Laboratoire des Mines, laboratoire de génie civil (MDC, MDS), et laboratoire de l'unité d'agrégat d'ADRAR OUFARNOU (ENOF).

Nous remercions en premier lieu, Dieu de nous avoir donné la volonté et le courage d'établir ce travail.

Nous remercions profondément Monsieur ARKOUB Hamid, Professeur de l'Université de Bejaia, pour l'intérêt constant qu'il a porté à ce travail, sa disponibilité, ses orientations, ses remarques fructueuses, et surtout sa méthode de travail autant qu'enseignant, ou bien encadreur.

Qu'il trouve ici notre profonde gratitude.

Nous remercions également le président de jury, ainsi les membres de jurys pour l'intérêt qu'ils ont accordés à ce travail en acceptant de le juger et de l'examiner. Nous n'oublions pas dans nos remerciements tout le personnel du Laboratoire de Technologie des Matériaux et de Génie des Procédés (LTMGP), de génie civil, et de l'unité d'ADRAR OUFARNOU (Ingénieurs, Techniciens, Secrétaires).

Nous ne pourrions terminer ces remerciements sans y associer nos familles, nos parents, nos amis et tant d'autres sans le soutien des quels nous n'aurions pas pu entreprendre ces études.

A toutes et à tous nous leur disons merci.



Dédicaces

A l'aide de dieu tout puissant, qui trace le chemin de ma vie j'ai pu arriver à réaliser ce modeste travail que Je dédie Aux êtres les plus chers, A la lumière de ma vie, mes chers parents, exemple de courage et de sérieux qui m'ont tout donné pour me permettre de réaliser mes rêves.

En ces quelques mots, je leurs exprime tout mon amour et mon respect pour tout ce qu'ils m'ont offert comme soutien, encouragement et aide. Je leurs souhaite une bonne santé, que Dieu me les garde.

A mes chères sœurs, et A mes chers frères.

A mon neveu: Fafa.

A mon Fidèle binôme : Sifax.

A tous mes chers amis.

Nabil

J'ai le plaisir de dédier ce modeste travail à:

A mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu et m'ont donné la force.

A mes chers frères et sœurs, qui m'ont toujours encouragé et souhaité la réussite.

A mes tantes et oncles. Mes cousins et cousines.

A tous mes amis

A mes copains de chambre et amis : Sofiane et Mazigh.

A mon Fidèle binôme : Nabil.

Sifax

A tous ceux qui nous sont chers, nous leurs dédions ce modeste travail

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES GRANULATS.....	3
I.1. Définition et classification.....	3
I.1.1. Qu'est-ce qu'un granulats.....	3
I.1.2. Origines.....	3
I.1.2.1. Naturel.....	3
I.1.2.2. Artificiel.....	4
I.1.2.3. Recyclé.....	4
I.2. Domaines d'utilisation des granulats.....	4
I.2.1. Routes et VRD (Voiries Réseaux Divers).....	4
I.2.2. Production de béton.....	5
I.2.3. Les réseaux ferrés.....	5
I.3. Granulats naturels.....	5
I.3.1. Origine minéralogique.....	5
I.3.2. Production.....	5
I.3.2.1. Décapage.....	5
I.3.2.2. Extraction.....	6
I.3.2.2.1. Gisement de granulats alluvionnaires.....	6
I.3.2.2.2. Gisement compact de roches massives.....	7
I.3.2.3. Transfert des matériaux sur le lieu de traitement.....	8
I.3.2.4. Traitement.....	8
I.3.2.5. Lavage.....	9
I.3.2.6. Stockage et livraison.....	9
I.3.2.8. Remise en état du site.....	10
I.3.3. Les principaux impacts d'exploitation des carrières sur l'environnement.....	10
I.3.3.1. Impact socio-économique.....	10
I.3.3.2. Impact hydrogéologique.....	10
I.3.3.3. Impact hydrologique et biologique.....	11
I.3.3.4. Impact biologique.....	11
I.3.3.5. Impact sur l'atmosphère.....	11
I.3.3.6. Impact sur le paysage.....	11

I.3.3.7. Impact sur les infrastructures.....	12
I.4. Granulats recyclés	14
I.4.1. Filière de la déconstruction	14
I.4.2. Filière des sous-produits industriels	15
Conclusion	16
CHAPITRE II : ETUDES DES GRANULATS RECYCLES.....	18
II.1. Introduction	18
II.2. Enjeux et problématique du recyclage des déchets du BTP	18
II.3. Classification des déchets destinés au recyclage.....	19
II.3.1. Identification visuelle des granulats recyclés	20
II.3.2. Réglementation sur la gestion des déchets.....	21
II.4. Différents origines de granulats recyclés.....	21
II.5. Installation de recyclage.....	22
II.5.1. Aspect réglementaire des installations de recyclage.....	23
II.5.2. Processus de fabrication des granulats recyclés.....	24
II.5.3. Mode d'exploitation.....	24
II.5.4. Plan d'assurance qualité du producteur – FTP.....	28
II.5.5. Cout des matériaux recyclés	28
II.5.6. Classification des granulats recyclés selon leurs classes granulaires	29
II.5.7. Désignation et identification des matériaux.....	30
II.6. Caractéristiques générales	30
II.6.1. Composition – Sorte de granulat de débris	30
II.6.2 Caractéristiques relatives à la granulométrie	31
II.6.2.1. Teneur en constituants réduisant la vitesse de prise et de durcissement des mélanges traités aux liants hydrauliques.....	31
II.7. Prescriptions complémentaires.....	32
II.7.1. Forme des pierres	32
II.7.2. Teneur en pierres rondes	32
II.7.3. Teneur en coquillages	33
II.7.4. Teneur en fines.....	33
II.7.5. Qualité des fines.....	33
II.7.6. Résistance à la fragmentation	33
II.7.7. Résistance à l'usure.....	34
II.7.8. Masse volumique réelle	34

II.7.9. Absorption d'eau.....	34
II.7.10. Résistance au gel-dégel.....	34
II.7.11. Teneur en sulfates solubles dans l'acide.....	34
II.7.12. Teneur totale en soufre.....	35
II.7.13. Stabilité volumétrique.....	35
II.7.14. Teneur en ions chlore.....	35
II.8. Domaine d'utilisation de granulats recyclés.....	36
II.8.1. Résumé de différents domaines d'utilisation de granulats recyclés	39
II.8.2. Précaution d'emploi ou particularités	40
II.8.3. Normes exigées pour l'utilisation dans le domaine des routes.....	41
II.9. Avantage du recyclage.....	42
II.10. Conditions du développement du recyclage.....	42
II.11. Différents contaminants existants dans les matériaux de recyclages.....	43
II.12. Conclusion.....	44
CHAPITRE III. MISE EN OEUVRE EXPERIMENTALE ET TECHNIQUE D'ANALYSES.....	46
III.1. Introduction.....	46
III.2. Matériaux utilisés.....	46
III.2.1. Provenance des échantillons.....	46
III.3. Programmes expérimentales.....	47
III.3.1. Prélèvement des échantillons.....	47
III.3.2. Préparation mécanique et échantillonnage	49
<i>III.3.2.1. Séchage.....</i>	<i>49</i>
III.3.2.2. Concassage.....	49
III.3.2.3. Récupération des granulats	51
III.3.2.4. Division et échantillonnage aux laboratoires.....	52
III.3.2.5. Tamisage.....	52
III.3.2.5.1. Granularité et Analyse granulométrique (NF EN 933-1).....	53
III.3.2.5.1.1. Analyse granulométrique (NF EN 933-1)	55
III.3.2.5.1.2. Coefficient d'aplatissement des granulats (NF EN 933-3).....	56
III.3.2.6. Coefficient d'absorption d'eau : NF EN 1097-6.....	58
III.3.2.7. Propreté.....	59
III.3.2.7.1. Équivalent de sable.....	59
III.3.2.7.2. Mesure de la capacité d'absorption de bleu méthylène d'un granulat	63
III.3.2.8. Masses volumique : NF EN 1097-6.....	66

III.3.2.8.1. Masse volumique apparente sèche des granulats	66
III.3.2.8.2. Masse spécifique ou Masse volumique absolue des granulats.....	67
III.3.2.9. Résistance à la fragmentation des gravillons Selon NF EN 1097-2	68
III.3.2.10. Analyse par diffraction des rayons X.....	70
III.3.2.11. Détermination des chlorures solubles dans l'eau	71
III.3.3. Essais sur le béton.....	72
III.3.3.1. Préparations et Confection des éprouvettes	72
III.3.3.2. Mesure de résistance à la compression (EN-12390-3).....	76
III.3.4. Conclusion	78
CHAPITRE IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	79
IV.1. Introduction.....	79
IV.2. Résultats et interprétations des différents essais.....	79
IV.2.1. Homogénéisation et division	79
IV.2.2. Résultats d'analyse granulométrique.....	80
IV.2.3. Résultats du coefficient d'aplatissement d'un gravier (NF EN 933-3).....	82
IV.2.4. Propriétés	83
IV.2.4.1. Equivalant de Sable	83
IV.2.4.2. Essai au bleu de méthylène.....	84
IV.2.5. Masses volumiques et Le coefficient d'absorption d'eau	84
IV.2.5.1. Masse volumique apparente.....	84
IV.2.5.2. Masse volumique absolue.....	85
IV.2.5.3. Coefficient d'absorption d'eau	85
IV.2.6. <i>Résistance à la fragmentation des gravillons</i>	86
IV.2.7. Caractéristiques chimiques et minéralogiques	86
IV.2.7.1. Caractérisations par diffraction des rayons X.....	86
IV.2.7.2. Détermination des chlorures solubles dans l'eau.....	87
IV.2.7.2.1. Préparation de la solution de nitrate d'argent (0,1 mol /L).....	87
IV.2.8. Caractérisation de béton	88
IV.2.8.1. Essais mécaniques.....	88
IV.3. Synthèse des différentes sources de granulats et leur utilisation sur le marché suivant leur typologie.....	89
IV.4. Interprétation et discussions	91
IV.5. Conclusion	93
Conclusion générale	94

Références bibliographiques.....95

Annexes

Résumé

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Liste des figures

Figure 1 : production des granulats selon leurs natures	5
Figure 2 : Décapage (ou découverte)	6
Figure 3 : Exploitation de granulats alluvionnaires depuis la berge, (A) Pelle, (B) Dragline ..	7
Figure 4 : Exploitation de granulats alluvionnaires en site immergé, (C) Excavateur à godet, (D) Drague flottante	7
Figure 5 : Exploitation d'une carrière à ciel ouvert	7
Figure 6 : Carrière souterraine de granulats	8
Figure 7 : Moyens de transport, (A) Bande transporteuse, (B) Dumper	8
Figure 8 : Station de traitement des granulats	9
Figure 9 : Lavage de granulats	9
Figure 10 : Stockage de granulats	9
Figure 11 : Différents modes de livraison	10
Figure 12 : Exploitation anarchique	12
Figure 13 : Schématisation d'une exploitation de carrière au sens d'analyse Cycle de Vie ..	13
Figure 14 : Déchets d'enrobés	14
Figure 15 : Déchets de déconstruction	15
Figure 16 : Principaux sous-produits industriels	16
Figure 17 : Classification des déchets de bâtiment, chiffre 2004	19
Figure 18 : Origines des granulats recyclés	22
Figure 19 : Installation de recyclage fixe	23
Figure 20 : Installation de recyclage mobile	23
Figure 21 : Stock de matériaux récupéré	24
Figure 22 : Pesée du camion entrant	24
Figure 23 : Prétraitement : (A) Brise de roche hydraulique, (B) pince à ferrailles	25
Figure 24 : Concasseur mobile	25
Figure 25 : Déferrailage par Over-band	26
Figure 26 : Tri manuel (Élimination bois, plastiques, ferrailage)	26
Figure 27 : Stock à l'air libre de produit fini	26
Figure 28 : Schéma général de production de granulats recyclés	27
Figure 29 : Schéma d'une coupe de chaussé	36
Figure 30 : Sous fondation de chaussées	37

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 31 : Couche de fondation	37
Figure 32 : Couche de fondation d'un hangar	37
Figure 33 : Voile de béton recyclé	38
Figure 34 : Schéma représentatif d'une réutilisation directe de déchets de démolition	38
Figure 35 : Différentes couches dont les granulats recyclés sont utilisés	39
Figure 36 : Prélèvement d'échantillon en tas	48
Figure 37 : Lieu de prélèvement d'échantillon	48
Figure 38 : Opération de quartage	48
Figure 39 : Diviseur à couloir	49
Figure 40 : Concasseur de type Fritsch	50
Figure 41 : Échantillon, (A) avant le concassage, (B) après le concassage	50
Figure 42 : Différentes fractions granulaires récupérées	51
Figure 43 : Différentes étapes de préparation	51
Figure 44 : Tamiseuse	53
Figure 45 : Grille d'aplatissement	57
Figure 46 : Grains à pores remplis d'eaux, et surfaces sèche	58
Figure 47 : Grains totalement secs	58
Figure 48 : Matériels utilisés pour l'essai Es	60
Figure 49 : Agitateur d'éprouvettes	60
Figure 50 : Méthode de mesure de h_1 et h_2	62
Figure 51 : Processus de déroulement de l'essai ES	62
Figure 52 : Teste à la tâche, (A) positif, (B) négatif	65
Figure 53 : Machine Los Angeles	69
Figure 54 : Échantillons avant et après passage à l'appareil los-Angeles	69
Figure 55 : Schéma du principe d'un spectromètre de diffraction des rayons X pour les échantillons poudre	71
Figure 56 : Photo de l'appareille de DRX	71
Figure 57 : Etapes de fabrication d'éprouvettes	75
Figure 58 : Appareil d'écrasement des éprouvettes	77
Figure 59 : Opération de division	79
Figure 60 : Détermination d'équivalent de sable	83
Figure 61 : Spectre DRX du sable concassé naturel (S.C.N).....	86
Figure 62 : Spectre DRX du sable concassé recyclé (S.C.R).....	87

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Liste des tableaux

Tableau 1 : Listes des matériaux rencontrés dans le domaine de BTP	20
Tableau 2 : Caractéristiques essentielles contrôlées	28
Tableau 3 : Différents produits de granulats recyclés	29
Tableau 4 : Exemple d'une désignation de granulats recyclés	30
Tableau 5 : Catégories des valeurs maximales du coefficient d'aplatissement	32
Tableau 6 : Catégories pour la teneur en pierres rondes	32
Tableau 7 : Catégorie pour la teneur en coquillages	33
Tableau 8 : Catégories des valeurs maximales de bleu de méthylène	33
Tableau 9 : Catégories des valeurs maximales du Los Angeles	33
Tableau 10 : Catégories des valeurs maximales du coefficient micro-Deval	34
Tableau 11 : Spécifications relatives à la teneur en sulfates	35
Tableau 12 : Spécifications relatives à la teneur en soufre	35
Tableau 13 : Spécifications relatives à la stabilité dimensionnelle	35
Tableau 14 : Les domaines d'emploi préconisés pour chaque matériau	39
Tableau 15 : Exigences d'utilisations des granulats dans les chaussées	41
Tableau 16 : Format et dimension des moules	73
Tableau 17 : Moyens de vibration des éprouvettes en fonction d'ouvrabilité de béton	74
Tableau 18 : Résultats de pourcentages de module de finesse et de teneur en fine	80
Tableau 19 : Caractéristiques granulométriques des échantillons	81
Tableau 20 : Interprétation des caractéristiques granulométrique	81
Tableau 21 : Coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire	82
Tableau 22 : Equivalent de Sable et module de finesse	83
Tableau 23 : Interprétation des résultats de l'équivalent de sable	84
Tableau 24 : Détermination des valeurs VBS des sables	84
Tableau 25 : Résultats des masses volumiques et du coefficient d'absorption	85
Tableau 26 : Détermination de coefficient de LOS ANGELES	86
Tableau 27 : Composition chimique des granulats (S.C.N, S.C.R).....	87
Tableau 28 : Pourcentage des chlorures	88
Tableau 29 : Pourcentage en granulats utilisé pour la fabrication des éprouvettes	88
Tableau 30 : Résultats des essais de compression	89
Tableau 31 : Domaines d'utilisations en fonction de type de granulats	89
Tableau 32 : Tableau de synthèse des différentes caractéristiques expérimentées	90

LISTE DES ABREVIATIONS ET DES SYMBOLES

- A** : Coefficient d'aplatissement, exprimée en pourcentage ;
- Ab** : Absorption d'eau, exprimée en pourcentage ;
- AS** : Teneur en sulfates solubles dans l'acide, exprimée en pourcentage ;
- BRH** : Brise roche hydraulique ;
- BTP** : Bâtiment travaux publique ;
- C** : Teneur en pierres rondes ;
- Cu** : Coefficient d'uniformité ;
- Cc** : Coefficient de courbure ;
- %C** : Teneur en ions chlorures, exprimée en pourcentage ;
- D** : Dimension supérieure d'une classe granulaire, exprimée en millimètres ;
- d** : Dimension inférieure d'une classe granulaire, exprimée en millimètres ;
- DD** : Déchets dangereux ;
- DND** : Déchets non dangereux ;
- DI** : Déchets inertes désignés ;
- DIB** : Déchets industriels banals ;
- DIS** : Déchets industriels spéciaux ;
- di/Di** : Classe granulaire, exprimée en millimètres ;
- EN** : Normes européennes ;
- EPS** : Poly-stère expansé ;
- ES** : Equivalent de sable sur le 0/2 mm, exprimé en pourcentage ;
- ESp** : Equivalent de sable sous le poids du piston ;
- ES_v** : Equivalent de sable visuel ;
- f** : Teneur en fines (passant à 0,063 mm), exprimée en pourcentage ;
- F** : Résistance au gel-dégel, exprimée en pourcentage ;
- f_c** : Résistance à l'écrasement (compression) des granulats, exprimée en MPa (N/mm²) ;
- FI** : Catégorie de la valeur du coefficient d'aplatissement ;
- FTP** : fiche technique produit ;
- GA₈₅** : Type grave ;
- GES** : Gaz à effet de serre.

LISTE DES ABREVIATIONS ET DES SYMBOLES

GN : granulats naturels ;

GNT : Granulats non traités ;

GR : granulats recyclés ;

GRB : Grave recyclée de béton avec au minimum 90 % de béton et au maximum 5 % d'enrobés ;

GRE : Grave recyclée d'enrobé avec au minimum 80 % d'enrobés ;

GRM : Grave recyclée mixte avec 30 % d'enrobés au maximum ;

GT : Granulats traités ;

GTA10 : Catégorie de tolérance autour de la granularité ;

ICPE : Installations classées pour la protection de l'environnement ;

LA : Coefficient Los Angeles ;

LPC : Teneur en contaminants légers, exprimée en pourcentage ;

MB_F ou VBS : Valeur de bleu sur le 0/2 mm, exprimée en g de bleu/g de matériau ;

MB_k : Valeur de bleu kaolinite ;

MDC : Laboratoire de matériaux de construction ;

M_{DE} : Micro-Deval en présence d'eau ;

M_F : Module de finesse ;

MDS : Laboratoire de mécanique des sols ;

NF : Normes françaises ;

OS_{Pass}, OS_{Fail} : Teneur en constituants réduisant la vitesse de prise et de durcissement des mélanges traités aux liants hydrauliques ;

PAQ : Plan d'assurance qualité ;

PSV : Coefficient de polissage accéléré ;

ρ_d : Masse volumique en vrac, exprimée en Mg/m³, ou t/m³ ;

ρ_s : Masse volumique apparente, exprimée en Mg/m³, ou t/m³ ;

S : Teneur en soufre total, exprimée en pourcentage ;

SC : Teneur en éléments coquilliers, exprimée en pourcentage ;

V : Stabilité dimensionnelle ;

VBF : Valeur de bleu des fillers ;

VRD : Voieries réseaux divers ;

W : Teneur en eau, exprimée en pourcentage.

REFERENCES NORMATIVES EUROPEENNES

Normes harmonisées granulats

EN 12620 Granulats pour bétons.

EN 13043 Granulats pour mélanges hydrocarbonés et enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et autres zones de circulation.

EN 13242 Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités pour les travaux de génie civil et pour la construction de chaussées.

EN 13285 Graves non traitées – Spécifications.

Propriétés générales des granulats

EN 932-1 Méthodes d'échantillonnage.

EN 932-2 Méthodes de réduction d'un échantillon de laboratoire.

EN 932-3 Procédure et terminologie pour la description pétrographique simplifiée.

EN 932-5 Equipements communs et étalonnage.

EN 932-6 Définitions de la répétitivité et de la reproductibilité.

Caractéristiques géométriques des granulats

EN 933-1 Détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage.

EN 933-2 Détermination de la granularité. Tamis de contrôle, dimensions nominales des ouvertures.

EN 933-3 Détermination de la forme des granulats. Coefficient d'aplatissement.

EN 933-4 Détermination de la forme des granulats. Indice de forme.

EN 933-5 Détermination du pourcentage de surfaces cassées dans les gravillons.

EN 933-6 Caractéristique de surface : coefficient d'écoulement des granulats.

EN 933-7 Détermination de la teneur en éléments coquilliers des gravillons d'origine marine.

EN 933-8 Evaluation des fines. Equivalent de sable.

EN 933-9 Evaluation des fines. Essai au bleu de méthylène.

EN 933-10 Evaluation des fines. Granularité des fillers (tamisage au jet d'air).

Propriétés mécaniques et physiques des granulats

EN 1097-1 Détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval).

EN 1097-2 Détermination de la résistance à la fragmentation (Los Angeles).

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

EN 1097-4 Détermination de la porosité du filler sec compacté.

EN 1097-5 Détermination de la teneur en eau par séchage à l'étuve ventilée.

EN 1097-6 Mesure de la masse volumique réelle et de l'absorption d'eau.

EN 1097-7 Détermination de la masse volumique réelle du filler. Méthode au pycnomètre.

EN 1097-8 Détermination du coefficient de polissage accélérée.

EN 1097-9 Méthode de détermination de la résistance à l'usure par abrasion provoquée par les pneus à crampons.

EN 1097-10 Détermination de la hauteur de succion d'eau.

Propriétés thermiques et altérabilité des granulats

EN 1367-1 Détermination de la résistance au gel/dégel.

EN 1367-2 Essai au sulfate de magnésium (alternatif à l'essai EN1367-1).

EN 1367-3 Test d'ébullition pour basaltes (Sonnenbrand basalte).

EN 1367-4 Détermination du retrait au séchage.

EN 1367-5 Détermination de la résistance au choc thermique.

EN 1367-6 Résistance au gel-dégel au contact du sel.

Propriétés chimiques des granulats

EN 1744-1 Analyse chimique.

EN 1744-3 Préparation de solutés par lixiviation des granulats.

EN 1744-4 Susceptibilité à l'eau des fillers pour mélanges bitumineux.

INTRODUCTION GENERALE

Depuis toujours, l'homme utilise des matériaux naturels pour la construction de son habitat et l'aménagement de son environnement. De ces deux nécessités premières découlent, aujourd'hui, trois grands secteurs d'activité, que sont les industries de carrières et matériaux de construction, le bâtiment et les travaux publics. [1]

Après s'être abrités dans des cavernes et avoir construit en branchages, en peaux animales et en terre, les bâtisseurs utilisèrent des pierres dures pour édifier des bâtiments plus importants, alors que les villes et les sociétés se structuraient et se développaient, pyramides, temples, châteaux et maisons témoignent du "génie constructeur" de nos ancêtres.

Très tôt dans l'histoire, on sut utiliser les roches, soit directement, soit en les transformant par la chaleur comme pour fabriquer les tuiles, les briques et le plâtre, les roches dures telles que le granite, le calcaire, le grès ou la meulière servirent de pierres de construction.

Au fil des siècles, la société s'est progressivement organisée avec le développement de l'habitat urbain, des monuments, des systèmes de défense et des voies de communication. Dans la mesure où cela était possible, on utilisait directement la pierre du sous-sol local pour réaliser des ouvrages.

Puis tout a rapidement changé ! À partir du XIXe siècle, l'invention du ciment et du béton a révolutionné l'art de construire, tandis que se développaient les réseaux de chemin de fer, infrastructures routières et ouvrages d'art nécessitant des travaux très importants et des matériaux nouveaux et économiques.

Tous ces travaux nécessitent désormais des matières premières sous forme de morceaux de roches, soit naturels (sables et graviers), soit obtenus artificiellement par concassage de roches naturelles.

Actuellement, la plupart des granulats utilisés sur le marché sont des granulats naturels issus de carrières ou de l'extraction des fleuves et mers. Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu. Il s'agit de produits nobles dont l'utilisation pourrait, par exemple, être en tout ou partie remplacée par des granulats recyclés pour la réalisation des bétons ou de fonds de coffrages. [2]

Comme toute matière première naturelle, les granulats naturels sont limités en quantité et leur extraction n'est pas sans impact sur la faune et la flore, on constate d'ailleurs que les critères d'exploitation deviennent plus stricts comme par exemple pour l'extraction de graviers alluvionnaires. Leur utilisation doit être réservée à des usages plus nobles pour lesquels aucune alternative n'existe.

Dans ce contexte, l'utilisation de produits recyclés trouve tout son sens. La bonne approche consiste à utiliser le 'bon produit', pour le 'bon usage', dans les 'bonnes conditions'

L'utilisation des granulats recyclés offre l'avantage de pouvoir approcher le travail en 'boucle fermée' un produit extrait = un produit utilisé = un produit recyclé = un produit réutilisé.

Favoriser le recyclage et l'utilisation de granulats recyclés peut constituer un avantage environnemental et financier indéniable.

Le recyclage des matériaux de construction, déjà bien engagé dans certains secteurs, est l'une des solutions prometteuses.

Pour autant, ces nouveaux matériaux présentent ils des propriétés suffisantes pour satisfaire une demande de performances chimiques, physiques, et mécaniques pour être utilisés dans tous les secteurs ?

Pour atteindre cet objectif de recherche, notre mémoire est subdivisé en quatre chapitres à savoir :

Le premier, est consacré à la présentation d'une revue bibliographique sur les granulats, leurs différentes origines, et utilisations...etc.

Le deuxième, porte sur l'étude approfondie sur les granulats recyclés, leurs origines, les processus de fabrications de ces derniers, leurs caractéristiques, et leurs utilisations.

La présentation de l'ensemble des protocoles expérimentaux, et méthodologies suivies dans la caractérisation des granulats fera l'objet du troisième chapitre.

Dans le quatrième chapitre nous présenterons l'ensemble de nos résultats et leurs interprétations.

Et enfin on termine par une conclusion générale.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES GRANULATS

Introduction :

Les granulats sont le constituant de base de tous travaux de génie civil. Il est donc important de maîtriser l'ensemble de leurs propriétés (et influences), tant de point de vue de leurs élaborations, que de leurs utilisations (mise en œuvre), et ce, afin de maîtriser au mieux le coût tout en respectant des critères de qualité.

La nature des gisements conditionne les propriétés intrinsèques (résistance, porosité, etc...) des granulats. Par contre, les caractéristiques géométriques (granularité, forme, etc...) et de propreté sont fonction du processus d'élaboration.

Pour fabriquer des produits ayant de qualités requises, les producteurs de granulats utilisent des installations de plus en plus complexes, faisant appel à des technologies bien maîtrisées (fragmentation, séparation, lavage, etc...).

I.1. Définitions et classification

I.1.1. Qu'est-ce qu'un granulats ?

Le granulats est un fragment de roche destiné à la fabrication d'ouvrages de travaux publics, de génie civil et de bâtiment. Leur nature et leur forme dépendent de leur provenance et des techniques de production. Leur taille est comprise entre 0 et 125 mm.

Il est obtenu en extrayant du sable et des graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, ou d'origine éolienne, en concassant des roches massives (calcaires ou carbonatées) ou encore en recyclant des matériaux de démolition ou des "laitiers" de sidérurgie.

Les granulats représentent, après l'eau et l'air, la matière première la plus importante utilisée dans certains pays.

Il existe six classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d ou D des granulats rencontrés (norme XPP 18-540). [3]

- Fillers $0/D$ où $D < 2$ mm avec au moins 70 % de passant à 0,063 mm ;
- Sablons $0/D$ où $D \leq 1$ mm avec moins de 70 % de passant à 0,063 mm ;
- Sables $0/D$ où $1 < D \leq 6,3$ mm ;
- Graves $0/D$ où $D > 6,3$ mm ;
- Gravillons d/D où $d \geq 1$ et $D \leq 125$ mm ;
- Ballasts d/D où $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm.

I.1.2. Origines

En fonction de sa nature et de son origine, un granulats, peut-être :

I.1.2.1. Naturel

D'origine minérale, issu de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).

Indépendamment de leur origine minéralogique, on classe ces granulats en deux catégories.

- Les granulats de roche meuble, dits roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion, ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses nuisibles à la résistance du béton et criblés pour obtenir différentes classes. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico-calcaires.

Ils sont exploités à proximité des cours d'eau, dans la nappe ou au-dessus de la nappe ou sur des fonds marins peu profonds. L'extraction est donc réalisée en fonction du gisement à sec ou dans l'eau.

- Les granulats de roches massives sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de précriblage est indispensable à l'obtention de granulats propres.

Différentes phases de concassage et de criblage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées.

Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, et degré de concassage.

I.1.2.2. Artificiel

D'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.

I.1.2.3. Recyclé

Obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.

I.2. Domaines d'utilisation des granulats

Les granulats sont employés dans l'industrie du BTP. Ils permettent de réaliser des ouvrages de génie civil, des bâtiments ou sont utilisés dans les TP.

I.2.1. Routes et VRD (Voiries et Réseaux Divers)

Les chaussées sont constituées en partie d'une couche d'assise (couche de fondation et couche de base). Elles sont surmontées éventuellement d'une couche de liaison pour l'amélioration des performances, puis d'une couche de roulement adaptée aux trafics (Classe du trafic définie par la moyenne journalière des poids lourds par voie de circulation).

Quel que soit le niveau, les granulats sont utilisés dans l'ensemble de ces couches. Ils doivent répondre à des critères de qualité liés à la solidité des ouvrages et à la sécurité. Ces exigences sont spécifiées dans des normes produits françaises (NF) et européennes (EN).

Les granulats de recyclage peuvent être utilisés dans les couches de forme et les couches d'assises, ainsi que sur les accotements des chaussées. [4] [5]

I.2.2. Production de béton

Les granulats sont également utilisés dans l'industrie du béton. Ils apportent au béton la consistance, le volume et participent à la résistance. Le ciment sert de liant à l'ensemble.

Les bétons peuvent être réalisés avec des granulats de diverses natures : alluvionnaires, éruptifs, calcaires. Actuellement, les emplois des bétons à base de granulats recyclés de bétons ne sont pas autorisés. Des bétons peuvent aussi être fabriqués avec des granulats concassés ou roulés, selon le contexte géologique locale (rareté des alluvions), ou selon des raisons purement techniques. [6]

I.2.3. Réseaux ferrés

Les voies ferrées requièrent de très grandes quantités de granulats pour la réalisation de structure des plates-formes, des chaussées, et de ballast des chemins de fer.

I.3. Granulats naturels

Les granulats naturels sont issus de roches meubles ou massives. Les roches meubles (matériaux alluvionnaires) sont exploitées le long des fleuves et des rivières.

I.3.1. Origine minéralogique

Parmi les granulats naturels les plus utilisés pour le béton proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques ou de roches éruptives telles que les basaltes, les granites.

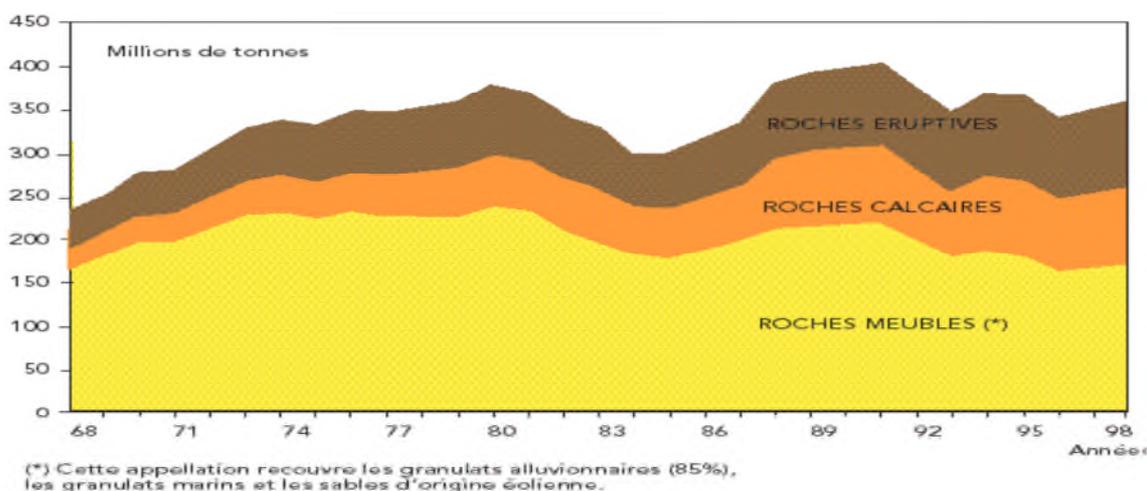


Figure 1 : production des granulats selon leurs natures. [7]

I.3.2. Production

La production des granulats à partir de roches meubles ou massives, nécessite les principales étapes suivantes.

I.3.2.1. Décapage

Il consiste à décaper les terrains situés au-dessus des niveaux à exploiter et à les mettre de côté en vue du réaménagement. Parmi ceux-ci on distingue les bonnes terres végétales et les niveaux stériles de roches plus ou moins altérées et non exploitables. Terres végétales et niveaux stériles sont stockés de façon indépendante. Ils peuvent parfois être disposés en tas

latéraux ou merlons qui permettent de faire un écran visuel et sonore entre la carrière et son environnement extérieur. [8]



Figure 2 : Décapage (ou découverte).

I.3.2.2. Extraction

S'effectue dans des carrières. Les techniques mises en œuvre dépendent du type de gisement :

I.3.2.2.1. Gisement de granulats alluvionnaires :

Exploité en terrain sec (au moyen d'engins de terrassement) ou en site immergé (au moyen par exemple de drague).

L'extraction peut être réalisée :

- **Soit par des engins flottants de dragage**

- Dragage à godets, munie d'un train de godets entraînés en rotation sur un bras inclinable. Les godets raclent le fond et remontent les matériaux. Ce type de drague ne peut extraire que dans un gisement sous faible profondeur d'eau.

- Dragage à grappin. Le grappin est suspendu et actionné par des câbles. Il est muni de deux mâchoires qui, en se fermant, raclent le fond et emprisonnent les matériaux.

Ce type de matériel peut extraire des granulats à plusieurs dizaines de mètres de profondeur.

- Dragage suceuse qui extrait les matériaux par aspiration au bout d'un bras tubulaire.

- **Soit depuis la berge par**

- Pelles à câble équipées en dragline : godet lancé au bout d'un câble et qui racle le fond ;

- Pelles hydrauliques (mécaniques) ou des excavateurs à godets fonctionnant sur le même principe que la drague à godets, mais installé sur la berge.

Une fois extraits les matériaux sont acheminés par bandes transporteuses (tapis roulants) vers le centre de traitement. Pour l'extraction par drague flottante, un train de tapis roulant sur pontons est disposé sur plan d'eau depuis la drague jusqu'à la berge.



(A)

(B)

Figure 3 : Exploitation de granulats alluvionnaires depuis la berge, (A) Pelle, (B) Dragline.



(C)

(D)

Figure 4 : Exploitation de granulats alluvionnaires en site immergé, (C) Excavateur à godet, (D) Dragage flottant.

I.3.2.2.2. Gisement compact de roches massives

Ce type de gisement nécessite l'emploi d'explosif, l'abattage et la fragmentation des blocs, soit à ciel ouvert, ou bien souterrain.



Figure 5 : Exploitation d'une carrière à ciel ouvert. [9]



Figure 6 : Carrière souterraine de granulats.

I.3.2.3. Transfert des matériaux sur le lieu de traitement

Il s'effectue soit en continu par transporteurs à bande soit en discontinu par camions et dumpers pour les extractions terrestres ou bateau dans le cas d'exploitations immergées assez loin des rives.

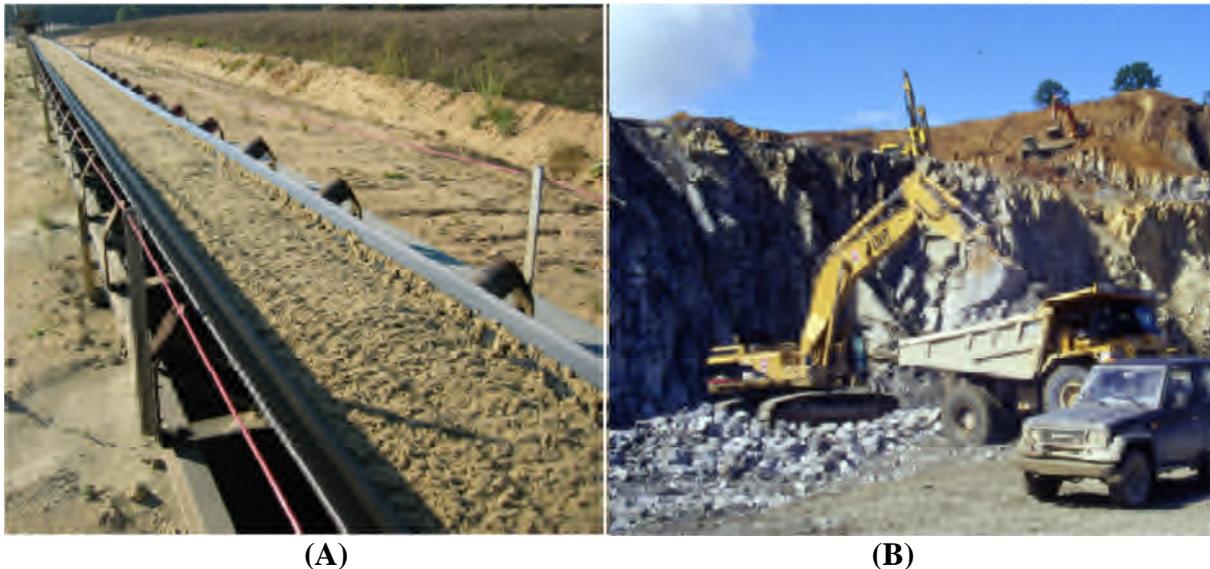


Figure 7 : Moyens de transport, (A) Bande transporteuse, (B) Dumper.

I.3.2.4. Traitement : Fait suite à l'extraction des matériaux, qui sont concassés et broyés (au moyen d'appareils travaillant par chocs ou écrasement) afin de réduire leur taille, criblés (au moyen de cribles vibrants) pour obtenir des granulats de tailles différentes, puis lavés (afin d'éliminer les éléments de pollution et les fines) ou dépoussiérés et enfin stockés. Les opérations de traitement permettent d'obtenir des granulats répondant à des spécifications précises quant à leurs caractéristiques géométriques et physiques pour des usages particuliers. [8]



Figure 8 : Station de traitement des granulats.

I.3.2.5. Lavage : Laver ou dépoussiérer permet d'obtenir des granulats propres.

La présence de boues ou autres matières enrobant les grains empêche l'adhérence avec les liants (ciment, chaux...) et interdit alors leur utilisation. Les eaux de lavage sont ensuite décantées dans des bassins spéciaux de façon à être réutilisées ou restituées à la rivière ou au lac. [8]

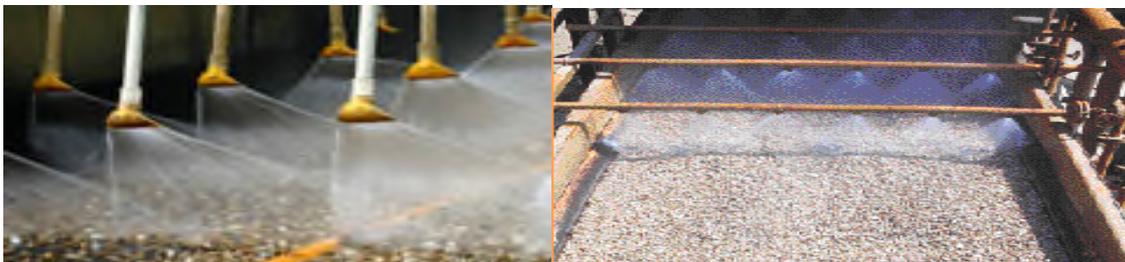


Figure 9 : Lavage de granulats.

I.3.2.6. Stockage et livraison

a). Stockage

En fin de traitement, on obtient des produits de qualité répondant à des critères bien précis (nature des granulats, forme, taille). Une fois réduits, traités et classés, les granulats sont acheminés vers les aires de stockage, soit sous forme de tas individualisés soit en silos.



Figure 10 : Stockage de granulats.

b). Livraison

Différents moyens de transport permettent ensuite de les livrer à la clientèle : trains, camions ou péniches.



Figure 11 : Différents modes de livraison.

I.3.2.8. Remise en état du site

Au cours de la phase d'exploitation, nous avons vu que la production de granulats va considérablement modifier l'environnement immédiat du site.

Or, d'un point de vue du développement durable, les carrières constituent une occupation temporaire du territoire sur lequel elle est implantée et l'usage ultérieur de ce dernier doit être prévu et intégré dès les premières démarches du projet.

En effet, la remise en état du site est réfléchi de façon très précise avant l'exploitation car ses détails doivent être précisés dans l'étude d'impact.

I.33. Principaux impacts d'exploitation des carrières sur l'environnement [10]

I.3.3.1. Impact socio-économique

Les activités d'exploitation des carrières ont un impact :

- Social tel que les répercussions sur la santé des personnes employées et des habitants au voisinage, des modifications induites dans l'environnement et dans les conditions de vie des populations locales.
- Economique tel que l'aménagement de nouvelles voies de transport et de communication, l'occupation des sols, notamment lorsque le site fait déjà l'objet d'une mise en valeur agricole ou forestière.

I.3.3.2. Impact hydrogéologique

Du fait de l'excavation engendrée, une carrière peut avoir un impact direct non négligeable sur l'écoulement souterrain des eaux. Ainsi, si l'exploitation se poursuit dans une nappe phréatique ou à proximité de celle-ci, le rabattement engendré pourrait, selon les cas, provoquer l'assèchement des puits ou cours d'eaux environnants, donc il peut résulter une modification de la piézométrie et un abaissement du niveau de la nappe phréatique, ainsi qu'une altération de la qualité des eaux souterraines.

I.3.3.3. Impact hydrologique et biologique

a). Hydrologique

Il est très fréquent qu'une carrière engendre des rejets d'eau au milieu naturel. On distingue deux origines à ces eaux :

- L'eau d'exhaure qui n'est présente que si l'excavation a rencontré un réservoir souterrain.
- L'eau météorique qui peut s'accumuler en fond de fouille après avoir ruisselé sur les pistes, les fronts de taille ou les stocks de matériaux.

L'impact produit est :

- La déviation des cours d'eaux ;
- La modification des éléments constitutifs ;
- La pollution par des eaux usées contaminées et la pollution due au renforcement de l'érosion.

b). Biologique

Le développement de l'activité d'extraction des matériaux dans une région est de nature à détruire la flore et écarter (faire migrer) la faune.

I.3.3.5. Impact sur l'atmosphère

La composition de l'atmosphère est stable, l'ajout de certains éléments peut engendrer un déséquilibre dans ce système.

Les activités humaines sont les facteurs essentiels pour son exhortation.

Dans le cas des carrières à ciel ouvert, la précarité de l'atmosphère est due aux :

- Dégagements de poussières par les tirs à l'explosif et le trafic routier ;
- Dégagements des gaz nocifs et des effluents gazeux suite à l'ignition spontanée de terrils et les échappements des engins et des automoteurs.

I.3.3.6. Impact sur le paysage

Il est évident que l'extraction de la carrière entraînerait une transformation du paysage et un impact négatif de la surélévation naturelle des reliefs (figure 12) (altération de la morphologie et l'apparition des surfaces dévastées), produisant des impacts visuels tel que :

- La forme de l'excavation ;
- L'aspect des fronts de taille ;
- Le stockage des remblais en particulier laisse des cicatrices dans le paysage ;
- Les contrastes de forme et de couleur ;
- La position de l'installation de traitement ;
- Le déboisement.



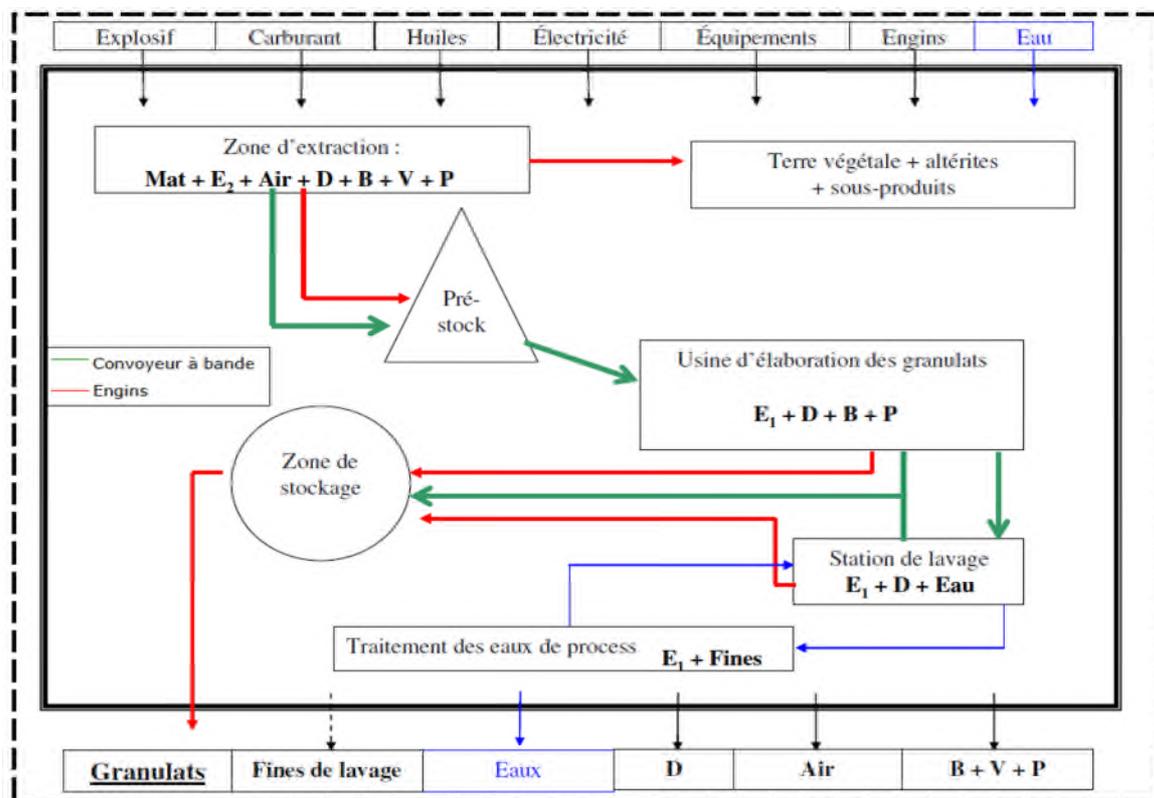
Figure 12 : Exploitation anarchique. [10]

I.3.3.7. Impact sur les infrastructures

L'exploitation de la carrière entraîne à long terme l'effet d'usure permanent des infrastructures routières par l'usage des convois et le risque de dégâts aux constructions voisines par les vibrations introduites.

Le transport des matériaux endommage les voiries. La circulation des engins entraîne la dégradation des chaussées et aggrave les risques de dérapage sur les routes par suite de l'épandage des boues.

• **Modèle global des sites de carrières**



Légende :

Mat : matière première (roche) ;

E₁ : énergie sous forme électrique ;

E₂ : énergie sous forme de carburant ;

Air : émissions atmosphériques ;

D : déchets ;

B : bruit ;

V : vibration ;

P : poussière ;

Eau : volume d'eau ;

Fines : fines de décantation des eaux de traitement ;

→ : Circuit d'eau de lavage des granulats ;

⎓ : Périmètre de l'exploitation.

Figure 13 : Schématisation d'une exploitation de carrière au sens d'analyse cycle de vie. [1]

I.4. Granulats recyclés

Dans le secteur des granulats, le recyclage s'organise en deux filières :

I.4.1. Filière de la déconstruction

Elle traite les matériaux issus de la démolition de bâtiments ou de chaussées : on parle de granulats_recyclés car la matière première utilisée pour les produire est elle-même constituée de granulats « purs » ou combinés à des liants (dans le béton et les enrobés routiers).

- **Chantiers routiers : un recyclage courant des matériaux sur place.**

Le secteur routier est en pointe puisque plus de 90 % des granulats recyclés proviennent du décapage de routes.

Le recyclage in situ des granulats qui constituent les couches d'assise des routes est très répandu : les granulats retirés de l'ancienne voie sont concassés et triés dans une installation mobile (de concassage et criblage) positionnée sur le chantier routier, avant leur réutilisation immédiate.

Le recyclage des matériaux peut atteindre 100 %

La récupération des enrobés, c'est-à-dire de la couche de roulement constituée d'un mélange de bitume et de granulats, est aussi couramment pratiquée. Ces matériaux appelés « agrégats d'enrobés » sont traités sur place ou dans des installations spécifiques appelées « plates-formes de recyclage » avant d'être réutilisés dans la construction de nouvelles chaussées.

La réglementation française autorise l'incorporation de 10 % d'enrobés recyclés (Circulaire du 18 juin 2001). [11]



Figure 14 : Déchets d'enrobés.

- **Déconstruction des bâtiments : valoriser les bétons**

En revanche, le recyclage du béton (qui, rappelons-le, est constitué pour l'essentiel de granulats) s'avère parfois plus complexe :

Les ouvrages d'art sont faciles à recycler (car constitués de béton pur), mais dans un bâtiment, le béton « cohabite » avec d'autres matériaux tels que le verre et l'aluminium (fenêtres), le bois, le plâtre, le plastique, la brique, etc.



Figure 15 : Déchets de déconstruction.

Le recyclage du béton suppose alors un tri préalable lors de la démolition du bâtiment. On parle alors de « **déconstruction** ».

Jusqu'à présent, cette opération onéreuse n'est pas toujours exigée dans les appels d'offres, les maîtres d'ouvrage n'en ayant pas prévu le financement.

Des granulats artificiels peuvent être employés pour réaliser des bétons à usages spécifiques.

Pour développer l'utilisation de granulats recyclés dans la fabrication de béton, des études sont actuellement en cours.

Elles visent à :

- préciser les utilisations possibles des granulats recyclés dans différents types de bétons.
- évaluer le nombre de recyclages successifs qui peuvent être opérés sur les matériaux de démolition.

Le dispositif normatif qui s'applique aux granulats recyclés est le même que celui en vigueur pour les granulats naturels, moyennant quelques caractéristiques spécifiques aux granulats recyclés.

I.4.2. Filière des sous-produits industriels

Qui sont les Schistes houillers, laitiers de hauts fourneaux ou d'aciéries, mâchefers d'incinération d'ordures ménagères, on parle alors aussi de granulats artificiels car la matière première utilisée n'est pas du sable et des graviers mais des résidus de procédés industriels.

Les professionnels français préfèrent parler à ce propos de « matériaux valorisés ».

- **Granulats issus de sous-produits industriels**

Les industries de la houille, les hauts fourneaux et les aciéries, ainsi que les usines d'incinération des ordures ménagères produisent des déchets qui sont valorisés à travers la production de granulats artificiels.

Les unités de traitement de ces sous-produits industriels se situent à proximité des gisements en question. Les granulats ainsi produits sont en général employés sur les chantiers routiers, en sous-couches.

Schistes houillers sont des sous-produits de l'industrie minière de la houille. Lors de l'extraction du charbon dans la mine, des bancs intercalaires de matériaux stériles

accompagnent inévitablement le charbon. Le terme « schistes houillers » désigne le sous-produit résultant de la séparation entre le charbon et le stérile.

Laitiers de hauts-fourneaux ou d'aciéries font partie de la gamme des co-produits sidérurgiques. Le laitier de haut-fourneau résulte de la production de la fonte : c'est la partie liquide surnageant à la surface du fer en fusion dans le haut-fourneau qui va être concassée après sa solidification. Le laitier d'aciérie est constitué des impuretés résultant du traitement de la fonte pour obtenir de l'acier.

Mâchefers d'incinération d'ordures ménagères sont la fraction incombustible des déchets restituée à la sortie du four sous forme d'un matériau solide.



Argile expansée



Schiste expansé



Laitier refroidi à l'air



Laitier expansé



Cendre volante



EPS

Figure 16 : Principaux sous-produits industriels.

- **Granulats à hautes caractéristiques**

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

Conclusion

Les réserves géologiques en granulats naturels sont limités, avec toutefois de nombreuses contraintes qui limitent leur exploitation, notamment pour les raisons suivantes :

- L'urbanisation croissante proche des centres de production de granulats limitent l'extension des espaces carrières ;
- La composition des formations géologiques locales limite l'exploitation des roches massives et induit des coûts de production plus élevés ;

- L'ouverture de nouvelles exploitations est soumise à des démarches réglementaires strictes.
- Par ailleurs, certaines réserves alluvionnaires sont insuffisantes dans certaines microrégions ce qui engendre des coûts de transport élevés pour subvenir aux besoins.

En conséquence :

Les ressources naturelles en granulats sont donc à économiser autant que possible afin de les pérenniser pour pouvoir répondre aux besoins dans le temps.

CHAPITRE II : ETUDE DES GRANULATS RECYCLES

II.1. Introduction

La réutilisation des déchets de démolition a été effectuée la première fois après la deuxième guerre mondiale en Allemagne.

Depuis cette date, plusieurs recherches ont été menées dans beaucoup de pays pour développer l'utilisation des déchets de démolition comme constituants de nouveau béton. Ces déchets peuvent être de béton démolé (déchets des éprouvettes écrasé dans laboratoire, déchets du bâtiment, des plates-formes des aéroports en béton, chaussées des routes en béton etc.), déchets de brique du bâtiment, ou déchets des éléments de trottoir. Les granulats fabriqués par ces déchets sont dits «Granulats Recyclés », et le béton fabriqué à base de ces granulats est dits : « Béton Recyclé». [12]

Cependant, les granulats recyclés fabriqués par les déchets de démolition des constructions dont plusieurs déchets autre que le béton tels que : le plâtre, la brique, le bois, le plastique, les métaux, les papiers etc... Après la séparation et le tamisage peuvent être réutilisés dans divers domaines.

Dans ce cadre, la valorisation par recyclage des déchets produits par l'activité du BTP, et l'utilisation des matériaux recyclés sont des activités à promouvoir et à favoriser par tous les acteurs du BTP. Ces démarches de valorisation des déchets du BTP et d'utilisation des produits s'inscrivent dans une logique de développement durable qui permettra :

- De minimiser la consommation de matériaux de carrières (préservation des ressources naturelles) ;
- De diminuer les volumes de stockage de déchets.

II.2. Enjeux et problématique du recyclage des déchets du BTP

Chaque année les activités du Bâtiment et des Travaux Publics produisent des quantités énormes de matériaux de démolition et de déblais, qui dans le cas général sont des déchets inertes.

Leur réutilisation dans un contexte d'économie de la ressource naturelle a vite été considérée comme une priorité pour les acteurs des Travaux Publics : maîtrises d'ouvrage, maîtrises d'œuvre, entreprises de BTP, carriers....

L'utilisation de tels matériaux dits recyclés offre plusieurs avantages : économie des ressources naturelles de granulats ; réduction des volumes de stockage des déchets inertes ; économie de transports.

Ces matériaux granulaires recyclés sont issus de chantiers de démolition de BTP, dits « bétons et produits de démolition recyclés » ou « grave recyclée ». Ils peuvent se substituer aux matériaux naturels en techniques routières à l'issue d'un processus d'élaboration spécifique.

Les matériaux issus du recyclage peuvent, selon leurs caractéristiques, être considérés comme des matériaux de terrassement, ou comme des granulats pour chaussée.

II.3. Classification des déchets destinés au recyclage

Les granulats recyclés proviennent des déchets de démolition de bâtiments ou de routes.

Ces déchets de chantier sont constitués de résidus des procédés de production et de transformation (déchets chimiques, emballages, bois traités ou non traités...). Ces déchets de démolition font partis des déchets industriels dans la classification usuelle (à distinguer des déchets urbains et des déchets agroalimentaire), Il est donc nécessaire de distinguer les différentes catégories des déchets industriels. [13]

Quatre grandes catégories permettent de classer ces déchets industriels :

- **Déchets inertes désignés DI** : La Directive européenne 1999/31/CE concernant la mise en décharge des déchets définit un déchet inerte comme un déchet ne pouvant subir aucune modification physique, chimique ou biologique.

Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ces déchets n'entraînent pas de pollution de l'environnement et ne peuvent nuire à la santé humaine.

Exemple : béton, briques, pierre, tuiles, céramiques...

- **Déchets industriels banals (DIB)** : Un déchet est dit banal si est traité par les mêmes procédures que ceux employés pour les déchets ménagers, ces déchets ne sont ni inertes, ni toxiques, cette appellation est en cours de modification : Déchets Non Dangereux (DND).

Exemple : plastiques, métaux, verre, bois non traités...

- **Déchets industriels spéciaux (DIS) ou déchets dangereux (DD)** : En opposition avec les DIB, ce type de déchet est traité par des procédés qui diffèrent de ceux employés pour les ordures ménagères, ils contiennent des substances dangereuses pour l'homme et pour l'environnement, leur stockage et leur traitement sont soumis à des règles strictes.

Exemple : amiante, solvants, peintures, huiles, colles, goudron, bois traités ou emballages souillés.

- **Déchets d'emballages** dont le traitement impose une valorisation au-delà d'une certaine quantité produite (volume hebdomadaire : 1100 litres : décret du 13 juillet 1994 modifié le 30 juillet 1998).

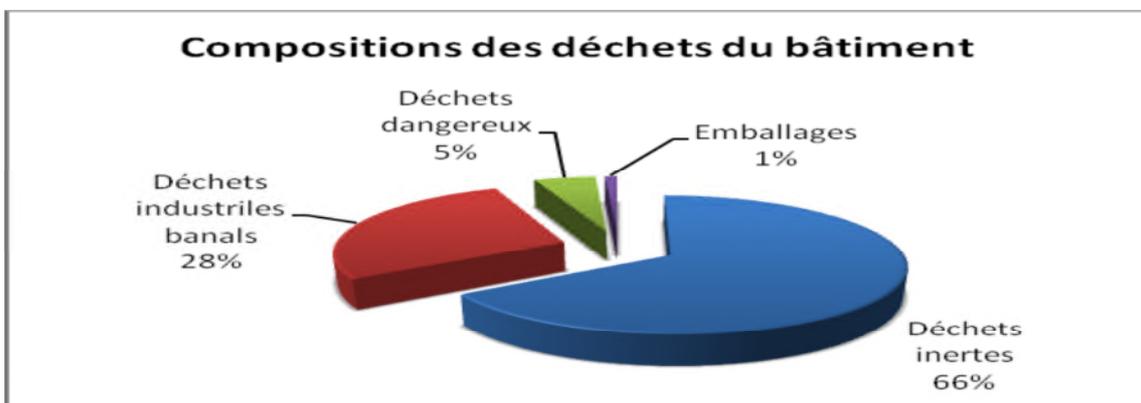


Figure 17 : Classification des déchets de bâtiment, chiffre 2004. [13]

Les déchets de démolition de bâtiments ou de routes peuvent donc être constitués de l'ensemble de ces types de déchets : béton, brique, bois, plastique, métaux, autres éléments. La démolition des routes génère des déchets d'enrobés mais également des déchets de bétons hydrauliques. .

II.3.1. Identification visuelle des granulats recyclés

Tableau 1 : Liste des matériaux rencontrés dans le domaine de BTP. [14]

catégorie	Liste des matériaux par catégorie
1	Débris de béton et matériaux pierreux naturels Masse volumique sèche > 2100Kg/m ³ (Débris de béton, granulats liés au mortier, pierres naturelles, pierres concassées, graviers,...)
2	Débris de maçonnerie Masse volumique sèche > 1600Kg/m ³ (Briques, mortier, tuiles en terre cuite, buse,...)
3	Autres matériaux pierreux (Carrelages, ardoises, plinthes, scories, béton cellulaire, argile expansée, céramique, coquillages,...)
4	Mélanges hydrocarbonés (revêtements hydrocarbonés, asphalte coulé,...)
5	Matériaux non pierreux (gypse, caoutchouc, plastique, isolation, verre, métaux, chaux, plâtre, bitume,...)
6	Matières organiques (bois, restes de plantes, papier, panneau de fibre, liège,...)
7	Matériaux spéciaux (amiante, charbon, schiste noir charbonneux, boules d'argile, lignite, cokes, briques réfractaires,...)

II.3.2. Règlements sur la gestion des déchets

Les déchets du bâtiment et des travaux publics sont soumis aux dispositions générales sur l'élimination des déchets.

A titre d'illustration, nous présentons l'exemple du code de l'environnement français, qui définit le rôle et les responsabilités des producteurs de déchets de chantier par rapport à leurs éliminations.

En effet, tout producteur de déchets de chantiers est responsable de leur bonne élimination. Il doit, entre autres veiller à limiter l'enfouissement aux seuls déchets ultimes, à favoriser leur valorisation par réemploi ou par recyclage. [13]

Enfin, la circulaire interministérielle du 15 février 2000, relative à la planification de la gestion des déchets de chantiers du BTP, a assigné les objectifs suivants :

- Assurer le respect de la réglementation (fin des décharges sauvages, application du principe du « pollueur-payeur ») ;
- Mettre en place un réseau de traitement bien réparti sur le territoire et dont les coûts seront intégrés et clairement répartis ;
- Réduire les déchets à la source,
- Réduire le stockage en développant la valorisation et le recyclage ;
- Développer l'utilisation des matériaux recyclés ;
- Impliquer les maîtres d'ouvrages publics.

II.4. Différents origines de granulats recyclés

En règle générale, on distingue quatre classes principales de granulats recyclés : [2]

1. Granulats de débris de béton

Proviennent de la démolition de bâtiments ou d'infrastructures de génie civil (bétons ou béton armé d'acier). (A) de la figure 18.

2. Granulats de débris de maçonnerie

Proviennent de la construction, de la rénovation et de la démolition des bâtiments. (B) de la figure 18.

3. Granulats de débris hydrocarbonés

Proviennent de la démolition d'infrastructures de génie civil (routes...), de la démolition de parkings...(C) de la figure 18.

4. Granulats de débris mixtes

Proviennent de la construction / rénovation démolition de bâtiments (briques/blocs/tuiles...). (D) de la figure 18.

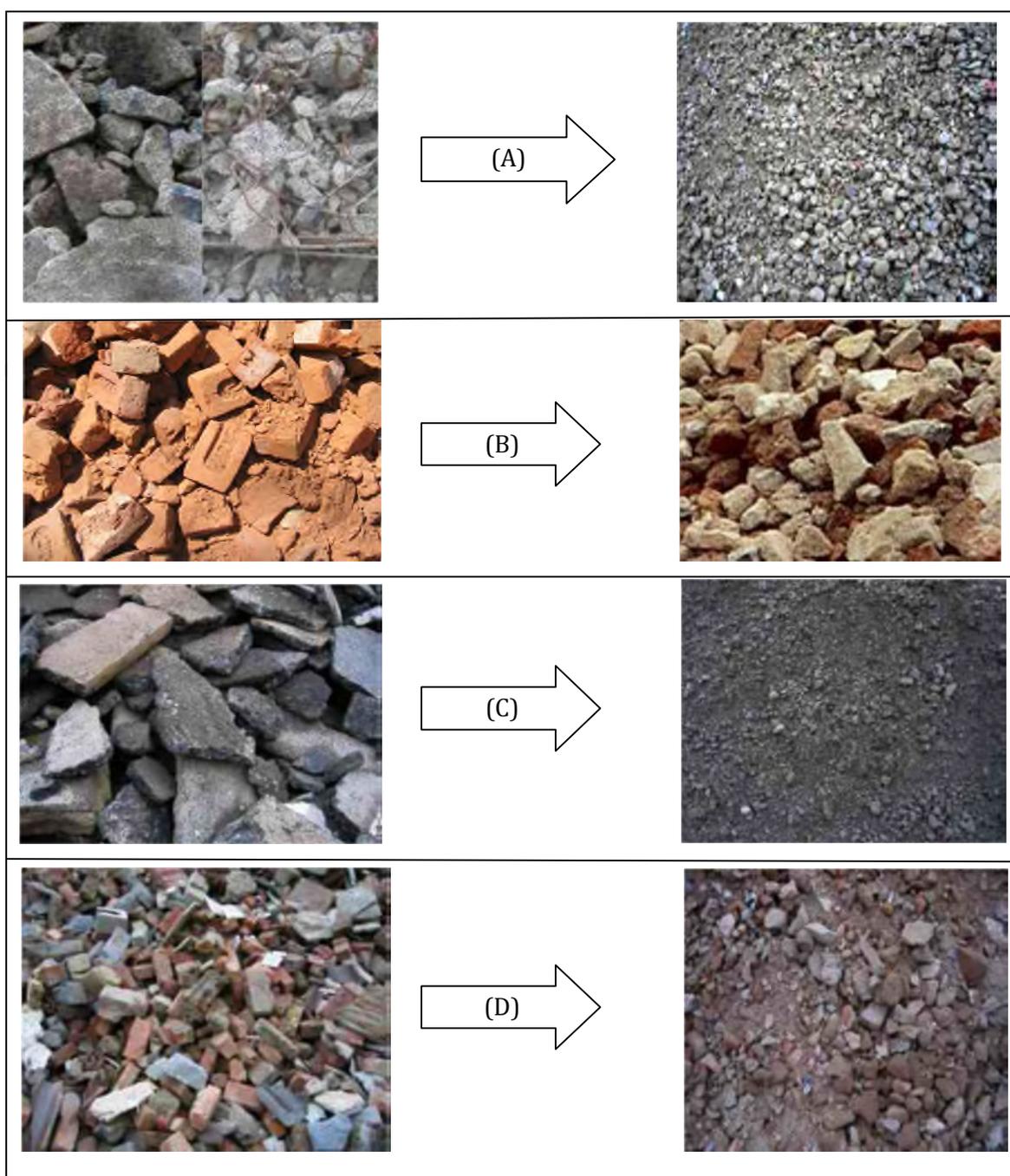


Figure 18 : Origines des granulats recyclés. [2]

II.5. Installation de recyclage [15] [16]

De manière générale, les installations de recyclage peuvent être fixes ou mobiles.

Les installations de graves recyclées recensées à l'heure actuelle sont de type mobile, leurs capacités de production journalières de ces installations mobiles sont estimées entre 500 t et 200 000 t/an.

Suivant l'importance des flux de matériaux à traiter, deux types d'installation peuvent être mises en place :

- 1. Installations fixes** situées à proximité des grands centres de production de déchets, permettent la mise en place de matériel de recyclage concassage à grand débit ainsi que d'équipements complémentaires de traitement : lavage, décantation, tri manuel.



Figure 19 : Installation de recyclage fixe.

- 2. Installations mobiles** permettent de réaliser des interventions ponctuelles sur des plates-formes de regroupement ou des chantiers de démolition, dès que les quantités à recycler atteignent 10000 à 15000 T. Cette solution permet de minimiser les coûts de traitement et de développer les plates-formes de regroupement suivant les besoins locaux dans le souci de limiter le transport routier des matériaux recyclables.



Figure 20 : Installations de recyclage mobile.

II.5.1. Aspect réglementaire des installations de recyclage

Les installations de concassage-recyclage ainsi que les plates-formes de regroupement de la région de lorraine à titre d'exemple font l'objet de déclaration (ou d'autorisation) préfectorale au titre des ICPE (Installations classées pour la protection de l'environnement), suivant la puissance des concasseurs et la capacité de stockage de matériaux. [15]

II.6. Processus de fabrication des granulats recyclés

Les différentes phases d'élaboration des produits issus du recyclage des matériaux de démolition sont :

- Sélection, stockage et traitement des produits bruts ;
- Préparation des matériaux avant concassage : cette étape consiste à réduire les plus gros éléments à l'aide d'un brise roche hydraulique (BRH) et à retirer les impuretés les plus grosses ;
- Tri manuel
- Déferrage électromagnétique ;
- Concassage et criblage : étape destinée à éliminer les matériaux de faibles caractéristiques ;
- Concassage secondaire éventuel de la fraction supérieure issue du concassage primaire ;
- Stockage ;
- Analyses éventuelles avant utilisation.

II.6.1. Mode d'exploitation :

Les différentes phases de récupération des produits issus du recyclage sont les suivantes :

a. Réception et tri des matériaux

La réception se fait à l'entrée du centre de recyclage par contrôle visuel. A l'issue de ce contrôle, les camions jugés trop riches en éléments indésirables (bois, plâtre, plastique...) sont refusés, les autres sont acceptés.

Les matériaux sont stockés en fonction de leur nature (béton, briques, enrobés) et du prétraitement qu'ils devront recevoir : brise roche hydraulique, pinces à ferrailles, tri manuel (des plastiques, bois, etc...).



Figure 21 : Stock de matériaux récupéré.

Figure 22 : Pesée du camion entrant.

b. Prétraitement

Le prétraitement consiste à réduire les plus gros éléments (Brise Roche Hydraulique), et à couper les éléments les plus longs (cisaille hydraulique) notamment lorsqu'ils sont ferrillés.



(A)

(B)

Figure 23 : Prétraitement : (A) Brise de roche hydraulique, (B) pince à ferrailles.

c. Criblage- Scalpage

Le criblage ou le scalpage, consiste à éliminer la fraction fine dans laquelle le risque de présence d'argile est le plus grand.

d. Concassage

Le concassage consiste à fragmenter et réduire les matériaux jusqu'à un diamètre préalablement défini.



Figure 24 : Concasseur mobile.

e. Dé-ferraillage

Le dé-ferraillage est avant et après le concasseur par bande électromagnétique pour enlever les ferrailles après sa libération des blocs de béton. Une ou plusieurs bandes sont disposées au long du processus de production.



Figure 25 : Déferrailage par Over-band.

f. Tri aval

Un tri manuel est effectué sur certaines installations, pour éliminer les impuretés résiduelles avant stockage.

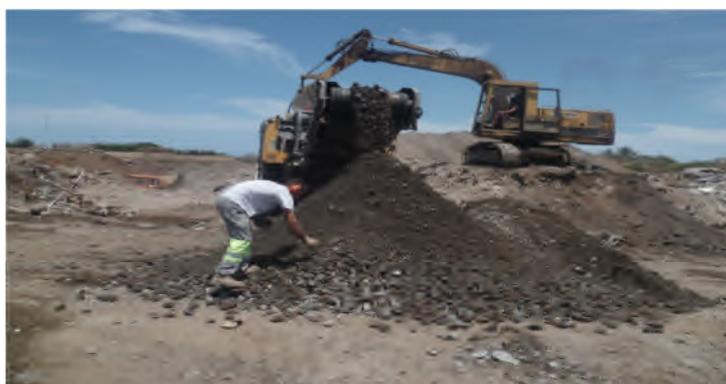


Figure 26 : Tri manuel (Elimination bois, plastiques, ferrailage).

g. Produit fini

Après l'élimination des impuretés, le produit fini est stocké en tas comme le montre la figure suivante :



Figure 27 : Stock à l'air libre de produit fini.

Synoptique de production

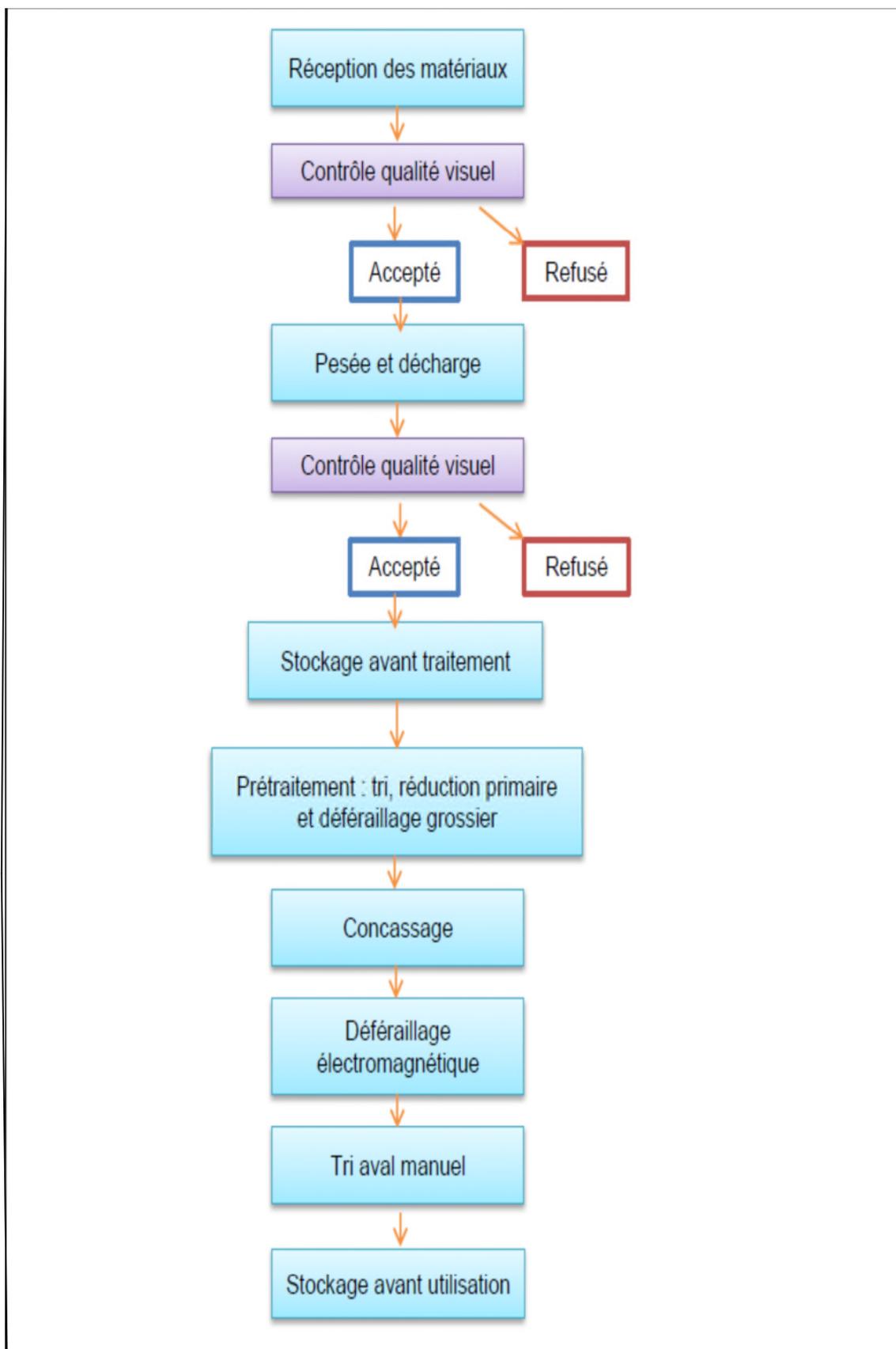


Figure 28 : Schéma général de production de granulats recyclés. [16]

II.6.2. Plan d'assurance qualité du producteur (PAQ) – FTP. [17]

Étant donné l'hétérogénéité des déchets inertes destinés à la fabrication des matériaux recyclés, chaque producteur doit établir :

1) un PAQ (Plan d'assurance qualité) dans lequel sont décrits :

- Les procédures de tri avant recyclage ;
- Les prétraitements ;
- Les procédés d'élaboration ;
- Le plan de contrôle ;
- Le type et la qualité des matériaux élaborés.

2) des FTP (fiche technique produit) avec :

- Classification des matériaux ;
- Caractéristiques mécaniques ;
- Teneur en sulfates.

Le plan de contrôle devra être effectué pour chaque lot de fabrication.

La nature des contrôles porteront sur :

- Les paramètres de nature (granulométrie, teneur en fines, propreté) ;
- Les paramètres de comportement mécanique (LA, MDE) ;
- Les caractéristiques physico-chimiques (vérifier que les matériaux recyclés sont inertes).

Le plan de contrôle sera au minimum

Tableau 2 : Caractéristiques essentielles contrôlées.

Nature des contrôles	Normes essais	fréquence
granulométrie	NF EN 933-1	1/10j de production
Teneur en fines	NF EN 933-1	1/10j de production
Propreté	NF EN 933-9	1/mois
LA,MDE	NF EN 1097-1 et 2	2/an
Teneur en sulfates	XP P 18-581	4/an

II.6.3. Cout des matériaux recyclés : [16]

D'après les informations communiquées par les acteurs du BTP, les prix de vente pratiqués pour les graves recyclées sont inférieurs d'environ 30 % à ceux des matériaux naturels.

Cette diminution du prix s'explique par des étapes de concassage et de lavage moins nombreuses ainsi qu'un transport sur de plus courtes distances.

La répartition du coût pour les matériaux recyclés est la suivante :

- 10 à 20 % lié au tri ;
- 20 à 25 % lié au transport sur le lieu de traitement ;

- 60 à 65 % lié aux matériels utilisés pour la transformation (pelle, chargeur concasseur) ;
- 5 à 10 % lié au stockage et au rechargement.

Ces pourcentages ainsi que le prix d'une grave recyclé varient selon la qualité des matériaux à recycler et donc sur le besoin ou non d'avoir un tri fin (mécanique et / ou manuel). L'optimisation des phases de tri via une procédure stricte pour l'acceptation des déchets entrants sur les installations de recyclage peut permettre de diminuer le coût d'un grave recyclé.

II.6.4. Classification des granulats recyclés selon leurs classes granulaires

Cinq produits représentatifs de 80 à 90 % de la production actuelle de matériaux recyclés ont été retenus. [17]

Tableau 3 : Différents produits de granulats recyclés.

Type de granulat recyclé	Granularité maximale	Appellation guide
GR 0 M	D max < 150 mm	GR 0 mixte 0/150
GR 0 B		GR 0 béton 0/150
GR 1 M	D max < 80mm	GR 1 mixte 0/80
GR 1 B		GR 1 béton 0/80
GR 2 M	D max < 31.5 mm	GR 2 mixte 0/31.5
GR 2 B		GR 2 béton 0/31.5
GR 2 E		GR 2 enrobé 0/31.5
GR 3 M	D max < 20 mm	GR 3 mixte 0/20
GR 3 B		GR 3 béton 0/20
GR 4 M	D max < 20 mm	GR 4 mixte 0/20
GR 4 B		GR 4 béton 0/20

Avec :

M : grave recyclée mixte avec 30 % d'enrobés au maximum

B : grave recyclée béton avec au minimum 90 % de béton et au maximum 5 % d'enrobés

E : grave recyclée enrobé avec au minimum 80 % d'enrobés

Afin d'optimiser la valorisation du produit, le tri des matériaux doit permettre d'entrer dans les classes ci-avant, cependant pour la tranche des matériaux contenant entre 30 et 80 % d'enrobés une étude spécifique ou un retour d'expérience est nécessaire.

Les produits cités sont ceux que l'on trouve le plus couramment sur l'ensemble des centres de recyclage, cependant d'autres produits peuvent exister pour répondre à des besoins de chantier plus spécifiques : matériaux drainants, GNT recomposées, graves hydrauliques, etc....

II.7. Désignation et identification des matériaux [14]

Les granulats de débris recyclés sont désignés par leur sorte, leur classe granulaire d/D ou 0/D et éventuellement leurs caractéristiques supplémentaires selon l'exemple ci-dessous et dans le même ordre :

Tableau 4 : Exemple d'une désignation de granulat recyclé.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Concassé de débris de béton	0/31,5 G _{A85} G _{T_A10}	f ₅ F _{I30} C _{90/3} M _{B_F20} L _{A₃₅} C _{NR} S _{C_{NR}} M _{DE NR} A _{S_{NR}} S _{NR} V _{NR}	OS _{Pass}

Exemple de désignation d'un granulat recyclé selon la NBN EN 13242

- 1- Sorte de granulats de débris selon.
- 2- Granularité (dimensions 0/31,5 mm et type grave GA85) et catégorie de tolérances autour de la granularité (GTA10).
- 3- Indication de(s) caractéristique(s) complémentaire(s).
- 4- Éléments pouvant perturber les liants ou empierrement des mélanges hydrauliques, selon.
- 5- Identification complémentaire du fabricant.

Si un fabricant produit intentionnellement plusieurs granulats de caractéristiques différentes pour lesquels l'application des présentes prescriptions techniques amènerait à des désignations identiques, il doit les différencier par une identification complémentaire univoque qui fait partie intégrante de ces désignations.

En complément de la désignation ci-dessus, la liberté est laissée au fabricant de désigner autrement chaque produit, à savoir par son appellation courante (par ex. sorte, granularité et application selon cahier des charges type). Pour chaque produit, une fiche technique doit être établie.

A la demande du client, la fiche technique sera jointe à la livraison.

II.8. Caractéristiques générales

Le contrôle des caractéristiques générales est obligatoire, quel que soit l'application ou l'exigence de l'utilisateur.

II.8.1. Composition – Sorte de granulat de débris

La classification des granulats de débris en fonction de leur composition est obtenue selon tableau 4.

Les granulats ne peuvent contenir d'éléments dont la nature, la forme, la dimension et la teneur peuvent être nuisibles à l'usage, tels que : grumeaux d'argile, charbon, lignite, coques, matières végétales, sels nuisibles solubles ou insolubles, schistes noir charbonneux, briques réfractaires,etc.

En outre, les granulats ne peuvent pas contenir d'éléments interdits par la législation en vigueur, comme par exemple l'amiante-ciment...

II.9. Caractéristiques relatives à la granulométrie

Suivant l'application, la granularité et la catégorie de tolérances autour de la granularité sont données par le fabricant conformément aux prescriptions des normes NBN EN 12620 et NBN EN 13242.

A côté des exigences minimales prévues dans ces normes, le fabricant peut ajouter un ou plusieurs tamis et définir pour ceux-ci des limites complémentaires. Le contrôle est réalisé selon la NBN EN 933-1.

II.9.1. Teneur en constituants réduisant la vitesse de prise et de durcissement des mélanges traités aux liants hydrauliques

Les granulats peuvent contenir des constituants qui risquent d'affecter les processus de prise et de durcissement des mélanges traités aux liants hydrauliques lorsqu'ils sont présents dans certaines proportions.

La présence de ces éléments dans les granulats est évaluée en 3 étapes :

1. En premier lieu on peut déterminer dans quelle mesure des éléments organiques sont présents dans les granulats au moyen du test NaOH décrit selon NBN EN 1744-1. Si le liquide surnageant de l'essai prend une couleur plus claire que la couleur standard, les granulats peuvent être considérés comme ne comportant pas d'éléments organiques et sont désignés par **OSPass**.

Dans le cas contraire, on doit passer à une seconde procédure d'essai.

2. Il s'agit du test à l'acide fulvique comme décrit au NBN EN 1744-1.

Pour cet essai également, si le liquide surnageant de l'échantillon testé prend une couleur plus claire que la couleur standard, les granulats peuvent être considérés comme ne comportant pas d'éléments organiques. Dans ce cas également, ils sont désignés par **OSPass**.

Si ce n'est pas le cas, on doit procéder à un troisième essai.

3. Dans cette troisième étape, on ne s'occupe plus spécifiquement de la présence et de la concentration en éléments organiques des granulats, mais plutôt de l'effet de ces éléments sur les processus de prise et de durcissement du ciment. Pour évaluer ce risque, l'effet des éléments organiques présents dans les granulats sur le temps de prise et sur la résistance en compression peut être déterminé la NBN EN 1744-1.

Afin que les granulats puissent être désignés par **OSPass**, la teneur en éléments perturbateurs de prise et durcissement doit être limitée à des quantités :

a. qui ne provoquent pas d'augmentation du temps de prise d'éprouvettes de mortier de plus de 120 minutes ;

b. qui ne provoquent pas de diminution de plus de 20 % de la résistance en compression.

Si les granulats recyclés satisfont à ces conditions, ils sont désignés par **OSPass**.

Si ces conditions ne sont pas respectées, les granulats sont désignés par **OSFail**.

Les granulats sont désignés par un des symboles **OSPass** ou **OSFail**.

II.10. Prescriptions complémentaires

Lorsque cela est exigé, les caractéristiques générales peuvent être complétées par une ou plusieurs des caractéristiques complémentaires suivantes :

II.10.1. Forme des pierres

La forme des pierres est déterminée selon la norme NBN EN 933-3 (coefficient d'aplatissement).

NOTE : dans les tableaux ci-dessous, « x » signifie que la catégorie est prévue dans la norme concernée.

Tableau 5 : Catégories des valeurs maximales du coefficient d'aplatissement.

Coefficient d'aplatissement	Catégorie FI	NBN EN 12620	NBN EN 13242
≤ 15	FI ₁₅	x	-
≤ 20	FI ₂₀	x	x
≤ 35	FI ₃₅	x	x
≤ 50	FI ₅₀	x	x
> 50	FI _{déclaré}	x	x
Pas d'exigence	FI _{NR}	x	x

II.10.2. Teneur en pierres rondes

La teneur en pierres rondes est déterminée selon la norme NBN EN 933-5.

Tableau 6 : Catégories pour la teneur en pierres rondes.

Teneur en pierres concassées %	Teneur en pierres rondes	Catégorie C	NBN EN 13242
90 tot 100	0 tot 3	C _{90/3}	x
50 tot 100	0 tot 10	C _{50/10}	x
50 tot 100	0 tot 30	C _{50/30}	x
-	0 tot 50	C _{NR/50}	x
-	0 tot 70	C _{NR/70}	x
Valeur déclarée	Valeur déclarée	C _{déclaré}	x
Pas d'exigence	Pas d'exigence	C _{NR}	x

II.10.3. Teneur en coquillages

La teneur en coquillages est déterminée selon la norme NBN EN 933-7.

Tableau 7 : Catégorie pour la teneur en coquillages.

Teneur en coquillage (%)	Catégorie SC
≤ 10	SC10
> 10	SC Déclaré
Pas d'exigence	SCNR

II.10.4. Teneur en fines

La teneur en fines doit satisfaire aux exigences prévues dans les normes NBN EN 12620 et NBN EN 13242. Elle est déterminée selon la NBN EN 933-1.

II.10.5. Qualité des fines

La qualité des fines est déterminée selon la norme NBN EN 933-9.

Tableau 8 : Catégories des valeurs maximales de bleu de méthylène.

Valeur de bleu de méthylène (g/kg)	Catégorie MB _F
≤ 10	MB _F 10
≤ 15	MB _F 15
≤ 20	MB _F 20
≤ 25	MB _F 25
≥ 25	MB _F déclaré
Pas d'exigence	MB _F NR

II.10.6. Résistance à la fragmentation

La résistance à la fragmentation est déterminée selon la norme NBN EN 1097-2.

Tableau 9 : Catégories des valeurs maximales du Los Angeles.

Coefficient Los Angeles	Catégorie LA	NBN EN 12620	NBN EN 13242
≤ 15	LA ₁₅	X	-
≤ 20	LA ₂₀	X	X
≤ 25	LA ₂₅	X	X
≤ 30	LA ₃₀	X	X
≤ 35	LA ₃₅	X	-
≤ 40	LA ₄₀	X	X
≤ 50	LA ₅₀	X	X
> 50	LA _{déclaré}	X	-
≤ 60	LA ₆₀	-	X
> 60	LA _{déclaré}	-	X
Pas d'exigence	LA _{NR}	X	X

II.10.7. Résistance à l'usure

La résistance à l'usure est déterminée selon la norme NBN EN 1097-1 - micro-Deval.

Son coefficient MDE, est indiqué par l'une des catégories du tableau 10.

Tableau 10 : Catégories des valeurs maximales du coefficient micro-Deval.

Coefficient micro-Deval	Catégorie M _{DE}	NBN EN 12620	NBN EN 13242
≤ 10	M _{DE} 10	X	-
≤ 15	M _{DE} 15	X	-
≤ 20	M _{DE} 20	X	X
≤ 25	M _{DE} 25	X	X
≤ 35	M _{DE} 35	X	X
≥ 35	M _{DE} déclaré	X	-
≤ 50	M _{DE} 50	-	X
> 50	M _{DE} déclaré	-	X
Pas d'exigence	M _{DE} NR	X	X

II.10.8. Masse volumique réelle

La masse volumique réelle des granulats est déterminée selon la norme NBN EN 1097-6.

Lorsqu'elle est exigée, la masse volumique réelle est renseignée au niveau de la fiche technique.

II.10.9. Absorption d'eau

L'absorption d'eau est déterminée selon la norme NBN EN 1097-6.

Lorsqu'elle est exigée, l'absorption d'eau maximum est renseignée au niveau de la fiche technique.

II.10.10. Résistance au gel-dégel

La résistance au gel-dégel est déterminée selon les normes et méthodes reprises dans les normes NBN EN 12620 et NBN EN 13242 et est, lorsqu'elle est exigée, indiquée en catégories selon les normes NBN EN 12620 ou NBN EN 13242.

II.10.11. Teneur en sulfates solubles dans l'acide

Les granulats sont classés en classes selon leur teneur en sulfates solubles dans l'acide déterminée selon les prescriptions de la NBN EN 1744-1.

Tableau 11 : Spécifications relatives à la teneur en sulfates.

Teneur en SO ₃ , en % de la masse des granulats	Catégorie AS
≤ 0,2	AS _{0,2}
≤ 0,8	AS _{0,8}
≤ 1,0	AS _{1,0}
> 1,0	AS _{déclaré}
Pas d'exigence	AS _{NR}

II.10.12. Teneur totale en soufre

Les granulats sont classés en classes selon leur teneur totale en soufre déterminée selon les prescriptions de la NBN EN 1744-1.

Les granulats sont désignés, par une des catégories du tableau 12.

Tableau 12 : Spécifications relatives à la teneur en soufre.

Teneur en soufre (S) en % de la masse des granulats	Catégorie S
≤ 1,00	S ₁
≤ 2,00	S ₂
> 2,00	S _{déclaré}
Pas d'exigence	S _{NR}

II.10.13. Stabilité volumétrique

La stabilité volumétrique est déterminée selon les prescriptions de la norme NBN EN 1744-1.

Les granulats sont désignés, par une des catégories du tableau 13.

Tableau 13 : Spécifications relatives à la stabilité dimensionnelle.

Expansion volumique Pourcentage en volume	Catégorie V
≤ 5	V ₅
≤ 7,5	V _{7,5}
≤ 10	V ₁₀
> 10	V _{déclaré}
Pas d'exigence	V _{NR}

II.10.14. Teneur en ions chlore

Lorsqu'elle est exigée, pour les applications selon la NBN EN 12620, la teneur en ions chlore est déterminée selon les prescriptions de la norme NBN EN 1744-1.

La teneur maximale en ions chlore est renseignée au niveau de la fiche technique.

II.11. Domaine d'utilisation de granulats recyclés

A l'heure actuelle, l'emploi de granulats recyclés n'est pas vraiment divers, les principaux domaines sont cités au tableau, 14, 15, et la figure 35. [2]

❖ Structure routière

Les chaussées se présentent comme des structures multicouches figure 29, qui sont mises en œuvre pour répartir les charges induites par le trafic que le sol support seul ne pourrait pas soutenir.

La structure complète comprend :

- le sol support ;
- la couche de forme qui protège le sol support pendant les travaux, permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques des matériaux de remblais ou du terrain en place et de les protéger du gel ;
- les couches d'assise (couche de fondation + couche de base) qui sont constituées de matériaux élaborés (le plus souvent liés pour les chaussées à trafic élevé) qui doivent répartir les contraintes de pression dues au trafic dans les limites admissibles au niveau de la plate-forme support ;
- les couches de surfaces (couche de liaison + couche de roulement) qui subissent directement les actions du trafic.

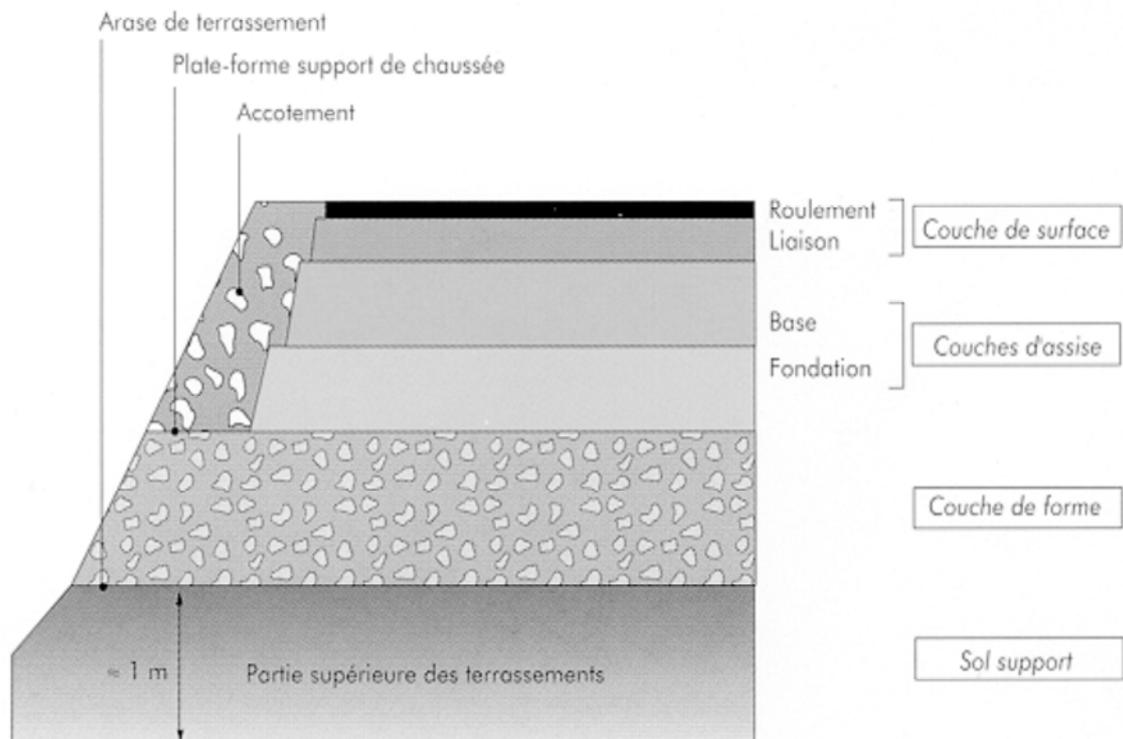


Figure 29 : Schéma d'une coupe de chaussée. [2]

1. Application en sous-fondation de voirie

Utilisation de granulats recyclés (béton / mixtes / hydrocarbonés) pour la réalisation de chemins d'accès aux habitations, lotissements... [2]



Figure 30 : Sous fondation de chaussées.

2. Application en fondation, sous-fondation et fondation d'infrastructures sportives



Figure 31 : Couche de fondation.

3. Application en fondation et sous-fondation de bâtiments industriels et de services

Utilisation en intérieur (empierrement de propreté...) et en extérieur (réalisation des parkings).



Figure 32 : Couche de fondation d'un hangar.

4. Application en construction : Exemples d'un voile de béton



Figure 33 : Voile de béton recyclé.

5. Utilisation détournée – Eléments de parement

Outre l'utilisation de matériaux en réutilisation directe, ou de matériaux issus d'un processus de recyclage, il est possible de développer une conception architecturale et technique s'inscrivant dans une démarche de récupération et de réutilisation directe de déchets valorisable.

C'est par exemple le cas du projet présenté ci-après pour lequel l'architecte a valorisé les déchets de briques et de béton issus de la démolition partielle (déchets inertes du bâtiment) pour la fabrication de panneaux d façade rapportés sur la structure du bâtiment rénové. [2]



Figure 34 : Schéma représentatif d'une réutilisation directe de déchets de démolition. [2]

II.11.1. Résumé de différents domaines d'utilisation de granulats recyclés [16]

Tableau 14 : Domaines d'emploi préconisés pour chaque matériau.

Produit	DOMAINES ET PRECAUTIONS D'EMPLOI
GR0M GR0B	Remblais généraux, remblais des fouilles, couches de forme.
GR1M GR1B	Remblais généraux, remblais des fouilles, couches de forme, poutre de rive. Précautions d'emploi : Maitrise de la teneur en eau ; Vérification de l'agressivité des matériaux si besoin.
GR2M GR3M GR4M	Couche de base ou couche de fondation, couche de réglage, sous trottoirs, accotement, etc... Précaution d'emploi : Maitrise de la teneur en eau.
GR2B GR3B GR4B	Couche de base ou couche de fondation, couche de réglage, sous trottoirs, accotement, etc... Précautions d'emploi : Maitrise de la teneur en eau.
GR2E	Couche de réglage, sous voiries piétonne, ou voiries à faible trafics. Précaution d'emploi : usage doit être limité aux couches de faible épaisseur (10cm).
Scalpage	Remblais généraux, remblais des fouilles. Précaution d'emploi : maitrise de la teneur en eau.

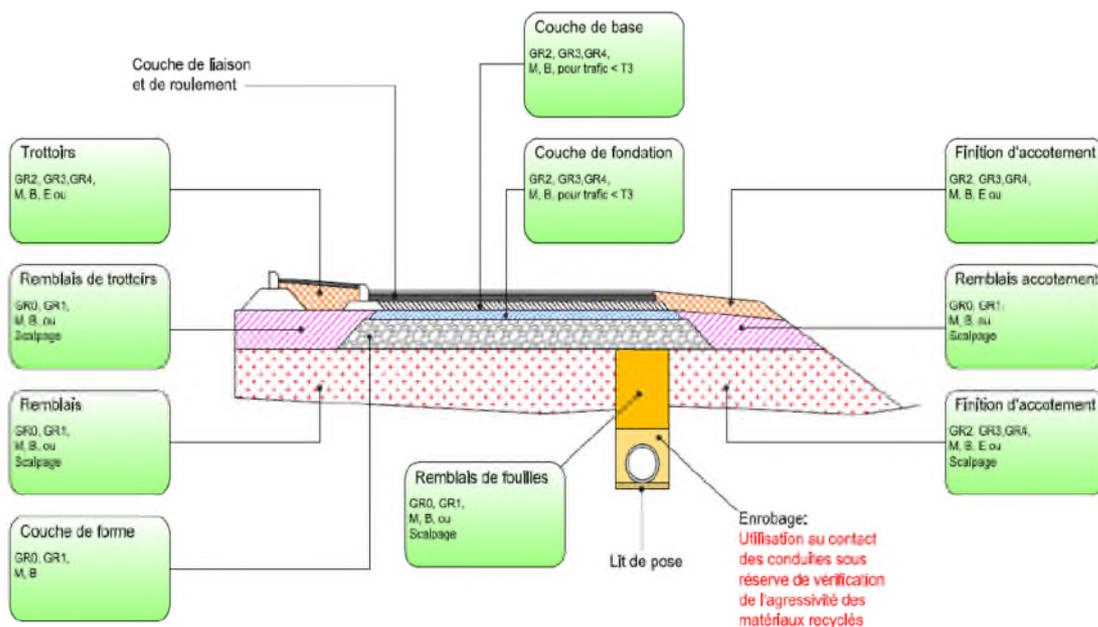


Figure 35 : Différentes couches dont les granulats recyclés sont utilisés. [17]

II.11.2. Précaution d'emploi ou particularités

a. Mise en œuvre

La mise en œuvre des graves de bétons concassés s'apparente à une mise en œuvre classique (niveleuse, compacteur, couche de protection).

Cependant, des spécificités de mise en œuvre liées à la qualité intrinsèque du matériau, sont à prendre en compte :

De manière générale, ces produits ont souvent une teneur en eau à la fabrication assez faible, inférieure à la teneur en eau optimum. Comme tout matériau, il convient donc d'amener la teneur en eau de ces matériaux à une teneur en eau proche de la teneur en eau optimum.

La difficulté particulière est, du fait de la porosité des matériaux, qu'une quantité importante d'eau est absorbée lentement par les granulats et ne sert pas directement à la maniabilité du matériau.

Il a une moindre résistance mécanique à la fragmentation (coefficient LA parfois > 40), de ce fait, il faut éviter les compacteurs trop puissants, qui entraînent un farinage du niveau de la surface avec une remontée d'éléments fins, il y a deux corollaires à ce problème de farinage :

- Lors de temps pluvieux notamment en hiver, il y a création d'une crème en surface qui vient polluer le matériau s'il est circulé ;
- Lors de temps trop sec, cela entraîne des problèmes de collage des enduits de protection, il est rappelé que les enduits de protection doivent être appliqués sur un support humide, Ne pas hésiter à arroser avant l'application de l'émulsion de bitume.

Il convient de réaliser une planche d'essais préalablement aux travaux, afin de valider : la qualité des matériaux, leur état hydrique, les conditions de mise en œuvre, ainsi que les performances à obtenir. [16]

Remarque

L'emploi de matériaux GR2 E est à réserver en couches de faible épaisseur (couche de réglage sous trottoir, parking ou voirie à faible trafic).

Il faut noter également que la meilleure utilisation des GR2 E est la valorisation en recyclage à chaud dans la production de nouveaux enrobés, lorsque les outils industriels le permettent.

b. Agressivité par rapport aux ouvrages

Dans le cas d'utilisation des matériaux recyclés au contact d'ouvrages béton, d'ouvrages métalliques (canalisations fontes ou acier, buses métalliques, palplanches), ou de terre armée, il est indispensable de vérifier l'agressivité des produits conformément aux normes NF EN 206-1 et A 05-252.

c. Emploi sous bâtiment :

Interdit sous dallage suivant la norme NF P 11-213.

d. Environnement

Les matériaux de démolition recyclés ne présentent pas de risque pour l'environnement.

II.11.3. Normes exigées pour l'utilisation dans le domaine des routes

Tableau 15 : Exigences d'utilisations des granulats dans les chaussées. [17]

catégorie	GR0	GR1	GR2	GR3	GR4
Utilisations	Remblais et couche de forme		Assises de chaussées		
références	NF P 11300		NF EN 13242 / NF EN 13285/ NF P 18545		
Paramètres de fabrication					
granularité	D _{max} ≤ 150mm	D _{max} ≤ 80	0/31.5	0/20	0/20
Teneur en fines		f ≤ 12	2 < f < 12	2 < f < 12	2 < f < 12
propreté		MB ≤ 0,2	MB ≤ 3 ES ≥ 40	MB ≤ 2.5 ES ≥ 50	MB ≤ 2.5 ES ≥ 50
Caractéristiques intrinsèques					
Los Angeles		LA ≤ 45	LA ≤ 45	LA ≤ 40	LA ≤ 35
Micro Deval		MDE ≤ 45	MDE ≤ 45 LA+MDE ≤ 80	MDE ≤ 35 LA+MDE ≤ 65	MDE ≤ 30 LA+MDE ≤ 55
Caractéristiques physico-chimiques					
Teneur en sulfates solubles	≤ 1,3	≤ 0,7	≤ 0,7	≤ 0,7	≤ 0,7
<ul style="list-style-type: none"> • Les essais LA et MDE ne sont pas adaptés aux graves recyclés d'enrobés ; • Les enrobés seront en priorités orientés vers une filière de recyclage pour incorporation dans la fabrication de matériaux bitumineux routiers ; • Le GR0M et le GR1M seront respectivement composés au minimum de 40% en poids d'enrobés ; • Le GR0B et GR1B seront composés au minimum de 90% en poids de béton. 					

II.12. Avantage du recyclage

Le recyclage des granulats sur les chantiers routiers et la réutilisation des matériaux sur place dans les chantiers de démolition de bâtiments permet :

- Une économie de la ressource naturelle ;
- Une réduction du transport des matériaux, donc une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre ;
- Une mise en œuvre rapide minimisant la gêne pour les habitants ;
- La réduction des quantités de matériaux mis en décharge.

L'allongement constaté des distances de transport pèse sur le coût des matériaux et augmente l'impact sur l'environnement.

Dans un écobilan comparatif, l'avantage revient évidemment aux granulats recyclés traités en milieu semi-urbain proche du gisement et des clients. Leur utilisation évite en effet d'une part un transport de matériaux de démolition vers les décharges et d'autre part un transport d'approvisionnement du chantier en granulats depuis une carrière.

La diminution importante de ces transports représente des gains importants en émissions de CO₂.

II.13. Conditions du développement du recyclage

- La condition indispensable au bon fonctionnement du circuit déconstruction-recyclage tient dans la proximité entre les plates-formes de traitement et les lieux de consommation ;
- Outre l'avantage environnemental, la proximité est également une condition indispensable de la compétitivité des granulats recyclés ;

Il faut donc pouvoir installer de nouveaux centres de recyclage dans les zones urbaines. Or, de tels projets se heurtent fréquemment à l'opposition des riverains. Le problème de l'acceptabilité est l'obstacle numéro un au développement actuel du recyclage.

✓ Autre condition à remplir : il faut déconstruire davantage, c'est-à-dire ne pas se contenter de démolir des bâtiments, mais trier sur place avec soin les différents matériaux ;

Dans le cas contraire, le coût de production des granulats recyclés s'élevant, ces matériaux ne peuvent être compétitifs par rapport aux matériaux naturels.

✓ Ensuite, il faut convaincre les maîtres d'ouvrage de donner la préférence aux granulats recyclés, ce qui suppose au préalable d'ouvrir les appels d'offre à ces produits. C'est donc là une évolution des mentalités dont il s'agit.

Pour développer l'incorporation de granulats recyclés dans la fabrication des bétons, reste à démontrer scientifiquement que ces matériaux ont les qualités techniques requises. Des études sont menées actuellement en ce sens.

Le développement de l'activité de recyclage suppose aussi une meilleure connaissance statistique du marché.

II.14. Différents contaminants existants dans les matériaux de recyclages

Béton concassé [18]

Le béton concassé est un matériau qui provient du démantèlement de structures comme des routes, viaducs, bâtiments résidentiels, commerciaux, industriels, bassins, fosses, etc.

Il est donc possible d'être en présence :

- a. De contaminants inorganiques (métaux et métalloïdes) en provenance de la matière première (granulaire naturel, matières résiduelles non dangereuses, ciment), d'enduits ou d'activité industrielle ;
- b. De contaminants organiques en provenance d'enduits, de déversements ou d'activités industrielles ;
- c. D'additifs à la formulation du béton pour atteindre certaines propriétés recherchées lors de la première utilisation (ex. : résistance à l'eau et à l'abrasion) qui peuvent influencer le comportement du béton lors de la valorisation ;
- d. D'amiante dans certaines formulations de béton ;
- e. D'un pH élevé en raison de la présence d'ions hydroxyles contenus dans la pâte de ciment.

Brique

La brique est un matériau qui provient du démantèlement de bâtiments résidentiels, commerciaux, industriels, etc.

Il est donc possible d'être en présence :

- ✓ De contaminants inorganiques (métaux et métalloïdes) en provenance de la matière première (granulaire naturel, matières résiduelles non dangereuses, ciment), d'enduits ou d'activités industrielles ;
- ✓ De contaminants organiques en provenance d'enduits, de déversements ou d'activité industrielle.

Les briques réfractaires ne sont pas incluses, car elles sont des résidus industriels.

Asphalte

L'asphalte est un matériau qui provient du démantèlement de routes, d'aires d'entreposage ainsi que de stationnements privés, commerciaux ou industriels.

Il y aura toujours présence :

- ✓ De composés organiques en raison du liant utilisé dans sa formulation.

Les concentrations en contaminants organiques peuvent être élevées. Lorsque l'asphalte est utilisé pour le revêtement de la chaussée, ce matériel est consolidé, ce qui limite la mobilité des composés organiques. Par contre, la mobilité et la disponibilité pour l'écosystème de ces composés augmentent lorsque les particules de revêtement ne sont plus liées, ce qui est précisément le cas pour les utilisations envisagées, car le matériel remplacera des granulats ;

- ✓ De contaminants inorganiques (métaux et métalloïdes) en provenance de la matière première (granulat naturel ou matières résiduelles non dangereuses), d'enduits ou d'activités industrielles ;
- ✓ D'amiante dans certaines formulations.

Résidu du secteur de la pierre de taille

Les résidus du secteur de la pierre de taille sont constitués de croûtes et de retailles contenant ou non polymère de type époxyde, formé de résine et d'un durcisseur dont la réaction est complétée, ainsi que de boues décantées et épaissies issues des bassins de décantation du secteur de la pierre de taille.

Pour les croûtes et les retailles, il est possible d'être en présence :

- ✓ De contaminants inorganiques (métaux et métalloïdes) en provenance de la matière première ;
- ✓ De contaminants organiques s'il y a utilisation de résine.

Pour les boues décantées et épaissies issues des bassins de décantation, il est possible d'être en présence :

- De contaminants inorganiques (métaux et métalloïdes) en provenance de la matière première, des abrasifs de polissage, de la matrice de segments diamantés des scies, d'acier ou d'ajout de chaux ;
- De contaminants organiques s'il y a utilisation de résine.

II.15. Conclusion

L'utilisation des granulats recyclés en construction routière est prometteuse.

La volonté de contrôler la qualité durable des matériaux mis en œuvre sur les chantiers public pose deux questions :

La définition des caractéristiques des matériaux en fonction de leur utilisation était relativement bien adaptée aux matériaux naturels mais rien ne prouve aujourd'hui que ces caractéristiques soient pertinentes pour les matériaux issus du recyclage. De même, les critères établis risquent de ne pas être adaptés aux matériaux recyclés.

Un effort de recherche est nécessaire pour définir de nouvelles propriétés et de nouveaux critères.

Des outils performants permettant de quantifier certains comportements granulaires sont actuellement développés mais la trop faible disponibilité des résultats ne permet pas d'en tirer la moindre conclusion.

Le coût des analyses et des contrôles sur les matériaux recyclés risque d'être plus important que celui des matériaux naturels avec la conséquence d'un rééquilibrage de prix entre les matériaux recyclés et naturels.

Des incitants sont dès lors nécessaires pour favoriser le choix de matériaux recyclés, qui, par ailleurs, présentent un risque d'hétérogénéité plus important, avec un potentiel de réduction de la qualité.

Pour garantir un bel avenir aux recyclés, la seule solution est de monter le niveau de qualité de ces matériaux, par l'utilisation des techniques les plus performantes de tri et de regroupement.

Une recherche sur les propriétés fondamentales des comportements granulaires doit permettre une définition plus rationnelle des analyses, sans grever le prix des matériaux recyclés, au risque de voir un désintéressement du recyclage pour des raisons purement économiques, ce qui serait une catastrophe du point de vue écologique.

**CHAPITRE III : MISE EN ŒUVRE EXPERIMENTALE ET TECHNIQUE
D'ANALYSES**

III.1. Introduction

Le terme agrégats, utilisé pour désigner les granulats, est donc impropre, en effet, un agrégat est un assemblage hétérogène de substances ou éléments qui adhèrent solidement entre eux (le mortier ou le béton par exemple).

Le terme granulat, au singulier, désigne un ensemble de grains d'un même type, quel que soit le critère de classification utilisé. Le terme granulats, au pluriel, sera utilisé pour désigner un mélange de grains de divers types.

Les granulats utilisés dans les travaux de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et des caractéristiques propres à chaque usage. Les granulats constituent le squelette du béton et ils représentent, dans les cas usuels, environ 80 % du poids total du béton.

Les granulats sont nécessaires pour la fabrication des bétons, du point de vue économique, car ils permettent de diminuer la quantité de liant qui est plus cher, du point de vue technique, car ils augmentent la stabilité dimensionnelle (retrait, fluage) et ils sont plus résistants que la pâte de ciment. Il faut, par conséquent, augmenter au maximum la quantité de granulats, en respectant toutefois les deux conditions suivantes :

- Les granulats doivent satisfaire certaines exigences de qualité ;
- La qualité de pâte liante doit être suffisante pour lier tous les grains et remplir les vides.

Les essais effectués au laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux, ceux-ci devant permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel on a fait le prélèvement.

III.2. Matériaux utilisés

Dans cette étude nous avons utilisés deux types de granulats

- Les granulats naturels : provenant de gisement d'ADRAR OUFARNOU wilaya de Bejaia.
- Les granulats recyclés : les granulats recyclés sont préparés au niveau de notre laboratoire par concassage de béton et séparation par l'opération de tamisage selon chaque fraction que l'on souhaite sans lavage.

III.2.1. Provenance des échantillons

1. Granulats naturels

Notre échantillon de granulats naturels provient de la carrière d'ADRAR OUFARNOU, wilaya de Bejaia (entreprise ALGRAN-unité Bejaia), et son étude est faite au niveau de leur laboratoire.

2. Granulats recyclés

Le lieu de prélèvement se situe à Targa Ouzemour, commune de Bejaia, wilaya Bejaia, plus exactement aux beaux quartiers, entre l'université A.MIRA Bejaia (Targa Ouzemour), et le stade magrébin.

L'origine de notre échantillon de granulats recyclés est un ancien béton réalisé par l'entreprise EBC dans les années 1990, pendant la réalisation du stade de l'union magrébin.

Ce béton était le résultat de démolition des silos de la centrale à béton qui a servi ce projet en béton.

III.3. Programmes expérimentales

Notre travail expérimentale vise à étudier les caractéristiques des granulats recyclés, et les comparer à celles des granulats naturels.

Les caractéristiques étudiées dans notre travail sont :

- Granularité (l'analyse granulométrique), module de finesse, et coefficient d'aplatissement ;
- Coefficient d'absorption d'eau ;
- Teneur en eau ;
- Equivalant de sable ;
- Essai au bleu de méthylène ;
- Masse volumique absolue et apparente ;
- Résistance à la fragmentation (essai los Angeles) ;
- Analyse par diffraction aux rayons X ;
- Détermination des chlorures solubles dans l'eau ;
- Résistance à la compression du béton.

III.3.1. Prélèvement des échantillons [19]

En général le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps :

- a. Prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai.

Lorsqu'il n'est pas possible de prendre tout le tas et de le réduire, on procède à un prélèvement local.

Pour notre cas, nous avons pris deux prélèvements, qui sont :

- **Echantillon de granulats naturels**

Qui s'est fait de la manière suivante :

- a) à la main, à l'aide d'une pelle.
- b) à la main, sur tas d'éléments grossiers (gravier concassé) par ratissage dans un récipient.
- c) au moyen d'une sonde, ouverture 4 à 6 cm, longueur 60 à 100 cm, extrémité taillée en sifflet.

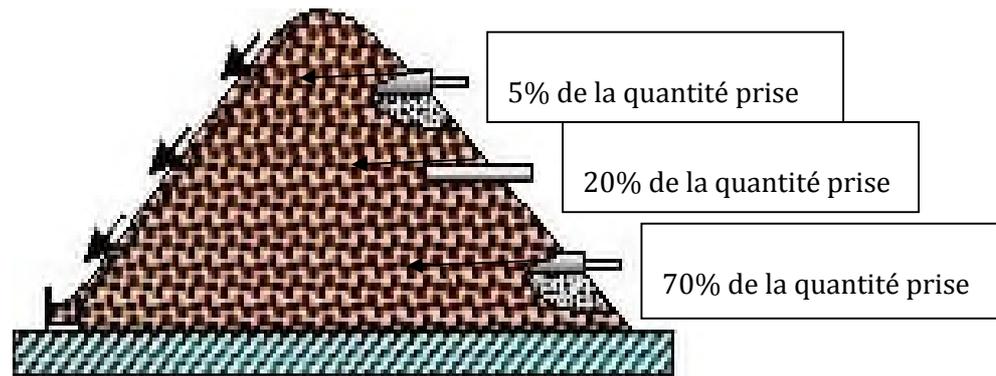


Figure 36 : Prélèvement d'échantillon en tas.

- **Echantillon de granulats recyclés** : Qui est prélevé à l'aide d'un marteau piqueur tout le long du voile de béton démolis (comme le montre la figure 37). La quantité d'échantillon à prélevés doit être supérieure aux quantités cumulées des essais à faire, pour notre cas, on a estimé qu'on aura besoin d'environ 60Kg.



Figure 37 : Lieu de prélèvement d'échantillon.

- Au laboratoire, prélèvement de la quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ.

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur. L'échantillon doit être séché à l'étuve à 105 °C s'il est exempt de minéraux argileux, ce qui est rare, ou à 60 °C dans le cas contraire.

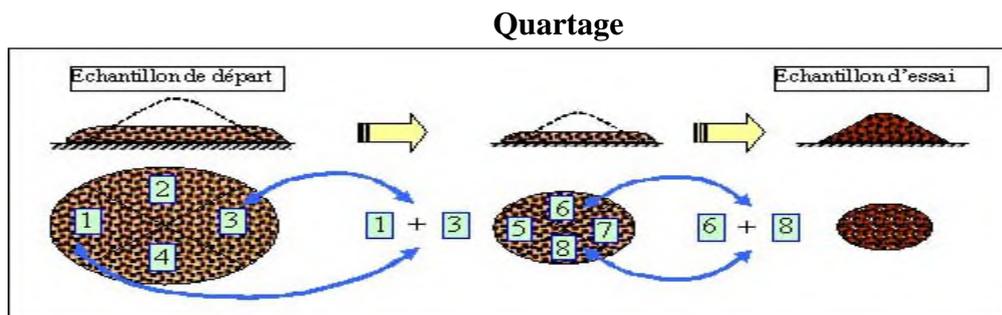


Figure 38: Opération de quartage.

Echantillonneur

Cet appareil de laboratoire figure 39, permet de diviser facilement en deux parties représentatives la totalité d'un échantillon initial, chaque moitié étant recueillie dans un bac de manière séparée.

La répétition en cascade de cette opération, en retenant à chaque opération le contenu de l'un des bacs, permet d'obtenir l'échantillon nécessaire, après trois ou quatre opérations identiques.



Figure 39 : Diviseur à couloir.

III.3.2. Préparation mécanique et échantillonnage

Avant de procéder à une analyse quelconque d'un matériau, celui-ci subit un traitement mécanique qui représente la phase la plus délicate pour obtenir un échantillon représentatif.

Pour atteindre ce but, nous appliquons les différents procédés mécaniques suivants :

III.3.2.1. Séchage

Séchage des échantillons à l'air ambiant jusqu'à ce qu'ils soient secs (2 à 5 jours).

III.3.2.2. Concassage

Le concassage est un traitement mécanique qui sert à réduire le diamètre des grains des matières premières à un diamètre inférieur, grâce à un concasseur de type FRITSCH, le diamètre des grains subit une réduction jusqu'au environ 2 mm.

Selon les dimensions maximales des morceaux à concasser, on distingue les stades de concassage suivant :

- Concassage grossier de 400 à 150 mm ;
- Concassage intermédiaire de 150 à 20 mm ;
- Concassage fin de 20 à 2 mm.

But de concassage

- Exécuter le procédé de concassage des matériaux granulaires ;
- Apprendre la construction d'un concasseur, son principe de fonctionnement et son réglage.

Objectif de concassage : Ce mode de préparation peut avoir plusieurs objectifs :

- Diminuer la taille des éléments pour satisfaire au fuseau granulométrique imposé par l'utilisation ;
- Libérer des composants indésirables ;
- Activer certaines propriétés physico-chimiques utiles à la mise en œuvre ;
- Enfin, concassage, peut être utilisé pour augmenter la surface réactive des résidus solides ou pour libérer des constituants réactifs améliorant les qualités physico-chimiques des produits.



Figure 40 : Concasseur de type Fritsch.



(A)

(B)

Figure 41 : Échantillon, (A) avant le concassage, (B) après le concassage.

Conclusion

A partir de cette expérience sur le concassage, on conclue que ce procédé, est très utile et très important soit à l'échelle industrielle, soit à l'échelle de laboratoire, car il permet la réduction de la matière première selon un taux de réduction désiré.

Comme il peut être utilisé pour augmenter la surface réactive des résidus solides ou pour libérer des constituants réactifs améliorant les qualités physico-chimiques des produits.

III.3.2.3. Récupération des granulats

Après le procédé de concassage, on a séparés notre échantillon en quatre fractions (0/3, 3/8 8/15, 15/25), comme le montre la figure 42, à l'aide des tamis suivants :

- Un tamis d'ouverture de 4 mm pour récupérer le sable ;
- Un tamis d'ouverture de 8 mm pour récupérer le gravier fraction 3/8 ;
- Un tamis d'ouverture de 16 mm pour récupérer le gravier fraction 8/15 ;
- Un tamis d'ouverture de 25 mm pour récupérer le gravier fraction 15/25.



Figure 42 : Déférentes fractions granulaires récupérées.

Schématisation du processus de préparation

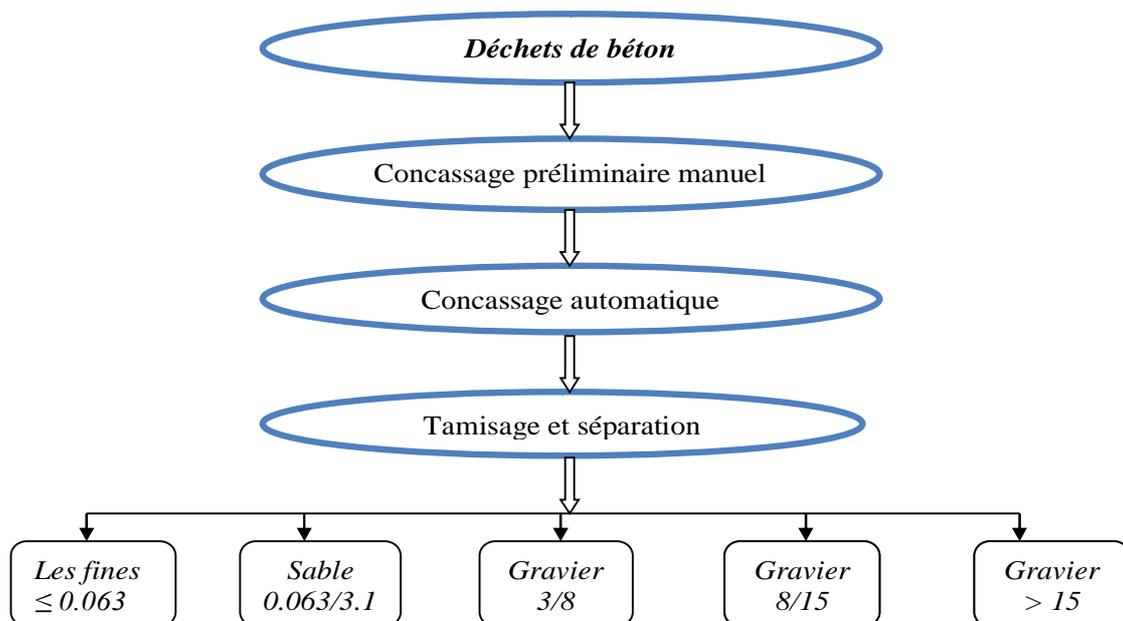


Figure 43 : Différentes étapes de préparation.

Remarque

Pour les étapes qui suivent, et pour chaque essai, les deux types de granulats sont utilisées (naturel et recyclé).

III.3.2.4. Division et échantillonnage aux laboratoires

Dans toutes les étapes qui suivent, chaque essai se fera pour deux échantillons, un naturel et un autre recyclé.

a). Échantillonnage

Après les récupérations des différentes fractions de notre échantillon on les homogénéise et on effectue la division pour récupérer un échantillon représentatif à analyser.

b). Homogénéisation et division

La division est une opération indispensable pour une meilleure représentativité de l'échantillon.

Avant cette opération, il est nécessaire de procéder à une homogénéisation qui est un procédé mécanique qui consiste à mélanger l'échantillon de sol et le rendre homogène, par division successive de l'échantillon. C'est une opération de réduction de poids de l'échantillon pour l'analyser.

Pour le cas du sable, on ne se contente pas de la division, mais on effectue aussi le procédé de quartage, dont on prélève deux quarts opposés, les deux autres quarts seront ainsi gardés comme témoins.

C'est une autre opération de réduction de poids de l'échantillon pour l'analyser, comme le montre la figure 38.

Ce procédé obéit à la loi de RECHARDSE qui exprimée par la relation :

$$Q_i \geq kd^2$$

$$m \leq Q_i / kd^2$$

$$m = 2^n$$

Avec :

Q_i : masse initiale à quarter ;

m : masse déterminant le nombre de quartage, utilisée comme moyen de vérification ;

d : diamètre de plus gros grain ;

k : coefficient de répartition de la minéralisation (matériau hétérogène; $k = 0,1$) ;

n : nombre de quartage.

III.3.2.5. Tamisage

Le tamisage permet de séparer les matériaux en fonctions granulaires définies par la cote de la maille carrée du tamis.

En pratique, la détermination de la distribution granulométrique se fait par classement dimensionnel à travers une série de tamis (NF-ISO 3310-2) d'ouverture de mailles décroissantes.

La tamiseuse utilisée au cours de notre travail est celle du laboratoire de génie civil; illustrée dans la figure 44 est constituée des tamis d'ordre décroissant.

Principe

Le tamisage est l'une des plus anciennes méthodes d'analyse granulométrique, et aussi l'une des plus largement utilisées car elle est peu coûteuse. Elle sert à déterminer la distribution pondérale des particules d'un matériau suivant leurs dimensions et elle permet de séparer le matériau en fractions granulaires définies.

Son principe de base consiste à diviser un matériau pulvérulent en le faisant passer à travers un (ou plusieurs) tamis dont les caractéristiques sont connues.



Figure 44 : Tamiseuse.

III.3.2.5.1. Granularité et analyse granulométrique (NF EN 933-1). [20]

Introduction

Les granulats utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie civil sont des matériaux roulés ou concassés d'origine naturelle ou artificielle, de dimensions comprises entre 0 et 125 mm. Ils ne sont généralement pas constitués par des éléments de tailles égales mais par un ensemble de grains dont les tailles variées se répartissent entre deux limites: la plus petite (d) et la plus grande (D) dimension en mm.

L'objectif de notre essai est de faire une étude granulométrique dans le but de classer notre granulats.

Quelques définitions

- **Refus partiel** : C'est la quantité du sol retenu dans un tamis donné ;
- **Refus cumulé** : C'est la quantité (masse) de la somme de refus partiel d'un tamis considéré et les refus partiels de tous les tamis situés au-dessus ;
- **Tamisât cumulé** : C'est la différence entre la quantité totale de l'échantillon et le refus cumulé ;
- **Coefficient d'uniformité** : Il est noté par C_U tel que : $C_U = D_{60}/D_{30}$

Avec : D_{60} est le diamètre du tamis qui laisse passer 60% de l'échantillon.

D_{30} est le diamètre du tamis qui laisse passer 30% de l'échantillon.

D_{60} et D_{30} sont déterminés sur la courbe granulométrique.

- **Coefficient de courbure** : Il est noté par C_c tel que : $C_c = (D_{30})^2 / (D_{60} * D_{10})$

Avec : D_{10} est le diamètre du tamis qui laisse passer 10% de l'échantillon ;

- **Le module de finesse M_f** : Est une caractéristique importante surtout en ce qui concerne les sables. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse M_f compris entre 2,2 et 2,8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins à très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

Pour $1,8 < M_f < 2,2$ le sable est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.

Pour $2,2 < M_f < 2,8$ le sable est à utiliser si l'on recherche une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.

Pour $2,8 < M_f < 3,2$ le sable est à utiliser si l'on recherche des résistances élevées au détriment de l'ouvrabilité et avec des risques de ségrégation.

Pour **$M_f > 3,2$** le sable est à rejeter.

Principe

La granulométrie est l'étude de la répartition des éléments selon leur taille par tamisage, après avoir concassé les échantillons.

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

La granulométrie ou analyse granulométrique consiste donc à fractionner des granulats au moyen d'une colonne de tamis dont les dimensions des mailles sont normalisées et décroissantes du haut vers le bas entre 80 mm et 0,063 mm.

But de l'essai

Le principal but est de classer et de déterminer la nature d'un granulat étudié par une analyse granulométrique.

L'analyse granulométrique a trois buts :

- Déterminer les dimensions des grains ;
- Déterminer les proportions de grains de même dimension (% pondéral) ;
- Déduire le Module de finesse (M_f).

Matériels nécessaires

- Une machine à tamiser ;
- Une série de tamis conforme à la Norme NF EN 933-1 et NF X 11-504 ;
- Un couvercle qui évite la perte de matériau pendant le tamisage et un réceptacle de fond pour recueillir le dernier tamisât ;
- Des récipients en plastique ;
- Une main écope pour le remplissage ;

- Une balance de portée 16 kg, précision 1 g.

Matériaux utilisés

- Un échantillon de sable ;
- Un échantillon de gravillon.

Utiliser des échantillons préparés, de masse déterminée suivant la Norme NF EN 933-1.

Mode opératoire

- Monter la colonne de tamis dans l'ordre décroissant de l'ouverture des mailles en ajoutant le couvercle et le fond ;
- Verser le matériau sec dans la colonne de tamis ;
- Agiter mécaniquement cette colonne ;
- Reprendre un à un les tamis en commençant par celui qui a la plus grande ouverture, en adaptant un fond et un couvercle ;
- Agiter manuellement chaque tamis jusqu'à ce que le refus du tamis ne varie pas de plus de 1% en masse par minute de tamisage ;
- Verser le tamisât dans celui immédiatement inférieur ;

Déterminer ainsi la masse du refus de chaque tamis ;

- Poursuivre l'opération jusqu'à déterminer la masse du refus contenu dans le fond de la colonne de tamis ;
- Vérifier la validité de l'analyse granulométrique imposée par la Norme NF EN 933-1 (différence entre la somme des masses de refus et de tamisât et de la masse initiale...).

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

0,063 - 0,08 - 0,10 - **0,125** - 0,16 - 0,20 - **0,25** - 0,315 - 0,40 - **0,50** - 0,63 - 0,80 - **1** - 1,25 - 1,60 - **2** - 3,15 - **4** - 5 - 6,30 - **8** - 10 - 12,50 - 14 - **16** - 20 - 25 - **31,50** - 40 - 50 - **63** - 80 - 100 - **125**

Les tamis, dont les dimensions soulignées et notées en gras, correspondent à la série de base préconisée par la Norme NF EN 933-2, de ce fait, lors de l'étude granulométrique, ces tamis sont utilisés prioritairement.

III.3.2.5.1.1. Analyse granulométrique (NF EN 933-1)

Choix des tamis ou passoires

Les séries de base sont fonction de petit d et de grand D , qui sont calculées comme suit :

$2D$, $1.4D$, D , d , $d/2$, et pour les séries intermédiaires, c'est selon nos besoins.

Pour un sable, on peut prendre tous les tamis compris entre 0,063 et 6,3mm (voir la liste sur l'une des feuilles d'analyse granulométrique à l'annexe I).

Généralement, on se contente des tamis suivants :

0,063 - 0,125 - 0,25 - 0,5 - 1 - 2 - 4 - 5 - 6,3.

Les cinq derniers se suivent pour avoir une meilleure définition au niveau des gros grains.

Pour un gravier, on peut prendre tous les tamis compris entre 4 et 80mm (voir la liste sur une des feuilles d'analyse granulométrique à l'annexe I).

Généralement, on se contente des tamis suivants : 4 – 5 – 6,3 – 8 – 10 – 12,5 – 16 – 20 – 25 – 31,5 – 50.

Préparation de l'analyse

Les tamis utilisés sont emboîtés les uns dans les autres, les dimensions croissants de bas en haut.

Dessous on met un récipient à fond plein pour recueillir les fines.

Au-dessus, on ferme avec un couvercle pour éviter la dispersion des poussières.

Tamisage

- L'échantillon pour l'essai est versé dans le tamis supérieur ;
- Mettre la colonne complète (tamis + fond plein + couvercle) sur la tamiseuse ;
- Lancer le tamisage.

Calculs de la teneur en fines

- A partir de l'échantillon global, on prélève la quantité nécessaire à l'essai ;
- Déterminer la teneur en eau du sable, soit w (2 essais au minimum) ;
- Peser précisément l'échantillon humide (m_0), puis le tamiser par lavage sur une petite colonne de tamis comprenant le 1 le 0,5 et le 0,063 jusqu'à ce que l'eau coulant du tamis soit claire ;
- Sécher les refus lavés à la poêle à frire pour aller plus vite ;
- Peser les refus lavés sec soit m_1 ;
- Soit la teneur en fines : $f = 1 - m_1/m_0 \cdot (1+w)$.

III.4.2.5.2. Coefficient d'aplatissement des granulats (NF EN 933-3)

Principe

La forme des gravillons est déterminée par l'essai d'aplatissement (A).

L'essai consiste à effectuer un double tamisage, tout d'abord, au moyen de tamis d'essai, l'échantillon est fractionné en différents granulats élémentaires d_i/D_i , comme indiqué dans l'annexe I, chacun des granulats élémentaires d_i/D_i est ensuite tamisé au moyen de grilles à fentes parallèles d'une largeur d'écartement $D_i/2$.

Le coefficient d'aplatissement global est calculé en tant que masse totale des particules passant au travers des grilles à fentes, exprimé en pourcentage du total de la masse sèche des particules faisant l'objet de l'essai.

Si nécessaire, le coefficient d'aplatissement de chaque granulats élémentaire d_i/D_i correspond au passant du tamisage sur la grille à fentes correspondante, exprimée en pourcentage de la masse de ce granulats élémentaire, il caractérise la forme du granulats à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur, plus A est élevé, plus le gravillon contient d'éléments plats.

Une mauvaise forme à une incidence sur la maniabilité et favorise la ségrégation.

C'est le pourcentage d'éléments tels que: $G / E > 1.58$

Où G: est la plus grande dimension des granulats.
E: est l'épaisseur.

Matériel nécessaire

- Balance avec une précision de $\pm 0,1$ % de la masse de la prise d'essai ;
- Étuve ventilée réglée par thermostat pour maintenir une température de (110 ± 5) °C ou tout autre appareillage adéquat pour sécher les granulats, sans entraîner leur rupture ;
- Grilles à fentes correspondantes comprenant des barres cylindriques parallèles conformes à la figure 45 et aux tolérances données dans le tableau d'analyse dans l'annexe I. Les tolérances de largeur de fente doivent s'appliquer à toute la longueur de chaque fente.

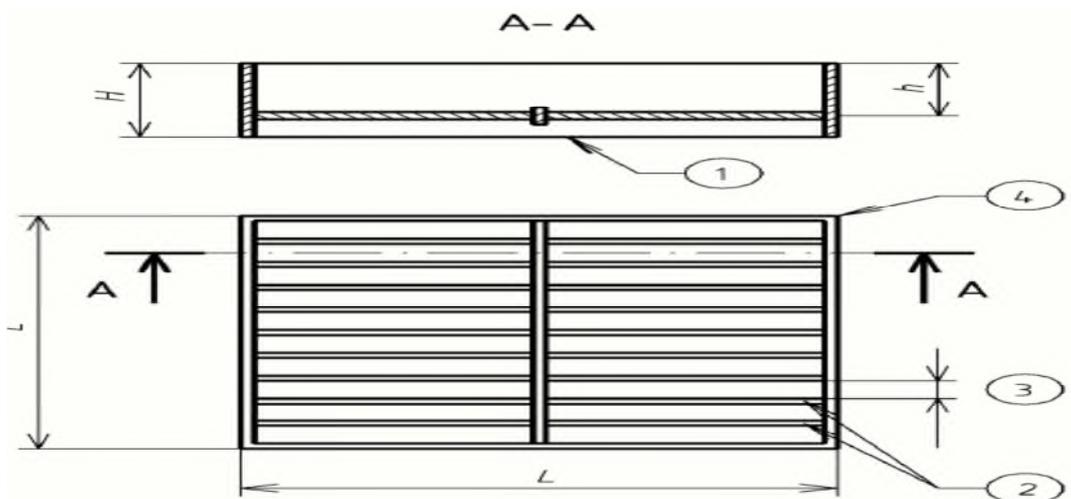


Figure 45 : Grille d'aplatissement.

Avec :

- (1) Support métallique des barres ;
- (2) Barres cylindriques en acier ;
- (3) Largeur de fente ;
- (4) Cadre métallique ;

$L = 250$ mm, $H = 75$ mm, $h = 55$ à 65 mm.

Pesée des refus

- Peser et éliminer tous les grains passant au tamis de 4 mm et retenus sur celui de 80 mm (voir les valeurs obtenues sur l'annexe I) ;
- Prendre le premier tamis et peser son refus : soit d_i/D_i la classe granulaire de ce refus (voir les valeurs obtenues sur l'annexe I) ;
- Tamiser ce granulat élémentaire d_i/D_i obtenu, sur la grille à fentes correspondante, ce tamisage doit être effectué manuellement et doit être considéré comme terminé lorsque le refus ne varie pas de plus de 1 % pendant 1 min de tamisage ;
- Pour ce granulat élémentaire, peser le matériau passant à travers la grille à fentes correspondante (voir les valeurs obtenues sur l'annexe I) ;
- Recommencer les différentes opérations décrites ci-dessus pour les tamis suivants.

III.3.2.6. Coefficient d'absorption d'eau (NF EN 1097-6).

Le coefficient d'absorption d'eau A_b représente la capacité d'absorption d'eau d'un granulat, plus il est élevé, plus le matériau est absorbant. [21]

Le coefficient d'absorption d'eau donné par la formule suivante :

$$WA = 100 \times (M_1 - M_2) / M_2 \text{ en pourcentage de la masse sèche}$$

D'où M_1 est la masse sèche de l'échantillon, et M_2 , sa masse humide.

Principe de l'essai

Cette norme définit le mode opératoire pour déterminer l'absorption d'eau d'un granulat.

- Granulat mis dans un récipient étanche, préalablement séché de manière prolongée ;
- Après remplissage avec de l'eau, on remarque que les pores des granulats contiennent encore du vide ;
- Après 24 heures (ou après mise sous vide), la quasi-totalité des pores sont maintenant remplis d'eau ;
- Après séchage superficiel; l'eau restante dans les pores est l'eau absorbée ;
- Après séchage prolongé à l'étuve, les pores sont de nouveaux remplis d'air.

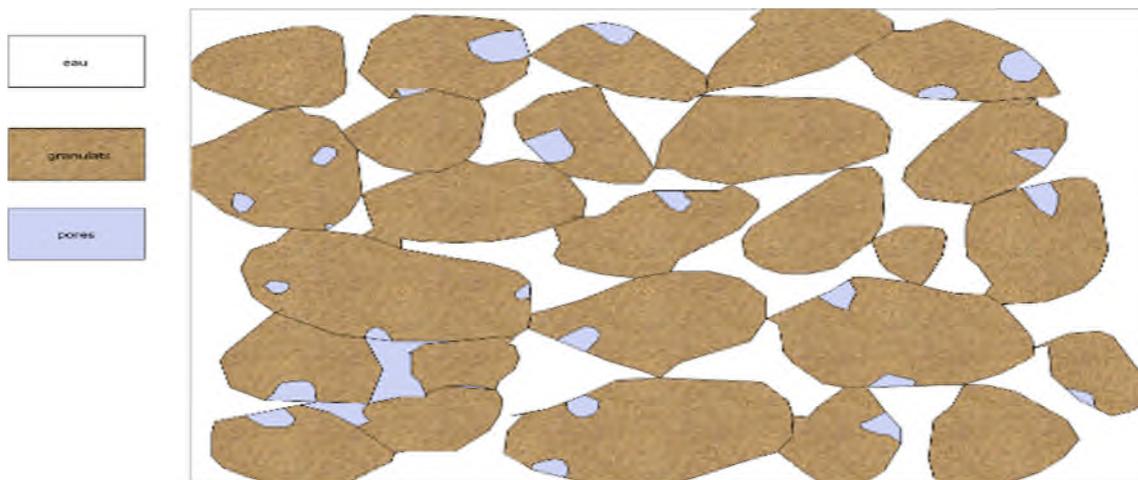


Figure 46 : Grains à pores remplis d'eaux, et surfaces sèches.



Figure 47 : Grains totalement secs.

III.3.2.7. Propreté

Déterminée par deux essais :

Essai qui détermine la qualité des fines (bleu méthylène), et un autre qui détermine leur teneur (d'équivalent de sable).

III.3.2.7.1. Équivalent de sable (la norme EN 933-8)

Il s'agit de déceler la présence d'éléments fins dans le sable et d'en caractériser l'importance par une valeur numérique.

Pourquoi fait-on cet essai ?

1. Il faut plus d'eau pour mouiller des éléments fins que les éléments grossiers, cette quantité varie dans le même sens que le rapport h_2/h_1 du sable.
Donc un sable contenant beaucoup d'éléments fins conduira à une faible valeur de c/e et par voie de conséquence à une faible résistance mécanique.
2. L'eau de gâchage ainsi introduite en excès s'évaporerait au cours du processus de durcissement : d'où formation de vides (béton poreux)

Il en résulte ainsi un retrait plus important et risque de fissuration.

3. Les éléments fins, en présence d'eau se colmatent aux granulats, ce qui fait chuter l'adhérence du liant.

L'essai doit être effectué sur un sable : On n'utilisera que la fraction qui traverse le tamis de 2mm (le refus doit être exclu).

On distingue :

- L'équivalent de sable visuel, noté ES_v ;
- L'équivalent de sable sous le poids du piston noté E.S.

Principe

L'essai d'équivalent de sable consiste à faire flocculer les éléments fins d'un sable mis en suspension dans une solution lavande puis, après un temps de mise au repos donné, on mesure la hauteur des éléments sédimentés.

Il permet de mesurer la propreté d'un sable et rend compte de la quantité des éléments fins contenus dans ce sable: fines de nature siliceuse ou calcaire et fines de nature argileuse, y compris celles qui recouvrent les granulats de dimension supérieure à 80 μm et qui n'apparaissent pas dans l'analyse granulométrique par voie sèche.

Contenu détaillé de l'appareillage d'équivalent de sable.

Matériels utilisés au cours de notre travail est celle du laboratoire MDC, illustré dans la figure 48 et 49, ce matériel répond aux spécifications de la norme EN 933-8.

- Epruvettes, avec deux traits repère bouchons ;
- Entonnoir ;
- Bonbonne de 5l, avec siphon et tube souple de 1.5m environ ;
- Tube laveur métallique, prolongeant le tube souple ;
- Machine agitatrice, électrique ou manuelle ;

- Machine à secouer les éprouvettes Selon EN 933-8, Avec : capot de protection, Arrêt automatique en fin de cycle, Alimentation : 240 V 50 Hz 200 W, Dimensions : 70 x 35 x 42 cm.



Figure 48 : Matériels utilisés pour l'essai d'équivalent de sable.



Figure 49 : Agitateur d'éprouvettes.

- Poids : 30 kg ;
- Réglette de mesure ;
- Piston taré. Dont la masse mobile est de 1000 g, et son diamètre d est légèrement inférieur à celui des éprouvettes.

Aussi, le matériel d'usage courant : tamis, spatule, récipients divers, balance, chronomètre, et thermomètre.

Matériaux utilisés

L'essai doit être réalisé sur la fraction 0/2 mm à une teneur en humidité inférieure à 2 % et à une température de (23 ± 3) °C. Dans certains cas, il peut s'avérer nécessaire de réduire ou d'augmenter la teneur en humidité naturelle afin d'obtenir une prise d'essai dont l'humidité est comprise entre 0% et 2%.

- Prélever environ 700 g d'échantillon humide ;
- Tamiser l'échantillon au tamis de mailles de 2 mm ;
- Echantillonner le granulat en 3 fractions égales et déterminer la teneur en eau w (2 essais) sur une fraction de l'échantillon.

Rappel: teneur en eau = $w = \text{Masse d'eau} / \text{Masse sèche en \%}$

- Préparer deux échantillons humides correspondants à 120 g de sable sec selon la formule:

Masse humide de l'échantillon = $120 \times (1+w)$ en g

Préparation

Le matériel et le sable récupéré tamisé doivent être préparés :

- Solution lavante dans une bonbonne de 5l, à 1 mètre au-dessus du fond des éprouvettes ;
- Dispositif siphonique amorcé, et relié au tube laveur ;
- Deux éprouvettes propres (on prend la moyenne des 2 résultantes) l'ensemble du processus est schématisé dans la figure 53.

Mode opératoire

- Remplir de solution lavante l'éprouvette graduée jusqu'au premier repère ;

(La solution lavante est composée de chlorure de calcium + glycérine + une solution aqueuse de formaldéhyde).

- Peser une quantité de 120g (+1g) de sable et le verser soigneusement à l'aide d'un entonnoir dans l'éprouvette posée verticalement ;
- Eliminer les bulles d'air en tapant à plusieurs reprises la base de l'éprouvette contre la paume de la main ;
- Laisser reposer 10 minutes ;
- Boucher l'éprouvette et l'agiter suivant un mouvement rectiligne, horizontal, sinusoïdal de 20 cm d'amplitude ,90 cycles durant 30 secondes ;

(Cette opération peut être effectuée à l'aide d'un agitateur électrique si possible)

- Oter le bouchon, laver en remplissant l'éprouvette de solution lavante à l'aide d'un tube laveur en enfonçant ce dernier jusqu'au fond de l'éprouvette on lave ainsi les parois intérieures de l'éprouvette ;
- Remonter lentement le tube laveur lorsque le niveau du liquide atteint le trait du 2eme repère (garder l'éprouvette en position verticale) ;
- Laisser reposer pendant 20 minutes en évitant toute vibration ;
- Mesurer à vue la hauteur totale de dépôt de sable y compris le flocculat (particules fines), soit h (mm) ;
- Mesurer à vue la hauteur de dépôt de sable propre, uniquement, soit h en (mm).

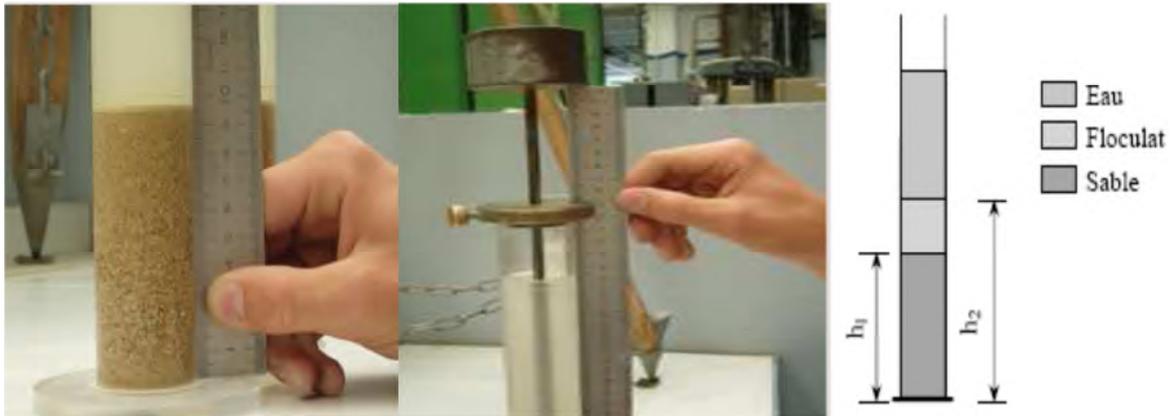


Figure 50 : Méthode de mesure de h_1 et h_2 .

L'équivalent de sable visuel est donc :- $ES_V = h_2/h_1 * 100$ (%).

NB : La mesure de h_2 n'est pas toujours aisée. ES_V qui en résulte, peut donc être entaché d'incertitude. Ce qui induit à faire la mesure plus précise suivante :

- Mesurer la hauteur h_2 à l'aide d'un piston ;
- Descendre lentement le piston taré dans liquide à travers le flocculat, le manchon prenant appui sur le bord supérieur de l'éprouvette. L'immobiliser une fois en contact de sable. Mesurer ainsi h_2 , noter la température.

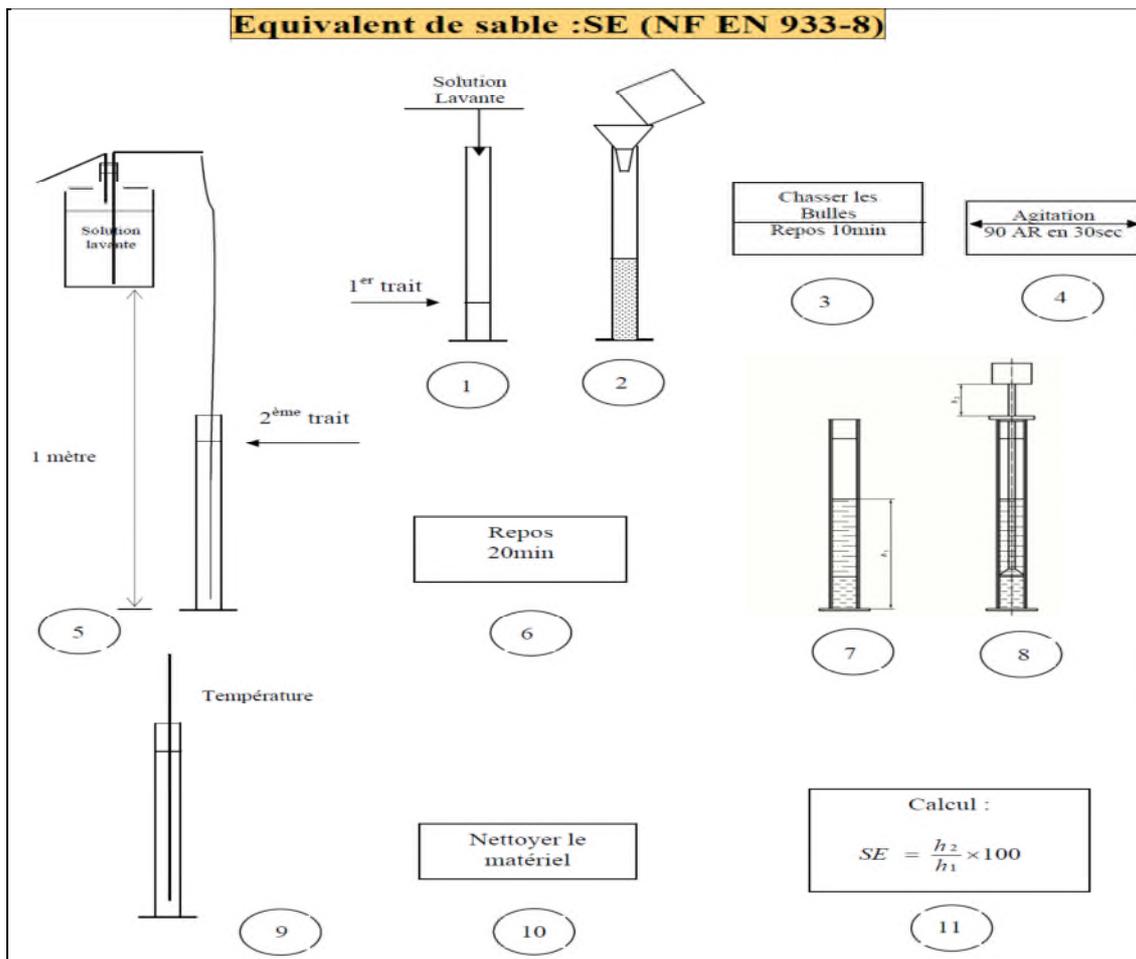


Figure 51 : Processus de déroulement de essai ES.

III.3.2.7.2. Mesure de la capacité d'absorption de bleu méthylène d'un granulat (NF EN 932-9). [22]

Essai utilisé pour la qualification des fines, utilisé principalement pour quantifier la propreté des sables utilisés dans les enrobés ou pour la fraction sableuse des graves.

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

Domaine d'application

La valeur de bleu de méthylène d'un sol (VBS) mesure la capacité d'adsorption des matériaux rocheux.

On appelle valeur de bleu VB d'un sable, la quantité en gramme de bleu de méthylène adsorbée par 1 kg de fraction 0/2 mm du sable.

On appelle valeur de bleu des fillers VBF la quantité en gramme de bleu de méthylène adsorbée par 1 kg de fraction 0/0.125 mm d'un granulat (fillers, sable fileries, tout venant, gravillon). Elle constitue un des paramètres d'identification des sols décrite dans la norme NF P 11-300.

Préparation de l'échantillon

Si le D_{max} du matériau est supérieur à 50 mm :

Prélever 10 Kg de sa fraction 0/50 mm, puis procéder au tamisage.

Si le D_{max} des matériaux est compris entre 5mm et 50mm

Prélevé une masse m de matériau humide telle que $m > 200 * D_{max}$ (m en gramme, D_{max} en millimètres).

Séparer par tamisage et si nécessaire par lavage la fraction 0/5 mm contenue dans l'échantillon.

Si D_{max} du matériau est inférieur ou égal à 5mm

Prélevé un masse, m , des matériaux humide telle que $m > 200 * D_{max}$.

Quarter et homogénéiser la fraction 0/5 mm de manier de préparés trois prises d'essais de masses égales et de l'ordre de :

- 30 g à 60 g dans le cas des sols très argileux ;
- > 60 g dans les cas des sols moyennement argileux.

Principe

Une prise d'essai de granulats est mise en suspension dans de l'eau, des doses de solutions de bleu de méthylènes sont progressivement ajoutées dans la suspension, l'adsorption de la solution par la prise d'essai est vérifiée après chaque addition en effectuant un test à la tache sur du papier filtre, lorsque du colorant libre est décelé de façon répétée, le test est arrêté, la valeur de bleu de méthylène noté MB, est calculée (s'exprime alors en gramme de colorant adsorbé par kilogramme de l'échantillon testé).

Solution de bleu de méthylène

Solution de bleu de méthylène à (10 \pm 0.1) g/L, le bleu de méthylène C₁₆H₁₈ClN₃S, nH₂O avec n de 2 à 3 doit être de pureté \geq 98.5 %.

Préparation de la solution

Déterminer la teneur en eau de la poudre de bleu de méthylène en séchant environ 5 g (enregistré à 0.01 g près) à 105°C jusqu'à obtention d'une masse constante ;

La teneur en eau W est alors calculée : $W = (Mh - Mg) / Mg \times 100$ avec Mh masse initiale de la poudre et Mg masse de la poudre sèche ;

Prélever alors une masse de poudre égale à $[(100 + W) / 10]$ g (précis à 0.01 g près), cette quantité de poudre "humide" correspond à 10 g de poudre sèche ;

Chauffer 500 ml d'eau déminéralisée à une température ne dépassant pas 40° C et ajouter lentement la poudre de bleu dans cette eau pendant 45 minutes et laisser refroidir ;

Transvaser la solution dans une fiole de 1 litre et compléter d'eau déminéralisée jusqu'à la graduation de 1 litre ;

Agiter et transvaser dans un flacon de conservation qui doit être opaque ou en verre teinté.

Cette solution ne se conserve que pendant 28 jours, ne pas oublier d'indiquer le jour de fabrication de la solution et de la jeter au bout de cette période.

Kaolinite

La kaolinite est un minéral de la famille des phyllosilicates, elle est utilisée pour vérifier en cas de doute une solution de bleu de méthylène.

Voici le mode opératoire :

Sécher jusqu'à masse constante la kaolinite puis prélever 30 \pm 0.1 g de kaolinite sèche dans 500 ml d'eau déminéralisée, effectuer alors l'essai, en notant V' le volume total de bleu ajouté, le MB_k de la kaolinite est alors de $MB_k = V' / 30$.

La valeur de MB_k ne variant pas en utilisant le même lot de kaolinite, la comparaison du MB_k pour chaque solution de bleu permettra de valider ou non cette solution.

Appareillages

- Burette permettant le titrage à 5 ml ou distributeur doseur monté sur le flacon de conservation de la solution de bleu de méthylène ;
- Papier filtre, teneur en cendres < 0.010 %, 95 g / m², épaisseur 0.2 mm, vitesse de filtration 75 secondes, pores de 8 μ m ;
- Tige de verre de 300 mm de long et de diamètre 8 mm ;
- Agitateur à ailettes, pouvant être mis en rotation à 400 \pm 40 et 600 \pm 60 tours par minutes, avec 3 ou 4 ailettes de 75 \pm 10 mm de diamètre ;
- Bécher de capacité de 1 à 2 litres.

Mode opératoire

Prise d'essai

Préparer, selon NF EN 932-2, un échantillon contenant 100 g de 0/2 mm.

On a tamisé à 2 mm pour éliminer le refus à 2mm, la teneur en eau devra être faite sur un échantillon équivalent, par calcul, la masse sèche sera donc $M_{sèche} = M_{humide} / (1 + W / 100)$, avec W humidité en %.

Préparation de la suspension.

On ajoute la prise d'essai à 250 +/- 0.1 ml d'eau déminéralisée puis on agitera la suspension obtenue pendant 5 minutes à 600 +/- 60 tours par minutes, on abaisse la vitesse à 400 +/- 40 tr /min pendant la suite de l'essai, et on mélange uniformément la solution de bleu de méthylène.

Test à la tâche.

On posera le papier filtre au-dessus d'un béccher pour que le papier soit le moins possible en contact avec une surface, et on introduit 0.2 ml de colorant, agiter pendant 5 minutes et effectuer le test à la tâche en déposant une goutte de la suspension sur le papier filtre.

La tâche qui se forme est composée d'un centre contenant un dépôt de matériaux et d'une auréole humide autour de ce dépôt, le dépôt doit avoir une taille comprise entre 8 et 12 mm.

Si dans la zone humide une auréole bleu claire persiste pendant une minute, le test est positif. En raison du temps nécessaire aux matériaux argileux pour adsorber le colorant, le test doit être répété pendant 5 minutes.

Si le test est négatif, ajouter 5 ml de bleu. S'il est négatif à la cinquième minutes après avoir été positif, ajouter 2 ml de bleu.

Le test s'achève quand l'auréole bleue persiste autour de la tache pendant 5 minutes. Le volume total de bleu de méthylène est noté V.

Voici un exemple qu'on a effectué au laboratoire des mines de l'université de Bejaïa

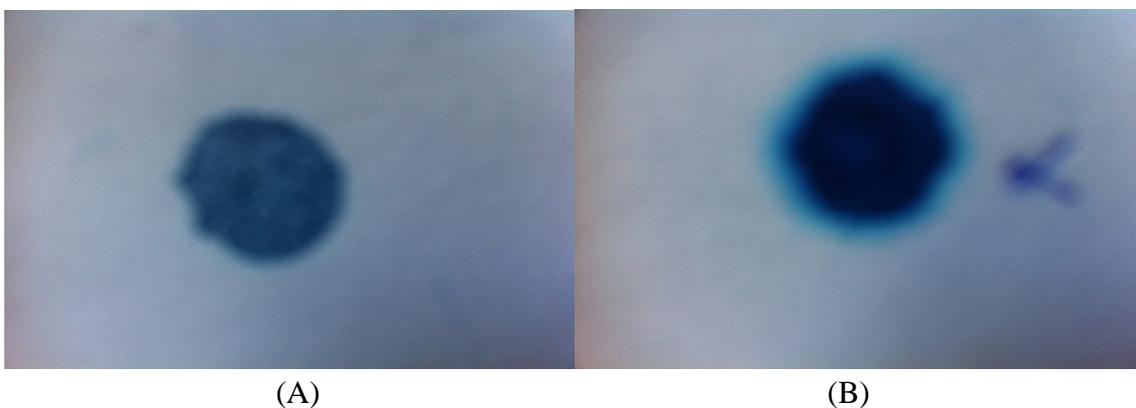


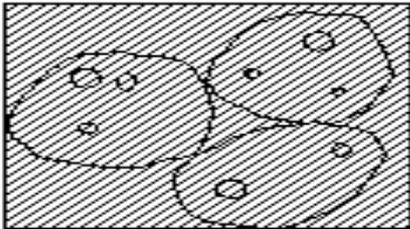
Figure 52 : Test à la tâche, (A) positif, (B) négatif.

III.3.2.8. Masses volumique (NF EN 1097-6).

III.3.2.8.1- Masse volumique apparente sèche des granulats

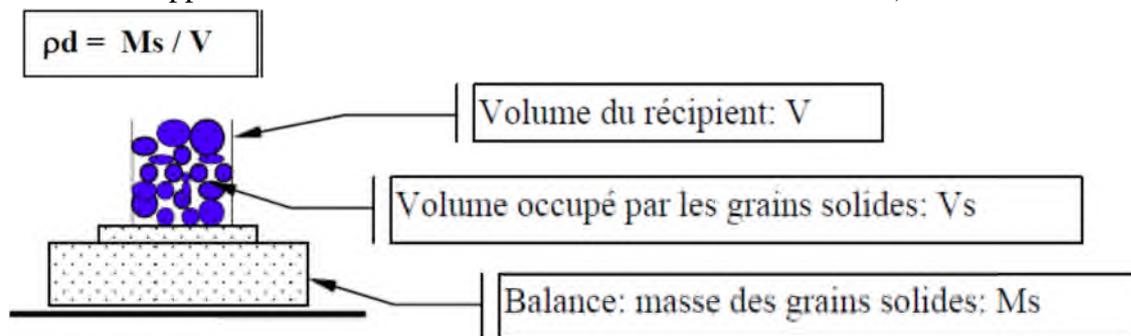
La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau avec tous vides inclus, exprimée en Kg/m³. [21]

Volume hachuré = Volume du récipient.



1-Principe

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



La masse volumique apparente prend en compte le volume des vides.

La détermination de la masse volumique se fait donc simplement en mesurant, la masse et le volume correspondant des matériaux.

Remarque : Nous n'étudierons ici que les matériaux dits en vrac.

Matériel nécessaire

- Un récipient cubique ou cylindrique de volume connu et dont la taille est adaptée aux granulats ;
- Granulats de dimension maximale $D \leq 20$ mm : récipient de capacité 1 l ;
- Granulats de dimension maximale $D > 20$ mm : récipient de capacité > 1 l ;
- Une règle à araser métallique ;
- Une main écope pour le remplissage ;
- Une balance de portée 5 kg, précision 1 g ;
- Des bacs en plastique pour effectuer les essais.

Matériaux utilisés

- Un échantillon de graviers secs (3 /8, 8/15, 15/25) ;
- Un échantillon de sable sec.

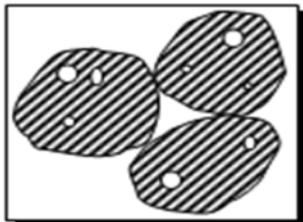
Mode opératoire

- Déterminer le volume du récipient = V ;
- Noter la masse du récipient propre et vide = M_0 ;
- Placer le récipient dans le bac en plastique ;
- Verser les granulats secs, par couches successives et sans tassement : utiliser les mains comme entonnoir naturel ;
- Araser à l'aide de la règle métallique, à laquelle on imprime un mouvement horizontal de va et vient, le récipient étant attaqué le long d'une diagonale horizontale ;
- Noter la masse du récipient rempli = M_1 ;
- Vider le granulat dans un bac en plastique et jeter son contenu dans la benne extérieure ;
- Renouveler l'opération 2 fois.

III.3.2.8.2. Masse spécifique ou Masse volumique absolue des granulats

La masse volumique absolue d'un matériau est la masse d'un mètre cube de ce matériau (les vides exclus).

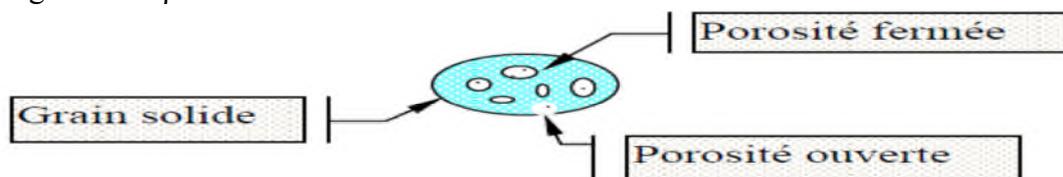
Volume hachuré = Volume absolu



Principe

La masse spécifique ρ_s ou masse volumique absolue est la masse de granulats secs (M_s) rapportée au volume absolu (= uniquement volume de solides) (V_s).

La mesure du volume des solides ne tient pas compte des pores fermés contenus par les granulats. $\rho_s = M_s / V_s$.



Si l'on veut réellement mesurer la masse spécifique ρ_s d'un corps poreux, il faut le réduire en poudre suffisamment fine pour que chaque grain soit constitué de matière solide.

Matériels nécessaire

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

Matériaux utilisés

- Un échantillon de gravillons 3/8, 8/15, 15/25 secs ;
- Un échantillon de sable sec.

Mode opératoire

- Placer l'éprouvette dans le bac en plastique ;
- Verser de l'eau dans l'éprouvette (demi-hauteur) et noter V1 ;
- Préparer un échantillon de granulats secs de masse M1 (environ 300 g) ;
- Verser l'échantillon dans l'éprouvette à l'aide de l'entonnoir et provoquer le départ des vides (= air) en remuant le mélange avec la tige agitateur ;
- Noter le nouveau volume d'eau dans l'éprouvette V2 ;
- Renouveler l'opération 2 fois.

III.3.2.9. Résistance à la fragmentation des gravillons Selon NF EN 1097-2

Cet essai a pour but de mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite par fragmentation, en soumettant le matériau à des chocs de boulets à l'intérieur d'un cylindre en rotation.

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

Il consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite en soumettant le matériau à une série de chocs et de frottements dans la machine Los Angeles.

A un coefficient Los Angeles faible correspond un excellent matériau. Dans la machine Los Angeles, introduire avec précaution la prise d'essai $M = 5000$ g et la charge de boulets de la classe granulaire choisie.

Après 500 rotations de la machine, à une vitesse régulière comprise entre 30 et 33 tr/min, recueillir le granulat et le tamiser à 1.6 mm, peser le refus, soit m le résultat de la pesée. [23], [5]

Le passant au tamis de 1.6 mm sera $p = 5000 - m$.

Par définition, le coefficient Los Angeles est le rapport : $LA = (m/M) \times 100$.

Principe de l'essai

Le principe de cet essai est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques.

Caractéristiques de la machine Los Angeles

Système de sécurité avec contacts électriques.

Positionnement automatique de la trappe (en option).

- Alimentation : 220 V mono ;
- Puissance : 745 W ;
- Dimensions : 990 x 750 x 968 mm ;
- Poids : 290 kg.



Figure 53 : Machine Los Angeles.

Mode opératoire

- L'essai consiste à mettre un échantillon de 5kg et 12 boulets de 417gr dans un tambour ;
- Le temps est fixé et à l'achèvement de l'essai on mesure le pourcentage d'éléments inférieurs à 1,6mm produit, on détermine en suite le coefficient Los Angeles qui doit être inférieur à certaines valeurs en fonction de la destination des granulats, dans cet essai on va manipuler sur le gravier de fraction 8/15 et 15/25 ;
- la machine fait 500 rotations (30 à 33 tours/min) ;
- Mesurer la masse « m » d'élément $< 1,6 \text{ mm}$;
- recueillir les matériaux dans un bac placé sous l'appareil ;
- tamiser les matériaux sur le tamis de 1.6mm ;
- laver le matériau (le refus) pour éliminer les fines ;
- laisser le matériau sécher à l'étuve à 105°C , on obtient une masse séchée.

Pour un bon béton une valeur max de $LA=40$ est demandée.



Echantillon avant l'essai.

Echantillon après l'essai.

Figure 54 : Echantillon avant et après passage à l'appareil LOS-Angeles.

III.3.2.10. Analyse par diffraction des rayons X

Pour la diffraction des rayons X (DRX) les échantillons sont analysés sous forme de poudre très fine. Cette technique est largement utilisée pour l'identification des minéraux.

Tout corps cristallisé peut être analysé par la diffraction X.

Ces derniers sont des ondes électromagnétiques situées entre les domaines des ultraviolets lointains et de rayon γ (longueur d'onde entre 100 et 0.5 °Å). Ces rayons sont produits par bombardement électronique sous vide et à haute tension d'accélération d'une cible.

Cela a pour conséquence la production d'un spectre continu sur lequel se détachent les raies caractéristiques de la cible. La figure 55 illustre un schéma représentatif de cette analyse. [24]

Le faisceau émis est diffracté sur le réseau de plan cristallin des échantillons, selon la loi de Bragg suivante:

$$\lambda n = 2 d \sin\theta$$

Avec,

n : Ordre de la diffraction (entier) ;

λ : Est la longueur d'onde de la source;

θ : L'angle entre le faisceau incident et le réseau de plans, il dépend que du réseau du cristal ;

d: L'espacement inter réticulaire entre deux plans parallèles successifs du réseau cristallin.

Pour une source émettrice de rayons X, le balayage selon un angle d'incidence (θ) d'une préparation représentative d'un échantillon permet d'accéder à tout l'espacement réticulaire **d** de l'échantillon, les diffractogrammes sont traités avec les logiciels de X'Pert PRO MRD Système overview.

Avantages et limites

Avantage : C'est une technique totalement non-destructive de l'échantillon. En cas de nécessité, l'échantillon peut être analysé plusieurs années après sa préparation. Les étalons de référence restent les mêmes dans le temps, ce qui assure une reproductibilité de l'analyse.

Limite : Les éléments de numéro atomique inférieur à celui du carbone ne peuvent pas être analysés par DRX.

Précision et sensibilité

La précision varie avec la quantité de matière disponible pour l'analyse.

Elle dépend également des éléments recherchés et de la matrice dans laquelle se trouve cet élément.

La sensibilité dépend de la méthode de préparation de l'échantillon et du matériau à analyser. Elle varie avec les éléments chimiques.

Elle approche le $\mu\text{g/g}$ quand on opère sans dilution sur un prélèvement de l'ordre du grammage.

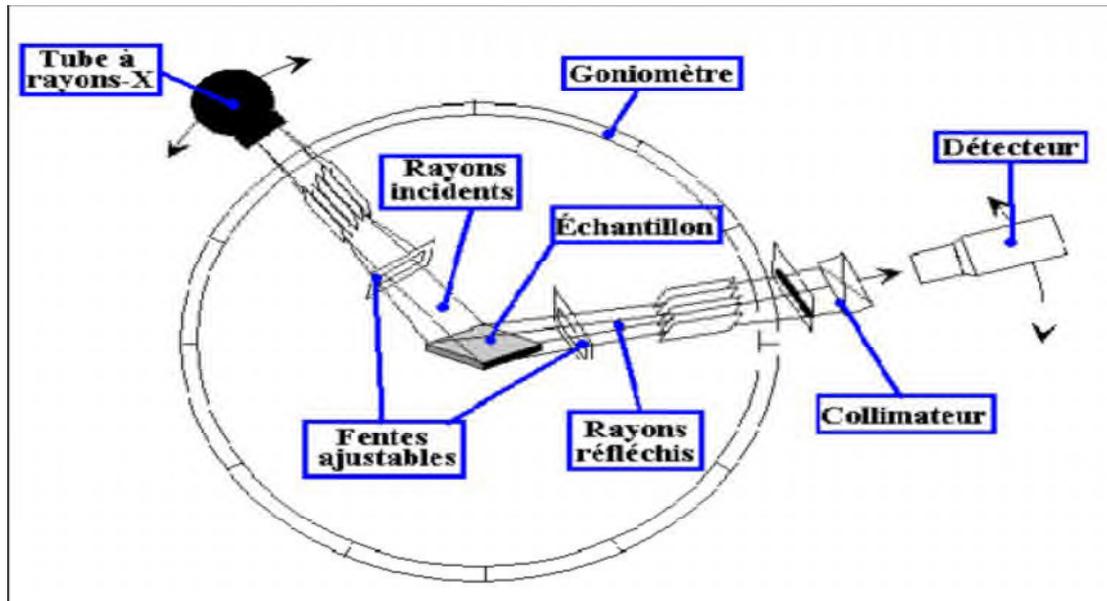


Figure 55 : Schéma du principe d'un spectromètre de diffraction des rayons X pour les échantillons poudre.

Les analyses par DRX sont effectuées dans le laboratoire des mines de l'université A/Mira de Bejaia à l'aide d'un diffractomètre à poudre comme le montre la figure 56.



Figure 56 : Photo de l'appareil de DRX.

III.3.2.11. Détermination des chlorures solubles dans l'eau

1. Principe (Méthode de Mohr)

Une prise d'essai de granulats est rapidement extraite à l'eau, à température ambiante pour entraîner les ions chlorures, l'extrait est ensuite analysé par la méthode de Mohr, ou le chlore est titré par les nitrates d'argent, le dichromate de potassium étant utilisé comme indicateur.[4]

2. Préparation de la prise d'essai

Réduire l'échantillon de laboratoire à une prise d'essai de 250 g de granulats.

3. Préparation des extraits

Pour les sables et gravillons, utiliser les bouteilles en plastique de 1L de capacité à large col, pour les granulats légers, employer les bouteilles de 5L de capacité, peser chaque bouteille et noter leur masse à 1g près.

4. Mode opératoire

Placer la prise d'essai dans les bouteilles, ajouter à chaque une d'elle une masse d'eau égale à celle des granulats, agiter 20 fois au moins, laisser décanter jusqu'à ce que le liquide surnageant soit plus au moins clair, prendre 25ml de l'eau surnageant au moyen d'une pipette de 25ml, et transférer dans une fiole de 100ml, ajouter 1ml de solution de dichromate de potassium à 10% et mélanger, puis titrer au moyen de la solution de nitrate d'argent (0,1 mol /L) jusqu'à apparition d'une couleur rouge, noter le volume V de nitrate d'argent ajouté.

5. Calcul et expression des résultats

$$\%C = 0.1 * 0.03545 * V * w * 4$$

Avec :

V : le volume de solution de nitrate d'argent ajouté.

W : est le rapport eau/granulats (en g/g).

III.3.3. Essais sur le béton

La vérification de la qualité d'un béton nécessite de vérifier sa résistance à la compression à 28 jours, F_{c28} , et pour cela on a confectionné cinq éprouvettes de différents pourcentages des granulats naturel et recyclé.

La confection de ces éprouvettes désigne deux choses :

Il y a la quantité de béton nécessaire, la façon de remplir et de manipuler l'éprouvette afin de garantir la qualité de l'éprouvette en béton, cette procédure est décrite dans la norme NF P 18-404.

Il y a la mise en place du béton dans l'éprouvette par vibration pour reproduire les conditions de mise en place du béton selon l'ouvrabilité désiré, ces procédures sont décrites dans la norme NF P 18-422, lorsque le béton est mis en place par une aiguille vibrante, et par la norme NF P18-423, lorsque le béton est mis en place par un piquage.

III.3.3.1. Préparations et Confection des éprouvettes

- **Dimension des moules (NFP 18-400)**

Les résistances sont mesurées sur des éprouvettes cylindriques ou prismatiques dont les moules ont des caractéristiques définies par la norme NF P 18-400 pour laquelle les moules plus fréquemment utilisés sont les moules cylindriques. Leurs dimensions sont indiquées dans le tableau 16, elles doivent être choisies en fonction du diamètre maximal des granulats (D) entrant dans la composition du béton.

Tableau 16 : Format et dimension des moules.

Format (cm)	Dimension (mm)		Section (cm ²) par un plan		D (mm) des granulats
	Diamètre (d)	Hauteur (h)	Orthogonal	Diamétral	
Cylindre 11x22	112.8	220	100	248	≤16
Cylindre 16x32	159.6	320	200	511	≤40
Cylindre 25x50	252.5	500	500	1262	≤80

❖ **Confection d'éprouvettes (16x32) cylindriques en béton (NFP 18-400 et NF P 18-404)**

• **Principe**

Cette manipulation a pour objet de définir et de réaliser des éprouvettes d'étude, cylindriques de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm en béton hydraulique, utilisables pour $D < 40$ mm, conformes à l'ouvrabilité et à la densité voulue lors de la composition.

• **Matériel nécessaire**

- Petit matériel de chantier : seaux, pelles, brouettes, pinceaux ;
- Des moules métalliques numérotés pour éprouvettes cylindriques ;
- Une règle à araser ;
- Une aiguille vibrante ;
- Une tige de piquage ;
- Un chronomètre ;
- Un malaxeur horizontal sur roues avec grille de protection ;
- Une balance de portée 50 kg, précision 10 g ;
- Des bacs en plastique pour effectuer les pesées ;
- Une main écope.

• **Moyen de vibration, nombre de couche, et temps de vibration, norme NF P18-422 et NF P 18-423**

La vibration de béton dépend de son ouvrabilité, du moyen de vibration, et de la nature des granulats constituants, et la mise en place de béton s'effectue en deux à trois couches.

La vibration du béton dépend de son ouvrabilité, au-delà d'une ouvrabilité de 10 cm, le béton se met en place par un simple piquage, en dessous la mise en place du béton ne nécessite pas une forte vibration.

Les éprouvettes sont vibrées par une aiguille de 25 mm de diamètre.

Tableau 17 : Moyens de vibration des éprouvettes en fonction d'ouvrabilité de béton.

<i>Ouvrabilité du béton</i>	<i>Moyen de vibration des éprouvettes 16×32</i>
$A \geq 10 \text{ cm}$	<i>Piquage</i>
$A < 10 \text{ cm}$	<i>Aiguille vibrante</i>

La mise en place du béton s'effectue en deux couches, le temps de vibration dépend du moyen de vibration, de l'ouvrabilité du béton et de la nature des granulats le constituant, les deux normes indiquent les temps de vibrations par couche en fonction de tous ces paramètres et sous forme de tableau.

• **Matériaux utilisés**

- L'huile de décoffrage ;
- Sable humide de granularité d/D ;
- Gravillon humide granularité d/D ;
- Gravier humide de granularité d/D ;
- Ciment du type CEM II 32,5.

Les compositions de bétons données sont déterminées pour des granulats secs, il est donc nécessaire de modifier les dosages pondéraux des compositions en fonction de la teneur en eau.

Rappel: teneur en eau = $w = \text{Masse d'eau} / \text{Masse sèche en \%}$.

• **Composition et quantité de béton à réaliser**

En déduire les quantités de matériaux à introduire

• **Composition d'1 m³ de béton**

- Ciment : 340Kg/m³ ;
- Sable (0/5) : 250 l/m³×1.6 = 832 Kg/m³ ;
- Graviers (5/25) : 750l/m³×1.5 = 1125 Kg/m³ ;
- Eau 178 l/m³×1 =175 Kg.

• **La masse d'1 m³ du béton pour**

$$\gamma_b = 340+832+1125+175 = 2472 \text{ Kg.}$$

• **Pour réaliser une éprouvette de béton on doit connaitre**

Volume d'un éprouvette : $V = \Pi d^2 \times h / 4$

$$V = 3.14 \times 16^2 \times 32 / 4 = 6430.7 \text{ cm}^3$$

Après majoration à 25% : $V_{\text{maj}} = 1.25 \times 6430.7 = 8038.375 \text{ cm}^3$

$$V_{\text{maj}} = 0.008 \text{ m}^3$$

D'où la masse du béton pour 1 éprouvette :

$$m = \gamma_b \times V_{\text{maj}} = 19.776 \text{ Kg}$$

On aura la composition suivante pour chaque éprouvette :

- Ciment : $(340 \times 19776) / 2472 = 2.72 \text{ Kg}$
- Sable : $(832 \times 19776) / 2472 = 6.656 \text{ Kg}$
- Graviers : $(1125 \times 19776) / 2472 = 9 \text{ Kg}$
 - fraction 3/8 : 3 Kg
 - fraction 8/15 : 3 Kg
 - Fraction 15/25 : 3 Kg
- Eau : la quantité d'eau est variable en fonction du pourcentage de granulat recyclé introduit. (voir le tableau 29 chapitre IV).

• **Mode opératoire ou procédure d'essai: NORME NF P 18-404**

On réalise cinq éprouvettes (16x32), dans les moules métalliques cylindriques, on procède les étapes illustrées dans la figure 57 :

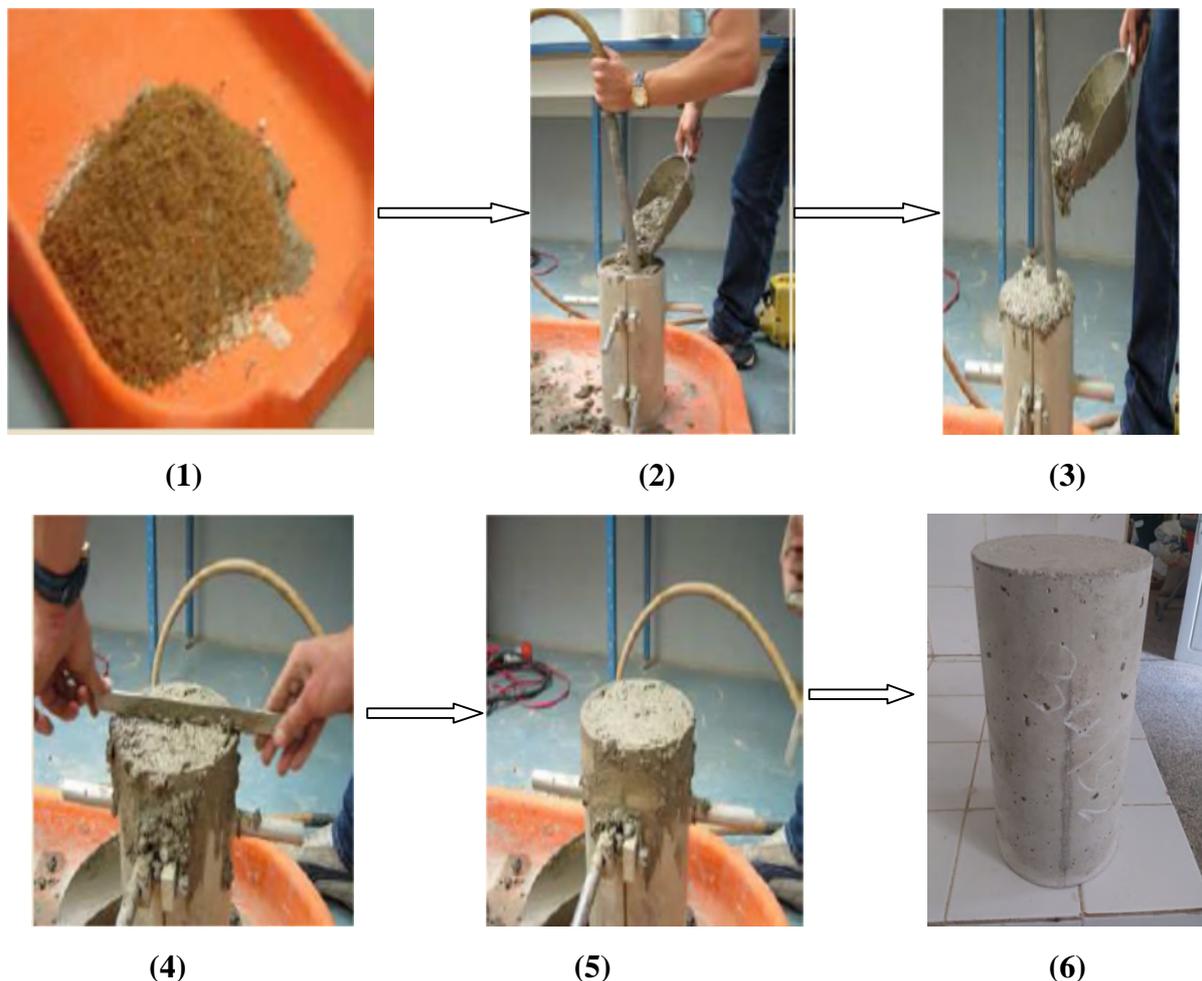


Figure 57 : Etapes de fabrication d'éprouvettes.

- (1) **Préparer les dosages** des granulats dans les bacs en plastique, du ciment de l'eau (après modification en fonction des teneurs en eau), le béton est confectionné en incorporant dans l'ordre, le gravier, puis le sable et enfin le ciment. Le mélange est brassé à sec durant approximativement une minute. L'eau est ensuite ajoutée doucement afin de vérifier visuellement l'ouvrabilité du béton. L'ensemble est ensuite brassé durant

approximativement 2 minutes, l'essai d'ouvrabilité est mené afin de vérifier et d'ajuster le dosage en eau, la rigidité de l'éprouvette durant les manipulations est vérifiée en plaçant dans un cylindre métallique normalisé.

- (2) L'éprouvette est ensuite remplie selon le nombre de couches nécessaires à la vibration du béton et vibrée conformément au temps indiqué.
- (3) La dernière couche est remplie jusqu'au bord de l'éprouvette. Elle est ensuite vibrée conformément au temps indiqué. La vibration contracte le béton. Le volume de béton dans l'éprouvette diminue. Cette diminution de volume est compensée en remplissant l'éprouvette au fur et à mesure afin que le niveau de béton soit maintenu jusqu'au bord supérieur de l'éprouvette.
- (4) L'éprouvette est arasée en deux phases ; une phase de dégrossissage consiste à passer un réglé sur le plat de son biseau et une phase d'affinage consiste à passer le réglé sur le plat.
- (5) **Démouler les éprouvettes** des moules métalliques, on note au feutre indélébile le nom du groupe précédent sur les éprouvettes + date du l'essai, on Stocke les éprouvettes dans la salle de conservation dans le bain à 20°C, afin de garantir les conditions d'hydratation du béton. **Nettoyer et enduire** les parois latérales des moules cylindriques d'huile de décoffrage.
- (6) **Peser les éprouvettes** Elle est pesée, puis stockée 24h à 20°C. Le cylindre métallique est retiré, **On Stocke les éprouvettes**, et on repère le numéro du moule pour permettre une identification sans ambiguïté. l'éprouvette est ensuite démoulée et stockée par immersion dans un bassin d'eau ou dans un local à 95% d'humidité et à 20°C.

III.3.3.2. Mesure de résistance à la compression (EN-12390-3)

Objectif de l'essai

Il s'agit de définir les qualités de résistance, il a pour but de connaître la résistance à la compression du béton, qui peut être mesurée au laboratoire sur des éprouvettes.

Dans le cadre de cette étude, un essai a été réalisé dans le but d'évaluer la résistance mécanique des bétons conventionnels, c'est l'essai de compression, l'essai a été réalisé sur cinq cylindres pour 27 jours et pour chacun des mélanges, comme mentionnée et expliqué au paragraphe (préparation des éprouvettes).

Cet essai avait pour but, entre autre, d'analyser et de vérifier l'impact des granulats recyclés sur les résistances mécaniques.

Cet essai est généralement influencé par la nature des matériaux, la teneur en liant et le pourcentage d'air entraîné dans les mélanges.

Dans notre cas, la teneur en liant a été fixée à **340 kg/m³**. De plus, la teneur en air est constante pour tous les mélanges, soit d'environ 6 %. Ces deux derniers facteurs ne seront pas considérés dans l'analyse des résultats, car ils sont constants d'un mélange à l'autre. [25]

Les résultats d'essai seront donc analysés d'après la nature des matériaux recyclés utilisés.

Equipement nécessaire

- Une machine d'essai qui est une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester et répondant aux prescriptions des normes NF P 18-411 et NF P 18-412, L'appareil utilisé durant l'essai de compressions est présenté dans la figure 58 Disponible à l'université A/Mira Bejaia, au niveau de laboratoire génie civil ;
- Un moyen pour rectifier les extrémités des éprouvettes : surfaçage au soufre, ou disque diamanté.



Figure 58 : Appareil d'écrasement des éprouvettes.

Principe de l'essai

Les éprouvettes étudiées sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

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 est 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 méga pascal (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.

Conclusion

Cet ensemble d'essais, nous permet de déterminer les différentes caractéristiques de granulats recyclés, ainsi que naturels, et d'en définir leurs domaines d'utilisations, pour ne pas risquer de les utiliser dans un domaine où ils ne seront pas satisfaisants aux normes exigées.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1. Introduction

La thématique des granulats recyclés de béton est un sujet très vaste qui couvre un grand nombre d'études. Cette partie expérimentale ne présente que les éléments essentiels à l'étude de caractérisation de leurs propriétés physiques, chimiques, mécaniques, et minéralogiques.

Le but est d'évaluer les caractéristiques des granulats recyclés, ainsi que de les comparer avec ceux des granulats naturels, et cela pour une utilisation futur dans des domaines, ou ils seront autorisés.

IV.2. Résultats et interprétations des différents essais

Voici les différents résultats obtenus par les différents.

IV.2.1. Homogénéisation et division

Voici un exemple d'une division d'un sable recyclé 0/4, les autres fractions sont mentionnées dans l'annexe I (page i et ii).

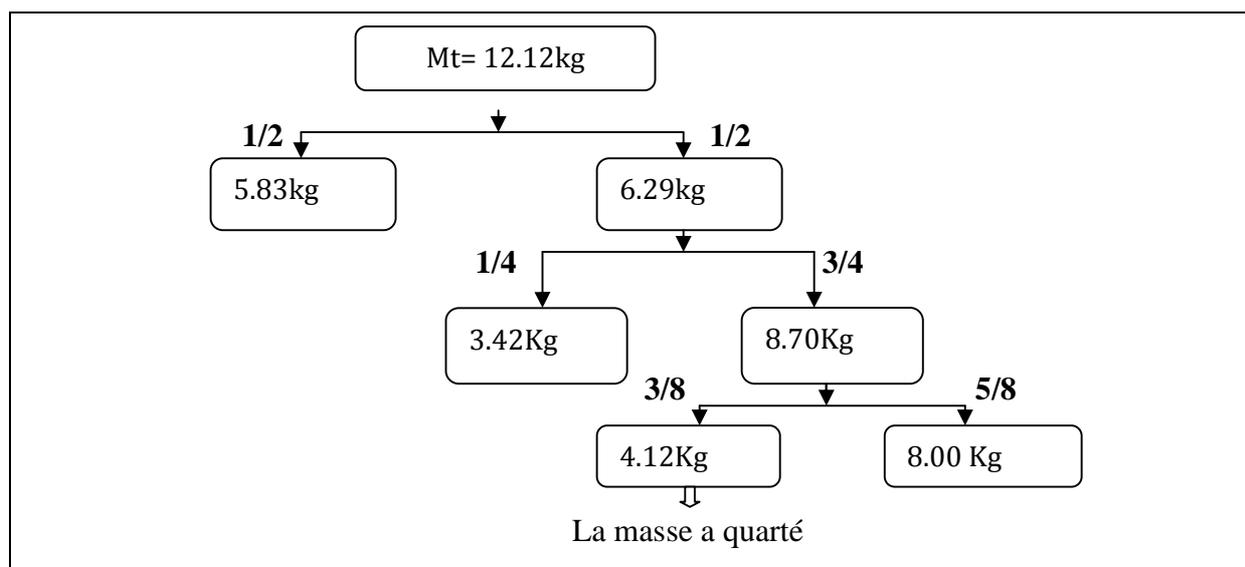


Figure 59 : Opération de division.

• **Quartage :**

Pour le sable, on ne se contente pas que de la division, mais on effectue aussi un quartage comme il est montré dans l'annexe I (page i).

Un échantillonnage intermédiaire s'est fait selon la technique des quartages de façon à minimiser les risques d'erreur sur la composition des échantillons liés à leur hétérogénéité et pour obtenir la masse de résidus nécessaire pour analyses et tests.

Grâce à cette manipulation, l'erreur liée à l'échantillonnage ne dépasse pas 10%. Le résidu résultant est ainsi préparé aux traitements chimiques et physiques.

IV.2.2. Résultats d'analyse granulométrique

• **Module de finesse et teneur en fines**

La norme XP P 18-540 définit le module de finesse d'un sable comme le 1/100ème de la somme des pourcentages des refus ($R_i \cdot 100 / M_i$) sur le tamis de 1.25mm exprimés en pourcentages.

• **Teneur en fines** : est déterminée par le rapport du passant à travers le tamis 0.063mm sur la masse initiale.

Tableau 18 : Résultats de pourcentages de module de finesse et de teneur en fines.

		G.N	G.R
Module de finesse de sable (Mf)		3.28	3.63
Teneur en fines (f en %)	0/4	10.65	6.87
	3/8	0.95	1.09
	8/15	0.59	0.43
	15/25	0.26	0.41

D'après les courbes granulométriques (voir Annexe 1, page xi,..., xiv), on détermine les coefficients suivants, les résultats sont notés dans le tableau 19.

• **Détermination graphique des diamètres D10, D30, D50 et D60**

D10, D30, D50, D60 représentent respectivement les diamètres des éléments correspondant à 10%, 30%, 50% et 60% de tamisât. Ils représentent respectivement les diamètres des mailles des tamis qui permettent le passage 10%, 30%, 50% et 60% du matériau de départ.

• **Coefficient de HAZEN (coefficient d'uniformité)**

Le coefficient de HAZEN permet de savoir si la granulométrie est étalée ou serrée (Uniforme), Ce coefficient est défini par la relation suivante : $CU = D_{60} / D_{10}$

CU : Le coefficient de HAZEN, d'après CAQUOT et KERISEL

$CU < 2$: La granulométrie est serrée (uniforme) ;

$CU > 2$: La granulométrie est étalée.

• **Coefficient de courbure**

Le coefficient de courbure vient en complément de coefficient de HAZEN, est donné par l'équation suivante : $C_c = (D_{30})^2 / D_{10} \cdot D_{60}$

C_c : le coefficient de courbure :

$1 < C_c < 3$: La granulométrie est bien graduée (continuité bien répartie) ;

$C_c < 1$ et $C_c > 3$: La granulométrie est mal graduée (continuité mal répartie).

Tableau 19 : Caractéristiques granulométriques des échantillons.

Designations	Granulats naturel				Granulats recyclés			
	Sable 0/3	Gravies 3/8	Gravies 8/15	Gravies 15/25	Sable 0/3	Gravies 3/8	Gravies 8/15	Gravies 15/25
D ₁₀	0.39	3.99	6.71	16.88	0.21	0.52	0.18	0.18
D ₃₀	0.56	4.66	9.05	18.10	0.41	1.90	0.43	0.44
D ₅₀	1.20	5.31	10.80	20.39	0.83	3.89	0.79	0.80
D ₆₀	1.30	5.45	11.72	21.76	1.03	5.10	1.00	1.06
C _C	0.80	1.00	1.04	0.89	0.77	1.36	1.02	1.01
C _U	2.66	1.36	1.74	1.28	4.90	9.80	5.55	5.88

Interprétations des résultats : L'interprétation des coefficients de forme, et de courbure sont résumées au tableau 20 suivant.

Tableau 20 : Présentation des caractéristiques granulométrique.

Les fractions	Natures	Coefficient de courbure		Coefficient d'uniformité	
		Granulométrie bien graduée 1<Cc<3	Granulométrie mal graduée Cc<1, Cc>3	Granulométrie serrée Cu<2	Granulométrie étalée Cu>2
Sables 0/4	Naturel		X		X
	Recyclé		X		X
Graviers 3/8	Naturel	X		X	
	Recyclé	X			X
Graviers 8/15	Naturel	X		X	
	Recyclé	X			X
Graviers 15/25	Naturel		X	X	
	recyclé	X			X

- **interprétation**

Pour le coefficient de courbure : la granulométrie des deux échantillons de sables est mal graduée, et ainsi le cas pour la fraction 15/25.

Pour le coefficient d'uniformité : la granulométrie des granulats naturels est serrée, sauf pour le cas du sable, par contre, elle est étalée pour toutes les fractions des granulats recyclés.

- **Intérêt en Génie Civil**

L'analyse granulométrique (NF EN 933-1) permet de distinguer les granulats suivant des classes granulaires qui sont commercialisées par les fabricants, l'élaboration d'une composition de béton nécessite une connaissance parfaite de la granulométrie et de la granularité, car la résistance et l'ouvrabilité du béton dépendent essentiellement du granulat. Par ailleurs, la dimension D du granulat se trouve limitée par différentes considérations concernant l'ouvrage à bétonner : épaisseur de la pièce, espacement des armatures, densité du ferrailage, complexité du coffrage, risque de ségrégation...

IV.2.3. Résultats du coefficient d'aplatissement d'un gravier (NF EN 933-3)

Les résultats sont portés sur des feuilles d'essai, et présentés dans l'annexe I, les notations suivantes sont utilisées : Ri = Masse de chaque classe granulaire di/Di, en grammes.

M1 = $\sum Ri$ (ce chiffre peut être légèrement inférieur à M0 mais ne doit pas s'en écarter de plus de 2 %), et M2 = $\sum mi$.

mi= Masse des éléments de chaque classe granulaire di/Di passant sur la grille correspondante.

Le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire est donné par :

$$A_i = (m_i/R_i) * 100$$

Le coefficient d'aplatissement global A est donné par :

$$A = (M_2/M_1) * 100$$

Tableau 21 : Coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire.

Les fractions granulaires	Granulats naturels		Granulats recyclés	
	Ai (%)	A (%)	Ai (%)	A (%)
La fraction 8/15	11.42	12.52	5.19	6.11
La fraction 15/25	12.47	14.41	5.6	5.28

• Intérêt en Génie Civil

L'élaboration des bétons de ciment, ainsi que la réalisation des corps de chaussées et des couches de roulement, nécessitent de n'utiliser que des granulats ayant une forme assez ramassée, à l'exclusion des granulats plats.

En effet, ceux-ci ne permettent pas de réaliser des bétons très compacts, et, par ailleurs, en technique routière, ils ne peuvent être utilisés car ils conduisent à des couches de roulement trop glissante, la détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats.

IV.2.4. Propriétés

IV.2.4.1. Equivalant de Sable

Cet essai effectué selon la norme EN 933-8, les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau 22.

1. L'équivalent de sable sous-piston : $ES_p = (h_2/h_1) \cdot 100$.

2. L'équivalent de sable visuel : $ES_v = (h_2'/h_1) \cdot 100$.

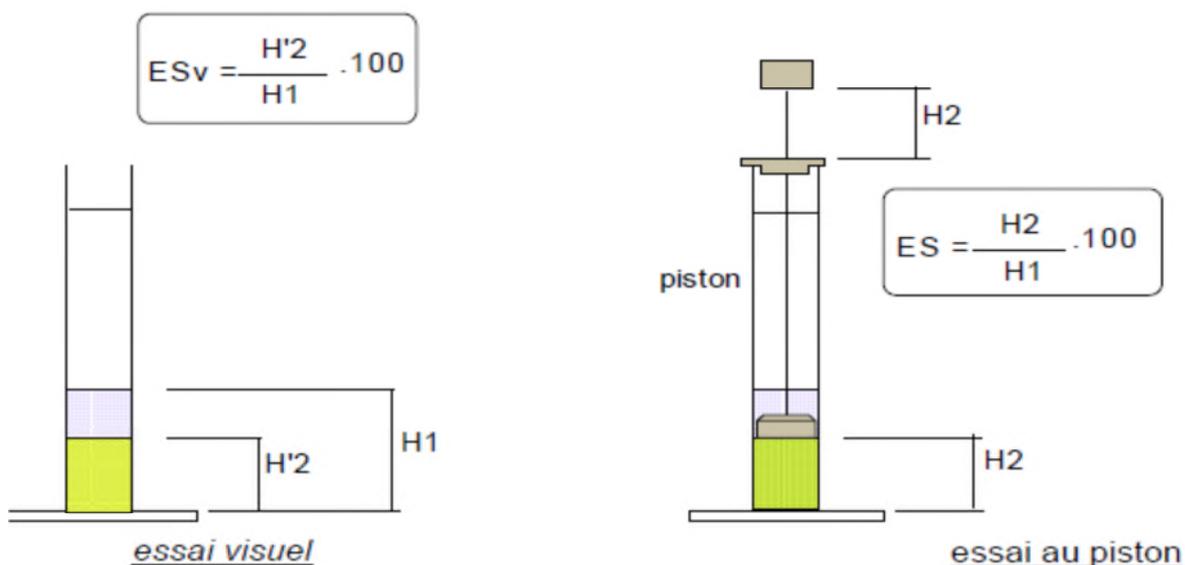


Figure 60 : Détermination d'équivalent de sable.

Tableau 22 : Équivalent de Sable et module de finesse.

		S.C.N	S.C.R
Équivalent de sable [%]	Visuel ES_v	70.58	84.51
	Avec piston ES_p	69.99	83.19

Tableau 23 : Références d'interprétation des résultats de l'équivalent de sable.

$ES_v < 65$	$ES_p < 60$	<i>Sable argileux, à rejeter pour des bétons de qualité</i>
$65 < ES_v < 75$	$60 < ES_p < 70$	<i>Sable légèrement argileux, admissible pour des bétons de qualité courante</i>
$75 < ES_v < 85$	$70 < ES_p < 80$	<i>Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses, convenant parfaitement pour des bétons de qualité</i>
$ES_v \geq 85$	$ES_p \geq 80$	<i>Sable très propre, risqué d'un défaut de plasticité du béton</i>

IV.2.4.2. Essai au bleu de méthylène

Les calculs exécutés sont les suivants :

La teneur en eau de l'échantillon soumis à l'essai (0/5mm), $w = (m_{h2} - m_{s2}) / m_{s2}$;

La masse sèche de la prise d'essai, $M_0 = m_{h1} / (1+w)$;

La masse de bleu introduite (solution à 10g/l), $B = V \times 0.01$;

• **Calcul de VBS**

Le Dmax de notre matériaux est inférieur à 5mm ; Dou : $VBS = (B/m_0) \times 100$.

VBS est exprimée en gramme de bleu par 100g de matériaux.

Tableau 24 : Détermination des valeurs VBS des sables.

Désignations	G. R	G. N
W (%)	3.58	
M0 (g)	150	150
B (ml)	0.03	0.06
VBS (g/100g)	0.02	0.04

IV.2.5. Masses volumiques et coefficient d'absorption d'eau

IV.2.5.1. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente sèche = ρ_d est donnée par :

$\rho_d = \text{Masse des granulats secs} / \text{Volume du récipient}$

$\rho_d = (M1 - M0) / V$

Ordre de grandeur : la masse volumique apparente sèche ρ_d est généralement comprise entre 1,4 et 1,8 g/cm³.

IV.2.5.2. Masse volumique absolue

La masse spécifique = ρ_s ou masse volumique absolue est donnée par :

$$\rho_s = M1 / (V2 - V1)$$

ρ_s en g/cm³ ou kg/dm³ ou t/m³

La masse volumique absolue ρ_s est généralement comprise entre 2,6 et 2,9 g/cm³

IV.2.5.3. Coefficient d'absorption d'eau

Cet essai est effectué selon la norme NF EN 1097-6, les résultats obtenus sont regroupé dans le tableau 25 ci-dessous.

Tableau 25 : Résultats des masses volumiques et du coefficient d'absorption.

Les fractions	Granulats Naturels				Granulats Recyclés			
	S.C.N 0/3	3/8	8/15	15/25	S.C.R 0/3	3/8	8/15	15/25
ρ_d (g/cm ³)	1.42	1.40	1.42	1.39	1.40	1.09	1.15	1.12
ρ_s (g/cm ³)	2.67	2.68	2.67	2.68	2.3	2.36	2.36	2.28
Ab [%]	0.99	0.73	0.91	0.81	18.05	7.04	6.81	6.73

• **Intérêt en Génie Civil**

La masse volumique apparente sèche ρ_d des granulats est nécessaire lors de l'établissement d'une composition de béton, elle permet également d'estimer la masse d'une charge d'exploitation (exemple : hall de stockage de matériaux...), comme elle sert à déterminer les capacités réelles des engins de terrassement.

Par ailleurs, la connaissance simultanée de la masse spécifique ρ_s et de la masse volumique apparente sèche ρ_d permet de calculer la compacité C et le pourcentage des vides V dans un échantillon.

Ainsi, un matériau tassé ou comprimé voit sa masse volumique apparente sèche ρ_d tendre vers sa masse volumique spécifique ρ_s .

IV.2.6. Résistance à la fragmentation des gravillons

Cet essai est effectué selon la norme NF EN 1097-2, les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 26.

Le coefficient de LOS ANGELES est exprimé par la relation suivant :

$$LA = [(M_{si} - M_{sf}) / M_{si}] * 100.$$

Tableau 26 : Détermination de coefficient de LOS ANGELES.

Fractions	G.R		G.N	
	10/14	10/25	10/14	10/25
Msi en kg	5	5	5	5
Msf en kg (après étuvage)	3.006	2.986	3.445	3.300
LA en %	39.88	40.28	31.1	34

• **Intérêt de l'essai**

On le mesure, pour les gravillons, par un essai de fragmentation (essai Los Angeles) dont le résultat intervient peu sur les caractéristiques des bétons (sauf pour les bétons à hautes performances). On limite sa valeur pour ne pas risquer d'avoir un mélange dont la granularité pourrait évoluer pendant le malaxage ou le transport en camion, ce qui modifierait les propriétés des bétons.

IV.2.7. caractéristiques chimiques et minéralogiques

IV.2.7.1. Caractérisations par diffraction des rayons X

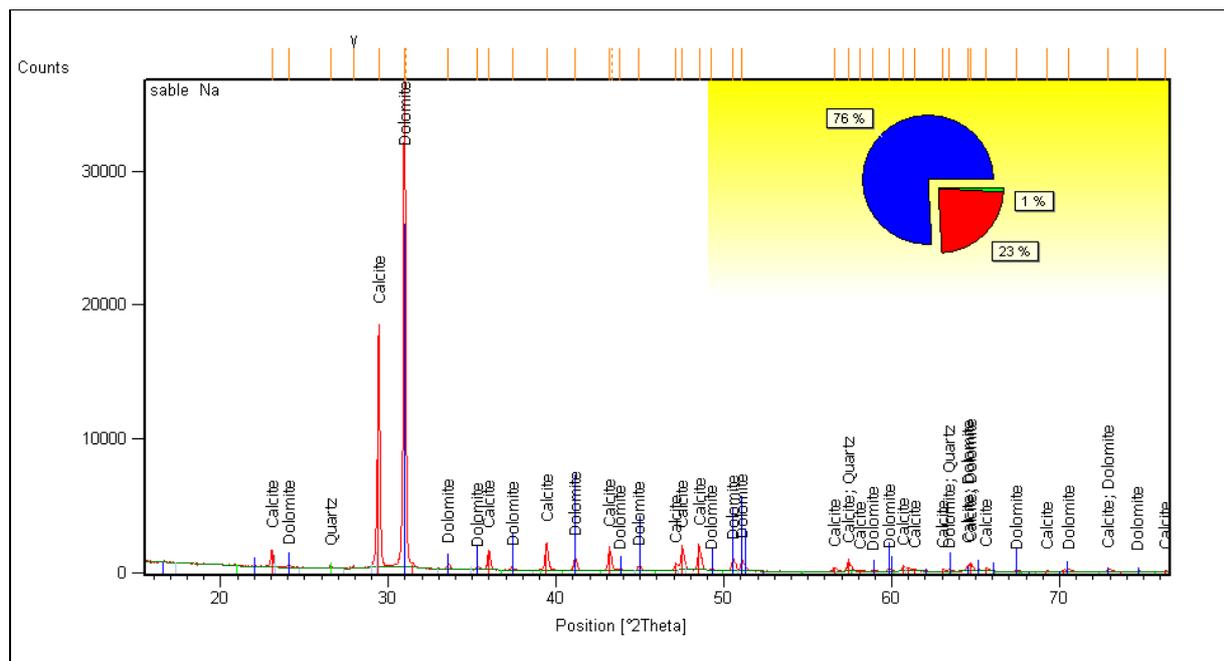


Figure 61 : Spectre DRX du sable concassé naturel (S.C.N).

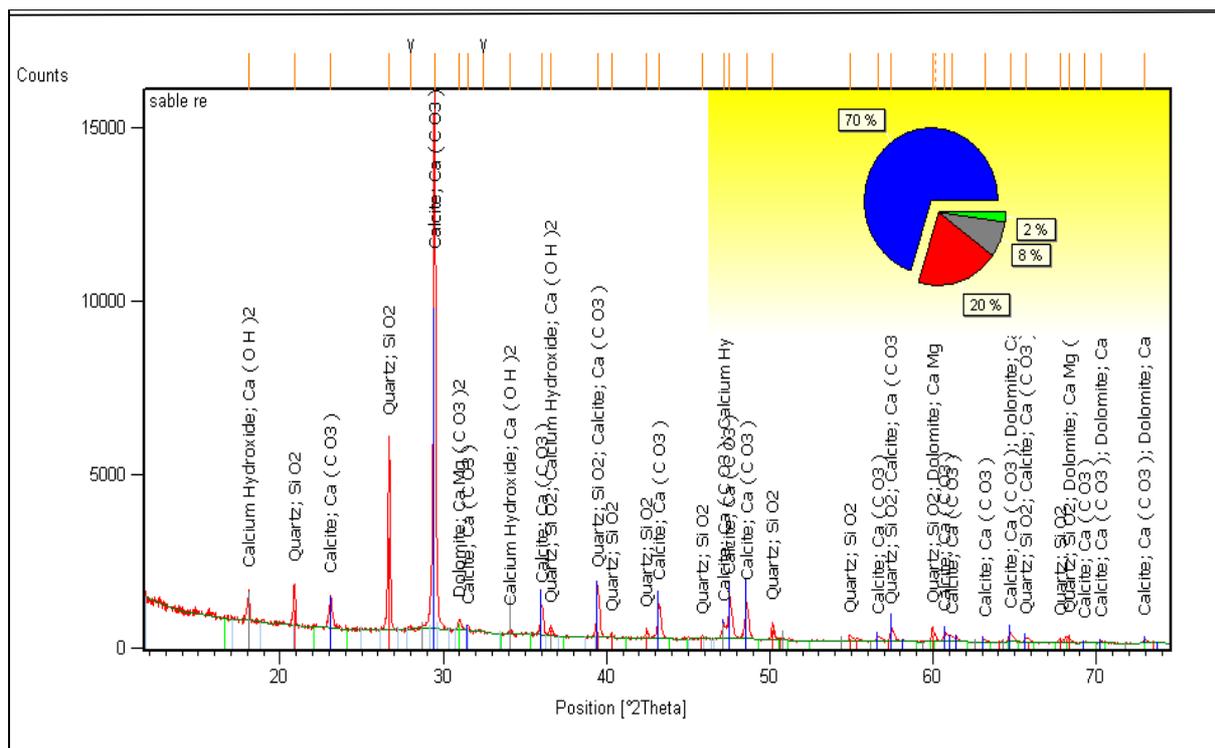


Figure 62 : Spectre DRX du sable concassé recyclé (S.C.R).

• **Résultats :**

D’après les spectres DRX représenté dans les figures 61 et 62, on détermine les compositions minéralogiques des deux sables, les résultats sont notés au tableau 27 :

Tableau 27 : Composition minéralogique des granulats (S.C N, S.C.R).

Caractéristiques	S.C.R	S.C.N
CaCO ₃	70	23
Ca Mg (CO ₃) ₂	02	76
Ca(OH) ₂	08	Néant
SiO ₂	20	01

IV.2.7.2. Détermination des chlorures solubles dans l’eau

Cet essai est effectué au niveau de l’université de Bejaïa, selon la norme NF EN 18-554.

IV.2.7.2.1. Préparation de la solution de nitrate d’argent (0,1 mol /L)

On a : $n = C \times V = m/M$, d’où :

$$m = M \times V \times C$$

$$m = 169.87 \times 250 \times 0.1 \longrightarrow m = 4.246 \text{ g}$$

Avec : m : La masse d'Ag₂NO₃ souhaitée à le préparer en g ;

M : Masse molaire d'Ag₂NO₃ en g/mole ;

V : Le volume d'eau en ml ;

C : Concentration ;

n : Nombre de moles.

Le pourcentage des chlorures est déterminé par la relation suivante :

$$\%C = 0.1 \times 0.03545 \times V_N \times W \times 4.$$

Tableau 28 : Pourcentage des chlorures.

Designation	G.N	G.R
V _N (ml)	0.20	0.97
W (g/g)	1.00	1.00
%C (%)	0.283	1.375

IV.2.8. Caractérisation du béton

IV.2.8.1. Essais mécaniques

Les essais mécaniques sont effectués sur les éprouvettes après 28 jours de cure, ces éprouvettes sont préparées selon le tableau 29 :

Tableau 29 : Pourcentage en granulats utilisés pour la fabrication des éprouvettes.

Désignation	(%) Pourcentage en G.N				(%) Pourcentage en G.R				Quantité d'eau(Kg)
	SCN0/3	3/8	8/15	15/25	SCR0/3	3/8	8/15	15/25	
Ep1	100	100	100	100	0	0	0	0	1.424
Ep2	0	0	0	0	100	100	100	100	2.150
Ep3	75	75	75	75	25	25	25	25	1.574
Ep4	100	0	0	0	0	100	100	100	1.624
Ep5	50	50	50	50	50	50	50	50	1.530

Les Résultats d'essai des résistances mécaniques moyennes à la compression des échantillons sont présentés dans le tableau 30.

Tableau 30 : Résultats des essais de compression.

	Poids (g)	Charge (KN)	fc (Mpa)
Ep 1	15870	540	27.0
Ep 2	13750	480.7	24.4
Ep 3	14770	522	26.1
Ep 4	14610	549.5	27.4
Ep 5	14910	498	24.9

IV.3. Synthèse des différentes sources de granulats et leurs utilisations sur le marché suivant leur typologie.

Tableau 31 : Domaines d'utilisations en fonction de type de granulats. [2]

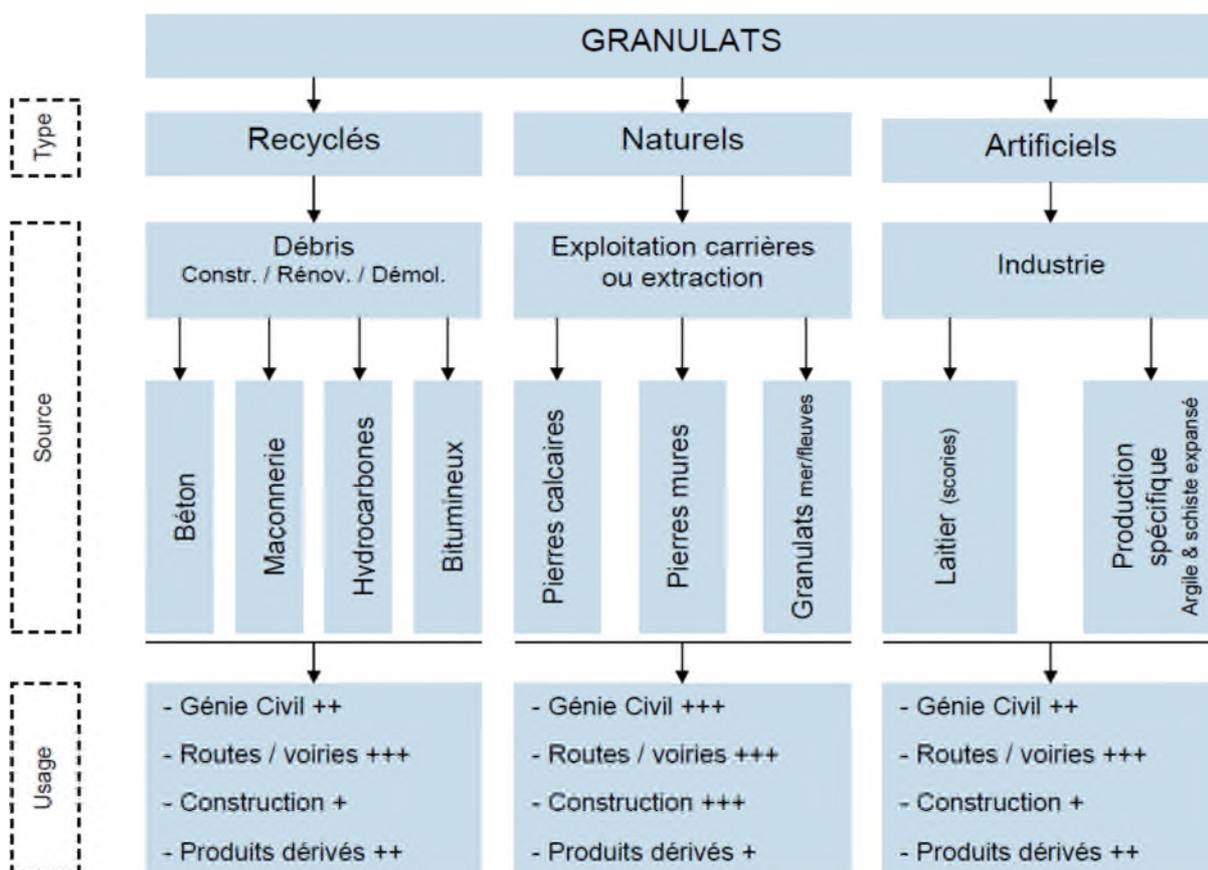


Tableau 32 : tableau de synthèse des différentes caractéristiques expérimentées.

caractéristiques		Granulat recyclé	Granulat naturel	comparaisons
Physique et mécanique		0/4 : Ab _{1,805} , ps _{2,3} , pd _{1,40} 3/8 : Ab _{7,04} , ps _{2,36} , pd _{1,09} 8/15 : Ab _{6,81} , ps _{2,36} , pd _{1,15} 15/25 : Ab _{6,73} , ps _{2,28} , pd _{1,12} LA (10/14) = 39.88 LA (10/25) = 40.28	0/4 : Ab _{0,99} , ps _{2,67} , pd _{1,42} 3/8 : Ab _{0,73} , ps _{2,68} , pd _{1,40} 8/15 : Ab _{0,91} , ps _{2,67} , pd _{1,42} 15/25 : Ab _{0,81} , ps _{2,68} , pd _{1,39} LA (10/14) = 31.1 LA (10/25) = 34	Le coefficient d'absorption d'eau, et Los Angeles des GR sont élevés par rapport aux GN, pour les autres, ils sont du même ordre de grandeur.
Fabrication	Géométrique	0/4 : Cc _{0,77} , Cu _{4,90} , f _{6,87} , Mf _{3,63} 3/8 : Cc _{1,36} , Cu _{9,80} , f _{1,09} 8/15 : Cc _{1,02} , Cu _{5,55} , f _{0,43} , A _{6,11} 15/25 : Cc _{1,01} , Cu _{5,88} , f _{0,41} , A _{5,28}	0/4 : Cc _{0,80} , Cu _{2,66} , f _{10,65} , Mf _{3,28} 3/8 : Cc _{1,00} , Cu _{1,36} , f _{0,95} 8/15 : Cc _{1,04} , Cu _{1,74} , f _{0,59} , A _{12,52} 15/25 : Cc _{0,89} , Cu _{1,28} , f _{0,26} , A _{14,41}	La teneur en fine des GN est élevée par rapport aux GR, par contre pour le module de finesse c'est le contraire. L'aplatissement des GN est plus élevé
Cc, et Cu (sans unité)				
ESP(%)				
VBS (g_{BW}/g de matériaux)	Physico-chimique	ESP = 83.19 VBS = 0.02	ESP = 69.99 VBS = 0.04	Le SN contient plus de fine argileuse que le SR.
Chimiques et minéralogique		C = 1.375	C = 0.283	La teneur en chlorures de SR est plus élevée.
C(%)		(70%) CaCO₃ , (08%) Ca(OH)₂	(23%) CaCO₃ , (00%) Ca(OH)₂	Le SR est silico-calcaire.
DRX(%)		(02%) CaMg (CO₃)₂ , (20%) SiO₂	(76%) Ca Mg (CO₃)₂ , (01%) SiO₂	Le SN contient du calcaire dolomitisé avec aucune présence de la chaux.

IV.4. Interprétation et discussions

Les granulats recyclés de béton diffèrent des granulats naturels par leur composition.

En effet, le granulat recyclé de béton est un matériau composite, dont les deux constituants sont :

- Des granulats naturels concassés partiellement ;
- De la pâte de ciment hydraté concassée, enrobant les granulats naturels.

Les éléments constitutifs de ces granulats recyclés sont présents en proportion différentes. En effet, le taux de pâte de ciment présent dans les granulats recyclés de béton varie en fonction de leur origine c'est-à-dire en fonction de la formulation de base du béton initial appelé béton parent dans la littérature.

Les propriétés de la pâte de ciment sont à l'origine des éventuelles mauvaises propriétés des granulats recyclés constatées. En effet, les propriétés physiques des granulats recyclés dépendent de la quantité et la qualité de pâte de ciment présente sur les granulats concassés.

Par conséquent, certaines propriétés mécaniques s'avèrent être moins bonnes que celles des granulats naturels.

L'analyse de ces résultats permet de conclure que :

- La masse volumique des granulats recyclés semble plus faible que celle des granulats naturels, cela est dû à la porosité que présentent les fines du ciment collées à la surface des grains.
- Par contre l'absorption d'eau est importante pour les granulats recyclés.

En effet, l'ensemble des études montre que les granulats recyclés de béton sont caractérisés par une forte capacité à absorber l'eau.

De plus, il semble que la partie la plus fine des granulats (sable) recyclés absorbe une quantité d'eau plus élevée que les éléments plus grossiers (gravier), cela nous mène une deuxième fois à conclure que la cause est due au ciment puisque c'est le sable recyclé qui en contient le plus.

Cet essai explique la différence entre les deux granulats de point de vue densité, par ce que les granulats recyclés ayant une forte absorption d'eau (environ de 7%) en comparaison avec les granulats naturels (environ de 1%), on peut expliquer ce phénomène par la forte porosité des granulats recyclés en comparaison à celle des granulats naturels.

- Le coefficient de Los Angeles des granulats recyclés est élevé par rapport aux granulats naturels, de plus sa valeur est au seuil des valeurs exigées par la norme XP P 18-540-article 10. et cela nous met dans un état de doute, pour dire est ce qu'il est conforme ou pas, puisque une simple variation de l'un des paramètres agissant sur cette valeur peut nous amener à contrarier notre interprétation.
- Essai d'équivalent de sable et de bleu de méthylène montrent que notre sable est très propre, ce qui implique qu'il n'est pas conforme à la confection du béton de qualité, par ce

qu'il peut entraîner un défaut de plasticité du béton, mais cela ne veut pas dire que ce sable est à rejeter, car, son utilisation ne se limite pas qu'au béton de qualité.

Donc soit, il va être utilisé dans un autre domaine où il sera conforme, à titre d'exemple, dans le domaine des chaussées, ou bien en le mélangeant avec un autre sable qui est moins propre, cela va porter des gains pour les deux cotés.

- La valeur du coefficient d'aplatissement des granulats recyclés est inférieure à celle des granulats naturels, et comme plus cette valeur est petite, le granulat est bon, on peut dire alors que la forme de notre granulat recyclé est plus conforme que celle du granulat naturel.
- On remarque dans le spectre DRX de sable concassé recyclé représenté sur la figure 62, deux pics majeurs à 29.4° et 31° , le premier indique la présence de quartz (SiO_2), le deuxième indique la présence de calcite pure, il existe aussi des pics mineurs, qui indiquent le quartz, la calcite, la dolomite, et la chaux, mais cette caractéristique n'est pas toujours valable elle peut varier selon la nature des déchets.

Le spectre DRX du sable naturel représenté dans la figure 61, nous donne un taux élevé de dolomite et de calcaire ce qui permet de dire que notre sable naturel provient en partie des calcaires et des dolomies.

- Pour la teneur en chlorures, elle est beaucoup plus élevée dans le sable recyclé, cela est dû soit à la nature du granulat d'origine, elle peut aussi provenir de l'eau de gâchage du béton dont on a prélevé notre échantillon.

D'une manière générale, les auteurs s'accordent à dire que la qualité des granulats recyclés semble être inférieure à celle des granulats naturels.

Pour s'assurer des résultats obtenus en étudiant les caractéristiques des granulats, on a confectionné 5 éprouvettes de béton à base de ces granulats (naturels et recyclés) en variant les quantités de granulats recyclés introduites, pour comparer leurs résistances à la compression, et on a tiré les résultats suivants :

D'après le tableau 30, on constate que, plus on diminue la quantité des granulats recyclés, la résistance à la compression augmente.

Jusqu'à un taux de 25% de granulats recyclés, la résistance est égale à 26.1Mpa, mais si on exclut le sable recyclé, et on ajoute 50% de graviers recyclés, les résultats seront plus satisfaisant que ceux de l'éprouvette à 100% naturels.

Donc la non satisfaction aux normes des caractéristiques des granulats recyclés n'est pas causée par ces graviers, mais par son sable.

IV.5. Conclusion

L'ensemble des essais effectués, est basé sur des méthodes d'échantillonnages bien définies, pour permettre de généraliser les résultats obtenus pour tous les granulats de même origine.

Ces relations ont l'avantage de prédire les résistances mécaniques de tous les mélanges effectués à l'aide des dosages d'un ou de plusieurs de ces matériaux.

Les exigences doivent être satisfaisantes pour éviter l'utilisation de matériaux inadaptés qui risquent de faire la contre publicité des matériaux recyclés.

Il est donc essentiel de contrôler la quantité et la qualité de la pâte de ciment présent sur les granulats d'origine afin de comprendre leur influence sur les propriétés des granulats recyclés, cela induit également la nécessité de connaître les propriétés physiques et mécaniques du béton parent.

Les granulats recyclés de bétons ont comme caractéristique une forte capacité d'absorption, cette propriété reste vraie quelle que soit la provenance du béton parent.

Ce critère influe considérablement sur le comportement rhéologique des bétons frais. Les compositions des bétons de GRB nécessitent une quantité d'eau supplémentaire pour l'obtention d'une ouvrabilité plastique similaire à celle d'une composition de béton de granulats naturels.

En effet, les bétons de GRB requièrent approximativement 51% d'eau supplémentaire pour un même affaissement qu'un béton classique.

Cette absorption est bien évidemment la conséquence de la présence de la pâte de ciment, mais plus particulièrement de sa structure alvéolaire. En effet, la pâte de ciment est reconnue pour être un matériau poreux. Les interstices ont tendances à capter l'eau et à la retenir. Il n'y a donc pas suffisamment d'eau libre pour hydrater les grains de ciment.

Il est nécessaire d'approfondir les connaissances sur les propriétés des granulats recyclés de béton en fonction de leur origine (qualité du béton parent,...) ce qui facilitera leur valorisation en tant que granulats à béton.

CONCLUSION GENERALE

Les besoins en granulats sont croissants à l'échelle nationale, liée à une demande de plus en plus forte en matériaux pour les constructions et les infrastructures. Cette situation contribue à l'épuisement des gisements naturels de granulats, de plus les contraintes environnementales réduisent les possibilités d'exploitation des gisements terrestres traditionnellement exploités et les difficultés pour ouvrir de nouvelles carrières imposent de chercher de nouvelles sources d'approvisionnement, le recyclage des matériaux de construction, semble être la solution la plus prometteuse. [26]

Le recyclage permet non seulement de répondre au déficit de production, mais aussi de mieux protéger l'environnement.

Les impacts environnementaux de l'extraction de granulats sont beaucoup plus faibles depuis la mise en œuvre des réglementations spécifiques à l'activité, mais ils restent difficilement quantifiables. En outre, ils peuvent ainsi revêtir certains aspects négatifs mais aussi bénéfiques.

Les granulats recyclés peuvent être constitués de différents types de matériaux pierreux inertes (blocs de béton / briques / tuiles...), déroger à leur utilisation implique de se priver d'un potentiel important de récupération de matière (déchets exploitables) alors même qu'un marché existe et que les décharges sauvages pullulent et défigurent nos paysages, d'autant plus que les CET sont pratiquement inexistantes.

Les granulats fabriqués à partir de résidus de béton peuvent avantageusement remplacer des matériaux de carrière et de sablière en tant que matériaux de construction.

Leur valorisation générera ainsi des gains environnementaux sous deux aspects, soit la réduction des quantités dirigées vers l'enfouissement et la diminution de l'extraction d'une ressource non renouvelable

Au même titre que les granulats naturels, les granulats recyclés répondent à des normes et à des réglementations strictes garantissant la connaissance qualitative et performantielle des produits. [27]

Les granulats recyclés répondent aux questions sur la façon d'aboutir à :

- Des diminutions importantes d'émissions de GES,
- La réduction de la consommation énergétique,
- La protection des ressources naturelles dont l'accès devient de plus en plus rare,
- La valorisation des matériaux de déconstruction pour limiter voire éliminer les mises en décharge.

Les résultats de notre étude montrent que les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques des granulats recyclés sont pratiquement similaires à celles des granulats naturels, d'où la nécessité urgente de la mise en place de mécanisme réglementant le développement de cette filière.

La substitution des granulats naturels par des granulats recyclés partiellement ou en totalité dans un béton, offre une nouvelle source d’approvisionnement et permet d’économiser les matériaux et les carrières, et répondre au problème de la gestion des déchets de démolition pour préserver l’environnement.

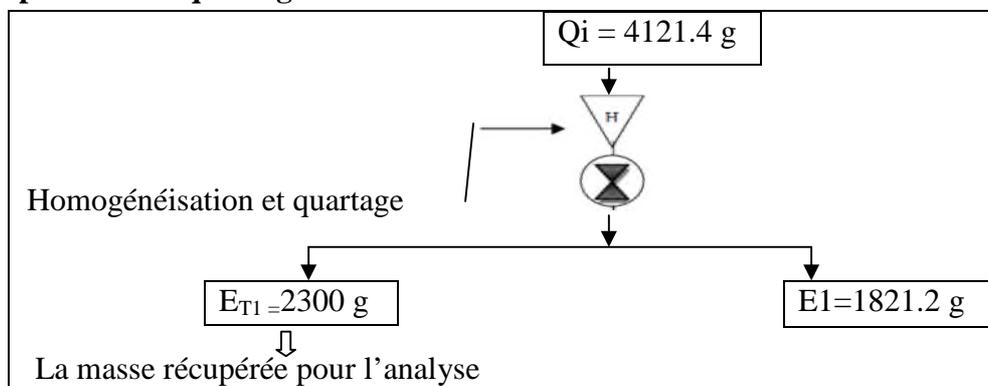
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. Thomas Martaud, le 22 octobre 2008, évaluation environnementale de la production de granulats naturels en exploitation de carrière, indicateurs, Thèse : modèles et outils.
- [2]. BRUXELLES ENVIRONNEMENT DECEMBRE 2010, l'utilisation des granulats issus du recyclage–IBGE fiche 4.1.
- [3]. AFNOR – XP P 18-545 – Février 2004, Granulats – Eléments de définition, conformité et codification –.
- [4]. NF EN 1744-1, septembre 1998– Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats -.
- [5]. AFNOR – NF EN 1097-2, Octobre 1998– Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 2 : méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation.
- [6]. AFNOR – NF P 11-300, septembre 1992- Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières – 28 APC Analyses – Rapport.
- [7]. UNICEM, Statistiques année 1997. Revue matériaux de construction et produits de carrières. N°700, numéro spécial novembre 1998.
- [8]. (Source : AWAA for cwarhitects) Projet CAMELEON – Appel à projet exemplaire 2007 (construction neuve).
- [9]. La lettre de l'ANPM N° 3- Novembre 2009, Bulletin d'information trimestriel de l'agence nationale du patrimoine minier – Alger.
- [10]. TLEMCEN, 2012, etude du potentiel local en granulats pour une utilisation optimale, Thèse, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID –.
- [11]. Guide d'utilisation des déchets recyclés pour le BTP à la REUNION, Mars 2012. Rapport final, BRGM/RP 60807-FR.
- [12]. SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.
- [13]. GRONDIN Aurélie 2011, valorisation des granulats recyclés de béton, Cellule économique du bâtiment et des travaux publics d'Alsace, Mémoire Projet de fin d'étude: CEBTP Alsace.
- [14]. Document COPRO : PTV 406, Version 1.7, 2003-10-02, Organisme Impartial de Contrôle de Produits pour la Construction, Rue de Termonde 168 - 1083 BRUXELLES, PROJET.
- [15]. Guides d'utilisation des matériaux lorrains en technique routière.
- [16]. V. Bastone, A. Rey, J. Druon (2012) – Guide d'utilisation des déchets recyclés pour le BTP à la Réunion (974). Rapport final. Rapport BRGM/RP-60806-FR, 56 p., 20 fig., 10 tab.

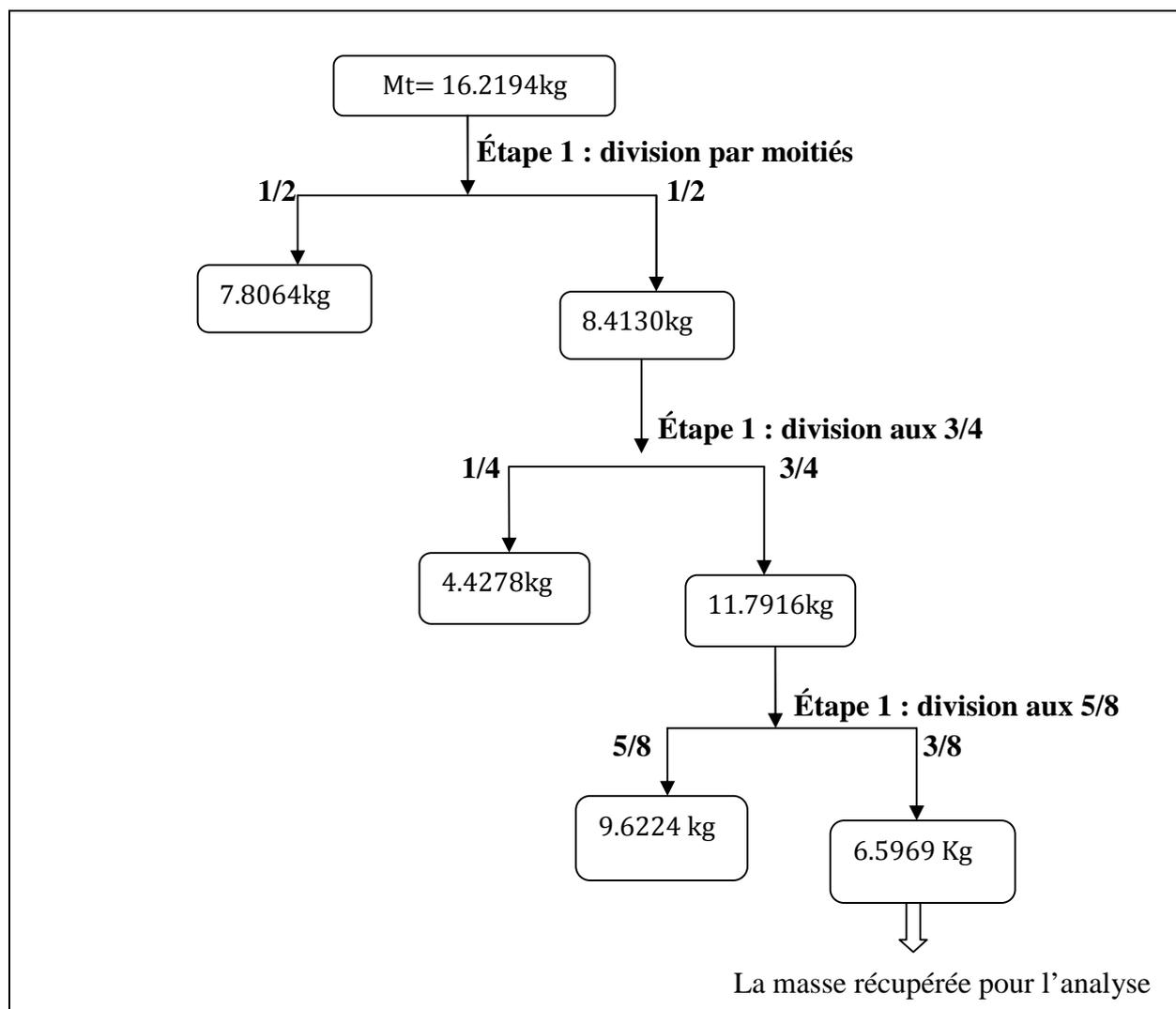
- [17]. Guide technique pour l'utilisation des matériaux alternatifs de bourgogne. Les graves de recyclage issues de la déconstruction du BTP.
- [18]. Québec, Suzanne Burelle, ing. M. Sc. Direction des politiques en milieu terrestre, juin 2009, lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique et d'asphalte issus des travaux de construction et de démolition et des résidus du secteur de la pierre de taille.,
- [19]. AFNOR (1996) - NF EN 932-1, Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats -partie 1 : méthodes d'échantillonnage.
- [20]. NF EN 933-1/A1, février 2006– Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1 : détermination de la granularité – Analyse granulométrique par tamisage.
- [21]. NF EN 1097-6, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats — Partie 6 : Détermination de la masse volumique réelle et de l'absorption d'eau.
- [22]. NF EN 933-9, déc. 2009– Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 9 : qualification des fines, essai au bleu de méthylène -
- [23]. NF EN 1097-2, Juin 2010, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 2 : méthode pour la détermination de la résistance à la fragmentation.
- [24]. ROUESSAC, F. and ROUESAC, 1998 « A. Analyse chimique: Méthodes et techniques Instrumentales Modernes, 4ème Edition, Dunod », P129.
- [25]. EN-12390-3, avril 2012, Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes.
- [26]. Pierre-Arnaud DUCLOS, le 9 juillet 2012, impacts morpho-sédimentaires, de l'extraction de granulats marins, thèse de doctorat de l'université de rouen.
- [27]. IREX, Septembre 2010, Etude d'opportunité pour un Projet National de R&D sur le recyclage complet des betons, pilotée par Horacio, colina de l'atilh.

I. Résultats de quartage de sable, et division de différentes fractions granulaires

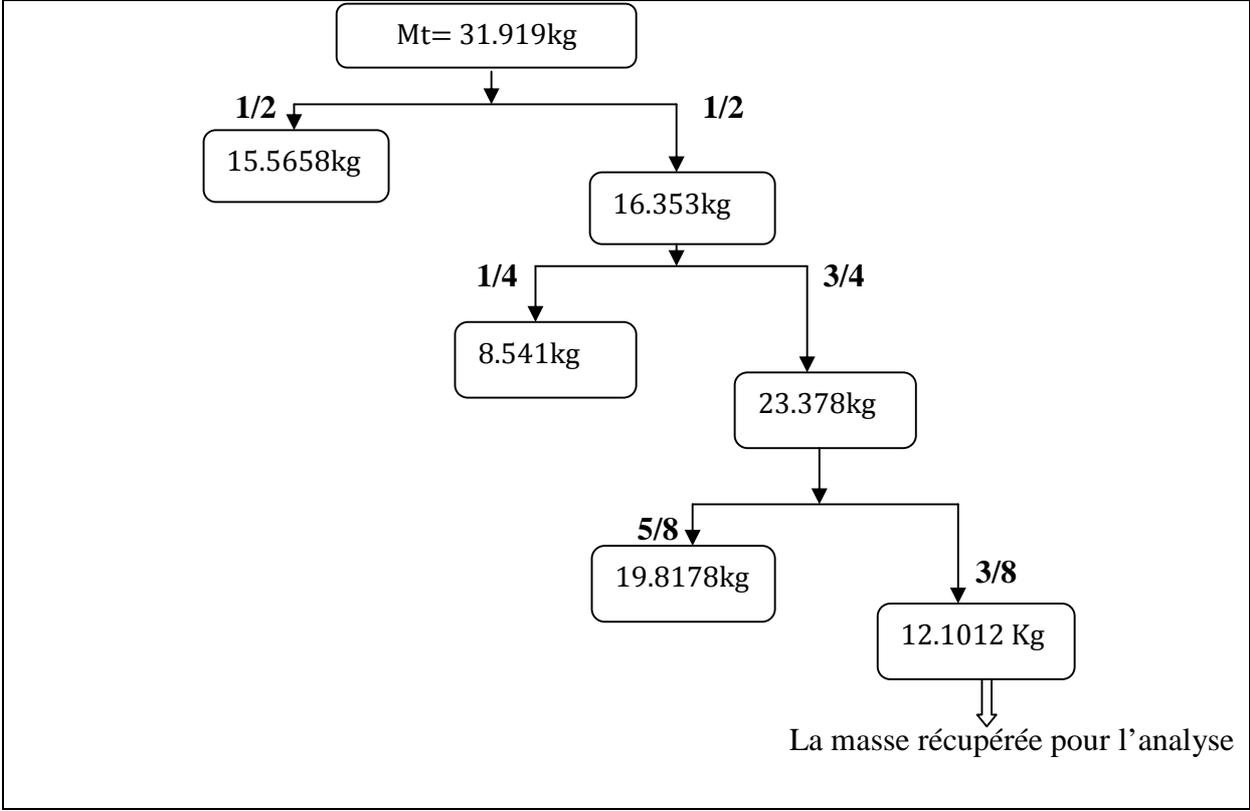
✚ Opération de quartage.



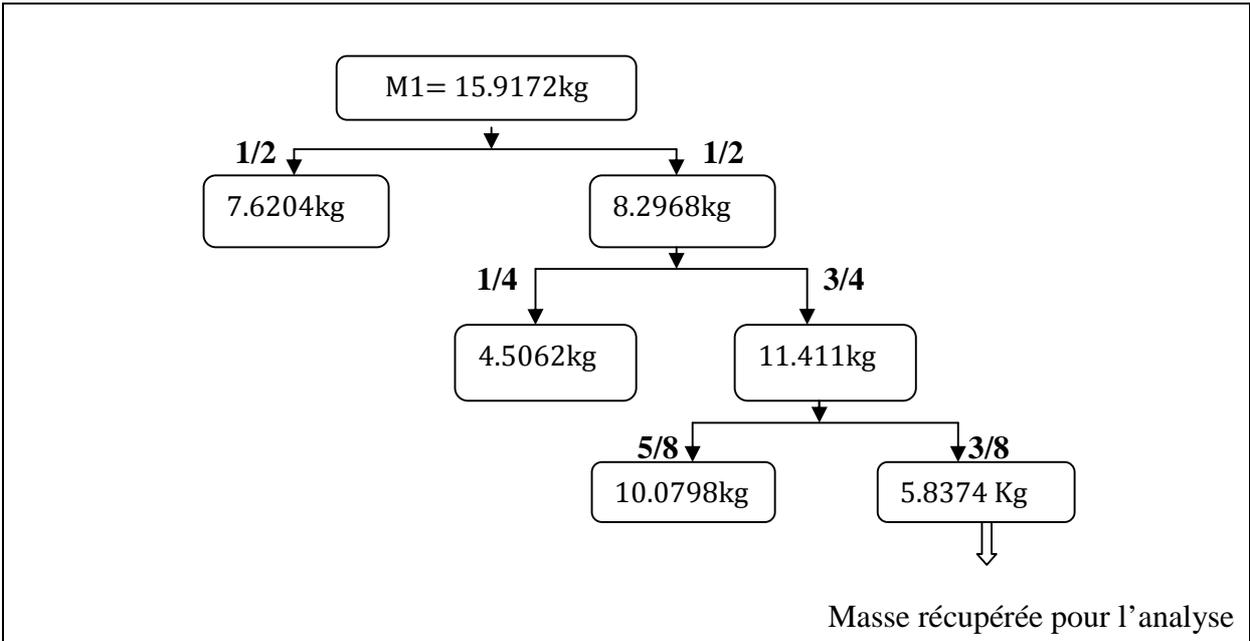
✚ Division : fraction 3/8



 Fraction 8/15



 Fraction 15/25



II. Analyse granulométrique

1- Les tableaux suivants présentent les résultats de l'analyse granulométrique obtenus, pour les granulats naturels :

Analyse granulométrique des granulats naturels (classe 0/4)

Laboratoire MDC- génie civile			
Université Abderrahmane-mira Bejaïa			
ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE NORME EN 933-1			
FEUILLE D'ESSAI			
Opérateur : -MANSEUR NABIL et ZIANI SIFAX		Date de prélèvement : 01/04/2014.	
Classe granulaire : 0/4mm		Lieu de prélèvement : Débit. (Station ARJA)	
Provenance: carrière Adrar Oufernou Béjaïa			
Procédé utilisé : Lavage et tamisage			
Masse sèche totale $M_1 =$	1521,60 g		
Masse sèche après lavage $M_2 =$	1363,2 g		
Masse sèche des fines retirées par lavage $M_1 - M_2 =$	158,4 g		
Tamis ouverture en millimètres	Masse refus cumulés (R _i) en grammes	Pourcentage refus cumulés $R_i / M_1 \times 100$	Pourcentage de tamisat cumulés $100 - \sum(R_i / M_1 \times 100)$
8	0	0,00	100
6,3	0	0,00	100,00
5	0	0,00	100,00
4	53,2	3,50	96,50
2	485	31,87	68,13
1	825,2	54,23	45,77
0,5	1076,8	70,77	29,23
0,25	1227,8	80,69	19,31
0,125	1315,6	86,46	13,54
0,063	1358	89,25	10,75
FT	1361,6	89,48	10,52
Matériau resté au fond P = 3,60 g		OBSERVATIONS:	
% de tamisat des fines (f) sur le tamis de 63 µm = $(M_1 - M_2) + P \times 100 =$ M1 10,65 %		1- f = 10,65 < 16 % : Conforme à la norme XP P18-545.	
$\sum R_i + P =$ 1361,60 g		2- Granularité: R.A.S. XP P18-545.	
$M_2 - [\sum R_i + P] \times 100 =$ M2 0,12 < 1%		3-Module de finesse $M_f(\%) =$ 3,28 compris à la limite supérieure du seuil normalisé: (4,0 à 2,4) . C'est un sable à gros grains.	
ANALYSE CORRECTE			

Analyse granulométrique des granulats naturels (classe 3/8)

Laboratoire MDC- génie civile			
Université Abderrahmane-mira Bejaïa			
ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE NORME EN 933-1			
FEUILLE D'ESSAI			
Opérateur : -MANSEUR NABIL et ZIANI SIFAX		Date de prélèvement : 01/04/2014.	
Classe granulaire : 3/8 mm		Lieu de prélèvement : Débit. (Station ARJA)	
Provenance: carrière Adrar Oufernou Béjaïa			
Procédé utilisé : Lavage et tamisage			
Masse sèche totale $M_1 =$	3046,8 g		
Masse sèche après lavage $M_2 =$	3018,4 g		
Masse sèche des fines retirées par lavage $M_1 - M_2 =$	28,4 g		
Tamis ouverture en millimètres	Masse refus cumulés (R _i) en grammes	Pourcentage refus cumulés $R_i / M_1 \times 100$	Pourcentage de tamisat cumulés $100 - \sum(R_i / M_1 \times 100)$
16	0,00	0,00	100,00
12,5	0,00	0,00	100,00
10	0,00	0,00	100,00
8	106,00	3,48	96,52
6,3	593,4	19,48	80,52
4	2866,2	94,07	5,93
3,15			
2	3002,8	98,56	1,44
1	3011	98,82	1,18
0,063	3015,6	98,98	1,02
FT	3016	98,99	1,01
Matériau resté au fond $P =$		0,4 g	OBSERVATIONS: 1- $f = 0,95 < 1,5 \%$: Conforme à la norme de la norme XP P18-545. 2-Granularité : R.A.S
% de tamisat des fines (f) sur le tamis de 63 μm = $(M_1 - M_2) + P \times 100 =$		0,95 %	
$M_2 - [\sum R_i + P] \times 100 =$		0,08 < 1%	
ANALYSE CORRECTE			

Analyse granulométrique des granulats naturels (classe 8/15)

Laboratoire MDC- génie civile			
Université Abderrahmane-mira Bejaïa			
ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE NORME EN 933-1			
FEUILLE D'ESSAI			
Opérateur : -MANSEUR NABIL et ZIANI SIFAX		Date de prélèvement : 01/04/2014.	
Classe granulaire : 8/15 mm		Lieu de prélèvement : Débit. (Station ARJA)	
Provenance:carriere Adrar Oufernou Béjaïa			
Procédé utilisé : Lavage et tamisage			
Masse sèche totale $M_1 =$	4669,4 g		
Masse sèche après lavage $M_2 =$	4642,8 g		
Masse sèche des fines retirées par lavage $M_1 - M_2 =$	26,6 g		
Tamis ouverture en millimètres	Masse refus cumulés (Ri) en grammes	Pourcentage refus cumulés $R_i / M_1 \times 100$	Pourcentage de tamisat cumulés $100 - \Sigma(R_i / M_1 \times 100)$
31,5	0,00	0,00	100,00
25	0,00	0,00	100,00
20	0,00	0,00	100,00
16	156,80	3,36	96,64
12,5	1394,40	29,86	70,14
10	2818,20	60,35	39,65
8	3885,8	83,22	16,78
6,3	4550,2	97,45	2,55
4	4622,2	98,99	1,01
2	4630,2	99,16	0,84
1	4632,8	99,22	0,78
0,063	4637,8	99,32	0,68
FT	4638,6	99,34	0,66
Matériau resté au fond P = 0,8 g		OBSERVATIONS: 1- f = 0,59 < 1,5 % : conforme aux exigences de la norme XP P18-545. 2-Granularité: R.A.S	
% de tamisat des fines (f) sur le tamis de 63 µm = $\frac{(M_1 - M_2) + P \times 100}{M_1} =$ 0,59 %			
$\Sigma R_i + P =$ 4638,6 g			
$M_2 - [\Sigma R_i + P] \times 100 =$ 0,090 < 1%			
M2			
ANALYSE CORRECTE			

Analyse granulométrique des granulats naturels (classe 15/25)

Laboratoire MDC- génie civile			
Université Abderrahmane-mira Bejaïa			
ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE NORME EN 933-1			
FEUILLE D'ESSAI			
Opérateur : -MANSEUR NABIL et ZIANI SIFAX		Date de prélèvement : 01/04/2014.	
Classe granulaire : 15/25 mm		Lieu de prélèvement : Débit. (STATION ARJA)	
Provenance: carriere Adrar Oufernou Béjaïa			
Procédé utilisé : Lavage et tamisage			
Masse sèche totale $M_1 =$	6574,8 g		
Masse sèche après lavage $M_2 =$	6558,4 g		
Masse sèche des fines retirées par lavage $M_1 - M_2 =$	16,4 g		
Tamis ouverture en millimètres	Masse refus cumulés (R _i) en grammes	Pourcentage refus cumulés $R_i / M_1 \times 100$	Pourcentage de tamisat cumulés $100 - \Sigma (R_i / M_1 \times 100)$
50	0,00	0	100,00
40	0,00	0,00	100,00
31,5	0,00	0,00	100,00
25	88,80	1,35	98,65
20	3612,60	54,95	45,05
16	6258,60	95,19	4,81
12,5	6524,40	99,23	0,77
10	6543,20	99,52	0,48
8	6546,40	99,57	0,43
4	6551,00	99,64	0,36
0,063	6556,00	99,71	0,29
FT	6556,80	99,73	0,27
Matériau resté au fond P = 0,80 g		OBSERVATIONS: 1- f = 0,26 < 1,5 % : conforme aux exigences de la norme XP P18-545 . 2-Granularité : Conforme aux exigences de la norme XP P18-545 .	
% de tamisat des fines (f) sur le tamis de 63 µm = $\frac{(M_1 - M_2) + P \times 100}{M_1} =$ 0,26 %			
$\Sigma R_i + P =$ 6556,80 g			
$M_2 - [\Sigma R_i + P] \times 100 =$ 0,02 < 1%			
ANALYSE CORRECTE			

2- Les tableaux suivants présentent les résultats de l'analyse granulométrique obtenus, pour les granulats recyclés :

Analyse granulométrique des granulats recyclés, (classe 0/4)

Laboratoire MDC- génie civile			
Université Abderrahmane-mira Bejaïa			
ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE NORME EN 933-1			
FEUILLE D'ESSAI			
Opérateur : -MANSEUR NABIL et ZIANI SIFAX		Date de prélèvement : 1/04/2014.	
Classe granulaire : 0/4mm		Lieu de prélèvement : granulat recyclé d'un ancien béton réalisé par l'entreprise EBC dans les années 1990,	
Provenance: granulats débéton de démolition			
Procédé utilisé : Lavage et tamisage			
Masse sèche totale $M_1 =$	2300,00 g		
Masse sèche après lavage $M_2 =$	2145 g		
Masse sèche des fines retirées par lavage	M1 - M2 = 155 g		
Tamis ouverture en millimètres	Masse refus cumulés (Ri) en grammes	Pourcentage refus cumulés $R_i / M_1 \times 100$	Pourcentage de tamisat cumulés $100 - \sum(R_i / M_1 \times 100)$
8	0	0,00	100,00
6,3	0	0,00	100,00
5	0	0,00	100,00
4	0,3	0,01	99,96
2	895,6	40,70	59,15
1	1405,2	63,86	35,91
0,5	1697,1	77,14	22,28
0,25	1916,1	87,09	11,97
0,125	2069,1	94,05	4,70
0,063	2139,1	97,23	1,24
FT	2142,1	97,36	1,10
Matériau resté au fond $P =$ 3,00 g		OBSERVATIONS:	
% de tamisat des fines (f) sur le tamis de 63 μm = $(M_1 - M_2) + P \times 100 =$ 6,87		1- $f = 6,87 < 16 \%$: Conforme à la norme XP P18-545.	
$\sum R_i + P =$ 2142,10		2- Granularité: R.A.S. XP P18-545.	
$M_2 - [\sum R_i + P] \times 100 :$ 0,14 < 1%		3- Module de finesse $M_f(\%) = 3,63$ compris à la limite supérieure du seuil normalisé: (4,0 à 2,4) C'est un sable à gros grains.	
ANALYSE CORRECTE			

Analyse granulométrique des granulats recyclés, (classe 3/8)

Laboratoire MDC- génie civile			
Université Abderrahmane-mira Bejaïa			
ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE NORME EN 933-1			
FEUILLE D'ESSAI			
Opérateur : -MANSEUR NABIL et ZIANI SIFAX		Date de prélèvement : 1/04/2014.	
Classe granulaire : 3/8 mm		Lieu de prélèvement : granulat recyclé d'un ancien béton réalisé par l'entreprise EBC dans les années 1990,	
Provenance: granulats de béton de démolition			
Procédé utilisé : Lavage et tamisage			
Masse sèche totale $M_1 =$	6596,9 g		
Masse sèche après lavage $M_2 =$	6526,6 g		
Masse sèche des fines retirées par lavage	$M_1 - M_2 = 70,03 \text{ g}$		
Tamis ouverture en millimètres	Masse refus cumulés (R _i) en grammes	Pourcentage refus cumulés $R_i / M_1 \times 100$	Pourcentage de tamisat cumulés $100 - \sum(R_i / M_1 \times 100)$
16	0,00	0,00	100,00
12,5	0,00	0,00	100,00
10	0,00	0,00	100,00
8	300,07	4,55	95,45
6,3	1822,67	27,63	72,37
4	3263,79	49,47	50,53
2	4639,38	70,33	29,67
1	5476,81	83,02	16,98
0,063	6522,7	98,88	1,12
FT	6524,9	98,91	1,09
Matériau resté au fond P = 2,2 g		OBSERVATIONS: 1- $f = 1.09 < 1,5 \%$: Conforme à la norme de la norme XP P18-545. 2- Granularité : R.A.S	
% de tamisat des fines (f) sur le tamis de 63 µm = $\frac{(M_1 - M_2) + P \times 100}{M_1} =$ 1,09			
$\frac{M_2 - [\sum R_i + P] \times 100}{M_2} =$ 0,03 < 1%			
ANALYSE CORRECTE			

Analyse granulométrique des granulats ordinaires (classe 8/15)

Laboratoire MDC- génie civile			
Université Abderrahmane-mira Bejaïa			
ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE NORME EN 933-1			
FEUILLE D'ESSAI			
Opérateur : -MANSEUR NABIL et ZIANI SIFAX		Date de prélèvement : 1/04/2014.	
Classe granulaire : 8/15 mm		Lieu de prélèvement : granulat recyclé d'un ancien béton réalisé par l'entreprise EBC dans les année 1990,	
Provenance: granulats débéton de démolition			
Procédé utilisé : Lavage et tamisage			
Masse sèche totale $M_1 =$	12101.2 g		
Masse sèche après lavage $M_2 =$	12048,7 g		
Masse sèche des fines retirées par lavage $M_1 - M_2 =$	52,5g		
Tamis ouverture en millimètres	Masse refus cumulés (Ri) en grammes	Pourcentage refus cumulés $R_i / M_1 \times 100$	Pourcentage de tamisat cumulés $100 - \Sigma(R_i / M_1 \times 100)$
31,5	0,00	0,00	100,00
25	0,00	0,00	100,00
20	0,00	0,00	100,00
16	356,80	2,95	97,05
12,5	7004,00	57,88	42,12
10	10844,10	89,61	10,39
8	11659,1	96,35	3,65
6,3	11850,1	97,92	2,08
5	11968,1	98,90	1,10
4	11970,1	98,92	1,08
0,063	12045,1	99,54	0,46
FT	12047,5	99,56	0,44
Matériau resté au fond P = 2,4 g		OBSERVATIONS: 1- $f = 0,43 < 1,5 \%$: conforme aux exigences de la norme XP P18-545 . 2-Granularité: R.A.S	
% de tamisat des fines (f) sur le tamis de 63 μm = $\frac{(M_1 - M_2) + P \times 100}{M_1} =$ 0,43 %			
$\Sigma R_i + P =$ 12047,5 g			
$M_2 - [\Sigma R_i + P] \times 100 =$ 0,010 < 1%			
M2			
ANALYSE CORRECTE			

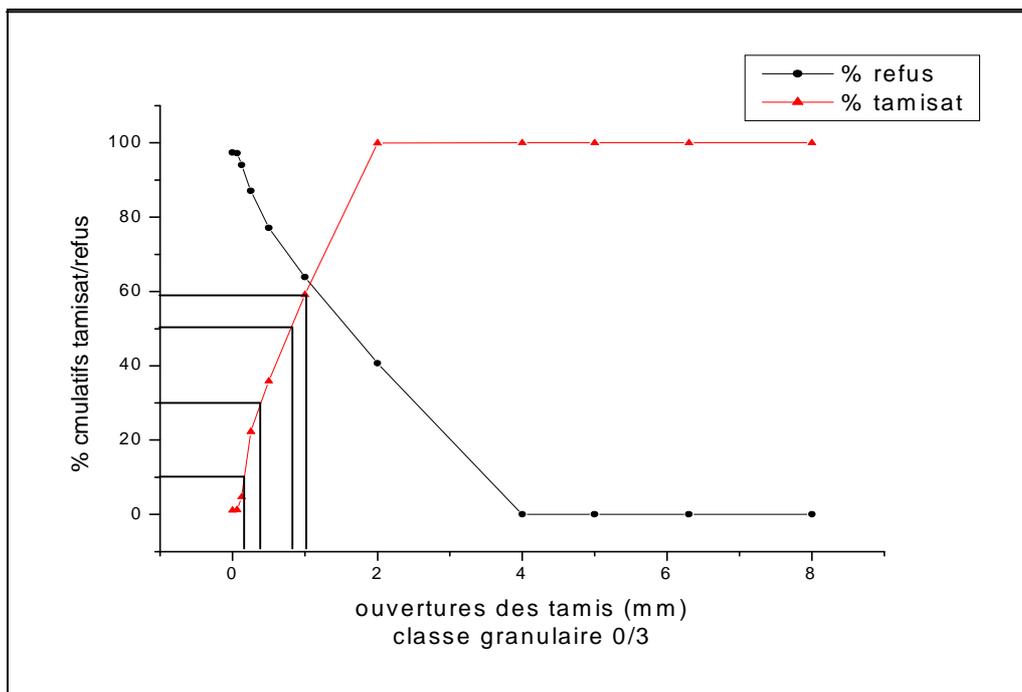
Analyse granulométrique des granulats ordinaires (classe 15/25)

Laboratoire MDC- génie civile			
Université Abderrahmane-mira Bejaïa			
ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE NORME EN 933-1			
FEUILLE D'ESSAI			
Opérateur :		Date de prélèvement : 1/04/2014.	
Classe granulaire : 15/25 mm		Lieu de prélèvement : granulat recyclé d'un ancien béton réalisé par l'entreprise EBC dans les années 1990,	
Provenance: granulats de béton de démolition			
Procédé utilisé : Lavage et tamisage			
Masse sèche totale $M_1 =$	5888,5 g		
Masse sèche après lavage $M_2 =$	5868,5 g		
Masse sèche des fines retirées par lavage $M_1 - M_2 =$	20 g		
Tamis ouverture en millimètres	Masse refus cumulés (R _i) en grammes	Pourcentage refus cumulés $R_i / M_1 \times 100$	Pourcentage de tamisat cumulés $100 - \sum (R_i / M_1 \times 100)$
50	0,00	0	100,00
			100,00
40	0,00	0,00	100,00
31,5	0,00	0,00	100,00
25	34,40	0,58	99,42
20	1071,60	18,20	81,80
			100,00
16	4778,80	81,15	18,85
12,5	5749,40	97,64	2,36
10	5805,40	98,59	1,41
8	5812,40	98,71	1,29
4	5838,60	99,15	0,85
0,063	5862,60	99,56	0,44
FT	5866,60	99,63	0,37
Matériau resté au fond P = 4,00 g		OBSERVATIONS: 1- f = 0,26 < 1,5 % : conforme aux exigences de la norme XP P18-545 . 2-Granularité : conforme aux exigences de la norme XP P18-545 .	
% de tamisat des fines (f) sur le tamis de 63 µm = $\frac{(M_1 - M_2) + P \times 100}{M_1}$ = 0,41 %			
$\sum R_i + P =$ 5866,60 g			
$M_2 - [\sum R_i + P] \times 100 :$ 0,03 < 1%			
ANALYSE CORRECTE			

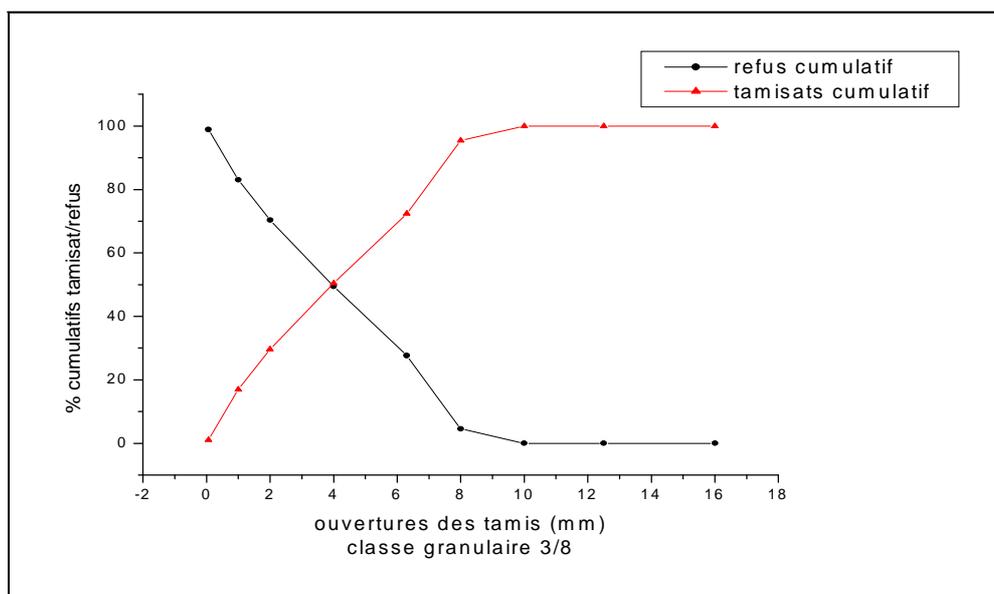
II.1. Identifications des courbes granulométriques de différentes classes granulaires

Les figures suivantes représentent la distribution granulométriques.

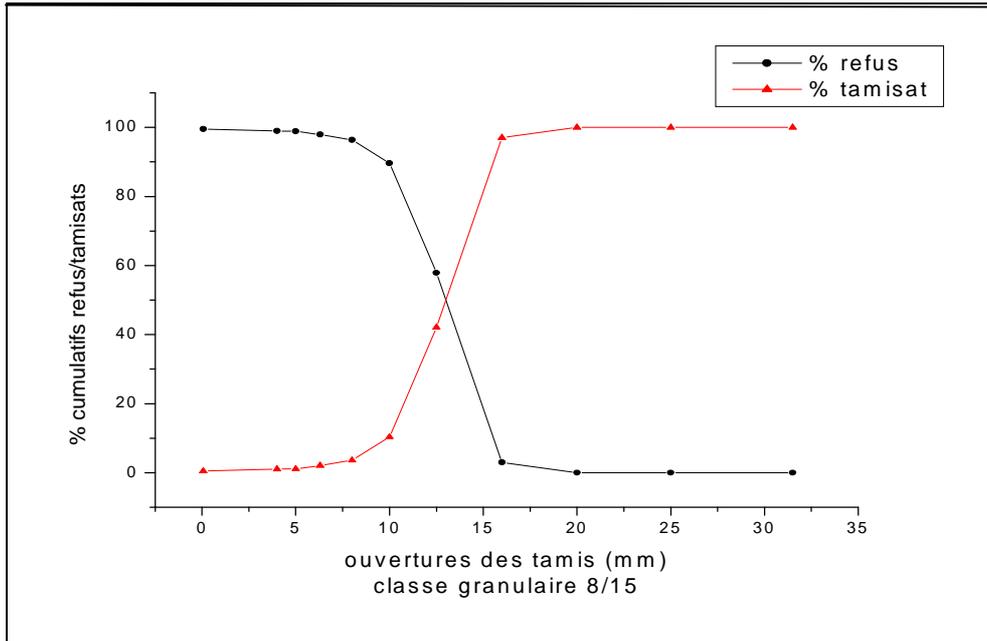
1-Granulats recyclés :



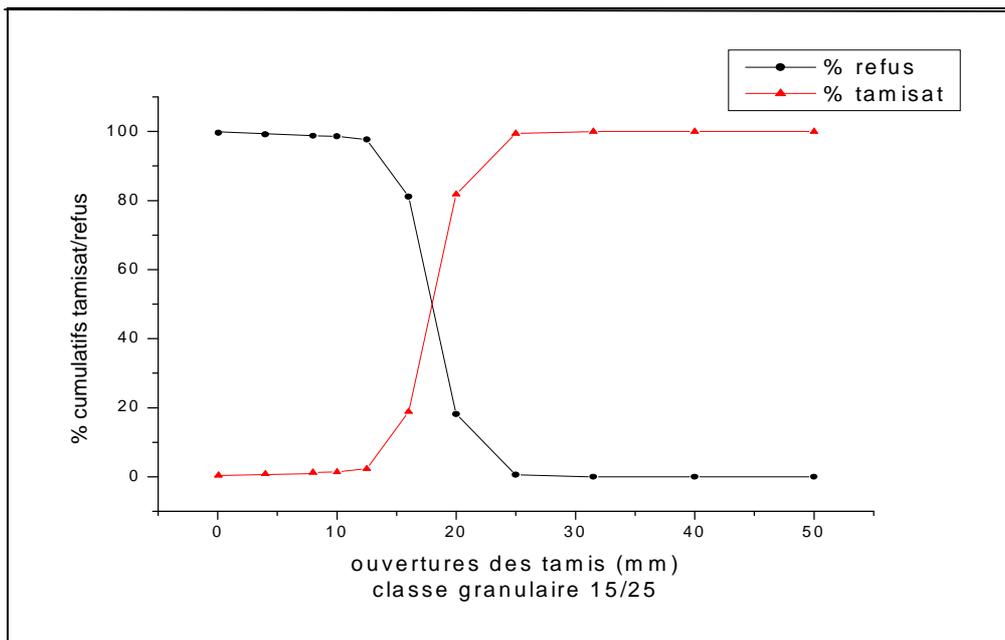
Courbe granulométrique de la fraction 0/3



Courbe granulométrique de la fraction 3/8

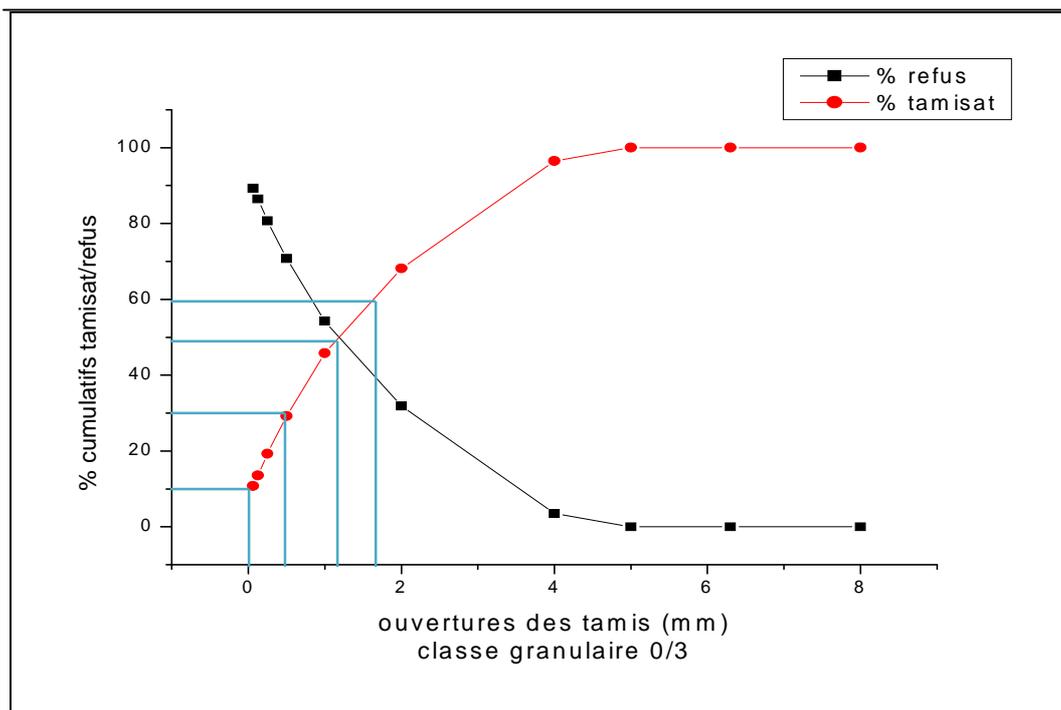


Courbe granulométrique de la fraction 8/15

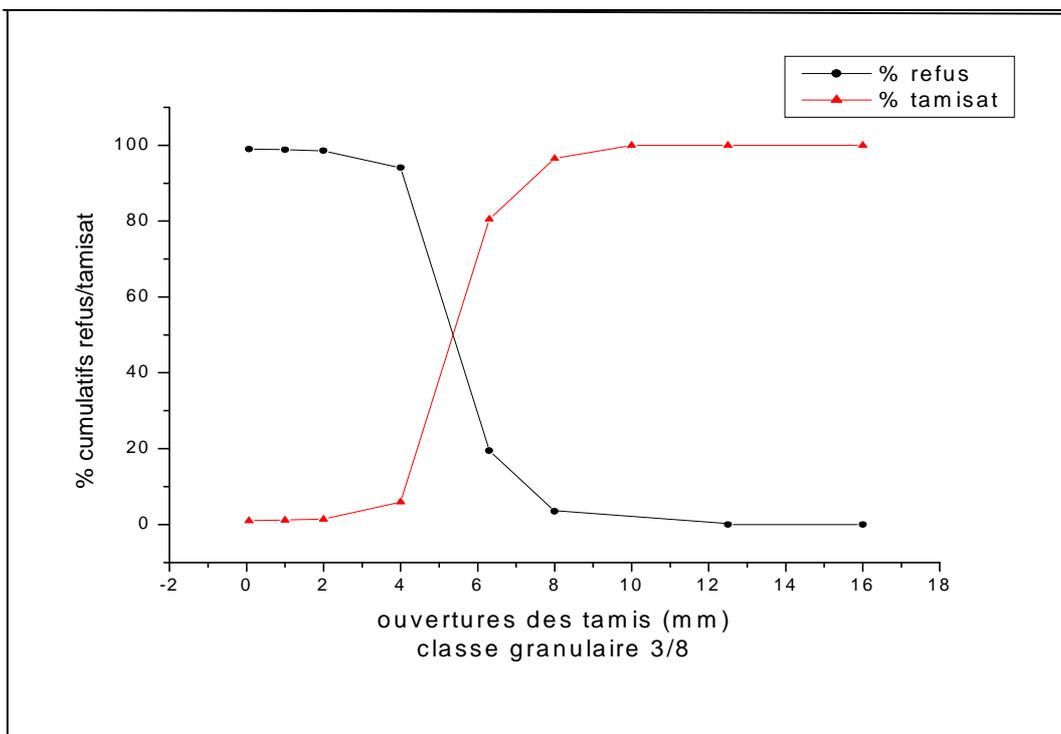


Courbe granulométrique de la fraction 15/25

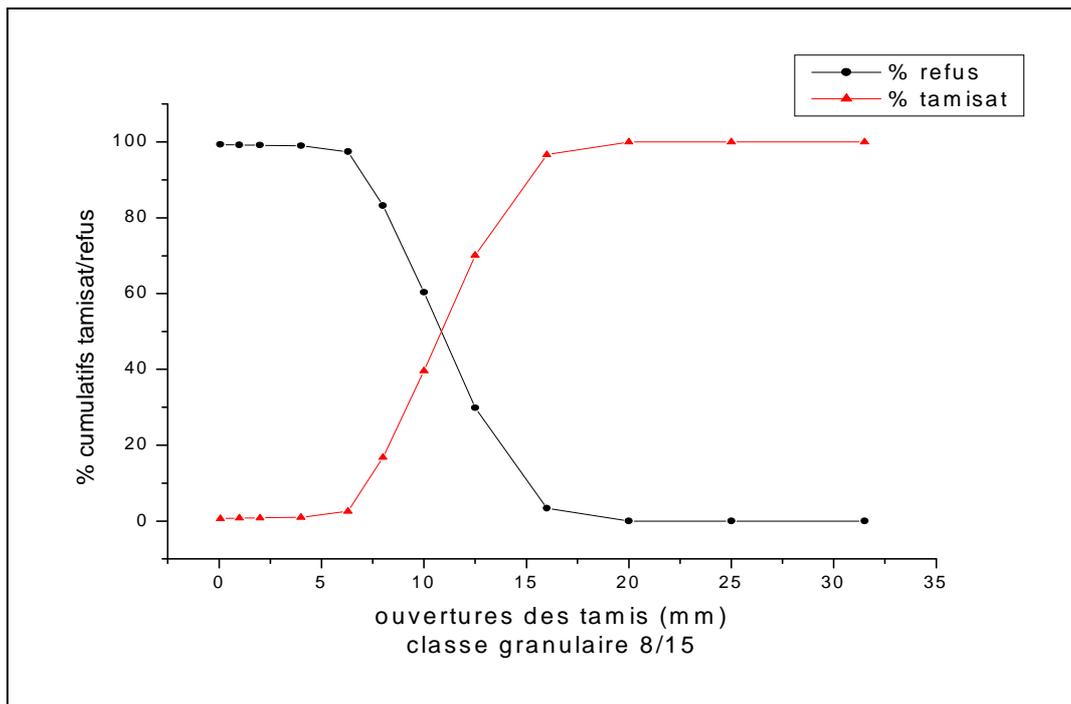
2. Granulats naturels



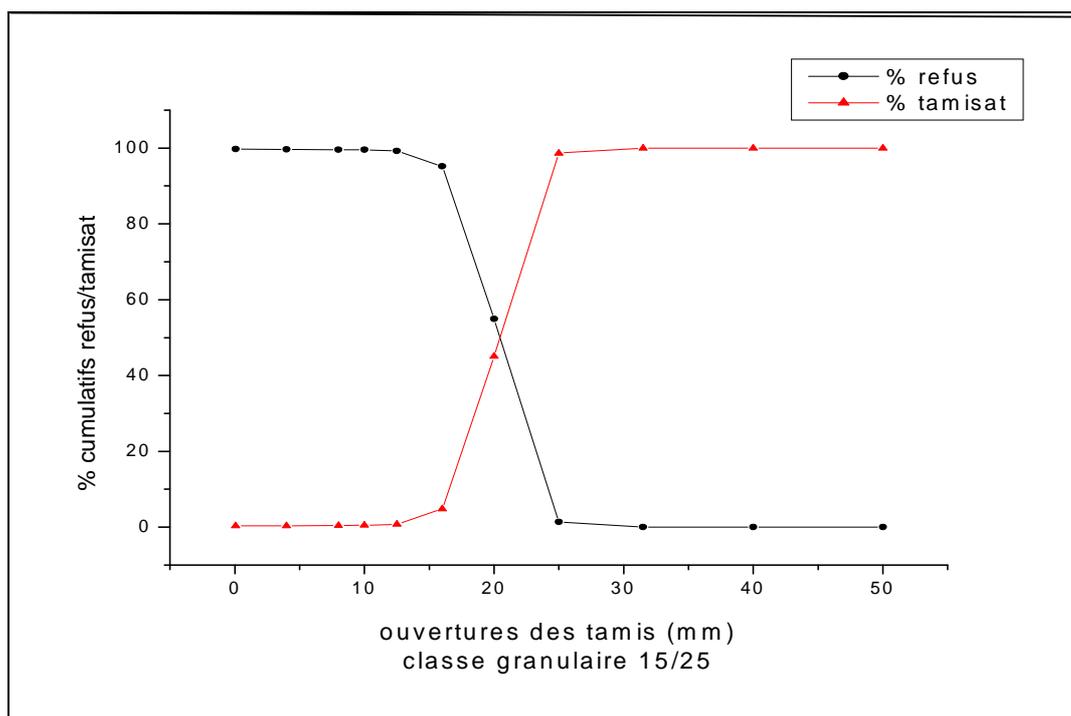
Courbe granulométrique de la fraction 0/3



Courbe granulométrique de la fraction 3/8



Courbe granulométrique de la fraction 8/15



Courbe granulométrique de la fraction 15/25

III. Détermination des coefficients d'aplatissement

1. Granulats recyclés

(Classe 8/15)

Laboratoire MDC- génie civile Université Abderrahmane- mira Bejaïa				
Détermination du coefficient d'aplatissement norme EN933-3				
Feuille de résultats d'essai				
Operateurs : - MANSEUR NABIL - ZIANI SYPHAX		date de prélèvement : 02/04/2014		
Classe granulaire : 8/15 mm		lieu de prélèvement : granulats recyclés étaient un ancien béton réalisé par l'entreprise EBC dans les années 1990		
Échantillon : Gravier				
Provenance : granulats recyclés de béton de démolition				
La masse de la prise d'essai : $M_0 = 12048,7\text{g}$		Refus sur un tamis de 80 mm = 0 g Refus sur un tamis de 4 mm = 77.4 g Somme des masses éliminées = 77.4 g		
Tamisage sur tamis d'essai		Tamisage sur grille à fente		
Fraction granulométrique di/Di (mm)	Masse (Ri) de granulats éliminés di/Di (g)	Largeur de fentes de la grille (mm)	Passent sur une grille à fentes mi (mm)	$A_i = m_i/R_i * 100$
63/80		40 ± 0.5		
50/63		31.5 ± 0.5		
40/50		25 ± 0.4		
31.1/40		20 ± 0.4		
25/31.1	0,00	16 ± 0.4		
20/25	0,00	12.5 ± 0.4		
16/20	356,80	10 ± 0.2	21.4	5.9
12.5/16	7004,00	8 ± 0.2	378.4	5.6
10/12.5	10844,10	6.3 ± 0.2	253	6.5
8/10	11659,1	5 ± 0.2	56.6	6.9
6.3/8	11850,1	4 ± 0.15	15	7.8
5/6.3	11968,1	3.15 ± 0.15	6.4	5.42
4/5	11970,1	2.5 ± 0.15	1.2	6.0
$M_1 = \sum R_i = 11970.1\text{ g}$		$M_2 = \sum m_i = 732\text{ g}$		
Le coefficient d'aplatissement $A = M_2/M_1 * 100 = 6.11\%$				
$100 * M_0 - (\sum R_i + \sum (\text{masses éliminées}))$			Analyse correcte	
M_0				
Observation : $A = 6.11\% < 15$, donc le 8/15 présente une forme conforme à la norme XP P18-545				

(Classe 15/25)

Laboratoire MDC- génie civile				
Université Abderrahmane- mira Bejaïa				
Détermination du coefficient d'aplatissement norme EN933-3				
Feuille de résultats d'essai				
Operateurs : - MANSEUR NABIL - ZIANI SYPHAX		date de prélèvement : 02/04/2014		
Classe granulaire : 15/25 mm		lieu de prélèvement : granulat recyclé était un ancien		
Échantillon : Gravier		béton réalisé par l'entreprise EBC dans les années		
Provenance : granulats recyclé de		1990.		
béton de démolition				
La masse de la prise d'essai : $M_0 = 5868,5g$		Refus sur un tamis de 80 mm= 0.00 g		
		Refus sur un tamis de 4 mm= 54.2 g		
		Somme des masse éliminées= 54.2 g		
Tamisage sur tamis d'essai		Tamisage sur grille à fente		
Fraction granulométrique d_i/D_i (mm)	Masse (R_i) de granulat éliminent d_i/D_i (g)	Largeur de fentes de la grille (mm)	Passent sur une grille à fentes m_i (mm)	$A_i = m_i/R_i * 100$
63/80		40 ± 0.5		
50/63		31.5 ± 0.5		
40/50	0,00	25 ± 0.4		
31.1/40	0.00	20 ± 0.4		
25/31.1	34,40	16 ± 0.4	5.3	15.4
20/25	1071,60	12.5 ± 0.4	100	9.64
16/20	4778,80	10 ± 0.2	136.4	3.6
12.5/16	5749,40	8 ± 0.2	35.2	3.62
10/12.5	5805,40	6.3 ± 0.2	0.8	1.42
8/10	5812,40	5 ± 0.2	0.6	8.5
$M_1 = \sum R_i = 5812.40$ g		$M_2 = \sum m_i = 278.3$ g		
Le coefficient d'aplatissement $A = M_2/M_1 * 100 = 5.28$ %				
$100 * M_0 - (\sum R_i + \sum (\text{masses éliminées})) = 0.03 < 1\%$			Analyse correcte	
M_0				
Observation : $A = 5.28$ %, donc le 15/25 présent une forme conforme à la norme XP P18-545				

2. Granulats naturels sont

(Classe 8/15)

Laboratoire MDC- génie civile				
Université Abderrahmane- mira Bejaïa				
Détermination du coefficient d'aplatissement norme EN933-3				
Feuille de résultats d'essai				
Operateurs : - MANSEUR NABIL - ZIANI SYPHAX		date de prélèvement : 02/04/2014		
Classe granulaire : 8/15 mm		lieu de prélèvement : granulats recyclés étaient un ancien		
Échantillon : Gravier		béton réalisé par l'entreprise EBC dans les années		
Provenance : granulats recyclés de		1990.		
béton de démolition				
La masse de la prise d'essai : $M_0 = 5868,5\text{g}$		Refus sur un tamis de 80 mm = 0.00 g		
		Refus sur un tamis de 4 mm = 54.2 g		
		Somme des masses éliminées = 54.2 g		
Tamisage sur tamis d'essai		Tamisage sur grille à fente		
Fraction granulométrique d_i/D_i (mm)	Masse (R_i) de granulats éliminés d_i/D_i (g)	Largeur de fentes de la grille (mm)	Passent sur une grille à fentes m_i (mm)	$A_i = m_i/R_i * 100$
63/80		40 ± 0.5		
50/63		31.5 ± 0.5		
40/50		25 ± 0.4		
31.1/40	0.00	20 ± 0.4		
25/31.1	0.00	16 ± 0.4		
20/25	0.00	12.5 ± 0.4		
16/20	70.2	10 ± 0.2	9.4	13.39
12.5/16	863.2	8 ± 0.2	162.8	11.70
10/12.5	1227	6.3 ± 0.2	130.4	10.63
8/10	1033	5 ± 0.2	111.8	10.82
6.3/8	714.2	4 ± 0.15	75.2	10.53
5/6.3	163.2	3.15 ± 0.15	21.4	13.11
4/5	44.8	2.5 ± 0.15	4.4	9.82
$M_1 = \sum R_i = 4115.6\text{ g}$		$M_2 = \sum m_i = 515.4\text{ g}$		
Le coefficient d'aplatissement $A = M_2/M_1 * 100 = 12.52\%$				
$100 * M_0 - (\sum R_i + \sum (\text{masses éliminées})) = 0.08 < 1\%$			Analyse correcte	
M_0				
Observation : $A = 12.52\%$, donc le 8/15 présente une forme conforme à la norme XP P18-545				

(Classe 15/25)

Laboratoire MDC- génie civile				
Université Abderrahmane- mira Bejaïa				
Détermination du coefficient d'aplatissement norme EN933-3				
Feuille de résultats d'essai				
Operateurs : - MANSEUR NABIL - ZIANI SYPHAX		date de prélèvement : 02/04/2014		
Classe granulaire : 15/25 mm		lieu de prélèvement : granulat recyclé était un ancien		
Échantillon : Gravier		béton réalisé par l'entreprise EBC dans les années		
Provenance : granulats recyclé de		1990.		
béton de démolition				
La masse de la prise d'essai : $M_0 = 5000$ g		Refus sur un tamis de 80 mm = 0.00 g		
		Somme des masse éliminées = 5 g		
Tamisage sur tamis d'essai		Tamisage sur grille à fente		
Fraction granulométrique d_i/D_i (mm)	Masse (R_i) de granulat éliminent d_i/D_i (g)	Largeur de fentes de la grille (mm)	Passent sur une grille à fentes m_i (mm)	$A_i = m_i/R_i * 100$
63/80		40 ± 0.5		
50/63		31.5 ± 0.5		
40/50	0,00	25 ± 0.4		
31.1/40	0.00	20 ± 0.4		
25/31.1	0.00	16 ± 0.4		
20/25	1157	12.5 ± 0.4	142	12.28
16/20	2883	10 ± 0.2	436	15.12
12.5/16	899	8 ± 0.2	138	15.35
10/12.5	56	6.3 ± 0.2	4	7.14
8/10	0	5 ± 0.2	0	0
$M_1 = \sum R_i = 4995$ g		$M_2 = \sum m_i = 720$ g		
Le coefficient d'aplatissement $A = M_2/M_1 * 100 = 14.41$ %				
$100 * M_0 - (\sum R_i + \sum (\text{masses éliminées})) = 0.1 < 1\%$			Analyse correcte	
M_0				
Observation : $A = 14$ %, donc le 15/25 présent une forme conforme à la norme XP P18-545				

I. L'essai de l'équivalent de Sable

Cet essai effectué Selon la norme NF EN933-8, Les résultats obtenus illustrer dans les tableaux suivant :

1. Granulats recyclé

<i>Laboratoire MDS- génie civile Université Abderrahmane- mira Bejaïa</i>			
<i>Évaluation des fines-équivalent de sable, norme EN933-8</i>			
<i>Feuille de résultats d'essai</i>			
<i>Operateurs : - MANSEUR NABIL - ZIANI SYPHAX</i>	<i>date de prélèvement : 02/04/2014</i>		
<i>Classe granulaire : 0/3 mm</i>	<i>lieu de prélèvement : granulat recyclé était un ancien</i>		
<i>Échantillon : Gravier</i>	<i>béton réalisé par l'entreprise EBC dans les années</i>		
<i>Provenance : granulats recyclé de</i>	<i>1990.</i>		
<i>béton de démolition</i>	<i>Eprouvette1</i>	<i>Eprouvette1</i>	<i>Eprouvette1</i>
<i>h₁ (mm)</i>	<i>12.7</i>	<i>12.1</i>	<i>11.7</i>
<i>h₂ visuel (mm)</i>	<i>10.9</i>	<i>10.0</i>	<i>9.93</i>
<i>Es (100* (h2/h1))</i>	<i>85.82</i>	<i>82.64</i>	<i>84.51</i>
<i>h₂ sous-piston (mm)</i>	<i>10.2</i>	<i>10.4</i>	<i>9.75</i>
<i>Es (100* (h2/h1))</i>	<i>80.31</i>	<i>85.95</i>	<i>83.33</i>
<i>NOTE: il convient que les valeurs de ES pour les trois éprouvettes ne différent pas plus de 4</i>			
<i>Équivalent de sable ES moyenne pou les trois éprouvettes</i>			
<i>ES_V = 84.51</i>			
<i>ES_P = 83.19</i>			

2. Granulats naturel

<i>Laboratoire MDS- génie civile Université Abderrahmane- mira Bejaïa</i>			
<i>Évaluation des fines-équivalent de sable, norme EN933-8</i>			
<i>Feuille de résultats d'essai</i>			
<i>Operateurs : - MANSEUR NABIL - ZIANI SYPHAX</i>	<i>date de prélèvement : 02/04/2014</i>		
<i>Classe granulaire : 0/3 mm</i>	<i>lieu de prélèvement : Débit.</i>		
<i>Échantillon : Gravier</i>			
<i>Provenance : granulats recyclé de béton de démolition</i>			
	<i>Eprouvette1</i>	<i>Eprouvette1</i>	<i>Eprouvette1</i>
<i>h₁ (mm)</i>	<i>11.0</i>	<i>11.35</i>	<i>11.30</i>
<i>h₂ visuel (mm)</i>	<i>7.90</i>	<i>7.85</i>	<i>8.0</i>
<i>Es (100* (h2/h1))</i>	<i>71.81</i>	<i>69.16</i>	<i>70.79</i>
<i>h₂ sous-piston (mm)</i>	<i>7.85</i>	<i>7.80</i>	<i>7.9</i>
<i>Es (100* (h2/h1))</i>	<i>71.36</i>	<i>68.72</i>	<i>69.91</i>
<i>NOTE: il convient que les valeurs de ES pour les trois éprouvettes ne diffèrent pas plus de 4</i>			
<i>Équivalent de sable ES moyenne pou les trois éprouvettes</i>			
<i>ES_V = 70.58</i>			
<i>ES_P = 69.99</i>			

II. Les masses volumiques

1. La masse volumique apparente

Tableau de résultats :

<i>fraction</i>		<i>SABLE</i>			<i>GRAVIER3/8</i>			<i>GRAVIER 8/15</i>			<i>GRAVIER 15/25</i>		
<i>Volume de recipient</i>	V_I	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020	1020
<i>Poids récipients (g)</i>	P_R	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440
<i>Poids total(g)</i>	P_T	1790	1710	1730	1570	1520	1550	1590	1630	1640	1600	1590	1600
<i>poids des matériaux (g)</i>	$P_T - P_R$	1350	1270	1686	1130	1080	1110	1150	1190	1200	1160	1150	1160
<i>Poids spécifié (g/cm³)</i>	$\frac{P_T - P_R}{V_I}$	1.32	1.24	1.65	1.10	1.05	1.08	1.12	1.16	1.17	1.13	1.12	1.13
<i>Moyennes</i>	<i>Moy(g/cm³)</i>	1.40			1.09			1.15			1.12		

2. La masse volumique absolue

		SABLE			GRAVIER3/8			GRAVIER8/15			GRAVIER15/25		
<i>Poids des matériaux</i>	<i>P</i>	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
<i>Volume initial</i>	<i>V1</i>	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
<i>Volume final</i>	<i>V2</i>	630	630	630	627	629	631	625	627	628	630	629	635
<i>Volume des matériaux</i>	<i>V1-V2</i>	130	130	130	127	129	131	125	127	128	130	129	135
<i>Poids spécifié</i>	$\frac{P}{V2-V1}$	2.30	2.30	2.30	2.36	2.32	2.29	2.40	2.36	2.34	2.30	2.32	2.22
<i>moyennes</i>	<i>Moy (g/cm³)</i>	2.3			2.36			2.36			2.28		

RESUME

Les granulats sont considérés comme des éléments essentiels dans la composition du béton ordinaire ou des bétons spéciaux.

L'épuisement des gisements naturels de granulats et les difficultés pour ouvrir de nouvelles carrières imposent de chercher de nouvelles sources d'approvisionnement.

Le recyclage des matériaux de construction, déjà bien engagé dans certains secteurs, est l'une des solutions prometteuses.

L'utilisation de ces granulats recyclés à une grande importance du point de vue environnement car d'une part elle permet de récupérer les matériaux résultants de la démolition des constructions due aux catastrophes naturelles ou la démolition du vieux bâtis.

D'autre part, leurs réutilisations permettent de protéger la nature de l'exploitation excessive des réserves des granulats naturels.

Pour autant, ces nouveaux matériaux présentent ils des propriétés suffisantes pour satisfaire une demande de performances chimiques, physiques et mécaniques pour être utilisés dans tous les secteurs ?

Et pour cela, l'objectif de notre recherche est d'étudier les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques des granulats recyclés et les comparer avec les granulats naturels pour une utilisation future dans le domaine de génie civil et les travaux publics.

Dans cette optique, une méthodologie d'évaluation de ces caractéristiques des granulats étudiés à été suivie par une série d'essais selon différents normes.

Mots clés : Granulat, granulats recyclés, recyclage, caractéristiques.