

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



685



Mémoire de Mastère

Présenté à l'Université de Guelma

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par : KARAMEN SELMA

BOUALLEG ABLA

Thème : LE BETON ET LE RECYCLAGE

Sous la direction de: Mr ACHOUCHE DJAMEL

Jun 2011

Remerciements



Nous tenons, d'abord à remercier en premier lieu et avant tout, notre Dieu le tout puissant qui nous a donné la force et la patience pour effectuer le présent travail.

Nous remercions nos très chers parents pour leurs soutiens et leurs patiences.

Nous souhaitons également exprimer notre gratitude aux personnes qui nous ont aidé à effectuer ce travail et notamment notre encadreur : **Monsieur ACHOUCHE DJAMEL** pour son suivi et ses conseils durant l'évolution de ce travail ainsi qu'à tout les enseignants et personnel administratif du département de génie civil de l'université du 8 mai 1945 Guelma.

Nous tenons aussi à remercier tous les étudiants de la promotion 2011 de master structure en particulier ainsi que tout les autres camarades du département génie civil.

Et tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin.



Sommaire

Introduction Générale:.....	01
<u>CHAPITRE I:</u>	
	1
I.1.Introduction Générale:.....	04
I.2.Differents types de déchets :.....	04
I.2.1.Déchets inertes :.....	04
I.2.2.Déchets spéciaux:.....	04
I.2.3.Déchets banals:.....	04
I.3.Pourquoi recyclé?.....	04
I.4.Avantages du recyclage:.....	06
I.5.Intérêt de recycler le béton:.....	09
I.6.Réticences à l'égard des matériaux recyclés:.....	10
I.7.Facteurs économiques :.....	11
I.8.Conditions pour développer le recyclage :.....	12
I.9.Conclusion:.....	13
<u>CHAPITRE II : Historique du recyclage du béton</u>	
II.1.Historique :.....	14
II.1.1.Le béton peut être recyclé à partir de :.....	14
II.1.2.La source principale étant bien sur les déchets de démolition :.....	15
✓ <i>en</i> Belgique :.....	16
✓ <i>au</i> Japon :.....	18
✓ Au Brésil :.....	19
✓ En Allemagne :.....	19
✓ En France :.....	21
<u>CHAPITRE III : Processus de recyclage du béton :</u>	
III.1.Introduction :.....	22
III.2.Béton et granulats recyclés:.....	22
III.2.1.Les déchets de chantier :.....	23

III.2.2. Les déchets de démolition :.....	24
III.3.Production de déchets:.....	24
III.4.Définition recyclage du béton:.....	25
III.5.Comment recycler ?.....	25
III.5.1.Procédés du recyclage:.....	25
III.5.2.Origine des produits à recycler :.....	25
III.6.Processus de recyclage :.....	25
III.7.Appartient Processus de recyclage :.....	29
III.7.1.Le broyage –dé ferrailage :.....	30
III.7.2.Le nettoyage des matériaux:.....	31
III.7.3.L'élaboration des produits finis:	31
III.8.Stockage chez un producteur de granulats recyclés:	33
III.9.Concassage, tamisage et stockage:.....	34
III.9.1.Agrégation et liaisons:.....	35
III.10.Station de recyclage :.....	35
III.11.Réduire les déchets de béton :.....	37
III.12.Plusieurs fois recyclable?.....	38
III.13.Le recyclage en granulats de la fraction inerte des matériaux de démolition:.....	38
III.14.Aspect économique:.....	39
III.14.1.Un facteur temps :.....	39
III.14.2. un facteur distance :.....	39
III.14.3.Nature des matériaux recyclés :.....	39
III.15.Aspect technique:.....	40
III.15.1.Pour être utilisés dans les domaines routiers:.....	40
III.15.2 Pour être utilisés dans les bétons:.....	40
III.16.Caracteristiques et domaines d'utilisation des granulats de recyclage:...	41
III.16.1. Aspect réglementaire:.....	41
III.16.2.Perspectives:.....	41
III.17. les grandes métropoles qui offrent les conditions les plus favorables :....	42
III.18.Facteur de developpement de la filiere recyclage:.....	43

III.20.Promotion du recyclage:	43
III.20.1.Au niveau des producteurs :.....	43
III.20.2.Au niveau des collectivités:.....	44
III.21. Conclusion :	44
<u>CHAPITRE IV : Utilisation de produits de recyclage du béton</u>	
IV.1.Introduction :	46
IV.2.Définition des granulats:	46
IV.3.Fabrication:	47
IV.3.1.Les carrières de granulats alluvionnaires :	47
IV.3.2.L'exploitation des roches massives:.....	47
IV.3.3.Les caractéristiques des roches pour granulats:.....	48
IV.4.Les caractéristiques des granulats naturels:	48
IV.4.1.Généralités :.....	48
IV.4.1.1.Les granulats de carrière:.....	49
IV.4.1.2.Les granulats alluvionnaires:.....	50
IV.4.2.Caractéristiques géométriques :.....	50
IV.4.2.1.Granulométrie :.....	50
IV.4.2.2.Classes granulites:.....	51
IV.4.2.3.Module de finesse:.....	52
IV.4.2.4.Forme des granulats:.....	52
IV.4.2.5.Coefficient d'aplatissement:.....	52
IV.4.3.Les caractéristiques physiques :.....	53
IV.4.3.1.Masse volumique apparente :.....	53
IV.4.3.2.Porosité :.....	53
IV.4.3.3.L'absorption d'eau des granulats :.....	53
IV.4.4.Les caractéristiques mécaniques :.....	54
IV.4.4.1.Résistance à la fragmentation :.....	54
IV.4.4.2.Résistance à l'attrition :.....	54
IV.4.4.3.Effets du gel-dégel :.....	54
IV.4.4.4.Alcali réaction :.....	54
IV.4.4.5.Propriétés thermiques des granulats :.....	55
IV.4.5.Impuretés dans les granulats :.....	56
IV.4.5.1.Impuretés organiques :.....	56

IV.4.5.2.Argiles et matériaux fins :.....	57
IV.4.5.3.Contamination par le sel:.....	58
IV.4.6.Les proprites essentielles des bétons :.....	58
IV.5.Utilisation des matériaux recycles:.....	59
IV.6.Caractéristiques du béton de recyclage de granulats de béton :.....	59
IV.6.1.Les caractéristiques physiques :.....	60
IV.6.1.1.Le coefficient d'absorption d'eau:	60
IV.6.2.Caractéristiques géotechniques des graves de recyclage:.....	61
IV.6.2.1.Comportement à la déformation:.....	62
IV.6.2.2.Retrait / fluage:.....	62
IV.6.3.Caractéristique chimiques:.....	63
IV.6.3.1.La teneur en chlorures:.....	63
IV.6.3.2.La teneur en sulfate:.....	63
IV.6.3.3.Alcali-reaction :.....	63
IV.6.3.4.Gelivite granulats:.....	64
IV.6.4.Caractéristique mécaniques :.....	64
IV.6.4.1.Résistance des granulats:	64
IV.6.4.2.Résistance à la compression:.....	64
IV.6.4.3.Influence de la variation du rapport Gravier/Sable:.....	64
IV.6.4.4.Module d'elasticite:.....	66
IV.6.4.5.La durabilité:.....	66
IV.6.4.6.Carbonatation:.....	66
IV.6.4.7.Alcalireactin :.....	67
IV.6.4.8.Le gel-degel:.....	67
IV.7.Caractéristique des agrégats recycles (essais):.....	68
IV.7.1.Analyse sur les matériaux de substitution:	68
IV.7.2.Analyse sur les produits finis:.....	68
IV.8.L'utilisation de granulats recyclés:.....	69
IV.9.Modes opératoires des essais :.....	70
IV.9.1.Eprouvettes :.....	70
IV.9.2.Gâchage et malaxage :.....	70
IV.9.3.Essais sur béton frais:.....	71
IV.9.3.1.Affaissement au cône d'Abrams :.....	71

IV.9.3.2.Mesure de l'air occlus :.....	71
IV.9.3.3.Mesure de la densité réelle du béton frais:.....	72
IV.10.Inconvénients des produits recyclés:.....	72
IV.11.Conclusion :.....	73
<u>CHAPITRE V : Recherche en cours</u>	
V.1.Introduction:.....	74
V.2.Recyclage des matériaux de construction :.....	74
➤ En France :.....	74
V.2.1.Chantiers routiers :.....	76
✶ ➤ En UAS :..... <i>USA</i>	77
V.2.2.Applications structurales :.....	78
V.2.3.Quelques exemples d'utilisations variées comprennent:.....	78
➤ En Allemagne :.....	79
V.2.4.Pour le béton :.....	80
V.2.5.Comme granulats fins:.....	80
V.3.La technologie actuelle :.....	82
V.3.1.Nouvelles technologies (émergente) :.....	82
V.4.Quelques statistiques :.....	83
➤ Au Canada :.....	83
➤ En France :.....	84
➤ En Allemagne :.....	84
➤ Au Royaume-Uni :.....	84
➤ Aux Pays-Bas :.....	85
➤ En Australie :.....	85
➤ Au Japon :.....	85
V.5.Des objectifs à la hausse :	85
V.6.Conclusion:.....	87

CHAPITRE VI : Cas de l'Algerie

VI.1.Introduction:	89
VI.2.Déchets en Algérie :	89
VI.2.1.Naissance d'une véritable politique environnementale :.....	89
VI.2.2.Déchets Industriels :.....	90
VI.2.3.Valorisation des déchets et sous produits dans le domaine des travaux publics:.....	91
VI.2.3.1.Pneus usagés et déchets plastiques :.....	91
VI.2.3.2.Déchets de la construction/démolition :.....	92
VI.3.Conclusion:	94
Conclusion générale	95

Liste des figures

Fig.III.1	l'élaboration des granulats recycles.....	22
Fig.III.2	Procédure de fabrication des granulats recyclés	24
Fig.III.3	l'installation de production de granulats recyclés	29
Fig.III.4	la centrale de recyclage des bétons.....	30
Fig.III.5	Processus de recyclage du béton.....	32
Fig. IV.1	différents types de granulats	48
Fig.IV.2	Courber granulométrique.....	51
Fig.IV.3	Formes de granulats recyclés	52
Fig.IV.4	Relation entre l'absorption d'eau et densité des granulats recyclés.....	61
Fig.IV.5	Relation entre la résistance à la compression à l'âge de 28 jours et le rapport G/S pour les bétons naturel et recyclé.....	65
Fig.V.1	Production mondiale de béton par région en 2006.....	86

Liste des photos

Photo.1	Démolition et déconstruction.....	03
Photo I.1	granulats recyclés.....	06
Photo I.2	Les bétons recyclés	07
Photo I.3	matériau de recyclage 20/60 mm.....	08
Photo I. 4	Grave de recyclage 0/20 mm.....	09
Photo.II.1	Recyclage des matériaux de démolition.....	17
Photo III.1	Les étapes du Processus de recyclage du béton.....	27
Photo III.2	Stockage des matériaux recyclés	34
Photo III.3	Stockage et concassage des matériaux.....	35
Photo III.4	Le Principe de fonctionnement d'une centrale à bétons recyclés.....	36
Figure IV.1	différents types de granulats.....	48
Photo.V.1	l'utilisation des agrégats recyclés dans des bétons routiers.....	77
Photo.V.2	l'utilisation des agrégats recyclés dans des bétons structuraux.....	78
Photo.VI.1	Déchets de la construction/démolition	92

Liste des tableaux

Tableau.IV.1	Proportion des comparants pour des bétons agrégats naturels.....	58
Tableau.IV.2	Caractéristiques des recyclage du béton.....	60
Tableau.IV.3	Proportion des comparants pour des bétons agrégats recyclés de fc28.....	62
Tableau.IV.4	Comparaison des Performance des bétons agrégats naturels et recyclés.....	69
Tableau.V.1	Principales applications des bétons – Commentaires obtenus.....	81

LISTE DES SYMBOLES

EN : Norme Européenne définitive
ENV :Prénorme européenne
NF :Norme Française
NF P :Norme Française applicable au bâtiment et génie civil
D ou D_{max} :Dimension maximale du plus gros granulaire de béton
d :Dimension de plus petit grain d'un mélange granulaire
Mf :Module de finesse des sables
A :Coefficient d'Aplatissement
P % :Porosité
W% :Teneur en eau
Ab % :Taux d'absorption d'eau
ES :Equivalent de sable
P :La propreté des gros granulats
NR :Non Réactif
PR :Potentiellement Réactifs
PRP :Potentiellement Réactifs à effet de Pessimum
G :Coefficient de Gélivité des granulats
LA :Coefficient Los Angeles
FD :Fragmentation Dynamique
MDE :Coefficient Micro-Deval
RAC1 :Béton de granulats recyclés
NAC2 :Béton de granulats naturels
Aff. :Affaissement au cône d'Abrams
Rcj :Résistance a la compression de béton à (j) jours
Rt :Résistance à la traction
E :Module d'élasticité
F :Charge de rupture
SN :Sable Naturel
SR :Sable Recyclé
GN :Gravier Naturel
GR :Gravier Recyclé

RESUME

Le besoin universel de conserver les ressources, de protéger l'environnement et de bien utiliser l'énergie doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie du béton. Le recyclage des déchets de construction et de démolition en tant que source de granulats pour la production de béton, a attiré des intérêts croissants de l'industrie du bâtiment.

L'utilisation des granulats recyclés à une grande importance du point de vue environnement car d'un coté elle permet de récupérer les matériaux résultants de la démolition des constructions due aux catastrophes naturelles ou la démolition du vieux bâtis.

De l'autre coté ; leurs réutilisations permet de protéger la nature de l'exploitation excessive de la réserve des granulats ordinaires.

L'objectif 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.

MOT CLES:

Granulats recyclés, Environnement, Recyclage, Démolition, Béton

ABSTRACT

The universal need to conserve resources, protect the environment and well using the energy must necessarily be felt in the field of concrete technology. Recycling of construction waste and demolition as a source of aggregates for concrete production has attracted growing interest in the building industry.

The use of the recycled aggregates has a great importance from the point of view of environment because it permits the recovery of the aggregates from demolished construction on result of earthquake or old construction.

On the other hand, the other hand, their reuse avoid on excessive exploitation of the ordinary aggregate.

The objective is to study the physical, chemical and mineralogical characteristics of the recycled aggregates and to compare them with the natural aggregates for a future use in the field of civil engineering and public works.

KEY WORDS:

Recycled aggregates, environment, recycling and demolition, concrete.

المخلص :

إن ضرورة مراعاة الاحتياجات العالمية في ميدان تكنولوجيا و صناعة الخرسانة تدعم الحفاظ على الموارد الطبيعية و حماية البيئة و استخدام عقلاني للطاقة إن رسكلة نفايات الانجاز و هدم البنايات جلبت اهتماما متزايدا في مجال البناء كونها مصدرا للحصى و الإنتاج الخرسانة.

استخدام المجاميع المعاد تدويرها في الأهمية من حيث البيئة لأنه يمكن استرداد جانب واحد من المواد الناتجة عن هدم المباني بسبب الكوارث الطبيعية أو هدم المباني القديمة. من ناحية أخرى، إعادة استخدامها يساعد في حماية الطبيعة من الاستغلال المفرط من إجمالي الاحتياطي العادي.

والهدف هو دراسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية والمعدنية من إجمالي المعاد تدويرها ومقارنتها مع المجاميع الطبيعية لاستخدامها في المستقبل في مجال الهندسة المدنية والأشغال العامة.

الكلمة الرئيسية

إعادة تدوير الركام، والبيئة، وإعادة التدوير، وهدم وملموسة

I.1.Introduction Générale:

Les ressources en granulats conventionnels s'épuisent de plus en plus avec les années, surtout dans les régions sahariennes. De plus, les infrastructures routières et urbaines vieillissent très vite et nécessiteront des travaux de réfection ou de démolition. Or, ces travaux causent des quantités importantes de résidus. Ces matériaux ainsi générés sont de plus en plus coûteux à entreposer et les sites d'entreposage se font aussi de plus en plus rares, sans compter que les normes environnementales limitent grandement l'ouverture d'autres sites de disposition. On devra donc trouver des moyens convenables pour réutiliser ces types de matériau [1].

Pour ce qui est des matériaux provenant de la démolition des bâtiments ainsi que des ouvrages de travaux publics tels que les blocs de béton et de maçonnerie qui nécessitent des stations de traitement et de concassage, ce qui exige plus de transformations et par conséquent un coût élevé relativement à la fabrication des granulats naturels, mais devant les besoins prépondérants des granulats d'une part et les exigences environnementales d'autre part le recyclage de ces matériaux reste la solution meilleure et efficace. [1]

La protection de l'environnement est devenu un élément fondamental, directement liée à la survie de l'être humain, la faune et la flore. Comme l'environnement, la protection de la nature, le développement durable jouent aujourd'hui un rôle important dans la satisfaction des exigences modernes pour les travaux de construction. [2]

Le béton de ciment Portland a été et va toujours être le matériau de construction le plus couramment utilisé dans la construction. De même que le cas des autres industries, le besoin universel de conserver les ressources, de protéger l'environnement doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie du béton. Par conséquent, une importance accrue a été octroyée à l'usage des déchets et des sous-produits pour la fabrication du ciment et du béton. [3].

Les dépôts naturels de sable, de gravier et de pierres (surtout ceux qui sont situés près des grands centres urbains) risquent de s'épuiser ou d'entraîner des frais d'exploitation très élevés en raison du coût de transport et des restrictions relatives à la protection de l'environnement. [4].

Par conséquent le recyclage des déchets des constructions devient impératif L'expansion urbaine et les nouvelles lois sur l'environnement ont conduit à la fermeture de nombreuses

centrales de fabrication de granulats et à l'ouverture restreinte de nouvelles. En conséquence, le granulat naturel doit être transporté à des distances toujours plus grandes et à des coûts qui augmentent toujours.

L'élimination des décombres et des matériaux de démolition, une demande accrue de granulats naturels s'est accentuée ces dernières années pour approvisionner les secteurs du bâtiment et des travaux publics. Le stock disponible de ces granulats ne satisfait plus cette demande et le recours à de nouvelles carrières est parfois difficile à réaliser en raison d'une réglementation rigoureuse (préservation des paysages, interdiction d'extraction de granulats alluvionnaires...). Par ailleurs, les matériaux de démolition ou de chantier provenant de la déconstruction des vieux bâtiments sont en quantité croissante et ne sont éliminés que par l'utilisation en remblai ou mis en décharges sauvages causant un impact sur l'environnement. Ce dernier constitue un paramètre essentiel du développement durable et sa préservation passe obligatoirement par le recyclage des gravats.

La majorité des applications de granulat recyclés issus de produits de démolition trouvent essentiellement des débouchés dans le domaine routier, mais une meilleure connaissance du comportement des bétons incluant de tels granulats peut contribuer au développement de cette application. Cependant, les travaux menés sur les matériaux de démolition en tant que granulats de substitution ne sont pas assez concluants, ils sont considérés comme déchets s'ils ne sont pas réutilisables, ce qui est un autre problème que le recyclage peut en partie résoudre.

Le recyclage est une solution optimale au problème posé par les enfouissements des déchets, les décharges publiques et les carrières, causes bien connues de la dégradation progressive de l'environnement et d'un déséquilibre sur un territoire. On dispose maintenant d'un procédé technologique pour le recyclage des granulats, à condition que les matériaux concernés soient homogènes. Si le matériau recyclé est de bonne qualité, il n'y aura besoin que de quelques changements à la technologie du béton.

Les granulats recyclés sont de la pierre concassée récupérée de la démolition d'ouvrages de génie civil (principalement des logements), d'excavations, et des déchets des usines de céramique et des carrières. Le matériau de base utilisé pour la production de granulats recyclés présente une grande diversité de niveaux de qualité. Il ne suffit pas de simplement trier les matériaux en diverses catégories granulométriques et de retirer certains contaminants. On peut se procurer les granulats en concassant et sélectionnant le béton ou en mélangeant des matériaux de construction. Les granulats recyclés, afin d'être utilisés dans des buts précis,

Introduction générale

doivent d'abord répondre à des exigences granulométriques précises, à des niveaux minimaux de contamination et garantir une stabilité et une durabilité à long terme.

Le recyclage des matériaux inertes du BTP est aujourd'hui considéré comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de mieux protéger l'environnement. Le secteur du bâtiment et des travaux publics a longtemps pratiqué la technique du dépôt sauvage ou de « l'enterrement civil » sur ses chantiers. Pourtant, malgré des blocages, économiques, normatifs et psychologiques, le recyclage de ces déchets progresse régulièrement. C'est vrai pour le secteur routier, particulièrement actif dans le développement de procédure de déconstruction (par opposition à la démolition) et de recyclage des revêtements routiers.



Photo.1: Démolition et déconstruction [13]

Chapitre: I

Pourquoi recyclage^{er}

I. Introduction:

Le recyclage semble être une solution idéale pour les problèmes de déchets issus de la rénovation ou de la reconstruction, que l'on veut éliminer et valoriser soit par contrainte environnementale ou soit par contrainte politique. De plus, l'épuisement des ressources de matériaux en construction fait que d'une façon générale, enser la construction dans une optique de réutilisation ultérieure, permettra de séparer aisément les éléments du bâtiment lors de sa démolition

II. Différents types de déchets :**I.1. Déchets inertes :**

Les déchets inertes sont des déchets n'ayant pas d'action sur le milieu ambiant et non-susceptibles d'évolution physico-chimique ou biologique importante au cours du temps.

En particulier, ils ne se décomposent pas, il n'est pas biodégradables et ne brûlent pas. [5].

I.2. Déchets spéciaux :

Les déchets spéciaux sont des déchets dangereux. Leur nature nécessite des protections particulières vis-à-vis de l'environnement lors de leur collecte, de leur traitement et de leur éventuel stockage. [5].

I.3. Déchets banals :

Les déchets banals sont des déchets non inertes et non dangereux. On les retrouvera principalement dans les ordures ménagères mais aussi dans les déchets des entreprises. En général, les déchets plastiques se retrouveront dans cette catégorie. [5].

I.2. Pourquoi recyclé ?

Le recyclage étant devenu impératif joue un rôle important dans l'obtention d'un développement durable, qui répond aux besoins du présent sans compromettre l'aptitude des générations futures à répondre à leurs propres besoins, il n'est donc pas à démontrer. Les ressources étant limitées, et il est donc nécessaire de conserver les granulats aussi longtemps

que possible, de minimiser la production des déchets et d'encourager leur recyclage et leur réutilisation.

Ces principes généraux ainsi que des considérations économiques, devraient être des leviers assez suffisants. La situation optimale est celle où le recyclage devient économiquement avantageux. Pour promouvoir et encourager le recyclage.

Les mesures devraient être prises par les pouvoirs publics pour stimuler le recyclage et la réutilisation :

- ✓ Parnu lesquelles on peut citer.
- ✓ Promotion d'une logique de recyclage.
- ✓ Partager le risque avec les investisseurs afin de stimuler l'innovation et la recherche dans les projets de recyclage.
- ✓ Mettre l'accent sur le recyclage dans les spécifications et les procédures contractuelles
- ✓ Encourager la réutilisation ; en introduisant des primes et detaxes (exonération fiscale pour les utilisateurs et producteurs de produits recyclés.
- ✓ Promouvoir un investissement plus grand dans les centrales de recyclage pour les rendre capables de traiter d'importantes quantités de matériaux récupérés ; En plus des avantages environnementaux, l'utilisation du béton recyclé peut aussi être économique, en fonction de la situation et des conditions locales.

Ces facteurs comprennent :

1. La proximité et la quantité de granulats naturels disponibles.
2. Fiabilité de l'approvisionnement, la qualité et la quantité de déchets de construction et de démolition (disponibilité des matériaux et la capacité des installations de recyclage).
3. Les perceptions du public quant à la qualité des produits recyclés.
4. Incitations des marchés publics.
5. Normes et règlements exigeant un traitement différent pour les granulats recyclés par rapport à la matière première.
6. Impôts et taxes sur les granulats naturels et la mise en décharge.

Le coût de l'envoi de déchets aux sites d'enfouissement peuvent souvent être plus grand que le coût du tri des déchets et la vente de béton d'un chantier à un recycleur (ou même de payer une redevance pour la collecte), en particulier lorsque les frais d'enfouissement existent.

Le coût de l'utilisation de matériaux de démolition dans une nouvelle construction sur le même site peut également être inférieur à celui des nouveaux matériaux.

Selon les méthodes de recyclage utilisées, en particulier la mesure dans laquelle les matériaux doivent être triés et d'autres matériaux enlevés, le coût du recyclage des machines et le traitement peut augmenter. Certains États américains ont estimé des économies allant jusqu'à 50% ÷ 60% de l'utilisation de granulats recyclés par rapport à de nouveaux agrégats.

Le recyclage est moins coûteux que l'enfouissement en Allemagne, en Hollande et au Danemark. Dans les pays sans infrastructures pour le recyclage, et des ressources naturelles abondantes le recyclage peut être plus coûteux.

Le recyclage peut être réalisé même dans des pays en voie de développement. Avec davantage de recherche et de développement, le champ d'application des agrégats recyclés peut être augmenté. Cependant, même avec la technologie existante, une augmentation considérable des taux de récupération peut être obtenue dans certains pays avec une plus grande acceptation par le public de granulats recyclés et la réduction des idées fausses ou de l'ignorance au sujet de ses possibilités d'utilisation [6].



Photo I.1: granulats recyclés.

I.3. Avantages du recyclage :

- ✓ Le processus de traitement évite toute perte de produits, ce qui fait que parmi des autres avantages on peut aussi citer .
- ✓ Le béton, et ses sous produits (gravats et autres déchets inertes) sont tous recyclés et donc réutilisés.

- ✓ La ferraille, le bois, le plastique et tout l'autre débris sont triés, isolés et évacués vers les filières de valorisation et de recyclage adaptées.
- ✓ 100% des gravats de chantier et du gros oeuvre sont valorisés en produits de seconde vie.
- ✓ Réduction des déchets, entroposage (depots) ou l'enfouissement et les dégradations des sites associées.
- ✓ Substitution aux ressources naturelles et donc réduction des coûts l'exploitation environnementaux inherents à l'exploitation des ressources naturelles.
- ✓ Réduction des frais (coûts) de transport, le béton peut souvent être recyclé sur les chantiers de construction ou démolition ou très près des zones urbaines, où il va être réutilisé.
- ✓ Réduction des coûts d'entroposage (de depots): par des taxes et des frais.
- ✓ Dans certains cas, les possibilités d'emploi se posent dans l'industrie du recyclage qui n'existeraient pas autrement que dans d'autres secteurs.

En recyclant les décombres on aide à détourner des tonnes de débris de construction de la décharge.

Le recyclage du béton de projet de démolition peut aboutir à des économies considérables puisqu'il sauve les dépenses de transporter le béton à l'enfouissement des déchets et élimine le coût de l'enlèvement et de décharge [7]



Photo I.2: Les bétons recyclés [42]

Il est possible aujourd'hui de recycler tous les produits (débris) de démolition des constructions, des dispositions peuvent être prises pour transporter des décombres du site de démolition à l'usine de recyclage dans certain cas de déplacer des machines de recyclage portables au site.

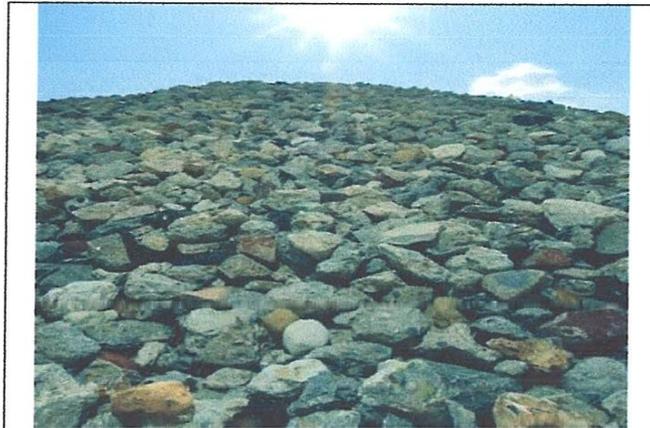


Photo I.3: Matériau de recyclage 20/60 mm. [44]

- ✓ En termes de protection de l'environnement des produits de démolition en général, le recyclage économise énormément d'énergie comparée à l'extraction, le traitement et le transport de nouveaux agrégats. [7]
- ✓ Les débris écrasés peuvent être réutilisés comme un agrégat dans un nouveau béton ou d'autre couche structurelle, (routes), quand il est souvent combiné avec un agrégat vierge il est utilisé dans un nouveau béton. Cependant, le béton recyclé est plus souvent utilisé comme agrégat dans une couche de sous-base (pour les routes et chaussées). [7]



Photo I. 4: Grave de recyclage 0/20 mm. [44]

- ✓ Le recyclage de débris est un processus relativement simple. Il implique de casser, enlever et écraser les décombres dans une matière avec une taille et une qualité indiquée. [7]
- ✓ Réduction des volumes de débris dans les sites d'enfouissement et dans les décharges sauvages, dont on cherche à réduire le nombre et l'usage.
- ✓ Réduction des coûts associés :
 - à l'exploitation des ressources naturelles.
 - Au transport.
 - à la disposition des débris dans les sites d'enfouissement et ceux des taxes qui y sont reliées, et à la consommation d'énergie.
 - Utilisation de matériaux qui autrement, auraient été perdus.
 - Performance de la matière recyclée qui présente pour certaines applications, des caractéristiques supérieures à la matière vierge.
 - Création d'emplois.
 - Réduction des gaz à effet de serre. [7]

I.4. Intérêt de recycler le béton :

Le procédé de fabrication du ciment réclame une combustion à 1500 degrés, réalisée notamment avec des combustibles fossiles qui émettent des gaz à effet de serre. De plus, la

transformation chimique du calcaire en chaux hydraulique émet principalement du CO₂ mais aussi des oxydes d'azote (NO_x) et du dioxyde de soufre SO₂ qui participent à l'acidification de l'atmosphère. Enfin, le transport entre les lieux de production et les chantiers participe également à l'émission de gaz à effet de serre. Ainsi, 884 kilogrammes de CO₂ sont émis pour chaque tonne de ciment produite (539 kg à cause du processus chimique et 345 kilogrammes à cause des combustibles fossiles utilisés pour la combustion), sans prendre en compte le transport.

Comme donc la production de ciment consomme une grande quantité de matières premières en partie non renouvelables (minerais et combustibles fossiles) et que sa fabrication est également à l'origine d'importantes émissions de CO₂, le recyclage de cette matière revêt donc tout son intérêt.

En limitant l'extraction des matières premières dans les carrières et en recyclant les déchets localement, ceci contribuera à rendre le secteur du BTP moins polluant et gaspilleur de ressources. Ceci est devenu indispensable dans un contexte où la relance de la construction de logements et d'équipements est impératif. [8]

La planification, l'ouverture et l'exploitation de nouveaux sites d'extraction de matériaux minéraux sont des activités qui deviennent de plus en plus laborieuses.

Cela est principalement lié à une acceptation sociale de plus en plus difficile, induite par la crainte (avérée ou supposée) des nuisances environnementales que pourraient provoquer ces installations envers les populations riveraines. De nombreuses oppositions influent lourdement sur l'allongement des procédures et peuvent provoquer l'abandon de projets.

Ces circonstances incitent les divers acteurs à mettre à profit toutes les solutions alternatives permettant de garantir l'approvisionnement. Parmi celles-ci figurent en première priorité le recyclage, c'est à dire la réutilisation de l'important gisement que constituent les déchets de chantiers minéraux.

I.5. Réticences à l'égard des matériaux recyclés :

A ces avantages évidents en termes de développement durable, que sont la protection du territoire et la réduction des impacts environnementaux, s'opposent encore beaucoup de réticences de la part des milieux professionnels utilisateurs (architectes, ingénieurs,

entrepreneurs). Ces réticences sont souvent autant d'origine culturelle (il peut être difficile de convaincre un architecte de faire du neuf avec des matériaux recyclés de qualité supposée moindre) qu'économiques (concurrence, prix du traitement, éventuellement surcoûts modestes des matériaux recyclés difficiles à faire accepter, etc). Cependant, et de manière plus générale, la pratique de la substitution des graves naturelles par des graves recyclées dans la construction et pour la fabrication de bétons maigres, voire de bétons non-classés, est devenue pratique courante. Ce changement d'habitudes a été rendu nécessaire par la pénurie croissante de matériaux neufs, vécue dans certaines régions qui doivent limiter l'usage des graves primaires. Confiants dans la qualité potentielle des produits que l'on peut obtenir à partir de gravats recyclés, certains professionnels de la branche fabriquent désormais des bétons classés à l'aide de granulats de béton recyclé de très bonne qualité.

Consécutivement à cette perception, la tendance est de réutiliser des produits recyclés pour des prestations qui n'exploitent pas tout leur potentiel de qualité. Ainsi des graves de béton concassé recyclées sont pour la plupart utilisées pour la confection de coffres ou de couches de fondation.

Une part importante des matériaux recyclés était utilisée pour du remblayage de fouilles ou pour des travaux de terrassement, des matériaux terreux de remblai, par exemple, auraient offert une qualité suffisante pour un tel usage.

Si le taux de recyclage des déchets de la construction peut être considéré comme globalement satisfaisant, la réutilisation adéquate des produits recyclés reste encore insatisfaisante pour certains d'entre eux.

Actuellement, les prix des graves recyclées sont légèrement inférieurs à ceux des matériaux neufs. [9]

I.6. Facteurs économiques :

Le succès rencontré par les matériaux de démolition recyclés dépend étroitement des conditions du marché et donc des coûts, y compris ceux du transport. On peut affirmer sans trop de crainte que l'utilisation des matériaux de démolition recyclés est en train de s'affranchir des résistances passées, principalement liées à la peur du risque et au poids des traditions, Ce constat est tout particulièrement vérifié lorsque les prix des matières recyclées deviennent concurrentiels avec ceux des matériaux neufs, voir plus avantageux. [9]

Avant les années 90, la majeure partie des déchets de démolition était acheminée telle quelle en décharge contrôlée inerte ou en dépôt pour matériaux d'excavation, à des coûts relativement bas. Avec la raréfaction des disponibilités et les restrictions imposées au début des années 90 à la mise en dépôt dans les décharges pour matériaux d'excavation, ces tarifs ont subi une importante évolution.

Le prix de la mise en décharge contrôlée inerte des matériaux de démolition devient une opération onéreuse, qui peut même s'avérer non rentable dans bien des cas. En comparaison, l'évacuation de déchets minéraux de chantier en centrale de tri, concassage et recyclage revient moins chère. Cette différence par rapport aux tarifs de mise en décharge constitue un moteur en faveur de l'alternative désormais moins coûteuse qu'est la revalorisation et la réutilisation de ces matériaux. [9]

I.7. Conditions pour développer le recyclage :

1. Favoriser le maillage d'un territoire en plates-formes de recyclage. C'est la condition sine qua non de la viabilité économique de la filière, la proximité entre chantiers de déconstruction, centres de traitement et lieux d'utilisation doit être assurée par les plans de gestion des déchets du BTP et déclinée dans les documents d'urbanisme.
2. Inciter à la déconstruction à la fois dans le bâtiment et les travaux publics, en développant le tri à la source et en intégrant la traçabilité ; ces opérations et leurs coûts doivent figurer dans les appels d'offres.
3. Intégrer de manière systématique les granulats recyclés et artificiels dans le corpus normatif français.
4. Ouvrir tous les appels d'offres aux variantes proposant l'utilisation de matériaux recyclés
5. Promouvoir auprès des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre l'usage de granulats recyclés dans les bétons, comme le permet la normalisation européenne déjà appliquée dans plusieurs pays
6. Mettre en place un instrument économique affecté, simple, lisible et efficace, incitant à développer l'offre et la demande de matériaux recyclés
7. Créer des observatoires régionaux, maillons indispensables d'un outil statistique efficace, pour accompagner le développement du recyclage. [10]

I.8. Conclusion :

Les granulats sont considérés comme des éléments essentiels dans la composition du béton ordinaire ou des bétons spéciaux.

L'utilisation des granulats recyclés à une grande importance du point de vue environnement car d'un coté elle permet de récupérer les matériaux résultants de la démolition des constructions due aux catastrophes naturelles ou la démolition du vieux bâtis.

De l'autre coté ; leurs réutilisations permet de protéger la nature de l'exploitation excessive de la réserve des granulats ordinaires.

Chapitre:II

Historique

II.1. Historique du recyclage du béton :

Le béton est le deuxième matériau le plus consommé après l'eau, et est à la base du développement urbain. On estime qu'en 2006 entre 21 à 31 milliards de tonnes de béton (contenant 2.54 milliards de tonnes de ciment) ont été consommées dans le monde en comparaison avec moins de 2 à 2.5 milliards de tonnes consommées en 1950 (200 milliards de tonnes de ciment). [11]

Contrairement à une idée souvent répandue, les premières réflexions sur les questions du recyclage et de la revalorisation des matériaux issus de la démolition ne sont pas si récentes. En 1992 déjà, divers experts suisses autant issus des milieux professionnels que publics, publiait une brochure intitulée "Recyclage, valorisation et traitement des déchets de chantier". Cette brochure apportait une réflexion pionnière et déjà très pertinente, en soulevant toutes les questions d'ordre technique et économique auxquelles l'élimination des matériaux de démolition allait donner lieu dans un futur proche. En même temps, elle mentionnait un ensemble de réponses, mettant l'accent sur l'importance stratégique et l'utilité de la revalorisation de ces matériaux. [9]

Ce texte proposait en 1992 des solutions qui en 2006 sont désormais considérées comme pratiques courantes et correspondent à l'état de la technique.

Au début des années 1980, la sensibilisation à la protection de l'environnement commençant à gagner également du terrain en Belgique, on s'est rendu compte que les granulats destinés à des applications en béton – telles que le gravier et le sable – n'étaient pas inépuisables. Depuis, ce sont des millions de tonnes de béton concassé qui ont été recyclées et réutilisées sous une forme secondaire : en particulier en tant que fondations et sous-fondations pour la construction de voiries et pour le béton maigre. [12]

II.1.1. Le béton peut être recyclé à partir de :

- ✓ Le béton non retenu, qui est encore frais (humide) des bétonnières de béton près à l'emploi
- ✓ les déchets de production dans une fabrique de béton préfabriqué.
- ✓ les déchets des sites de construction et démolition. [14]

II.1.2. La source principale étant bien sur les déchets de démolition :

Le recyclage du béton et des déchets de construction et démolition n'est pas nouveau, il a toujours été un élément dans la construction à cause de sa nature inerte, et la relative facilité avec laquelle il peut être réduit en agrégats.

Depuis l'ère romaine, les matériaux de construction ont été recyclés et réutilisés dans les situations économiquement difficiles quand l'infrastructure pour l'exploitation et le recouvrement extraction de nouveaux matériaux était souvent limitée ou restreinte pour une raison ou une autre. Les recherches sur les propriétés des agrégats recyclés ont commencé dans les années 1940, la crise pétrolière de 1973 à accélérée la recherche dans le monde sur l'utilisation des agrégats recyclés. [14]

Le béton est un matériau de construction durable qui peut aussi être récupéré (recyclé).

On estime qu'environ 25 milliards de tonnes de béton sont produits chaque année dans le monde, cela veut dire plus de 1.7 milliards de camions en charge chaque année, ou 6.4 millions de chargement par jour, ou plus de 3,8 tonne par habitant par année.

La quantité de béton utilisé dans les constructions dans le monde équivaut au double des autres matériaux de construction tel que le bois, l'acier.

Environ 1,300 millions de tonnes de déchets sont produits chaque année parmi lesquels 40% ou 510 millions de tonnes de déchets (en Europe).

Les USA produisent environ 325 millions de tonnes de déchets de construction et démolition, le Japon environ 77 millions de tonnes, la Chine et l'Inde quand à eux produisent actuellement plus de 50% du béton dans le monde, par conséquent leur production de déchets sera proportionnelle à leur taux de croissance et développement. [16]

Beaucoup de pays dans le monde possèdent des plans de recyclage pour le béton de construction et de démolition et des taux de recouvrement (récupération) très importants ont été réalisés en Hollande, au Japon, en Belgique et en Allemagne. Dans d'autres pays par contre, les déchets sont juste entreposés.

La Hollande est un exemple de pays dont les dépôts (enfouissement) des déchets de béton est interdit. Tout le béton est recyclé à part quelques résidus du processus de traitement.

Le béton récupéré des déchets de construction et démolition peut être broyé et utilisé comme agrégats. Les sous bases de chaussées et routes en est la principale destination il peut aussi être utilisé dans un béton nouveau.

Le béton de retour (frais, et humide de retour des centrales de BPE comme (surplus) peut aussi être recyclé avec succès. les unités de récupération pour la réutilisation des matériaux existent sur plusieurs sites de production dans les pays développés. plus de 125 milliards de tonnes sont produits chaque année.

Recycler le béton réduit l'exploitation des ressources naturelles et les coûts de transport associés, et réduit de même les dépôts de déchets cependant ceci à un impact réduit sur la réduction des émissions des gaz à effet de serre, puisque la majeure partie des émissions a lieu lors de la fabrication du ciment, et le ciment seul ne peut pas être recyclé.

Les plans de construction des bâtiments écologiques reconnaît et donne une grande importance à la récupération des déchets de construction et de démolition et encourage l'utilisation des matériaux recyclés y compris le béton recyclé.

Des pays comme la Hollande et le Japon arrivent à réaliser une récupération presque totale des déchets de béton.

Il n'est presque pas possible de réutiliser le béton, dans le sens où être réutilisé dans sa forme originale, ni il ne peut être recyclé des ses composants, mais il va être broyé (concassé) en de petits blocs ou agrégats pour de futures utilisations.

Le béton recyclé est défini comme un béton récupéré, réutilisé dans un produit nouveau.

Le recyclage du béton est une industrie bien établie dans plusieurs pays, et presque la totalité du béton peut être broyé et réutilisé comme agrégats. la technologie actuelle de recyclage a l'aide de moyens mécaniques de broyage existe déjà et est relativement peu coûteuse.

Nous allons exposer la situation des autres pays développés dans la demande du recyclage du béton :

✓ Belgique

En Belgique, la quantité totale de béton concassé est évaluée à quelque 15 millions de tonnes par an, soit plus d'une tonne par habitant, ou encore 41% du volume total des déchets issus de la construction.

La production et l'utilisation de gravats en Belgique sont certifiées entre 1982 et 1989, quelque 200.000 tonnes de béton concassé a servi à la construction de la nouvelle écluse de

Berendrecht. Toutefois, l'intégration de granulats recyclés aux éléments structurels et de pavage en béton ne s'est pas encore imposée partout.

Depuis l'introduction de cette certification en 1996, l'utilisation de gravats de béton agréés a enregistré une hausse significative. Entre-temps, ce sont plus de 90% du béton concassé Produit au total qui sont recyclés et réutilisés en particulier pour la construction des routes.[20].



Photo. II.1 : Recyclage des matériaux de démolition [19]

Aussi plusieurs fabricants de béton ont- mis sur pied un vaste programme pilote destiné à imposer le béton concassé comme solution de remplacement aux granulats naturels pour la fabrication de béton comme sous-couche de pavés, dalles et bordures en béton. On a ainsi remarqué qu'un remplacement de l'ordre de 20% n'avait pas d'influence significative sur les paramètres de qualité clés tels que la résistance au fendage (pavés en béton), la résistance à la flexion (bordures) et l'absorption d'eau. [12]

En octobre 2005, la province pakistanaise du Cachemire a été frappée par un tremblement de terre dévastateur qui a coûté la vie à 80 000 personnes et privé d'un toit 1,8 million d'habitants, mais qui a également laissé derrière lui des millions de tonnes de gravats. Outre l'urgence de l'aide humanitaire, les autorités belges se sont demandées ce qu'il était possible de faire de cette gigantesque montagne de décombres. [15]

Après une mission de reconnaissance des autorités de la ville de Bruxelles, de la Confédération Construction, un projet d'aide a vu le jour : une installation de broyage et de triage des gravats de béton d'une valeur de 455.000 euros a été offerte. Celle-ci permet de

transformer 80 tonnes de gravats en granulats par heure. Une partie de ces granulats est utilisée pour la reconstruction de routes et de remblai de terrains à bâtir, tandis que l'autre a été affectée, comme souhaité, à la production de blocs de béton pour la reconstruction des habitations. [15]

✓ Le Japon

Au Japon, l'instauration des premières lois et règlements environnementaux portant sur les débris de construction est datée des années 1970. Les années '90 ont été marquées par une emphase mise sur le recyclage et les années 2000 par une « société basée sur le recyclage », incluant des politiques d'achats de produits « verts ». Déjà en 2000, le pays s'était donné comme objectif un taux de récupération de 80 %, réduisant ainsi de moitié, la quantité de déchets de construction générée, en comparaison avec 1990. Ces objectifs ont été rehaussés à 90 % en 2005 et 95 % en 2010.

Au Japon, on classe les débris de construction et de démolition en deux catégories :

- Agrégats de construction.
- Matériel généré après des travaux d'excavation et qui peut être réutilisé directement, sans aucune autre transformation.
- Débris de construction.
- Recyclables : blocs de béton, produits issus du bitume, débris de bois.
- Non recyclables : déchets dangereux.

Parmi les mesures instaurées par les autorités pour sensibiliser, obliger ou encourager l'industrie de la construction à recycler, nous pouvons mentionner :

- Les utilisateurs de matériaux à potentiel de recyclage sont tenus de les réutiliser.
- Des prêts à taux avantageux sont offerts afin d'encourager la construction d'édifices promis à une longue durée de vie.
- Les constructeurs ont l'obligation de présenter des rapports portant sur la gestion des matériaux et leur potentiel de recyclage (plans de recyclage, potentiel d'utilisation des matériaux recyclés, recyclage durant les travaux de construction, triage des déchets, etc.).

Lors de travaux publics ou privés, on encourage les entrepreneurs à réutiliser les agrégats sur le site. [16]

Malgré le fait que les agrégats recyclés des bétons de démolition présentent une densité de 2.2 Kg/dm^3 et une absorption d'eau de 5%, les agrégats ne sont considérés comme étant adéquat au béton de structure, que ceux respectant les critères du RILEM pour des bétons de $f_{c_{28}} < 20 \text{ MPa}$ ceci est du au grand taux de mortiers et de produits ceramiques contenus des les agrégats. [17]

✓ Au Brésil

Les centrales principales de recyclage des bétons de construction et de démolition appartiennent. La technologie de recyclage est très simple. Dans la plupart des cas, la centrale est composée de machines broyeuses, bandes transporteuses, un système de tri et, dans certains cas, un séparateur magnétique l'enlèvement de plastique, bois et les contaminants fait est manuelle faite, que ce soit avant ou après concassage .le plastique, bois et les métaux sont vendus ou donnés.

La plupart des produits de recyclage au béton, comme dans de nombreux pays, est utilisé dans les chaussées. [17]

✓ En Allemagne

Dans ce pays, l'implication de tous les niveaux de gouvernements, ainsi que de tous les joueurs de l'industrie contribue à l'atteinte d'objectifs de récupération élevés. Ce sont les autorités locales qui ont la responsabilité de s'assurer du traitement approprié des déchets. Elles délivrent les permis de construction et de démolition qui incluent occasionnellement des précisions sur les méthodes de déconstruction et des plans de gestion de débris de construction. La collecte des débris étant la responsabilité de leurs propriétaires, les autorités locales s'assurent que ces derniers remplissent cette tâche en respect des règles en place. Les États sont impliqués dans la mise en oeuvre et l'application des règlements destinés à atteindre les objectifs de recyclage fixés par l'Union européenne et par l'état fédéral. Ce dernier, par le biais du ministère de l'Environnement, de la Conservation de la nature et de la Sécurité nucléaire, supporté par l'Agence fédérale de l'Environnement, est responsable du développement des lois et règlements. [16]

Ils représentaient par exemple 49 % des ressources du béton en 1988, 40 % dix ans plus tard. En outre, dans le cas du béton, l'utilisation de produits recyclés permet de restreindre le recours au ciment, et ainsi de limiter les émissions de gaz à effet de serre.

Cela suppose toutefois de mettre en place des dispositifs adaptés sur l'ensemble de la filière. Ainsi, la majorité des produits de la démolition se compose de matériaux composites. Une mise en place du tri dès le chantier, le suivi des matériaux employés pour connaître leurs caractéristiques, constitue autant de mesures destinées à faciliter le recyclage. Initialement au début années 1990 Ils soutenaient que les économies industrielles modernes pouvaient fonctionner très efficacement en n'utilisant qu'un quart des matières premières vierges dominantes du moment. Quelques années plus tard, a montré que l'accroissement de la productivité des ressources pouvait aller au delà (par un facteur 10) et qu'il était bien à la portée du management et des technologies existantes, si les bonnes incitations politiques sont faites. Autre ressource économisée, cette fois dans le domaine des revêtements routiers : le bitume, qui représente une part considérable des coûts de production des matériaux (jusqu'à 35 % au moment du pic pétrolier). Face à un renchérissement prévisible des coûts de l'énergie, le recyclage représente donc là aussi une opportunité économique supplémentaire, tout en contribuant à diminuer impact environnemental et prélèvement sur les ressources.

En 2002, l'architecte américain William McDonough et le chimiste allemand Michael Braungart ont écrit *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things* (Du berceau au berceau, revoir la façon dont nous fabriquons les choses ndlt). Ils ont conclu que le gaspillage et la pollution pouvaient être entièrement évités.

L'industrie du ciment, avec une production de 2.3 milliards de tonnes en 2006, représente 7 pour cent de l'énergie utilisée dans l'industrie.

Le producteur a la responsabilité ultime des déchets qu'il génère. Toutefois, tous les acteurs en lien avec les matériaux ont le devoir d'en faciliter la réduction, la récupération et le recyclage. Le fabricant fait la conception de son matériau pour en faciliter la récupération. Le propriétaire de bâtiments et leurs concepteurs (architectes et ingénieurs) ont l'obligation d'intégrer une stratégie de gestion des débris dans leurs plans et devis. Les entreprises de démolition prennent en charge la responsabilité de la récupération, du traitement, de la transformation et de la mise en marché des matériaux. Une part significative de leurs revenus provient de la vente de ces matériaux. Les entreprises de démolition qui atteignent le taux de récupération le plus élevé sont celles qui sont les plus compétitives et les plus rentables. Notons que la matière provenant de la démolition de bâtiments représente 24,3 % de la composition de débris dans ce pays. La part la plus importante revient au matériel d'excavation, avec 65,9 %. La qualité de la matière recyclée étant une clé essentielle à

l'ouverture des marchés, un système d'assurance qualité a été développée en Allemagne. Un organisme indépendant, LAGA85, a établi des codes stricts, auxquels la matière recyclée doit se conformer pour être réutilisée pour des applications déterminées. Ces codes donnent aux recycleurs et aux entrepreneurs des indications claires concernant ce qui peut ou ne peut pas être fait avec telle ou telle matière. Chaque chargement de matière recyclée est inspecté et certifié par un tiers afin de s'assurer qu'il correspond aux critères recherchés. Cette certification est accordée par le German Institut for Qualität Assurance an Labelling (RAL), qui s'assure que la matière répond aux normes de LAGA ou du Deutsch Institut fuer Normung (DIN). Le rôle de LAGA et de RAL est essentiel pour le bon fonctionnement du marché des matières recyclées. [16]

✓ En France

En 1998 dans son « guide des déchets de chantier de bâtiment », estimait cette production à 24 millions de tonnes dont 64% de déchets inertes. Cette étude montrait que l'essentiel des déchets était constitué de déchets inertes en mélange (37,2%), de ciment et mortier (12,9%) ou de béton armé (9,8%). L'importance des déchets mélangés (avec des éléments qu'il est souvent difficile de séparer comme le plâtre ou des substances toxiques) limite la qualité et les possibilités du recyclage.

Il y a donc urgence à modifier les pratiques actuelles, à prescrire le non mélange des déchets et à pratiquer la déconstruction sélective des bâtiments qui peut représenter une alternative économique et qualitative. C'est la condition pour que le recyclage des inertes qui représente moins de 10% du gisement progresse sensiblement.

Une autre étude du (Pimenta, Del motte (1997)) a montré que la fabrication de blocs préfabriqués en béton avec des granulats recyclés était possible sous réserve d'utiliser davantage de sable naturel et d'augmenter de 10 % la teneur en ciment. Pourtant, les expérimentations en France n'ont pas dépassé le stade du laboratoire alors que dans d'autres pays des chantiers ont été réalisés comme le « Environmental building » en Grande-Bretagne ou encore, projet .

Chapitre:III

Processus de recyclage

III.1.Introduction

Le processus de recyclage des matériaux comprend plusieurs étapes et peut être effectué avec plusieurs types de matériels selon la nature du produit, la mobilité des équipements souhaités, la production souhaitée, la qualité du résultat final souhaitée. [21]

Penser la construction dans une optique de réutilisation ultérieure, permettra de séparer aisément les éléments du bâtiment lors de sa démolition. Les éléments peuvent alors être démontés, récupérés et traités de la manière la plus appropriée. Les gravats et produits de démolition peuvent être entreposés et traités par concassage et criblage, afin d'être réutilisés sous forme de granulats recyclés. En termes de mobilité, nature et propreté de production, les installations de concassage deviennent de plus en plus sophistiquées.

Aujourd'hui, le principal débouché des granulats provenant du recyclage de béton concassé est la construction de routes (sous fondations, empièvements, béton maigre,...). Une faible partie seulement est utilisée dans la fabrication de nouveau béton.

III.2.Béton et granulats recyclés :

Le recyclage de granulats issus de bétons de démolition passe par différentes étapes, à savoir la démolition des structures, l'élaboration des granulats à partir des blocs de béton, la composition du béton à base des granulats recyclés et enfin l'étude de la durabilité de ces bétons. [22]

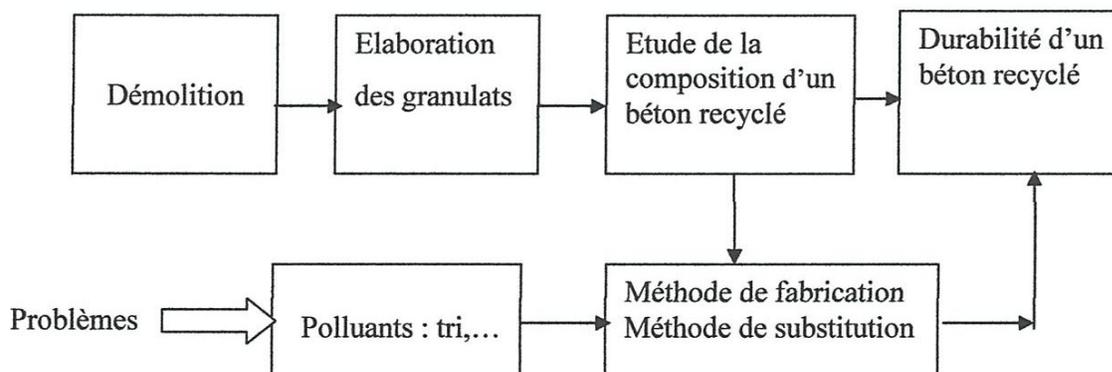


Figure III.1: l'élaboration des granulats recyclés.

Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité pour les collectivités.

Sont considérés comme déchets toutes substances mise en rebut, ou tout produit qui doit être jeté car il est usé, contaminé ou abîmé. [23]

Les dépôts de sable naturel de gravier ou de pierres, surtout ceux qui se situent près de grands centres urbains, risquent de s'épuiser ou d'entraîner des frais d'exploitation très élevés en raison du coût du transport et la place occupée par les sites de stockages et les restrictions relatives à la protection de l'environnement.

Le recyclage est le procédé de traitement des différents types de déchets et des sous-produits. Il constitue une activité importante dans les pays développés.

Le recyclage a deux conséquences écologiques bénéfiques : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles.

En Europe, plus de 25% des déchets proviennent de la démolition ou de la rénovation d'immeubles et de ces rebuts qui encombrer les décharges publiques. On estime que 30% seulement des matériaux utilisés dans la construction sont actuellement recyclés, alors que la pratique dans certains pays européens, démontre que 90% sont réutilisables.[24]

III.2.1. Les déchets de chantier :

Les déchets de chantiers sont composés essentiellement de déchets provenant des chantiers du bâtiment et des travaux publics et des activités industrielles consacrées à la fabrication de matériaux de construction. Ils sont définis comme étant des déchets inertes qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas, ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine.[25] Les déchets admissibles sont : les bétons, les pierres, les tuiles, les céramiques, les briques, les carrelages ainsi que les enrobés bitumineux sans goudron. L'amiante est considérée comme déchets inertes mais son utilisation est interdite pour raison de santé. [26]

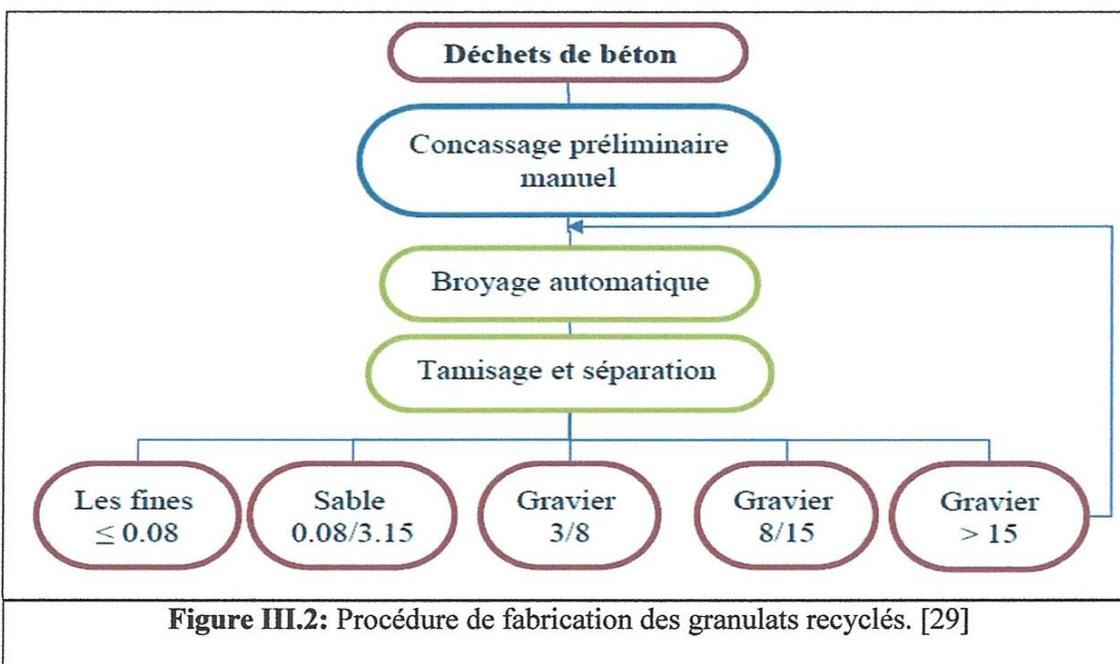
III.2.2. Les déchets de démolition :

Les déchets de démolition sont une sous catégorie des déchets du bâtiment qui regroupent tous les matériaux de déconstruction ou de réhabilitation. Comme le béton constitue presque 75 % en poids de tous les matériaux de construction, il s'en suit donc que les fortes proportions des rebuts de démolition soient du béton. [27]

III.3. Production de déchets :

Le principe de la prévention ou de la réduction de la production de déchets et de leur nocivité est à prendre en considération entre autre par :

1. L'application de technologies propres et plus économes en recours naturelle.
2. L'utilisation de produits conçus de sorte à ce qu'ils ne contribuent pas ou contribuent le moins possible par leur caractéristique de fabrication, d'utilisation ou d'élimination à accroître la quantité ou la nocivité des déchets et les risques de pollution.
3. L'utilisation de techniques appropriées en vue de l'élimination des substances dangereuses contenues dans les déchets destinés à la valorisation. [28].



III.4.Définition recyclage du béton :

Le secteur du béton en général est très avancé en matière de recyclage. La quasi-totalité des déchets de béton sont recyclés. Lorsqu'une construction est démolie, le béton est concassé mécaniquement, il peut alors à nouveau être utilisé (en tout ou en partie) dans la fabrication de nouveaux blocs de maçonnerie. De cette manière, les matières premières naturelles peuvent être économisées. [30]

III.5.Comment recycler ?

III.5.1.Procédés du recyclage :

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage : chimique, mécanique et organique.

Le recyclage dit « chimique » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants. Le recyclage dit « mécanique » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer. Le recyclage dit « organique » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz. [3]

III.5.2.Origine des produits à recycler :

- ✓ Démolition des structure an acier on superflux.
- ✓ Eléments de béton rejetés par la constreccion.
- ✓ Démolition de la structure temporaire.
- ✓ Les refues, déchets (Restes) et emballages. [31]

III.6.Processus de recyclage :

Aujourd'hui, grâce à des techniques très perfectionnées et des normes claires en matière de traitement des matériaux de recyclage, se prononcer pour ou contre le choix de matériaux de construction recyclés ne pose plus aucun problème de qualité. Non seulement ceux-ci offrent les meilleures propriétés, mais il est possible de les utiliser sans arrière-pensée comme alternative aux matériaux classiques.

Ainsi, dans la construction des routes, les graves recyclées peuvent être utilisées dans la couche de fondation et les granulats de matériaux bitumineux peuvent être destinés à l'enrobement. Quant au béton recyclé, il n'a rien à envier au béton traditionnel. Quel que soit le matériau de construction de recyclage utilisé, les propriétés offertes sont toujours les mêmes que celles d'un matériau neuf correspondant.

	
Sélection des produits sur chantiers.	Traitement.
	
Tri manuel.	Déferrage.
	
Concassage, criblage.	Concasseur à mâchoires.

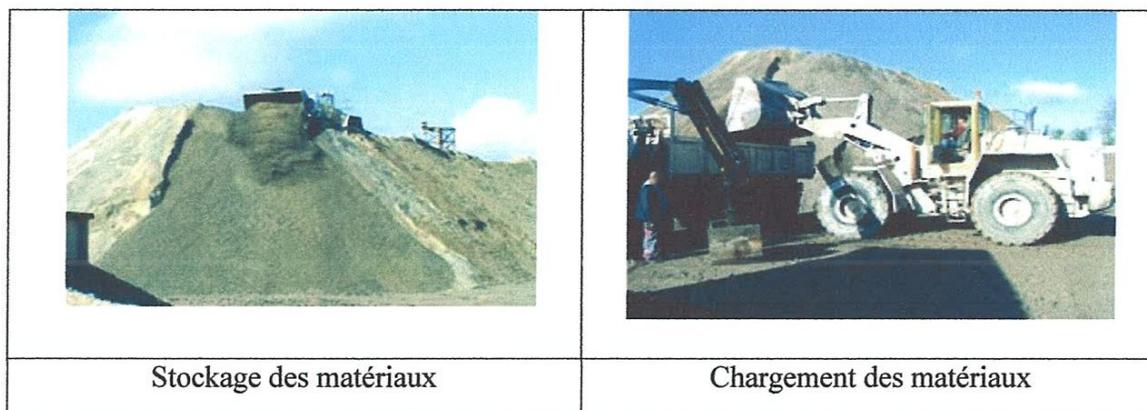


Photo III.1 : Les étapes du Processus de recyclage du béton. [32]

Les installations de production de granulats recyclés ne sont pas tellement différentes des installations de concassage des granulats naturels, ce qui les différencie c'est la présence des impuretés dans les matériaux. Pour enlever ces impuretés, à différents moments au cours du processus de concassage des opérations de triage manuel ou mécanique sont effectuées.

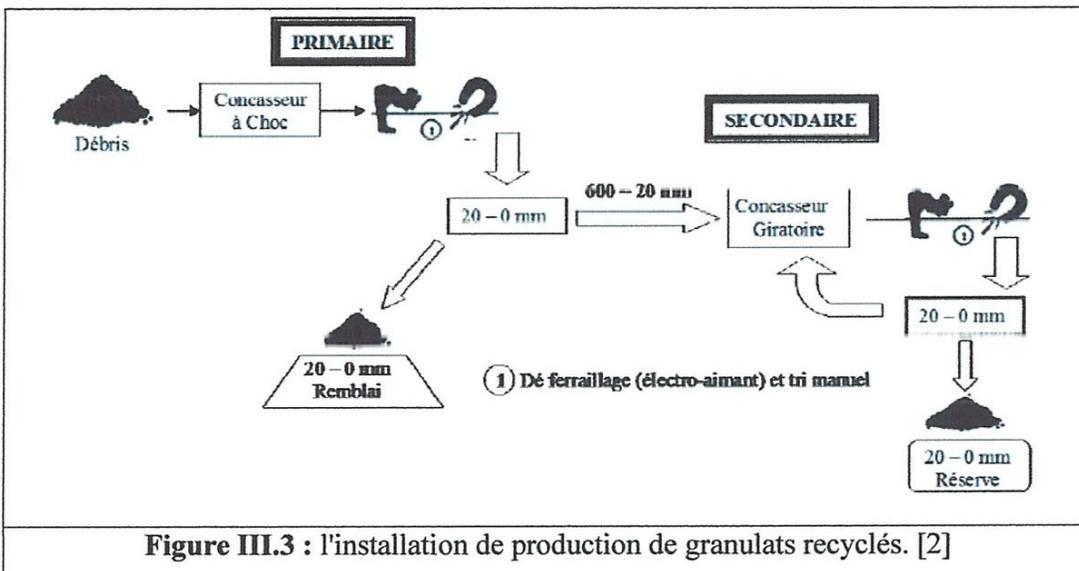
Les plus gros débris comme les plaques de métal, les panneaux de bois, les aciers d'armature, le papier, le plastique, etc. sont enlevés à la main avant l'entrée des matériaux au concasseur primaire, tandis que pour enlever les impuretés légères, on propose deux procédés : l'épuration à l'air et l'épuration par voie humide. Pour la première solution, les granulats sont entraînés par un courant d'air sur des distances variables selon leur forme et leur nature. Le deuxième cas, l'épuration par voie humide (flottaison), la séparation est réalisée au moyen d'un bain dans lequel les granulats recyclés sont transportés par bande immergée et les fractions légères qui flottent sont séparées par des jets d'eau à contre-courant. Des électro-aimants sont ajoutés au circuit de concassage pour enlever les débris métalliques. Ces électro-aimants seront installés à la sortie des concasseurs et recueilleront les éléments métalliques comme les aciers d'armature. [33]

Le nombre de concasseurs utilisés dépendra de la qualité de granulat à obtenir. L'utilisation d'un seul concasseur donnera des matériaux de plus ou moins bonne qualité, et ce, même si le matériau de départ est relativement propre. De plus, procéder à un seul concassage n'enlèvera pas toutes les impuretés, seuls les débris métalliques seront enlevés grâce à l'électro-aimant. Donc, l'utilisation d'un deuxième concasseur permettra de procéder à une deuxième opération

de triage (manuel et magnétique), ce qui donnera un matériau beaucoup plus propre. Pour obtenir une plus grande propreté, le propose donc d'enlever la fraction inférieure à 10 mm après le premier concassage et de diriger le retenu vers le deuxième concasseur. Le choix des concasseurs est aussi un élément important de la production de ce type de granulat. Au départ, les concasseurs doivent traiter des blocs de 0,8 à 1 mètre de diamètre, ce qui implique que l'usure du concasseur est beaucoup plus rapide et que le débit de production est plus faible qu'en carrière. La majorité des installations de traitement des matériaux de démolition sont munies de concasseurs à mâchoire ou percussion comme concasseur primaire et un concasseur à mâchoire, à percussion ou plus rarement de type conique en concassage secondaire. À l'exception de la distribution granulométrique, les autres propriétés comme la densité, la masse volumique, l'absorption, et la dégradation à l'impact ne sont pas affectées par le type de concasseur ou le circuit de concassage proprement dit, et tous les concasseurs produisent à peu près la même quantité de particules cubiques si, évidemment, le granulat original du béton de ciment n'a pas de tendance particulière à développer des particules plates et allongées. Les concasseurs à mâchoires donnent une granulométrie plus grossière, rendant ainsi la réduction de la granulométrie insuffisante, ce qui nécessitera un deuxième concassage. Par contre, il affirme que ce sont ces concasseurs qui assurent la meilleure distribution granulométrique pour la production de granulats recyclés fabriqués à partir de béton de ciment. Les concasseurs à impacts (ou à percussion) permettent une bonne réduction de la granularité lors du premier concassage et séparent très bien les armatures du béton; cependant, ils subissent une usure très importante et les dimensions des matériaux à concasser sont limitées. Ces deux premiers types de concasseurs génèrent à peu près la même quantité de particules fines (particules < 80 µm). Le troisième type de concasseur, à cône, est beaucoup moins utilisé, mais il est très utile comme concasseur secondaire avec des granulats entrant de grosseur maximale de 200 millimètres. Le type de matériau à concasser aura aussi une incidence sur le choix des concasseurs. Si on concasse du béton de ciment, la quantité de pâte de ciment entourant les granulats naturels sera plus ou moins importante dépendamment du type de concasseur utilisé. De plus, il affirme que le concasseur à percussion brise aussi bien les granulats naturels que la gangue de ciment, mais ne détache pas cette dernière des granulats naturels tandis que, de par leur action combinée de frottement écrasement, les concasseurs à mâchoires donneront un pourcentage de pâte de ciment plus important dans la fraction fine. On aura donc, à la sortie du concassage, des granulats ayant une grande

proportion de particules fines. Sélection et stockage des produits bruts on peut donc résumer les étapes de fabrication des agrégats recyclé comme suit :

- Préparation avant traitement qui consiste à réduire les plus gros éléments à l'aide d'un marteau hydraulique. [34]
- Concassage primaire à l'aide d'un concasseur à percussion ou à mâchoires suivi d'un dé ferrailage électromagnétique; selon les installations, le concassage peut être précédé d'un criblage destiné à éliminer les matériaux à faibles caractéristiques et suivi d'un tri manuel destiné à retirer les impuretés; éventuellement, concassage secondaire portant sur la fraction supérieure issue du concassage primaire.



III.7. *Etapes du* ~~Appartient~~ Processus de recyclage :

Les granulats élaborés pour l'installation de concassage –criblage ont pour origine divers matériaux provenant de démolition de bâtiments ou des ouvrages Les matériaux d'origine sont constitués par des blocs ou des dalles de béton de taille variable, qui comprennent pour la plupart un ferrailage assez-dense ,il convient aussi de noter que le tout-venant de démolition comporte une proportion non négligeable d'éléments de natures diverses :bois, matière plastique ,produits d'étanchéité, métaux non ferreux, etc. Pour traiter un matériau aussi hétérogène il est nécessaire de concevoir une installation particulière permettant

d'éliminer à la fois les éléments ferreux et les déchets de toutes natures notamment ceux ayant une faible densité comme les morceaux de bois et les matières plastique (polystyrène). Le fonctionnement de l'installation permet ainsi trois opérations successives : [35].

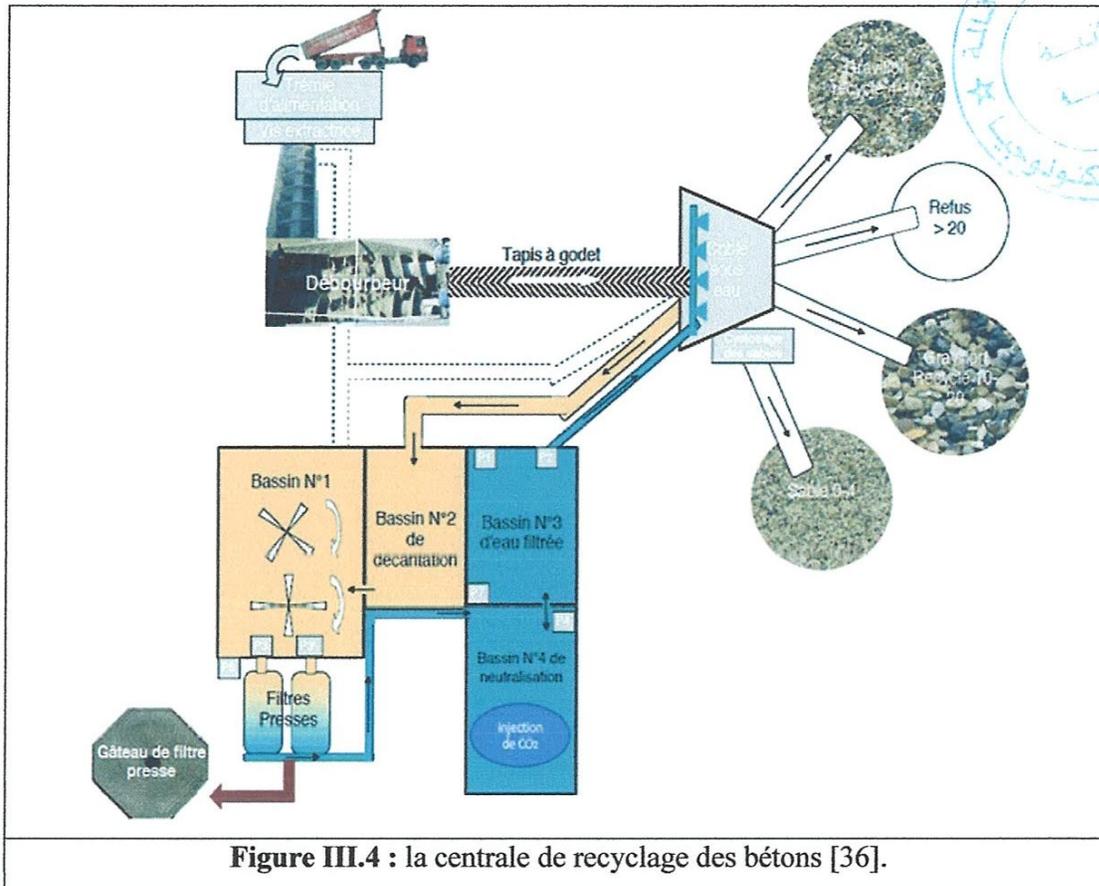


Figure III.4 : la centrale de recyclage des bétons [36].

III.7.1. Le broyage –dé ferrailage :

Avant leur passage dans l'installation, les bétons démolition subissent une préparation qui consiste à fragmenter les plus gros blocs à l'aide d'un brise roche et enlever les ferrailles les plus importantes par découpage au chalumeau. Le concasseur primaire est volontairement surdimensionné afin de faciliter le passage des blocs de béton et leurs armatures.

L'opération de broyage-déferrailage proprement dite est réalisée par un double concassage (deux concasseurs à mâchoires avec scalpage intercalé à 60mm) et un double déferrailage obtenu par un tri magnétique après chaque concasseur. [35]

III.7.2. Le nettoyage des matériaux :

Les granulats 0/150 sortant du concasseur secondaire sont criblés et séparés en trois fractions 0/6, 6/80, 80/150. Seule la fraction 6/80 est soumise à un nettoyage par passage dans un système de lavage de type qui sépare les éléments par différence de densité.

A ce niveau, la plus grande partie des éléments indésirables légers est éliminée. La fraction 0/6 qui est relativement plus homogène court-circuite l'appareil de nettoyage; quant au 80/150, il est réintroduit dans l'installation après concassage. [35]

III.7.3. L'élaboration des produits finis :

Il s'agit d'une opération classique. Les matériaux 0/80 issus du concassage secondaire et du lavage sont criblés et concassés (concasseurs giratoires). On notera cependant deux opérations complémentaires : un nouveau déferrailage et un tri manuel au niveau d'un crible pour l'élimination des déchets subsistants malgré les processus utilisés. [35]

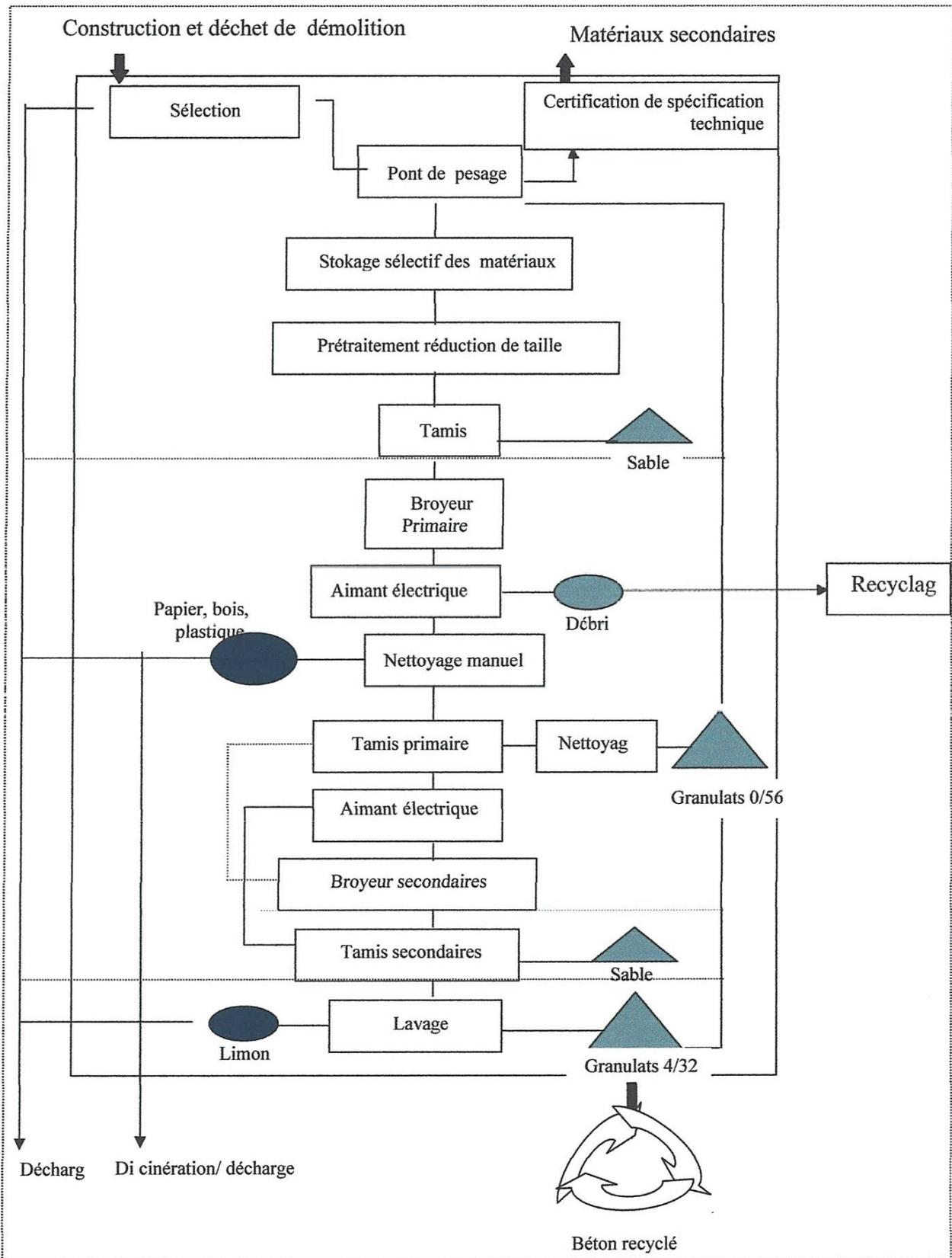


Figure III.5: Processus de recyclage du béton.[33]

III.8. Stockage chez un producteur de granulats recyclés :

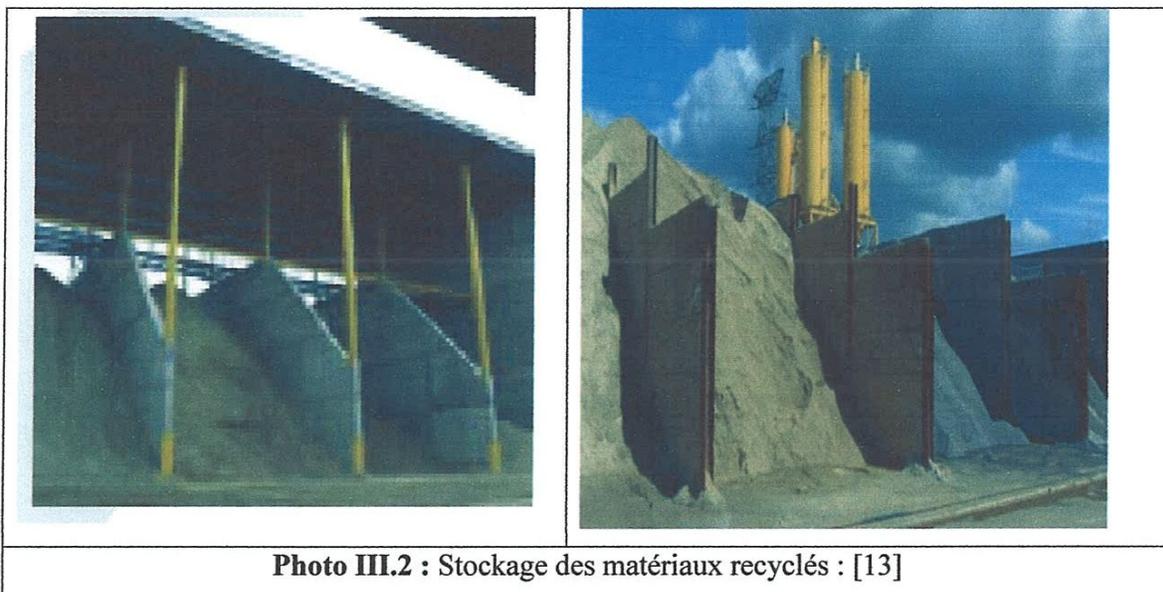
L'aire de stockage devra être conçue de façon à limiter l'infiltration des eaux provenant des précipitations (compaction sous les empilements). Des empilements distincts et identifiés devront être utilisés en fonction des types de matières (béton, brique) afin d'éviter toutes confusions lors du transport.

Un volume maximal de stockage (aire de dimension définie) devrait être fixé et l'exploitant devra prendre des engagements à établir et à conserver les éléments permettant d'évaluer le taux de roulement. La capacité sera établie en fonction de la capacité de traitement des équipements et de la superficie du terrain. Un bilan annuel des entrées et sorties de matériaux devra être préparé afin de vérifier le taux de roulement et d'éviter l'accumulation de matière sur le lieu, le cas échéant.

Un lieu de stockage distinct pour les impuretés avant leur transport vers un lieu autorisé devra être aménagé, s'il y a lieu. [37] Un volume maximal de stockage sera fixé. La capacité sera établie en fonction des équipements et des quantités utilisés (% dans le mélange). Des vérifications seront effectuées à partir de ce volume maximal autorisé pour éviter l'accumulation de matières sur le site, le cas échéant.

Des sections d'entreposage distinctes et identifiées devraient être établies en fonction des catégories de matériaux afin d'éviter toutes confusions lors du transport de ces derniers, s'il y a lieu.

Aucun aménagement supplémentaire ne sera requis en regard des produits finis fabriqués (par exemple, la fabrication de béton, d'enrobés à chaud ou à froid) à partir des granulats recyclés.



III.9. Concassage, tamisage et stockage :

D'après les estimations, le secteur du béton préfabriqué produit chaque année environ 270.000 tonnes de béton concassé pur au départ de déchets de nettoyage, produits de second choix ou matériaux déclassés. S'il est stocké correctement -les résidus tels que le bois, le plastique, les bige bangs, etc. étant triés soigneusement- ce béton concassé disponible est broyé à l'aide d'une installation mobile et passé au tamis suivant trois fractions de granulés par exemple:

0/6 – 6/14 – 14/20 mm. Les fractions 6/14mm et 14/20mm sont utilisées pour les bordures, tandis que les fractions 0/6 et 6/14mm se retrouvent dans les pavés en béton. Chaque fraction doit être stockée séparément dans un bac de dosage. Elles seront ensuite dosées automatiquement, comme n'importe quelle autre matière première, avant de prendre le chemin du malaxeur.

Porosité et absorption de l'eau L'utilisation et le stockage de granulats de béton concassé exigent une attention particulière par rapport aux granulats inertes classiques.

En effet, la porosité des granulats du béton concassé est supérieure à celle d'une matière première telle que le concassé calcaire. La porosité et l'absorption d'eau par 24 heures des granulats de gravats de béton provenant de différents concasseurs ont été comparées aux concasses de calcaire. On a ainsi obtenu pour les granules de débris de béton :

Une densité réelle plus faible en kg/m^3 .

Le béton humide fabriqué à partir de granulats poreux requiert dès lors un facteur eau-ciment plus élevé pour atteindre la même résistance finale. Il convient par conséquent d'augmenter la proportion en eau. L'eau excédentaire est en quelque sorte « absorbée » par les granulats. C'est la raison pour laquelle il est préférable de saturer les granulats des gravats de béton en eau dès le dosage. [13]

III.9.1. Agrégation et liaisons :

Par ailleurs, le béton concassé fraîchement broyé présente déjà une teneur résiduelle en ciment non hydraté. Aussi les gravats pourront-ils se reagglomérer après avoir été humidifiés. De même une teneur trop élevée en particules fines a le même effet, raison pour laquelle des liaisons peuvent se former dans les récipients après un certain temps, avec des problèmes de dosage à la clé.

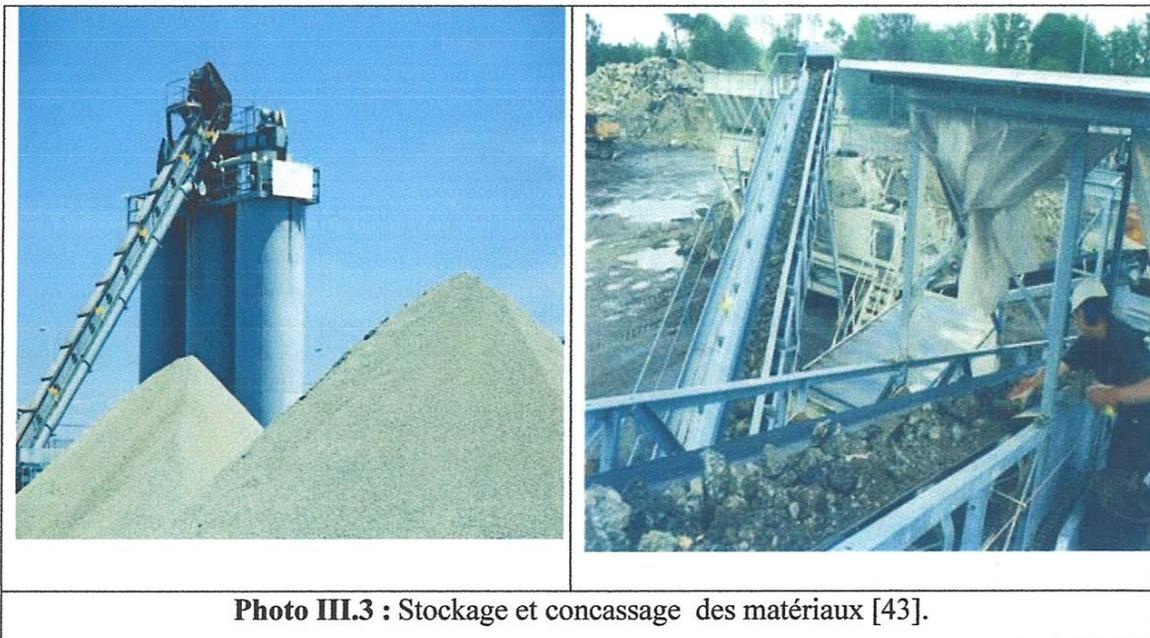


Photo III.3 : Stockage et concassage des matériaux [43].

III.10. Station de recyclage :

Les installations sont composées des éléments suivants :

- ✓ Pont de Pesage du poids des décombres livrés et agrégats.

- ✓ Un espace de stockage suffisant pour des stocks, les différentes sortes de décombres et les différentes catégories de produits les granulats recyclés, sur pilotis stock distinct
- ✓ Les équipements de prétraitement des déchets, ce prétraitement permet de éliminer les grosses impuretés (bois, métaux, plastiques, ...) et de réduire les gros éléments en la taille (en utilisant par exemple pinces hydrauliques).
- ✓ L'équipement nécessaire à l'alimentation de l'installation elle-même (avec Pelle ajourée baignoire, chargeuses sur pneus, ...) d'une passoire avant d'éliminer la terre, de sable et de gypse avant que le matériau est introduit dans les broyeurs.
- ✓ Un concasseur primaire, en général, il s'agit d'un concasseur à mâchoires.
- ✓ Les systèmes électriques aimant pour enlever l'acier.
- ✓ Une installation de tamis pour séparer les matériaux dans diverses fractions.
- ✓ Un air tamis ou d'une installation de lavage pour séparer le bois, papier, textiles, ... à partir des agrégats brisés.
- ✓ Une crucherie secondaire et l'installation de tamis pour réduire davantage les agrégats de taille et de séparer les différentes fractions produites Certaines plantes sont en outre équipés de soutes de mélange afin d'être en mesure de produire des fractions d'agrégation avec une distribution bien contrôlée des particules de taille continue. [38]

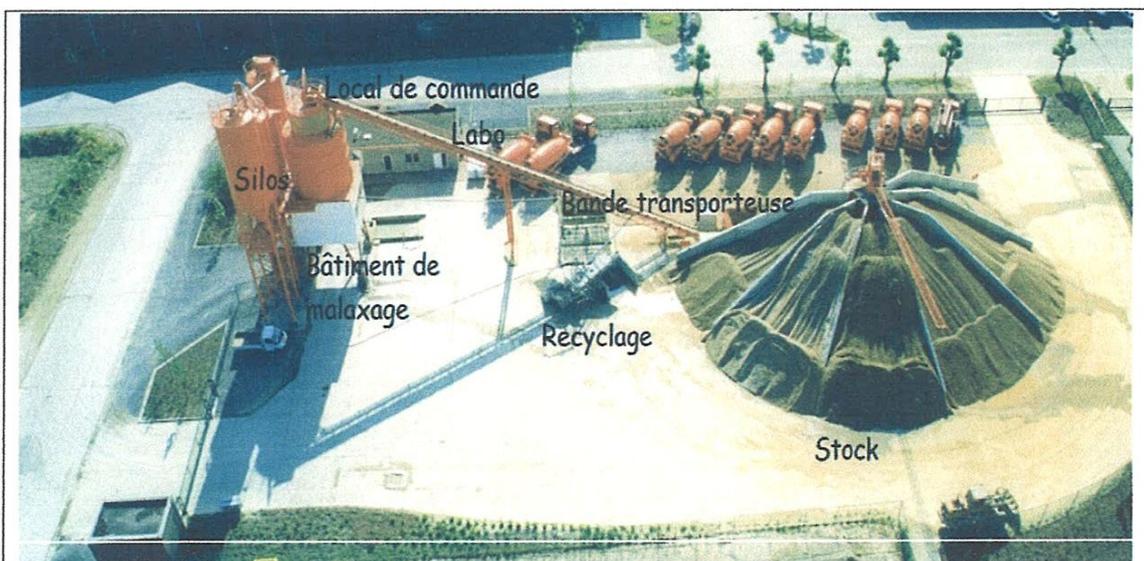


Photo .III.4. Le Principe de fonctionnement d'une centrale à bétons recyclés [39].

III.11. Réduire les déchets de béton :

« Utiliser le granulats recyclés à 10 % semble peu prometteur. Mais si tous les chantiers adoptaient cette recette, les déchets supprimés seraient énormes », Le béton est en effet le deuxième matériau le plus utilisé au monde, c'est pourquoi les déchets de béton s'accumulent rapidement. En fait, chaque année, les déchets du béton équivalent à une tonne par habitant. De plus, substituer le sable et le gravier par du granulats recyclés résoudrait une autre problématique, « C'est vrai que la quantité de déchets s'accumule à la suite des opérations de démolition, mais il faut aussi considérer que les stocks de granulats naturels diminuent », souligne le chercheur. « C'est aussi dans une conscience environnementale que moi et mon équipe avons fait des recherches pendant deux ans [pour formuler un béton qui puisse utiliser des granulats recyclés].

Les granulats recyclés se taillent rapidement une place en construction, admet le professeur. Comme le Dr Franck Cassagnabère l'a démontré, le gravier et la roche extraits des carrières demeurent toujours des granulats de meilleure qualité, mais les ingénieurs ont compris l'importance de recycler le vieux béton. « C'est toujours une meilleure chose de réutiliser la montagne de déchets des opérations de démolition plutôt que de les rejeter dans l'environnement ».

Il tempère cependant que « pour produire un béton durable, il faut s'assurer que le mélange soit consistant. Les ingénieurs ajustent donc la quantité de granulats recyclés en conséquence ». C'est actuellement pour le béton préfabriqué qu'il demeure plus facile d'utiliser le granulats recyclés. « C'est plus difficile pour les travailleurs de produire un béton durable sur les chantiers, car les mélangeurs sont bien moins précis que ceux en usine », explique le professeur. Il est d'autant plus préférable d'utiliser le granulats recyclés pour des structures qui ne sont pas exposées aux intempéries, ajoute « Avec les hivers et l'humidité qu'il y a au Canada et au nord des États-Unis, les viaducs et la surface des gratte-ciel en arrachent. Ils se détériorent plus rapidement qu'un pilier de ciment dans un stationnement souterrain ». [40].

III.12.Plusieurs fois recyclable ?

Malgré le fait que le béton perd en résistance en vieillissant, croit qu'un béton composé de granulats recyclés puisse être recyclé à son tour. « Le rendement du granulat risque d'être moins bon avec le temps, mais du moment que la durabilité du mélange continue d'être perfectionnée par les chercheurs, nous aurons toujours un béton de qualité », lancet-il avec assurance.

Pour les années à venir, le granulat recyclé risque d'être un ingrédient toujours plus privilégié, selon le professeur. « Les recherches sur le béton se font aujourd'hui dans le sens de la protection de l'environnement et du développement durable C'est certain qu'on n'a pas fini d'en entendre parler » [40].

III.13.Le recyclage en granulats de la fraction inerte des matériaux de démolition :

Démolir, c'est abattre un quartier, un immeuble, une usine, un ouvrage d'art... Le résultat, c'est un tas de matériaux de construction : béton, béton armé, briques, pierre de taille, plâtre, bois, métaux, verre, matières plastiques, céramiques, papiers... Ce tas est plus ou moins
Ces matériaux peuvent être classés en deux catégories selon leur aptitude à être déposés dans le milieu naturel avec un risque limité pour l'environnement :

- ✓ Les matériaux dits inertes, qui n'évoluent pas dans le temps (béton, brique, tuile, pierre, verre, céramique)
- ✓ Les matériaux qui évoluent dans le temps ou qui représentent une gêne visuelle pour l'environnement (plâtre, bois, papier, carton, métal, matières synthétiques).

Quatre possibilités permettent d'évacuer l'ensemble de ces matériaux :

- ✓ La décharge de résidus urbains la plus simple et la plus commode puisqu'elle est apte, réglementairement et techniquement, à recevoir pratiquement tous les matériaux de démolition.
- ✓ L'incinération des produits inflammables ; papier, carton, bois, plastiques.
- ✓ La décharge de résidus inertes.
- ✓ Le recyclage, axé sur la fabrication de granulats.

Les trois dernières possibilités ne sont opérationnelles que si l'on procède à un tri préalable et parmi celles-ci, notamment pour les matériaux dits inertes, le recyclage est sans doute la filière la plus contraignante. [41].

III.14. Aspect économique:

En 1991, on recensait, une vingtaine de sociétés productrices de granulats de recyclage à partir de matériaux de démolition. La taille des installations reste relativement modeste, avec une production moyenne annuelle de l'ordre de 100 000 tonnes, comprise entre 30 000 et 300 000 tonnes.

Le secteur de la démolition qui alimente en grande partie les installations de recyclage produit, annuellement, de 20 à 25 millions de tonnes de gravats renfermant 10 à 15 millions de tonnes de matériaux recyclables. Pratiquement 20 à 30% de ce potentiel sont transformés actuellement en granulats. Ce sous-emploi s'explique par deux facteurs :

III.14.1. Un facteur temps :

Le délai moyen d'un chantier de démolition est d'un mois, ce qui ne permet pas toujours l'utilisation d'une technique de démolition sélective, ni la préparation des matériaux.

En effet, le réemploi des matériaux de démolition pour la fabrication des granulats nécessite une préparation spéciale : tri par nature de matériau et calibrage des éléments, notamment pour un recyclage à partir de centrales mobiles.

III.14.2. un facteur distance :

Les matériaux de démolition sont souvent évacués vers le lieu le plus proche du chantier, qui peut être un site de recyclage, ou une décharge malgré le caractère payant de celle-ci.

III.14.3. Nature des matériaux recyclés :

Les producteurs ont une politique de sélection des matériaux de démolition à la réception, les matériaux refusés étant mis en décharge par les entreprises de démolition. Cette notion de qualité est fondée sur deux critères : la propreté et l'homogénéité, ce qui permet de distinguer cinq catégories de matériaux :

- ✓ Le béton propre, armé ou non, sans enduit ni plâtre.
- ✓ Les matériaux propres, mais composites (enrobés, briques, tuiles, graves, pierres et blocs rocheux...).

- ✓ Les matériaux mélangés, avec une faible teneur en plâtre et en bois (maçonnerie, béton armé...).
- ✓ Les mauvais matériaux, avec une teneur en bois et en déchets supérieure à 10% (maçonnerie, béton armé...).
- ✓ Les autres (matériaux terreux...).

Généralement, les matériaux réceptionnés sont stockés selon leur qualité et leur facilité de traitement. Ils sont composés à plus de 90% de matériaux propres et à 60% de bétons propres.

III.15.Aspect technique :

Les normes et les spécifications techniques qui déterminent les possibilités d'utilisation des granulats de recyclage sont les mêmes que pour les granulats naturels :

III.15.1.Pour être utilisés dans les domaines routiers :

(Couche de roulement, couche de base, couche de fondation, ouvrage d'art), les granulats doivent satisfaire aux caractéristiques mécaniques et de fabrication définies par le Ministère des Transports.

Ces spécifications prennent en compte trois critères :

- L'importance du trafic.
- La position des couches dans la chaussée,
- La technique de traitement (graves non traitées ou traitées aux liants hydrauliques, enrobés, etc...).

Deux essais principaux permettent d'évaluer la qualité des granulats :

- L'essai Los Angeles, qui mesure la résistance à la fragmentation,
- L'essai Micro-Deval en présence d'eau, qui mesure la résistance à l'usure.

A partir des valeurs obtenues, les granulats sont classés en 6 catégories, de qualité écrouissant

III.15.2 Pour être utilisés dans les bétons :

Outre les spécifications de la norme 18-541, les granulats ne doivent pas contenir de fortes teneurs en matières organiques, sulfates, sulfures, chlorures, ainsi que certaines formes de silice ou silicate, substances susceptibles de nuire à la qualité du béton (corrosion des armatures, gonflement, fissuration) et donc à la résistance de celui-ci.

III.16. Caractéristiques et domaines d'utilisation des granulats de recyclage :

D'après leurs caractéristiques, les granulats de recyclage rentrent en majorité dans les catégories, ce qui limite leurs possibilités d'utilisation aux couches de base et de fondation des chaussées, avec une étude particulière pour les trafics supérieurs à, ainsi qu'aux couches de liaison de bétons bitumineux pour des chaussées à trafic inférieur.

Mais, compte tenu de l'hétérogénéité des matériaux de construction, et malgré les sélections pratiquées, les granulats de recyclage sont susceptibles de présenter des variations mécaniques, physiques ou chimiques. Cette absence de régularité dans la qualité limite souvent les possibilités d'utilisation aux catégories, les plus médiocres.

En ce qui concerne les bétons, l'emploi des granulats de recyclage se heurte à la caractérisation des teneurs en sulfates et en sulfures. Toutefois, il apparaît que la connaissance de la teneur globale en sulfates n'est pas suffisante et des études sont menées pour déterminer :

- La répartition des sulfates dans les différentes fractions granulométriques.
- La mise au point d'un test semi-quantitatif mesurant les teneurs en sulfates.
- Les seuils critiques de teneur en sulfates.
- Les domaines d'utilisation des granulats.

III.16.1. Aspect réglementaire :

Les unités de recyclage des matériaux de démolition sont justiciables, comme toutes les industries, de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement. Les unités de production de granulats sont analogues aux installations de broyage-concassage existantes sur les sites de carrières.

III.16.2. Perspectives :

Malgré une évolution ascendante de la production, le développement du recyclage de la fraction inerte des matériaux de démolition n'est pas acquis. En effet, la différence entre granulat "neuf" et granulat "ancien" est principalement d'ordre économique. Pour que

l'utilisation des granulats de recyclage s'accroisse, il faut que celle-ci ne soit pas plus coûteuse que l'utilisation des matériaux naturels.

III.17. les grandes métropoles qui offrent les conditions les plus favorables :

- Approvisionnement en matériaux de démolition abondant et régulier.
- Consommation de granulats importante, avec des sources d'approvisionnement en granulats naturels souvent éloignées.
- Coût de mise en décharge élevé.

Dans ce contexte, le recyclage peut être rentable, d'autant plus qu'il permet :

- D'économiser une matière première d'accès souvent difficile aux environs des grandes métropoles.
- De réduire l'encombrement des décharges de résidus urbains.
- De réduire, au moins partiellement, le transport en milieu urbain ou périurbain.

Ailleurs, où le potentiel de recyclage est plus ou moins diffus, des solutions techniques sont envisageables, mais les risques d'échecs sont importants :

- Le recyclage par une installation mobile, outre le fait qu'il nécessite des chantiers de démolition importants (30 000 tonnes au minimum), présente des difficultés au niveau de la commercialisation des produits, pour plusieurs raisons :
 - Compétitivité souvent moins favorable que dans les grandes métropoles.
 - Délais d'évacuation des matériaux courts (durée du chantier).
 - Offre des produits se situant en marge des circuits organisés.
- Le recyclage par une installation fixe collectant les matériaux de démolition sur une vaste aire géographique, est réalisable techniquement mais plus incertaine sur le plan économique car le coût de collecte doit être plus attractif que le coût de mise en décharge. Ainsi, pour un chantier de démolition situé à 50 km de l'installation de recyclage, le coût de mise en décharge, pour être dissuasif, devrait être supérieur au coût du transport à l'installation et s'élever, au minimum à (à majorer, le cas échéant, d'une réception à titre onéreux correspondant à la préparation des matériaux).[44]

III.18. Facteur de développement de la filière recyclage :

Le développement de la réutilisation des matériaux de démolition repose principalement sur la rentabilité économique de l'opération. Pour favoriser ce développement, des mesures sont envisageables mais peuvent avoir des effets secondaires allant à l'encontre des objectifs recherchés :

- ✓ La hausse des coûts de réception dans les installations de recyclage repositionne la mise en décharge qui devient plus attractive.
- ✓ Le réajustement de l'incitation au recyclage par l'augmentation du coût de la mise en décharge accroît les risques de multiplication des dépôts sauvages.

Par ailleurs, deux facteurs devraient, à moyen terme, contribuer à développer le recyclage :

- ✓ L'augmentation plus rapide du coût rendu des granulats naturels liée à la prise en compte des données environnementales de plus en plus contraignantes.
- ✓ La diffusion de nouvelles pratiques dans la démolition, orientées vers une technique de "déconstruction" adaptée à la récupération sélective des matériaux potentiellement valorisables. En effet, le tri effectué par le démolisseur en amont de l'installation de production de granulats recyclés, ne peut que concourir à améliorer l'efficacité du matériel et faciliter le suivi de la qualité de la fabrication. Cette option pourrait être prévue dans les appels d'offres de démolition.

III.20. Promotion du recyclage :

La promotion du recyclage de la fraction inerte des matériaux de démolition se situe à trois niveaux :

III.20.1. Au niveau des producteurs :

Qui, compte-tenu de l'hétérogénéité des matériaux de démolition, doivent parvenir à maîtriser parfaitement leur fabrication, de façon à proposer sur le marché des granulats de qualité homogène et régulière. Poursuivent deux objectifs :

- ✓ Une réduction de la production de granulats naturels, consommatrice d'espaces souvent en concurrence avec d'autres occupations du sol.

- ✓ Un réemploi optimal des matériaux inertes qui sont évacués dans des sites de décharges alors que ceux-ci sont de plus en plus difficiles à renouveler du fait des contraintes environnementales et de l'opposition quasi systématique des populations.

L'action de promotion par les pouvoirs publics peut s'exercer suivant quatre voies :

- ✓ Inciter les détenteurs de déchets de démolition à approvisionner en priorité les unités de recyclage avec des matériaux homogènes ; cette incitation repose notamment sur la création d'une taxe sur la mise en décharge.
- ✓ Mener des campagnes d'information et de sensibilisation sur les filières de recyclage de l'ensemble des matériaux de démolition.
- ✓ Aider à la certification des produits recyclés.
- ✓ Participer au développement des techniques de "déconstruction", de tri et de recyclage des matériaux de démolition.[45]

III.20.2. Au niveau des collectivités :

Qui, de par leurs compétences, sont à même d'intervenir dans trois domaines :

- L'approvisionnement des unités de recyclage : la délivrance d'un permis de démolir peut être assortie d'une clause prescrivant des recommandations relatives à la destination des matériaux de démolition.
- Le développement des sites de recyclage : les collectivités, notamment les collectivités territoriales, sont à même d'aider et de planifier la mise en place d'unités de recyclage.
- L'ouverture des marchés de travaux aux granulats recyclés : outre les collectivités, l'ensemble des maîtres d'ouvrage et maîtres d'oeuvre, publics et privés, ont la possibilité de favoriser l'utilisation des granulats recyclés en proposant systématiquement une variante "granulats de recyclage" dans les appels d'offres.

III.21. Conclusion :

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.

L'utilisation des granulats recyclés dans la fabrication des bétons offre une bonne solution au problème de la gestion des déchets de démolition pour préserver l'environnement.

Un grand nombre de déchets de construction sont produits chaque année, dans le processus de recyclage, vous allez utiliser nos machines de recyclage.

Il permet la réutilisation des bétons et des pierres de taille issus de la démolition et des sous-produits de l'industrie tels les laitiers de hauts fourneaux ou les mâchefers. Concassés, lavés et criblés, ces matériaux permettent la production de granulats.

Leur usage reste pour l'instant réservé à des emplois spécifiques compte tenu de leur qualité particulière et la réglementation en cours.

Chapitre:IV

Utilisation des produits de recyclage

IV.1.Introduction :

La production des granulats recyclés s'est développée au début des années 80, elle répond au besoin d'une autre source de granulats et de la réduction des volumes de déchets. L'utilisation des granulats recyclés dans les bétons présente plusieurs avantages tant au niveau environnementale, humain, technologique et économique qui s'intéresse de plus en plus les industriels.

Nous avons analysé les caractéristiques des granulats recyclés (déchet de marbre) et des granulats ordinaires entrant dans la composition des bétons.

En effet, notre recherche a pour objet l'étude de la possibilité d'utiliser les déchets de marbre comme granulats dans le béton en substitution d'une fraction volumique du sable, de gravier et les deux ensembles, et d'analyser les comportements des bétons obtenus à l'état frais ainsi qu'à l'état durci en les comparant à ceux d'un béton composé de granulats ordinaires (témoin).

IV.2.Définition des granulats:

Le granulats est un fragment de roche dont la taille oscille entre 0 et 125 mm de diamètre. Derrière le terme se cache en réalité toute une famille de produits. On y distingue notamment les sables ($\varnothing < 4$ mm) et les graviers. La taille des granulats est définie selon leur diamètre. Ainsi, un « 6/10" se compose de grains dont le diamètre moyen est compris 6 et 10 mm. Les professionnels distinguent trois sources d'approvisionnement en granulats : l'alluvionnaire, les roches massives et les matériaux issus du recyclage. La nature, forme et caractéristiques des granulats varient selon leur provenance et les techniques de production. On connaît les caractéristiques (résistance aux chocs, à la compression, à l'abrasion, au gel...) et les propriétés chimiques est une obligation pour définir les domaines d'usage ou les limites d'emploi de tel ou tel type de granulats. Les granulats sont utilisés dans de nombreux domaines : voirie ferroviaire et routière, étanchéification des ouvrages d'art, fabrication de bétons et mortiers... Près de 1 m³ de granulats est nécessaire pour fabriquer 1 m³ de béton. [46]

IV.3.Fabrication:

Il existe trois sources d'approvisionnement en granulats :

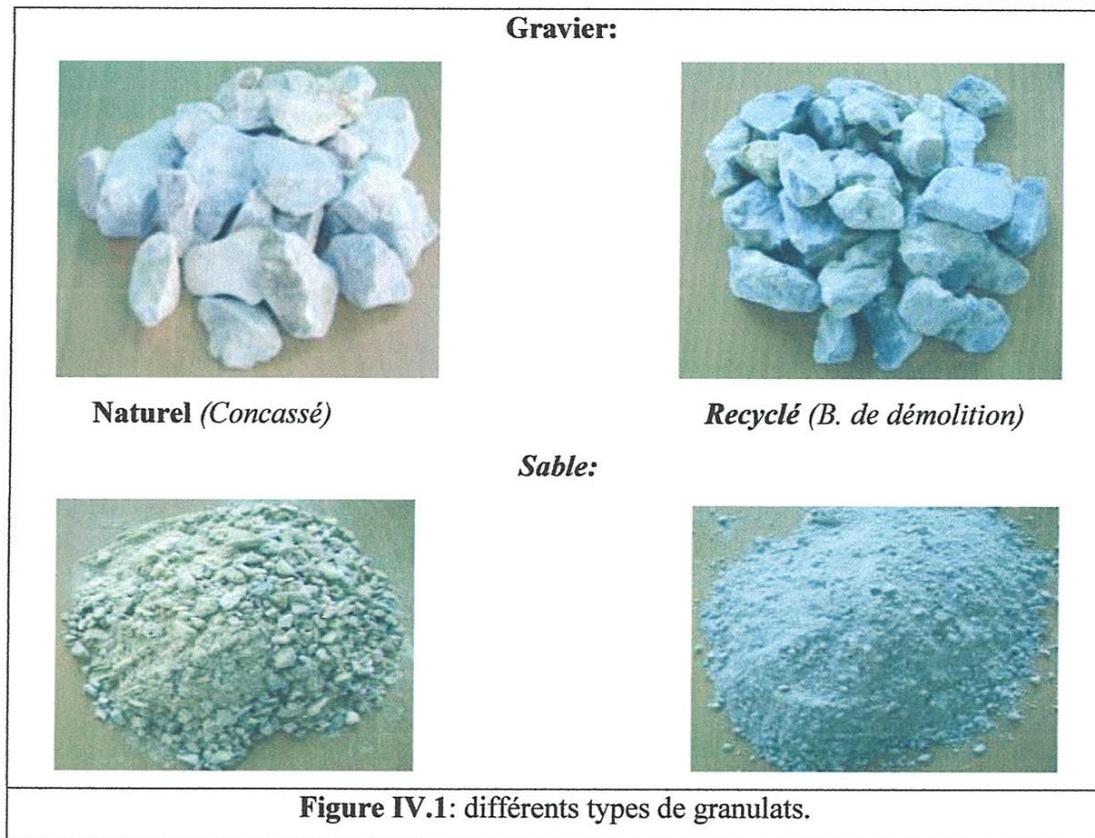
IV.3.1.Les carrières de granulats alluvionnaires :

Les lits ou anciens lits de rivière, les fonds de lacs ou certains fonds marins. L'extraction se fait « à sec » ou « dans l'eau », à l'aide des pelles hydrauliques ou de draglines. Ces granulats sont pratiquement prêts à l'emploi. Un lavage et un calibrage peuvent toutefois s'avérer nécessaires pour permettre leur utilisation. Si leur granulométrie est importante, un concassage, suivi d'un criblage doit alors être envisagé. [46]

IV.3.2.L'exploitation des roches massives :

C'est une principale filière granulaire. Extraits dans une carrière, les granulats sont transportés par camion, bateau ou train vers les usines de transformation ou d'utilisation directe.

L'emploi d'explosifs est nécessaire pour extraire la matière première, autrement dit pour abattre une importante quantité de matériaux. Suit le concassage de la roche éclatée pour la transformer en granulats. Le lavage-criblage permet de trier les grains par tailles et de les rendre propres. [46]



IV.3.3. Les caractéristiques des roches pour granulats

Les granulats naturels sont issus de roches meubles ou massives, caractérisées par leur composition minéralogique, leur texture, leur état d'altération, leur porosité. De ces caractéristiques dépendront les propriétés des granulats (résistances mécaniques, absorption d'eau ou porosité, homogénéité, gélivité, altérabilité, réactivité aux alcalins, etc.).

IV.4. Les caractéristiques des granulats naturels:

IV.4.1. Généralités :

Les quatre opérations nécessaires à la production des granulats sont :

- L'extraction de la matière première.
- Le concassage.
- Le criblage.
- Le stockage avant expédition.

Parfois, une opération complète, remplace un de ces quatre traitements, par exemple ; La cuisson des nodules d'argile de schiste expansé prend place entre le concassage et le criblage et lorsque les nodules sont moulés, le concassage est supprimé.

Le concassage est une opération primordiale dans le cas des granulats de carrière ; intéressant généralement que les classes granulaires.

Il faut donc distinguer les sources pour décrire les particularités de la fabrication, mais on se bornera aux principes généraux car l'équipement nécessaire est extrêmement divers suivant le site, la nature des matériaux, les qualités à produire, les conditions économiques. [2]

IV.4.1.1. Les granulats de carrière:

Ils sont produits à partir de bancs rocheux, la connaissance approfondie des bancs gisement est primordiale puisque les caractéristiques des granulats produits dépendent de la roche et de la structure des bancs, par exemple, si un banc calcaire dur est très fissuré, étant rempli d'argile, le sable de concassage contiendra beaucoup de fines argileuses.

L'extraction se fait par abattage à l'explosif après que la découverte (terre végétale et roche altérée surplombant le front de taille) ait été éliminée au boteur, l'abattage doit se faire selon les règles de l'art, l'usage de l'explosif étant très réglementé pour des raisons de sécurité et de nuisances à l'égard de la collectivité. [2]

Généralement, après l'abattage, on procède à un précriblage appelé « scalpage ».

Le scalpage a pour but d'éliminer les restes de découverts et de roches altérées présents dans l'abattage préalable au tir de mine.

Le matériau scalpé ou non, est ensuite concassé pour être amené à la dimension d'utilisation. Le concassage est réalisé en plusieurs étapes, concassage primaire, secondaire et tertiaire, par exemple séparés l'un de l'autre par des criblages.

Le choix des concasseurs affectés à ces opérations est évidemment très lourd de conséquences pour la carrière puisque d'une part les concasseurs représentent un investissement important et, d'autre part, la productivité de l'installation, la qualité, et le prix des granulats en dépendent énormément. Le type d'appareil et ses dimensions sont choisis en fonction :

- ✓ De la dureté de la roche à concasser.
- ✓ De la dimension du plus gros bloc à admettre (au concassage primaire, cette dimension dépend de la matière dont le tir de mine est effectué).
- ✓ Du débit (à même ouverte, un concassage giratoire débite beaucoup plus qu'un concasseur à mâchoires).

- ✓ Du rapport de réduction (4 à 5 pour les concasseurs à mâchoires, 5 à 6 pour les giratoires primaires).
- ✓ Du coût de l'investissement par tonne de matériau produite.
- ✓ Les paramètres tels que les caractéristiques mécaniques de la roche, le débit d'alimentation et sa régularité, le réglage du concasseur ont une influence sur la forme, l'angularité et le débit du produit de concassage.
- ✓ Le criblage est l'opération complémentaire du concassage :

On fait circuler le matériau à cribler sur un tamis qui vibre et le matériau est ainsi séparé en passants et refus. [2]

IV.4.1.2. Les granulats alluvionnaires:

L'extraction se fait classiquement par une pelle mécanique en site terrestre et par dragage en site aquatique.

Ce sont essentiellement les conditions économiques de l'installation et du marché qui déterminent le choix du matériel à utiliser.

Contrairement au cas de l'exploitation en carrière, le concassage est une opération auxiliaire puisqu'on concasse les classes granulaires non demandées pour augmenter la production des classes déficitaires, le matériel de concassage est donc choisi en conséquence.

Le criblage est ici, l'opération principale ; il est généralement pratiqué dans un courant d'eau, ce qui combine tamisage et lavage en effet, même en site terrestre, le gisement est fréquemment sous la nappe phréatique, ainsi à l'inverse des sables de concassage qui contiennent toujours de 5 à 20% de fines (les grains inférieurs à 80 μ m). [2]

IV.4.2. Caractéristiques géométriques :

IV.4.2.1. Granulométrie :

La granulométrie permet de déterminer l'échelonnement des dimensions des grains contenus dans un granulat.

Elle consiste à tamiser le granulat sur une série de tamis à mailles carrées, de dimensions d'ouverture décroissantes et à peser le refus sur chaque tamis. Les ouvertures carrées des tamis sont normalisées et s'échelonnent de 0,08 mm à 80 mm.

La courbe granulométrique exprime les pourcentages cumulés, en poids, de grains passant dans les tamis successifs.

Les courbes granulométriques des différents granulats peuvent être déterminées par l'essai de l'analyse granulométrique (NF P 18-560). [2]

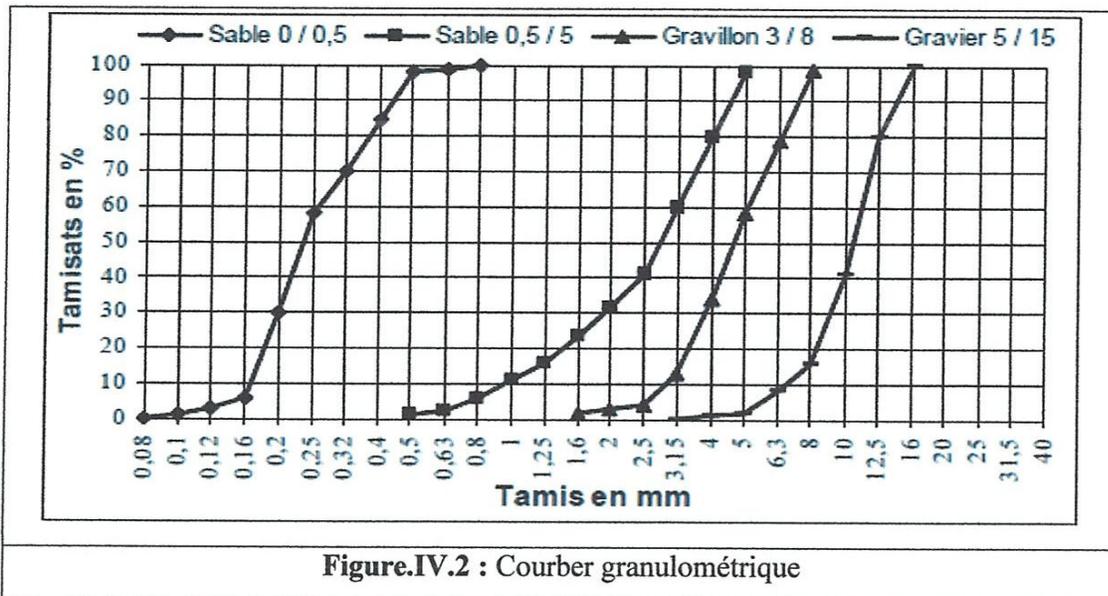


Figure.IV.2 : Courbes granulométriques

IV.4.2.2. Classes granulaires:

On trie les granulats par dimension au moyen de tamis (mailles carrées) et de passoirs (trous circulaires) et on désigne une classe de granulats par un ou deux chiffres. Si un seul chiffre est donné, c'est celui du diamètre maximum D exprimé en mm; si l'on donne deux chiffres, le premier désigne le diamètre minimum d , des grains et le deuxième le diamètre maximum D .

Un granulat est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D . Lorsque d est inférieur à 2 mm, le granulat est désigné $0/D$.

Il existe cinq classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrées (Norme NFP18-101):

- Les fines $0/D$ avec $D \leq 0,08$ mm.
- Les sables $0/D$ avec $D \leq 6,3$ mm.
- Les gravillons d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm.
- Les cailloux d/D avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm.
- Les graves d/D avec $d \geq 6,3$ mm et $D \leq 80$ mm. [2]

IV.4.2.3. Module de finesse:

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis de modules 23, 26, 29, 32, 35, 38. Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons.

IV.4.2.4. Forme des granulats:

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

- La longueur L , distance maximale de deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulat.
- L'épaisseur E , distance minimale de deux plans parallèles tangents au granulat,
- La grosseur G , dimension de la maille carrée minimale du tamis qui laisse passer le granulat. [2]

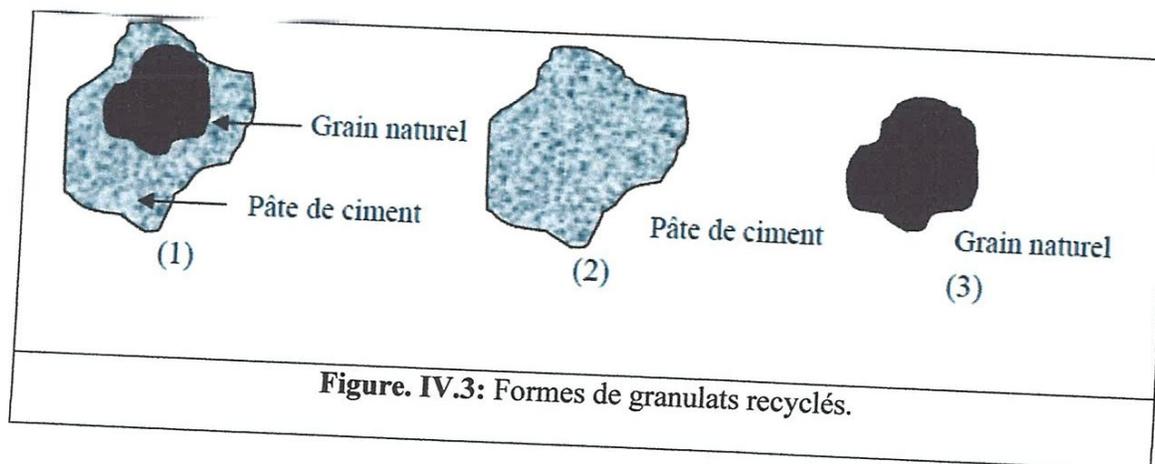


Figure. IV.3: Formes de granulats recyclés.

IV.4.2.5. Coefficient d'aplatissement:

Coefficient d'aplatissement caractérise la forme du granulat à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur. Il est déterminé par un double tamisage d'abord au travers de

la série de tamis à mailles carrée utilisée pour l'étude de la granulométrie. Puis par un second tamisage des refus retenus sur les différents tamis sur une série de grilles à fentes parallèles. Le rapport entre les dimensions des tamis et des grilles étant de 1,58. La norme NF P 18-561 définit les modalités de sa mesure. [2]

IV.4.3. Les caractéristiques physiques :

IV.4.3.1. Masse volumique apparente :

C'est la masse du granulat sec occupant l'unité de volume. Elle dépend du tassement, de la forme et de la granulométrie des grains. Elle se mesure conformément à un mode opératoire précis (normes NF P 18 554 et 18 555).

Elle est comprise entre $1\,400\text{ kg/m}^3$ et $1\,600\text{ kg/m}^3$ pour les granulats roulés silico-calcaires.

La valeur apparente est utilisée dans le cas où l'on effectue les dosages en volume des différentes composantes du béton. [2]

IV.4.3.2. Porosité :

C'est le rapport du volume des vides contenus dans les grains au volume des grains, exprimé en pourcentage.

La porosité des granulats courants est en général très faible. Cependant, la porosité est importante dans le cas des granulats légers. La mesure de la porosité se fait selon la norme (NF P 18 554 et 18 555).

IV.4.3.3. L'absorption d'eau des granulats :

La plupart des granulats stockés dans une atmosphère sèche pendant un certain temps, peuvent par la suite absorber de l'eau. Le processus par lequel le liquide pénètre dans la roche et l'augmentation de poids qui en résulte est appelé absorption.

L'absorption peut varier dans de très larges mesures suivant la nature du granulat. Elle peut varier de 0 à plus de 30 % du poids sec pour granulat léger.

En général, les granulats naturels utilisés pour la confection du béton sont peu poreux et n'absorbent pratiquement pas d'eau lorsqu'ils sont gâchés avec le ciment et l'eau. Par contre, des granulats artificiels, tels que agrégats légers expansés d'argile, sont poreux. Il faut alors

tenir compte de l'absorption de l'eau par les granulats lorsque l'on détermine la quantité d'eau requise pour fabriquer le béton.

La mesure du coefficient d'absorption d'eau se fait selon la norme (NF P 18 554 et 18 555).

IV.4.4. Les caractéristiques mécaniques :

IV.4.4.1. Résistance à la fragmentation :

Dans les bétons, les granulats sont soumis à des contraintes pouvant entraîner leur rupture :

La mesure de leur résistance à la fragmentation s'obtient par l'essai Los Angeles.

Il fait l'objet de la norme NF P 18-573. C'est un essai de résistance aux impacts, basé sur la mesure de la dégradation granulométrique des matériaux soumis aux chocs.

Le coefficient Los Angeles est calculé à partir du passage au tamis de 1,6 mm, mesuré en fin d'essai, caractérise le granulat ; et la résistance à la fragmentation est d'autant meilleure que sa valeur est petite.

L'essai de friabilité des sables, adapté à la granulométrie fine de ces derniers, mesure la résistance des sables à la fragmentation. Le coefficient caractéristique (FS) est d'autant plus élevé que le sable est friable. [2]

IV.4.4.2. Résistance à l'attrition :

C'est une caractéristique très importante pour les matériaux entrant dans la composition des assises de chaussées, soumises à des déformations périodiques dues au passage des véhicules et induisant un effet d'attrition entre les granulats.

L'essai Micro Deval (norme NF P 18-572) est un essai dont le principe est de reproduire, dans un cylindre en rotation, des phénomènes d'usure.

Les granulats résistent d'autant mieux à l'attrition que la valeur du coefficient Micro Deval est faible.

IV.4.4.3. Effets du gel-dégel :

Lorsque les conditions en service font que la température d'un béton saturé passe en dessous du point de congélation, l'eau contenue dans les pores capillaires de la pâte durcie gèle progressivement, d'une façon identique à celle des pores d'une roche et donne lieu à une

expansion. Le gonflement induit par le gel est un phénomène cumulatif, c'est-à-dire qu'il augmente au fur et à mesure que le béton est soumis à des cycles répétés de gel-dégel. [2]

Le phénomène d'expansion du béton sous l'effet du gel se produit principalement dans la pâte de ciment hydraté. Les vides les plus importants, dus à un serrage ou compactage incomplet du béton sont habituellement remplis d'air et ne contribuent donc pas de manière sensible au gonflement du béton.

Un granulat ne sera pas sensible au gel s'il possède une porosité très faible ou si son système capillaire est interrompu par un nombre suffisant de macropores (qui jouent le rôle de bulles d'air). Cependant, un granulat dans le béton peut être considéré comme un volume fermé, car la faible perméabilité de la pâte environnante ne permettra pas à l'eau de se déplacer assez rapidement dans les vides d'air.

Les granulats utilisés habituellement ont une porosité de l'ordre de 0 à 5% et il est préférable d'éviter les granulats qui ont des porosités élevées.

Cependant, l'emploi de tels granulats n'entraîne pas obligatoirement des problèmes de durabilité au gel. En effet, les pores de grande dimension présents dans les bétons aérés et dans le béton sans fines contribuent probablement à la résistance au gel de ces matériaux.

De plus, même pour les granulats ordinaires, aucune relation simple entre la porosité des granulats et la résistance au gel-dégel du béton n'a encore été établie.

De façon générale, les granulats de grande dimension sont plus sensibles au gel, de plus l'emploi de granulats de dimension maximale élevée ou une proportion importante d'éléments plats est à déconseiller puisque des poches d'eau de ressuage peuvent se former sous les granulats. [2]

IV.4.4.4. Alkali réaction :

Dans les granulats, certains constituants amorphes et mal cristallisés de la silice (SiO_2) sont sensibles aux alcalis et peuvent en présence d'humidité réagir avec un hydroxyde alcalin provenant du ciment (NaOH , Ca(OH)_2). Il se forme des silicates alcalins hydratés plus volumineux entraînant la désagrégation du béton en présence d'humidité qui se traduit par des fissurations, des gonflements provoquant des déformations éventuelles parfois très importantes de la structure, des écaillages, des exsudations, des cratères superficiels.

Ces désordres qui n'apparaissent pas tous, peuvent dans certains cas entraîner à plus ou moins longue échéance la ruine totale de l'ouvrage.

Trois conditions sont simultanément nécessaires à l'alcali réaction :

- ✓ La présence d'un granulat potentiellement réactif.
- ✓ Une concentration élevée en éléments alcalins dans la solution interstitielle.
- ✓ Une ambiance de conservation du béton présentant une humidité élevée supérieure à 80 %.

Si l'une de ces conditions n'est pas remplie, il n'y a pas de risque d'alcali réaction.

La norme (NF P18 542) définit les critères de qualification des granulats vis-à-vis de l'alcali réaction. [2]

IV.4.4.5. Propriétés thermiques des granulats :

Trois propriétés thermiques des granulats sont importantes en ce qui concerne la performance du béton, il s'agit du coefficient de dilatation thermique, de la chaleur spécifique et de la conductivité.

Cependant, il a été suggéré que, si la différence entre les coefficients de dilatation thermique et de la pâte de ciment hydraté est importante, une variation notable de la température peut occasionner des mouvements différentiels et rompre ainsi l'adhérence entre les granulats et la pâte qui les entoure. Toutefois, les mouvements différentiels étant provoqués également par d'autres contraintes telles celles causées par le retrait de séchage, une différence importante entre les coefficients de dilatation n'entraîne pas automatiquement des désordres lorsque la température varie entre 4 et 60 °C.

Toutefois, lorsque les coefficients diffèrent de plus de $5,5 \times 10^{-6}$ par °C, la durabilité du béton soumis à des cycles de gel-dégel peut être affectée.

Si les températures extrêmes sont prévues, les propriétés thermiques des granulats doivent être connues, par exemple, le quartz subit un changement de structure cristalline à 574 °C et se dilate subitement de 0,85 %. Cette dilatation suffit à provoquer la rupture du béton ; pour cette raison, le quartz n'est jamais utilisé dans la fabrication des bétons qui devront résister à de fortes températures. [2]

IV.4.5. Impuretés dans les granulats :

IV.4.5.1. Impuretés organiques :

Des granulats naturels peuvent être suffisamment durs et résistants pour être utilisés et cependant ne pas être satisfaisant pour fabriquer du béton s'ils contiennent des impuretés organiques interférant avec les réactions chimiques d'hydratation. Les matières organiques

trouvées dans les granulats sont généralement constituées de produits de décomposition de matières végétales et apparaissent sous forme d'humus ou de terre organique.

De tels matériaux semblent être plus courants dans les sables que dans les granulats grossiers, plus facilement lavés. [2]

IV.4.5.2. Argiles et matériaux fins :

L'argile peut être présente sous forme d'une pellicule enveloppant les granulats et interférer dans leur liaison avec la pâte de ciment.

Comme une bonne liaison est essentielle pour garantir au béton une résistance et une durabilité satisfaisante, ce film argileux peut causer un réel problème. Le sable joue également un rôle non négligeable s'il renferme de l'argile, celle-ci peut retarder la prise en agissant par enrobage des grains de ciment. Il se formerait une pellicule mince, véritable barrière de la diffusion des ions, empêchant ainsi la cristallisation régulière et homogène.

Les retards de prise et de durcissement du béton ne sont qu'exceptionnellement dus au liant.

Ils proviennent le plus souvent soit d'un abaissement imprévu de la température, soit de matière contenue en très faibles quantités dans l'eau de gâchage ou dans le sable.

Deux grands types de matériaux fins peuvent exister dans les granulats : le silt et la poussière de concassage. [2]

Le silt est un matériau de 2 à 60 μm , réduit à cette taille par des processus météoriques naturels ; il peut ainsi se trouver dans des granulats provenant de dépôts naturels.

Par ailleurs, les poussières de concassage sont des matériaux fins formés durant le processus de réduction de la roche en une pierre concassée, ou plus rarement, de graviers en granulats fins concassés. Lors d'un processus correct de traitement des granulats, cette poussière devrait être ôtée par lavage.

Il existe un essai permettant la détermination du pourcentage des éléments très fins du sable (argile, limon et les matières solubles), c'est l'essai dit l'équivalent de sable ES. Les sables convenables ont un ES supérieur à 65 selon les normes (NF P18 598).

Un test calorimétrique permet également de s'assurer que le sable ne contient pas de matières organiques dangereuses (NF P18 586). [2]

IV.4.5.3. Contamination par le sel:

Un sable provenant du bord de mer ou qui a été dragué, soit en mer ou dans un estuaire de rivière, tout comme un sable de désert, contient du sel et doit être traité.

Le procédé le plus simple consiste à laver le sable dans de l'eau douce, mais un soin particulier doit être apporté aux prélèvements effectués au dessus de la limite des hautes eaux dans lesquelles une grande quantité de sel, parfois supérieure à 6 de la masse de sable, peut être trouvée.

En général, le sable provenant des fonds marins, même lavé dans l'eau de mer, ne contient pas de quantités néfastes de sel.

A cause du risque de corrosion des armatures par des chlorures, on précise la quantité maximale d'ions chlore qui peuvent être présents dans un béton.

Compositions	Contrainte F_{c28} N/mm ²	Proportion des constituants Kg/m ³			
		Ciment portland	Eau (libre)	Granulats	
				Gros	Fins
A	10	175	185	1200	755
B	20	220	185	1200	725
C	35	325	165	1200	370
D	45	415	160	1200	515
E	30	285	185	1200	670
F	35	310	185	1200	650

Tableau IV.1: Proportion des comparants pour des bétons agrégats naturels.

IV.4.6. Les propriétés essentielles des bétons :

La diversité des bétons actuels, aux propriétés extrêmement variables, ne permet pas d'imaginer un principe de formulation commun. Celle-ci est orientée vers les propriétés principales demandées au matériau et adaptée en fonction des propriétés secondaires recherchées. Un bon béton n'est acquis, que lorsque trois objectifs principaux sont atteints :

obtenir une résistance mécanique, obtenir une rhéologie qui permet une mise en oeuvre facile et un squelette granulaire donnant une compacité maximale, et qui peut être une propriété secondaire recherchée. Comme il n'existe pas une grande variété de granulats disponibles en un lieu donné, la formulation d'un béton devra tenir compte des ressources locales et des coûts. C'est pourquoi les propriétés intrinsèques des granulats ne sont pas toujours valorisées dans les bétons. [1]

Les propriétés des bétons qui en découlent des granulats ne sont pas toujours observatrices. Le béton de granulats recyclés (RAC₁) de point de vue morphologie est identique à un béton de granulats naturels (NAC₂) ce qui les différencie se sont les granulats. Dans ce contexte, nous présentons un état des lieux de l'influence des granulats sur les propriétés du béton et plus particulièrement le cas des granulats recyclés. [1]

IV.5. Utilisation des matériaux recyclés:

Les matériaux recyclés (granulats de bétons de ciment concassés mélangés avec ou sans enrobés, et matériaux de chaussées routières concassés dont $D \leq 20$ mm) pourront être utilisés en couches d'assise de chaussées dont la classe de trafic est inférieure ou égale à T2. Ces graves recyclées répondront impérativement aux caractéristiques demandées pour une grave de catégorie 3 ou 4, avec cependant une valeur au bleu de méthylène MB (prEN 933-9) inférieure à 1,5 et une teneur en sulfates solubles dans l'eau inférieure à 0,2 (SSa). En caractéristiques particulières, la compacité des graves recyclés COPM (essai Proctor Modifié, NF P 98-231-1) devra être supérieure ou égale à 80 %. [48]

IV.6. Caractéristiques du béton de recyclage de granulats de béton :

Lors de l'utilisation de granulats de recyclage, on remplace généralement le sable de béton concassé par du sable naturel.

Comme le montre clairement le tableau, c'est le sable de béton concassé qui a la plus grande influence sur les caractéristiques du béton durci, et notamment sur le retrait et le fluage.

Composition	0/4mm: 100% sable naturel 4/32 mm: 100% granulats de béton	0/4 mm: 100% sable de béton concassé 4/32 mm: 100% granulats de béton
Résistance à la compression	env. 10% plus faible	env. 30% plus faible
Module d'élasticité	env. 20% plus faible	env. 30% plus faible
Retrait	env. 10% plus élevé	env. 100% plus élevé
Fluage	env. 30-40% plus élevé	env. 100% plus élevé

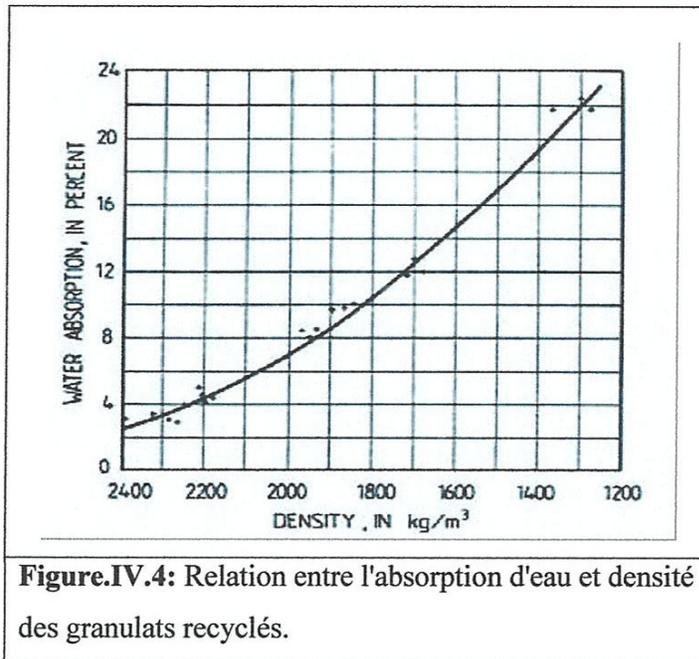
Tableau IV.2: Caractéristiques des recyclage du béton

IV.6.1. Les caractéristiques physiques :

IV.6.1.1. Le coefficient d'absorption d'eau:

Cet essai est effectué selon la norme NF EN 18-554. D'après les résultats des masses volumiques on constate que ces masses diminuent avec l'augmentation de la fraction granulaire. Aussi, les granulats naturels et les granulats recyclés ayant à peu près les mêmes masses volumiques absolues; par contre les masses volumiques apparentes des peu près les mêmes masses volumiques absolues; par contre les masses volumiques apparentes des granulats recyclés sont inférieures que les granulats naturels, ceci s'explique par la présence des pores dans les granulats recyclés; cette dernière est due à la porosité trouvée dans la matière première (les déchets du béton).

L'essai d'absorption d'eau explique la différence entre les deux granulats de point de vue densité, parce 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.



IV.6.2. Caractéristiques géotechniques des graves de recyclage:

Les matériaux issus du recyclage peuvent être classés, selon leur granulométrie, en cinq catégories vis-à-vis de leur emploi en technique routière:

Matériaux de pré criblage et grave non calibrée

grave 0/D avec $6,3 \text{ mm} < D \leq 31,5$

sable 0/D avec $1 < D \leq 6,3 \text{ mm}$

gravillons d/D avec $d \geq 1$ et $D \leq 125 \text{ mm}$

Dans la partie de la norme XP P 18 540 traitant des granulats pour couches de chaussée, des classes spécifiques sont définies pour les matériaux recyclés, basées sur la teneur en sulfates.

En fonction des usages prévus, la valeur de bleu et la teneur en sulfates doivent être surveillés afin d'éviter l'apparition de gonflements.

Pour les autres caractéristiques les matériaux recyclés suivent le même classement que les granulats naturels.

Les caractéristiques intrinsèques de ces matériaux recyclés sont faibles et comprises dans les limites suivantes:

Résistance à la fragmentation:

LA compris entre 25 et 50

Résistance à l'attrition:

MDE compris entre 15 et 50

Taux en % agrégats recyclés	Proportion Kg/m ³				
	Ciment portland	Eau	Granulats Kg/m ³		
			Gros		fins
			RCA Recycles	NA Naturels	
0	310	185	0	1200	650
20	310	185	240	960	650
30	310	185	360	840	645
50	310	185	590	590	640
100	310	185	1270	0	625

Tableau IV.3: Proportion des comparants pour des bétons agrégats recyclés de f_c_{28} **IV.6.2.1. Comportement à la déformation:**

Le module d'élasticité est une caractéristique accessoire (c.-à-d. qu'elle ne constitue généralement pas une valeur de référence lors de la définition de la composition du béton).

Le module d'élasticité de béton comprenant une proportion importante d'agrégats de recyclage est inférieur à celui de béton conventionnel. Le comportement à la déformation de la partie d'ouvrage ne doit pas être un critère déterminant.

IV.6.2.2. Retrait / fluage:

Le retrait et le fluage sont également des caractéristiques accessoires. Les bétons à base de granulats de recyclage tendent à avoir un retrait et un fluage plus importants. Cette tendance augmente avec la proportion de granulats de recyclage. Le retrait et le fluage sont particulièrement augmentés en cas d'utilisation de sable de béton concassé et de mouillage préalable des granulats.

IV.6.3.Caractéristique chimiques:**IV.6.3.1.La teneur en chlorures:**

Un sable provenant du bord de mer, tout comme un sable de désert, contient du sel et doit être traité. La quantité d'ions chlore acceptable dans les granulats est limitée à: 1 % pour les bétons non armés; 0,40 % pour les bétons armés. Il a été constaté sur des cas de bétons recyclés la présence de chlorures dépassant les limites recommandées. Ceci est semblablement lié à la contamination des ouvrages par les chlorures au cours leurs exploitations avant démolition.

IV.6.3.2.La teneur en sulfate:

La norme européenne EN-12-620 définit la limite de la teneur en sulfate à 1 %.

La teneur en sulfate des granulats recyclés est en relation avec la quantité de la pâte cimentaire attachée aux granulats. La contrainte de compression du béton qui emploie 3% de plâtre est de 15 % inférieur à celui sans plâtre. Toutefois, les granulats doivent être lavés avant leur utilisation et la démolition sélective pourrait être considérée comme une alternative efficace.

IV.6.3.3 Alcali-réaction :

L'alcali-réaction est un ensemble de réactions chimiques pouvant se produire entre certaines formes de silices, de silicates ou de carbonates appartenant aux granulats et les éléments alcalins (sodium, potassium) en solutions dans la pâte liante, et la formation d'un gel expansif entraînant l'éclatement du béton.

Les granulats sont désignés comme étant non réactifs (NR), potentiellement réactifs (PR), potentiellement réactifs à effet de pessimum (PRP). La teneur en alcalins actifs des granulats est communiquée si elle dépasse 0,01 % exprimée en Na₂O équivalent.

IV.6.3.4.Gélinivité granulats:

Un granulat ne sera pas sensible au gel, s'il possède une porosité très faible ou si son système capillaire est interrompu par un nombre suffisant de macros pores (qui jouent le rôle de bulles d'air). Un granulat est considéré comme non gélif si au moins l'une des trois valeurs

spécifiées suivantes est respectée: absorbe peu d'eau ($A_b \leq 1\%$), sa résistance à la fragmentation est bonne ($LA \leq 25$), sa gélivité ($G \leq 30$). Dans les cas contraires, la gélivité est mesurée par la dégradation granulométrique du matériau préalablement soumis à des cycles gel-dégel.

IV.6.4.Caractéristique mécaniques :

IV.6.4.1.Résistance des granulats:

La résistance des granulats est obtenue par des essais indirects, des essais de résistance au choc et à l'usure. En général, la résistance et l'élasticité des granulats dépendent de leur composition minéralogique, de leur texture et de leur structure. [1]

IV.6.4.2.Résistance à la compression:

La résistance à la compression des bétons à base de granulats de recyclage est influencée directement par la résistance des granulats utilisés. Celle-ci dépend à son tour de la densité brute des granulats. Comme les granulats de recyclage présentent généralement une densité inférieure à celle des granulats naturels, en raison de la présence de ciment et d'une composition souvent hétérogène, la résistance à la compression des bétons de recyclage est généralement elle aussi moindre. [1]

Au moyen de techniques spécifiques lors de la préparation du béton, comme une teneur en ciment accrue (d'environ 10%) ou un rapport E/C réduit, on obtient des bétons de résistance comparable à celle du béton de granulats naturels.

IV.6.4.3.Influence de la variation du rapport Gravier/Sable:

L'évolution de la résistance en compression à 28 jours en fonction de l'augmentation du rapport Gravier/Sable (G/S) et pour les dosages en ciments 300 et 400 Kg/m³ pour les bétons béton naturel et béton recyclé, est représentée en 'Fig. [4]

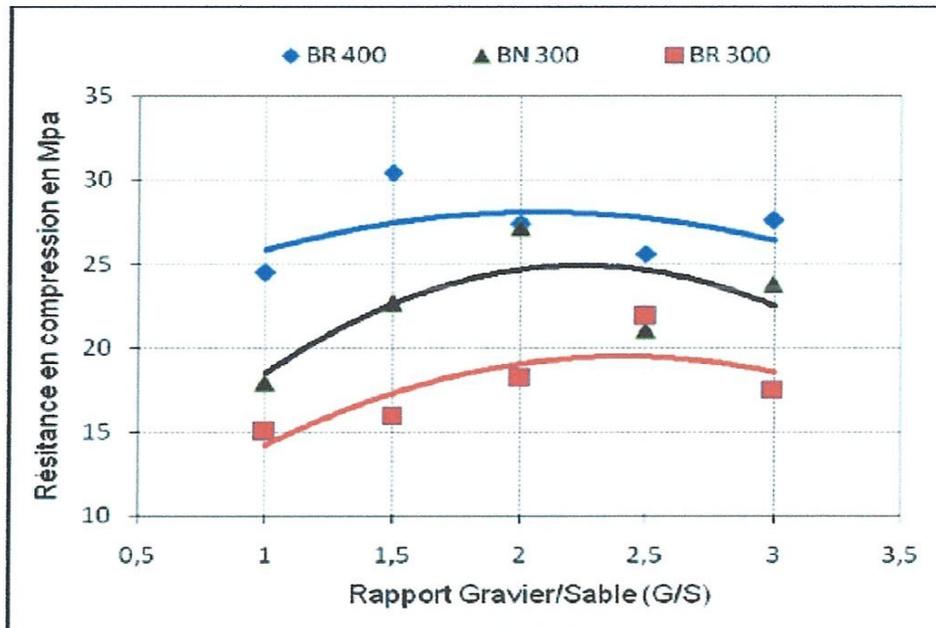


Figure.IV.5: Relation entre la résistance à la compression à l'âge de 28 jours et le rapport G/S pour les bétons naturel et recyclé.

Aussi bien pour le béton normal que pour les bétons de granulats recyclés, l'évolution de la résistance en compression à 28 jours est d'autant plus sensible à la variation de dosage en ciment.

Dans une publication présentée au 1^{er} ont [1] tent que pour trois types de béton BR400, BN 300 et BR 300 le rapport G/S est très important dans la résistance au compression, ceci confirme ce qui a été largement étalé dans différents articles concernant l'influence de ce paramètre sur la résistance: les recommandations préconisent ce taux dans le cas d'un béton normal. Au-delà de cette valeur, une diminution de la résistance est constatée à cause d'une probable apparition de ségrégation due à un manque de mortier. Ceci va dans le même sens des résultats

Les bétons de granulats recyclés BR300 et BR400 dosés respectivement à 300 et 400 kg/m³ en ciment présentent une évolution semblable à celle obtenue pour le béton BN300. Cependant, les meilleures résistances ne sont pas obtenues pour un même rapport G/S. Nous constatons que la résistance du béton recyclé chute dès que le rapport G/S dépasse 2,5 pour le béton dosé à 300 kg/m³ et 1,5 pour un béton dosé à 400 kg/m³. Ceci est l'effet d'une abondance de quantité d'eau à cause du rapport E/C qui est presque constant pour tous ces deux types de

peut être envisagé. La mesure de la gélivité peut être quantifiée par la dégradation granulométrique des granulats soumis à des cycles gel-dégel ou bien à partir de la résistance gel-dégel du béton, mais aucune relation simple entre ces essais n'a été établie. Des essais ont été menés dans le but d'améliorer la durabilité au gel des bétons de granulats recyclés par une reconfiguration de la composition, la méthode de l'air entraîné est la meilleure façon d'améliorer la résistance au gel des granulats recyclés, cependant, cette méthode affecte quelques propriétés physiques des bétons.[52]

IV.7.Caractéristique des agrégats recyclés (essais)

IV.7.1.Analyse sur les matériaux de substitution:

- Description visuelle.
- Granulats metrie /dimensions / forme etc....
- Absorption d'eau.
- L'analyse de l'oxyde (%).
- chlorure d'acide soluble (%).
- Total soufre (%).

IV.7.2.Analyse sur les produits finis:

- Résistance à la compression.
- Densité.
- Couleur / aspect visuel.
- La durabilité.[53]

Propriété	Contrainte de résistance N/mm ²	Type de béton			
		Agréats naturels	%des gros agrégats recyclés		
			30	50	100
Caractéristique mécanique					
Résistance à la flexion N/mm ²	30	4.4	4.3	4.3	4.5
Module E KN/mm ²	30	25.5	26.0	25.5	25.0
Retrait (micro)	30	596	600	625	673
Coefficient de fluage	30	1.25	1.24	1.41	1.93
Performance liée à la durabilité					
Profondeur de carbonatation (mm)	30	32	32	36.3	51.0
	30	21	21	20	18.5
% de durabilité résévis du sel-de-gel	35	99	102	100	97
Profondeur d'abrasion (mm)	35	0.69	0.73	0.73	0.78
%d'expansion des sulfates 10 ⁻³	20	38	35	54	56

Tableau IV.4: Comparaison des Performance des bétons agrégats naturels et recyclés.

IV.8.L'utilisation de granulats recyclés:

- Les granulats de béton 80/200:

Ce type d'agrégats trouve leur application exclusivement pour des travaux hydrauliques matériau de remplissage pour les protections berges de la rivière. La demande du marché est de toute façon plutôt limitée.

- Les granulats de béton 0 / 80, 0 / 56 ou 0 / 40 (4 / 32):

Le prix du marché de ce type d'agrégats est d'environ 220 à 240 francs belges par tonne et en tant que telle environ 100 francs belges par tonne en dessous du prix du gaz naturel agrégats.

Ces agrégats d'une granulométrie continue sont l'essentiel de la production et sont principalement utilisés dans les applications de la construction de routes, soit comme matériau de base roadsub, plus ils sont également utilisés dans le secteur privé pour le remblayage et la création d'aires de stationnement non durci. À quelques reprises le matériel est divisé en a0/20

et 20/40 fraction par exemple, et recyclé comme granulat dans le béton maigre. Le nombre limité d'usines de recyclage qui ont leur propre installation à béton utilise généralement une fraction 4 / 32 pour leur production de béton. Une substitution de 100% des agrégats grossiers par des granulats recyclés est dans ce cas le plus généralement utilisée.

• Tamis et broyeurs sable:

Ce matériau a un prix de marché très faible d'environ 80 francs belges par tonne. Généralement le produit est vendu comme du sable pour les bases sous la chaussée ou pour la construction de remblais.

Sans doute à l'heure actuelle les granulats recyclés sont donc de loin le plus utilisé dans la route construction. Toutefois, la façon dont les choses vont maintenant la consommation de matériaux recyclés granulats dans le secteur routier peut s'attendre à stagner dans le futur, comme:

- La construction de routes déjà maintenant a de consommer deux fois le montant de gravats, est la production rénovation de la route.
- Augmentera au cours de la construction de nouvelles routes.

IV.9.Modes opératoires des essais :

IV.9.1.Eprouvettes :

Dans les essais réalisés pour l'étude des bétons, deux types d'éprouvettes ont été utilisés :

-Eprouvettes de forme cylindrique de dimensions 16x32 cm, dont la hauteur est égale à deux fois le diamètre pour les essais de compression, selon la norme «NF P 18 406»

-Eprouvettes de forme prismatique de dimension 7x7x28 cm selon la norme «NF P 18 407»

Pour les essais de traction par flexion.

IV.9.2.Gâchage et malaxage :

Le malaxage a été réalisé dans une bétonnière de type B132, qui assure le mélange des constituants par simple rotation de la cuve suivant un axe horizontal, la vitesse de rotation est fonction du diamètre de la cuve; il est de l'ordre de 24 tours par minute.

Des palettes solidaires de la cuve assurent l'entraînement des matériaux et ce mouvement de brassage assure le mélange des constituants.

La capacité de la cuve est de 134 litres et le volume de malaxage est de 100 litres. La vidange de la cuve se fait par inversion du sens de rotation. Le temps de malaxage est de 03 minutes

dont 01 minutes de malaxage à sec des graviers et de ciment, 02 minutes de malaxage humide, après ajout d'eau et de sable. La vibration est réalisée sur une table vibrante (vibration extérieure).

IV.9.3.Essais sur béton frais:

IV.9.3.1.Affaissement au cône d'Abrams :

Cet essai est effectué conformément aux prescriptions de la norme «NF P18 451». C'est l'essai de mesure de consistance le plus employé et le plus connu universellement. Le moule utilisé pour réaliser cet essai est un cône tronqué de 30cm de hauteur.

Placé sur une surface lisse, la petite ouverture vers le haut, le cône est rempli de béton en trois couches d'égal volume. Chacune des couches est compactée avec 25 coups d'une tige métallique normalisée de 1,6 cm de diamètre, dont l'extrémité est arrondie. Une fois le cône rempli, le dessus de la surface doit être arasé en se servant de la tige et en effectuant des mouvements de va et vient. Durant ces opérations, le cône doit demeurer fixe sur la base lisse; des écrous de serrage, situés à la base du cône, permettent de le maintenir immobile.

Après remplissage, le cône est relevé lentement et le béton s'affaisse, la différence entre la hauteur du béton affaissé et la hauteur du cône est appelée l'affaissement.

IV.9.3.2.Mesure de l'air occlus :

Le seul élément compressible dans un béton frais est l'air «NF P18 353». Il existe trois méthodes pour mesurer la teneur en air totale du béton frais:

La méthode gravimétrique, volumétrique et préssiométrique. Nous avons utilisé dans nos essais la méthode préssiométrique. Son principe est fondé sur la relation entre le volume d'air et la pression appliquée donnée par la loi de Mariotte. Cet essai a été réalisé avec un aéromètre qui indique directement la teneur en air (%).

La procédure consiste essentiellement à observer la diminution de volume d'un échantillon de béton compacté lorsqu'il est soumis à une pression connue.

IV.9.3.3. Mesure de la densité réelle du béton frais:

La densité réelle du béton frais est mesurée par la pesée d'un récipient de 8 litres (le récipient de l'aéromètre à béton) rempli de béton selon un moule de remplissage analogue à celui utilisé pour le remplissage des éprouvettes cylindriques.

La densité est calculée par la formule suivante :

$$\rho = (P - P_0) / V$$

Avec : **P** : est la masse du récipient plein de béton (arasé à l'aide d'une règle)

P₀ : est la masse du récipient vide

ρ : est la densité du béton frais et **V** le volume du récipient (8 litres)

IV.10. Inconvénients des produits recyclés:

La qualité du béton recouvert est largement tributaire de la qualité du béton d'origine et les conditions exceptionnelles que le béton a pu avoir enduré dans sa première vie. Dans une étude néerlandaise, certains restes de brome et de chrome ont été constatés dans certains béton recyclé. Au Japon, il a été noté que des restes de chrome et le plomb ont été trouvés dans les déchets de béton car elles sont à l'origine contenues dans le ciment, ce qui pourrait potentiellement causer des contaminations des sols. D'autre part, des recherches récentes au Royaume-Uni indiquent l'absence de différences, en moyenne, par rapport à la matière originale. Une étude suisse a conclu qu'aucune augmentation de la pollution importante ne s'est produite (en particulier en ce qui concerne les eaux souterraines) lorsque des matériaux de construction recyclés sont utilisés. Toutefois, la réglementation suisse exige des mesures de protection des eaux souterraines lors de l'utilisation de matériaux de démolition recyclés. Et de l'utilisation des lits d'infiltration et de drainage est interdite (en raison de la contamination potentielle avec le chrome).

Le béton des chaussées utilisés dans les pays froids où les sels de dégivrage sont souvent appliqués peut augmenter la teneur en chlorure de sodium qui peut limiter la récupération pour utilisation du béton une nouvelle fois en raison du risque de réaction alkalisilica ou corrosion de l'acier.

IV.11.Conclusion :

Dans un béton, les granulats apportent la consistance, le volume et la résistance. La nature minérale des granulats est souvent un critère fondamental de leur utilisation, les caractéristiques physiques et mécaniques sont aussi importantes par l'influence nuisibles qu'elles peuvent exercer sur la résistance.

Le choix d'un granulats est donc un facteur important de la composition du béton, qui doit toujours être étudiée en fonction des performances attendues, spécialement sur le plan de la durabilité.

Nous avons exposé dans ce chapitre les critères que doivent remplir l'utilisation des granulats dans le béton hydraulique. Nous avons utilisé les déchets de marbre comme granulats dans le béton en substitution d'une fraction volumique du sable, de gravier et les deux ensembles, avec des taux de substitution de (25%, 50%, 75% et 100%).

Chapitre: V

Recherches en cours

V.1.Introduction

Un béton de recyclage conforme à la norme est un béton dont le granulat est constitué à hauteur d'au moins 25% de sa masse de béton recyclé et/ou de granulats non triés au sens de la Directive de pour la valorisation des déchets de chantiers minéraux. La directive SIA 2030 consacrée au béton de recyclage est présentement en cours d'élaboration; elle prendra en compte les données actuelles, en particulier les normes de structures et prescriptions environnementales les plus récentes. Elle a pour objectif de rendre possible le recours en toute sécurité à du béton de recyclage pour les constructions en béton. Le béton de recyclage et le granulat de béton sont aujourd'hui souvent utilisés dans la construction. Le peut être calculé selon la norme comme pour le béton constitué d'un granulat naturel. Le béton de recyclage comportant du granulat non trié n'a jusqu'à aujourd'hui que rarement été utilisé pour la construction de structures, car ses propriétés peuvent différer sensiblement de celles d'un béton composé d'un granulat naturel. Mais une faible teneur en matériaux minéraux non triés (jusqu'à 5% de la masse du granulat), qui peut se présenter dans un béton normal ou un béton de recyclage, ne pose en général.

Les granulats peuvent provenir de filières industrielles de recyclage valorisant des sous-produits (ou coproduits) industriels ou issus de la démolition de bâtiments ou de voiries (broyats de bétons, briques, recyclage de ballasts de chemin de fer, de croûtes ou de fraisas d'enrobés routiers ou de terrils miniers.)

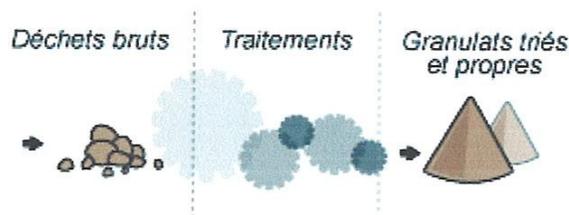
Les bétons recyclés concassés sont surtout destinés à la fabrication de graves routières, les croûtes ou les fraisas d'enrobés sont recyclés dans la fabrication de graves-bitumes ou d'enrobés routiers.

V.2.Recyclage des matériaux de construction :

Prometteur mais insuffisant:

➤ En France :

Est une consommatrice importante de granulats, l'utilisation totale de granulats a atteint 413 millions de tonnes en 2000 (soit 7 tonnes par habitant et par an) dont 328 Mt pour les génies civils et 85 Mt pour le bâtiment.



Ces matériaux naturels sont utilisés essentiellement pour les travaux routiers (283 M/t) ou les bétons hydrauliques (130M/t), ces matériaux pondéreux voyagent sur des distances relativement courtes, essentiellement en camion, le camion représente le mode de transport prépondérant (91%), loin devant le bateau (5%) et le rail (4%).

Certaines régions équilibrent production et consommation alors que d'autres dépendent d'approvisionnements parfois éloignés.

En 2009, les principaux syndicats professionnels signé avec l'Association des Départements de France, une «convention d'engagement volontaire des acteurs de conception, réalisation et maintenance des infrastructures routières, voirie et espace publics urbain ».

Dans cette convention, les entreprises de construction routière et les entreprises de terrassement, notamment, dans le cadre de la mise en œuvre des orientations du Grenelle de l'Environnement, s'engagent à préserver les ressources non renouvelables et se donnent les objectifs suivants :

- le réemploi ou la valorisation de 100% des matériaux géologiques naturels excavés sur les chantiers de terrassement (objectif annoncé : une amélioration de 10% de réemploi dès 2012 et de 100% de réemploi ou de valorisation à l'horizon 2020).
- une meilleure valorisation des matériaux issus de déconstruction routière et un accroissement du recyclage des déchets de chantier des.
- l'augmentation de la réutilisation en centrale des matériaux bitumineux issus de la déconstruction routière (objectif annoncé : 60% en 2012).

De son côté l'Etat s'engage dès 2010 :

- à renforcer sa politique d'innovation routière en assurant des expérimentations sur chantiers,
- à participer à la refonte de la doctrine technique et normative en matière de réemploi des matériaux et de valorisation des déchets issus de la déconstruction des routes, à assurer la

promotion de cette politique auprès des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'œuvre, notamment dans le cadre des partenariats techniques. « à prévoir systématiquement, dès 2010, dans ses marchés de travaux la possibilité de réemploi des matériaux, de leur recyclage ou de la valorisation de déchets, et à ouvrir ses marchés de travaux à de telles variantes ». [44]

V.2.1.Chantiers routiers:

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

Le recyclage in situ des granulats qui constituent les couches d'assise des routes est très répandu : avant leur réutilisation immédiate.

Le recyclage est important dans les travaux routiers où une part importante des déchets est utilisée sur les chantiers. Des procédés permettent aujourd'hui le retraitement en place de la couche de roulement ou de la chaussée, elle-même ; la proportion de recyclage approche les 100 % pour les couches de roulements dont les mélanges granulats.

En plus de leurs propres déchets, elles valorisent la totalité de la fraction recyclée des déchets inertes de bâtiment, soit environ 10 % du gisement. Cette valorisation pourrait encore aller plus loin afin de limiter la mise en décharge trop importante des inertes du bâtiment. De nombreuses initiatives sont donc engagées par des professionnels afin de gérer la prise en compte des déchets.



Photo. V.1: l'utilisation des agrégats recyclés dans des bétons routiers.

➤ **En UAS :**

Utilisez pour la base de la route, la chaussée et sous-bas est généralisée et l'utilisation la plus commune. Aux États-Unis de son utilisation et l'acceptation a été promu par la Fédéral Highway Administration, qui a adopté une politique pro utilisation et entrepris des recherches dans le domaine. De recherche finlandaise a trouvé que le béton recyclé spécifié pour une qualité convenue et la composition de la sous-couche de base et de base peut permettre à l'épaisseur de ces couches à être réduite en raison des propriétés bonnes roulement de matériel.

Il peut également être utilisé engagée en asphalte mixtures. Divers projets de génie civil peut également faire usage de gros granulats.

Directives et règlements considèrent souvent les limites physiques des granulats de béton recyclé, mais, idéalement, elles devraient aussi favoriser son utilisation. Une étude plus par le National Road Mixed Concrete Association (NRMCA) aux États-Unis a conclu que jusqu'à 10% agrégat de béton recyclé est utilisable comme substitut des granulats vierges pour applications concrètes, y compris structurelles concrète.⁷⁶ de recherche du Royaume-Uni indique que jusqu'à 20% de granulats de béton recyclé peut être utilisé pour la plupart des applications (y compris structurelles).

État australien lignes directrices que jusqu'à 30% de matières recyclées granulats dans le béton de structure peut être jusqu'à 30% sans différence notable dans la maniabilité et la résistance par rapport à l'état naturel agrégat.

V.2.2.Applications structurales :

Les avis sont partagés concernant ces applications. Les normes japonaises autorisent l'utilisation des agrégats recyclés dans des bétons structuraux. Le développement de technologies a permis d'en augmenter la qualité, réalisant des progrès remarquables au cours des dernières années dans ce pays.

Selon un organisme international regroupant des experts en matériaux de construction, la Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, l'utilisation de 20 %

d'agrégats de béton recyclés pour des applications structurales en béton est une pratique en cours dans certains pays. Les gravats de $\geq 4\text{mm}$ sont utilisés. Des méthodes pour garantir la qualité de tous les types d'agrégats recyclés sont disponibles. Toutefois, selon cet organisme, dans certains pays, elle est insuffisante.

En France, l'utilisation de la matière recyclée pour des structures porteuses est interdite. Certains États américains l'excluent également, comme c'est le cas pour le Texas. Les recherches devront se poursuivre afin de développer les connaissances sur les particularités techniques des granulats recyclés, pour leur utilisation dans un contexte structural.

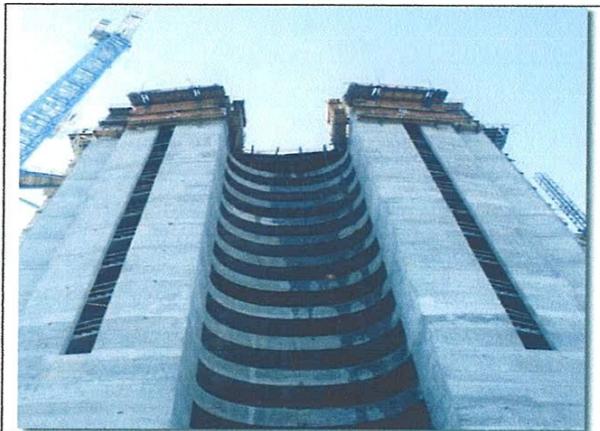


Photo. V.2: l'utilisation des agrégats recyclés dans des bétons structuraux.

V.2.3. Quelques exemples d'utilisations variées comprennent:

- Béton recyclé à partir de gravats de construction et la route a été trouvé à un bon matériau pour les récifs artificiels dans la baie de Chesapeake, Etats-Unis, à l'aide des programmes de restauration d'huîtres. Les surfaces irrégulières et des pores de béton concassé offrent une bonne protection pour les petites huîtres des prédateursfs artificiels pour la pêche sur la côte est des États-Unis aussi souvent l'utilisation concrète de ferraille.
- Ciment St Laurent (Holcim) écrasé de 450.000 tonnes de gravats de béton pour les réutiliser comme base de route pour tabliers de nouvelles à l'aéroport de Toronto.
- La Thaïlande utilise les déchets de béton pour faire pavés, des pots et des bancs pour communautaire.

- Le développement de l'aéroport Gardermoen norvégien a permis la réutilisation de plus de 90% des matières récupérées à partir du site de démolition.

➤ **En Allemagne :**

Reste que le recyclage des matériaux possède encore une marge de progression importante. Le taux pour le béton est de 8 %, et de 5,3 % pour les granulats routiers, à comparer avec les 18 % atteints en Allemagne ou dans les pays scandinaves. C'est pourquoi la convention d'engagement des entreprises des travaux publics signée le 25 mars 2009 s'est fixé un objectif ambitieux : 100 % de recyclage des fraissâtes extraits des routes chaque année, correspondant à 18 % de matériaux recyclés dans l'utilisation finale.

On ajoutera que le recyclage demande une réorganisation du cycle de production, afin de renforcer la production de matériau sur site, à travers des unités fixes ou mobiles. Il reste en outre à connaître la résistance des produits à long terme, et à développer des techniques de fabrication améliorant leurs qualités de résistance, durabilité, etc.....

Cette pratique a connu une importante croissance au cours des 15 dernières années, tant par les quantités d'agrégats que de celles des entreprises concernées. Des compagnies de pavage, entrepreneurs en construction de routes, carrières, entrepreneurs en démolition et entreprises spécialisées dont le broyage d'agrégats recyclés est l'activité principale, y sont impliquées. Notons qu'en Allemagne, près de 70 % de la matière recyclée provenant des débris de construction sont utilisées pour la construction de routes en 2002.

V.2.4. Pour le béton:

Lignes directrices allemandes que dans certaines circonstances agrégats recyclés peuvent être utilisées jusqu'à 45% de l'agrégat total, selon la catégorie d'exposition du Concrete. Comme granulats de béton recyclé à ciment, quand réutilisés dans le béton à tendance à avoir plus d'absorption de l'eau et peut avoir moins de force que les granulats vierges. Parfois, plus de ciment sont nécessaire.

Potentiel signifié captives reste d'accroître l'utilisation des granulats recyclés secondaires dans le béton. Dans certains pays, notamment l'Allemagne, la Suisse et l'Australie, le béton contenant des granulats recyclés est aujourd'hui commercialisé. Par exemple, Boral «verte»

est en béton pré mélangé à partir de granulats recyclés qui a été utilisé dans un certain nombre de projets de construction en Australie, y compris le chef de file mondial Green Building Council House 2, un immeuble de bureaux de 10 étages à Melbourne. Un exemple notable de l'Allemagne est le complexe Waldspirale contenant 105 logements résidentiels conçus par Friedensreich Hundertwasser à Darmstadt. Achevé en 2000, le bâtiment fait l'utilisation de granulats recyclés dans le béton. Plus grande école de Zurich à Birch a ouvert la voie pour l'utilisation des agrégats recyclés dans le béton en Suisse. En Espagne, Horcimex usées recyclées agréger le contenu dans le béton de structure pour un logement projet à Madrid.

Dans la mesure où cet ensemble recyclé est utilisé dans le béton, il tend à être principalement dans le béton prêt à l'emploi. Quelques exemples de la France existent pour une utilisation dans le béton préfabriqué, mais la CSI n'est pas actuellement connaissance d'une utilisation généralisée.

V.2.5. Comme granulats fins :

Granulats fins peuvent être utilisés à la place du sable naturel. Toutefois, le contenu du mortier peut affecter la maniabilité, la force et le retrait de l'absorption d'eau élevée, ce qui pourrait augmenter le risque de règlement et de retrait à sec de craquage. Granulats fins contiennent souvent en plâtre de C & DW et il est plus coûteux, à la fois économiquement et écologiquement, de nettoyer le matériel. Granulats fins peut être un bon remplissage des corrections sous niveau car ils peuvent agir comme agent de séchage en mélange avec des sous agrégats de qualité Fine soil.80 peuvent être utilisés dans le sous-bas et en tout-en utilise globale. Compte tenu de l'impact de l'extraction du sable des rivières et des mers, d'autres sources sont d'une importance croissante et l'utilisation peut augmenter à la suite de cette.

Pays	Principales utilisations
Royaume-Uni	La matière broyée est principalement utilisée comme sous-couches « <i>subi base material</i> » pour la construction de routes.
États-Unis	Le béton recyclé peut être utilisé comme agrégats, s'il est traité adéquatement. L'asphalte recyclé est réutilisé dans l'asphalte comme liant « <i>binder</i> », ou comme agrégats
Canada (Alberta)	Sous-couches pour la construction de routes, etc.
France	Les principales utilisations sont les remblais (couches inférieures des ouvrages routiers), les assises de chaussées (au-dessus de ces remblais), le remplissage de tranchées, les accotements de chaussées. Matériaux majoritairement non traités (pas de mélange avec du ciment ou du bitume). Très peu, voire pas du tout, d'utilisation dans la fabrication de produits en béton (béton prêt à l'emploi, béton préfabriqué)
Belgique	Fondations et sous-fondations de voiries (65 %) et de bâtiments industriels (35 %). Certaines granulométries (0/31,5 mm) sont également couramment employées pour réaliser de nouveaux bétons (non normalisés). Les normes belges tolèrent l'intégration de jusqu'à 20 % de granulats de béton recyclés dans les nouveaux bétons, mais limitent encore assez fortement les applications possibles de tels bétons.
Allemagne	Les agrégats sont principalement utilisés sur la route et dans des travaux de génie civil. Par exemple, pour les bases de gel, les digues et barrages, ainsi que les routes de terre. Ils sont utilisés de façon marginale dans la construction.

Tableau. V. 1: Principales applications des bétons – Commentaires obtenus

V.3.La technologie actuelle :

La méthode la plus commune pour le recyclage du béton sec et durée le broyage. Trieurs mobiles et concasseurs sont souvent installés sur les sites de construction pour permettre le traitement sur site. Dans d'autres situations des sites bien spécifiques sont établis, ils sont généralement (souvent) capable de produire un agrégat de bonne qualité : les aimants et d'autres prouesse mécaniques sont utilisées pour extraire l'acier, qui est ensuite recyclés. Un système de broyage typique est représenté sur la figure suivante. Le recyclage des agrégats de béton (grossier et fin) peut être réalisé (effectué) en utilisant des équipements modernes qui peuvent même être mobile, et 55% à 73% de matériaux peut être récupérés et utilisé pour le béton structure, la quantité(%) restant peut être utilisé pour les produits préfabriqués en béton.

V.3.1.Nouvelles technologies (émergente):

Bien que ces technologies soient nouvelles et commercialement non encore disponibles à l'heure actuelle, ces technologies peuvent inclure :

1. Construction en circuit fermé en utilisant l'énergie mécanique et thermique. L'Université de Delft, en collaboration avec TNO, travaille sur un concept de construction nouvelle en circuit fermé permettant gravats de béton et des débris de maçonnerie sont séparés en agrégats grossiers et fins et de la pierre de ciment en utilisant l'énergie mécanique et thermique fournie par la fraction combustible des C & DW.
2. Décomposition électrique du béton.

Pour briser le béton (ou des rochers), la contrainte de cisaillement élevée est nécessaire au moyen d'une onde de choc. La technologie conventionnelle utilise la force mécanique. Sinon la chaleur (voir ci-dessus) ou de l'énergie électrique peut être utilisée. L'énergie électrique peut être utilisée pour créer un courant pulsé. À l'heure actuelle, les coûts élevés des dépenses initiales sont un obstacle à l'utilisation, mais de niche. Les applications peuvent bénéficier de cette technologie où les actions de redoublement élevé sont nécessaires. Les impacts environnementaux de l'utilisation de l'électricité ont également besoin à prendre en considération.

3. Micro-ondes La technologie à micro-ondes peut également être utilisée pour écraser le béton.

V.4. Quelques statistiques :

➤ Au Canada :

Une estimation réalisée à partir de statistiques publiées par Environnement Canada, quantifiait le volume total de débris de la construction et de démolition générés au Canada à près de 12,5 millions de tonnes en 2005 (0,39 tonne). Selon cette estimation, 36,2 % de la matière était attribuable aux bétons et gravats et 34,6 % à l'asphalte. Le taux de récupération global était estimé à 42,2 %. L'asphalte présentait le plus haut pourcentage de recyclage avec 72,5 %, suivi des bétons et gravats avec 42 %. Les statistiques sur la production canadienne de débris de construction, de rénovation et de démolition varient selon la source des données. Les chiffres publiés par Statistique Canada pour l'année 2002 sont bien en dessous des estimations d'Environnement Canada : 3,3 et 3,4 millions de tonnes sont comptabilisés respectivement pour 2000 et 2002. Le Québec était responsable de 18,4 % de ce volume, comparativement à 34,4 % pour l'Ontario. [16]

Le démarque des autres provinces, par la disponibilité de données actualisées sur la production de ce type de débris.

Générées dans le secteur de la construction, de la rénovation et de la démolition (0,59 tonne). De ce volume, 3,2 millions de tonnes ont été récupérées, sur un potentiel de 4,3 millions de tonnes. En appliquant la proportion des chiffres de Statistique Canada aux données québécoises, on obtiendrait, pour 2008, un total de 25 millions de tonnes de la construction et de démolition générées à l'échelle canadienne, incluant 8,6 millions de tonnes pour l'Ontario. La quantité de débris globale produite annuellement, incluant ceux provenant des infrastructures comme les routes et les ponts, est estimée entre 325 et 350 millions de tonnes. Le béton pourrait représenter environ 60 % de ce tonnage.

Les débris de la construction et de démolition provenant de bâtiments seulement totalisaient 170 millions de tonnes en 2003, selon l'EPA. Leur répartition est la suivante :

- 9 % des nouvelles constructions.
- 42 % de la rénovation.
- 49 % de la démolition.

La composition, en poids, des débris provenant de la construction et de la démolition de bâtiments.

Le taux de récupération des débris comptabilisé par l'EPA était de 48 % en 2003. Ce pourcentage varie selon les États²⁰. Les volumes de débris de la construction et de démolition récupérés les plus importants. [16]

➤ **En France :**

Plus de 32 millions de tonnes de débris de chantiers de bâtiments et 100 millions de tonnes de débris de travaux publics sont produites chaque année (2,06 millions de tonnes). Ce volume atteindrait 309 millions de tonnes, lorsqu'on y comptabilise la récupération de sols. Le taux de recyclage des bétons atteindrait 63 %²⁵. [16]

➤ **En Allemagne :**

En 2003, 223,4 millions de tonnes de débris de la construction et de démolition ont été générées (2,7 tonnes), comparativement à 240,8 millions de tonnes en 2002. Le volume produit en 2002 se répartit comme suit :

- 70 % lors de travaux d'excavation.
- 24 % lors de travaux de démolition de bâtiments.
- 8 % lors de la démolition de routes.
- 2 % sur des sites de construction.

➤ **Au Royaume-Uni :**

Au total, 89,6 millions de tonnes de débris de la construction et de démolition ont été comptabilisées au Royaume-Uni en 2005 (1,48 tonne). De ce volume, 51 % ont été recyclés et 16,7 % ont été utilisés pour la régénération de sites ou pour des projets d'infrastructures. Le 31,3 % restant a été enfoui comme déchet. [16]

➤ **Aux Pays-Bas :**

Les débris de la construction et de démolition générés annuellement aux Pays-Bas sont de 25 millions de tonnes (1,5 tonne). Le taux de récupération est le plus élevé de l'Union européenne, atteignant 95 %³¹. Le recyclage des bétons est présent dans ce pays depuis

plusieurs années, favorisé par un manque de disponibilité d'agrégats naturels et d'espace pour les enfouir.

➤ **En Australie :**

Les débris de la construction et de démolition y représentent 42,4 % de l'ensemble des déchets solides du pays. Ainsi, 13,7 millions de tonnes sont générées (0,64 tonne). De ce volume, 7,8 millions de tonnes sont récupérées, représentant un taux de 57 %. Les bétons occupent 81,8 % du volume des débris de la construction et de démolition et comptent un taux de récupération de 54 %. [16]

➤ **Au Japon :**

Au Japon, 77 millions de tonnes de débris de la construction et de démolition étaient générées en 2005 (0,6 tonnes). Le taux de récupération était de 80 %. Le béton compte pour 42 % de ce volume et l'asphalte 34 %. Le taux de recyclage de ces deux matières est de 98 %.

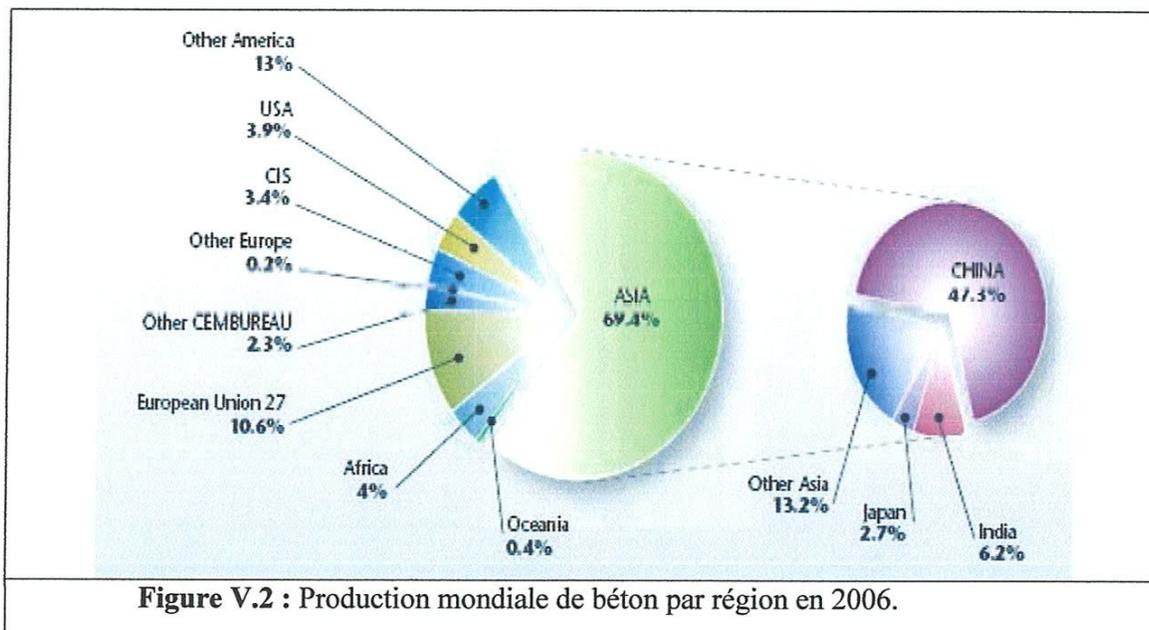
Les chiffres sur les quantités de matières et les taux de récupération sont des indices révélateurs de la volonté des pays à gérer cette matière. On doit toutefois tenir compte, lors de l'analyse des données, des particularités géographiques, des méthodes de construction et des principaux matériaux utilisés.

Recyclé comptes agrégés pour 6% à 8% de la consommation totale en Europe, avec des différences significatives entre les pays. Les plus grands utilisateurs sont le Royaume-Uni, les Pays-Bas, Belgique, Suisse et Allemagne. Il a été estimé en 2000 que ~ 5% du total aux États-Unis ont été recyclées globale. [16]

V.5.Des objectifs à la hausse :

Dans plusieurs pays, les objectifs de récupération des débris de la construction et de démolition sont revus à la hausse. Au Canada, le gouvernement de l'Ontario par exemple, s'est donné un objectif de 60 % de recyclage de ces débris pour l'année 2008, alors que 12 % seulement étaient recyclés en 2005. En Alberta, plusieurs mesures ont été mises de l'avant pour favoriser cette industrie, réduire les quantités générées et augmenter la récupération. Mentionnons que l'objectif de récupération de 60 % fixé par le gouvernement québécois a été dépassé par l'industrie de la construction et de démolition, pour atteindre 74 % en 2008.

Dans son projet de politique québécoise de gestion des matières résiduelles 2010-2015, c'est 80 % des bétons, briques et asphalte que le Québec prévoit valoriser ou recycler. Aux États-Unis, le président Obama a récemment rehaussé les cibles à 50 % de valorisation³⁸. À partir de 2012, les bétons ne pourront plus être éliminés dans les décharges en France. [16]



Les débris de béton proviennent principalement de deux sources, soit de la récupération des travaux de construction ou de démolition, mais également de restes de béton prêt à l'emploi non utilisés. Certains experts évaluent que près de 20 % du béton utilisé actuellement pourrait techniquement être remplacé par du béton recyclé. Aux États-Unis seulement, l'industrie du béton prêt à l'emploi pourrait épargner 300 millions \$ par année par l'utilisation d'agréats recyclés.

Le béton récupéré est habituellement broyé en morceaux ou sous forme d'agréats auxquels sont donnés de nouveaux usages. Cette matière connaît un taux de récupération relativement élevé, lorsqu'on la compare à l'ensemble des débris de la construction et de démolition. En Europe, les pays les plus performants sont les Pays-Bas avec un taux 95 %, l'Allemagne avec 80 % et la France avec 63 %. Les agréats recyclés sont en concurrence avec les agréats naturels. Des indications sur ce marché apportent un certain éclairage sur le potentiel de la matière recyclée. Mentionnons seulement que 460 millions de tonnes métriques d'agréats

naturels ont été vendues au Canada en 2006 et que en a produit 50,4 millions de tonnes en 2008⁵¹. , comme au Royaume-Uni, 25 % de tous les agrégats étaient occupés par la matière recyclée, 12,6 millions de tonnes de matière recyclée pourraient être écoulées. Nous vous référons à l'annexe C, pour en connaître davantage sur les applications des agrégats naturels. Dans le but de promouvoir l'utilisation des agrégats recyclés, le Waste & Ressources Action Programme du Royaume-Uni, a mis sur pied un portail. On y retrouve, entre autres, des informations sur les applications, les équipements de traitement, les fournisseurs d'agrégats, des études de cas, etc. C'est également le cas en France en Belgique en Allemagne et au Japon. [16]

V.6.Conclusion:

En gérant correctement la problématique des déchets, il est possible de transformer les gravats de béton concasse avec succès, et ce en circuit ferme et sans quitter le site de production. En tenant compte que les matières premières naturelles ne sont pas inépuisables et que l'utilisation d'un maximum de matériaux secondaires ne doit pas se faire au détriment de la qualité élevée du produit fini, le recyclage des gravats de béton constitue, a long terme, l'unique solution pour une production respectueuse de l'environnement.

Les granulats peuvent provenir de filières industrielles de recyclage valorisant des sous-produits industriels ou issus de la démolition de bâtiments ou de voiries (broyats de bétons, briques, recyclage de ballasts de chemin de fer, de croûtes ou de fraisas d'enrobés routiers ou de terrils miniers.

Les bétons recyclés concassés sont surtout destinés à la fabrication de graves routières, les croûtes ou les fraisas d'enrobés sont recyclés dans la fabrication de graves-bitumes ou d'enrobés routiers. Actuellement se développe aussi l'usage des mâchefers d'incinération des ordures ménagères.

Les techniques employées pour la production sont celles décrites pour les roches. Deux postes différents : celui de l'extraction qui n'a pas lieu d'être dans le cas de terrils, de crassiers et de fraisage des anciennes chaussées, et celui du tri. En effet, dans le cas de certains.

Coproduits, l'attention est portée sur l'élimination des éléments nocifs capables d'engendrer des désordres. IL peut s'agir des plâtres et des matériaux flottants dans le cas des matériaux de démolition.

Chapitre: VI

Cas de l'Algerie

VI.1.Introduction:

En Algérie, l'épuisement des gisements naturels de granulats et les difficultés pour mettre en place de nouvelles carrières imposent de rechercher de nouvelles sources d'approvisionnement, pour faire face aux besoins en granulats pour les grands chantiers.

VI.2.Déchets en Algérie :**VI.2.1Naissance d'une véritable politique environnementale :**

L'Algérie est entrain de connaître un développement économique et démographique sans précédent. Le taux élevé d'accroissement de la population a ainsi engendré une urbanisation accélérée, le plus souvent de manière anarchique qui a vu la prolifération de l'habitation précaire. Cela ne s'est pas fait sans conséquences sur l'environnement. Face à la gravité des problèmes environnementaux, le gouvernement algérien a décidé en 2001 de consacrer une enveloppe financière importante, de près de 970 Md, pour atteindre les objectifs inscrits dans le Plan National d'actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD), prévu jusqu'en 2010.

Le secteur de l'environnement connaît actuellement des mutations à travers notamment le renforcement du cadre institutionnel et juridique.

- Sur le plan de la politique environnementale, le Plan National d'Actions pour L'Environnement et le Développement Durable (PNAEDD) fixe les différents programmes environnementaux du pays pour 2001-2010.
- Ces politiques sont appuyées par le Fonds National de l'Environnement et de dépollution (FEDEP) qui intervient notamment pour aider les entreprises industrielles à réduire ou à éliminer leurs pollutions et les unités de collecte, de traitement et de recyclage des déchets, ainsi que par la nouvelle fiscalité écologique basée sur le principe du pollueur payeur afin d'inciter à des comportements plus respectueux de l'environnement.
- Sur le plan législatif et réglementaire, plusieurs lois ont été promulguées :
 - ✓ Loi n 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
 - ✓ Loi n°01-20 du 12 Décembre 2001 relative à l'aménagement du territoire dans le cadre du développement durable.
 - ✓ Loi n°02-02 du 05 février 2002 relative à la protection et à la valorisation du littoral.

- ✓ Loi n°03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'Environnement dans le cadre du développement durable.
- ✓ Loi n°04-03 du 23 Juin 2004 relative à la protection des zones de montagne dans le cadre du développement durable.
- ✓ Loi n°04-09 du 14 août 2004 relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable.
- ✓ Loi n°04-20 du 25 Décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable.
- ✓ Ratification par l'Algérie du Protocole de Kyoto.
- ✓ Entrée en application de la fiscalité écologique en janvier 2005.

Le montant de la taxe est de 24.000DA/tonne de déchets liés aux activités de soin des hôpitaux et cliniques et de 10500 DA/tonne de déchets industriels dangereux stockés. Sur le plan institutionnel, création de plusieurs organismes :

- Le Centre National des Technologies de Production plus Propres (CNTPP).
- L'Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable.
- L'Agence Nationale des Déchets.
- Le Conservatoire National des Formations à l'environnement.
- Le Centre National de Développement des Ressources Biologiques.
- Le Commissariat National du Littoral.
- Le Centre National des Technologies de Productions plus Propres.
- Le Haut Conseil de l'Environnement et du Développement Durable.

VI.2.2.Déchets Industriels :

Le cadastre relatif à l'élimination des déchets spéciaux a été réalisé en 2002 et a donné lieu au Plan National de Gestion des Déchets Spéciaux (PNADGES) qui a permis de caractériser le déchet par typologie et niveau de dangerosité. Ce document est important car il permet de contrôler le suivi de l'évolution de la production des déchets spéciaux.

En effet, les estimations données par le MATET sont alarmantes : les stocks de déchets spéciaux sont estimés à 2.8Mt. La production de déchets spéciaux est estimée à 325 000 tonnes/ an. Ce stockage massif et la production non contrôlée de ces matières dangereuses ne sont évidemment pas anodins en termes de santé publique et d'incidence sur l'environnement. Compte tenu de la législation en vigueur et conformément au principe du pollueur payeur défini dans le cadre du FEDEP (Fonds National de l'Environnement et de Dépollution),

chaque industriel est responsable de ses déchets produits et à ce titre, il est tenu de les traiter. Pourtant le cadre législatif n'est pas encore suffisamment contraignant puisque les industriels préfèrent encore s'acquitter de la taxe de déstockage plutôt que de traiter leurs déchets.

D'ici la fin d'année, le MATET envisage de nouvelles mesures coercitives à l'encontre des industriels : une augmentation du montant de la taxe déstockage et également un crédit d'impôt incitatif pour les entreprises.

Le gisement de déchets spéciaux est essentiellement centré dans les régions Est (1ère région productrice de déchets spéciaux), Centre et Ouest dans les wilayas d'Algérie, de Bejaïa, Skikda, Annaba, Tlemcen et Oran. 87% des déchets produits proviennent de ces zones, soient 282000 tonnes/ an et détiennent à elles seules 95% des déchets détenus en stock.

VI.2.3. Valorisation des déchets et sous produits dans le domaine des travaux publics:

VI.2.3.1. Pneus usagés et déchets plastiques :

En Algérie le secteur d'activité œuvre en effet à renforcer ses actions en matière de valorisation des déchets et sous produits industriels notamment les pneus usagés dans les travaux routiers et de génie civil. Cette démarche consiste évidemment à développer et appuyer l'utilisation de ce déchet industriel dans les divers travaux de Génie civil ce qui contribuera d'une part, à la préservation de l'environnement, et d'autre part, à la réduction des coûts induits par l'utilisation des matériaux de plus en plus rares notamment dans certaines régions du pays.

En effet, les pneumatiques usagés constituent un gisement de matières premières secondaires, leur récupération et leur valorisation constituent pour notre pays un impératif économique.

La valorisation de ce déchet industriel est à ses premiers balbutiements. Un premier chantier expérimental a été initié par le département ministériel, concernant l'utilisation des pneus réformés en tant que soutènement d'un talus de remblai dans un projet routier contournement de Bou Smaili). Les travaux déjà finalisés ont permis de mettre en œuvre 3500 pneus mis à disposition par Michelin Algérie.

VI.2.3.2. Déchets de la construction/démolition :

La démolition des ouvrages en béton et l'industrie des matériaux de construction sont toujours accompagnées par des produits secondaires ou des déchets ; le stockage de tels déchets solides dans des dépôts favorise la pollution de l'environnement et puisque les réserves en granulats alluvionnaires vont s'épuiser, il est donc nécessaire de trouver un moyen pour valoriser ces produits et les réutiliser de nouveau comme granulats dans les bétons et les mortiers.

Le béton recyclé est simplement du vieux béton broyé pour produire des granulats. Il peut être utilisé dans les couches de fondation comme dans du béton maigre et comme seule source de granulats ou remplacement partiel des granulats dans du béton neuf.

Les granulats de béton recyclé sont généralement plus absorbants et moins denses que les granulats ordinaires. La forme des particules est semblable à celle de la pierre concassée.

Le béton fabriqué avec des granulats provenant du recyclage, présente généralement de bonnes qualités la maniabilité, durabilité et résistance à l'action du gel-dégel. La résistance en compression varie selon la résistance du béton initial et le rapport eau/liants du nouveau béton. Le mortier fabriqué avec des sables provenant de déchets de briques, présente généralement de bonnes résistances à l'action du gel-dégel, à l'action du séchage et aux eaux usées.

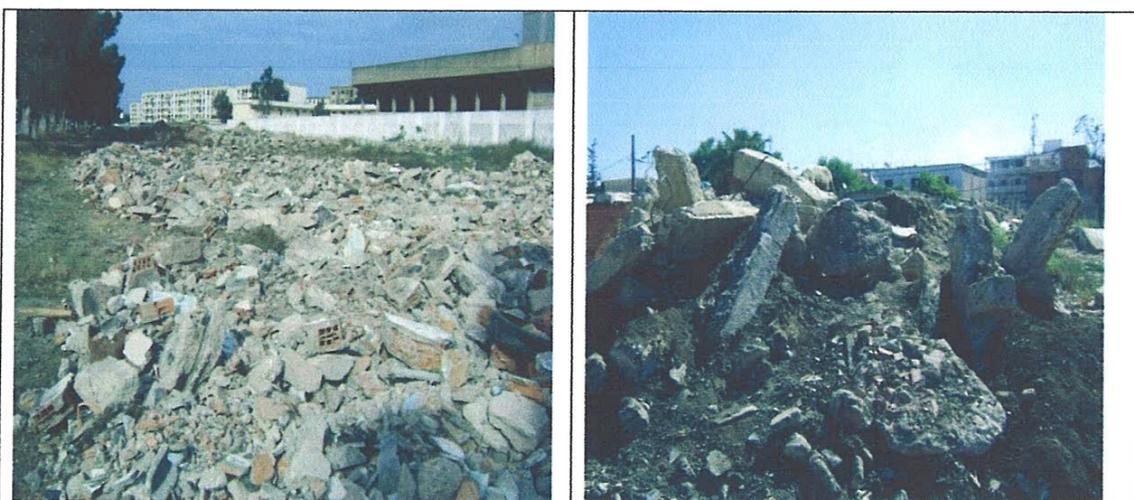


Photo. VI.1: Déchets de la construction/démolition .

Pour les raisons suivantes notre pays à bissac d'une législation sur le recyclage du béton :

- L'Algérie compte un déficit important en matériaux de construction et en particulier le ciment et le sable.
- L'Algérie a une demande en granulats considérablement croissante en rapport avec le développement surtout dans les régions du sud du pays. Dans le bâtiment, la demande en sable s'élève annuellement à plus de 15 millions de mètre cube. Face à la gravité des problèmes environnementaux, le gouvernement algérien a décidé en 2001 de consacrer une enveloppe financière importante, de près de 970 millions de dinars, pour atteindre les objectifs inscrits dans le Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAEDD), l'épuisement des gisements naturels de granulats et les difficultés pour mettre en place de nouvelles carrières imposent de rechercher de nouvelles sources d'approvisionnement, pour faire face aux besoins en granulats pour les grands chantiers lancés par le gouvernement algérien (Autoroute Est-Ouest, la construction d'un million de logement ... etc.), l'application des granulats recyclés dans la production du béton n'a pas encore franchi le seuil des laboratoires et les expériences menées sont beaucoup plus à caractère formatif et non sous l'impulsion d'ordre environnemental ou économique. Par ailleurs, une utilisation abusive d'une ressource non renouvelable de granulats naturels est constatée même pour la production d'éléments de moindres importances à l'exemple de béton pour trottoir. Alors que pour cet usage, les matériaux de démolition peuvent constituer une alternative.
- Pays sismique (destruction de bâtiment).
- Parc immobilier ancien et le nouveau en majorité en préfabriqué.
- Utilisation importante de la préfabrication (Retour des éléments).
- Pays en voie de construction et renouvellement de infrastructure routière.

VI.3.Conclusion:

En Algérie, la totalité de la production du béton dans le bâtiment et les travaux publics est composée seulement de granulats d'origine naturelle. Les contraintes liées à la croissance de la demande ces dernières années pour ce type de granulats, nécessitent le recours à d'autres alternatives que les granulats naturels. Par ailleurs, les matériaux de démolition ou de chantier provenant de la déconstruction du vieux bâti sont en quantité croissante. Ils sont utilisés en remblai ou mis en décharge sauvage causant un impact sur l'environnement.

Conclusion générale :

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 est la solution la plus prometteuse. Le recyclage permet non seulement de répondre au déficit de production, mais aussi de mieux protéger l'environnement.

Les déchets de démolition représentent un gisement important suite aux différentes catastrophes qu'a connu le pays et leur valorisation dans le secteur industriel pose beaucoup de problèmes. Il est donc important de connaître les propriétés intrinsèques, inhérentes aux matériaux recyclés et aux mélanges de plusieurs types de granulats recyclés afin de faire un choix judicieux du matériau le plus apte à remplir les fonctions qui lui sont assignées. Compte tenu de l'emploi fait de ces matériaux.

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.

L'utilisation des granulats recyclés dans la fabrication des bétons offre une bonne solution au problème de la gestion des déchets de démolition pour préserver l'environnement.

Les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques des granulats recyclés sont presque les mêmes que les granulats naturels, d'où la nécessité de les utiliser dans le domaine du génie civil.

Ce projet nous a permis d'approfondir nos connaissances sur le recyclage du béton de construction et de démolition, particulièrement sur les processus de recyclage, les caractéristiques des matériaux (agrégats) recyclés, et leurs utilisations (routes et structures) ainsi que les recherches en cours sur le sujet.

Nous avons aussi constaté l'utilité du recyclage dans un pays comme l'Algérie, pays sismique, construction anciennes, processus de construction préfabriqué, et donc la nécessité d'un projet de réglementation sur le recyclage en général dans notre pays.

Références bibliographiques

- [1]: AK. HACHANA, E.BENAICHI, B. MEZGUICHE, M. MELLAS" *étude de béton des à base des agrégats des déchets de démolition "*
- [2]: BERREDJEM Layachi" *le recyclage des bétons de demolition solution pour le développement durable formulation et compartiments physique et mécaniques des béton à base de ces recyclés» Annaba 2009*
- [3]: Mlle SAADANI Sabrina, " *Comportement des bétons à base de granulats recyclés"*
- [4]: L. Berredjem, N. Arabi, " *les matériaux de demoliation une source de granulats pour béton : formulation et caractérisation d'un béton a base de ces recyclés"*
- [5] : Haddar Abderrahmene & Mimoune Zoubeyr « *L'effet du nombre du recyclage de PVC sur les propriétés du polyéthylène réticulé par le silane » Juin (2009)*
- [6] : " *Recyclage des béton souples existantes "* (2001)
- [7] : www.file:///H:/Nouveau%20dossier78/rubble-recycling-f.htm
- [8]: www.notre-chima
"planete.info/.../actu_2709_dechets_demolition_boues_beton_recyclage.php -
Cached"
- [9]: " *recyclage des déchets minéraux de chantier dans le canton de vand"* février (2007)
- [10]: " *recyclage des granulats "*
- [11]: <http://www.carmeuse.fr/page.aspeid=145/recyclage>.
- [12]: SESA « *Recyclage de gravats de béton »*
- [13]: www.lerm.fr/lerm/.../lerm_Newsletter8_granulatbibliogr.shtml -Cached -Similar

- [14]: Edited by Y.Kasai «*Demolition and Reuse of Concrete and Masonry*» Proceedings of the Second International RILEM Symposium held in 1988 in Tokyo.
- [15]: O. Boudlal & B. Melbouci » *Laboratoire de Géomatériau, Environnement et Aménagement (LGEA)* », *Faculté du génie de la construction, Département de génie civil, Université Mouloud Mammeri, de Tizi-Ouzou, BP N°17 RP 15000 Tizi-Ouzou.*
- [16]: Monsieur Sébastien Richer, "recyclage des bétons de construction et de démolition " mai (2010) 3R MCDQ ET RECYC-QUÉBEC ii Rapport technique n° RT-40916
- [17]: Edited by T.C.Hansen «*Recycling of Demolished Concrete and Masonry*»It has been compiled by RILEM Technical Committee 37-DRC and draws on research and practical experience worldwide.
- [18]: Le recyclage des bétons au Québec et à l'étranger. www.recyc-uebec.gouv.qc.ca.
- [19]: S. S. JANKAR et C. B. K. RAO, "*Index of aggregate particle shape and texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning*", *Cement & concrete research*, 34(11), pp:2021-2027, (2004).
- [20]: C. S. POON & C. S. LAM, "*The effect of aggregates-to-cement (A/C) ratio and types of aggregates on the properties of pre-cast concrete blocks*", *Cement & Concrete Composites*, 30(4), pp:283-289, (2008).
- [21]: http://www.dailymotion.com/video/x1511g_lerecyclagedblaisdetranchs_business
- [22]: Hallshow Hussain, Daniel Levacher (Recyclage de béton de démolition dans la fabrication des nouveaux bétons) *Université de Limoges, I.U.T Limousin de Génie Civil.*
- [23] L.Azzouz; M.Bouhicha; S.Kenai; M.Hadjoudja: Recyclage des déchets de briques dans le béton de sable de dunes (PROCEEDINGS du 1er colloque national de génie civil: matériaux de construction, novembre 2000, université de Mostaganem).
- [24] Jan Desmyter-Edmonde Rousseau, CSTC: RTD info 26 le bâtiment ce recycle mars 2004
- [25]: Le LERM, "*Déchets de chantiers de bâtiment*", enquête CEBTP/DEMAIN pour FFB et ADEME, (1999).

- [26]: ADEME, "*Guide des déchets de chantiers de bâtiment*", Paris, (1998).
- [27]: N. BOURMATTE, "*Granulats Recyclés de substitution pour Bétons Hydrauliques, Caractérisation, Performances, Durabilité*", Thèse de Magister, Université Menterie de Constantine, 159 p., (2005).
- [28]: "*Centrales à béton*",
- [29]: M. Benhouana, B. Nezergui, "*caractéristiques physiques et chimiques des granulats recyclés et granulats naturels*"(2009)
- [30]: recyclage <http://www.carmeuse.fr/page.asp?id=93&langue=FR>
- [31]: Vivian W. Y "*A Review on the Viable Technology for Construction Waste Recycling*" Tam1
- [32]: http://www.lhoist.fr/frames/Frame_QuickLime/Frame_QuickLime.htm
- [33]: RILEM, "*Demolition and Reuse of concrete*", Report of technical committee, 37-DRC, T.C Hansen, E&FN SPON, 305 p., (1988).
- [34]: F. PELLERIN, "*Caractérisation des granulats recyclés fabriqués avec du béton de ciment et des enrobés bitumineux pour utilisation dans les fondations routières*", Thèse de master es sciences, Université de Laval, 165 p., (2000).
- [35]: Melle Nadjua Bourmatte "*granulats recyclés de substitution pour béton hydrauliques* " Constantine juin(2007)
- [36]: Journée de clôture de l'opération de recherche « *Bétons environnementaux* » François de Larrard.
- [37]: "*lignes directrices relatives la gestion des de brique et d'asphalte issus des travaux de construction et de démolition et des résidus du secteur de la pierre de taille*" juin (2009)
- [38]: Québec « *Lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique, d'asphalte et de pierre de taille* » Gouvernement du Québec, 2009
- [39]: le principe de fonctionnement d'une centrale a béton 2004
- [40]: Dominique Auger-Gagnon "Le béton recyclé tout aussi durable «Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton.
- [41]: KOMAR A » *matériaux et éléments de construction* » Moscou, éditions 1978
- [43]: "*classification et aide au choix des matériaux granulaires recyclés pour leurs usages routiers hors agrégats d'enrobés* ", février (2011)

[44] : L. BERREDJEM & N. ARABI, "*Les matériaux de démolition des déchets inertes, une source de granulats pour béton*", Séminaire national sur l'environnement et industrie, Sheraton Oran, pp :31-43, (2009).

[45] : R. HADFIEVA-ZAHARIEVA, "*Durabilité des bétons à base de granulats recyclés*", Thèse de Doctorat, Université d'Artois, 350 p., (1998) (rapporté par [70]).

[46]: Le Granulats www/wp-content/plugins/flv-gallery/flvgallery.php on line 221

[47] : "Strasbourg": 2010 indices 1

[48]:Y. MALIER, "*Les bétons à haute performance, caractérisation, durabilité et applications*", Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 673p, (1992).

[49] : M. SANCHEZ de JUAN & P. A. GUTIERREZ, "*Influence of recycled aggregate quality on concrete properties*", laboratoire Central des Matériaux et Structures, Espagne

[50]:R. N. SWAMY, "*The Alkali-Silica Reaction in Concrete*", Blackie and Son. Ltd, Glasgow, 336 p., (1992).

[51] :F.R. GOTTFREDSSEN & F. THOGERSEN, "*Recycling of concrete in aggressive environment*", 3rd International RILEM Symposium on Démolition and Reuse of Concrete and Masonry Odense", Denmark, pp:362-370, (1993).

[52] :A. GOKCE, S. NAGATAKI, T. Saeki & M. Hisada, "*Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: the role of air content in demolished concrete*", Cement and Concrete Research, 34(5), pp:799-806, (2004).