

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : STRUCTURES

Présenté par : **DIA Mouhamadou Bassirou**

SOUMAH Mouloukou Souleymane

**Thème : Etat de l'art sur les bétons à base de recyclât:
Perspectives pour l'Algérie**

Sous le direction de : Pr CHERAIT Yacine

Juin 2019

- Remerciements -

Nous remercions profondément ALLAH, le Très Haut, le tout puissant de nous avoir donné la vie, la santé, la sérénité et les capacités pour mener à terme ce mémoire de fin d'études de master deux option structures.

*Les travaux ont été réalisés sous la direction du professeur **Yacine CHERAIT** à qui nous adressons nos profonds et sincères remerciements pour son aide, sa disponibilité et sa compréhension dans tous les précieux moments qu'il a su nous consacrer.*

*Nous tenons à renouveler nos remerciements à notre encadreur **Yacine CHERAIT** qui, par son esprit de synthèse, a largement contribué à la réalisation de ce travail. Nous le remercions également pour les nombreux moments qu'il nous a consacrés, notamment pour son aide précieuse à l'interprétation des résultats et à la réalisation de ce document.*

Nous remercions également aux membres de jury qui nous font l'honneur d'examiner notre travail.

Nous remercions à l'ensemble du corps enseignants et administratif du département de génie civil et d'hydraulique de la faculté des sciences et de la technologie de l'Université 8 Mai 45 de Guelma.

Nos remerciements les plus profonds pour nos chères familles pour leur soutien moral indéfectible et leurs encouragements.

Enfin, nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.



Mouhamadou Bassirou DIA
Sénégal (Dakar)



Mouloukou Souleymane SOUMAH
Guinée Conakry (Conakry)

-Dédicaces-

A nos chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de nos études. Nous vous seront toujours profondément reconnaissant.

A nos chères frères et sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

A toute nos familles pour leur soutien tout au long de notre parcours universitaire.

A nos Etats respectifs (Sénégal, Guinée Conakry), qui grâce leur bonne relation diplomatique, nous ont permis de poursuivre nos études dans ce beau pays qu'est l'Algérie.

A notre encadreur Pr. Yacine Chérait, dont ces qualités pédagogiques et surtout humaines sont pour nous un modèle. Votre gentillesse, disponibilité, culture scientifique, et compétences professionnelles ont toujours suscité notre admiration et respect.

A l'ensemble des professeurs qui ont contribué à notre formation.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.

Merci

ملخص

الاستهلاك العالمي السنوي من الاسمنت والركام هو عدة مليارات طن سنويا. من أجل الحفاظ على الموارد الطبيعية وحماية البيئة وترشيد استهلاك الطاقة, لذلك يبدو من المناسب دراسة جدوى إعادة تدوير بعض النفايات الناتجة عن الأنشطة الصناعية وغيرها من الأنشطة المختلفة في الخرسانة, إضافات الأسمنت والاسمنت. يتطلب هذا النهج إجراء جرد أولي للنفايات المناسبة لإعادة التدوير في الهندسة المدنية, وفي المرحلة الثانية, دراسة السلوك (من زوايا مختلفة), والمواد المطورة من هذه المعاد تدويرها.

في هذا العمل النهائي للرسالة, نقترح, من خلال بحث ببليوغرافي مفصل, دراسة إمكانية استرداد الإطارات المستعملة, وخبث أفران الصهر, وخرسانات الهدم, ونفايات الطوب, مسحوق الزجاج والحشو الجيرية, في مجال البناء, وخاصة في صناعة الخرسانة والأسمنت, وكذلك الاحتمالات التي يمكن تصورها على المستوى الوطني.

الكلمات الرئيسية: النفايات, الأسمنت المركب, الخرسانة, المجاميع, إضافات الأسمنت, المعاد تدويرها.

RESUME

La consommation mondiale annuelle en ciment et en granulats s'élève à plusieurs dizaines milliards de tonnes par année. Dans le but de conserver les ressources naturelles, protéger l'environnement, et rationaliser la consommation en énergie, il apparaît donc opportun d'étudier la faisabilité de recycler certains déchets générés par les différentes activités industrielles et autres, dans les filières du béton, des ciments et des ajouts cimentaires. Cette approche nécessite dans un premier un recensement des déchets aptes à être recyclés en génie civil et dans une seconde phase, l'étude du comportement (sous différents angles), des matériaux élaborés à partir de ces recyclât.

Dans ce travail de mémoire de fin d'études, nous nous proposons, à travers une recherche bibliographique détaillée, d'étudier le potentiel de valorisation des pneus usagés, des laitiers de haut fourneau, des bétons de démolition, des déchets de briques, de la poudrette de verre et des fillers calcaires, dans le domaine de la construction, particulièrement dans la fabrication des bétons et des ciments ainsi que les perspectives envisageables au niveau national.

MOTS-CLES : Déchets, Ciment composé, Béton, Granulats, Ajouts cimentaires, Recyclât.

ABSTRACT

The annual global consumption of cement and aggregates is several billion tons per year. In order to conserve natural resources, protect the environment, and rationalize energy consumption, it therefore seems appropriate to study the feasibility of recycling certain waste generated by various industrial and other activities in the concrete, cement and cement additions. This approach requires a first inventory of waste suitable for recycling in civil engineering and in a second phase, the study of behavior (from different angles), materials developed from these recycled.

In this final dissertation work, we propose, through a detailed bibliographic research, to study the potential of recovery of used tires, blast furnace slags, demolition concretes, brick waste, glass powder and calcareous fillers, in the field of construction, particularly in the manufacture of concretes and cements, as well as the prospects that can be envisaged at national level.

KEYWORDS : Waste, Composite cement, Concrete, Aggregates, Cement additives,
Recycled.

SOMMAIRE

Liste des figures	I
Liste des tableaux	III
Liste des symboles	V
Introduction générale	1

CHAPITRE I . Généralités et synthèse sur les déchets et leur réglementation

Partie A : Généralités sur les déchets

I. Introduction.....	7
I.1. Définition d'un déchet.....	7
II. Classification des déchets.....	8
II.1. Déchets solides ménagers.....	8
II.2. Déchets industriels.....	9
II.3. Déchets hospitaliers.....	10
II.4. Déchets de construction.....	10
III. Gestion des déchets.....	12
III.1. Définition de la gestion des déchets.....	12
III.2. Principes de gestion des déchets.....	12
III.3. Méthodes de gestion des déchets.....	13
IV. Aspect règlementaire et législatives de la gestion des déchets.....	15
IV.1. En Algérie.....	15
IV.2. Au Sénégal.....	17
IV.3. En Guinée.....	18

Partie B: Synthèse sur les déchets utilisés en génie civil

V. Introduction.....	20
VI. Recyclage des déchets.....	20
VI.1. Les trois grands principes du recyclage.....	20
VI.2. Intérêt du recyclage dans le domaine du génie civil.....	21
VI.3. Utilisation des recyclât.....	22
VI.4. Déchets recyclés dans le domaine du génie civil.....	24
VII. Conclusion du chapitre.....	33
Références bibliographiques.....	34

CHAPITRE II . Valorisation des déchets comme granulats pour béton

I. Introduction.....	37
II. Les granulats.....	37
II.1. Définition.....	37
II.2. Classification normalisées des granulats.....	37
III. Valorisation du béton de démolition comme granulats pour béton.....	39
III.1. Techniques de démolition et déconstruction.....	39
III.2. Elaboration des granulats de démolition.....	41
III.3. Caractéristiques des granulats de béton recyclé(GBR).....	43
III.4. Fabrication du béton à GBR.....	47
III.5. Impact des GBR sur les propriétés du béton à l'état frais.....	49
III.6. Facteurs influençant les propriétés mécaniques du béton à GBR.....	50
III.7. Impact des GBR sur les propriétés mécaniques.....	52
IV. Valorisation des laitiers cristallisés comme granulats pour béton.....	54
IV.1. Elaboration du laitier.....	54
IV.2. Laitier cristallisé.....	55
IV.3. Caractéristiques du laitier cristallisé	56
V. Valorisation des déchets de pneus usagés comme granulats pour béton.....	66
V.1. Elaboration de la poudrette de caoutchouc.....	66
V.2. Caractéristiques des granulats de caoutchouc	67
V.3. Impact des GC sur les propriétés du béton à l'état frais.....	69
V.4. Impact des GC sur les propriétés à l'état durci béton	71
V.5. Impact sur les propriétés liées à la durabilité.....	75
VI. Conclusion du chapitre.....	78
Références bibliographiques.....	80

CHAPITRE III . Valorisation des déchets comme constituants du ciment ou comme ajouts cimentaires dans le béton

I. Introduction.....	87
II. Composition des ciments : principes et méthodes.....	87
III. Rappel de la norme Algérienne NA/442 sur les ciments.....	87
III.1. Bref aperçu sur l'industrie cimentaire Algérienne.....	88
IV. Béton de démolition.....	88

IV.1. Valorisation de la partie fine du béton de démolition comme constituants..... du ciment	88
IV.2. Valorisation de la partie fine du béton de démolition comme ajouts..... cimentaires au béton	90
V. Valorisation des laitiers granulés comme constituants du ciment.....	91
V.1. Caractéristiques du laitier granulé.....	91
V.2. Les constituants des ciments aux laitiers.....	92
V.3. Impact du laitier sur les principales propriétés des ciments.....	93
VI. Valorisation du laitier comme ajouts cimentaires dans le béton.....	95
VII. Déchets de verre.....	96
VII.1. Valorisation de la poudre de verre comme ajouts cimentaires dans le béton...	96
VI. Conclusion du chapitre.....	101
Références bibliographiques.....	102

CHAPITRE IV. Perspectives de l'utilisation des recyclât en Algérie

I. Introduction.....	107
II. Perspectives de l'utilisation des recyclât en Algérie.....	107
II.1. Pneus usagés.....	107
II.2. Laitiers sidérurgiques.....	114
II.3. Béton de démolition.....	118
II.4. Déchets de briques.....	122
II.5. Les fillers.....	125
III. Conclusion du chapitre.....	126
Références bibliographiques.....	127
Conclusion générale	130
Perspectives	132
Annexe A	134
Annexe B	136

TABLE DES FIGURES

Réf figure	Titre	N° page
Figure I.1	Répartition des déchets dans un bâtiment	11
Figure I.2	Photo d'un laitier de haut fourneau	13
Figure I.3	Photo d'un laitier d'acier	14
Figure I.4	Photos du mâchefer	14
Figure I.5	Site de stockage scories et scories	15
Figure I.6	Photo de la cendre volante	15
Figure I.7	Déchets de verres	24
Figure I.8	Déchets de pneus usagés	24
Figure I.9	Ciment durci	25
Figure I.10	Résidus d'incinérateurs	26
Figure I.11	Boues rouges	26
Figure I.12	Déchets de démolition	27
Figure I.13	Industrie du béton	27
Photo I.14	Briques en terre crue	28
Photo I.15	Briques en terre cuite	28
Figure I.16	Sable de fonderies	29
Figure I.17	Déchet plastiques	29
Figure I.18	Enfouissement des déchets	30
Figure I.19	Incinération en plein air et usine d'incinération	30
Figure I.20	Photo d'une décharge contrôlée	31
Figure I.21	Sable de fonderies	31
Figure I.22	Compostage de déchets organiques	32
Figure I.23	Déchets de marbres et déchets de marbre broyés	33
Figure II.1	Démolition à l'aide d'une tenaille	40
Figure II.2	Démolition par dynamitage de bâtiment	41
Figure II.3	Opération de tri durant une déconstruction sélective	41
Figure II.4	Elimination des matériaux légers par jet d'air	42
Figure II.5	Déferraillage magnétique	42
Figure II.6	Divers aspects des granulats en fonction de leur taille	45
Figure II.7	Interface granulat naturel/pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton	46
Figure II.8	Différents types de laitiers sidérurgiques	54

Figure II.9	Laitier de haut fourneau	55
Figure II.10	Laitier cristallisé et laitier vitrifié granulé de haut fourneau	55
Figure II.11	Laitier en fusion coulé dans une fosse	56
Figure II.12	Laitiers cristallin d'aciérie électrique ayant une structure poreuse et rugueuse	57
Figure II.13	Procédé ACERITA, vieillissement naturel du laitier (Brésil)	59
Figure II.14	Granulats de caoutchouc	67
Figure II.15	Courbes granulométriques du sable et du GC de classe (0/4) mm	68
Figure II.16	Influence des GC sur l'affaissement	70
Figure II.17	Variation de la masse volumique du béton incorporant des GC	70
Figure II.18	Influence du taux de caoutchouc sur le contenu d'air occlus	71
Figure II.19	Influence du dosage en GC sur la résistance en compression à 7 et 28 jours (BAP dont le sable 04mm remplacé par des G.C. 0-4mm)	72
Figure II.20	Influence de l'adjonction de GC sur la résistance en compression	72
Figure II.21	Influence des GC sur le module d'élasticité	73
Figure II.22	Influence de l'incorporation de GC sur la capacité de déformation en traction directe	74
Figure II.23	Influence du dosage en granulats de caoutchouc sur la conductivité thermique	75
Figure II.24	Evolution de la perméabilité à l'oxygène en fonction du taux d'incorporation et de la taille des GC	76
Figure II.25	Evolution du retrait total des mortiers en fonctions du taux de substitution en GC	77
Figure II.26	Effet des GC sur la résistance au gel-dégel des matériaux à base cimentaire : état des éprouvettes après 300 cycles de gel-dégel	78
Figure III.1	Résistance à la compression et résistance relative à la compression par rapport à celle du CEM II/A-LL en fonction du temps	90
Figure III.2	Cinétiques comparées de durcissement d'un CHF avec 60% de laitier et d'un CPA	95
Figure III.3	Schéma d'obtention de la poudre de verre	97
Figure III.4	Porosité fermée et ouverte dans un béton	99
Figure IV.1	Fuseau granulaire de la poudre de caoutchouc	109
Figure IV.2	Chantier expérimental Pneusol à Bou-Smail (Algérie)	110
Figure IV.3	Etalement au cône d'Abram's des quatre bétons confectionnés	113
Figure IV.4	Résistances en compression à 28 jours des bétons étudiés	114
Figure IV.5	Utilisation possible des granulats de béton recyclés	119
Figure IV.6	Courbe granulométrique des fillers calcaires locaux	125

TABLE DES TABLEAUX

Réf tableau	Titre	N° page
Tableau I.1	Comparaison de la production des déchets solides dans les villes d'Alger, Dakar et Conakry	9
Tableau I.2	Composition des déchets en % de matière sèche dans 3 capitales africaines	9
Tableau I.3	Taux de collecte des déchets dans 3 capitales africaines	9
Tableau I.4	Déchets dans un bâtiment	11
Tableau II.1	Classification normalisée des granulats	38
Tableau II.2	Classification des granulats suivant leur masse volumique	38
Tableau II.3	Ordre de grandeur des proportions dans le béton	39
Tableau II.4	Contexte géologique des bassins industriels dont les GBR de l'étude sont issus	44
Tableau II.5	Composition des gravillons de GBR selon la norme européenne EN 933-11	44
Tableau II.6	Identification visuelle des principales roches présentes dans les GBR	44
Tableau II.7	Composition chimique des différents types des laitiers de haut fourneau	56
Tableau II.8	Propriétés physiques de deux types de granulats	58
Tableau II.9	Densité à l'état frais de différents mélanges avec laitiers cristallins	60
Tableau II.10	Résistance en compression et en flexion à 28 jours	63
Tableau II.11	Résultats de la résistance en traction d'un béton composé de laitiers d'aciérie électrique à 28 jours	64
Tableau II.12	Résistance en compression avant et après les cycles de gel/dégel pendant 25 jours pour six mélanges	65
Tableau II.13	Résultats du test de lixiviation pour des granulats de laitier	66
Tableau II.14	Coefficient de perméabilité à l'air du composite ciment - caoutchouc	73
Tableau II.15	Résultats de la résistance par fendage des échantillons d'épaisseur (E) et de diamètre (D)	76
Tableau III.1	Catégories de ciment	87
Tableau III.2	Classes normalisées de résistance	88
Tableau III.3	Valeurs minimales garanties des résistances à la compression	88
Tableau III.4	Composition chimique du laitier en %	92
Tableau III.5	Chaleur d'hydratation des ciments à 7 jours	94
Tableau IV.1	Compositions des bétons étudiés pour 1m ³	113
Tableau IV.2	Production du laitier par les hauts fourneaux d'El Hadjar	115
Tableau IV.3	Consommation du laitier granulé par la cimenterie de Hadjar Soud	116

Tableau IV.4 Comparaison du prix agrégats dans quelques pays	120
Tableau IV-5 Etat de la production des briqueteries en Algérie	123

LISTE DES SYMBOLES

Ab₂₄	Absorption d'eau après 24 heures
BPE	Béton prêt à l'emploi
BTP	Bâtiments et travaux publics
CET	Centre d'enfouissement technique
CHF	Ciment haut fourneau
CLK	Ciment de laitier au clinker
CPJ	Ciment portland composé
CPA	Ciment portland artificiel
(D)	Fumée de silice
DAS	Déchets d'activité de soin
DASRI	Déchets d'activité de soin risques infectieux
DAOM	Déchets d'activité de soin assimilables aux ordures ménagères.
DCB	Déchets de construction et de démolition
DIB	Déchets industriels banals
DID	Déchets industriels dangereux
DIS	Déchets industriels spéciaux.
E/C	Rapport Eau/ciment
GBR	Granulats de béton recyclé
GC	Granulats de caoutchouc
(L, LL)	Calcaires
MA	Mortier adhérent
MDE	Dureté Micro-Deval
MPa	Méga Pascal
OM	Ordures ménagères
(P, Q)	Matériaux pouzzolanes
PCD	Pâte de ciment durci
PUNR	Pneus usagés non réutilisables
PVA	Polymère acétate de vinyle
S	Laitier de haut fourneau granulé
SEC	Sable enrobé de ciment
T	Schistes calcinés
(V, W)	Cendres volantes

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

On estime à près de 23 millions de tonnes la quantité de déchets solides générée annuellement en Algérie, dont plus de la moitié est constituée de déchets ménagers et assimilés (DMA) - entreprises, hôpitaux, écoles, collectivités, etc. - représentant la part la plus importante des déchets solides générés en Algérie, soit autour de 11 millions de tonnes par an en 2014. Un Algérien génère en moyenne près de 1kg de DMA par jour.

La quantité de ces déchets augmente annuellement de 3%, selon les chiffres de l'Agence nationale des déchets (AND). Une étude allemande (GIZ) a estimé à plus de 2,5 millions la quantité annuelle des déchets industriels. Les déchets ne manquent pas, mais c'est le sort qui leur est réservé qui pose problème. Près de la moitié des déchets ménagers et assimilés sont déversés dans des décharges.

Certains déchets ont fait l'objet ces dernières décennies, de multitudes travaux de recherches afin de les recycler dans le domaine du génie civil. Ainsi on a par exemple étudié la possibilité d'utiliser la poudrette de verre, les déchets de briques, les pneus usagés, le béton de démolition, etc. comme granulats dans la confection des bétons ou comme ajout secondaire dans la fabrication des ciments. Cette démarche qui consiste à valoriser au maximum les sous produits industriels et autres déchets générés par les différentes activités humaines, participe de manière très efficace au processus de développement durable des pays, et fait l'objet des thématiques de recherche en cours de développement dans de nombreux laboratoires.

C'est dans cet objectif de contribution au développement durable du pays que s'inscrit notre mémoire de fin d'études de master. Le travail proposé se veut une synthèse sur les différents déchets aptes à être recyclés dans l'élaboration des liants hydrauliques et des bétons. Une utilisation massive de ces sous produits aura sans aucun des conséquences considérables sur le prix de revient des ouvrages à cause de leur faible coût et également sur l'environnement où les industries (particulièrement cimentières) sont soumises à des quotas très strictes en matière d'émission de CO₂ et ce dans le cadre du fameux protocole de Kyoto de 2004.

Structuration du mémoire

Notre mémoire, construit en quatre chapitres, illustre bien la faisabilité, soit de substituer une partie des granulats traditionnels utilisés dans l'élaboration des bétons, soit pour la fabrication des ciments composés et ce en utilisant plusieurs types de recyclât.

Le premier chapitre, intitulé "Généralités et synthèse sur les déchets et leur réglementation" expose dans sa première partie des généralités sur les déchets, notamment leur classification normalisée ainsi que les textes réglementaires concernant leurs gestions. Dans la seconde partie on établira une synthèse la plus exhaustive possible sur les déchets utilisés en génie civil principalement dans l'élaboration des bétons et des ciments composés.

Le second chapitre est intitulé "Valorisation des déchets comme granulats pour béton". Les granulats traditionnels constituent entre 63 et 85% du poids du béton. Leur remplacement par d'autres produits à faible coût peut s'avérer donc très intéressant d'un point de vue économique. L'objectif de ce second chapitre est d'établir une synthèse de plusieurs études scientifiques entreprises en vue de substituer une partie des granulats traditionnels par plusieurs matériaux issus d'opérations de recyclages. Notre étude s'est focalisée sur les déchets suivants : le laitier de haut fourneau, les mâchefers, les scories, les cendres volantes, la poudrette de verre, les pneus usagés, le ciment durci, les déchets de briques, la poudre de marbre, le béton de démolition, le sable des fonderies et les déchets plastiques.

Le troisième chapitre intitulé "Valorisation des déchets comme constituants du ciment ou ajouts cimentaires dans le béton" expose une synthèse d'études scientifiques entreprises sur la valorisation de certains déchets utilisés directement comme ajout cimentaire, soit comme ajout secondaire dans la fabrication des ciments composés.

Dans le quatrième et dernier chapitre intitulé "Perspectives de l'utilisation de recyclât en Algérie", on expose certaines perspectives envisageables pour la valorisation des déchets au niveau national dans le domaine du génie civil.

Le document se termine par une conclusion générale qui synthétise les résultats obtenus, à travers cette recherche bibliographique ainsi que les perspectives envisageables dans le domaine du recyclage de certains sous produits industriels dans le domaine de la construction en Algérie.

CHAPITRE 1 :

Généralités et synthèse sur les déchets et leur réglementation

Ce premier chapitre expose, dans sa première partie, des généralités sur les déchets, notamment leur classification normalisée ainsi que les textes réglementaires concernant leurs gestions en Algérie, au Sénégal et en Guinée. Dans la seconde partie on établira une synthèse globale sur les différents déchets recyclés dans le domaine génie civil et plus particulièrement dans l'élaboration des bétons et des ciments composés.

SOMMAIRE

PARTIE A : Généralités sur les déchets (Définition, classification, réglementation)

I. Introduction.....	7
II. Définition d'un déchet.....	- 7 -
II. Classification des déchets.....	- 8 -
II.1. Déchets solides ménagers	- 8 -
II.2. Déchets industriels	- 9 -
II.3. Déchets hospitaliers	- 10 -
II.4. Déchets de la construction	- 10 -
III. Gestion des déchets.....	- 12 -
III.1. Définition	- 12 -
III.2. Principes de gestion des déchets	- 12 -
III.3. Méthodes de gestion des déchets	- 13 -
III.3.1. L'enfouissement.....	- 13 -
III.3.2. L'incinération.....	- 13 -
III.3.3. La décharge contrôlée	- 14 -
III.3.4. Le compostage	- 14 -
III.3.5. Le recyclage	- 15 -
IV. Aspect réglementaire et législatives de la gestion des déchets	- 15 -
IV.1. En Algérie.....	- 15 -
IV.2. Au Sénégal.....	- 17 -
IV.3 En Guinée	- 18 -

Partie B: Synthèse sur les déchets utilisés en génie civil

V. Introduction.....	20
VI. Recyclage des déchets.....	- 20 -
VI.1 Les trois grands principes du recyclage	- 20 -
VI.2. Intérêt du recyclage dans le domaine du génie civil	- 21 -
VI.3. Utilisation des recyclât	- 22 -
VI.4. Déchets recyclés dans le domaine du génie civil.....	- 24 -
VI.4.1. Les Laitiers sidérurgiques	- 24 -
VI.4.2. Sous-produits provenant des centrales thermiques	- 25 -
VI.4.3. Mâchefer	- 25 -
VI.4.4. Scories.....	- 25 -
VI.4.5. Cendres volantes	- 26 -
VI.4.6. Déchets de verre	- 26 -
VI.4.7. Pneus usagés	- 27 -
VI.4.8. Ciment durci	- 27 -
VI.4.9. Résidus d'incinérateurs.....	- 28 -
VI.4.10. Boues rouges.....	- 28 -

VI.4.11. Déchets de démolition	29
VI.4.12. Déchets de production de l'industrie du béton	29
VI.4.13. Déchets de briques	- 30 -
VI.4.14. Sables de fonderies	- 31 -
VI.4.15. Déchets plastiques	- 31 -
VI.4.15. Déchets de marbre	- 32 -
VII. Conclusion du chapitre.....	33
Références bibliographiques.....	34

PARTIE A :

Généralités sur les déchets (Définition, classification, réglementation)

I. Introduction

La question de la gestion des déchets constitue un défi majeur pour tous les pays, plus particulièrement ceux en voie de développement, car ses effets sont fortement visibles par tous. Les déchets engendrent des nuisances importantes pour les habitants et ont des conséquences néfastes sur la santé des populations, sur l'environnement et sur les ressources hydriques. Se pose alors les quatre questions fondamentales suivantes :

- 1) Alors qu'est-ce réellement un déchet?
- 2) Quelles sont les différentes catégories de déchets?
- 3) Ya-t-il une politique ou réglementation concernant la gestion déchets dans tous les pays?
- 4) Comment sont éliminés les déchets?

Nous tenterons dans cette première partie de ce chapitre de répondre à ces questions tout essayant de préciser la situation en Algérie et dans la mesure du possible au Sénégal et en Guinée.

I.1. Définition d'un déchet

Un déchet est "*tout résidu du processus de la production, de la transformation ou de l'utilisation, abandonné par le détenteur et qui, par sa nature, produit des effets nocifs sur les écosystèmes naturels*".

[1] définit le déchet des points de vues économique et juridique comme suit :

- Du point de vue économique, un déchet est tout objet dont la valeur économique est nulle ou négative pour son détenteur. Pour s'en débarrasser, il paye un service ou s'en charge lui-même,
- Du point de vue juridique, la définition du déchet permet de distinguer une conception subjective et une conception objective. Selon la conception subjective, une propriété devient un déchet lorsque le détenteur a la volonté de s'en débarrasser. Elle lui appartient aussi longtemps qu'elle demeure dans son espace privé. Cette propriété appartient à la municipalité lorsqu'elle est déposée sur la voie publique car, en effet, par cet acte, le détenteur manifeste clairement sa volonté de l'abandonner. Selon la conception objective, un déchet est tout objet dont la gestion doit être contrôlée au profit de

la protection de la santé publique et de l'environnement, indépendamment de la volonté du propriétaire et de sa valeur économique.

Une autre question vient immédiatement à l'esprit : «que fait-on des déchets?». Car le problème se situe bien à ce niveau et se pose de façon d'autant plus aiguë que la quantité des déchets augmente continuellement.

Les pays à fort niveau de consommation ou de production ont été les premiers à se trouver confrontés au problème, car l'accumulation des déchets occasionnait des nuisances insupportables : pollutions diverses et problèmes de santé publique.

II. Classification des déchets

II.1 Déchets solides ménagers

On entend par "déchets ménagers" tous les détritiques générés dans les ménages, tels que déchets de nourriture ou de préparation des repas, balayures, objets ménagers, journaux et papiers divers, emballages métalliques de petites dimensions, bouteilles, emballages papier ou plastique, chiffons et autres résidus textiles, etc. On y inclut également les déchets végétaux provenant de l'entretien des jardins, et des cours. Bien souvent, on assimile aussi aux déchets ménagers d'autres détritiques dans la mesure où ils sont de nature similaire aux déchets des ménages et produits par des individus dans des proportions relativement proches. On citera par exemple les déchets de bureaux, des commerces, de l'artisanat, des administrations, des halles, des foires, des marchés, des collectivités telles que les cantines, de l'entretien des espaces verts et des voiries ainsi que tous les objets et cadavres de petits animaux abandonnés sur la voie publique.

On distingue habituellement trois fractions dans les déchets ménagers [2] :

- 1) La fraction biodégradable : elle comprend les matières qui peuvent être dégradées par l'action de microorganismes en un laps de temps déterminé: végétaux, déchets alimentaires, fruits, produits cellulosiques et les plastiques biodégradables,
- 2) La fraction inerte : elle comprend les matières qui ne peuvent être dégradées par l'action de microorganismes en un laps de temps déterminé: verre, pierres, céramiques, plastiques non biodégradables, textiles synthétiques, caoutchouc, etc. Cette fraction apporte plus de nuisance que de pollution chimique,
- 3) Les contaminants : ce sont des matières qui relâchent des contaminants chimiques (par exemple des métaux lourds) dans le milieu et qui ne sont pas ou peu biodégradables: batteries, métaux non ferreux, solvants, peintures, huiles, encres, matériaux (plâtres, etc.) contenant des sulfates, etc.

Les tableaux I.1, I.2 et I.3 [3] donnent quelques renseignements concernant les déchets solides ménagers en Algérie, au Sénégal et en Guinée.

Tableau I.1: Comparaison de la production des déchets solides dans les villes d'Alger, Dakar et Conakry [3].

Pays	Villes	Quantités de déchets en kg/habitant /jour
Algérie	Alger	0,7
Sénégal	Dakar	0,6
Guinée	Conakry	0,6

Tableau I.2 : Composition des déchets en % de matière sèche dans 3 capitales africaines [3].

Pays	Organiques (%)	Verres (%)	Papiers cartons (%)	Plastiques (%)	Métaux (%)	Autres (%)
Algérie	62.1	1.6	9.4	12	1.4	13.5
Sénégal	56.3	1.7	9.5	6.2	1.9	24.4
Guinée	69	0.3	4.1	22.8	1.4	2.4

Tableau I.3 : Taux de collecte des déchets dans 3 capitales africaines [3].

Villes	Population	Taux de collecte déchets (%)
Alger (Algérie)	3600000	78
Dakar (Sénégal)	3529300	47
Conakry (Guinée)	2317376	71

II.2 Déchets industriels

Selon le rapport sur la gestion des déchets en Algérie [4], l'Algérie génère 2550000t/an de déchets industriels. Les stocks de déchets spéciaux en Algérie sont estimés à 2,8 millions de tonnes et la production de déchets spéciaux est estimée quant à elle à 325000t/an. Compte tenu de la législation en vigueur et conformément au principe du pollueur payeur défini dans le cadre du Fonds National de l'Environnement et de Dépollution (FEDEP), 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. 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'Alger, de Bejaïa, Skikda, Annaba, Tlemcen et Oran. 87% des déchets produits proviennent de ces zones, soient 282000t/an et détiennent à elles seules 95% des déchets détenus en stock [4].

Les déchets industriels peuvent classés en 3 catégories :

1 - Déchets industriels banals (DIB) : Les déchet industriels banals (DIB) sont des déchets ni inerte ni dangereux, générés par les entreprises dont le traitement peut éventuellement être réalisé dans les mêmes installations que les ordures ménagères : cartons, verre, déchets de cuisine, emballages, déchets textiles, etc.

2 - Déchets industriels dangereux (DID) : Les déchets industriels dangereux (DID) est la catégorie qui regroupe les déchets dangereux autres que les déchets dangereux des ménages et les déchets d'activités de soins et assimilés à risques infectieux. Ils sont particulièrement nocifs pour l'environnement.

3 - Déchets industriels spéciaux (DIS) : Les déchets industriels spéciaux (DIS) désignent des déchets qui présentent des risques pour l'environnement et la santé humaine. Actuellement, il est préférable de préférer le nom de déchets dangereux (ou déchets industriels dangereux - DID) à celui de déchets industriels spéciaux [5].

II.3 Déchets hospitaliers

Les déchets d'activité de soin (DAS) se définissent comme «les déchets issus des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif, curatif ou palliatif, dans les domaines de la médecine humaine et vétérinaire». Ces déchets hospitaliers comprennent :

- Les déchets d'activités de soins à risques infectieux (DASRI),
- Les déchets d'activités de soins assimilables aux ordures ménagères (DAOM),
- Les ordures ménagères (OM),
- Les recyclables (cartons notamment, papiers, plastiques, etc.),
- Autres déchets industriels dangereux qui comprennent au moins une trentaine de filières,
- Les déchets radioactifs.

En Algérie, on classe les pièces anatomiques identifiables d'origine humaine dans les déchets [4].

II.4 Déchets de la construction

Les déchets du BTP ou déchets du bâtiment et des travaux publics correspondant aux déchets provenant du secteur du bâtiment et des travaux publics (construction, réhabilitation, démolition et déconstruction dans les domaines du bâtiment et des travaux publics).

On distingue, les 3 classes suivantes [6] :

- Les déchets inertes,
- Les déchets non dangereux non inertes,
- Les déchets dangereux.

La figure suivante expose la répartition des déchets dans un bâtiment selon [6].

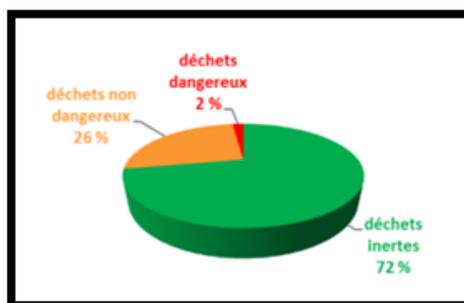


Figure I.1 : Répartition des déchets dans un bâtiment [6].

▪ **Les déchets inertes**

Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas, et ne produisent aucune autre réaction physique, chimique ou biologique de nature à nuire à l’environnement ou à la santé.

▪ **Les déchets non dangereux non inertes**

Les déchets non dangereux sont des déchets ni inertes, ni dangereux pour l’environnement ou la santé.

▪ **Les déchets dangereux**

Les déchets dangereux, anciennement nommés déchets industriels spéciaux (DIS), contiennent des substances dangereuses pour l’environnement ou la santé. Ils sont marqués d’un astérisque dans la classification des déchets.

Le tableau suivant [6] synthétise les différents déchets recensés dans un bâtiment.

Tableau 1.4 : Déchets dans un bâtiment [6].

	<p>- Bétons, - Briques, tuiles et céramiques, - Mélange de béton, briques, tuiles et céramiques, - Verre (partie vitrage uniquement), - Matériaux bitumineux sans goudron, - Terres et pierres (y compris déblais mais hors terre végétale),</p>
	<p>- Métaux et leurs alliages, - Bois bruts ou faiblement adjuvés, - Papiers, Cartons, - Plastiques, - Laines minérales, - Peintures, vernis, colles, mastics en phase aqueuse, - Cartouches ne contenant pas de produits toxiques, - Mélanges de ces différents déchets, y compris les mélanges contenant des déchets inertes, (déchets d’équipements électriques et électroniques) ne contenant pas de substances dangereuses, - Déchets alimentaires liés à la vie sur le chantier... - du Plâtre,</p>
	<p>- Aérosols, - Accumulateurs et piles contenant des substances dangereuses, - Bois traité avec des substances dangereuses, - Boues de séparateur d’hydrocarbures, - Cartouches contenant des substances dangereuses, - Emballages souillés par des substances dangereuses, - Produits contenant du goudron, - Lampes à économie d’énergie, - déchets d’équipements électriques et électroniques contenant des substances dangereuses, - peintures, vernis, colles, solvants contenant des substances dangereuses, - Pinceaux, chiffons souillés avec des produits dangereux, - Produits absorbants pollués aux hydrocarbures, - Transformateurs au pyralène... - de l’amiante friable et lié, tous matériaux amiantés,</p>

III. Gestion des déchets

La gestion des déchets constitue une préoccupation majeure pour les autorités en charge de ce secteur. Elle représente aujourd'hui un véritable enjeu tant financier, en raison de l'augmentation croissante des coûts de gestion des déchets, qu'environnemental, lié d'une part au risque d'insuffisance d'exutoires de traitement à moyen terme, et d'autre part au gaspillage des matières premières.

III.1 Définition de la gestion des déchets

La gestion des déchets regroupe la collecte, le transport, la valorisation et l'élimination des déchets généralement issus des activités humaines. L'accent a été mis, ces dernières décennies, sur la réduction de l'effet des déchets sur la nature et l'environnement et sur leur valorisation.

La gestion des déchets concerne tous les types de déchets, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux, chacun possédant sa filière spécifique. Les manières de gérer les déchets diffèrent selon qu'on se trouve dans un pays développé ou en voie de développement, dans une ville ou dans une zone rurale, que l'on ait affaire à un particulier, un industriel ou à un commerçant.

La gestion des déchets non toxiques pour les particuliers ou les institutions dans les agglomérations est habituellement sous la responsabilité des autorités locales (Mairies, etc.), alors que la gestion des déchets des commerçants et industriels est sous leur propre responsabilité.

III.2 Principes de gestion des déchets

Il y a plusieurs principes qui guident la gestion des déchets dont l'usage varie selon les pays ou les régions.

La hiérarchie des stratégies (règle des trois R) :

- 1 -  Réduire
- 2 -  Réutiliser
- 3 -  Recycler

La hiérarchie des stratégies a plusieurs fois changée d'aspect ces dix dernières années, mais le concept sous-jacent est demeuré la pierre angulaire de la plupart des stratégies de gestion des déchets : utiliser au maximum les matériaux et générer le minimum de rebuts. Certains experts en gestion des déchets ont récemment ajouté un «quatrième R» : «Repenser», qui implique que le système actuel présente des faiblesses et qu'un système parfaitement efficace exigerait qu'un regard totalement différent soit porté sur les déchets. Certaines solutions "repensées" sont parfois peu intuitives. On peut prendre par exemple un cas dans l'industrie textile : afin de réduire la quantité de papier utilisée pour les patrons, il a été conseillé de les découper dans de plus grandes feuilles, afin de pouvoir utiliser les chutes pour découper les petites pièces du patron. Ainsi, il y a une réduction du résidu global. Ce type de solution n'est bien entendu pas limité à l'industrie textile.

La réduction à la source nécessite des efforts pour réduire les déchets toxiques et autres résidus en modifiant la production industrielle. Les méthodes de réduction à la source impliquent des changements dans les processus de fabrication, les apports de matières premières et la composition des produits. Parfois le principe de «prévention de la pollution» indique en fait la mise en œuvre d'une politique de réduction à la source.

Une autre méthode de réduction des déchets à la source est d'accroître les incitations au recyclage. A titre d'exemple, plusieurs villes aux États-Unis ont mis en place des taxes dont le montant est fonction des quantités d'ordures déposées qui se sont révélées efficaces pour réduire le volume des déchets urbains. L'efficacité des politiques de réduction à la source se mesure à l'importance de la réduction de la production de déchets.

III.3 Méthodes de gestion des déchets

La gestion des déchets consiste en la détermination du type de traitement à appliquer à telle ou telle autre catégorie des déchets. Certes pour assurer une bonne gestion des déchets, il faut mettre des moyens sur le plan financier que matériel, par conséquent, la bonne gestion limitera les dégâts sanitaires. C'est ainsi que nous allons examiner successivement les différents modes de gestion des déchets. Ces méthodes sont actuellement au nombre de cinq.

III.3.1 L'enfouissement

L'enfouissement est une méthode d'évacuation des déchets organiques qui consiste à creuser une fosse profonde de 0,5 à 1m pour y verser des déchets, asperger de l'essence et la couvrir d'une couche de terre afin de brûler sans fumée les déchets. Ce procédé utilise comme produits désinfectants ou désodorisants le chlore, la chaux, le mazout, et l'essence. Cette méthode reste très appropriée dans des formations sanitaires.



Figure I.2 : Enfouissement des déchets.

III.3.2 L'incinération

C'est un procédé urbain d'élimination finale des déchets qui consiste à brûler au moyen d'un feu les déchets produits par les hôpitaux. Les procédés de l'incinération comprennent le ramassage des déchets et ordures, le triage pour dissocier les déchets combustible et non combustible. Elle peut être

considérée comme un procédé par l'excellence de traitement des immondices, c'est une méthode satisfaisante qui présente cependant quelques inconvénients, parmi lesquels on peut citer :

- Elle nécessite une évacuation des cendres après son exécution,
- Elle provoque un danger de pollution de l'environnement par sa fumée,
- Elle nécessite un investissement et un coût d'exploitation élevés pour sa construction.



Figure I.3 : Incinération en plein air et usine d'incinération.

III.3.3 La décharge contrôlée

La décharge contrôlée est un dépotoir public prévu à l'avance pour l'évacuation des immondices ménagères. Elle a l'avantage d'offrir des éléments pour l'alimentation des jardins ou des plantations d'arbres. Cette méthode n'est pas conseillée pour le traitement des déchets hospitaliers.



Figure I.4 : Photo d'une décharge contrôlée.

III.3.4 Le compostage

Le compostage est un procédé de décomposition des matières organiques usée de manière à le récupérer sous une autre forme permettant une utilisation ultérieure comme engrais. Il nécessite la préparation suivantes : réception des ordures, triage des ordures, préparation des compostes, décomposition, présentation du produit fini.



Figure I.5 : Compostage de déchets organiques.

III.3.5 Le recyclage

Etant donné que tout ce qui est brûlé est irrémédiablement perdu en tant que matière première, c'est ainsi que le recyclage, qui a pour avantage de réduire la consommation en matière première pour la fabrication de nouveau bien, permet de minimiser l'impact en environnemental des déchets. Afin que les déchets recyclables puissent être effectivement recyclés, il est nécessaire qu'un pré-tri soit effectué en amont. Cette opération a pour objectif principal d'éviter un souillage des déchets recyclables par des déchets non recyclables. En effet, ceci pourrait les rendre impropres au recyclage. D'autre part, il permet d'orienter les différents déchets vers la bonne destination.



Figure I.6 : Usine de recyclage des déchets.

IV. Aspect réglementaire et législatives de la gestion des déchets

IV.1 En Algérie

L'Algérie est en train 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 (bidonvilles). Cela ne s'est pas fait sans conséquences graves 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 970Md [7], pour atteindre les objectifs inscrits dans le plan national d'actions pour l'environnement et le développement durable (PNAE-DD). 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 (PNAE-DD) fixe les différents programmes environnementaux du pays. 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 [4] :

- 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.

Entrée en application de la fiscalité écologique en janvier 2005. Le montant de la taxe est de 24000DA/tonne de déchets liés aux activités de soin des hôpitaux et cliniques et de 10500DA/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.

Lois Algériennes concernant les déchets :

- Loi N°90-08 portant code communal.
- Loi N°01-19 du 12/12/2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
- Loi N°03-10 du 19/07/2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.
- Décret exécutif n° 02-175 du 20/05/2002 portant création de l'Agence Nationale des déchets.
- Décret exécutif n° 02-372 du 11/11/2002 relatif aux déchets d'emballages.
- Décret exécutif n° 04-199 du 19/07/2004 fixant les modalités de création, d'organisation, de fonctionnement et de financement du système public de traitement et de valorisation des déchets d'emballages «ECO-JEM».
- Décret exécutif n° 04-410 du 14/12/2004 fixant les règles générales d'aménagement et d'exploitation des installations de traitement des déchets et les conditions d'admission de ces déchets au niveau de ces installations.
- Décret exécutif 07-205 du 30/06/2007 fixant les modalités et procédures d'élaboration, de publication et de révision du schéma communal de gestion des déchets ménagers et assimilés.

IV.2 Au Sénégal

Concernant le Sénégal [8] il faut noter l'existence de trois codes principaux qui traitent de la gestion des déchets à savoir :

- La loi 83-05 du 28 janvier 1983 portant le code de l'environnement ;
- La loi 81-13 du 04 mars 1981 portant le code de l'eau ;
- La loi 81-71 du 05 juillet 1971 portant le code de l'hygiène.

La gestion des déchets urbains et industriels relève de la politique nationale de gestion de l'environnement qui se réfère à deux textes principaux : le Plan national de l'environnement, adopté en 1997 et qui avait pour objectif de préparer la stratégie de gestion de l'environnement, et la lettre de politique sectorielle adoptée en 2004.

La loi 2001-01 du 15 Janvier 2001 portant Code de l'environnement précise notamment :

- Les déchets doivent être éliminés ou recyclés de manière écologiquement rationnelle afin de supprimer ou de réduire leurs effets nocifs sur la santé de l'homme, sur les ressources naturelles, la faune et la flore ou la qualité de l'environnement (article L30) ;
- Toute personne, qui produit ou détient des déchets, doit en assurer elle-même l'élimination ou le recyclage ou les faire éliminer ou recycler auprès des entreprises agréées par le ministre chargé de l'environnement. À défaut, elle doit remettre ces déchets à la collectivité locale ou à toute société agréée par l'État en vue de la gestion des déchets. Cette société, ou la collectivité locale elle-même, peut signer des contrats avec les producteurs ou les détenteurs de déchets en vue de leur

élimination ou de leur recyclage. Le recyclage doit toujours se faire en fonction des normes en vigueur au Sénégal (article L31) ;

- Les collectivités locales et les regroupements constitués assurent l'élimination de déchets des ménages, éventuellement en liaison avec les services régionaux et les services nationaux de l'état, conformément à la réglementation en vigueur (article L32) ;
- L'élimination des déchets comporte les opérations de collecte, de transport, de stockage et de traitement nécessaires à la récupération des matériaux utiles ou de l'énergie, ou de tout dépôt ou rejet sur les endroits appropriés, de tout autre dépôt dans des conditions propres à en éviter les nuisances mentionnées dans la présente loi (article L33) ;
- L'enfouissement dans le sous-sol ne peut être opéré qu'après autorisation du ministre chargé de l'environnement qui fixe des prescriptions techniques et des règles particulières à observer (article L42).

IV.3 En Guinée

Loi n° 28-00 composée des articles suivants, traite de la gestion des déchets et à leur élimination en guinée Conakry [9].

➤ **Article premier** : La présente loi a pour objet de prévenir et de protéger la santé de l'homme, la faune, la flore, les eaux, l'air, le sol, les écosystèmes, les sites et paysages et l'environnement en général contre les effets nocifs des déchets. A cet effet, elle vise :

- la prévention de la nocivité des déchets et la réduction de leur production ;
 - l'organisation de la collecte, du transport, du stockage, du traitement des déchets et de leur élimination de façon écologiquement rationnelle ;
 - la valorisation des déchets par le réemploi, le recyclage ou toute autre opération visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie ;
 - la planification nationale, régionale et locale en matière de gestion et d'élimination des déchets ;
 - l'information du public sur les effets nocifs des déchets, sur la santé publique et l'environnement ainsi que sur les mesures de prévention ou de compensation de leurs effets préjudiciables ;
 - la mise en place d'un système de contrôle et de répression des infractions commises dans ce domaine.
- **Article 2** : Les dispositions de la présente loi s'appliquent, sans préjudice de celles qui régissent les établissements insalubres, incommodes ou dangereux, les ressources en eaux, l'exploitation des carrières, l'hygiène publique, l'assainissement liquide urbain, les bureaux municipaux d'hygiène, à toutes les catégories de déchets tels que définis à l'article 3 ci-dessous. Sont exclus du champ d'application de la présente loi : les déchets radioactifs, les épaves des navires et toutes autres épaves

maritimes, les effluents gazeux ainsi que les déversements, écoulements, rejets, dépôts directs ou indirects dans une eau superficielle ou une nappe souterraine prévus par l'article 52 de la loi n°10-95 sur l'eau exceptés les rejets qui sont contenus dans des récipients fermés.

➤ **Article 4** : Les produits conçus, fabriqués et importés par les générateurs des déchets doivent présenter des caractéristiques de manière à ce que, lors de leur cycle de vie, la quantité et la nocivité des déchets engendrés par ces produits soient réduites en utilisant la technique disponible économiquement viable et appropriée. Les générateurs des déchets sont tenus également de fournir à l'administration toutes les informations sur les caractéristiques des déchets qu'ils fabriquent, distribuent ou importent. Des conditions et des mesures peuvent être imposées à certains produits lors de leur fabrication ou leur importation ou leur distribution en vue de réduire la quantité et la nocivité des déchets issus de ces produits. Les modalités d'application des alinéas 2 et 3 de cet article sont fixées par voie réglementaire.

➤ **Article 5** : L'utilisation de produits issus du recyclage des déchets dans la fabrication des produits destinés à être mis en contact direct avec les produits alimentaires est interdite.

➤ **Article 6** : Toute personne qui détient ou produit des déchets, dans des conditions de nature à produire des effets nocifs sur le sol, la faune et la flore, à dégrader les sites ou les paysages, à polluer l'air ou les eaux, à engendrer des odeurs, ou d'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement, est tenue d'en assurer ou d'en faire assurer l'élimination dans les conditions propres à éviter les dits effets, et ce, conformément aux dispositions de la présente loi et ses textes d'application.

➤ **Article 7** : L'incinération des déchets en plein air est interdite, à l'exception des déchets végétaux issus des jardins et du brûlis qui se pratique sur les chaumes dans les champs.

PARTIE B:

Synthèse sur les déchets utilisés en génie civil

V. Introduction

La réduction des réserves exploitables de granulats naturels ont pour conséquence, la recherche d'autres voies d'approvisionnement en granulats pour l'industrie du béton. notamment le recyclage. Notre objectif dans cette deuxième partie est de montrer :

- ✓ Pourquoi le recyclage est aujourd'hui une priorité incontournable dans la construction?
- ✓ Quels sont les déchets qui sont recyclés ou valoriser dans le domaine du génie civil?

Ainsi dans les paragraphes suivants, nous allons montrer l'intérêt du recyclage en génie civil pour ensuite faire une synthèse sur les principaux déchets recyclés dans l'industrie de la construction.

VI. Recyclage des déchets

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets et de réintroduction des matériaux qui en sont issus, dans un nouveau cycle de vie. Le recyclage a donc deux conséquences écologiques majeures :

- ✓ La réduction du volume des déchets, et donc de la limitation de la pollution qu'ils causeraient (certains matériaux mettent des décennies, voire des siècles à se dégrader),
- ✓ La préservation des ressources naturelles, car la matière recyclée est utilisée à la place de celle qu'on aurait dû extraire.

VI.1 Les trois grands principes du recyclage

1. **Réduire** : regroupe les actions au niveau de la production pour réduire les tonnages d'objets (par exemple les emballages) susceptibles de finir en déchet.
2. **Réutiliser** : regroupe les actions permettant de réemployer un produit usagé pour lui donner une deuxième vie, pour un usage identique ou différent.
3. **Recycler** : désigne l'ensemble des opérations de collecte et traitement des déchets permettant de réintroduire dans un cycle de fabrication les matériaux qui constituaient le déchet.

Trois types de recyclage [10]

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 ou pour séparer par courants de Foucault;
- Le recyclage dit «*organique*» consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais ou du carburant tel que le biogaz.

Étapes du recyclage [10]

La chaîne du recyclage comporte différentes étapes :

➤ **Étape 1 - Collecte de déchets**

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. Dans les pays développés, les ordures ménagères sont généralement incinérées ou enfouies en centres d'enfouissement pour déchets non dangereux. Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence.

La collecte sélective, dite aussi «séparative» et souvent appelée à tort «tri sélectif» est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui jette le déchet le trie lui-même. La taxe au sac est un bon moyen pour inciter les personnes au tri sélectif, car seuls les déchets non recyclables finissent en général dans ces sacs taxés, les déchets recyclables étant eux déposés dans des lieux où il n'y a pas de taxe.

À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations mécanisées permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Un tri manuel, par des opérateurs devant un tapis roulant, complète souvent ces opérations automatiques.

➤ **Étape 2 - Transformation**

Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi.

➤ **Étape 3 - Commercialisation et conservation**

Une fois transformées, les matières premières issues du recyclage sont utilisées pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs.

VI.2 Intérêt du recyclage dans le domaine du génie civil [11]

Actuellement, la plupart des granulats utilisés sur le marché sont des granulats naturels issus de carrières ou de l'extraction des lits des fleuves ou des fonds marins. Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu.

Le granulat recyclé ne peut pas être considéré à ce jour comme un matériau de remplacement qui permettrait d'éviter l'exploitation des gisements naturels mais il peut ralentir ce processus. Par

exemple, la Belgique produit annuelle environ 72 millions de tonnes par an de granulats tous types confondus.

La répartition des différents types de granulats s'effectue de la manière suivante :

- granulats naturels : environ 43 millions de tonnes par an (+/- 58%), la fabrication des bétons consomme à elle seule 15 millions de tonnes;
- granulats marins : environ 4 millions de tonnes par an (+/- 5,5%);
- granulats artificiels : environ 2 millions de tonnes par an (+/- 2,25%);
- sables/graves : environ 11 millions de tonnes par an (+/- 14,75%);
- granulats recyclés : 14 millions de tonnes par an (+/- 19,5%).

Ainsi le recyclage des déchets comme granulats pour les routes ou la construction permet:

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

Au niveau environnemental, le recyclage complet du béton contribue à minimiser l'impact CO₂ du fait que :

- ✓ pour les grandes agglomérations, l'utilisation des granulats recyclés permettra de diminuer une partie du CO₂ attribuée au transport de granulats ;
- ✓ Le béton concassé est susceptible de piéger le CO₂ en se carbonatant [12];
- ✓ La récupération des fines potentiellement utilisables, après traitement, dans la production d'un nouveau ciment ou autre liant hydraulique, a un impact sur la réduction de la production de CO₂ des cimenteries.

De plus le recyclage est une activité économique à part entière. Elle est le moyen de création de richesses pour les entreprises de ce secteur. Par exemple, les 205 entreprises du recyclage en Ile-de-France rassemblent près de 5000 salariés en 2015. En Algérie, on estime que le recyclage créera plus de 30000 postes d'emplois directs. En théorie, presque tous les matériaux sont recyclables. En pratique, l'absence de filière rentable fait qu'ils ne sont pas tous recyclés.

II.3 Utilisation des recyclât

Les domaines d'emploi des recyclât sont diversifiés dont la confection de nouveaux bétons de bâtiment, les travaux de routes, la fabrication de ciment, etc. Cette application se fait tout en respectant certaines normes. Pour confectionner de nouveaux bétons de bâtiment, les granulats de bétons concassés recyclés ont une absorption d'eau plus élevée, une masse volumique plus faible et une homogénéité moindre par rapport aux granulats naturels [13]. Ces différences engendrent une

perte d'ouvrabilité du béton frais, une résistance mécanique plus faible et une vitesse de carbonatation plus élevée des bétons durcis constitués des gravillons de bétons recyclés. Ces phénomènes sont encore accrus en présence d'une fraction sable de bétons concassés (0/4mm). Ces inconvénients sont plus ou moins compensés par l'ajout de 10 à 15% de ciment supplémentaire et d'un fluidifiant. De plus, les granulats recyclés dont la granulométrie est comprise entre 20 et 63mm sont destinés aux terrassements ou aux chaussées. Pour la stabilisation de plates-formes et consolidation de sol les matériaux de recyclage de granularité 20/60 et 30/80 sont recommandés [13].

Dans le domaine du génie civil, les pneus usagés sont utilisés entiers ou découpés pour constituer des parements ou renforcer les remblais allégés (Techniques Pneusol et Pneuresil).

La poudrette de caoutchouc est obtenue par broyage de pneus usagés non réutilisables (PUNR) ou de déchets de rechapage. Cette poudrette est utilisée dans la fabrication des revêtements de sols industriels et sportifs, la réalisation de matériaux d'isolation phonique, de membranes anti-fissures à usage routier ou de membranes anti-vibrations destinées aux plates – formes ferroviaires. Elle est également employée comme liant dans les bitumes. L'enrobé possède ainsi un pouvoir drainant important évitant le phénomène d'aquaplaning, le bruit de roulage est réduit et le processus de vieillissement ralenti [11].

Les boues rouges sont utilisées dans les domaines suivants:

- ✓ Construction des routes à cause de leur solidité et de leur durabilité ;
- ✓ Production du ciment à cause de leur résistance au gel et leur bas prix ;
- ✓ Fertilisation des sols grâce à leur teneur élevée en potassium et en phosphate ;
- ✓ Extraction des oxydes de fer, de scandium, de plomb et de titan;
- ✓ Fabrication de céramique;
- ✓ Neutralisation des eaux des mines et des sites contaminés.

La poudre de verre comme ajout cimentaire peut remplacer jusqu'à 30% du ciment dans le béton. Cette initiative novatrice pour la récupération et le recyclage du verre en Amérique du Nord a plusieurs avantages. En plus d'offrir un débouché au recyclage du verre, elle améliore la qualité du béton de construction. Les intérêts ne sont pas seulement de nature environnementale puisque les propriétés de ce produit lui permettent de remplacer les ajouts cimentaires classiques en améliorant les performances des bétons [11].

Le laitier expansé est utilisé pour la fabrication du béton léger ayant une masse volumique apparente de l'ordre de 800kg/m³. Les blocs de béton de laitier sont utilisés pour la construction de murs porteurs et de murs non porteurs. Le béton de laitier expansé a une excellente résistance au feu et une conductivité thermique supérieure d'environ 75% de celle des autres bétons légers [11].

VI.4 Déchets recyclés dans le domaine du génie civil

VI.4.1 Les Laitiers sidérurgiques

Le laitier de haut fourneau est un sous produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Le laitier est ensuite refroidi lentement à l'air libre et donne un matériau cristallin et compact connu sous le nom de «laitier refroidi à l'air» ou bien il est refroidi rapidement et traité au moyen de jets d'eau pour obtenir un matériau léger désigné sous le nom «laitier expansé». Le laitier refroidi à l'air est approprié comme granulat pour le béton. La stabilité volumique, la résistance aux sulfates et la résistance à la corrosion par les solutions de chlorure font que le béton de laitier armé convient pour plusieurs applications.



Figure I.7 : Photo d'un laitier de haut fourneau.

▪ Laitier d'acier

Ce laitier est formé par l'élimination des impuretés contenues dans la fonte brute. Il est riche en phosphate ou en calcium et contient du silicate bicalcique, il est utilisé uniquement comme matériau de remblai pour les routes. Normalement, ce laitier est stocké en piles pendant une période allant jusqu'à un an avant d'être utilisé. L'utilisation de ces laitiers est assez peu répandue en raison des problèmes de stabilité dimensionnelle. Des procédés de vieillissement se sont développés afin de maîtriser cette instabilité et des initiatives de valorisation, notamment en génie civil. Aussi, les risques environnementaux associés à l'utilisation des laitiers dans certaines filières sont encore peu connus.



Figure I.8 : Photo d'un laitier d'acier.

VI.4.2 Sous-produits provenant des centrales thermiques

Dans les centrales électriques anciennes, les résidus de la combustion de houille sont désignés sous le nom de «mâchefer». Dans les centrales modernes, on utilise du charbon broyé ou pulvérisé pour la production de vapeur. Les petites particules qui sont transportées par les gaz de combustion sont recueillies par précipitation électrostatique ou par un autre moyen quelconque. Les particules sont appelées «cendres volantes». Certaines particules de cendres forment des scories qui tombent au fond du four. Dans les fourneaux à température élevée, il se produit également des résidus fondus appelés laitier de charbon.

VI.4.3 Mâchefer

Le mâchefer contient une proportion considérable de charbon non brûlé et d'autres impuretés. Il est utilisé principalement pour la fabrication de blocs de béton. Etant donné que le mâchefer contient des sulfates et des chlorures, il n'est pas recommandé pour le béton armé. Ce matériau risque de devenir de plus en plus rare à mesure que les centrales électriques anciennes passent à la combustion de charbon pulvérisé. A la sortie du four d'incinération les mâchefers sont généralement humides et contiennent des éléments grossiers (exemples : verre, ferrailles, gros imbrûlés).

Les mâchefers sont classés en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques en 3 catégories:

- Mâchefers de catégorie «V» à faible fraction lixiviable (fraction d'éléments solubles dans un solvant);
- Mâchefers intermédiaires de catégorie «M»;
- Mâchefers avec forte fraction lixiviable de catégorie «S».



Figure I.9 : Photos du mâchefer.

VI.4.4 Scories

Ces résidus constituent environ 2,5% de la production totale de cendres. On prévoit que plus le charbon sera utilisé, plus on aura de cendres. La composition chimique des scories de combustion américaines est semblable à celle des cendres volantes, sauf que les scories ont une plus forte proportion d'alcalis et de sulfates. Les scories de charbon et le laitier de charbon peuvent être utilisés comme granulats légers.



Figure I.10 : Site de stockage scories et scories.

VI.4.5 Cendres volantes

Les cendres volantes pourraient constituer de très bons granulats légers, mais elles ne sont pas beaucoup utilisées. Elles sont issues de la combustion du charbon pulvérisé et poussé dans la chambre de combustion d'un four par des gaz d'échappement. Elles sont préférables à beaucoup d'autres granules légers étant donné qu'elles donnent une combustion plus efficace, du fait que le carbone contenu dans les cendres produit la quantité de chaleur nécessaire pour éliminer l'humidité des boulettes et pour amener les boulettes à la température de frittage. Les cendres volantes sont classées selon leurs teneurs en CaO et du type du charbon brûlé.



Figure I.11 : Photo de la cendre volante.

VI.4.6 Déchets de verre

Le verre est un corps solide, non cristallin, homogène, provenant du refroidissement progressif de certaines substances après fusion. Le verre est l'un des matériaux les plus utiles car il possède de nombreuses qualités. Il est facile à modeler, transparent et peut prendre de nombreuses formes.

Le problème environnemental que posent les déchets non biodégradables tels que les bouteilles non réutilisables (verre) devient une préoccupation majeure au regard des quantités énormes produites dans les grandes villes. L'une des rares voies de recyclage de ces déchets est de les stocker dans les procédés de construction (béton). Ainsi, le verre est un matériau riche en silice et en sodium. Son utilisation dans une matrice cimentaire entraîne deux réactions à effet contraire : la réaction alcali silice néfaste pour les bétons par les gonflements qu'elle génère, et la réaction pouzzolanique qui est bénéfique.

Des millions de tonnes de verre sont récupérées chaque année et une voie de recyclage du verre consiste à l'utiliser dans les matériaux de construction. Il est utilisé sous deux formes principales: les granulats (taille > 4mm) et les poudres (taille < 4mm). Les granulats sont utilisés en remplacement des gravas dans les bétons et lui procurent une résistance moindre. Les poudres sont utilisées dans les mortiers en remplacement du sable mais aussi dans l'industrie du ciment comme fines.



Figure I.12 : Déchets de verres.

VI.4.7 Pneus usagés

Les matériaux cimentaires ont une capacité de déformation très limitée ainsi qu'une faible résistance à la traction, ce qui les rend sensibles à la fissuration, notamment la fissuration due au retrait. A titre d'exemple, les dallages, les chaussées et plus généralement les éléments mis en place en grande surface se fissurent sous l'effet du retrait. Ainsi, l'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation avant localisation de la macro-fissure. Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des granulats en caoutchouc a une grande résistance à la fissuration dû au retrait.



Figure I.13: Déchets de pneus usagés.

VI.4.8 Ciment durci

Dans le cas où un sac de ciment est en contact avec l'eau, la poudre se cristallise. Cette recristallisation du ciment est suivie d'une réaction d'hydrolyse. Ces deux réactions sont rapides et provoquent le durcissement du ciment. Il devient inutilisable comme liant sur le chantier. Le ciment ainsi durci devient automatiquement un déchet. Il peut être concassé et utilisé comme granulats de béton. Ce déchet est produit accidentellement ou par négligence, il est donc important d'éliminer le ciment durci et d'œuvrer pour empêcher sa production.



Figure I.14 : Ciment durci.

VI.4.9 Résidus d'incinérateurs

L'incinération des déchets domestiques et industriels entraîne la production de grandes quantités de résidus solides. Ces résidus comportent toutefois certaines matières délétères, ce qui compromet leur utilisation en tant que composants du béton. Ainsi, l'aluminium entraîne la dilatation par suite de l'évolution de l'hydrogène, les métaux ferreux font tacher le béton et les sels de plomb et de zinc solubles nuisent à la prise du ciment. La présence de verre entraîne aussi la dilatation des granulats alcalins.



Figure I.15 : Résidus d'incinérateurs.

VI.4.10 Boues rouges

Les boues rouges sont des résidus industriels issus du processus d'extraction d'aluminium à partir de la bauxite. Elles sont stockées soit au fond des océans (Exemples: Allemagne et France), soit près des usines comme au Canada. Elles sont de consistance assez plastique pour être formées en boules, chauffées à des températures de 1260 à 1310°C, elles sont transformées en granulats denses et résistants pouvant entrer dans la composition de bétons de résistances convenables.



Figure I.16 : Boues rouges.

VI.4.11 Déchets de démolition

Le béton constitue presque 75%, en poids de tous les matériaux de construction. Il s'ensuit donc que la plus grande partie de rebuts de démolition est constituée de béton. Par ailleurs, les sinistres (principalement les séismes) fournissent chaque année des millions de tonnes de débris de béton.

Aujourd'hui, les producteurs de granulats recyclés ont une politique de sélection des matériaux de démolition. Ainsi, on distingue cinq catégories de matériaux de démolition en fonction de leur nature:

- 1) les bétons armés sans enduit ni plâtre;
- 2) les matériaux composés de briques, de tuiles, de graves, de pierres et de blocs rocheux, etc.
- 3) les matériaux mélangés avec une faible teneur en plâtre, bois, plastique, etc.
- 4) les mauvais matériaux avec une teneur en bois, plâtre, plastique : supérieure à 10%,
- 5) les autres matériaux n'entrant pas dans les catégories précédentes.



Figure I.17 : Déchets de démolition.

VI.4.12 Déchets de production de l'industrie du béton

Les granulats de déchets de production ont deux origines :

- 1) Les débris de béton générés tout au long des étapes de la production; ils résultent du nettoyage des installations de fabrication et du transport du béton frais (chutes de béton); il peut également s'agir de béton provenant de gâchées non utilisées ou non utilisables.
- 2) Les produits défectueux, mal formés, partiellement cassés ou d'aspect non conforme; à ces produits défectueux s'ajoutent les produits ayant fait l'objet d'essais de résistance à la rupture.



Figure I.18 : Industrie du béton.

VI.4.13 Déchets de briques

Les déchets de briques sont issus de l'industrie des produits rouges. Ces produits comptent parmi les plus anciens matériaux de construction, ils sont des produits céramiques dont les argiles sont la matière première et parfois des additifs. Les briques ont généralement une forme parallélépipède rectangle. Il existe deux types de briques: briques en terre crue et briques en terre cuite.

▪ **Briques en terre crue**

Les briques en terre crue (figure I.19) constituent un matériau de base pour la construction de murs et de voûtes. En principe, les briques sont, fabriquées à base de terre (environ 75%), de paille (environ 20%) et d'eau (environ 5%). Le mélange est coulé dans des moules en bois, pour obtenir des briques de $(40.20.10)\text{cm}^3$. Les briques sont séchées à l'air pendant plusieurs jours, avant d'être utilisées.



Figure I.19 : Briques en terre crue [14].

▪ **Briques en terre cuite**

Les briques en terre cuite (figure I.20) se composent d'argile, d'adjuvants naturels (sable, sciure de bois) et d'eau. Les composants sont broyés jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène. L'argile est façonnée puis séchée et cuite à une température d'environ 1000°C , pour devenir ce que l'on appelle des briques en terre cuite.



Figure I.20 : Briques en terre cuite [14].

L'industrie des produits génèrent des quantités considérables de déchets. Selon les statistiques disponibles, la quantité de rebus dans cette industrie représente environ 10% de la production globale.

VI.4.14 Sables de fonderies

Les sables de fonderie sont des sous-produits de l'industrie de la fonderie. Dans le procédé de moulage des pièces métalliques, les fonderies utilisent un sable fin siliceux associé à d'autres matériaux tels que l'argile ou des liants organiques (résines phénoliques). Quand le sable n'est plus réutilisable pour l'industrie de la fonderie, il est mis en décharge. Les sables de fonderie sont donc susceptibles de constituer une matière première d'un coût assez faible pour la fabrication des bétons hydrauliques. La réglementation française, en l'occurrence l'Arrêté Ministériel du 16 juillet 1991 relatif à l'élimination des sables de fonderie contenant des liants organiques de synthèse, précise les conditions de la réutilisation de ces sables: «les sables de fonderie peuvent être utilisés pour la fabrication de produits à base de liants hydrauliques si leur teneur en phénol est inférieure à 5mg/kg de sable rapporté à la matière sèche».



Figure I.21 : Sable de fonderies.

VI.4.15 Déchets plastiques

On entend par déchet plastique, les résidus de processus de production, de transformation et de consommation, ou encore les produits plastiques destinés à l'abandon. Les déchets plastiques peuvent incorporés dans des matrices cimentaires. En effet, des études antérieures ont montrées qu'il était possible d'utiliser les déchets plastiques dans les bétons comme liant pour la production d'un matériau

composite à haute performance ou sont ajoutés dans le béton (sous forme de grains et fibres ondulées et rectilignes [7]).

Il existe plusieurs types de déchets plastiques :

- Les déchets plastiques industriels : il s'agit de l'ensemble des déchets issus des processus de production de résines (essentiellement trouvés dans les sites pétrochimiques) et de transformation des résines en objets fins (principalement trouvé dans la filière de la plasturgie).
- Les déchets de production : ils proviennent des arrêts de réacteur de polymérisations, des purges de réacteurs et des lots déclassés. Ils sont homogènes et présentent la particularité d'avoir un degré de pollution faible, voire inexistant. On y retrouve, en très grande majorité, les polymères de grande diffusion (PE, PS, PVC).
- Les déchets de transformation : ils proviennent de toutes les opérations de plasturgie permettant l'obtention de produits finis (extrusion, injection, soufflage, calandrage,...). On y retrouve, précisément, les carottes, lisières et bordures de ces opérations de thermoformage, les pièces présentant des défauts, ou encore, les chutes de démarrage et d'arrêt de machine.



Figure I.22 : Déchet plastiques.

VI.4.16 Déchets de marbre

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire, existant dans une grande diversité de coloris pouvant présenter des veines ou des fossiles. Certains types de marbre portent des noms particuliers, par exemple le cipolin ou la griotte. Le marbre désigne un carbonate de calcium à tissu compact ou cristallin qui se laisse rayer et réagit aux acides de plus ou moins siliceux ou argileux, il se présente en épaisseur homogène ou diversement mélangé à d'autres matières, sa densité est élevée en moyenne de 2,27. La classification des marbres est fondée sur les teintes ou les dessins : outre le blanc ils existent des variétés, beiges, bleus, roses, gris jaunes, rouges, vertes, violettes ou noires.

La production de marbre en France est faible et on constate une régression par rapport à des pays comme l'Italie, le Portugal, et la Grande Bretagne. Les produits marbrières Algériennes sont extraits et transformés conformément aux normes européennes : italiennes et françaises en particuliers. Les procédés utilisés en Algérie pour le travail du marbre sont ceux utilisés dans le monde :

- ✓ Sciage des masses au fil hélicoïdal, au fil diamanté et haveuse pour l'abatage et le tranchage des masses brutes de marbres naturels en carrières.
- ✓ Transformation des produits finis au moyen de lames et disques, débitages secondaires et ponçages avec des pierres ponces.

Le marbre Algérien est exploité actuellement par l'entreprise nationale du marbre "Enamarbre" qui dispose de dix unités de production implantées dans cinq Wilayas [14].

La production de marbre en blocs (2018), par les filiales de l'entreprise Enamarbre est de 200.000m².



Figure I.23 : Déchets de marbres et déchets de marbre broyés.

VII. Conclusion du chapitre

La gestion des déchets sous leurs différentes formes représente un véritable défi aux gestionnaires. Et afin de limiter leurs impacts négatifs sur l'environnement, beaucoup de pays dont l'Algérie, le Sénégal et la Guinée ont mis aux points des textes réglementaires qui fixent la gestion des déchets. Concernant les déchets potentiellement recyclable en construction, notre synthèse a permis de recenser les recyclât suivants : les laitiers de haut fourneau, les mâchefers, les scories, les cendres volantes, les déchets de verre, les pneus usagés, le ciment durci, les résidus d'incinérateurs, les boues rouges, les déchets de démolition, les fillers calcaires, les déchets de briques, les sables de fonderies, les déchets plastiques et les déchets de marbre. L'utilisation de ces produits dans l'élaboration des bétons et des ciments, nécessite des travaux de recherches.

Le deuxième chapitre sera ainsi consacré aux effets de l'utilisation des recyclât sur les différentes propriétés des bétons.

Références bibliographiques

- [1] Sané.Y., La gestion des déchets à Abidjan : Un problème récurrent et apparemment sans solution, AJEAM/RAGEE 2002; Vol.4
- [2] Thonart.P, Diabaté.S, Hiligsmann.S., Guide pratique sur la gestion des ménagers et des sites d'enfouissement, technique dans les pays du sud, Institut de l'énergie et de l'environnement, 2005.
- [3] Revue d'Africa2, L'économie verte au service du développement durable de l'Afrique et de ses citoyens, 2017.
- [4] Bourmate.N., Granulats recyclés de substitution pour béton hydraulique, thèse de doctorat, Université des frères Mentouri, Constantine, Algérie 2017.
- [5] <https://www.sirmet.fr>, site consulté le 23/02/2019.
- [6] Château.L., Déchets du bâtiment, Fiche technique, décembre 2014.
- [7] Belkbir.H., Elaboration d'un béton autoplaçant léger à base des déchets de plastique, mémoire de DEUA, Université de Boumerdes, Algérie 2011.
- [8] Rouyat.J., La gestion des ordures ménagères dans les villes secondaires du Sénégal.
- [9] <https://www.mofa.go.jp>, site consulté le 28/07/2019.
- [10] <https://www.fr.wikipedia.org/wiki/Recyclage>, site consulté le 24/04/2019.
- [11] Djebien.R., Formulation et propriétés du béton de sable à base de fines recyclés, thèse de doctorat, Université 20 Aout 1955- Skikda, Algérie 2015.
- [12] Thai-Hoa.V., Caractérisation de la phase solide et transferts de gaz dans les milieux poreux insaturés. Etude expérimentale et modélisation appliquées à la diffusion de l'hydrogène dans les matériaux cimentaires. Spécialité Génie Civil. Université de Toulouse, France 2009, Pp.24-25.
- [13] Raphaël.B., Substitution des granulats alluvionnaires dans l'industrie du béton par les granulats marins, concassés ou recyclés, 2003.
- [14] Nigri.G., Nouvelle élaboration d'un liant hydraulique, thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma, Algérie Février 2018.
- [15] Habhoub.H., Granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques : déchets de marbre, thèse de doctorat, Université de Skikda, Algérie, 2008.

CHAPITRE II :

Valorisation des déchets comme granulats pour béton

Les granulats traditionnels (sables et graviers) constituent entre 63 et 85% du poids du béton. La substitution d'une partie des granulats par d'autres matériaux à faible coût peut s'avérer donc très intéressant d'un point de vue purement économique. Cette substitution permet également de réduire le volume des déchets, et donc de la limitation de la pollution qu'ils causeraient (certains matériaux mettent des décennies, voire des siècles à se dégrader), et la préservation des ressources naturelles, car la matière recyclée est utilisée à la place de celle qu'on aurait dû extraire.

L'objectif de ce second chapitre est d'établir une synthèse de plusieurs études scientifiques entreprises en vue de substituer une partie des granulats traditionnels par plusieurs autres matériaux issus d'opérations de recyclages.

SOMMAIRE

I.Introduction :	- 37 -
II. Les granulats	- 37 -
II.1. Définition	- 37 -
II.2 Classifications normalisées des granulats	- 37 -
II. 2.1 Classification des granulats selon leur origine	- 37 -
II. 2.2 Classification des granulats selon leur taille	- 37 -
II. 2.3Classification des granulats selon leur masse volumique	- 38 -
III. Valorisation de béton démolition comme granulats pour béton.	- 39 -
III.1 Techniques de démolition et de déconstruction :.....	- 41 -
III.2 Élaboration des granulats de démolition :.....	- 41 -
III. 3 Caractéristiques des granulats de béton recyclé	- 43 -
III. 4 Fabrication du béton à GBR (granulats de béton recyclé).....	- 47 -
III. 5. Impact des GBR sur les propriétés du béton à l'état frais.....	- 49 -
III. 6 Facteurs influençant les propriétés mécaniques du béton à GBR	- 50 -
III. 7 Impact des GBR sur les propriétés mécaniques	- 52 -
III. 8 Impact des GBR sur les propriétés liées à la durabilité	- 52 -
IV. Valorisation des laitiers cristallisés comme granulats pour béton.....	- 54 -
IV.1 Elaboration du laitier:	- 54 -
IV.2 Laitier cristallisé	- 55 -
IV.3 Caractéristiques du laitier cristallin.....	- 56 -
IV.4 Impact des granulats de laitier sur le béton	- 59 -
IV.4 .1 Impact sur les propriétés à l'état frais.....	- 59 -
IV.4.2 Impact sur les propriétés à l'état durci.....	- 61 -
IV.4.3 Impact sur les propriétés liées à la durabilité.....	- 64 -
V.Valorisation des déchets de pneus usagés comme granulats pour béton	- 66 -
V.1 Elaboration de granules et poudre de pneus usagés	- 66 -
V.2 Caractéristiques des granulats de caoutchouc	- 67 -
V.3 Impact des GC sur les propriétés des bétons à l'état frais	- 69 -
V.4 Impact des GC sur les propriétés à l'état durci du béton	- 71 -
V.5 Impact sur les propriétés liées à la durabilité.....	- 75 -
VI. Conclusion du chapitre	- 78 -
Références bibliographiques.....	80

I .Introduction

Dans le premier chapitre on a pu voir la problématique liée au différents déchets, cependant pour trouver une solution à cette situation et préserver les granulats traditionnels d'une surexploitation des ressources naturelles disponibles, plusieurs études ont été menées partout dans le monde concernant la valorisation de certains déchets comme granulats pour béton. Ainsi le présent chapitre fera l'objet d'une synthèse bibliographique pour mettre en lumière les points suivants :

- ✓ Comment sont élaborés les granulats recyclés?
- ✓ Quelles sont les caractéristiques ou propriétés des granulats recyclés?
- ✓ Quel est l'impact des granulats recyclés sur les propriétés du béton à l'état frais du béton?
- ✓ Quel est l'impact des granulats recyclés sur les propriétés du béton à l'état durci?
- ✓ Quel est l'impact des granulats recyclés sur les propriétés liées aux facteurs de durabilité?

II. Les granulats

II.1 Définition

Les granulats, ou agrégats, sont définis comme étant un ensemble de grains chimiquement inerte de dimensions comprises entre 0 et 125mm, qui mélangés à la pâte de ciment, constituent le squelette du béton. Le terme granulat est étendu à des granulats artificiels ou non, utilisés dans la construction : laitier (sous-produit de la sidérurgie), mâchefer, déchets de briques, matériaux expansés, vermiculite, perlite, liège, des granulats très durs (quartz, corindon, carborundum, etc.) ou très denses (barytine, magnétite).

II.2 Classifications normalisées des granulats

II.2.1 Classification des granulats selon leur origine

Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine naturelle, artificielle ou recyclée :

- 1- «Naturels», lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives et qu'ils subissent aucun traitement autre que mécanique (réduction de dimensions) ;
- 2- «Artificiels», lorsqu'ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais ;
- 3 - «Recyclés», lorsqu'ils proviennent de la démolition d'ouvrages ou lorsqu'ils sont réutilisés.

II.2.2 Classification des granulats selon leur taille

Les granulats sont classés en fonction de leur granularité déterminée par analyse granulométrique sur des tamis de contrôle à mailles carrées dans une série normalisée. La norme Algérienne NA452[1] classe les granulats en trois catégories suivant leurs dimensions, qui vont de 0,08 à 80mm. Nous trouverons les sables, les graviers ou gravillons, et les cailloux. Au-delà des limites indiquées c'est le domaine des fines et des moellons. Le tableau II.1 indique le classement normalisé des granulats en fonction de leur taille.

Tableau II.1: Classification normalisée des granulats[2].

Granulat		Ecartement des Mailles des tamis	Diamètre des trous des passoires (mm)
Fines		< 0,08	
Sables	Fins	0,08 ÷ 0,315	
	Moyens	0,315 ÷ 1,25	
	Gros	1,25 ÷ 5	
Graviers	Fins		6,3 ÷ 10
	Moyens		10 ÷ 16
	Gros		16 ÷ 25
Cailloux	Petits		25 ÷ 40
	Moyens		40 ÷ 63
	Gros		63 ÷ 80
Moellons			> 80

Ainsi tout granulat est désigné par deux nombres (d/D) représentant respectivement la plus petite (d) et la plus grande dimension (D) de ses grains. Tout intervalle (d/D) ainsi défini est également appelé classe granulaire. Les dimensions (d) et (D) à sont choisies dans la série suivante: 0 – 0,063 – 0,08 – 0,1 – 0,125 – 0,16 – 0,2 – 0,25 – 0,315 – 0,4 – 0,5 – 0,63 – 0,8 – 1 – 1,25 – 1,6 – 2 – 2,5 – 3,15 – 4 – 5 – 6,3 – 8 – 10 – 12,5 – 14 – 16 – 20 – 25 – 31,5 – 40 – 50 – 63 – 80 – 100 – 125mm.

II.2.3 Classification des granulats selon leur masse volumique

Le classement des granulats en fonction de leur masse volumique est illustré dans le tableau suivant

Tableau II.2 : Classification des granulats suivant leur masse volumique[2].

Classification	Masse volumique (t/m ³)
Granulat léger	< 2
Granulat courant	Entre 2 et 3
Granulat lourd	> 3

Les granulats (sable, gravillons) constituent le squelette du béton. Ils doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. Leurs proportions moyennes en volume et en poids sont représentés dans le tableau II.3.

Tableau II.3 : Ordre de grandeur des proportions dans le béton[2].

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

Ainsi et selon les chiffres du tableau II.3, il apparaît clairement que les granulats constituent la phase la plus importante en terme de poids et de volume dans le béton. La substitution d'une partie de ces composants peut donc se justifier d'un point de vue économique. Dans les paragraphes suivants, nous tenterons d'établir une synthèse sur la substitution d'une partie des granulats traditionnels par des granulats issus d'opération de recyclage ou de démolition.

III. Valorisation du béton de démolition comme granulats pour béton [3]

Pour favoriser le recyclage des déchets de construction et de démolition (DCD), les granulats de béton recyclé (GBR) doivent être de bonne qualité pour pouvoir être incorporés dans le béton. Il faut notamment qu'ils présentent une teneur élevée en béton et en matériaux rocheux, sans être trop contaminés par du plâtre, du bois, du plastique, etc. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de mettre en œuvre un procédé de démolition adéquat permettant de trier les différentes natures de matériaux rencontrés. Une déconstruction (démolition sélective) est alors toujours préférée à une démolition sans tri préalable [2].

III.1 Techniques de démolition et déconstruction [3]

Différents facteurs influencent le choix de la technique ou de la combinaison des techniques utilisées sur un chantier de démolition :

- la surface de travail disponible ;
- l'existence de réglementations locales ou nationales obligeant le tri des déchets ;
- l'existence de prescriptions environnementales (imposées par le Maître de l'Ouvrage) ;
- l'emplacement du chantier de démolition ;
- le volume de démolition ;
- le temps alloué pour réaliser la démolition.

Les techniques décrites ci-après ne peuvent être mises en œuvre que par des entreprises qualifiées, ayant compétences pour appliquer les mesures de sécurité adéquates envers les travailleurs et le voisinage.

III.1.1 Technique de démolition à l'aide d'outils à main [3]

Ces techniques sont principalement utilisées pour les démolitions de petits volumes, et pour les travaux préparatoires avant la démolition d'ouvrages plus grands. Lorsqu'il s'agit de travaux préparatoires, les produits polluants sont supprimés (amiante, plomb, etc.). Différents outils sont

utilisés tels que maillets, pioches et marteaux qui peuvent être électriques, pneumatiques ou hydrauliques. Ce type de démolition est lent et coûteux, mais il permet un bon tri si il est bien entrepris.

III.1.2 Techniques de démolition à l'aide d'outils portés [3]

Par rapport aux outils à main, ces techniques présentent l'intérêt d'être beaucoup plus efficaces et beaucoup plus puissantes. Différents outils tels que pinces, cisailles, boulets sont portés par un engin mécanique. La sélection de l'outil dépend du type de bâtiment (taille, matériaux de la structure, etc.). Le coût d'utilisation de ces outils (coût unitaire par tonne de matériaux démolis) est inférieur à celui des outils à main. Lorsque l'immeuble est très élevé, des mini-engins peuvent être utilisés pour déconstruire les étages supérieurs, avant que les engins de démolition adaptés, travaillant depuis le sol, n'interviennent.



FigureII.1 : Démolition à l'aide d'une tenaille [3].

III.1.3 Démolition par dynamitage [3]

Le dynamitage est un processus de démolition très efficace, qui fragilise ou produit l'effondrement de la structure du bâtiment. Selon le type du bâtiment, différentes techniques de dynamitage peuvent être utilisées. Elles peuvent aussi être utilisées dans les différentes parties d'un bâtiment pour avoir une démolition sélective. Avant le dynamitage, le bâtiment doit être nettoyé et les matériaux récupérés sont triés, afin d'obtenir une bonne qualité de déchets inertes pouvant être recyclés. Cette étape est primordiale, car si le tri n'a pas été fait avant le foudroyage, tous les déchets seront mélangés. Ces techniques nécessitent également une expertise et une bonne connaissance en matière de structure des bâtiments. Elle est généralement utilisée pour les bâtiments où les techniques de démolition classiques ne peuvent être appliquées en raison de la taille du bâtiment, du niveau de risque ou du manque d'efficacité des techniques classiques.



Figure II.2: Démolition par dynamitage de bâtiment [3].

III.1.4 Autres procédés de démolition [3]

D'autres techniques de démolition peuvent impliquer des procédés plus anciens comme le perçage, le forage ou l'abattage par câbles, mais aussi plus récemment comme les méthodes thermiques où les matériaux sont fusionnés pour être séparés les uns des autres, ou encore des procédés électriques ou chimiques.

▪ **Déconstruction :**

La déconstruction est un processus de démolition sélectif permettant un tri efficace des différents matériaux. De ce fait, elle a un coût plus élevé que la démolition classique. Ce surcoût est directement lié à l'augmentation de la durée du processus de démolition, au nombre d'opérations à effectuer pour faire le tri des différents matériaux, et au nombre d'ouvriers nécessaires.



Figure II.3: Opération de tri durant une déconstruction sélective [3].

III.2 Élaboration des granulats de démolition [3]

Les granulats de béton recyclé (GBR) produits industriellement proviennent généralement d'ouvrages démolis. Ils contiennent de ce fait une large variété de bétons de composition et de propriétés différentes associés à une plus ou moins grande proportion de corps étrangers (par exemple, de la brique en terre cuite, des enrobés bitumineux, du verre, du plâtre, etc.). Il est relativement facile de séparer les constituants tels le plastique, le bois, le métal, le papier et les

matériaux de couverture. C'est moins évident pour la céramique, les enrobés et la pierre. Ces constituants sont presque toujours présents dans les différents granulats recyclés.

La plupart des GBR contiennent donc une variété de composants minéraux (pierre, mortier, brique, plâtre et autres matériaux de qualité médiocre). Pour pouvoir valoriser au mieux les GBR, il est nécessaire d'améliorer leur uniformité et de réduire au maximum les contaminants.

Il existe plusieurs configurations de plateforme de recyclage des déchets de construction et de démolition (DCD). Les procédés rencontrés actuellement comprennent généralement les opérations suivantes[4]:

- extraction des éléments métalliques à l'aide de séparateurs magnétiques ;
- élimination des éléments indésirables légers (plâtre, bois, plastique, etc.) par des systèmes de tri (séparateurs manuels, pneumatiques ou hydrauliques, etc.) ;
- concassage/criblage, pour produire un matériau élaboré compatible avec l'utilisation finale recherchée ;
- floculation des argiles, par des techniques de flottation par exemple.



FigureII.4: Elimination des matériaux légers par jet d'air[4].



FigureII.5 : Déferrailage magnétique[4].

III.3 Caractéristiques des granulats de béton recyclé [3]

III.3.1 Composition et propriétés chimiques

▪ **Mesure de la teneur de pâte de ciment durci (PCD) adhérente et mortier adhérente**

Lorsque le béton est concassé, une partie de la pâte de ciment reste attachée aux grains d'origine. Cette pâte de ciment adhérente est généralement beaucoup plus poreuse que les granulats naturels utilisés pour fabriquer le béton. Par conséquent, la qualité et le volume de PCD résiduelle sont très souvent à l'origine des moins bonnes propriétés des GBR, comparativement à celles des granulats naturels : masse volumique plus faible, plus forte absorption d'eau, coefficient Los Angeles (LA) plus élevé, teneur en sulfates plus forte, etc. Connaître la teneur en PCD dans un GBR est alors nécessaire pour évaluer sa qualité. Plusieurs méthodes ont été tentées pour réaliser cette quantification mais, vu la difficulté, elles n'ont pas réellement abouti.

Des méthodes expérimentales se sont alors intéressées à la mesure de la teneur en mortier adhérent (MA). Le mortier adhérent est à priori plus facile à quantifier expérimentalement que la PCD, mais sa définition est plus ambiguë. Tout d'abord, elle dépend étroitement de la taille maximale choisie pour séparer mortier et béton (généralement 4 à 5mm). Ensuite, le MA peut ne pas contenir que du mortier issu du béton d'origine, mais également des fragments du gravillon naturel libérés lors du concassage. Par conséquent, le MA dépend beaucoup de la méthode expérimentale utilisée pour sa détermination.

Plusieurs procédés sont proposés dans la littérature pour mesurer en laboratoire la teneur en PCD ou en MA. Elles reposent sur des méthodes thermomécaniques, chimiques ou visuelles, voir sur la combinaison de plusieurs d'entre elles. Le but est de séparer autant que possible la PCD du granulat naturel afin de permettre une optimisation du recyclage des GBR.

- Les méthodes thermomécaniques cherchent à séparer le MA des gravillons en favorisant le développement de fissures entre les deux phases.
- Les méthodes chimiques sont basées sur la dissolution sélective de la pâte de ciment adhérente. Une solution d'acide chlorhydrique permet de dissoudre efficacement la PCD.

▪ **Paramètres influençant la teneur en PCD ou en MA**

La teneur et les propriétés de la PCD dépendent de la composition du béton d'origine. Une plus forte proportion de ciment et d'eau dans la formule du béton se traduira par une plus grande teneur en PCD dans les GBR.

La distribution de la PCD selon les classes granulaires de GBR est largement influencée par le procédé de concassage. Par conséquent, les concassages successifs diminuent la teneur en MA des gravillons de GBR, mais augmentent concomitamment la quantité de fines de GBR[5].

▪ **Caractéristiques minéralogiques et chimiques des GBR**

Peu de travaux fournissent des données précises et exhaustives sur les caractéristiques chimiques et minéralogiques des GBR. Nous citerons les résultats d'un projet de recherche nommé Recybéton [3].

Dans cette étude, les auteurs ont étudié neuf GBR : quatre sables (0/4 ou 0/6mm) et cinq gravillons (4/20, 4/10 ou 10/20mm), issus (concassage et criblage) de quatre plateformes de recyclage identifiées 1 à 4. Ils ont été choisis pour représenter les principaux bassins urbains et industriels répartis sur les principaux contextes géologiques de la France (voir tableau II.4).

Tableau II.4: Contexte géologique des bassins industriels d'où les GBR de l'étude sont issus [3].

Plateforme	Contexte géologique principal
1	Périphérie du bassin parisien, proche du complexe métamorphique ancien
2	Bassin alluvial du Rhône et de la Saône - proximité du massif Alpin
3	Centre du bassin sédimentaire de Paris
4	Bassin alluvial du Rhin - proximité des Vosges et de la Forêt- Noire

Tableau II.5: Composition des gravillons de GBR selon la norme européenne EN 933-11[3].

Plateforme	Classe granulaire	X	Rc	Ru	Rb	Ra	Rg
1	4-20	0,02	73,1	4	17,3	2,5	0,30
2	4-10	0,02	65,5	32,5	0,6	0,8	0,03
3	10-20	0,01	94,9	0,03	3,8	1,5	0,02
4	4-20	0,02	85,0	13,1	1,8	0,3	0

Légende :

- X : cohésif (argile et sols), métal, bois, plastiques, plâtre,
- Rc : béton, produits en béton, mortier, éléments de maçonneries en béton,
- Ru : granulats seuls, pierre naturelle, granulats traités aux liants hydrauliques,
- Rb : éléments de maçonnerie en argile, béton léger non-flottant,
- Ra : matériaux bitumineux,
- Rg : verre.

Tableau II.6: Identification visuelle des principales roches présentes dans les GBR[3].

Plateforme	Principaux types de roches identifiés, à l'exclusion du sable siliceux
1	Calcaires et roches métamorphiques (schiste, quartzite)+pollution artificielle (tuiles et briques)
2	Calcaires, grès, roches magmatiques diverses (granité, etc.) et roches métamorphiques (micaschistes, etc.)
3	Calcaires riches en silex
4	Calcaires, grès, roches magmatiques diverses (granite, etc.) et roches métamorphiques (schistes, quartzite, etc.)



Figure II.6 : Divers aspects des granulats en fonction de leur taille[3].

▪ **Contrôle de la teneur en GBR dans un mélange de sables naturels et recyclés**

La présence de 10% seulement de sable de GBR modifie sensiblement les caractéristiques du sable naturel, comme l'absorption d'eau, la présence d'impuretés et la teneur en sulfates solubles. Dans le mélange, le sable de GBR peut être détecté en mesurant ces différentes propriétés, mais sa quantification précise n'est pas réellement possible. Si le mélange contient une faible proportion de sable de GBR, seule la mesure des sulfates solubles dans les conditions de répétabilité permet de contrôler le dosage avec une erreur inférieure à 2%. La détermination précise de la proportion de GBR en condition de reproductibilité est compromise. Les contrôles de production ou d'utilisation, ou les agréments, seraient plus facilement validés si des propriétés cibles du mélange étaient plutôt fixées (teneur limite en sulfates solubles, par exemple) et non un pourcentage de GBR dans le mélange.

III.3.2 Propriétés physiques des GBR

Les propriétés physiques, comme la masse volumique réelle et le coefficient d'absorption d'eau (A_b), sont des propriétés très importantes pour la réutilisation des GBR dans le béton. Jusqu'à présent, il n'existe pas des normes particulières pour mesurer la masse volumique réelle et l'absorption d'eau des GBR. Les normes dédiées aux granulats naturels, telles [NF EN 1097-6, ASTM C127] (pour les gravillons), [ASTM C128] (pour les sables) sont donc aussi utilisées pour les GBR cependant les protocoles utilisés pour les granulats naturels ne sont pas réellement adaptés pour les GBR.[6] signalent que l'immersion des GBR peut entraîner un détachement partiel de la PCD de même, le séchage à l'étuve à 105°C pour obtenir la masse sèche peut éliminer une partie de l'eau liée aux hydrates de la PCD.

En règle générale, les GBR ont une absorption d'eau supérieure et une masse volumique réelle inférieure que celles des granulats naturels, en raison de la présence de la PCD. La mesure de A_b est particulièrement importante car elle détermine la quantité d'eau efficace (E_{eff}) dans le béton (cette quantité se référant à l'eau présente dans la pâte fraîche de ciment, à l'exclusion de l'eau absorbée par les granulats) et influe aussi sur l'ouvrabilité du béton frais et la formation de réseaux poreux du béton par conséquent sur les caractéristiques mécaniques et la durabilité du béton durci.

À partir de plus de 230 articles sur les GBR, [7] ont constaté que la masse volumique réelle et Ab_{24} suivaient une distribution normale. La masse volumique réelle moyenne de tous les résultats recueillis est 2327kg/m^3 pour les gravillons et 2065kg/m^3 pour les sables de GBR. Pour Ab_{24} , les valeurs sont 4,7% pour les gravillons et 9,5% pour les sables.

Lors de la fabrication des granulats recyclés le concassage a deux effets:

- 1) En créant des fissures, le concassage contribue à une augmentation de l'absorption d'eau.
- 2) Les fissures dans la partie hydratée du ciment primaire est responsable de la forte absorption d'eau[7].

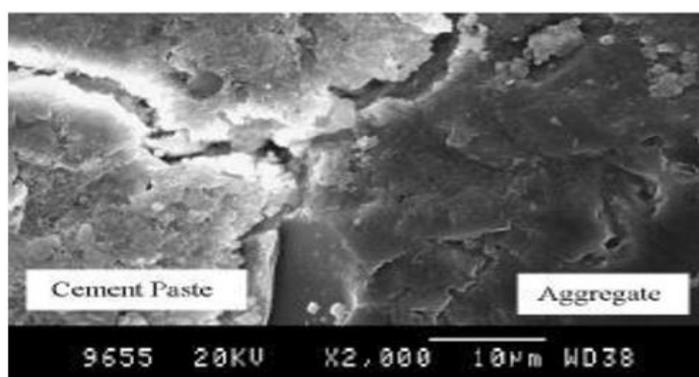


Figure II.7 :Interface granulat naturel/pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton[7].

▪ Autres propriétés

Distribution granulométrique : de manière générale, un granulat recyclé présente plus de particules fines qu'un granulat naturel[8]. On ne peut pas généraliser cette caractéristique, car elle varie beaucoup en fonction du type de granulat recyclé et du type de granulat naturel avec lequel on le compare.

Porosité : Le volume des pores d'un granulat recyclé est sensiblement plus élevé que celui d'un granulat naturel. Ceci est dû à la nature poreuse du mortier résiduel provenant du vieux béton. La porosité plus importante du mortier le rend plus faible et moins dense qu'un granulat naturel [9].

III.3.3 Propriétés mécaniques des GBR

▪ Résistance aux chocs et à l'abrasion

L'essai Los Angeles (LA) est le plus souvent retenu pour déterminer la résistance aux chocs et à l'abrasion des divers gravillons recyclés. Lors d'un essai de résistance à l'abrasion Los Angeles, tout le mortier résiduel qui est lié au granulat d'origine se détache. Il est possible d'observer une grande perte de masse, donc un coefficient Los Angeles plus élevé que celui observé sur un granulat naturel [8,10]. La résistance à l'abrasion est donc directement liée à la teneur en mortier résiduel. Typiquement, la perte à l'essai Los Angeles observé sur un granulat naturel est de l'ordre de 15 à 30% alors qu'il est de l'ordre de 20 à 45% sur un granulat recyclé[11].

▪ Résistance à l'écrasement

Le coefficient d'écrasement fournit une estimation de la résistance d'un granulat à l'écrasement sous une charge de compression croissante. Plus petite est la valeur du coefficient, plus le granulat est résistant. Selon la littérature, ce coefficient serait de l'ordre de 20 à 30% pour un granulat recyclé, alors qu'il est de l'ordre de 14 à 22% pour un granulat naturel [12]. Un granulat recyclé est donc moins résistant et cela est causé en grande partie par la faible résistance du mortier résiduel.

III.4 Fabrication du béton à GBR

Il existe plusieurs difficultés liées à l'utilisation des granulats de béton recyclé (GBR) dans l'industrie du Béton Prêt à l'Emploi (BPE)[3], parmi lesquelles on peut citer :

- la nécessité d'avoir un ou plusieurs silos supplémentaires. Leur implantation n'est cependant pas toujours facile pour les centrales situées en milieu urbain, là où les GBR sont principalement disponibles.
- Un autre problème délicat est le contrôle de la teneur en eau des granulats et de son impact sur la rhéologie du béton frais. Il est généralement admis que l'absorption d'eau élevée des GBR génère des difficultés pour un dosage précis de l'eau efficace de la formule. De même, l'eau absorbée par les GBR, entre la fin du malaxage et le coulage sur chantier, peut faire évoluer la consistance du béton durant le transport. [3] a étudié l'influence du taux de pré-saturation des GBR sur la rhéologie des bétons de GBR. L'état initial de pré-saturation des GBR n'a pas réellement d'effet sur les propriétés rhéologiques du béton frais à la fin du malaxage, le temps de malaxage étant généralement suffisant pour qu'un GBR sous-saturé absorbe une grande partie de l'eau nécessaire à sa saturation.
- Un autre problème est l'abrasion des granulats durant le malaxage. Afin de mieux mesurer son importance et d'en tenir compte dans la formulation des bétons de GBR, la friabilité des GBR a été étudiée dans différentes conditions de malaxage. La diminution de la taille des gains durant cette phase est causée par une combinaison d'actions de type attrition/fragmentation, dont l'ampleur est reliée à la valeur du coefficient MDE du GBR, et à sa teneur en pâte et en mortier résiduels. La pâte de ciment fraîche protège les GBR durant le malaxage, et limite leur abrasion. Toutefois, pour un malaxage inférieur à une minute, durée habituelle dans un contexte industriel, les mécanismes d'attrition n'ont pas encore réellement débuté, et par conséquent n'impactent pas significativement la qualité du béton. Ces résultats ont été vérifiés lors de la fabrication, avec les outils industriels habituels, des bétons mis en œuvre sur les chantiers expérimentaux du Projet Recybéton [3].

III.4.1Pré-saturation des GBR

Il est généralement admis que l'absorption d'eau élevée des GBR [13]et leur hétérogénéité rendent difficile le maintien d'un même dosage en eau d'une gâchée à l'autre. De plus, l'eau absorbée

pendant le transport entre la fin du malaxage et la mise en œuvre peut changer la consistance du béton.[14] ont étudié des GBR qui ont absorbé jusqu'à 5% de l'eau du mélange entre 100 secondes et 1 heure. Ils en déduisent que les pertes de maniabilité dues à l'absorption d'eau diffèrent d'un GBR à l'autre. Ils signalent également que la cinétique d'absorption d'eau des GBR est différente entre eau pure et pâte de ciment. On rejoint ici les travaux de[15]qui a montré que la cinétique d'absorption d'eau des granulats légers, plongés dans une pâte de ciment, dépendait fortement du rapport (Eau/Poudre) de la pâte. Il existe donc une influence de la teneur en eau initiale des GBR sur la qualité du malaxage des bétons de GBR. Afin d'éviter des variations de consistance,[16]ont proposé d'immerger les GBR dans l'eau pendant 10 minutes, suivi éventuellement d'un bref séchage à l'air, pour éliminer l'eau de surface subséquente. La saturation complète afin d'éviter tout transfert d'eau vers les granulats a aussi été proposée par d'autres auteurs [17].

[18, 19]ont étudié l'effet de l'utilisation de GBR séchés à l'étuve, séchés à l'air ou saturés surface sèche avant malaxage, en considérant une quantité d'eau totale constante dans le béton. Ils concluent que le séchage à l'air des GBR donne des bétons de meilleure maniabilité et de meilleure résistance à la compression. Les auteurs proposent que l'état saturé ne doit pas être retenu en raison du risque de ressuage. Toutefois, pour les sables de GBR[20] signalent que la sensibilité à la fissuration du béton augmente avec la teneur en eau initiale des granulats, dans une gradation croissante allant du séchage à l'étuve jusqu'à l'état saturé surface sèche. À l'évidence, l'utilisation de GBR pré-humidifiés à des teneurs en eau différentes, en gardant l'eau ajoutée constante (donc à différentes quantités d'eau totale) conduit à une augmentation de l'ouvrabilité et une diminution de la résistance à la compression.[21, 22] ont également étudié la variation de l'affaissement de bétons incorporant des GBR séchés à l'étuve, saturés surface sèche ou pré-humidifiés à un état intermédiaire, en gardant l'eau ajoutée constante. La perte d'affaissement n'est pas influencée par la teneur en eau initiale des granulats (quel que soit l'affaissement initial), et elle est comparable à celle d'un béton de granulats naturels. Ce résultat est interprété comme la conséquence d'une absorption rapide des GBR, qui se produit probablement pour l'essentiel pendant le temps de malaxage.

III.4.2 Procédure de malaxage – effet de la séquence de chargement

La technique du sable enrobé de ciment (SEC) a été proposée dans les années 1980 pour améliorer la résistance à la compression des bétons ordinaires à base de granulats naturels [23, 24]. Cette méthode permet d'accroître jusqu'à 25% la résistance, par rapport à un malaxage normal (en une seule étape) et pour la même quantité d'eau totale. Ils expliquent ce gain par une amélioration de l'interface pâte de ciment–granulat [25].À la fin des années 1990, [26] ont montré que l'eau absorbée par les GBR avant ou au cours du malaxage, pouvait améliorer la résistance du béton. Ce résultat a servi à adapter la méthode SEC à la spécificité des GBR, en augmentant la quantité d'eau introduite au départ (50% de l'eau totale) et en retardant l'introduction du ciment[27, 28]. Cette méthode de malaxage en deux étapes améliore effectivement le comportement mécanique des bétons de GBR (augmentation

d'environ 15% de la résistance à la compression, et de 20 à 25% de la résistance à la traction) et leur durabilité (pénétration des ions chlorure et carbonatation), par comparaison au malaxage en une seule étape. L'effet bénéfique s'explique par une amélioration des propriétés de la nouvelle auréole de transition [28, 29]. Cette méthode appelée «Approche du malaxage en deux étapes» [30] a été reprise ces dernières années.

III.5 Impact des GBR sur les propriétés du béton à l'état frais

La forte capacité d'absorption d'eau des granulats de béton recyclé (GBR) influence directement les propriétés du béton frais. C'est pourquoi plusieurs études se sont focalisées sur l'effet de la teneur en eau des GBR vis-à-vis de la maniabilité du béton [21]. Cependant, le plus souvent, les résultats présentés, qui montrent l'importance de l'état de pré-saturation des GBR sur le dosage en eau ou sur l'évolution de la maniabilité du béton dans le temps, ne sont basés que sur un essai unique, tel l'affaissement ou l'étalement. Or, la connaissance d'un seul paramètre technologique ne permet pas de discriminer correctement la fluidité des différentes formules de béton [31].

L'humidification préalable des GBR n'a pas d'effet significatif sur les propriétés rhéologiques du béton frais en fin de malaxage. Le temps de malaxage est suffisant pour que les GBR sous saturés absorbent une grande partie de l'eau nécessaire à leur saturation. Une teneur en eau des GBR comprise entre $0,8A_{24}$ et A_{24} (A_{24} étant l'absorption d'eau des GBR à 24 heures) paraît être un bon compromis pour minimiser l'effet négatif de l'absorption d'eau sur les propriétés d'écoulement du béton, en terme de seuil de cisaillement et de viscosité plastique. Les propriétés du béton de GBR dépendent du couple ciment/adjuvant, mais aussi du taux de substitution des granulats naturels par des GBR. Il y a donc une réelle influence des GBR sur la compatibilité (équilibre physico-chimique) du couple ciment/adjuvant. Cette influence est plus marquée avec les sables de GBR qu'avec les gravillons de GBR.

Plus le pourcentage de substitution est élevé, plus la rhéologie est affectée. Il faut cependant distinguer les bétons contenant des sables de GBR, pour lesquels une dégradation apparaît lorsque le taux de substitution dépasse 30%, et les bétons contenant des gravillons de GBR, pour lesquels peu d'effets sont observés, y compris jusqu'à 100% de substitution [3].

▪ Affaissement

De manière générale, l'affaissement d'un béton comportant des granulats recyclés sera plus faible que l'affaissement d'un béton ayant des granulats naturels pour un même rapport E/C [8]. Cette baisse d'affaissement est principalement causée par la grande absorption et l'angularité des granulats recyclés. Effectivement, [32] observe que la demande en eau augmente de 3,1 à 9,4% pour garder un affaissement égal lorsqu'on utilise des granulats recyclés.

▪ **Rapport E/C**

Les granulats recyclés ont une grande absorption, ce qui peut affecter aussi le rapport E/C effectif, puisqu'un granulats recyclé non saturé peut absorber l'eau lors du malaxage [32]. Ainsi, moins d'eau libre est présente dans le mélange pour lubrifier les composantes. Le rapport E/C effectif se voit donc diminué, ce qui cause, par le fait même, une perte d'affaissement. Il est cependant possible d'atteindre le même affaissement si on ajoute l'eau nécessaire pour remplir la porosité du granulats recyclé [33].

▪ **Masse volumique**

La masse volumique à l'état frais est plus faible pour un béton recyclé. Cela est dû au fait que les granulats recyclés sont composés en partie de mortier résiduel. La densité du mortier résiduelle est plus faible que la densité du granulats naturel, ce qui cause une perte de masse volumique du béton recyclé [34].

▪ **Teneur en air**

Selon certaines études, la teneur en air ne semble pas être affectée par l'utilisation de granulats recyclés [33, 35].

III.6 Facteurs influençant les propriétés mécaniques du béton à GBR [36]

▪ **Rapport E/C**

Le rapport E/C est un facteur de formulation très important pour les bétons en général. Une grande corrélation existe entre le rapport E/C et la résistance finale du béton. Le remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés semble avoir un impact négatif plus important lorsque le rapport E/C est plus faible. Il est recommandé d'utiliser des granulats recyclés dans les bétons à résistance moyenne (20 à 40MPa) puisque l'obtention de résistances plus élevées nécessite un apport en ciment plus grand, donc des coûts plus élevés. Une étude [35] démontre que la résistance à la compression à 28 jours est la même pour un béton recyclé que pour le béton témoin pour un rapport E/C de 0,7.

D'autres études utilisant un rapport E/C plus bas que 0,7 observe une baisse des résistances de 10% [37, 38].

▪ **Qualité et teneur en mortier**

La qualité du mortier résiduel attaché sur le granulats recyclé a un impact important sur la résistance finale du béton. L'impact du mortier résiduel sur la résistance à la compression vient du fait que la qualité de ce mortier contrôle la dureté de la vieille interface granulats-pâte. Dans le cas des bétons ayant un rapport E/C faible, plus dureté de la vieille interface augmente, plus la résistance à la compression du béton augmente [28]. Ceci est causé par le fait que la vieille interface est plus faible que la nouvelle interface formée entre le granulats recyclé et le mortier, c'est donc la vieille interface qui contrôle la résistance. Plus le rapport E/C augmente, plus l'impact de la qualité du mortier

résiduel diminue. Effectivement, dans le cas d'un rapport E/C plus grand, la nouvelle interface devient plus faible que la vieille et contrôle donc la résistance.

▪ **Granulométrie du granulat de béton recyclé**

Une étude a démontré que la résistance du béton diminue de 10 à 35% selon la grosseur des granulats utilisés. Plus la taille maximale des granulats est petite, plus grande est la diminution de la résistance [10]. Ainsi, il peut être nécessaire de diminuer le rapport E/C pour maintenir la même résistance à la compression.

▪ **Teneur en eau du granulat de béton recyclé**

La grande absorption du granulat de béton recyclé lui permet d'absorber une grande quantité d'eau de gâchage s'il n'est pas humidifié ou saturé au préalable. Dans ce cas, il est important de doser l'eau de gâchage en conséquence, en prenant en compte à la fois le taux d'humidité des granulats recyclés ainsi que leur taux d'absorption. Si ces mesures ne sont pas prises en compte, il y aura des effets importants sur le rapport E/C et donc, sur les propriétés mécaniques finales du béton.

▪ **Utilisation d'ajouts cimentaires**

Les ajouts cimentaires sont des sous-produits de différentes industries qui sont utilisés en remplacement ou en ajout du ciment. Ils permettent entre autres à améliorer certaines propriétés du béton. Dans cette section, l'impact des cendres volantes et de la fumée de silice est présenté.

L'utilisation de cendre volante permet, dans certains cas, de diminuer l'effet négatif de l'utilisation des granulats de béton recyclé sur les propriétés mécaniques et la durabilité. Par exemple, un remplacement massique de 25% du ciment par des cendres volantes permet d'obtenir une meilleure résistance à la pénétration des ions de chlore et de diminuer la perméabilité du béton, ce qui améliore sa durabilité[39]. Selon les études réalisées [40], les cendres volantes permettraient aussi de diminuer le retrait de séchage dans les bétons recyclés.

L'ajout de 8% de fumée de silice dans le mélange cimentaire permet d'améliorer les résistances en compression et en traction du béton recyclé. De plus, l'ajout de fumée de silice permet d'obtenir une interface pâte-granulat plus dense et de remplir les pores et les fissures du granulat de béton recyclé [41]. Ceci cause donc une amélioration de la résistance en compression et une meilleure durabilité.

▪ **Taux de remplacement**

Le taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés a un impact important sur les propriétés des bétons recyclés. Plus le taux de remplacement augmente, plus les effets négatifs sur les propriétés seront importants. Il semble exister un taux de remplacement pour lequel peu d'impact négatif est notable. Cette valeur n'est pas exacte, puisqu'elle varie selon les études et en fonction des propriétés étudiées. Les valeurs de remplacement proposé dans la littérature se situent généralement entre 20 et 50% [8, 42].

III.7 Impact des GBR sur les propriétés mécaniques[36]

▪ Résistance à la compression

La résistance à la compression est un paramètre fondamental pour évaluer la qualité d'un béton. L'impact du remplacement du granulat naturel par un granulat de béton recyclé sur la résistance à la compression est, comme pour la majorité des propriétés du béton, fonction du taux de remplacement.

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 recyclés est généralement moindre. La présence du mortier collé aux granulats et qui possède une dureté beaucoup plus faible que le granulat naturel, affecte davantage cette dureté donc sa qualification [43]. Néanmoins, la résistance du béton ne soit pas seulement due à la résistance mécanique des granulats, mais aussi, à un certain degré, à leur absorption et à leurs caractéristiques de liaison.

Les bétons à GBR peuvent rivaliser les bétons conventionnels s'ils sont riches en gravier que de vieux mortier[44].

Avec des moyens techniques spécifiques lors de la préparation du béton, une teneur en ciment accrue (d'environ 10%) et un rapport E/C réduit, des bétons de résistance comparable à celle du béton de granulats naturels peuvent être atteints. Un béton préparé avec 50% de granulats recyclés humides et $E/C = 0,55$ donne la même résistance en compression qu'un béton conventionnel[45].

Les résistances mécaniques des bétons réalisés avec des ajouts limités de granulats recyclés de déchets de béton (10% pour les sables et 30% pour les gravillons) peuvent être équivalentes à celles des bétons de granulats naturels[46].

Généralement, pour une formulation traditionnelle de béton et un taux de remplacement de 100%, une diminution de la résistance est observable. Certaines études ont démontré qu'il y avait une diminution de 10% [37, 38], alors que d'autres ont démontré que cette diminution se situait plutôt entre 20 et 25% [42]. Ces différents résultats expliquent probablement que le taux de remplacement n'est qu'un des multiples facteurs affectant la résistance à la compression des bétons recyclés.

▪ Résistance à la flexion

La résistance à la flexion ne semble pas être réellement influencée par le taux de remplacement [8]. En effet, une variation minime de la résistance à la flexion est observée pour un béton témoin et un béton recyclé avec un taux de 100%. Selon une autre étude, il y aurait plutôt une diminution de 10% suite au remplacement du granulat naturel dans un béton ayant un rapport E/C de 0,5[37].

III.8 Impact des GBR sur les propriétés liées à la durabilité [36]

▪ Retrait

Le retrait du béton est essentiellement dû à l'évaporation de l'eau libre contenue dans le béton et par l'hydratation de ses constituants dans le temps. C'est une mesure du changement volumétrique du

béton. La contraction du béton qui est observé lors du séchage est appelée retrait de séchage et ce changement peut causer de la fissuration. Ainsi, le retrait de séchage représente un aspect important de la durabilité du béton.

De manière générale, le retrait de séchage augmente avec le taux de remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé [29, 33, 35]. Le retrait le plus important est observé au jeune âge et il est d'autant plus important lorsque le taux de remplacement est supérieur à 50% [33]. Les facteurs responsables du plus grand retrait observé lors de l'utilisation de granulats recyclés sont la présence de mortier résiduel et l'eau de gâchage supplémentaire ajoutée pour combler la porosité des granulats [29]. La déformation du béton peut aussi être influencée par l'absorption des granulats, l'utilisation de granulats recyclés causera donc un plus grand retrait.

▪ Porosité

Le volume de pores et l'interconnexion de ceux-ci ont un impact assez important sur la durabilité du béton. Les bétons faiblement poreux sont en général plus durables puisque leur faible perméabilité retarde entre autres la pénétration de l'eau et d'autres agents potentiellement agressifs [47].

Certains auteurs affirment que le volume de pores augmente en fonction du taux de remplacement, puisque les granulats de béton recyclé sont, à la base, plus poreux que les granulats naturels [8]. Cependant, une étude plus récente réalisée par [42] a démontrée des résultats inverses. Dans cette étude, les bétons recyclés ont une porosité semblable au béton conventionnel à 28 jours. La porosité du béton recyclé aurait même tendance à diminuer au-dessous de celle du béton à granulat naturel dans le temps [40].

▪ Perméabilité

La perméabilité du béton est grandement influencée par le volume des pores présents dans la matrice et elle détermine la facilité avec laquelle un liquide s'écoule dans le béton. La perméabilité a un impact important sur les propriétés liées à la durabilité du béton tel que la résistance aux cycles de gel-dégel et la résistance à la pénétration des ions de chlorures. En général, la perméabilité augmente avec le taux de remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé [8, 33, 48]. Cette augmentation est probablement causée par la grande absorption du granulat recyclé. Cependant, cette augmentation n'a pas été observée pour un taux de remplacement inférieur à 20% [48].

▪ Résistance aux cycles de gel-dégel

La résistance aux cycles de gel-dégel est une caractéristique importante pour la durabilité des bétons extérieurs dans un environnement nordique. Elle dépend entre autres de la porosité, de l'interconnexion des pores et de la perméabilité du béton. Cette propriété est étudiée en mesurant la perte de masse du béton à la suite d'un nombre de cycles de gel-dégel fixe.

La majorité des études rapportent que la résistance au gel-dégel des bétons de GBR est inférieure à celle des bétons courants [49, 50, 51] et qu'elle dépend notamment du degré de saturation en eau du

matériau [52]. D'autres chercheurs [53] montrent qu'en utilisant un entraîneur d'air, les bétons de GBR peuvent s'avérer aussi durables que les bétons de granulats naturels. Selon [54], la teneur en granulat recyclé ne semble pas nuire à la résistance au gel-dégel du béton.

IV. Valorisation des laitiers cristallisés comme granulats pour béton

IV.1 Elaboration du laitier

Les laitiers sidérurgiques sont des matières minérales artificielles issues de la fabrication de l'acier. L'acier peut être produit suivant deux filières d'élaboration : la filière fonte ou filière minerai de fer et la filière électrique. Les laitiers générés diffèrent suivant ces filières d'élaboration de l'acier.

La première filière de production de laitier est la filière «minerai de fer», filière traditionnelle de production de l'acier. Dans cette filière, l'acier est produit par la fabrication de fonte à partir de minerai de fer et de coke dans un haut-fourneau.

La deuxième filière de production de laitier est la filière électrique. L'acier est produit dans des fours à arc électrique alimentés par des ferrailles recyclées[55].

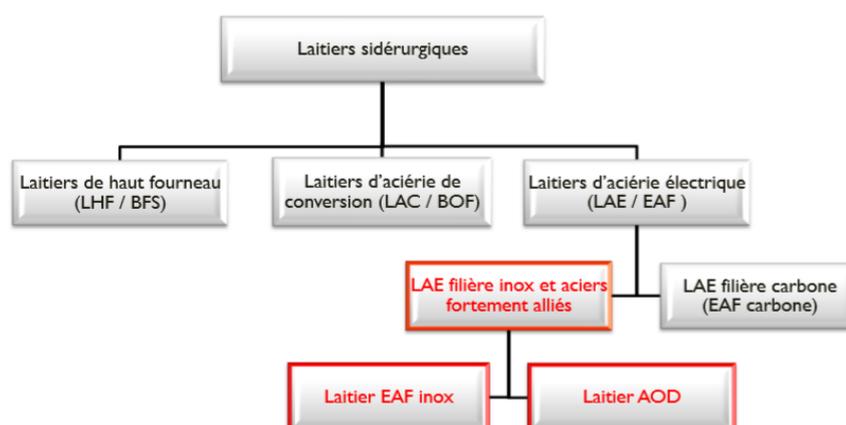


Figure II.8 : Différents types de laitiers sidérurgiques[55].

Dans le haut fourneau, en plus du minerai de fer et du coke, on introduit un fondant, généralement à base de chaux, pour abaisser le point de fusion de la gangue et permettre ainsi au minerai de s'extraire à une température de 1400 à 1500°C. Les oxydes de la charge non transformés en métal constituent le laitier. Le laitier est évacué du haut fourneau à l'état liquide, à la température de fusion de la gangue, surnageant la fonte par différence de densité [56].

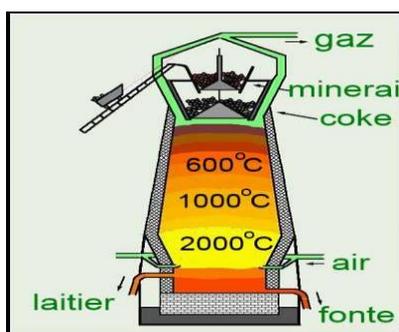


Figure II.9 : Laitier de haut fourneau[56].

Suivant le mode de refroidissement on distingue trois catégories de laitier [56] :

a) Le laitier cristallisé ou coulé en fosse

Ce laitier est refroidi lentement à l'air libre jusqu'à durcissement. Après extraction et concassage, il sera utilisé comme granulats. Ce laitier ne possède aucune propriété hydraulique et ne peut être employé en cimenterie comme adjuvant actif.

b) Le laitier vitrifié ou granulé

Le refroidissement brusque par un courant d'eau froide transforme le laitier liquide en un granulats fin d'où le nom de laitier granulé, qui sera utilisé comme ajout au liant hydraulique.

c) le laitier boulette

Une autre forme de production a été développée et consiste en un bouletage du laitier, qui donne d'une part un granulats léger et d'autre part sable 0-3mm pouvant être utilisé dans la fabrication des liants hydrauliques.



Figure II.10: Laitier cristallisé et laitier vitrifié granulé de haut fourneau [56].

IV.2 Laitier cristallisé[56]

Selon le produit et surtout la structure qu'on désire obtenir à partir du laitier fondu, on utilise le procédé de refroidissement correspondant. Un refroidissement lent entraîne la cristallisation du laitier. On obtient un matériau solide sous forme de gros granulats, après concassage et classification par fractions granulaires. Le matériau constitue un granulats pour la construction routière et pour la

confection des bétons. Le laitier en fusion séparé de la fonte coule dans une rigole vers la fosse où il va se refroidir naturellement et se solidifier en cristallisant d'où son nom de laitier cristallisé.



Figure II.11: Laitier en fusion coulé dans une fosse[57].

Après solidification de la surface, on active le refroidissement avec un arrosage qui accélère la progression du front de solidification et fragmente par choc thermique le laitier qui vient de se solidifier. Le laitier refroidi est repris ensuite à la pelle mécanique de la même manière qu'en carrière. Le laitier cristallisé résultant d'un refroidissement lent est une roche artificielle.

IV.3 Caractéristiques du laitier cristallin

▪ Composition chimique et minéralogique[58]

La composition chimique du laitier varie suivant le rapport pondéral de chargement du haut fourneau en minerai, coke et fondant en général. Cette composition chimique est susceptible de se changer au cours des années selon le type du minéral, avec l'épuisement des sources.

Le tableau suivant présente la variation de la teneur des oxydes majeurs et mineurs dans le laitier suivant ses types.

Tableau II.7 : Composition chimique des plusieurs types des laitiers de haut fourneau[56].

Constituants (%)	Laitier Français	Laitier Nord Américain	Laitier Algérien
SiO ₂	29 à 36	33 à 42	40,07
Al ₂ O ₃	13 à 19	10 à 16	6
CaO	40 à 43	36 à 45	42,15
Fe ₂ O ₃	< 4	0,3 à 20	2,03
MgO	< 6	3 à 12	4,68
S	< 1,5	-	0,15
TiO ₂	-	-	2,64
MnO	-	-	1,07
K ₂ O	-	-	1,07

▪ Masse volumique

-Masse volumique absolue: Elle varie habituellement entre 2,85 et 3,05g/cm³ et reste très voisine de 3,0g/cm³.

-Masse volumique apparente: La masse volumique apparente du laitier cristallisé varie suivant la coulée et les conditions de refroidissement, les valeurs les plus courantes étant comprises entre 1,20 et 1,40g/cm³.

-Masse volumique apparente du grain: Elle dépend des conditions de refroidissement et surtout de la porosité interne du grain, et varie habituellement de 2,65 à 2,90g/cm³[55].

▪ Densité

La densité relative du granulat de laitier est plus grande que celle du granulat naturel [59,60]. La littérature à ce sujet indique que la densité relative des laitiers cristallins se situe généralement entre 3 et 4 alors que les granulats naturels ont généralement une densité de l'ordre de 2,75.

▪ Porosité et état de surface

La plupart des laitiers cristallins possèdent une porosité élevée ainsi qu'un état de surface rugueux[58]. Le fait que les laitiers soient plus poreux que les granulats naturels influe sur son absorption. L'état de surface rugueux des laitiers va, quant à lui, influencer la zone de transition pâte-granulat au sein du béton. Cet état de surface poreux et rugueux est observable dans les trois photos suivantes :



Figure II.12: Laitiers cristallin d'aciérie électrique ayant une structure poreuse et rugueuse[61].

▪ Absorption d'eau

Dans les études caractérisant les laitiers cristallins, l'absorption est bien souvent relevée afin d'appréhender la rhéologie du béton. Celle-ci est généralement supérieure à celle des granulats naturels de l'étude servant à faire un béton de référence[62, 63]. Les valeurs d'absorption des laitiers cristallins se situent généralement entre 1 et 5% alors que pour un granulat naturel celles-ci sont souvent en deçà de 1% [55]. Cependant, cette caractéristique n'est pas généralisable, car il arrive que certains laitiers cristallins possèdent une absorption inférieure à celle des granulats naturels [65]. L'absorption des laitiers diffère bien souvent selon les fonderies, selon le procédé de fabrication (hauts fourneaux, à arc électrique, etc.), mais aussi selon le broyage. Ainsi, en réceptionnant un nouveau laitier, il est toujours bénéfique de caractériser son taux d'absorption.

Cette propriété est particulièrement importante puisqu'elle affecte la quantité d'eau à ajouter au mélange pour une maniabilité donnée. Comme l'absorption du laitier cristallin est souvent plus grande que celle du granulats naturels, la quantité d'eau que celui-ci contient à l'état saturé est supérieure. Une correction de la quantité d'eau ajoutée au mélange est donc nécessaire pour maintenir le même rapport Eau/Ciment[66].

Tableau II.8 : Propriétés physiques de deux types de granulats [66].

Propriétés	Laitiers de fours à arc	Cranulats calcaire
Densité	3,3	3,3
Absorption	2,5	0,75
Résistance à l'abrasion par fragmentation (Los Angeles)	13,9	24,1

▪ **Résistance à l'abrasion, à l'usure et aux chocs**

Selon les résultats de [62], il s'avère que les laitiers cristallins possèdent en général une très bonne résistance à l'abrasion. Celle-ci est bien souvent meilleure que celle des granulats naturels de type calcaire. Une des raisons de cette meilleure résistance à l'abrasion peut provenir de la densité des laitiers cristallins, plus importante que celle des granulats naturels.

Leurs valeurs de résistance à l'abrasion se situent généralement en dessous de 20%, alors que pour un granulats naturels, celles-ci sont souvent aux alentours de 20%.

▪ **Risque d'expansion**

La teneur élevée en chaux libre (CaO) et en périclase (MgO) des laitiers cristallins limite parfois leur utilisation en tant que granulats. En effet, on craint, une fois le béton durci, leur hydratation, engendrant une expansion et donc un risque de fissuration. La chaux libre s'hydrate rapidement et provoque une dilatation volumétrique brusque alors que la périclase s'hydrate plus lentement, donnant lieu à une expansion étalée dans le temps[63].

Néanmoins, plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour s'affranchir du risque d'expansion volumique:

- Le vieillissement à l'air libre du matériau : le surnageant est étalé à l'air libre et s'hydrate sous l'effet de la pluie ou par une humidification artificielle. Cette méthode exige des superficies considérables de stockage notamment.
- Le vieillissement accéléré dans des autoclaves. Cette méthode exige des quantités d'énergies non négligeables, mais elle est utilisée dans des pays pauvres en matériaux naturels. Les Pays-Bas incorporent une grande quantité de laitiers sous forme cimentaire et granulaire dans leur béton et utilisent cette méthode.

Aujourd'hui, diverses normes assimilent la teneur en chaux et en périclase au risque d'expansion. Par exemple, la norme française NF-P 18-302 recommande pour une utilisation saine sous forme granulaire que le taux de chaux et de périclase soit inférieur à 44%.



Figure II.13: Procédé ACERITA, vieillissement naturel du laitier (Brésil) [66].

IV.4 Impact des granulats de laitier cristallisé sur le béton

Plusieurs propriétés du béton sont affectées par le remplacement du granulats naturels par des scories artificielles (laitier cristallin). En effet, les études effectuées sur les propriétés des bétons fabriqués à base de laitiers cristallins comme gros granulats et/ou granulats fins varient considérablement, en fonction des variables évaluées, de la formulation des mélanges, du type de liant utilisé et du type de laitier.

D'après [57, 60], les facteurs affectant les propriétés du béton de laitier sont notamment : le type de ciment, la source des laitiers, le taux de remplacement du granulats naturels par le laitier cristallin, le rapport Eau/Ciment, la présence d'ajouts cimentaires et l'humidité des granulats.

IV.4.1 Impact sur les propriétés à l'état frais

▪ Affaissement [61]

Il apparaît généralement que, pour un même rapport E/C (masse d'eau efficace divisée par la masse de ciment), l'utilisation des laitiers cristallins diminue l'affaissement du béton, comparativement à un béton contenant un granulats naturels. Cette baisse de l'affaissement semble être due aux caractéristiques intrinsèques des laitiers : leur capacité d'absorption et leur état de surface rugueux créent plus de friction interne que celle observée dans les bétons conventionnels. Puisque les granulats non saturés peuvent absorber l'eau du mélange lors du malaxage, les granulats de laitier affectent la maniabilité ainsi que le rapport E/C effectif des bétons.

Il reste donc moins d'eau libre pouvant servir à lubrifier les composants du béton, diminuant par le fait même son affaissement. Pour un remplacement élevé, les laitiers ont donc un impact négatif sur la rhéologie du béton, surtout si le remplacement des granulats concerne aussi la partie fine (<5 mm), [52] recommande dans la partie fine, de conserver au moins 50% de granulats naturels.

pour ne pas avoir une perte trop importante de maniabilité. Pour obtenir l'affaissement désiré, des corrections sur le volume d'eau apporté selon le taux d'humidité des granulats doivent être mises en place. C'est d'ailleurs ce qui est fait aussi dans le cas de granulats naturels.

▪ **Teneur en air**

La teneur en air entraînée ne semble pas différer de façon significative par rapport à un béton conventionnel [52]. Par contre, les laitiers cristallins peuvent développer une non-compatibilité avec certains adjuvants entraîneurs d'air. Dans ce cas-là, il est certes possible d'obtenir une bonne teneur en air, mais celle-ci sera répartie sous forme de grosses bulles [63].

▪ **Densité**

La densité à l'état frais d'un béton avec laitiers cristallins est plus élevée (de l'ordre de 20% pour un même mélange), tel qu'illustré dans le tableau II.9. Cela est probablement dû à la plus grande masse volumique des granulats de laitier. La densité élevée d'un béton est une caractéristique avantageuse pour de nombreuses applications (telles que les constructions routières, les travaux de terrassement, fondations, murs d'étaisements, ouvrages de protection contre les radiations, etc.). Il faut néanmoins prendre particulièrement soin de l'élaboration d'un tel béton pour éviter la ségrégation des granulats de laitiers très denses [59].

Tableau II.9 : Densité à l'état frais de différents mélanges avec laitiers cristallins [59],

Béton	Mélange conventionnel	30MPa	50MPa	70MPa	70MPa avec cendre volantes	70MPa avec fumée de silice
Densité à l'état frais	Entre 2,3 et 2,4	2,79	2,75	2,78	2,81	2,79

▪ **Zone de transition à l'interface granulat/pâte**

Dans le cas d'une utilisation de laitiers cristallins dans le béton, l'interface pâte-granulat est excellente [67]. En effet, la rugosité et porosité des laitiers développe un lien d'une grande résistance entre les gros granulats et la matrice de mortier. Pour un béton à hautes performances composé de laitiers, celle-ci traverse en effet les granulats de laitiers et ne suit plus la zone de transition comme pour un béton usuel [61].

Ainsi, la texture de surface des granulats de laitier joue un rôle majeur dans les propriétés mécaniques de la zone de transition et permet la fabrication de bétons à hautes résistances, tout comme de bons granulats naturels.

IV.4.2 Impact sur les propriétés à l'état durci

IV.4.2.1 Facteurs influençant les propriétés mécaniques [65]

▪ Le rapport Eau/Ciment (E/C)

Le rapport E/C est un des facteurs de formulation les plus importants pour les bétons en général. Il existe une grande corrélation entre le rapport E/C et la résistance finale du béton. Il est aussi intéressant de noter que pour un rapport E/C constant et lorsque le laitier cristallin n'est pas pré-saturé lors de la formulation, il est possible que leur plus grande absorption diminue le rapport E/C effectif et améliore donc les propriétés mécaniques du béton réalisé.

De plus, l'absorption élevée de certains laitiers leur confère une utilité pertinente pour la fabrication de bétons à hautes performances. En effet, ces granulats auront la capacité de relâcher dans la pâte cimentaire une partie de leur eau absorbée pendant la durée de la prise, limitant ainsi le retrait endogène particulièrement élevé pour un faible rapport E/C[59].

▪ Impact de l'utilisation des ajouts cimentaires

Les ajouts cimentaires sont des sous-produits de différentes industries qui sont utilisés en supplément ou en remplacement partiel du ciment. Trois types d'ajouts cimentaires dans les bétons avec granulats de laitier sont couramment utilisés. Il s'agit des cendres volantes, des laitiers et de la fumée de silice.

1-Cendres volantes

Le remplacement d'une fraction du ciment par des cendres volantes de chaudières à charbon cause une diminution des propriétés mécaniques à 28 jours (résistances en compression, flexion et traction). Cependant, l'effet pouzzolanique des cendres volantes permet un gain de résistance très intéressant de 28 à 90 jours [62, 67].

2- Laitiers

Le laitier refroidi brutalement et broyé entre 400 et 500m²/kg acquiert des propriétés hydrauliques intéressantes lors de sa vitrification. La majorité des éléments tels que Ca, Mg, Si et Al se retrouvent sous forme non cristalline. Il est alors intéressant de pouvoir réaliser un béton «tout laitier» en remplaçant partiellement ou totalement les granulats naturels par des laitiers cristallins (gros granulat et sable) et en ajoutant au ciment un pourcentage de laitier vitrifié possédant un effet pouzzolanique[68].

De plus, son hydratation est plus rapide que les cendres volantes, son effet pouzzolanique se fait sentir au bout de 7 jours seulement contre, rappelons-le, 28 jours pour les cendres volantes. Ainsi, en incorporant du laitier de haut fourneau sous forme cimentaire, on n'apercevra pas une baisse de résistance à 28 jours. Enfin, le laitier reste l'ajout cimentaire le plus efficace contre la pénétration des ions chlore du béton lorsqu'il est incorporé dans une proportion assez élevée (plus de 50% en général).

3-Fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium. Elle se présente sous forme de très fines particules sphériques d'un diamètre moyen de $0,1\mu\text{m}$ ayant une surface spécifique atteignant 15000 à $30000\text{m}^2/\text{kg}$. Ainsi, l'ajout de 8 à 12% de fumée de silice au mélange est bénéfique pour la résistance en compression et en traction du béton, qu'il ait des granulats conventionnels ou non.

De plus, la très grande finesse de la fumée de silice qui garantit un effet filler qui permet au béton d'obtenir d'excellentes propriétés de durabilité.

▪ Taux de remplacement

Les chercheurs sont tous d'accord sur le fait que le taux de remplacement du granulat naturel par un laitier cristallin a un effet sur les propriétés du béton, que ce soit à l'état frais ou durci. Ceci dit, les laitiers cristallins n'ont pas d'impact négatif considérable sur le béton. Ils possèdent seulement certaines caractéristiques affectant négativement la rhéologie du béton (porosité relativement élevée, particules anguleuses et rugueuses) et constituent parfois un danger d'expansion, toutefois limité. Ainsi, le remplacement total de la fraction grossière des granulats ne pose pas de problème et confère au béton des propriétés mécaniques et de durabilité aussi bonnes que celles d'un béton conventionnel, voire même meilleures [69, 70]. C'est pourquoi les laitiers cristallins sont actuellement utilisés en tant que granulat de béton dans de nombreux pays [71].

Cependant, même si le remplacement total des gros granulats donne des résultats très encourageants, ceci n'est pas toujours le cas pour le remplacement de la partie fine des granulats. Un remplacement total des granulats (partie fine et grossière) donne parfois des résultats modestes et des propriétés mécaniques moins performantes que pour un béton conventionnel. Ceci peut être expliqué par :

- une forte demande d'eau supplémentaire, car le laitier broyé finement possède une absorption beaucoup plus élevée [67];
- l'incorporation de fines de laitiers ne possédant pas forcément des propriétés mécaniques identiques [71];
- l'obtention d'une matrice cimentaire moins cohésive: l'adhérence entre le granulat de laitier et la matrice cimentaire (pâte et laitier cristallisé sous forme de fines) semble alors être plus faible et peut faire perdre 7% de résistance mécanique en compression par rapport à un béton conventionnel [54].

Les fines de laitier ne semblent donc pas convenir aux exigences granulaires dans un béton de ciment pour un taux de remplacement élevé [72].

IV.4.3 Propriétés à l'état durci

▪ Résistance à la compression

La résistance en compression est la propriété la plus étudiée dans le cas des bétons incorporant des laitiers cristallins en tant que granulat. L'impact du remplacement du granulat naturel par un laitier cristallin sur la résistance en compression du béton est, comme pour les autres propriétés du béton, fonction du taux de remplacement.

Comme décrit dans les parties précédentes, le remplacement total de la partie grossière des granulats naturels par des laitiers cristallins améliore la zone de transition pâte-granulats. La rugosité de l'état de surface et la porosité des granulats de laitier est responsable d'une interface souvent de très bonne qualité entre les granulats et la pâte cimentaire [63].

Ainsi, tous les auteurs s'accordent sur le fait que des bétons fabriqués avec des granulats grossiers de laitier donnent des résistances en compression au moins égales à celles des bétons conventionnels et même souvent meilleures [57, 69, 73]. Le tableau suivant donne un exemple adéquat de ce phénomène.

Tableau II.10 : Résistance en compression et en flexion à 28 jours [73].

Bétons	Résistance en Compression (MPa)	Résistance flexion (MPa)
Béton témoin	45,4	9,3
Béton au laitier	59,6	9,5
Béton conventionnel avec 10% de fines de caoutchouc	42,8	6,2
Béton de laitier avec 10% de fines de caoutchouc	51,5	6,7

Cependant, comme mentionné plus haut, le remplacement total de la partie fine des granulats par des laitiers a un effet négatif sur la résistance en compression, qui peut causer jusqu'à 7% de perte par rapport à un mélange traditionnel [73].

▪ Résistance à la traction

Bien que les bétons ne soient généralement pas conçus pour résister à la traction directe, connaître la résistance en traction permet d'estimer la charge à partir de laquelle la fissuration se développe. On mesure celle-ci par l'essai de résistance à la traction indirecte aussi appelée «essai brésilien» ou «par fendage». Un béton à hautes performances composé de laitiers d'aciérie électrique semble fragile en traction. L'amélioration de la résistance en compression n'est donc pas forcément liée à une augmentation de la résistance en traction. En effet, un béton de 70MPa en compression n'a donné que 2,9MPa de résistance en traction, soit un rapport Résistance en traction/Résistance en compression de 4,15%.

Tableau II.11: Résultats de la résistance en traction d'un béton composé de laitiers à 28 jours [59].

Bétons	30MPa	50MPa	70MPa	70MPa avec cendres volantes	70MPa avec fumée de silice
Résistance en traction (MPa)	2,9	3,5	4,4	3,1	2,9
Ratio traction/compression (%)	4,4	4,4	4,3	3,5	2,3

▪ **Module d'élasticité**

Le module d'élasticité ou module de Young est normalement représenté par la pente de la section linéaire de la courbe contrainte/déformation. Les facteurs les plus importants affectant le module d'élasticité sont le rapport E/C, la nature des gros granulats et la teneur en air entraîné. La plupart des études effectuées sur ce sujet rapportent que le module d'élasticité est semblable ou meilleur pour des bétons contenant des granulats de laitier par rapport à des bétons conventionnels [59].

▪ **Densité**

La densité d'un béton fabriqué à base de granulats de laitier est, généralement, plus élevée que celle d'un béton conventionnel, et ce même à l'état durci. La masse volumique à l'état durci d'un béton de laitier varie souvent entre 2600 et 2800kg/m³ alors que celle d'un béton conventionnel, bien plus faible, est comprise entre 2300 et 2400 kg/m³[59].

IV.4.4 Impact sur les propriétés liées à la durabilité

Lorsqu'on fabrique un béton, on parle souvent de résistance mécanique en compression, traction et flexion. Mais, ces propriétés mécaniques, bien qu'elles soient très importantes pour la conception même d'un ouvrage ou d'une structure ne sont pas forcément les seules à entrer en jeu. Même si un béton possède une excellente résistance mécanique, sa durabilité dans le temps n'est pas toujours prouvée. Il est donc toujours intéressant de caractériser la durabilité d'un béton placé dans son environnement [74, 75].

Par définition, la durabilité du béton est liée à sa capacité de résister aux attaques physiques et chimiques perpétuées par son environnement [76].

▪ **Perméabilité du béton à l'eau**

La perméabilité du béton se définit comme la propriété qui gouverne l'écoulement d'un fluide dans le solide poreux qu'est le béton. Un béton contenant des granulats de laitier possède en général une faible perméabilité à l'eau en comparaison d'un béton conventionnel de même rapport E/C. Cela est notamment dû à l'excellente zone de transition dans le béton de laitier lui conférant une densité matricielle importante. Ainsi, de par cette imperméabilité, un béton fabriqué avec des granulats de laitier possédera de bonnes caractéristiques de durabilité [59, 60].

▪ **Résistance aux cycles de gel/dégel**

Lorsque le béton est soumis au gel, une partie de son eau libre contenue dans ses pores ou ses granulats est susceptible d'occuper plus de volume. En effet, l'eau sous forme solide occupe un volume 9% supérieur que l'eau sous forme liquide.

Les granulats naturels peu poreux possèdent une faible absorption et vont donc contenir une quantité négligeable d'eau libre dans leurs pores. Néanmoins, cela est différent pour les granulats de laitier, plus poreux. Le gel peut provoquer des fissurations au sein du granulat si celui-ci ne possède pas des propriétés mécaniques suffisantes. Cependant, les études menées à ce sujet montrent que les bétons de laitier soumis à des cycles de gel-dégel possèdent des résistances aussi bonnes voire meilleures que celles des bétons conventionnels, prouvant ainsi la possibilité d'utilisation des laitiers cristallins en tant que granulats, et ce même dans les pays froids. D'ailleurs, même pour un remplacement de la partie fine granulaire à hauteur de 50% (le maximum possible sans problèmes importants de rhéologie), le béton de laitier donne des résistances supérieures à celles du béton de référence [68].

Selon l'étude réalisée par [63], le béton tout laitier (remplacement total de la partie fine et grossière des granulats par des laitiers) a donné les meilleurs résultats de résistance aux cycles de gel/dégel suivant l'essai de la norme ASTM C-666, par rapport aux bétons incorporant un taux moins important de granulats de laitier. L'excellent réseau d'air au sein de la matrice cimentaire a permis pour tous les bétons de ne pas subir de détériorations importantes et même de gagner en résistance en compression.

Tableau II.12 : Résistance en compression avant et après les cycles de gel/dégel pendant 25 jours pour six mélanges comportant un taux croissant de granulats de laitier [63].

Béton	Résistance en compression (MPa)		
	Après gel-dégel	Avant gel-dégel	Variation (%)
Conventionnel	50,1	44,6	+ 11,0
Laitier 25%	51,7	45,4	+ 12,2
Laitier 50%	50,4	44,0	+ 12,6
(remplacement de la partie fine seulement)			
Laitier 50%	49,6	45,2	+ 8,9
Laitier 75%	48,8	45,1	+ 7,6
Laitier 100%	50,5	41,4	+ 18,0

▪ **Lixiviation des métaux lourds**

L'augmentation de l'incorporation de sous-produits industriels au sein du béton peut causer des problèmes environnementaux à cause de la lixiviation des métaux lourds, surtout dans le cas de

dallage ou de pavage [62]. De plus, la possibilité de lixiviation de certains matériaux lourds du granulat vers la pâte cimentaire pendant la phase d'hydratation doit être prise en compte.

Pour cela, des bétons âgés d'au moins 28 jours sont broyés puis placés dans une cuve remplie d'eau distillée et d'acide nitrique. L'eau de lixiviation est ensuite récupérée et testée pour relever la teneur des métaux lourds principaux tels que le cuivre, le zinc, le nickel, le chrome, le cadmium et le plomb. Ces valeurs sont ensuite comparées aux données des normes exigées dans les pays.

Les résultats pour les bétons avec des laitiers cristallins sont toujours excellents. Ainsi, l'eau de lixiviation provenant d'un béton avec un grand volume de laitier cristallin peut être décrit comme déchet inactif (tableau II.13)[62, 63].

Tableau II.13 : Résultats du test de lixiviation pour des granulats de laitier [63].

Eléments	Concentration (mg/l)	Limites (mg/l)
Ni	<40	50
F	<1,5	1,5
S	<200	250
Cl	<75	100
B	0,0125	1
Cu	<0,001	0,05
Zn	<0,03	3
Be	<0,005	0,01
Co	<0,001	0,25
V	0,103	0,25
As	<0,02	0,05
Cd	<0,003	0,005
Cr	<0,002	0,05
Pb	<0,04	0,05
Hg	<0,001	0,001
pH	10,8	5,5-12,0

V. Valorisation des déchets de pneus usagés comme granulats pour béton

V.1 Elaboration de la poudrette de caoutchouc

A) Séparation :

Séparer la bande de roulement de la carcasse composée de feuille en caoutchouc synthétique (chambre à air), de toile de carcasse.

B) Laminage des parties 100% en caoutchouc :

Découpe les flancs de la carcasse et de la bande de roulement en bandelettes. La largeur de découpe est ajustable.

C) Prébroyage :

Broyer grossièrement les bandelettes de caoutchouc obtenues précédemment avec des dimensions prédéfinies.

D) Séparation caoutchouc - câbles d'acier:

Les parties non broyer précédemment sont pressées par une machine afin de séparer le caoutchouc des câbles d'acier qui les composent. Une fois cette opération effectuée, le caoutchouc est récupéré puis broyé.

E) Le granulateur :

C'est une machine pour la production de poudrette de caoutchouc. Elle broie selon la granulométrie prédéfinie tous les gros morceaux obtenus précédemment. Elle peut également traiter directement les bandelettes de caoutchouc, les morceaux, des semelles de chaussures[72].

V.2 Caractéristiques des granulats de caoutchouc

Les granulats en caoutchouc utilisés par [73], lors de ces travaux sont des broyages de pneus usagés et utilisés en remplacement volumique partiel du sable. Ces granulats dont la dimension du plus gros grain est la même que celle du sable, soit 0-4mm (voir figure II.14).



Figure II.14 : Granulats de caoutchouc[73].

Leur courbe granulométrique est présentée à la figure II.15 et celle du sable est rappelée sur la même figure pour faciliter la comparaison des deux distributions granulaires. Il est visible que les GC ont une répartition granulaire légèrement différente de celle du sable. On notera aussi que les GC, en comparaison du sable, ont une teneur en fine moins importante. Ce qui va jouer un rôle important vis-à-vis de l'affaissement et de la teneur en air occlus à l'état frais.

Enfin, signalons que la densité des GC est de 1,2 et donc très inférieure à celle des granulats naturels (sable) qui est de 2,67 et leur coefficient d'absorption d'eau est négligeable [74].

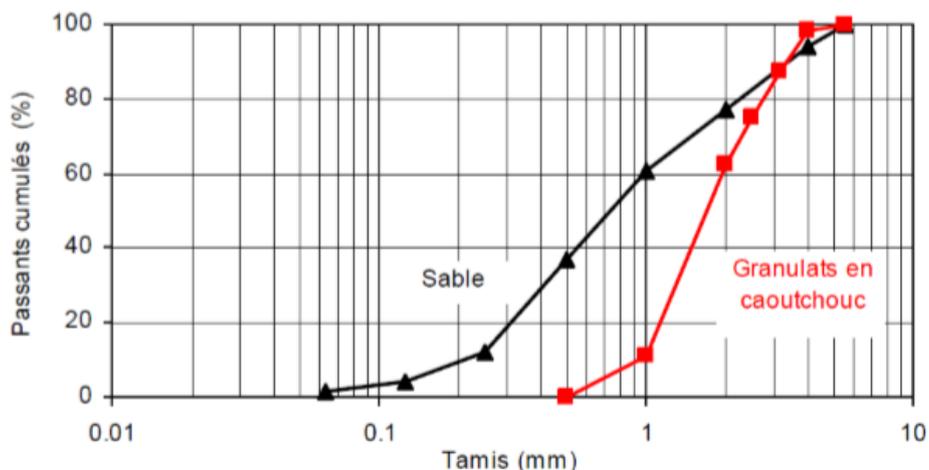


Figure II.15: Courbes granulométriques d'un GC de classe 0/4mm et d'un sable[74].

▪ Traitement de la surface des GC

De nombreux chercheurs pensent que le défaut d'adhérence entre le caoutchouc et pâte de ciment est une des raisons de la chute de résistance du béton incorporant ces granulats. Sous la charge extérieure, les premières microfissures apparaissent dans la zone de transition entre les GC et la pâte de ciment, une zone dont la résistance est beaucoup plus faible que celle des autres phases solides du composite. De la coalescence de ces microfissures, il résulte une microfissure qui cause la rupture du béton. Pour cette raison, certains auteurs étudient les possibilités d'améliorer l'adhérence entre ces deux matériaux (le caoutchouc et la pâte de ciment) qui sont très différents. Cependant, les résultats obtenus à ce jour sont peu convaincants[75].

Par exemple,[76] utilisent une solution alcaline (NaOH) pour traiter la surface de granulat en caoutchouc dans le but d'améliorer sa capacité d'attirer et de retenir l'eau. Les observations au microscope électrique ont permis de montrer une meilleure adhérence entre la pâte de ciment et les GC traités à la soude[77], tentent d'améliorer l'adhérence entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment en utilisant deux adjuvants: le polymère acétate de vinyle (PVA) et le silane. Les résultats montrent que les adjuvants PVA et silane augmente effectivement la résistance en compression du béton de caoutchouc et parmi eux, l'effet du PVA est plus favorable que celui du silane. Ces auteurs préconisent donc l'utilisation d'adjuvant convenable pour traiter la surface des particules de caoutchouc et améliorer ainsi la performance du béton incorporant des GC pour les applications en génie civil.

▪ Elasticité

L'élasticité se caractérise par la capacité d'un matériau à se déformer sous contrainte et à reprendre sa dimension initiale lorsque cesse la contrainte.

Exemples d'application: joints de portière d'automobile, flexibles, profilés pour portes et fenêtres, etc.

▪ **Etanchéité**

Le caoutchouc est ainsi imperméable à l'air, aux gaz et à l'eau. Il a également une grande capacité à filtrer le bruit[72].

Exemples d'application: tubes et tuyaux, pneumatiques, toiles enduites, revêtement de toiture, joints, etc.

▪ **Amortissement**

Le caoutchouc possède également la capacité d'amortir les chocs ou de filtrer les vibrations. Exemples d'application : pneumatique (amortissement des irrégularités de la route), pièces antivibratoires (filtration des vibrations en provenance du moteur ou des organes de liaison au sol...).

[72].

V.3 Impact des GC sur les propriétés des bétons à l'état frais[74]

Pour évaluer la rhéologie à l'état frais du béton, dans la pratique, on se base souvent sur des essais d'ouvrabilité dont le résultat est quantifié par l'affaissement ou par l'étalement dans le cas du béton auto-plaçant.

▪ **Affaissement**

[79] ont étudié des propriétés mécaniques des bétons de caoutchouc dont 0 à 20% de la masse du ciment est remplacée par la masse de fumée de silice (SF). La figure II.17 illustre l'évolution de l'affaissement en fonction du dosage en GC et du dosage X% de la fumée de silice. Ces auteurs observent que l'affaissement du béton adiminué avec l'augmentation de caoutchouc. Pour le dosage de 50% de GC, l'affaissement est presque nul.

L'étude réalisée par [80],a indiquée une conclusion un peu différente par rapport à d'autres auteurs. En effet, d'après cette étude le béton incorporant des GC a une maniabilité acceptable en termes de facilité de manipulation, de placement et de finition. Néanmoins, leurs résultats montrent que la procédure ordinaire pour évaluer l'affaissement n'est pas appropriée à ce composite cimentaire. Ils ont donc suggéré qu'il fallait chercher d'autres méthodes pour mesurer correctement l'affaissement du béton incorporant des granulats en caoutchouc.

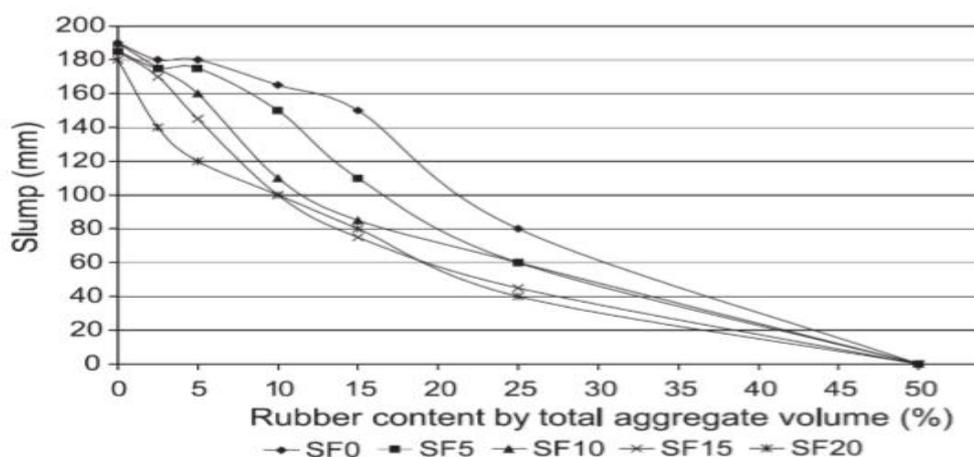


Figure II.16 : Influence des GC sur l'affaissement[79].

Pour ce qui concerne le béton auto-plaçant,[73] a montré dans sa thèse que l'adjonction de GC dans des bétons auto-plaçant (BAP) entraîne une modification des propriétés à l'état frais, la modification la plus remarquable étant la chute de l'étalement avec l'augmentation du taux d'incorporation. Il a conclu que l'augmentation du dosage en GC se fait au détriment de l'ensemble des paramètres rhéologiques considérés.

L'incorporation de ces granulats conduit à des mélanges plus visqueux et présentant des seuils de cisaillement plus importants.

▪ Masse volumique

La masse volumique d'un béton dépend de sa composition en particulier de la densité des granulats utilisés. Le béton incorporant des GC en substitution des granulats naturels a naturellement une masse volumique plus faible que celle du béton ordinaire. Avec l'incorporation de GC on peut envisager la production de bétons légers de structure [74].

[81] ont aussi indiqué que la masse volumique diminue approximativement de 102 kg/m³ pour chaque 22,7kg de GC ajouté, une tendance illustrée par la figure II.17.

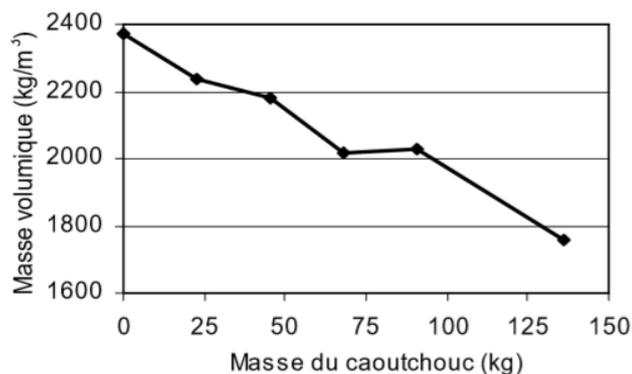


Figure II.17 : Variation de la masse volumique du béton incorporant des GC [81].

▪ **Teneur en air**

S'agissant de la teneur en air occlus, [82] ont noté qu'elle augmente avec le volume de caoutchouc. C'est ce qui est illustré par la figure II.18 où le groupe A correspond à un béton pour lequel le sable a été remplacé par des GC fins, le gravier a été remplacé par de gros GC dans le cas du groupe B tandis qu'ils ont substitué le sable et le gravier par des GC fins et gros dans le cas du groupe C. Ces auteurs ont observé que la teneur en air occlus du groupe B est inférieure à celle du groupe A lorsque le volume de caoutchouc dépasse 30% du volume total des granulats. Cette diminution peut être expliquée par la compacité plus élevée pour le groupe B à même volume de GC.

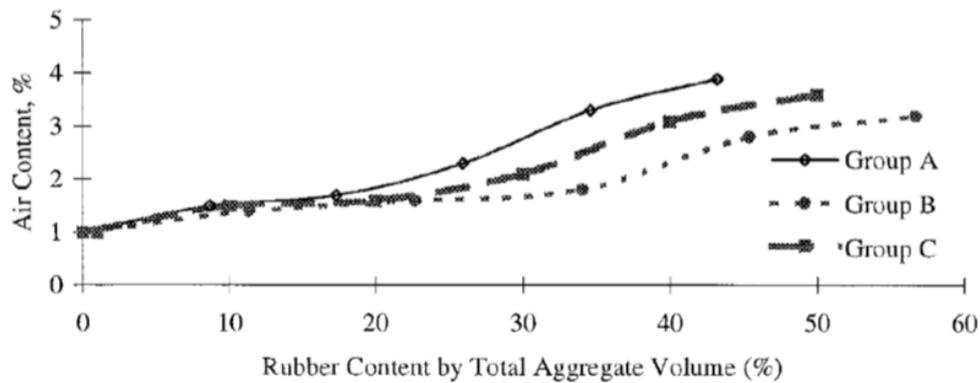


Figure II.18 : Influence du taux de caoutchouc sur le contenu d'air occlus [82].

V.4 Impact des GC sur les propriétés à l'état durci du béton [74]

▪ **Résistance à la compression**

La résistance en compression du béton dépend d'un grand nombre de paramètres : le type et dosage des matériaux utilisés, la nature des granulats, la porosité, la condition de réalisation et de cure, etc. Les chercheurs qui ont travaillé récemment sur les matériaux cimentaires incorporant des GC ont tous relevé que la substitution de granulats naturels par des GC entraînait inévitablement une chute de la résistance en compression.

L'examen des résultats obtenus par [73], lui a permis de préciser l'impact du dosage et de la taille des GC sur ce paramètre dans le cas de BAP. Ses résultats illustrés par la figure II.19 ont confirmé que la présence de GC est très préjudiciable vis-à-vis de la résistance en compression. Une chute jusqu'à 86% de la résistance est observée pour les composites les plus dosés en GC. Dans l'application visée, une résistance en compression minimale de l'ordre de 5MPa lui a imposé un taux maximal de substitution de 25%.

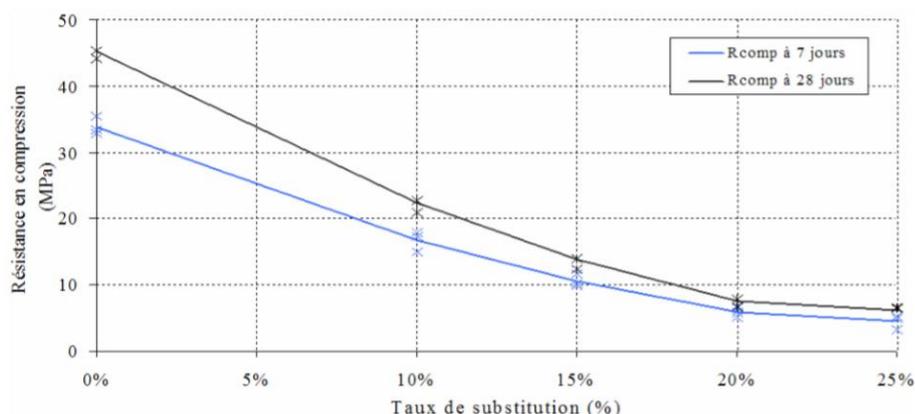


Figure II.19: Influence du dosage en GC sur la résistance en compression à 7 et 28 jours (BAP dont le sable 0-4mm remplacé par des GC 0-4mm)[73].

[42] ont confirmé qu'il y a une chute de la résistance en compression de 90% entre un béton de référence et un béton incorporant plus de 60% de GC. A partir de cette étude, dont les résultats sont illustrés à la figure II.20, les auteurs ont conseillé de ne pas dépasser un taux de substitution de 20% du volume total de la phase granulaire.

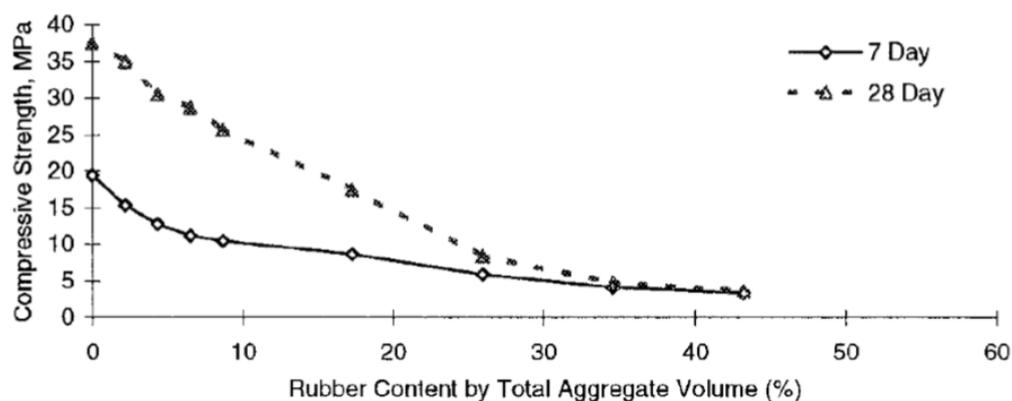


Figure II.20: Influence de l'adjonction de GC sur la résistance en compression[82].

▪ Résistance a la traction

Par rapport à la résistance à la compression, la résistance à la traction du béton est relativement faible mais on a parfois besoin de la connaître[81], ont montré que l'augmentation du contenu en GC dans le béton entraîne une réduction de la résistance à la traction par fendage. Les échantillons testés sont obtenus par sciage d'éprouvettes cylindriques de diamètre ($D=102\text{mm}$) perpendiculairement à la génératrice par tranche d'épaisseur (E) comprise entre 22 et 26mm. Leurs résultats ont été récapitulés dans le tableau II.14. Cependant, ils ont observé aussi un bénéfice de l'incorporation de GC : malgré la chute de la résistance en traction, la déformation à la rupture est augmentée. Cette capacité de déformation à la rupture montre que le béton incorporant des GC est plus ductile.

Tableau II.14: Résultats de la résistance par fendage des échantillons d'épaisseur (E) et de diamètre (D)[81].

Masse GC (kg/m ³)	Epaisseur E (mm)	Diamètre D (mm)	Résistance en traction (MPa)	Déformation à la rupture (%)
0	22	102	2,1	0,31
119	20	102	1,1	0,67
178	24	102	0,9	0,43
237	26	102	0,6	0,54

▪ **Module d'élasticité**

Au même titre que les résistances en compression et en traction, de nombreux travaux confirment que l'incorporation de GC induit une chute importante du module d'élasticité. Cela est par ailleurs prévisible compte tenu des relations empiriques existantes permettant d'estimer le module d'élasticité à partir de la résistance en compression.

Dans une étude récente réalisée par [84], les granulats en caoutchouc dont la dimension maximale est de 25mm remplacent 5 ; 7,5 et 10% en masse des gros granulats naturels. Les auteurs montrent à la figure II.21 une réduction de 30% du module d'élasticité lorsqu'on passe du béton de référence au béton incorporant 10% de GC.

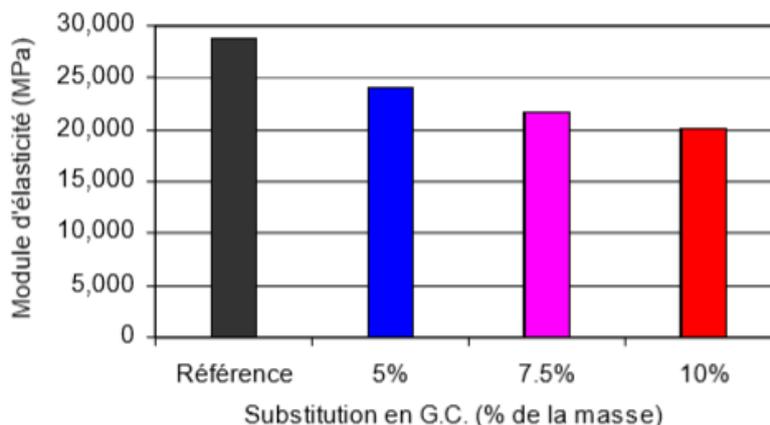


Figure II.21 : Influence des GC sur le module d'élasticité[84].

▪ **Capacité de déformation**

Si on se contente d'analyser les effets de l'incorporation des GC sur les seules résistances en compression et en traction, la conclusion est sans équivoque : cette incorporation est défavorable à la capacité portante et ne présente que des inconvénients.

Des études[85] ont présenté une autre facette des effets de l'adjonction des GC. Sachant que le module d'élasticité de ces inclusions est nettement plus faible que celui de la matrice cimentaire, ces

auteurs ont fait l'hypothèse que les granulats en caoutchouc se comportent comme des trous lorsqu'une fissure débouche à leur interface avec la matrice cimentaire. Dans ce cas il en résulterait une relaxation des contraintes, retardant la coalescence des microfissures et leur localisation en macrofissure. Cette hypothèse a été rapidement validée avec un support de mortier à base de ciment dans lequel le sable a été remplacé par des granulats en caoutchouc dans des proportions volumiques de 20 (M20) et 30% (M30). Les réponses de ces composites en traction directe sont illustrées par la figure suivante où les mortiers incorporant des GC sont comparés au mortier de référence M0 sur un diagramme force-allongement. Si on retrouve l'effet des GC sur le module d'élasticité (pente initiale plus faible) et sur la résistance en traction, on constate bien que l'on atteint des niveaux d'allongement nettement plus importants avant le domaine post-pic.

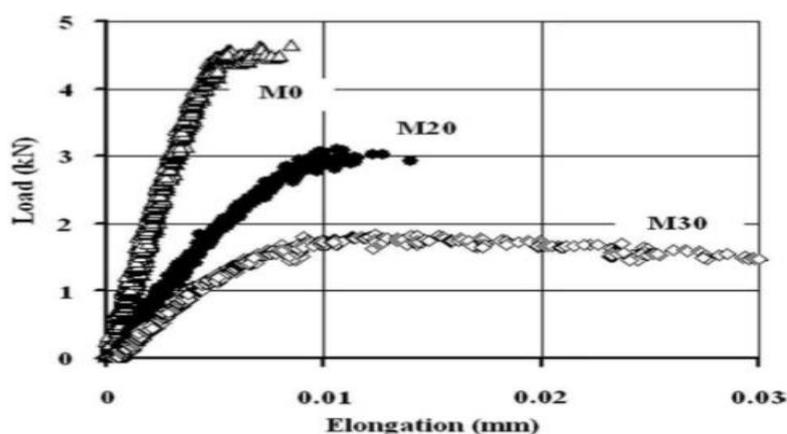


Figure II.22: Influence de l'incorporation de GC sur la capacité de déformation en traction directe [85].

▪ Amortissement des vibrations

Certains chercheurs considèrent que le béton incorporant des granulats en caoutchouc a un potentiel pour amortir des ondes. D'après [80], la vitesse de transfert des ondes à travers un matériau est le facteur le plus important de la mécanique vibratoire. Il observe que la présence des GC réduit significativement la vitesse des ondes ultrasoniques. En conséquence [80] en a déduit que ce composite a un potentiel pour amortir une vibration et qu'il peut en particulier servir d'isolant phonique. Avec une telle capacité d'amortissement d'ondes en général et plus particulièrement des vibrations mécaniques, il n'est pas superflu d'envisager l'utilisation de ce composite dans les applications comme les murs antibruit des artères routières, comme fondation de rails d'engins roulant ou d'assises de machines vibrantes, etc.

▪ Propriétés thermiques

La conductivité thermique du caoutchouc est relativement faible, elle est du même ordre que celle de la terre crue, soit 0,3 à 0,4 W/m.°C. Dans le travail de recherche, fait par [86] dont les résultats sont présentés ci-dessous (figure II.23), il a été montré que la conductivité thermique diminue avec

l'augmentation du dosage de granulats de caoutchouc. En effet, le caoutchouc représente une structure amorphe et sa conductivité thermique d'environ $0,4\text{W/m}^{\circ}\text{C}$, est faible par rapport à celle des granulats naturels qui représentent une structure cristalline et une conductivité thermique généralement supérieure à $1,5\text{W/m}^{\circ}\text{C}$.

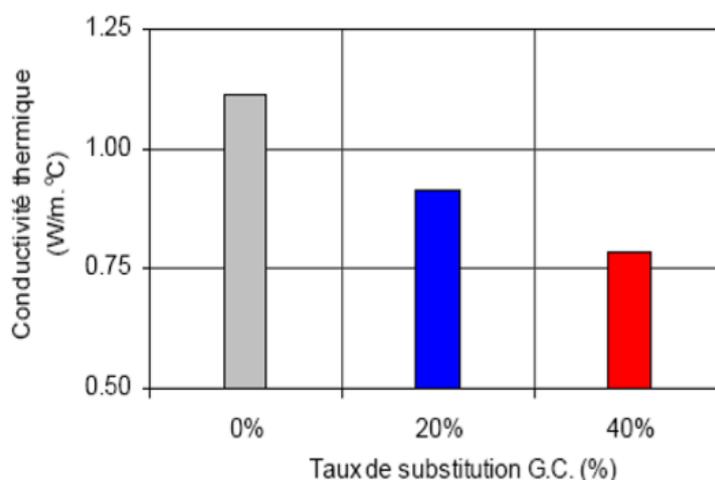


Figure II.23: Influence du dosage en granulats de caoutchouc sur la conductivité thermique [86].

Une autre étude [87] montre une diminution de l'ordre de 13,1%, 15,2%, 17% et 21,2% de la conductivité thermique des mortier incorporant 10%, 20%, 30% à 40% de poudre de caoutchouc (taille $\leq 0,6\text{cm}$), respectivement, remplaçant le même poids du sable naturel, et une réduction de l'ordre de 18,2%, 24,6%, 26% et 27,8% de la conductivité thermique.

La réduction de la conductivité thermique de la matrice caoutchoutée peut être attribuée en partie à l'augmentation de piégeage de l'air provoquée par les particules de caoutchouc hydrophobe, pendant le mélange et en partie à la faible conductivité thermique de la poudre de caoutchouc. [88] a montré, que l'air entraîné lors du malaxage, conduit à une porosité fermée dans la matrice cimentaire, ce qui améliore les performances d'isolation thermique du composite cimentaire, modifiées par des granulats de caoutchouc.

V.5 Impact sur les propriétés liés à la durabilité

▪ Perméabilité

Pour certains auteurs, dont les résultats sont présentés dans le tableau II.15, le coefficient de perméabilité à l'air diminue avec l'augmentation du taux de GC alors que la porosité augmente. Ils justifient ces constatations a priori contradictoires par le fait que le réseau poreux du composite incorporant des granulats en caoutchouc est plus discontinu. Cette conclusion de [89], peut être rapprochée des observations de [92], qui, en étudiant des bétons mousses incorporant de cendres volantes, ont aussi constaté que malgré une porosité élevée, le réseau des pores plus discontinu entraîne une perméabilité à l'air nettement plus faible.

Tableau II.15 : Coefficient de perméabilité à l'air du composite ciment – caoutchouc [89].

Volume du GC (%)	Coefficient de perméabilité à l'air (10^{-17} m^2)		
	CRAC		ERAC
0		12,56	
10	10,25	-	9,85
20	4,38	-	2,95
30	3,24	-	2,23
40	2,36	-	1,74

Toujours au sujet de la perméabilité au gaz et comme le montre la figure II.24 [73], qui a travaillé sur les propriétés des BAP incorporant des GC en arrive à la conclusion que la perméabilité à l'oxygène du BAP augmente avec le taux d'incorporation en GC.

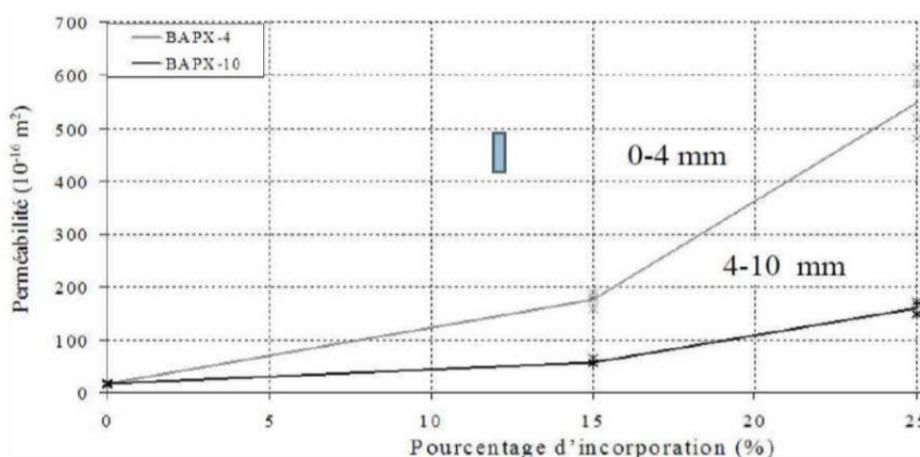


Figure II.24 : Evolution de la perméabilité à l'oxygène en fonction du taux d'incorporation et de la taille des GC [73].

▪ Retrait

Le phénomène de retrait est un facteur très important dans la pratique. Il correspond à des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant et après la prise des bétons. Lorsqu'elles ne sont pas maîtrisées par le ferrailage ou la présence de joints, ces variations dimensionnelles entraînent souvent l'apparition de fissures précoces, d'ouverture conséquente ce qui peut nuire à la durabilité du béton.

Certains auteurs ont étudié l'influence des GC sur le retrait du béton et leurs résultats montrent que le retrait du béton caoutchouc est plus élevé que celui du béton de référence. [90] confirment à la figure II.25 que les variations dimensionnelles des mortiers incorporant des GC sont plus élevées que celles du mortier de référence. C'est essentiellement par la relation entre la rigidité des granulats et

l'amplitude des variations dimensionnelles de retrait [83, 91] que les auteurs interprètent les résultats obtenus.

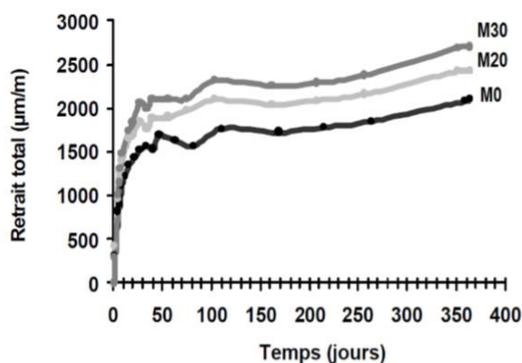


Figure II.25: Evolution du retrait total des mortiers en fonctions du taux de substitution en GC [91].

A partir des observations de l'amplitude de retrait avec la présence de granulats en caoutchouc, ces auteurs se retrouvent en face de deux phénomènes en compétition et dont les effets sont en opposition vis-à-vis de la fissuration de retrait : d'une part la présence de GC permet d'augmenter la capacité de déformation avant localisation de la fissuration, et d'autre part cette présence de GC entraîne une augmentation des variations dimensionnelles de retrait. Cependant les résultats de [85] montrent que la capacité de déformation avant localisation de la macrofissuration des mortiers incorporant des GC est prépondérante vis-à-vis de l'amplitude des variations dimensionnelles de retrait. La présence de GC peut donc être considérée comme une solution pertinente pour empêcher (ou retarder) la fissuration de retrait vis-à-vis de l'amplitude des variations dimensionnelles de retrait. La présence de GC peut donc être considérée comme une solution pertinente pour empêcher (ou retarder) la fissuration de retrait.

▪ Résistance au gel et dégel

[73], rapporte des résultats selon lesquels les bétons contenant 10 et 15% en masse de GC dont la dimension est de 2 à 6mm ont un facteur de durabilité 60% plus élevé que celui du béton normal après 300 cycles de gel-dégel. Dans une autre étude, [93] confirme que les granulats en caoutchouc améliorent la résistance au gel-dégel des composites cimentaires. Pour illustrer cette conclusion on peut s'appuyer sur l'état des éprouvettes de référence et celui des composites ciment-caoutchouc après 300 cycles de gel-dégel présentés à la figure II.26.

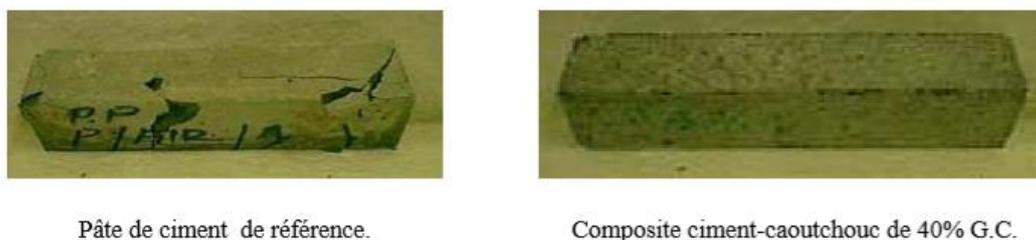


Figure II.26: Effet des GC sur la résistance au gel-dégel des matériaux à base cimentaire : état des éprouvettes après 300 cycles de gel-dégel [93].

VI. Conclusion du chapitre

Granulats de béton démolition (GBR)

Il existe de nombreuses études dans la littérature, avec des résultats parfois contradictoires qui proviennent de la diversité des granulats de béton recyclé utilisés, des différentes méthodologies déployées pour maintenir constants les paramètres de composition, et de la diversité des modes opératoires.

- La déconstruction sélective des constructions est indispensable, avec choix plus coûteux mais assure des granulats de bonne qualité.
- En raison de l'hétérogénéité et de la variabilité des sources de GBR, il faut accorder plus d'attention au contrôle de la régularité des caractéristiques des GBR.
- La forte capacité d'absorption d'eau des granulats de béton recyclé (GBR) influence directement les propriétés du béton frais. Cependant des valeurs seuils pour le recyclage et une pré-humidification des GBR permettent d'obtenir un béton frais stable : 30% de substitution pour les sables de GBR, 100% de substitution pour les gravillons de GBR. Pour des taux de sable plus élevé, il existe encore la possibilité d'utiliser des retardateurs de prise.
- L'utilisation des granulats recyclés donne un retrait élevé à jeune âge et donc un risque de fissuration plus important réduisant ainsi la durabilité du béton aux agents agressifs.
- Les GBR réduisent de façon prévisible les performances du béton en matière de propriétés de transfert, selon une intensité qui dépend des caractéristiques intrinsèques des GBR (porosité), du taux de substitution et de la compacité de la matrice cimentaire du nouveau béton. En optimisant la formulation du béton (réduction du rapport E/C notamment), il est cependant possible d'obtenir des bétons aussi durables que les bétons de granulats naturels.

Granulat de laitier

- Les granulats de laitier affectent la maniabilité ainsi que le rapport E/C effectif des bétons. Des corrections sur le volume d'eau apporté selon le taux d'humidité des granulats doivent être mises en place,

- Tous les auteurs s'accordent sur le fait que des bétons fabriqués avec des granulats grossiers de laitier donnent des résistances en compression ou traction au moins égales à celles des bétons conventionnels et même souvent meilleure,
- L'emploi de laitier cristallisé concassé comme granulat dans un béton n'augmente pas la perméabilité de celui-ci, la porosité des grains de laitier étant fermée, c'est à dire que les pores et cavités ne communiquent pas entre eux. De ce fait la remontée capillaire est faible. Ainsi le béton de laitier présente une bonne résistance aux milieux agressifs. Leurs comportement aux cycles gel/dégel est excellent.
- La littérature traitant de la valorisation de laitiers cristallins montre que ces granulats peuvent facilement être incorporés au sein d'une matrice cimentaire, avec certaines précautions toutefois. Si le risque d'expansion volumétrique est affranchi, les laitiers cristallins semblent être tout à fait aptes à servir de granulat pour béton, offrant même bien souvent de meilleures résistances mécaniques et de durabilité que les bétons conventionnels.
- Le taux de substitution des granulats naturels peut aller jusqu'à 100% de la fraction grossière et 50% pour la fraction fine.

Granulat de caoutchouc

- Nous avons pu constater que non seulement les granulats en caoutchouc sont particulièrement préjudiciables vis-à-vis de la maniabilité du béton et conduisent à un mélange plus visqueux.
- Les différents documents et exemples disponibles dans la littérature convergent sans équivoque sur la conclusion que l'incorporation des GC dans le béton entraîne une chute sur les résistances en compression et en traction malgré les tentatives de traitement de la surfaces des granulats de caoutchouc. Cette chute de résistance peut être expliquée rigidité plus faible des GC conjuguée à leur mauvaise adhérence avec la matrice cimentaire. Un taux de substitution inférieur à 5% donne tout de même des résistances acceptables.
- Malgré la chute des résistances mécaniques ce composite offre une grande capacité de déformation avant la localisation de la fissuration, un atout vis-à-vis de la fissuration due aux variations dimensionnelles de retrait, la principale pathologie limitant l'utilisation du matériau dans les applications à grande surface.
- D'autre part les bétons caoutchoutés en général, possèdent des propriétés séduisantes, telles que la faible densité, une ductilité élevées, une importante capacité antivibratoires, une résistance aux chocs, une bonne isolation thermique et acoustique et une meilleure durabilité par rapport aux bétons classiques. Ces propriétés sont influencées par le taux d'inclusion de caoutchouc.

Référence bibliographiques

- [1] Norme Algérienne NA442, Liants hydrauliques- ciments courants : Composition, spécifications et critères de conformité, 2^{ème} Edition. Edition IANOR, Algérie, 2000.
- [2] Cherait.Y., Nafa.Z., Eléments de matériaux de construction. Edition : Direction de la publication de l'université 8 mai 1945 Guelma. N° ISBN 9961-9548-7-4, 2007.
- [3] D.Larrard.F; Colina.H., Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4, 792 pages, ISBN 978-2-85782-747.
- [4] Céréma., Valorisation des graves de déconstruction, Guide Rhône-Alpes d'utilisation en Travaux Publics, 24 p., 2014.
- [5] Nagataki.S., Gokce.A., Saeki.T., Hisada.M., Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Research, volume 34, N°6, p 965-971, 2004.
- [6] Tam.V.W., Gao.X., Tam.C., Chan.C., New approach in measuring water absorption of recycled aggregates, Construction and Building Materials, 22(3), 364-9, 2008.
- [7] Silva.R.V., de Brito.J., Dhir.R.K., The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: a review, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 19(7), 825-849, 2014.
- [8] Chakaradhara.R., Bhattacharyya.M., Barai.S., (2011, January). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. Materials and Structures, 44(1), pp. 205-220.
- [9] Safuiddin.M., Alengaram.U., Salam.M., Jumaat.M., Jaafar.F., Saad.H. (2011, June 03). Properties of high-workability concrete with recycled concrete aggregate. Materials Research, 14(2), pp. 1-8.
- [10] Padmini.A., Ramamurthy.K., Mathews.M., (2009, February). Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials, 23(2), pp. 829-836.
- [11] Hansen.T., Recycling of Demolished Concrete and Masonry. Oxfordshire: Taylor Francis Group, 1992.
- [12] Safuiddin.M., Alengaram.U., Rahman.M., Salam.M., Jumaat.M., (2013). Use of recycled concrete aggregate in concrete : a review. Journal of civil engineering and management, 19(6), pp. 796-810.
- [13] Sagoe-Crentsil.K., Brown.T., Taylor.A.H., Performance of Concrete Made with Commercially Produced Coarse Recycled Concrete Aggregate, Cement and Concrete Research, 31, 707-712, 2001
- [14] Belin.P., Habert.G., Thiery.M., Roussel.N., Cement paste content and water absorption of recycled concrete coarse aggregates, Materials and Structures, , 1451-1465, 2014
- [15] Bello.L., Mise au point d'une méthodologie pour formuler de nouveaux bétons légers autoplaçant durables, Université de Montpellier II, ED I2S, 2014.
- [16] González.J.G., Robles.D.R., Valdés.A.J., Morán del Pozo, J.M.Romero, M.I.G., Influence of Moisture States of Recycled Coarse Aggregates on the Slump Test, Advances Materials Research, 742, 379-383, 2013.
- [17] Hansen.T.C., Recycled Aggregates and Recycled Aggregate Concrete: Second State-of- the-Art, Report 1945-1989, 1992.
- [18] Barra.M., Vazquez.E., The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete, Waste Management, 16, (1-3), 113-117, 1996.
- [19] Poon.C.S., Shui .Z.H., Lam.L., Fok.H., Kou.S.C., Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. Cement and Concrete Research, 34, 31-36, 2004.
- [20] Ji.T., Chen.C.-Y., Chen.Y.-Y., Zhuang.Y.-Z. Chen.J.-F., Lin.X., Effect of moisture state of recycled fine aggregate on the cracking resistibility of concrete, Construction and Building Materials, 44, 726-733, 2013
- [21] Mefteh.H., Kebaili.O., Oucief.H., Berredjem.L., Arabi.N., Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete, Journal of cleaner production, 54, 282-288, 2013.

- [22] Sanchez-Roldán.Z., Martín-Morales.M., Valverde-Palacios.I., Valverde-Espinosa.I., Zamorano.M., Study of potential advantages of pre-soaking on the properties of pre-cast concrete made with recycled coarse aggregate, *Materiales de Construcción* 66, 2016
- [23] Higuchi.Y., Coated-sand technique produces high strength concrete, *Concrete International*, 2, 4, 75-76, 1980.
- [24] Hayakawa.M., Itoh.Y., A new concrete mixing method for improving bond mechanism, *Bond in concrete*, Ed. by P. Bartos, Applied Science Publishers, London, 24-33, 1982.
- [25] Tamimi.A.K., The effects of a new mixing technique on the properties of the cement paste-aggregate interface, *Cement and Concrete Research*, 24, 1299-1304, 1994.
- [26] Kurowa.R., Tsuji.M., Sawamoto.T., Tanaka.Y., Effect of water condition in aggregate and mixing procedure under decreased pressure on compressive strength of recycled aggregate concrete, *JCA Proceedings of Cement & Concrete*, 53, 535-542, 1999.
- [27] Ryu.J.S., Improvement on strength and impermeability of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate, *Journal of Materials Science Letters*, 21, 1565-1567, 2002.
- [28] Otsuki.N., Miyazato.S., Yodsudjai.W., Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete, *Journal of materials in civil engineering*, 15, 443-451, 2003.
- [29] Li.W., Xiao.J., Sun.Z., Kawashima.S., Shah.S.P., Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches, *Construction and Building Materials*, 35, 1045-1055, 2012.
- [30] Tam.V.W.Y., Gao.X.F., Tam.C.M., Microstructural analysis of recycled concrete produced from two-stage mixing approach, *Cement Concrete Research*, 35, 6, 1195-1203, 2005.
- [31] De Larrard.F., *Concrete Mixture-Proportioning: a scientific approach*, Modern Concrete Technology, series No. 9, A. Bentur and S. Mindness editors, E & FN SPON, ISBN 0-419-23500-0, 1999.
- [32] Butler.L., West.J., Tighe.S. (2011, October). The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, 41(10), pp. 1037-1049.
- [33] Malešev.M., Radonjanin.V., Marinković.S. (2010). Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. *Sustainability*, 2(5), pp. 1204-1225.
- [34] Fathifazl.G., Abbas.A., Razaqpur.A., Isgor.O., Fournier.B., Foo.S., (2009, October). New Mixture Proportioning Method for Concrete Made with Coarse Recycled Concrete Aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(10), pp. 601-611.
- [35] Sagoe-Crentsil.K., Brown.T., Taylor.A., (2001, May). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, 31(5), pp. 707-721.
- [36] Mari-Jo., Bastien.S., Valorisation des granulats de béton recyclé et des granulats de verre recyclé dans les pavages industriels en béton compacté au rouleau, mémoire de maîtrise, Canada avril 2016)
- [37] Rahal.K., Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*, pp. 407-415, January 2007.
- [38] de Oliveira.M., Vazquez.E. (1996). The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. *Waste Management*, 16(1-3), pp. 113-117.
- [39] Kou.S., Poon.C.-S., Etxeberria, M., (2011, February). Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33(2), pp. 286-291.
- [40] Kou.S., Poon.C., (2012). Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction & Building Materials*, 35, pp. 69-76.
- [41] Tam.V., Gao.X., Tam.C., Chan.C. (2008, March). New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 22(3), pp. 364-369.
- [42] Etxeberria.M., Vázquez.E., Mari.A., Barra.M., (2007, May). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), pp. 735-742.

- [43] M. S. Juan.M.S., P. A. Gutierrez.P.A., Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Construction & Building Materials*, 23(2), 872-877, (2009).
- [44] Tabsh.S., Abdelfatah.A.S, Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete, *Construction and Building Materials*, 23(2), 1163-1167, (2009).
- [45] Gonzalez.B, Fonteboa, Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante, Thèse de Doctorat, Université de la Coruna - Espagne, (2002).
- [46] Raphaël.B., Substitution des granulats alluvionnaires dans l'industrie du béton par les granulats marins, concassés ou recyclés. CERIB, RB/JRO, EA286/Matériau. Réf.DDE 27. (2003).
- [47] Gagné.R., (2013). La durabilité du béton. Dans R. Gagné, Notes de cours GCI 714 - Durabilité et réparation du béton (pp. 28-62). Université de Sherbrooke.
- [48] Levy.S., Helene.P., (2004, November). Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. *Cement and Concrete Research*, 34(11).
- [49] Buck.A. D., Recycled concrete as a source of aggregate, *ACI Journal*, 1997.
- [50] Malhorta.V.M., Use of recycled concrete as a new aggregate. Proceedings of Symposium on energy and resource conservation in the cement and concrete industry, CANMET, Report N° 76-9, Ottawa, 1978.
- [51] Coquillat.G., Recyclage de matériaux de démolition dans la confection de béton, CEPTB – Service d'Etude des matériaux, Unité : technologie des bétons, 80, 61-248, 1982
- [52] Zaharieva.R., Buyle-Bodin.F, Wirquin.E., Frost resistance of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Research*, 34, 2004.
- [53] Richardson.A., Coventry.K., Bacon.J., Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete, *Journal of Cleaner Production*, 19, 2011.
- [54] Li,X., (2008, December), Recycling and reuse of waste concrete in China. Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(1-2), pp. 36-44.
- [55] Adegoloye.O., Valorisation des laitiers issus de l'élaboration d'aciers inoxydables comme granulats dans le béton, thèse de doctorat, l'université de CERGY-PONTOISE, 2014
- [56] Behim.M., sous produits industriels et développement durable : réactivité, rôle et durabilité des laitiers d'el hadjar dans les matériaux à matrice cimentaire, thèse doctorat, université Badji Mokhtar-Annaba 2005.
- [57] Guide technique régional relatif à la valorisation des laitiers de hauts fourneaux.
- [58] Noui.S, L'influence des granulats artificiels «laitier» sur la résistance mécanique du béton, Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016.
- [59] Khazadi.M., Behnood.A., (2009), Mechanical properties of high-strength concrete incorporating copper slag as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, volume 23, numéro 6, p. 2183-2188.
- [60] Chunlin.L., Kunpeng.Z., Depeng.C., (2011), Possibility of concrete prepared with steel slag as fine and coarse aggregates: A preliminary study, 2011 International Conference on Advances in Engineering.
- [61] Abu-Eishah.S., El-Dieb.A.S., Bedir.M.S.,(2012), Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region. *Construction and Building Materials*, volume 34, p. 249-256.
- [62] Papayianni.I., Anastasiou.E., (2011). Concrete incorporating high calcium fly ash and EAF slag aggregates. *Magazine of Concrete Research*, volume 63, N°8, p. 597-604.
- [63] Pellegrino.C., Cavagnis.P., Faleschini.F., Brunelli.K., (2012). Properties of concretes with Black/Oxidizing Electric Arc Furnace slag aggregate. *Cement and Concrete Composites*
- [64] V.W.Y., Gao.X.F., Tarn.C.M., Chan.C.H., (2008), New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, volume 22, N°3, p. 364-9.
- [65] Muraz.L., Valorisation de scories cristallines dans le béton de ciment, Mémoire de master, Québec 2015.

- [66] Phuc Lam.D., valorisation des laitiers LWS dans les mélanges granulaires, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Nancy, 9 Juillet 2010.
- [67] Arellano.R., BurciagaDíaz.O., Escalante.García.J.I., (2010). Lightweight concretes of activated metakaolin-fly ash binders, with blast furnace slag aggregates. *Construction and Building Materials*, volume 24, numéro 7, p. 1166-1175
- [68] Bouslama.S., Jelidi.A., (2003). Hydraulic concrete development using Tunisian blast furnace slag. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, volume 36, numéro 255, p. 59-67.
- [69] Yüksel.I., Bilir.T., Özkan.O., (2007). Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate. *Building and Environment*, volume 42, numéro 7, p. 2651-2659.
- [70] Liu.C., Zha.K., Che.D., (2011). Possibility of concrete prepared with steel slag as fine and coarse aggregates: A preliminary study. *Dans Procedia Engineering*, volume 24 p. 412-416.
- [71] Froněk.B., Bosela.P., Delatte.N., (2012). Steel slag aggregate used in Portland cement concrete.
- [72] Hani.A., Etude de Comportement d'un Béton Hydraulique Modifié (déchet des pneus), Mémoire de master, Université Kasdi Merbah, Orglia 2016.
- [73] Garros.M., (2007), Composites cimentaires incorporant des granulats caoutchouc issus du broyage de pneus usagés : optimisation de la composition et caractérisation, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse.
- [74] Ho.A.C., (2010), Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés : Application aux éléments de grande surface. Thèse de doctorat, Université INSA de Toulouse. 60-62.
- [75] Mamery.S., Béton à base de recyclats: influence du type de recyclats et rôle de la formulation. Autre. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2013. Français. <NNT: 2013BORI5230>.
- [76] Segre N., Joekes.I., (2000). Use of tire rubber particles as addition to cement paste. *Cement and Concrete Research* 30, 1421-1425.
- [77] Xi.Y., Li.Y., Xie.Z., Lee.J.S., (2004). Utilization of Solid Wastes (Waste Glass and Rubber Particles) As Aggregates in Concrete, Proc. of International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, Beijing, China, 45-54, May 20-21.
- [78] Albano.C., Camacho.N., Reyes.J., Feliu.J.L, Hernández.M., (2005). Influence of scrap rubber addition to Portland I concrete composites : Destructive and non-destructive testing. *Composite Structures* 71, 439-446.
- [79] Güneş.E., Gesoğlu.M., Özturan T., Properties of rubberized concretes containing silica fume. *Cement and Concrete Research* 34, 2309-2317, 2004.
- [80] Khaloo.A.R., Dehestani.M., Rahmatbadi P., Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles. *Waste Management* 28, 2472-2482, 2008.
- [81] Kaloush.K.E., Way.G.B., Zhu.H., Properties of Crumb Rubber Concrete. *Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board*, Volume 1914.
- [82] Khatib.Z.K., Bayomy.F.M., Rubberized portland cement concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 206-213, 2005.
- [83] Hobbs.D.W., The dependence of the bulk modulus, Young's modulus, creep, shrinkage and thermal expansion of concrete upon aggregate volume concentration. *Mat. Struct.* 4: 107-114, 1971.
- [84] Ganjian.E., Khorami.M., Maghsoudi.A.A., (2009). Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials – Vol. 23. Numéro 5 – pp. 1828-1836.*
- [85] Turatsinze.A., Bonnet.S., Granju.J.L., Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortars: improvement in cracking shrinkage resistance. *Construction and Building Materials*, 21: 176-181, 2005.
- [86] M. Ho Anh Cuong, (2010). Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés: Application aux éléments de grande surface. Thèse de Doctorat, Université de Génie Civil, Toulouse, P. 9.
- [87] Fadiel A., Al Rifaie F., Taher A., Fini E., (2014). Use of crumb rubber to improve thermal efficiency of cement-based materials. *Am. J. Eng. Appl. Sci.*, Vol. 7, No. 1, PP. 1-11.

[88] Benazzouk.A., (2002). Contribution à la valorisation de déchets de caoutchouc: composites cimentaire à base de caoutchouc compact et cellulaire. Thèse de doctorat, Université de Picardie.

[89] Benazzouk A., Douzane.O., Quéneudec.M (2004). Transport of fluids in cement–rubber composites. *Cement & Concrete Composites* 26, 21–29. Cité dans (Ho, 2010).

[90] Turatsinze.A., Bascoul.A., Restrained Crack Widening in Mode I Crack Propagation for Mortar and Concrete. *Advn Cem Bas Mat*, 4:77-92, 1996.

[91] Neville.A.M., Propriétés des bétons. Quatrième édition. Edition française par CRIB, Editions Eyrolles, 2000.

[92] Kerasley E. P. and Wainwright P.J (2001). Porosity and permeability of foamed concrete. *Cement Concr Res*, 31: 805–12. Cité dans (Ho, 2010).

[93] Benazzouk.A., Quéneudec.M., Effet du caractère cellulaire des granulats sur le comportement d'un composite ciment-caoutchouc aux cycles de gel/dégel. *Proceeding of CNR IUT Roanne*, publication de l'Université de St-Etienne, ISBN 2 86272 2200, Tome 2, pp. 477–87, 2001

CHAPITRE 3 :

Valorisation des déchets comme constituants du ciment ou comme ajouts cimentaires dans le béton

Le ciment composé CPJ est actuellement le ciment le plus utilisé dans le monde. C'est un ciment composé de clinker et d'un ajout normalisé dont la proportion varie entre 5 et 35% du poids du clinker. La substitution des ajouts normalisés (cendres volantes, calcaires, laitiers de haut fourneau, schistes calcinés, matériaux pouzzolaniques, fumée de silice) par d'autres ajouts issus de l'opération de recyclage des déchets est une opération qui peut être très rentable pour l'industrie cimentaire, puisque les recyclats sont des produits disponibles et à faible coût.

Dans ce chapitre, on établira une synthèse sur l'élaboration de ciments composés en utilisant comme ajouts les granulats de béton de démolition, le laitier de haut fourneau et la poudrette de verres.

SOMMAIRE

I. Introduction.....	87
II. Composition des ciments : principes et méthodes.....	87
III. Rappel de la norme Algérienne NA/442 sur les ciments.....	87
III.1. Bref aperçu sur l'industrie cimentaire Algérienne.....	88
IV. Béton de démolition.....	88
IV.1. Valorisation de la partie fine du béton de démolition comme constituants..... du ciment	88
IV.2. Valorisation de la partie fine du béton de démolition comme ajouts..... cimentaires au béton	90
V. Valorisation des laitiers granulés comme constituants du ciment.....	91
V.1. Caractéristiques du laitier granulé.....	91
V.2. Les constituants des ciments aux laitiers.....	92
V.3. Impact du laitier sur les principales propriétés des ciments.....	93
VI. Valorisation du laitier comme ajouts cimentaires dans le béton.....	95
VII. Déchets de verre.....	96
VII.1. Valorisation de la poudre de verre comme ajouts cimentaires dans le béton.....	96
VI. Conclusion du chapitre.....	101
Références bibliographiques.....	102

I. Introduction

Il existe deux façons de recycler la fraction fine des déchets dans le ciment et le béton : la première est la substitution au clinker, en tant que constituant secondaire du ciment et la deuxième est l'ajout direct au béton en tant que matériau cimentaire supplémentaire. Ces deux voies sont évaluées dans ce troisième chapitre, en axant principalement l'étude sur l'impact de la substitution sur les propriétés du ciment.

II. Composition des ciments : principes et méthodes

La composition des ciments est régie au niveau du territoire national par la norme NA/442 [1] et du côté Européen par la norme EN 197-1[2]. Cette norme ([1]) fondamentale définit les constituants principaux (plus de 6% en masse) et les constituants secondaires (moins de 5% en masse) du ciment.

Parmi les constituants principaux, on trouve le clinker Portland et neuf autres matériaux qui sont les calcaires (L, LL), le laitier de haut fourneau granulé (S), les cendres volantes provenant des centrales thermiques au charbon (V, W), les matériaux pouzzolaniques (P, Q), les schistes calcinées (T) et les fumées de silice (D).

Parmi les constituants secondaires, on trouve les matériaux issus du procédé de fabrication du ciment, tels le calcaire et le clinker mal clinkérisé, parfois appelé «fines brûlées». En outre, du sulfate de calcium est toujours ajouté (aux constituants principaux + secondaires) afin d'optimiser le temps de prise. Selon les proportions massiques de chaque constituant, le ciment se classe par exemple dans la catégorie CEM I (clinker + sulfate de calcium), CEM II/A-LL (clinker + calcaire + sulfate de calcium) ou CEM III/A (clinker + laitier de haut fourneau + sulfate de calcium).

III. Rappel de la norme Algérienne NA/442 sur le ciment

La norme Algérienne NA/442 [1] relative aux liants hydrauliques divise les ciments en catégories, selon la quantité et la nature des constituants (tableau III.1) et en classes et sous classes selon les résistances (tableaux III.2 et III.3).

Tableau III.1 : Catégories de ciment [1].

Type de ciment	Désignation	Constituants en %			
		Clinker	Laitier	Cendres	Fillers
Ciment Portland	CPA	≥ 97	-	-	≤ 3
	CPJ	≥ 65	$\leq (97 - 40)$		
Ciment de haut fourneau	CHF	(25 – 60)	(40 – 75)	-	≤ 3
Ciment de laitier au clinker	CLK	≤ 20	≥ 80		≤ 3
Ciment de laitier aux cendres	CLC	(25 – 60)	(20 – 45)	(20 – 45)	≤ 3

Tableau III.2 : Classes normalisées de résistance [2].

Désignation		Résistance à la compression en MPa		
Classes	Sous classes	2 jours	28 jours	
		Limite inférieure	Limite inférieure	Limite supérieure
35	-	-	25	45
45	-	-	35	55
	R*	15	35	55
55	-	-	45	65
	R*	22.5	45	65
HP	-	-	55	-
	R*	27	55	-

Tableau III.3 : Valeurs minimales garanties des résistances à la compression [2].

Résistance à la compression en MPa			
Classes	2 jours	7 jours	28 jours
35	-	10	25
45	-	17.5	25
45R	12	-	35
55	10	-	45
55R	17	-	45
HP	15	-	55
HPR	22	-	55

III.1 Bref aperçu sur l'industrie cimentaire Algérienne

La production du ciment en Algérie, oscille actuellement entre 25 et 30 millions de tonnes. Elle devra atteindre les 40 millions en 2020 [3]. La majorité de cette production est assurée par le groupe public GICA, qui comporte 12 filiales, et dont la production en 2014 s'est élevée à 11555280 tonnes de ciment [4]. Ainsi l'Algérie est passé d'un pays importateur à un pays exportateur en ciment.

IV. Béton de démolition

IV.1 Valorisation de la partie fine du béton de démolition comme constituants du ciment [5]

Le Projet Recybéton [5] a étudié la possibilité de l'incorporation des granulats de béton recyclé (béton de démolition) comme constituants du ciment ou ajouts dans le béton. Ces principaux résultats sont analysés ci-dessous.

IV.1.1 Production des ciments Portland composés CEM II/A-M et CEM II/B-M par substitution du calcaire par des fines de granulats de béton recyclé (GBR)

Compte tenu de la nature des matériaux agréés en tant que constituant principal du ciment, autres que le clinker, la démarche a consisté à déterminer lequel pouvait être le plus facilement substitué par des fines de GBR. Compte tenu de la composition minéralogique des GBR, il est apparu logique de

substituer le calcaire additionné au clinker dans les ciments de catégorie CEM II/A ou B-LL. Le remplacement progressif du calcaire par les fines de GBR a alors conduit aux compositions cimentaires suivantes :

- CEM II/A-LL15 42,5 R : Clinker + 15% de calcaire + 6% de gypse.
- CEM II/A-M (LL7-GBR8) : Clinker + 7% de calcaire + 8% de fines de GBR + 6% de gypse.
- CEM II/B-M (LL9-GBR16) : Clinker + 9% de calcaire + 16% de fines de GBR + 6% de gypse
- CEM II/B-GBR25 : Clinker + 25% de fines de GBR + 6% de gypse.

Ces ciments ont été produits à une échelle semi-pilote par concassage puis broyage dans un broyeur à boulets, suivi de tamisages et de recompositions granulométriques afin d'obtenir une granularité similaire à celle d'un ciment industriel pris comme référence, en l'occurrence le CEM II/A-LL 42,5R.

IV.1.2 Impact des granulats de béton recyclé sur les propriétés des ciments CPJ

Les propriétés des ciments composés ainsi fabriqués ont été mesurées sur poudre, sur pâte et sur mortier, conformément aux prescriptions de la norme NF EN-196 [6] et de ses différentes parties.

IV.1.2.1 Caractéristiques sur poudre

La masse volumique des ciments composés diminue avec l'ajout des fines de GBR, en raison de leur plus faible masse volumique, par rapport à celle du clinker. Elle varie de 3,065g/cm³ pour le ciment CEM II/A-LL à 2,966g/cm³ pour le ciment CEM II/B-GBR. Les ciments sont principalement composés d'oxyde de calcium et d'oxyde de silicium. Une faible augmentation de la teneur en ce dernier est observée avec l'ajout des fines de GBR, puisqu'elle atteint 27% pour le ciment CEM II/B-GBR.

La teneur en chaux libre est similaire pour tous les ciments (environ 2%) mais le résidu insoluble augmente linéairement avec la teneur en fines de GBR; elle atteint 9% pour le ciment CEM II/B-GBR. Cette évolution est due à la présence du quartz dans les fines de GBR. La perte au feu ne diminue pas significativement avec la substitution des fillers calcaires par les fines de GBR, en raison de la présence de carbonates, et de sulfates dans les fines de GBR.

IV.1.2.2 Caractéristiques sur pâtes de ciment

L'incorporation de fines de GBR dans le ciment entraîne un léger raidissement de la pâte, qui a été compensé par un supplément d'eau, pour garder la consistance normale. Ainsi, la valeur de la demande en eau a augmenté de 8% entre les ciments CEM II/A-LL et CEM II/B-GBR. Ce comportement s'explique a priori par la présence de l'ancienne pâte de ciment microporeuse au sein des fines de GBR [7, 8, 9].

Le temps de prise augmente avec le taux d'incorporation des fines de GBR, et donc avec la diminution concomitante du taux de clinker. Pour le CEM II/A, l'ajout des fines de GBR n'affecte pas le temps de prise, tant initial que final. Pour le CEM II/B, l'augmentation de la teneur en fines de GBR, de 16%

(avec 9% de calcaire) à 25%, retarde le temps de prise initial de 30 minutes, mais n'affecte pas le temps de fin de prise.

IV.1.2.1 Caractéristiques sur mortiers

L'ajout des fines de GBR réduit la chaleur d'hydratation des ciments, et diffère le pic maximum de température. Donc Les ciments avec les fines de GBR présentent donc une chaleur d'hydratation plus faible et retardée, qualités intéressantes pour des utilisations particulières.

Les valeurs de résistance à la compression des différents ciments dans le temps, et leur résistance à la compression relativisée à celle du ciment CEM II/A-LL, sont données par la figure III.1. La résistance à la compression des ciments incorporant les fines de GBR est inférieure, quelle que soit l'échéance, à celle du ciment de référence (CEM II/A-LL). La diminution est plus importante pour le ciment CEM II/A que pour le ciment CEM II/B. Elle est importante à court terme (1 et 2 jours), mais moins franche à plus long terme (28 et 90 jours). Les résistances relatives à la compression sont proches les unes des autres à partir de 7 jours.

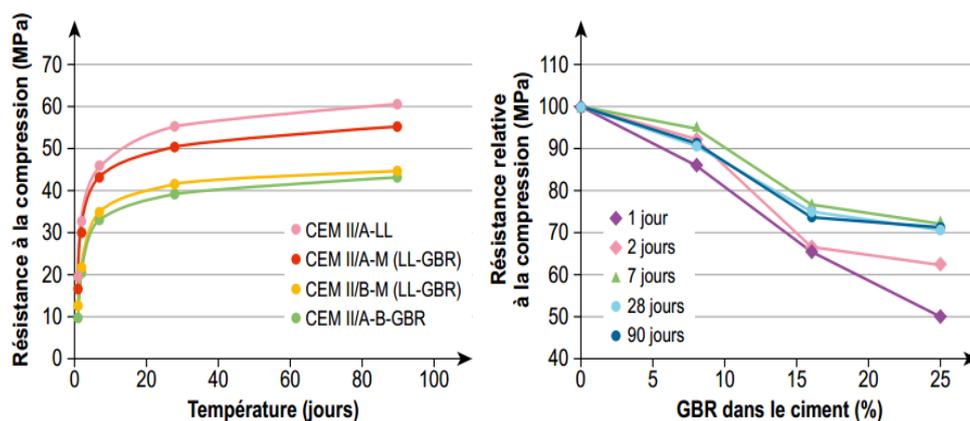


Figure III.1 : Résistance à la compression et résistance relative à la compression par rapport à celle du CEM II/A-LL en fonction du temps.

Les ciments contenant des fines de GBR présentent finalement des valeurs de résistance mécanique qui sont compatibles avec une classe de résistance 32,5N et 42,5N, selon le taux de substitution. On obtient ainsi des CEM II/A et des CEM II/B ayant des propriétés suffisantes pour des utilisations courantes. Cependant, de toute évidence, la classe de résistance d'un ciment ne peut être donnée que sur une base statistique étendue. D'autres études sont donc nécessaires, au niveau industriel notamment.

IV.2. Valorisation du béton de démolition comme ajouts cimentaires au béton [5]

Les fines de GBR ont aussi été évaluées en tant qu'ajouts minéraux pouvant remplacer une partie du ciment, au sein du béton. Les additions au béton sont définies comme des constituants minéraux finement divisés utilisés pour améliorer ou conférer des propriétés spécifiques au béton. Dans la norme NF EN 206/CN, elles sont séparées en deux catégories :

- 1) les additions de type I, qui sont presque inertes, tels les fillers siliceux ou les pigments,
- 2) les additions de type II, qui sont des additions ayant des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques latentes, telles les cendres volantes, les fumées de silice et le laitier de haut fourneau granulé broyé.

Les GBR contiennent des granulats naturels et de la pâte de ciment hydraté, mais ils peuvent contenir aussi des composés anhydres, comme du clinker non hydraté et des additions qui peuvent ne pas être totalement inertes lorsqu'elles sont réutilisées dans un nouveau béton [10, 11]. De plus, des phases siliceuses présentes dans les granulats peuvent aussi avoir une certaine réactivité. Ainsi, les fines de GBR peuvent être considérées soit comme une addition de type I, c'est-à-dire une charge inerte constituée par les minéraux inertes présents dans les granulats et la pâte hydratée, soit comme une addition de type II pouvant présenter une activité pouzzolanique ou hydraulique, grâce au ciment resté anhydre, aux additions ou aux granulats naturels réactifs présents [8, 12, 13, 14].

Les essais effectués sur pâtes et mortiers incorporant des fines de dépoussiérage (fines de GBR-D) et des fines obtenues par broyage de sables de béton recyclé (fines de GBR) [5] ont montré que ces matériaux se comportent plutôt comme des charges minérales inertes, même s'ils ont une légère activité pouzzolanique.

Enfin, les fines de GBR-D se révèlent être peu efficaces en termes de contribution à la résistance des mortiers. Les fines de GBR doivent être finement broyées afin qu'elles expriment la meilleure efficacité en tant qu'addition de type I. Les sables de GBR peuvent aussi être transformés en fines de GBR par broyage, et constituer ainsi une voie intéressante pour valoriser les sables de GBR dans les bétons, dans l'hypothèse où cette coupure ne serait pas facilement réutilisable en tant que sable dans de nouveaux bétons.

V. Valorisation des laitiers granulés comme constituants du ciment

V.1 Caractéristiques du laitier granulé

V.1.1 Composition chimique

Le laitier de haut fourneau est avant tout un sous-produit du processus d'élaboration de la fonte. La composition chimique du laitier peut varier dans de larges limites, suivant la pureté du minerai, la nature et la quantité des fondants, la nature du combustible et le procédé employé. Généralement les concentrations en oxydes varient pour la chaux (CaO) de 30 à 50%, la silice (SiO₂) de 28 à 38%, l'alumine (Al₂O₃) de 8 à 24%, le soufre (S) de 1 à 2,5%.

La composition chimique est un paramètre déterminant de la réactivité des laitiers. Le tableau III.4 récapitule les compositions chimiques du laitier dans quelques pays producteurs de fonte [15, 16, 17].

Tableau III.4 : Composition chimique du laitier en % [16, 16, 17].

Oxydes	Teneur en %			
	Algérie	France	Canada	Japon
SiO ₂	40.1	33.5	35.6	31.2
CaO	40.2	42.2	38.8	37.4
Al ₂ O ₃	6.0	13.3	7.8	16.2
MgO	4.7	6.0	11.5	8.46
SO ₃ ,S	0.15	0.94	4.36	3.03
FeO	2.0	12.4	0.11	0.05
MnO	2.64	2.64	0.60	0.65
Cr ₂ O ₃	-	-	0.01	0.01
TiO ₂	1.16	0.55	0.27	1.95
Na ₂ O	-	0.39	0.27	0.64
K ₂ O	0.70	0.70	0.43	0.47
Total	97.6	100.1	99.6	100.2

V.1.2 Composition minéralogique potentielle du laitier

La composition minéralogique potentielle des laitiers a été calculée [18] à partir des principaux oxydes (CaO, MgO, Al₂O₃, SiO₂) par analyse chimique. Les phases cristallisées susceptibles d'apparaître au cours de la dévitrification sont la mélilite qui est une solution solide de la gehlinitite (C₂AS) et de l'akermanite (C₂MS₂), la pseudowollastonite (CS), la rankinite (C₃S₂), la merwinite (C₃MS₂), le silicate bicalcique (C₂S), le diopside (CMS₂), la montécellite (CMS) et la forstérite (MS₂). Les résultats des calculs chimiques conduisent à conclure que les laitiers de haut fourneau utilisés en cimenterie sont potentiellement constitués de (C₃S₂, C₂AS et C₂MS₂) pour 95% et de (CS ou C₃MS₂ ou C₂S) pour 5% [18].

V.1.3 Granulométrie

Le laitier granulé se présente sous forme d'un gros sable de granulométrie 0/5 et de module de finesse voisin de 3 [19].

V.1.4 Masses volumiques

La masse volumique apparente du laitier granulé peut varier de 900 à 1000kgm³ et sa masse volumique absolue de 2800 à 3000kg/m³ [19].

V.2 Les constituants des ciments au laitiers

Le ciment résulte d'un mélange de composants et peuvent être classés en trois catégories en fonction de leur dosage comme le définit la norme Algérienne NA/442 [1].

V.2.1 Les constituants principaux

Les constituants principaux du ciment sont nombreux et peuvent être d'origine artificielle tel que le clinker et le laitier de haut fourneau ou naturelle tel que les pouzzolanes naturelles et les calcaires.

Dans notre recherche bibliographique, nous allons nous intéresser uniquement au clinker et au laitier comme constituants principaux du ciment.

a- Le clinker : résulte à l'origine du mélange de deux matières premières: le calcaire (80% environ) et l'argile (20% environ). Ces matériaux sont transformés en poudre fine, mélangés et homogénéisés avant d'être cuits dans un four rotatif à une température de l'ordre de 1450°C pour donner ce qu'on appelle le clinker. Le clinker doit être constitué d'au moins 2/3 de silicates de calcium $[(CaO)_3.SiO_2]$ et $[(CaO)_2.SiO_2]$, la partie restante contenant de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres oxydes. Le rapport en masse (CaO/SiO_2) doit être supérieur à 2. La teneur en oxyde de magnésium (MgO) ne doit pas dépasser 5% [20].

b- Le laitier granulé :

Le laitier granulé de haut fourneau, sous-produit de l'élaboration de la fonte, est obtenu par refroidissement rapide de la scorie fondue à la sortie du haut fourneau. Le laitier granulé est un matériau hydraulique latent, s'il est utilisé en qualité de constituant principal (sa proportion est supérieure à 5% en masse dans le ciment). Il doit contenir au moins 2/3 en masse de laitier vitreux et il doit être constitué d'au moins 2/3 en masse de la somme de CaO, SiO_2 et MgO, le restant étant Al_2O_3 avec en outre de faibles quantités d'autres oxydes. Le rapport en masse $(CaO + MgO)/SiO_2$ doit dépasser 1.0 [20]. Le laitier vitrifié par trempe intervient comme constituant dans la fabrication de nombreux ciments.

V.2.2 Les constituants secondaires

Les constituants secondaires sont introduits dans une proportion qui n'excède pas 5% en masse. Le sulfate de calcium doit être ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication en vue de réguler la prise. Le sulfate de calcium peut être du gypse déshydraté ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre $CaSO_4$) ou tout mélange de ceux-ci [21].

V.3 Impact du laitier sur les principales propriétés des ciments

V.3.1 Masse volumique

La masse volumique réelle d'un ciment dépend de sa composition : elle varie de 3050 à 3200kg/m³ pour les ciments portland sans addition, de 2950 à 3050kg/m³ pour les ciments au laitier, la masse volumique réelle du laitier broyé variant de 2800 à 2900kg/m³ [17]. La masse volumique apparente du ciment varie en général de 800 à 1200kg/m³. On compte en moyenne 1100kg/m³ pour un ciment en vrac non tassé.

V.3.2 Chaleur d'hydratation

La prise du ciment est caractérisée par un réchauffement de la pâte. La quantité de chaleur dégagée renseigne sur la vitesse et le degré d'hydratation. Les ciments de haut fourneau et les ciments de laitier au clinker présentent une chaleur d'hydratation faible. Avec un CPA55, le flux de chaleur maximal (calorimétrie adiabatique) sur mortier normalisé dépasse 40J/g.h, 7 à 8 heures après le gâchage. Avec

un CPJ45, ce même flux maximal ne dépasse pas 15 J/g.h vers 10 heures d'hydratation et avec un CLK 45 on descend à 10 J/g.h au bout d'un jour environ [15]. Les chaleurs d'hydratation mesurées par la méthode du calorimètre de Langavant après sept jours sont données au tableau III.5 [15].

Tableau III.5 : Chaleur d'hydratation des ciments à 7 jours [15].

Type de ciment	Quantité de chaleur en Joule/g
Ciment alumineux	500 - 630
Ciment portland artificiel de classe élevée (CPA)	360 - 420
Ciment portland artificiel (CPA) ordinaire et ciment portland composé	250 - 360
Ciment de haut fourneau (CHF) et ciment de laitier au clinker (CLK)	190 - 260
Ciment prompt	170 - 210

V.3.3 Prise et durcissement des ciments au laitier

Les ciments à forte teneur en laitier type CHF (ciment de haut fourneau) et CLK (ciment de laitier au clinker) ont des temps de prise plus longs que ceux des ciments portland sans addition, surtout par temps froid. La cinétique de prise et de durcissement des ciments au laitier est en effet bien différente de celle des ciments portland. Si les résistances mécaniques à 28 jours sont équivalentes, les résistances aux jeunes âges (2 jours) des ciments à forte teneur en laitier sont inférieures. Mais au-delà de 28 jours, la pente des courbes de résistance mécanique obtenue à long terme peut être sensiblement supérieure pour les ciments au laitier. Les courbes des résistances mécaniques respectives de ciment à forte teneur en laitier (CHF) et de ciment portland montrent que le premier a une évolution plus lente et plus progressive (figure III.2). Les courbes se croisent à 28 jours à 20°C, voire plus tard si la température est plus basse [22].

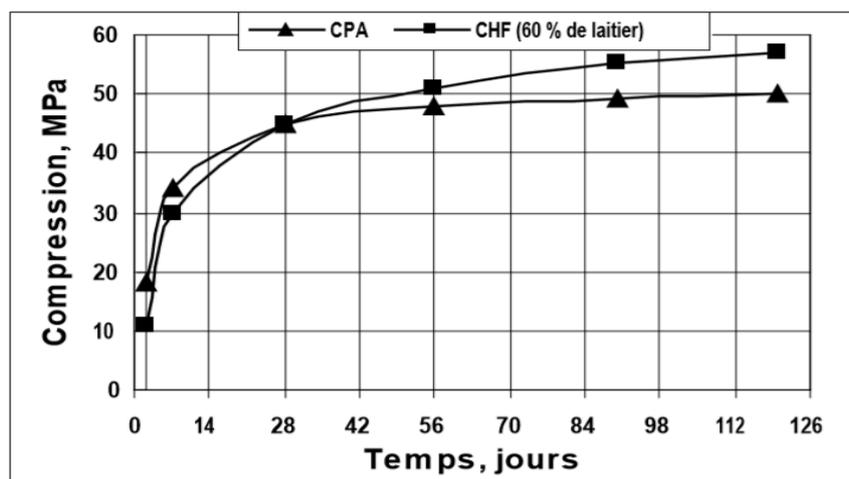


Figure III.2 : Cinétiques comparées de durcissement d'un CHF avec 60% de laitier et d'un CPA [22].

V.3.4 Résistance chimique des ciments au laitier

L'addition du laitier au ciment réduit les perméabilités et les coefficients de diffusion. Ainsi, avec la substitution d'au moins 50% de clinker par le laitier et pour un même rapport eau/liant, on observe une réduction de la perméabilité et de la diffusivité par un facteur de l'ordre de 10 par rapport au CPA. Le béton de ciment au laitier présente une résistance élevée à la diffusion des chlorures et des alcalis.

L'imperméabilité croît avec la teneur en laitier dans le ciment. En effet, on observe une diminution simultanée du nombre des pores capillaires et de la dimension moyenne des pores, d'où il résulte une diminution globale de la porosité capillaire de 25 à 30% [15]. Certains auteurs rapportent que les ciments au laitier fixent une plus grande quantité de chlorures que le CPA [17, 23]. Cette plus grande capacité de fixation de chlorures serait due à la forte adsorption sur les pores des ciments hydratés. Ainsi, l'influence bénéfique de l'ajout de laitier sur la diminution de la vitesse de corrosion est confirmée [25].

De façon générale, beaucoup d'auteurs [26] indiquent que les ajouts de laitier dans le béton accroissent de façon significative la carbonatation par rapport à un béton de CPA.

VI. Valorisation du laitier comme ajouts cimentaire dans le béton [15]

Le laitier granulé peut intervenir comme constituant dans la composition des bétons hydrauliques. Il peut être ainsi utilisé dans les bétons classiques comme sable actif de par son caractère hydraulique, soit à l'état brut, soit sous forme de laitier pré-broyé. Il peut également être moulu et incorporé dans le béton comme filer actif.

L'incorporation du laitier granulé brut dans un béton classique de granulats naturels, en remplacement de tout ou partie du sable, se traduit par une augmentation des résistances mécaniques (à dosage en ciment constant). Le malaxage et la mise en œuvre provoquent l'attrition des fines hydrauliques dont

l'action vient se cumuler avec celle de la liaison pâte de ciment – sable de laitier granulé (les deux produits sont hydrauliques et présentent une affinité réciproque).

Par contre, la rhéologie des mélanges peut se trouver affectée, le béton devenant rêche et perdant sa maniabilité, à dosage en eau constant. Pour améliorer la rhéologie des mélanges, on introduit des ajouts, telles les cendres volantes qui non seulement améliorent la rhéologie de ces bétons mais ont de surcroît des propriétés pouzzolaniques. Elles lubrifient les mélanges et augmentent leur compacité par remplissage des vides. L'amélioration de la maniabilité peut aussi être assurée par une charge inerte tel qu'un filler naturel, le plus souvent du calcaire. Indépendamment de son action sur l'ouvrabilité (onctuosité du produit, plastifiant rétenteur d'eau), la chaux grasse jouera un rôle d'activation du laitier. L'emploi des adjuvants améliore la rhéologie des bétons de laitier granulé, mais peut répondre à d'autres critères (réduction du dosage en eau à maniabilité constante, soit une augmentation de la résistance mécanique à dosage en ciment constant).

VII. Déchets de verres

VII.1 Valorisation de la poudre de verre (PV) comme ajouts cimentaires dans le béton

La poudre de verre est un ajout cimentaire alternatif. Elle est obtenue après la collecte et le broyage des fragments de verre coloré. Sa haute teneur en silice amorphe SiO_2 lui confère des propriétés pouzzolaniques en se combinant avec la chaux pour produire d'autres hydrates. L'utilisation de la PV comme ajout cimentaire a fait l'objet de plusieurs recherches depuis plus d'une vingtaine d'années [27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34]. Ses effets sur l'ouvrabilité, les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons sont exposés dans les paragraphes suivants.

VII.1.1 Caractéristiques de la poudre verre

Généralement le verre est reçu sous forme de morceaux de différentes tailles. Il est séparé de tous les débris qu'il contient tel que, le plastique, le métal et le papier. Le verre ainsi obtenu est ensuite broyé dans un broyeur à boulets. La finesse obtenue après un broyage de 14 séquences de 25 minutes entrecoupées par 35 minutes de repos est de $555 \text{ m}^2/\text{kg}$. Cette période de repos permet au verre de se refroidir, en évitant tout colmatage de la poudre sur les parois du broyeur et sur les boulets d'acier. La figure suivante schématise le processus de l'obtention de la poudre à partir de verre concassé [33].

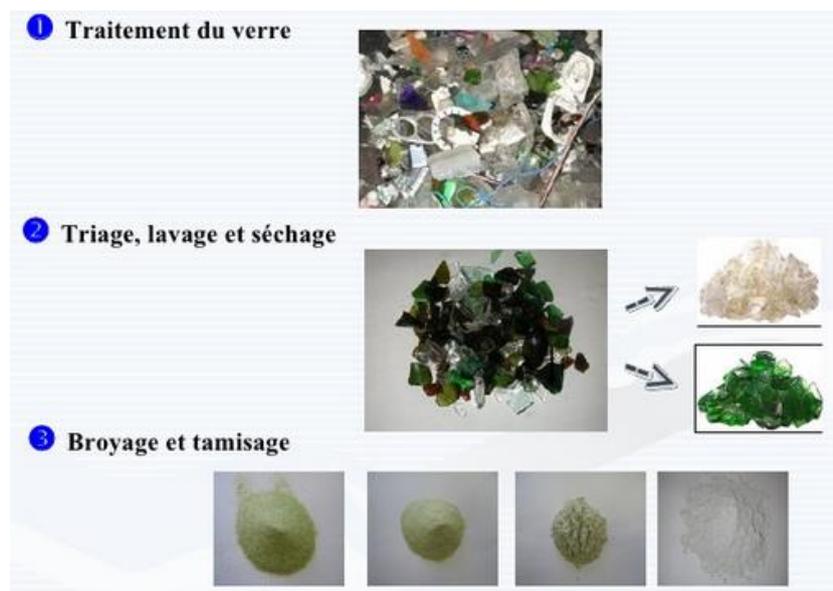


Figure III.3 : Schéma d'obtention de la poudre de verre [35].

VII .1.1.1 Composition chimique de la poudre de verre

L'analyse chimique du verre montre trois éléments majeurs composent le verre. Il s'agit de la silice (SiO_2) avec 70,93 %, des alcalis (NaO_2) avec 13 % et de l'oxyde de sodium (CaO) avec 12% [36].

VII.1.1.2 Propriétés minéralogiques de la poudre de verre

L'analyse minéralogique (par le diffractomètre des rayons X) montre une structure amorphe prévoyant une bonne réactivité de cette poudre lors de son activation [35, 36].

La structure amorphe, la teneur importante en silice et la surface spécifique Blaine élevée sont a priori en faveur de l'utilisation de la poudre de verre en tant que matériau pouzzolanique [35].

VI .1.1.3 Densité

La densité de la poudre verre est au voisinage de 2,50 [36].

VII.1.2 Impact de la poudre verre sur le béton à l'état frais

VII.1.2.1 Maniabilité

Les travaux menés par [37], montrent une diminution de 18 % de l'affaissement dans un béton binaire contenant 30 % de la poudre de verre dont la finesse est élevée (diamètre inférieure à $38\mu\text{m}$).

Contrairement à d'autres études, [38] indique que l'ajout de la poudre de verre dans des bétons de faible rapport E/C améliore l'ouvrabilité. Un autre paramètre ressorti par [39], est la pureté de la poudre de verre qui diminue la demande en eau.

[40] a étudié l'effet de la finesse de la PV sur les performances à l'état frais et à l'état durci des bétons (ordinaire, haute performance et autoplaçant). Il s'avère qu'une finesse semblable à celle du ciment soit une valeur optimale pour l'obtention d'une ouvrabilité acceptable. Pour un BAP ayant un rapport

$E/C = 0,4$, l'incorporation de 20% de poudre de verre diminue le seuil de cisaillement de 32% et la viscosité plastique de 21% en comparaison avec un béton témoin (100% ciment). De plus, la demande en superplastifiant diminue à mesure qu'augmente le pourcentage de remplacement du ciment par la poudre de verre [34]. L'absorption quasi nulle de la poudre de verre constitue aussi un facteur de diminution du dosage de superplastifiant requis pour un étalement donné. Cependant, pour les besoins rhéologiques des BAP, une finesse supérieure à celle du ciment peut être appréciable, notamment pour le maintien de la stabilité.

VII.1.2.2 Temps de prise

La prise de béton est gouvernée par la réaction d'hydratation et la longueur de la période dormante. Selon l'activité pouzzolanique de l'ajout cimentaire, le temps de prise peut être prolongé, comme il peut être raccourci. L'utilisation des ajouts cimentaires tend à retarder le temps de prise [41].

Le temps de la prise initiale d'un mortier de 30% de poudre de verre en substitution de ciment augmente la durée de la prise initiale mais ce temps reste dans la limite autorisée [42].

VII.1.2.3 Température d'hydratation

La présence des ajouts a contribué d'une manière substantielle, dépendamment de type d'ajout, à baisser la température d'hydratation dans les bétons.

La température maximale dans les bétons contenant uniquement le verre broyé (20% en substitution massive dans le béton) est inférieure de 3°C à celle incorporant la fumée de silice et de 6°C par rapport à celle contenant le métakaolin [36].

VII .1.3 Effet de la poudre de verre sur l'état durci

La poudre de verre en substitution du ciment entraîne une amélioration significative des propriétés mécaniques due à la réaction pouzzolanique [43, 44].

Il est démontré que la poudre de verre a une pouzzolanité similaire, voire supérieure à celle des cendres volantes [45]. De ce fait, cet ajout alternatif contribue aux gains de résistances mécaniques et de durabilité dans le temps. Les études sur le béton ordinaire montrent que l'on peut incorporer jusqu'à 30% de PV en remplacement partiel du ciment [36, 41, 45, 46].

La substitution de 30% de ciment par une poudre dont le diamètre maximum des particules est de 38 μ m a donné lieu à une activité pouzzolanique [37]. La substitution de 20% de ciment par la poudre de verre a une activité pouzzolanique après 7 jours [46].

Tout comme les cendres volantes, la PV n'a pas d'influence sur les résistances à jeune âge. Les résistances à la compression à 28 jours sont plus faibles par rapport à un béton de ciment Portland. Au-delà de 56 jours et jusqu'à 91 jours les résistances des bétons avec PV sont équivalentes, voire supérieures au béton témoin. En outre, le développement des résistances à la compression augmente avec

la teneur en PV entre 28 et 91 jours [34]. En effet, des bétons à hautes performances ont été formulés avec un dosage en liant de 400 kg/m^3 et un rapport Eau/Liant de 0,40. L'incorporation de 20 et 30% de PV confèrent au béton un taux de développement des résistances à la compression respectivement de 12 et 18%, alors que pour béton témoin, ce même taux est de 9%.

L'utilisation de 40% de poudre de verre dans le mortier augmente la résistance en compression de 17, 27 et 43% à 28, 91, et 365 jours respectivement [39].

[45] montre que 20% de remplacement de ciment Portland par une poudre de verre de finesse de $800 \text{ m}^2/\text{kg}$ et de 10% des granulats par la même poudre donne des résistances similaires à celles d'un remplacement de 10% de ciment par la fumée de silice. Il montre aussi que les 20% de substitution de ciment donnent des résultats appréciables. L'amélioration de la résistance en compression dans certains mélanges à différent pourcentages est en fonction de la finesse et du mode de mûrissement [46].

D'une façon générale, l'augmentation de la résistance en compression a une influence sur les résistances en flexion, en traction et sur la ductilité du béton.

VII .1.4 Effet du verre sur la durabilité

VII .1.3.1 Perméabilité du béton

À l'état durci la liaison entre les pores provoque un chemin préférentiel pour le passage des liquides, des gaz ou des ions potentiellement agressifs comme illustré dans la figure suivante :

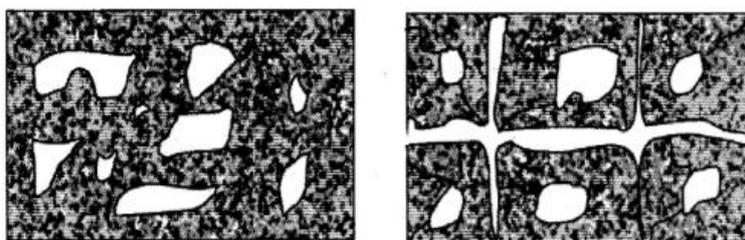


Figure III. 4: Porosité fermée et ouverte dans un béton [36].

Il est devenu très commode d'affirmer que la durabilité d'une structure en béton est étroitement liée à sa perméabilité. Il revient à dire que la diminution de la perméabilité rend le béton plus durable.

Des travaux [47] ont rapportés que l'utilisation de 20 % du verre broyé de finesse $800 \text{ m}^2/\text{kg}$ diminue la perméabilité du béton. Ils concluaient que la perméabilité du béton est faible après 380 jours de mûrissement.

VII.1.3.2 Retrait de séchage

L'utilisation des ajouts cimentaires dans des proportions élevées augmente le retrait [48]. Cependant des études réalisées par [47] montrent que le retrait de séchage diminue avec la teneur en poudre de

verre. Les mélanges de béton incorporant 10, 20 et 30% de poudre de verre ont un retrait en dessous de la limite fixée par la norme australienne qui est de 0,075% à l'âge de 70 jours.

VII .1.3.3 Le gel dégel dans les bétons à base de verre

Un béton est résistant au gel-dégel, si son facteur de durabilité est supérieur à 80 % après 300 cycles (Selon la norme ASTM C 260).

[36] a montré dans ses études que les bétons contenant 20% de poudre verre ont résisté aux 300 cycles de gel dégel. Leurs facteurs de durabilité sont tous supérieurs à 80 %. Cette résistance au gel/dégel est due principalement au volume d'air entraîné dans tous les bétons.

VI I.1.3.4 La résistance à la réaction alcalis-silice

La réaction alcali-silice est une pathologie des bétons qui se caractérise par une réaction chimique entre la silice amorphe ou mal cristallisée contenue dans les granulats et certains ions de la solution interstitielle fortement basique (pH généralement > 13) et alcaline principalement constituée d'hydroxydes alcalins en solution (NaOH, KOH). Cette réaction se produit lorsque les trois conditions suivantes sont réunies :

- Des alcalins (Na⁺, K⁺) en quantités suffisantes pour maintenir une concentration en ions hydroxydes élevés;
- Des granulats réactifs, c'est à dire contenant de la silice réactive;
- de l'eau (humidité).

Le produit de la réaction ainsi formé est un gel visqueux qui a tendance à gonfler en présence d'eau tout en générant des contraintes de tension au sein des granulats en cause et sur la pâte de ciment environnante [36].

L'utilisation des ajouts cimentaires ont tendance à contrôlé la réaction alcalis-silice due essentiellement à leurs effet pouzzolanique [43, 49]. Le contrôle de la réaction alcalis-silice dépend de la composition chimique de l'ajout, de son pourcentage de substitution et de la vitesse de sa réactivité.

Les travaux effectués sur le verre sont tous en accord pour dire que l'utilisation sous forme de granulats augmente la réaction alcalis granulat [44, 50, 51, 52, 53]. Le remplacement des granulats fins ainsi que des gros granulats a montré son effet négatif en remplacement partiel ou total [48, 47]; [45, 47, 54]. L'expansion est causée par les granulats dont le diamètre est entre 1,18 et 2,36mm [34].

Par contre le remplacement d'un pourcentage de ciment par la poudre de verre de diamètre inférieur à 0,25mm réduit l'expansion due à la réaction alcalis-silice [36]. Des études confirment que le remplacement de ciment par 20% de poudre de verre réduit l'expansion de plus de 50% par rapport à un mortier de référence [46]. L'expansion peut être contrôlée par l'utilisation d'une poudre de finesse Blaine de 800m²/kg [36]. Ils résultent aussi que les alcalis sont fixés et ne se trouvent pas dans la

solution interstitielle. Autres chercheurs suggèrent l'utilisation de 1,5% de fibre métallique dans un mortier contenant 20% de verre afin de réduire l'expansion de 40%.

Il ressort de ces résultats que l'utilisation de la poudre de verre dans le béton contrôle la réaction alcalis silice dépendamment de sa composition chimique et de sa finesse.

VIII. Conclusion du chapitre

Le ciment composé CPJ comporte entre 5 et 35% d'ajouts secondaires normalisés (Calcaires, Schistes calcinés, cendres volantes, laitier de haut fourneau, fumée de silice, matériaux pouzzolanes). La synthèse présentée dans le troisième chapitre montre que d'autres produits peuvent être également utilisés dans la fabrication des ciments ou comme ajouts cimentaires au béton. C'est le cas notamment, de la partie fine des bétons de démolition, et de la poudrette de verre. Les résultats expérimentaux montrent que les ciments obtenus avec l'emploi de ces nouveaux ajouts sont équivalentes à ceux des ciments composés classiques.

Concernant le GBR, les résultats ont conduits aux nouveaux ciments suivants :

- ✓ CEM II/A-M (LL7-GBR8) : Clinker + 7% de calcaire + 8% de fines de GBR + 6% de gypse.
- ✓ CEM II/B-M (LL9-GBR16) : Clinker + 9% de calcaire + 16% de fines de GBR + 6% de gypse
- ✓ CEM II/B-GBR25 : Clinker + 25% de fines de GBR + 6% de gypse.

Concernant la poudrette de verre, les taux de substitution pouvant être utilisés pour la confection des ciments, varie entre 10 et 40%.

Références bibliographiques

- [1] Norme Algérienne NA/442, Liants hydrauliques : Définition, classification et spécification des ciments, IANOR, 1994.
- [2] Norme EN -197-1, Comité Européen de normalisation.
- [3] www.radioalgerie.dz/news/fr/article/20181023/153303.html, site consulté le 15.05.2019.
- [4] <https://www.gica.dz/fiche-technique>, site consulté le 15.05.2019.
- [5] Larrard.F., Colina.H., Le béton recyclé, Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4, 792 pages, ISBN 978-2-85782-747.
- [6] Norme Française NF EN 196-1, Méthodes d'essais des ciments : détermination des résistances mécaniques, AFNOR.
- [7] Hansen.T.C., Recycled Aggregates and Recycled Aggregate Concrete: Second State-of- the-Art, Report 1945-1989, 1992.
- [8] Evangelista.L., de Brito.J., Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates, Cement and concrete composites, 29(5), 397-401, 2007.
- [9] Evangelista.L., Guedes.M., de Brito.J., Ferro.A.C., Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste, Cement and Concrete Composites, 86, 178-188, 2015.
- [10] Braga.M., de Brito.J., Veiga.R., Incorporation of fine concrete aggregates in mortars, Construction and Building Materials, 36, 960-968, 2012.
- [11] Braga.M., de Brito.J., Veiga.R., Reduction of the cement content in mortars made with fine concrete aggregates, Materials and structures, 47, 171-182, 2014.
- [12] Kim.Y.J., Choi.Y.W., Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement, Construction and Building Materials, 30, 500-504, 2012.
- [13] OksriNelfia.L., Mahieux.P.Y., Amiri.O., Turcry Ph., Lux J., Reuse of recycled crushed concrete fines as mineral addition in cementitious materials, Materials and Structures, 49, 3239-3251, 2016.
- [14] Topic.J., Prosek.Z., Plachy.T., Influence of increasing amount of recycled concrete powder on mechanical properties of cement paste, IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering, 236, 2017.
- [15] Alexandre.L, Sebileau.J.L, Le laitier de haut fourneau, édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 1988, 340 p.
- [16] Document technique du laboratoire de la cimenterie de Hadjar Soud (SCHS), décembre 2002.
- [17] Roper.H., Composition, morphologie, hydratation et propriétés adhésives de quelques laitiers granulés, 7ème Congrès International de la Chimie du Ciment, Paris, volume 2, thème 3, 1980, p 13 - 17.
- [18] Gourdin.P., Composition minéralogique potentielle des laitiers vitrifiés de haut fourneau, Ciments – bétons – plâtres et chaux. N°727, 6, 1980, p 363.
- [19] Behim.M., sous produits industriels et développement durable : reactivite, role et durabilite des laitiers d'el hadjar dans les materiaux a matrice cimentaire, thèse de doctorat , Université Badji Mokhtar, Annaba, 2005.
- [20] Norme Française NF-P 15–301, Liants hydrauliques, ciments courants, composition, spécification et critères de conformité, juin 1994.
- [21] Detriche.C.H., La maîtrise de la fissuration précoce: condition de la durabilité des ouvrages, Durabilité des bétons, chapitre 4, presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 1992, Paris, pp 107 – 128.
- [22] Smolczyk.G., Structure et caractérisation du laitier, rapport principal du 7ème Congrès International de la Chimie du Ciment, Paris, volume 2, thème 3, 1980, P 1 - 16.
- [23] Shi.C, Day.R.L., Early hydration characteristics of alkali slag cements, Cement and concrete research, volume 25, N°6, 1995, pp 1333 – 1346.
- [24] Zhang.X., Ding.X.Z., Lim.T.H., Yang.J., Microwave study of hydration of slag cement blends in early period, Cement and concrete research, N°5, volume 25, 1995, pp 1086 – 1094.

- [25] Lea.M.F., The chemistry of cement and concrete, 3^{ème} édition, Edouard Arnold publishers, London, 1970.
- [26] Litwan.G.G, Meyer.A., Carbonatation of granulated blast furnace slag cement, concrete during twenty years of field exposure, in: Proceeding: 2nd International Conference of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, V.m. Malhotra, ed, 1986, ACI, SP 91, 2, pp 1031 – 1048.
- [27] Abdalla.A.H., (2012). Optimisation et Performance des Bétons Incorporant de la Poudre de Verre Comme un Remplacement Partiel du Ciment Portland. ProQuest Dissertations and Theses. Université de Sherbrooke (Canada).
- [28] Idir, R., Cyr.M., Tagnit.H., (2011). Pozzolanic properties of fine and coarse color mixed glass cullet. Cement and Concrete Composites, 33(1), 19-2
- [29] Jain.J.a., Neithalath,N., (2010). Chloride transport in fly ash and glass powder modified concretes – Influence of test methods on microstructure. Cement and Concrete Composites, 32(2), 148-156.
- [30] Shao,Y., Lefort,T., Moras,S., Rodriguez,D. (2000). Studies on concrete containing ground waste glass. Cement and Concrete Research, 30(1), 91-100.
- [31] Shayan.A., Xu.A., (2004). Value-added utilisation of waste glass in concrete. Cement and Concrete Research, 34(1), 81-89.
- [32] Shayan.A., Xu.A., (2006). Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concretes labs. Cement and Concrete Research, 36(3), 457-468
- [33] Shi,C., Wu,Y., (2005). Mixture Proportioning and Properties of Self-Consolidating Light weight Concrete Containing Glass Powder. ACI Materials Journal, (102).
- [34] Zidol.A., (2009). Optimisation de la finesse de la poudre de verre dans les systèmes cimentaires binaires. Université de Sherbrooke.
- [35] Khmiri.A., Incorporation des déchets de verres dans le ciment Portland, publication scientifique
- [36] Faycal.A., Propriétés à l'état frais, à l'état durci et durabilité des bétons incorporant du verre finement broyé, mémoire de master université Sherbrooke, Canada, février 2009.
- [37] Shao.Y., Thibaut.L., Shylesh.M., Damian.R., (2000) Studies on concrete containing ground waste glass, Cement and Concrete Research,V 30, lip.
- [38] Brooks. Jj., Johari.M.A.M., Mazloom.M., (2000) Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete, Cement and Concrete Composites, 22(1).
- [39] Byars.B., Zhu.H.Y., (2004) rapport du Centre of Cement and Concrete University of Sheffield, 34 p.
- [40] Meyer.C., Baxter.S., (1997) Use of Recycled Glass for Concrete Masonry and Blocks. Columbia University Final Report to New York State Energy Research and Development Authority, Report No. 97-15.
- [41] Schwarz.N., Neithalath.N., (2008). Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration. Cement and Concrete Research, 38(4), 429-436
- [42] Neville.A., (2000) Propriétés des bétons, Editions Eyrolles, Paris, Traduit par le CRIB, 806 p.
- [43] Fournier.B., CANMET (1997) industry joint Research Program on Alkali-Aggregate Reaction - Fourth Progress Report, Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Ottawa.
- [44] Panchakarla.V.S., Hall.,M.W., (1996) Glascrete disposing of non-recyclable glass, in: K.P. Chong (Ed.), Materials for a New Millennium, Proceedings of ASCE Materials Engineering Conference, Washington, D.C, lip.
- [45] Shayan.A., Xu.A., (2006) Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs, Cement and Concrete Research 36, 13
- [46] Shi.C., Wu.Y., Riefler.C., Wang.H., (2005) Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders, Cement and Concrete Research (35), 8 p
- [47] Shayan.A., Xu.A., (2004) Value-added utilization of waste glass in concrete, Cement and Concrete Research, Vol 34, 10 p
- [48] Neville.A., (2000) Propriétés des Bétons, Ed Eyrolles, Paris, Traduit par le CRIB, 806 p.
- [49] Lana.D.S., Ozyildirim.C., (1999) Preventive measures for alkali-silica reactions (binary and ternary systems), cement and concrete research 29, 9 p.

[50] Meyer.C., Baxter.S., (1997) Use of Recycled Glass for Concrete Masonry and Blocks. Columbia University Final Report to New York State Energy Research and Development Authority, Report No. 97-15.

[51] Polley.C., Cramer.S.M., De la Cruz.R.V., (1998) Potential for using waste glass in Portland cement concrete, J Materials in Civil Engineering, ASCE 10 (4), lip.

[52] JIN.W., (1998) Alkali-silica reaction in concrete with glass aggregate, thesis for degree of Doctor of Science, Columbia University.

[53] Prezzi.M., Monteiro.P.J.M., Sposito.G., (1997) The alkali -silica reaction: Part I. Use of double-layer theory to explain behavior of reaction product gels, ACI Mater. J. 94 (1), 9p.

[54] Park.S.B., Lee.B.C., (2004) Studies on expansion properties in mortar containing waste glass and fibers, Cement and Concrete Research V 34, 8 p.

CHAPITRE 4 :

Perspectives de l'utilisation des recyclât en Algérie

Dans ce quatrième et dernier chapitre intitulé "Perspectives de l'utilisation des recyclât en Algérie", nous tenterons d'apporter quelques éléments de réponse sur la question à savoir si un pays comme l'Algérie peut-elle réellement se lancer dans la voie du recyclage du béton à l'instar des pays développés et si elle dispose de gisements suffisants de déchets pour démarrer une activité de recyclage à grande échelle.

SOMMAIRE

I .Introduction	107
II. Perspectives de l'utilisation des recyclât en Algérie.....	107
II.1 Pneus usagés.....	107
II.2. Laitiers sidérurgiques	114
II.3 Béton de démolition	118
II.4. Déchets de briques	122
II..5. Les fillers	125
III. Conclusion du chapitre	125
Références bibliographiques	126

I. Introduction

Dans les chapitres précédents, on a pu apprécier l'état de l'art sur la valorisation de certains déchets (laitier de haut fourneau, pneus usagé, ciment durci, poudrette de verre, béton de démolition, etc.) dans la fabrication des bétons et des ciments. Il est paru évident que le béton à base de recyclât peut présenter selon les propriétés recherchées des performances semblables, voire parfois meilleurs que le béton conventionnel ou à base de granulats naturels. Ce qui induit la question à savoir si :

- un pays comme l'Algérie peut-elle réellement se lancer dans la voie du recyclage du béton à l'instar des pays développés?
- Qu'est ce qui freine cette opportunité?
- Dispose-t-elle de gisements suffisants de déchets pour démarrer une activité de recyclage à plus grande échelle?

Nous tenterons dans les paragraphes suivants d'apporter quelques éléments de réponses.

II. Perspectives de l'utilisation des recyclât en Algérie

Nous allons explorer dans ce quatrième et dernier chapitre quelques perspectives pour la valorisation des pneus usagés, des laitiers de haut fourneau, des déchets de briques, des fillers calcaires et du béton de démolition en Algérie et dans la mesure du possible au Sénégal et en Guinée.

II.1 Pneus usagés

Le stockage et l'élimination des pneumatiques usagés sont devenus des préoccupations graves pour l'environnement à travers le monde. Selon l'Agence Nationale de Promotion du Commerce Extérieur, l'Algérie importe annuellement environ 50 milles tonnes de pneumatiques en caoutchouc [1]. Sachant que chaque pneu neuf vendu génère un pneu usagé, et tenant compte de la perte de masse due à l'usure du pneu une fois usé, on se retrouve avec environ 46 milles de tonnes de pneus usagés, chaque année [1]. Les statistiques disponibles donnent les chiffres suivants : 1 million de tonne par an au Japon [2]. La Chine à elle seule génère 5,2 millions de tonnes de pneus usagés chaque année [3]. Chaque année, ce sont quelque 3,5 millions de pneus (lourds et légers) qui sont vendus en Algérie et faute de perspective efficace de ces pneus usagés, les carcasses continuent à encombrer les terrains vagues et les terres agricoles [4].

Selon une enquête réalisée par l'Ecole Nationale des Travaux Publics [5] auprès de la Sonatrach, l'Algérie a dénombré pas moins de 1 million de pneus hors d'usage contre 385000 unités en 1990 (Conseil National Economique et Social 2006). Rien qu'en 2009 les pneus usés ont été évalué à plus de 1 million d'unités par an, soit environ 26000 t/an et un stock d'environ 5 millions d'unités (130000 tonnes) [6].

[7] ont estimé le gisement des pneus hors d'usage en Algérie à 1439514 pneus par an soit 25 918 tonnes par an. Ils sont repartis en 1107410 pneus de type VL (voiture léger) par an et 332104 pneus de type

PL (poids lourds) par an. D'après une étude [8] l'Algérie produit plus 2 millions d'unités/an de pneus usagés.

Ces quantités sont susceptibles à la hausse à cause de l'augmentation du parc automobile Algérien qui est estimé à 8,4 millions de véhicules, d'après les déclarations du Ministre du transport en septembre 2016 au journal El Moudjahid.

Ces déchets posent énormément de problèmes notamment vis-à-vis de l'environnement. Pour assurer un développement durable, et optimiser la consommation des matières premières et de l'énergie, l'Algérie s'est doté de règlements spécifiques concernant la gestion des sous-produits industriels et des déchets. Ces lois ont été exposées au niveau de la partie A du premier chapitre.

Nous allons dans ce qui suit, présenter un état sur les déchets potentiellement recyclables au niveau national.

II.1.1 Valorisation des pneus usagés sous forme de matières premières [1]

Les pneumatiques usagés peuvent être broyés en poudrettes ou en granulés de caoutchouc. Ces produits sont utilisés en combinaison avec d'autres matériaux.

II.1.1.1. Les voies de valorisation des pneus usagés

Les voies de valorisation des pneus usagés sont de plus en plus objets de projets diversifiés, de recherche et développement. A titre d'exemples non exhaustifs on peut citer les axes suivants :

1. Poudrettes : il s'agit de particules de caoutchouc dont les dimensions sont inférieures à 4mm. Son coût d'obtention dépend de sa finesse, de son origine chimique et de l'absence ou non de corps étrangers. Les poudrettes sont utilisées comme charges dans des mélanges servant à produire des pièces, ne subissant pas de contraintes mécaniques ou dynamiques élevées. Comme exemple d'utilisation, on peut citer la fabrication de bandages et de roues pleines (caddie, poubelles, tondeuses, brouette, etc.), la modification des revêtements routiers (diminution de bruit et de l'aquaplaning du fait d'un drainage en surface)...etc.

La figure IV.1 expose l'étendue granulaire d'une poudrette commercialisée par une entreprise implantée dans la Wilaya de Sétif [9].

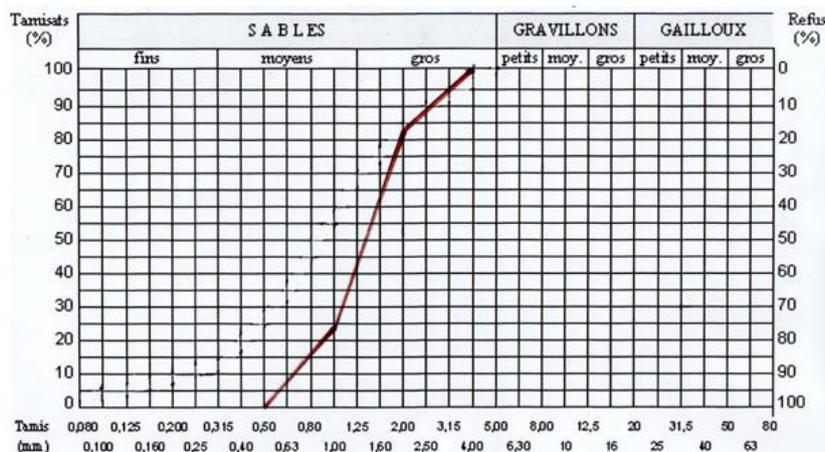


Figure IV.1 : Fuseau granulair d'une poudre de caoutchouc commercialisée en Algérie [9].

Selon [9], le fuseau granulair de la poudre commercialisée localement correspond à celui d'un sable moyen (0/4) avec une masse volumique de 870kg/m^3 .

2. Granulés : il s'agit de particules de caoutchouc d'une taille supérieure à celle des poudrettes. Les granulés peuvent être agglomérés par des résines, colorés ou non, et permettent, par moulage, de réaliser facilement des feuilles ou des plaques. Comme exemples d'utilisations, on peut citer les aires de jeux, les pavés antidérapants, les revêtements pour terrains de sport (surfaces souples, diminution des nuisances sonores, etc.).

3. Réhabilitation de carrière [10]

La méthode de comblement, qui fait l'objet d'un agrément pour les carrières en fin d'exploitation, consiste à alterner des couches de terre et des couches de pneus usagés de grande taille. Cette procédure de réhabilitation du site doit faire l'objet d'une surveillance scientifique sanitaire et environnementale. Sur la base de cette surveillance, il a été confirmé que l'utilisation des pneus en comblement de carrière est une application qui a toute sa place dans la valorisation des pneus usagés dès lors que cette technique est bien maîtrisée.

4. La technique "Pneusol"

Cette technique consiste à utiliser des pneus usagés entiers, dans des applications géotechniques. Actuellement, plus de deux cent cinquante ouvrages en Pneusol ont été construits en Algérie et dans d'autres pays comme, les Etats-Unis, la Jordanie, le Brésil, etc., dans différents domaines du génie civil (remblais légers, murs de soutènement, protection de pentes et de berges, etc.).

5. La valorisation énergétique

La récupération de l'énergie est une autre option pour la transformation des pneus hors d'usage. Lorsqu'ils sont brûlés comme combustible, les pneus produisent des émissions de CO_2 plus élevées que le pétrole et le gaz naturel, mais inférieures à celles du charbon. Dans les fours à ciment, l'utilisation de

pneus entiers comme combustible dérivé des pneus remplace non seulement des combustibles fossiles, mais contribue aussi à la production du ciment. L'acier nécessaire à la production du ciment provient des pneus utilisés comme combustible.

D'autres types de valorisation de matière, par transformation chimique, sont possible, telle que la régénération (par combinaison d'actions chimiques, mécaniques et thermiques), ou la Pyrolyse-Thermolyse. Les produits issus de cette décomposition, dont des huiles combustibles lourds et légères, du carbone...etc. Le développement industriel de ces types de valorisation, est cependant freiné par le coût de mise en œuvre.

II.1.2. Valorisation des pneus en Algérie

Actuellement en Algérie la seule voie de valorisation en génie civil des pneus usés réside dans les applications géotechniques comme les ouvrages en Pneusol (le remblai léger, mur de soutènement, protection de pente et de berges, etc.). La figure IV.2 illustre la consolidation d'un talus par des pneus usagés au niveau de la Commune de Bou-Smail.



Figure IV.2 : Chantier expérimental Pneusol à Bou-Smail (Algérie).

Vu le gisement de pneus usés disponible en Algérie, d'autres perspectives pourraient être envisagés notamment sous forme de granulats à plusieurs tailles, pouvant servir ensuite dans de diverses applications, tels que la fabrication des bétons. En effet les granulats occupent une grande partie du volume de béton et leurs caractéristiques influencent de manière significative les propriétés du béton. Les propriétés des nouveaux bétons, sont sensiblement affectés par la forme et la texture du caoutchouc ainsi que la façon dont elle est obtenue, susceptibles de varier sur une large gamme. Plusieurs pays peuvent profiter de ce débouché pour les déchets pneumatiques, telle que l'Algérie qui a encore du mal à atteindre ce moyen efficace de recyclage. Traité avec une solution d'hydroxyde de sodium pour améliorer son adhérence avec la pâte de ciment, le granulats de caoutchouc offre des caractéristiques intéressantes du point de vue durabilité, de la densité et de l'élasticité.

Ainsi les bétons légers, obtenus par incorporation des granulats de pneus usagés trouvent des applications relativement courantes dans la confection des structures isolantes (acoustiques et thermiques), antivibratoires (mécanique) ou bien celles destinées à porter des faibles charges. Ces

bétons possèdent une capacité améliorée d'absorption de l'énergie d'impact ainsi qu'une meilleure résistance à la fissuration. Ce composite constitue donc une réponse pour améliorer la résistance à la fissuration de retrait, la principale pathologie qui limite la durabilité des éléments à grande surface (dalles, chaussés).

D'autre part lorsque l'on se réfère aux données disponibles dans la bibliographie il apparaît très clairement que le simple recyclage de pneus sous forme de granulats dans les matériaux à base cimentaire peut être freiné par l'impact très préjudiciable sur la résistance à la compression, la propriété de référence de ce composite. C'est pour cette raison que plus de recherches doivent être faites en Algérie sur l'identification de la valeur ajoutée par l'adjonction de GC et les applications rendues possibles par les nouvelles propriétés des bétons et mortiers. Il s'agit donc d'une recherche des voies de valorisation.

Par ailleurs, la valorisation des pneumatiques en travaux public notamment dans la géotechnique routière est moins contraignante car l'addition du caoutchouc granulaire aux liants bitumineux ou même dans les structures des chaussées, a des avantages appréciables [11].

- Plus grande durabilité
- Résilience de la surface
- Entretien réduit
- Plus grande résistance à la déformation et à la fissuration
- Plus grande résistance à la fissuration aux basses températures
- Plus grande viscosité et rigidité.
- Contribue à la réduction des bruits de roulement
- Remplace des matériaux vierges tels que le styrène butadiène-styrène.

La première application du bitume/caoutchouc, en France, a été en 1965, mais l'idée a été ensuite abandonnée. Le procédé s'est développé ensuite aux Etats-Unis et a fait l'objet d'un brevet. Le principe a été d'incorporer la poudrette de caoutchouc dans le bitume pour améliorer ces performances physico-mécaniques à de différents dosages. Cette utilisation, se développe peu face au développement de l'emploi généralisé des polymères dans les liants modifiés [11]. Dans le but d'améliorer la stabilité thermique et les caractéristiques des revêtements routiers, des études ont permis d'évaluer quelques propriétés techniques fondamentales tels que: le compactage, la compressibilité, la perméabilité, la résistance au cisaillement, module d'élasticité et le coefficient de poisson [12]. Une des possibilités étudiées, est l'incorporation de caoutchouc recyclé dans l'asphalte, dont les toutes premières études ont été prometteuses. Elles ont montré que l'asphalte caoutchouté, présente une meilleure résistance au dérapage, une fissuration par fatigue réduite et une meilleure longévité [13].

Cependant, il faut noter aussi que quelques initiatives sur le recyclage des pneus ont été entreprises en Algérie.

- En 2006 un industriel algérien, Djaffer Ouali, patron de la société Alitco, a signé un accord de partenariat industriel avec l'Italien Marchetti Giovanni Padara pour la création d'une usine à Mostaganem sur la récupération des pneus usagés dont la gomme sera déchiquetée et emballée pour être utilisée dans la confection du bitume pour les routes [14].

- Créée en 2012, Douin Recyclage Caoutchouc est une société Algérienne (implanté dans la Wilaya de Sétif) spécialisée dans la fabrication de granulats de caoutchouc à partir des pneumatiques usagés non réutilisables [9].

- En 2017, Abderrahmane Damou, responsable de l'entreprise Recytech appelle le ministère de l'environnement à intervenir auprès des détenteurs des pneus pour les remettre à la disposition des recycleurs. Depuis sa création, Recytech a recyclé environ 1000tonnes. Un chiffre que Damou qualifié de dérisoire en raison de la capacité de l'entreprise estimée à 12000 tonne par an dans pays qui produit environ 50000tonnes par an [15].

- En 2018, le directeur général de la société Algérienne de recyclage des pneus collectés a annoncé les travaux de réalisation d'une usine de valorisation de pneus usagés dans la zone d'activité de Hassi Bounif (Oran) [8].

Ces pneus collectés par ces entreprises peuvent très bien être valorisés sous forme de granulats ou poudre dans les matériaux cimentaires mais le recyclage des pneus peine à trouver sa place dans ce créneau, les maîtres d'œuvres et les entreprises locaux de la construction ne semble pas être emballer à cette idée vue l'absence de normes nationales spécifiques à cette utilisation.

Au Sénégal, le marché des pneumatiques génère seulement, environ 5000 à 6000 pneus par an (pneus neufs et d'occasion importés) [15]. De plus les difficultés liées à la collecte et au transport des pneus usés, ajoutés l'absence d'études fiables et concrètes pour recenser ou estimer la quantité de pneus usés disponible constituent des obstacles n'ouvrant pas de réelles perspectives à la valorisation des pneus usés dans le béton.

II.1.2 Exemple d'étude d'un béton local conçu à partir de GC [9]

Une étude [9] sur la faisabilité de substituer jusqu'à 25% de sable a été entreprise en 2018. Cette étude a porté sur les compositions retenues dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1 : Compositions des bétons étudiés pour 1 m³ [9].

Notations	Dosage en kg/m ³					
	Ciment	Eau	Gravillon 3/8	Gravier 5/15	Sable	Poudre de caoutchouc
BO	400	242	337	834	591	0
BC ₁₀	400	242	337	834	532	20,6
BC _{17,5}	400	242	337	834	488	36
BC ₂₅	400	242	337	834	443	51,4

*BO : béton ordinaire (Taux de substitution = 0%)

▪ **Comportement rhéologique à l'état frais**

L'auteur [9] a mesuré l'ouvrabilité au cône d'Abram's. Les résultats sont reportés sur l'histogramme suivant :

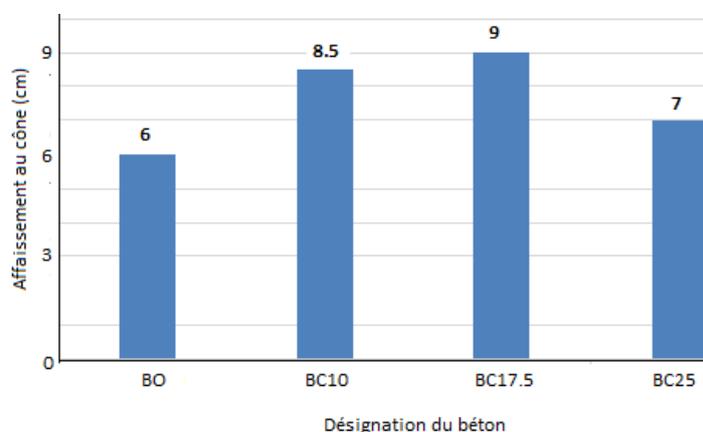


Figure IV.3 : Etalement au cône d'Abram's des quatre bétons confectionnés [9].

Les affaissements mesurés varient entre 6 et 9cm, les quatre compositions peuvent être classées dans la catégorie des "bétons plastiques".

▪ **Comportement à l'état durci**

Les valeurs des résistances en compression à 28 jours mesurées sur cylindres prismatiques (16.32)cm² sont exposées dans la figure IV.4.

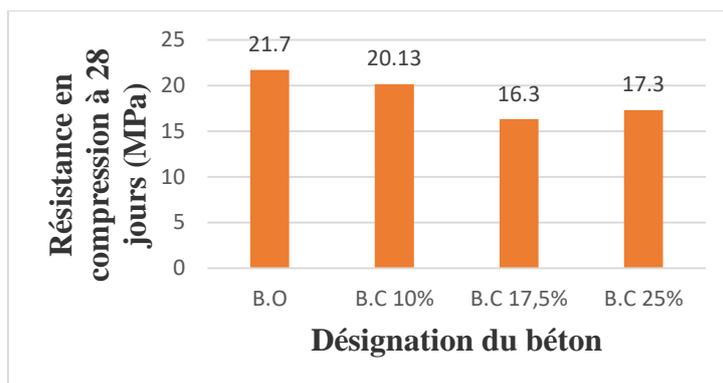


Figure IV.4 : Résistances en compression à 28 jours du béton en fonction du taux de substitution [9].

Selon [9] l'incorporation de poudrette de caoutchouc s'accompagne d'une chute de la résistance du béton à 28 jours. Les chutes constatées varient entre 7,2 et 24,9% et suivent le même sens que le taux de substitution. A titre d'exemple, la substitution de 10% du poids du sable par de la poudrette de caoutchouc fait passer la résistance en compression sur cylindre de 21,7MPa à 20,13MPa, soit une baisse de 7,2%. Cette étude montre qu'il est donc possible de substituer jusqu'à 25% de la quantité de sable par de la poudrette de caoutchouc sans changement du comportement rhéologique à l'état frais ni perte notable des performances mécaniques.

Conclusion : Une partie des 50 milles tonnes de pneumatiques en caoutchouc disponibles annuellement en Algérie (chiffre appelé à augmenté en fonction du parc Automobile) peut être donc recyclé dans l'élaboration des bétons en substituant une partie des granulats. Selon les différentes études entreprises, le taux de substitution maximal se situe au environ de 25%. Cependant la quantité annuelle de pneus usagés ne permet pas de prévoir une utilisation à grand échelle de ce recyclat dans le domaine du béton armé dans l'état actuel.

II.2 Laitiers sidérurgiques

Comme nous l'avons vu au deuxième chapitre, le laitier sidérurgique présente des propriétés remarquables qui le rendent apte à l'emploi comme granulats pour béton lorsqu'il sous forme cristalline et comme constituants du ciment et ajouts cimentaires lorsqu'il est sous forme granulé. Il n'y aucun doute que, de ce fait, qu'il constitue une possibilité de valorisation fort intéressante.

D'un point de vue disponibilité mondiale, les chiffres parlent d'environ 250 millions de tonnes par an de laitier de haut fourneau. Cependant son utilisation comme ajout minéral n'est que d'environ 90 millions de tonnes [16].

En Algérie la production du laitier par les hauts fourneaux du complexe d'El Hadjar d'Annaba dépasse un demi-million de tonnes. Plus précisément il est de l'ordre de 600000 tonnes par an [17] dont en moyenne 430000tonnes de laitier granulé et 170000tonnes de laitier cristallisé [19]. Dans le processus

de fabrication de l'acier, une tonne de fonte produite génère à El Hadjar en moyenne 380kg de laitier [18].

Le tableau suivant résume les statistiques de production du laitier granulé et cristallisé par les hauts fourneaux d'El Hadjar.

Tableau IV.2 : Production du laitier par les hauts fourneaux d'El Hadjar [17, 18].

Désignation	Production (10 ³)									
	1987		1988		1989		1995		2002	
	t/an	%	t/an	%	t/an	%	t/an	%	t/an	%
Laitier granulé	167	57.3	484	71.2	347	62.7	129	34	467	82.5
Laitier cristallisé	124	41.7	196	28.8	206	37.3	250	66	99	17.5
Total	291	100	680	100	553	100	379	100	566	100

Les premières utilisations du laitier granulé de haut fourneau d'El Hadjar dans le domaine du génie civil concernent deux axes qui sont

- **La réalisation des assises de chaussées :**

Les résultats satisfaisants donnés par des planches d'essais réalisées sur les tronçons des routes nationales (RN44 et RN16) dans les années 1970, en utilisant le laitier granulé du premier haut fourneau sous forme de grave – laitier et de sable – laitier ont permis de réaliser le tronçon de la voie express Est – Ouest (Annaba – Tlemcen), reliant les villes d'Annaba et de Berrahal, avec un mélange de laitier granulé moulu, de chaux et de ciment [19, 20].

- **La fabrication du ciment composé (CPJ)**

L'intégration du laitier granulé de hauts fourneaux d'El Hadjar dans la fabrication des ciments a été faite pour la première fois en 1982 par la cimenterie de Hadjar Soud après des essais satisfaisant en laboratoire, validés plus tard par une autre étude [21], suivis d'essais à l'échelle industrielle. Cependant le dosage adopté qui était de 15% ne permettait pas d'absorber tout le laitier granulé de fraîche production et encore moins les stocks de laitier. Aujourd'hui on estime la quantité de laitier, en majorité granulé, stocké à l'intérieur du complexe sidérurgique, à 2 millions de tonnes [17].

L'intégration du laitier granulé dans les ciments a posé un problème aux cimentiers car sa teneur en eau est trop élevée, en moyenne 14%, ce qui nécessitait son séchage. La cimenterie de Hadjar Soud s'est dotée d'un séchoir spécialement pour sécher le laitier granulé. Le dosage en laitier granulé dans le ciment de type CPJ fluctue entre 15 et 25% en fonction de la qualité du clinker produit.

Le tableau suivant donne les dosages de laitier granulé utilisés par la cimenterie de Hadjar soud de [22, 23].

Tableau IV.3 : Consommation du laitier granulé par la cimenterie de Hadjar Soud [22, 23].

Année	1994	1995	1996	1997	2002	2017
Consommation du laitier granulé (%)	19.74	18.28	17.08	13.55	20	

Ainsi malgré, la présence d’usine de fabrication de ciment, la valorisation du laitier reste encore timide. En effet l'utilisation des ajouts minéraux comme le laitier dans la fabrication du ciment a un double avantage écologique et économique. Ces sous-produits de la sidérurgie sont produits en quantités importantes dans le complexe sidérurgique d'El Hadjar.

Malheureusement, seuls 20% de ces résidus sont utilisés par les industriels du ciment. Rappelons que chaque année 600000 tonnes de laitiers sont produites par l'industrie sidérurgique, indiquent les chiffres officiels mais seulement 120000 tonnes sont utilisées annuellement dans l'industrie du ciment. Le reste ne trouve pas preneur chez les cimentiers, encore réticents à employer ce minéral de substitution. Pourtant, en récupérant 60% de ces déchets pour les intégrer à des taux d'addition au niveau des ciments, en termes de substitution on peut aller jusqu'à 30% d'économie sur la production d'une tonne de ciment [24].

Le reste pourrait être utilisé comme granulats dans le béton ou comme ajouts cimentaires une fois finement broyé.

Des réalisations multiples témoignent des prouesses que l’on peut attendre du laitier moulu utilisé comme addition au béton. Ces témoignages, issus du retour de terrain, constituent autant de démonstrations pratiques pertinentes, non seulement de l’aptitude du matériau à satisfaire les exigences liées à la construction de grands ouvrages mais également de la maîtrise de l’utilisation du laitier moulu en ajout à la bétonnière.

Quelques exemples récents documentent ce constat [25] :

- Le stade international irlandais de Rugby/Football (New Lansdowne Road 40 et 70% de laitier moulu),
- le New International Conference Center (Dublin 70% de laitier moulu), l’Anglo-Irish Bank, HQ, (Dublin - 50 et 70% de laitier moulu),
- le Port de Milford (UK - 55% laitier moulu), le Port de Rasfalan (Qatar murs de quai - 60% de laitier moulu),

- une station d'épuration (Dubai - 70 et 50% de laitier moulu en association avec de la fumée de silice).

L'utilisation quotidienne du laitier moulu en Europe, dans les centrales à béton prêt à l'emploi ou en préfabrication, est une démonstration supplémentaire que laitier moulu utilisé comme ajouts cimentaires ne pose aucun problème sur le plan pratique et permet de satisfaire amplement aux exigences physico-mécaniques généralement attendues pour des bétons.

A l'instar de la Belgique, ou le laitier moulu possède, depuis l'été 2004, un agrément technique (ATG) et une certification de haut niveau (d'où sa désignation LMA Laitier Moulu Agréé) et plus généralement en Europe où depuis 2006, la norme Européenne EN 15167-1 relative au laitier de haut fourneau moulu définit les exigences auxquelles doit satisfaire le matériau pour pouvoir être utilisé comme addition dans le béton, les normes doivent évoluer en Algérie visant à promouvoir et réglementer son utilisation comme ajouts dans le béton.

L'utilisation du laitier granulé ou cristallisé d'El Hadjar en qualité de granulats dans le béton est restée au stade expérimental [26, 27].

De plus l'Algérie serait sur la voie de décupler la production de son industrie sidérurgique. D'après le ministre algérien de l'Industrie et des mines, la production sidérurgique annuelle sera portée à 12 millions de tonnes à l'horizon 2020, contre 2,5 millions de tonnes enregistrées en 2016, grâce à l'entrée en exploitation des projets publics et privés en cours de réalisation.

Si le complexe d'El Hadjar arrive à atteindre son niveau de production de 1,2 million de tonnes par an, la capacité globale prévue pourrait augmenter à 13,2 millions de tonnes par an en 2020 [28].

Ceci va encore contribuer à l'augmentation de déchets sidérurgiques comme le laitier.

Cet abondance de cette matière ouvre sans doute la voie à sa valorisation dans le ciment et béton à plus grande échelle voire industrielle.

Au Sénégal, l'Etat ne s'est pas encore dotée d'une usine d'exploitation et de transformation du minerai de fer. Par conséquent des déchets de laitier ne sont pas générés pour envisager une valorisation dans le béton.

Conclusion : *L'Algérie produit actuellement entre 25 et 30 millions de tonnes de ciment par an. En 2021, l'état projette la production de 40 millions de tonnes pour devenir ainsi un pays exportateur de ce produit. La majorité de cette production correspond à des ciments composés (CPJ). Localement ces ciments comportent au moyenne 20% d'ajouts constitués essentiellement de laitier de haut fourneau pour les cimenteries implantés dans l'Est et de pouzzolane naturelle pour les cimenteries implantées dans l'Ouest. Le laitier reste encore sous exploité et ce malgré les nombreuses opportunités qu'il offre dans le domaine des routes, de l'élaboration des ciments et des bétons.*

II.3 Béton de démolition

Les matériaux de démolition présentent souvent une grande diversité, et nécessitent une sélection : afin d'être réutilisés. On peut les classer en quatre grandes catégories :

- (1) Les matériaux de déconstruction de bâtiments et ouvrages d'art : béton (armé ou non), sans enduit, ni plâtre, ni amiante ou autre déchets industriels spéciaux.
- (2) Les matériaux de déconstruction de chaussées : traités ou non aux liants hydrauliques ou hydrocarbonés, bordures en béton, pierre naturelle... (Nb : les granulats enrobés de liant hydrocarbonés sont impropres à la formulation de nouveaux bétons, surtout si ceux-ci sont susceptibles de subir des incendies).
- (3) Les mélanges de matériaux composites : ossatures en béton, maçonnerie, relativement pauvres en plâtre, verre, bois, plastique... etc.
- (4) Les mélanges hétérogènes du même type mais avec des teneurs en matériaux indésirables supérieures à 10%.

Il faut noter que plus de 90% des approvisionnements ont pour origine les catégories (1) et (2). La littérature montre bien la faisabilité d'utilisation des granulats de béton recyclés (béton de démolition) dans un nouveau béton.

En France, on produit chaque année environ 260 millions de tonnes de déchets du BTP, seule une fraction de ces déchets sont recyclés, et ne sont à présent destinés qu'aux travaux routiers. La part de granulats recyclés est estimée à seulement 10% de la production nationale totale de granulats [29].

Pendant ce temps, certains pays Européens comme l'Allemagne, les Pays Bas, le Danemark, la Norvège ou la Suisse, réalisent déjà des bétons de structure incorporant du granulat recyclé.

Quelques projets expérimentaux de réutilisation du béton de déconstruction dans le bâtiment ont déjà vu le jour en Europe [30]:

- ✓ Suisse : école «Leutschenbach», 2009.
- ✓ Suisse : appartements «Brunnenhof», 2007.
- ✓ République Tchèque : «multipurpose experimental building» à l'UCEEB, 2014.
- ✓ Belgique : «A recycled house», 2000.
- ✓ Royaume-Uni: «New operations center for Wessex Water», 2000.

La figure suivante illustre bien l'utilisation possible des bétons de GBR, où BR-R = Béton recyclé à base de GBR (Granulats de Béton Recyclés);

BR-M : Béton recyclé à base de granulats mixtes recyclés.

BR-R (au moins 25% de GBR) et BR-M (au moins 25% de granulats mixtes recyclés).

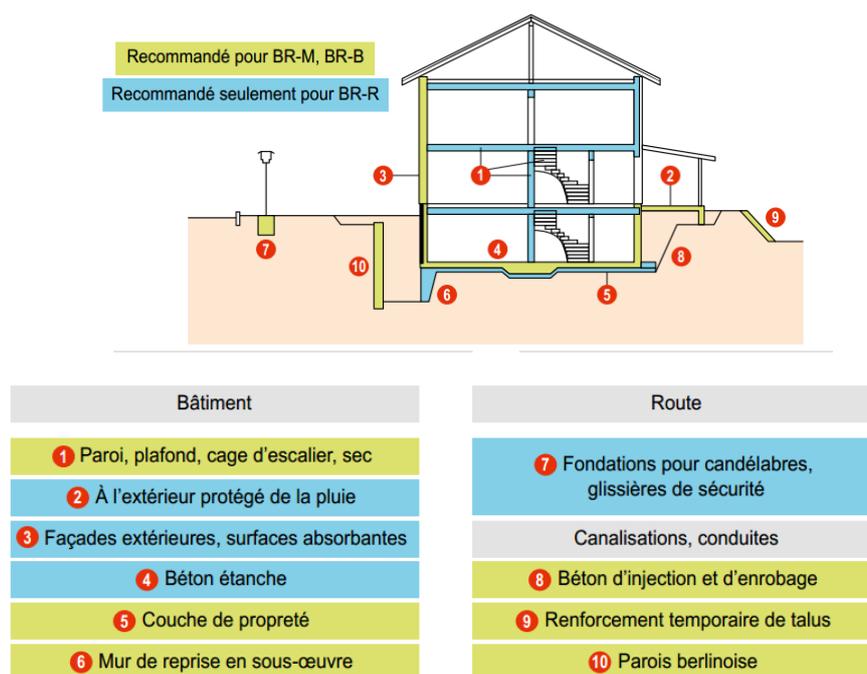


Figure IV.5 : Utilisation possible des granulats de béton recyclés [31].

En Algérie l'absence d'un service fiable de la collecte des déchets inertes et l'inexistence des décharges destinées à ce type de déchets ou des Centre d'enfouissement technique de classe 2 (réservée aux déchets ménagers et assimilés), font que le recensement précise de la quantité de déchets de démolition est impossible à l'heure actuelle. Face à cette situation des dépotoirs sauvages sont apparus dans tous les communes et parfois même au sein des quartiers et des villages. Une estimation a été effectuée par le Centre National d'Étude et de Recherche Intégrée en Bâtiment (CNERIB) sur les déchets inertes de quatre wilayas de la région de centre, (Alger, Blida, Boumerdes, Tipaza) il l'estime entre 300 mille à 500 mille t/an dont 40% de béton.

En 2003, suite au séisme qui a touché la wilaya de Boumerdes de nombreuses bâtisses ont été démolies et plus de 2,5 millions de tonnes de déchets inertes ont été enregistrées. À l'image des autres villes Algériennes, la wilaya de Constantine compte plus de 64,8t/an des déchets inertes [32].

La production Algérienne annuelle des déchets inertes issus essentiellement du domaine du Génie civil (Déchets de construction & démolition), est estimée à environ 11 millions de tonnes en selon le rapport sur la gestion des déchets solides en Algérie [6].

Cependant, la valorisation est basée uniquement sur la réutilisation de ce type de déchets dans le remblayage ou bien sont destinés à être enfouis dans des centres d'enfouissement (CET).

En effet, Il est prévu, la réalisation d'au moins un CET de classe 3 par Wilaya. On dénombre actuellement 54 opérations de CET de classe 3 inscrits pour la réalisation, parmi lesquels, 09 CET sont achevés, dont six (06) sont en exploitation.

En général, la collecte et le transport des déchets de construction et de démolition sont à la charge des particuliers. Les décharges de gravats sont mises à la disposition des producteurs de ces déchets moyennant la somme d'environ 1000DA par camion d'environ 2,5 tonnes. Malheureusement, le nombre trop insuffisant de décharges et l'incivisme de certaines personnes, ont favorisé la création de dépôts anarchiques le long des routes, des rives des oueds et à proximité des espaces verts [6].

Ces derniers peuvent présenter un gisement valorisable rentable, d'autant plus qu'un grand nombre d'infrastructures provenant de l'héritage colonial arrivent à la fin de leur cycle de vie. Il est donc important d'en tirer un bénéfice maximal en trouvant des alternatives efficaces, pérennes et rentable comme le recyclage dans la confection de nouveaux bétons résistance moyenne destinés à la construction résidentielle, dans les constructions de sous fondation de route, et des conditions d'agressivité faibles.

La composition mixte sable recyclé et gravier naturel est la mieux envisageable dans l'immédiat et le problème de l'indisponibilité de granulats en fins constaté pour certaines régions en Algérie, se trouve résolu. L'utilisation des granulats recyclés dans le béton offre une solution prometteuse aux problèmes des déchets de démolition [33].

[34] a réalisé une étude économique complète en comparant les coûts et bénéfices engendrés par la méthode de production de granulats actuelle avec ceux engendrés par la méthode de recyclage (tableau IV.4). Il a été démontré que sur le long terme les granulats recyclés sont économiquement bien plus intéressants, mais que le facteur «disponibilité» affecte quelque peu la viabilité de cette méthode. En effet, la quantité de matériaux disponibles est limitée par le nombre de chantiers de démolition locaux, et quand les producteurs de granulats recyclés échouent à fournir la quantité souhaitée, alors les granulats naturels redeviennent la source d'approvisionnement numéro un.

Tableau IV.4 : Comparaison du prix agrégats dans quelques pays [34].

Pays	(1) Prix moyen des agrégats recyclés €/t	(2) Prix moyen des agrégats naturels €/t	Rapport (1)/(2)
France	4.4–9.0	3.6–6.5	1.2–1.4
Espagne	3.0	6.0–14.4	0.2–0.5
Belgique	2.4–7.2	2.4–10.8	0.7–1.1
Royaume-Uni	3.3–8.4	4.4–15.2	0.5–0.6
Allemagne	4.8–8.4	6.5–8.8	0.7–0.95
Pays Bas	8.7	11.4	0.76

Dans la mesure où il est probable que les granulats recyclés soient plus proches des lieux de leur consommation que les granulats naturels, en particulier dans les grandes agglomérations, l'utilisation croissante des granulats recyclés devrait permettre de réduire les coûts de transport.

Ainsi La première étape à franchir en Algérie serait de calquer les méthodes de démolition sur d'autres pays d'Europe qui aujourd'hui recyclent quasiment tout leur béton. Le maximum est atteint en Suisse avec 95% de béton recyclé, l'Allemagne suit avec 80% et en France à un taux de recyclage de 62% [29].

Par ailleurs, aujourd'hui en Algérie la réutilisation des déchets de démolition de chantiers du bâtiment pourrait s'avérer plus complexe.

En effet, les ouvrages d'art sont faciles à recycler, puisque constitués presque uniquement de béton. Dans un bâtiment, le béton cohabite avec d'autres matériaux très divers (bois, plastiques, métaux, verre, brique...) Le recyclage du béton n'est alors possible qu'à la suite d'un tri des matériaux, on parle ici de «déconstruction». Cette opération est onéreuse, et jusqu'à présent n'était pas nécessairement demandée dans les appels d'offres et non prévue dans le financement.

De plus, si ce système de recyclage du béton est aujourd'hui si peu systématiquement mis en place, c'est avant tout parce que les premières études réalisées en laboratoire tendent à montrer que les bétons élaborés à partir de granulats recyclés présentent des problèmes d'hétérogénéité, et quelques difficultés de mise en œuvre (problème d'ouvrabilité, nécessité d'utiliser plus d'eau et plus de ciment pour atteindre des performances mécaniques similaires aux bétons standards).

En France l'applicabilité des règles de calcul de l'Eurocode 2 aux granulats recyclés n'est pas encore établie. Le dispositif normatif est le même pour les granulats naturels et recyclés, bien que certaines caractéristiques spécifiques à ces derniers induisent une réflexion autour de son applicabilité.

Selon la norme EN 206-1, l'utilisation des granulats recyclés a été autorisée, mis à part dans les bétons précontraints, mais dans des proportions limitées qui dépendent de leur qualité et de la classe de résistance souhaitée pour le béton.

Trois types de gravillons recyclés sont définis :

- Type 1 : Au moins 95 % de béton ou granulats non liés
- Type 2 : Au moins 90 % de béton ou granulats non liés
- Type 3 : Au moins 70 % de béton ou granulats non liés

Le taux de substitution maximal autorisé de granulats recyclés en % par rapport à la masse totale de gravillon ou de sable varie de 30% pour les gravillons de type 1, à 15% pour les gravillons de type 2 et 5% pour les gravillons de type 3. De plus, les gravillons recyclés de type 2 et 3 ainsi que les sables recyclés ne peuvent être utilisés que pour des bétons de résistances inférieures ou égales à C25/30 [30].

Par contre en Algérie des questions liées aux normes restent toujours posées. C'est pourquoi Il faudra aussi envisager quelques évolutions ou aménagements normatifs et notamment la norme Algérienne sur les bétons et les ciments pour une optimisation de l'utilisation des granulats de béton recyclés.

D'autre part plusieurs axes de recherches restent encore à défricher. La variabilité des matériaux issus du gisement de bétons recyclés ne doit pas être négligée car le gisement n'étant pas naturel, la variabilité est plus importante, donc il faudra notamment s'assurer que le granulat ne souffre pas de pollution. Et il faut intégrer le fait que les granulats recyclés absorbent plus d'eau.

Plus de recherches sur les questions liées à l'impact des mortiers accolés aux bétons issus de la déconstruction doivent être établies. L'idéal serait tests destinés à séparer la pâte de ciment du gravillon naturel.

Au Royaume-Uni, on demande de ne pas utiliser de granulats recyclés quand il y a une exigence feu [35], il serait donc intéressant en Algérie d'étudier son comportement face à ce dernier.

Conclusion : *L'Algérie fait face à deux défis majeurs ; un parc immobilier qui comporte des dizaines de milliers de logements vétustes, appelés à être démolis et un risque sismique très élevé. Ces deux phénomènes cumulés conduisent à des déchets issus de la démolition estimés à plus de 11 millions de tonnes par année. Les quantités sont considérables et permettent de contribuer à réduire fortement à la production des granulats traditionnels. Leur emploi reste tributaire d'études spécifiques sur ces déchets, et l'établissement de normes nationales.*

Pour un pays en voie de développement comme le Sénégal ou on note plus ou moins une carence en terme d'infrastructures, les activités de démolition sont très rares (voire inexistantes). Par conséquent les débris de démolition sont très peu et donc les perspectives d'une valorisation de ces déchets dans le béton sont pour le moment négligées.

II.4 Déchets de briques

La production Algérienne des produits rouges qui font partie du secteur des matériaux de construction concerne essentiellement la fabrication de briques à 98% et en quantité plus faible, les tuiles et produits divers. La brique rouge est le matériau de construction le plus utilisé dans la construction des murs en raison de leur facilité d'utilisation; ces bonnes caractéristiques techniques et de leur adaptabilité au climat.

La brique a longtemps été fabriqué selon des méthodes artisanales, l'introduction de fours modernes utilisant l'énergie fossiles (chaleur, fuel, et gaz) et /ou énergie électrique rend leur fabrication facile. La technologie a progressé vers l'automatisation entière du procédé.

Tableau IV-5 : Etat de la production des briqueteries en Algérie [36].

Région	Nombre	En activité	En projet
Centre	57	35	12
Est	51	34	9
Ouest	41	31	4
Sud	20	16	3
Totaux	169	121	28

La production Algérienne s'élève actuellement à plus de 30 millions de tonnes par année [37]. E cette industrie génère entre 10 et 15% de casses, ce qui est correspond à une masse de déchets variant entre 3 et 4,5 millions de tonnes, ce qui est considérable. Deux options s'offrent à l'Algérie quant à l'utilisation de ces déchets.

Deux options s'offrent à l'Algérie quant à l'utilisation de ces déchets :

▪ **Comme substituant aux granulats**

[38] ont étudié l'utilisation des déchets de brique comme substituant des gros et fins agrégats dans la formulation des bétons. Ils ont formulés des bétons en substituant, 25, 50, 75 et 100% de granulats gros et des bétons formulés avec 25, 50, 75 et 100% de granulats fins et d'autres bétons avec des substitutions variantes des gros et fin granulats 100/100%, 50/50% , 75/25%, 25/75%. La comparaison des résultats des déférents types de bétons avec le béton de référence formulé avec des granulats naturel 0/0% a aboutie aux résultats suivants:

- 1) la résistance à la compression à l'âge de 28 jours diminue de 35, 30 et 40% lorsque les gros, les fins et les deux granulats respectivement sont substitués par les déchets de brique.
- 2) la résistance à la flexion diminue de 15 à 40%.
- 3) le rapport résistance à la compression /résistance à la flexion varie de 8,1 à 11,8.
- 4) le module d'élasticité diminue de 30, 40 et 50% lorsque les gros, les fins et les deux granulats respectivement sont substitués par les déchets de brique.

▪ **Comme substituant au clinker**

Dans le cadre d'une thèse au niveau du laboratoire de génie civil et d'hydraulique de l'université de Guelma, [36] à mise au point un nouveau ciment composé élaboré à partir de déchets de briques finement broyés. Ces travaux ont abouti à la mise au point d'une fiche technique (voir annexe A) qui synthétise l'ensemble des résultats obtenus et qui sont tous en conformité avec les prescriptions de la norme Algérienne NA/442 [38] qui rappelons le définit les conditions d'utilisation et de spécifications des ciments.

▪ **Impact sur l'émission de dioxyde de carbone**

Dans la littérature, on trouve que l'émission de gaz carbonique CO₂ générée par l'industrie cimentaire est proportionnelle à la production. En nous basant sur la formule donnée par [32], on peut estimer la quantité de CO₂ émise par tonne de ciment produite.

Le CO₂ émit par la production du ciment est due à la décarbonation du calcaire utilisé comme matière première pour la fabrication du clinker et aux combustibles nécessaires à la calcination du clinker.

$$E_{cp} = (K_c \times CaO_{clinker} \times Clinker_{ciment})C_p \quad Eq. (IV. 1)$$

Avec:

K_c: Coefficient égal à 0,785 (g/mol de CO₂)/ (g/mol de CaO);

CaO_{clinker}: pourcentage de CaO dans le clinker ;

Clinker_{ciment} : pourcentage du clinker dans le ciment,

C_p : production annuelle du ciment.

Ainsi en appliquant la formule de l'équation IV.1 pour un ciment sans ajouts de déchets de briques et un ciment contenant 10% de poudres de briques, et pour une nationale de 25 millions de tonnes, on aboutit à :

Selon les résultats de l'analyse chimique [36], le pourcentage de CaO dans le clinker est de 0,668, le pourcentage du clinker dans le ciment sans ajout (C0) est de 95% ; et enfin le pourcentage du clinker dans le ciment contenant 10% de poudres de briques (C10) est de 85%.

En appliquant la formule (4-1), on trouve:

CO₂ émis par le procédé de calcination du calcaire.

E_{cal} =12,454 millions de tonnes pour un ciment de référence.

E_{cal} = 11,143 millions de tonnes pour ciment contenant 10% de déchets de briques.

L'émission de CO₂ par les combustibles n'est pas la même pour les deux échantillons.

Ainsi la substitution de 10% de clinker par des déchets permet de réduire, au niveau du territoire national, l'émission en CO₂ de plus 1,311 millions de tonnes/an, ce qui est loin d'être négligeable.

Conclusion : *Les déchets de briques se trouvent en abondance en Algérie, avec un fort potentiel d'utilisation comme substituant aux granulats naturels (on peut aller jusqu'à un taux de 20%) ou comme ajout dans la fabrication des ciments composés (le seuil limite est de 10%). Un ciment élaboré [36] à partir de déchet de brique a été élaboré et il répond à l'ensemble des conditions préconisées par la norme Algérienne NA/442. Ainsi ce déchet peut être une solution futuriste dans la fabrication des ciments composés au niveau des cimenteries nationales, et outre une baisse prévue du prix de revient, son utilisation permet une réduction sensible des émissions en CO₂, contribuant ainsi à la protection de notre environnement.*

II.5 Les fillers

Les fillers sont des matières inorganiques minérales, naturelles ou artificielles spécialement sélectionnés. Ils peuvent être inertes ou présenter des propriétés faiblement hydrauliques. Les fillers sont obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitier, bentonite, cendres volantes). L'introduction de ces matières dans la composition du ciment, avec une granulométrie et préparation appropriée améliorent les propriétés physiques des ciments, telles que l'ouvrabilité ou le pouvoir de rétention d'eau. Ils sont utilisés principalement comme ajout secondaire aux ciments composés ou carrément comme ajout cimentaire. L'entreprise nationale des granulats [40] ont étudié le fuseau granulaire des fillers calcaires de l'Est Algérie,

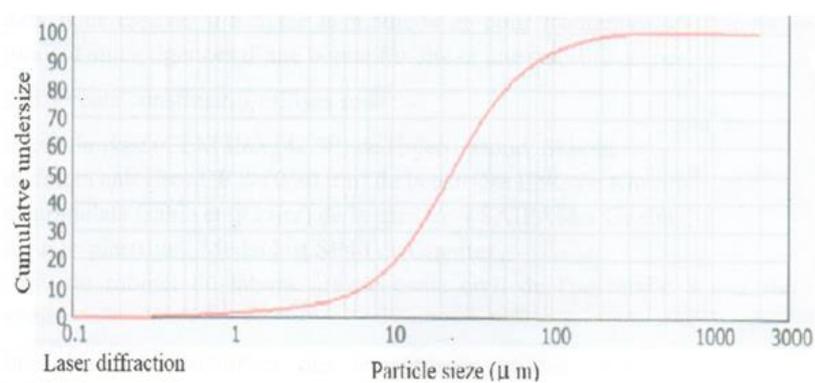


Figure IV.6 : Courbe granulométrique des fillers calcaires locaux [40].

Ces produits se trouvent en abondance aux niveaux des unités de concassage. Ils peuvent substituer le ciment dans un ratio allant jusqu'à 25%, ce qui est considérable. Leur utilisation au niveau national reste actuellement limitée à des travaux de recherches uniquement.

Conclusion : *En Algérie, et vu le nombre considérables d'unités de concassage, la disponibilité des fillers (principalement calcaires) ne pose pas de problème. Ils peuvent être utilisés comme fines, c'est à dire compléter les parties fines manquantes d'un sable par exemple, ou comme ajout cimentaire. Dans ce cas, ils se substituent au ciment dans un ratio allant jusqu'à 25%, ce qui est considérable. Selon les informations disponibles, leur utilisation au niveau national reste actuellement limitée à des travaux de recherches uniquement.*

III. Conclusion du chapitre

Les objectifs visés par notre travail est d'établir une synthèse sur les différents déchets industriels et autres aptes à être recyclés dans l'élaboration des liants hydrauliques et des bétons, et d'étudier leurs faisabilité au niveau national. Une utilisation massive de ces matériaux aura sans aucun des conséquences considérables sur le prix de revient des ouvrages à cause de leur faible cout et également sur l'environnement où les industries (particulièrement cimentières) sont soumises à des quotas très strictes en matière d'émission de CO₂ et ce dans le cadre du fameux protocole de Kyoto de 2004.

Au niveau disponibilité locale, notre recherche laisse apparaître que les laitiers de haut fourneaux, les déchets de briques, les déchets de verre, les déchets de démolition, les déchets de plastiques, les déchets de marbres et les fillers se trouvent en quantités suffisantes, leur permettant de prévoir leurs utilisation dans le domaine du génie civil au niveau local. Cependant un manque d'études spécifiques et de normes freinent encore une large utilisation des recyclât au niveau Algérien.

Références bibliographiques

- [1] Trouzine.H., Asroun.A., Asroun.N., Belabdelouhab.F., Thanh Long.N., Problématique des pneumatiques usagés en Algérie, Revue Nature & Technologie. n° 05/Juin 2011. Pages 28 à 35.
- [2] Rodriguez.IDM.; Laresgoiti.MF.; Cabrero.MA.; Torres.A.; Chomon, MJ 2001, 'Pyrolysis of scrap tyres', Fuel Processing Technology, vol 72, pp. 9-22.
- [3] Oyedun.A., Lam.K-L., Fittkau.M., Hui.C-W., 2012, 'Optimisation of particle size in waste type pyrolysis', Fuel, vol 95, pp. 417-424.
- [4] <http://www.motors-dz.com/>
- [5] Akkouche.N., Optimisation de la valorisation énergétique des gaz de pyrolyse des pneus hors d'usage, thèse de doctorat, Université M'hamed Bougara - Boumerdes, 2016/2017.
- [6] Rapport sur la gestion des déchets solides en Algérie, Avril 2014.
- [7] Trouzine. H, Asroun.N, Belabdelouhab.F, 'Problématique des pneumatiques usagés en Algérie', Nature & Technologie, no. 5, pp. 283.
- [8] <https://revade.dz/archives>, site consulté le 29/04/2019.
- [9] Aissaoui.W., Etude expérimentale des propriétés mécaniques des bétons élaborés à base de granulats en caoutchouc, Mémoire de Masters, Université 8 Mai 1945, Juin 2018.
- [10] Meziani.F., Gabi.S., Kahil.A., Réduction de la pollution de l'environnement par le recyclage et la valorisation des pneus usagés, Communication Science & Technologie N°10 janvier2012 COST.
- [11] Medine.M., Etude expérimentale des bétons légers Incorporant des granulats issus du broyage des pneus usés, thèse de doctorat, Université Djillali Liabès, Algérie, 08/03/2018.
- [12] André.L.R., Stéphane.O., Les réactions sulfatiques: conditions de formation, structure et expansion des minéraux secondaires sulfatés, Bulletin Des Laboratoires Des Ponts Et Chaussées - 225 - Mars-Avril 2000 - Réf. 4316 - PP. 41-50
- [13] Adams.C., Lamborn.M., Shuler.S., (1985). Asphalt-Rubber Binder Laboratory Performance. Report FHWA/TX-8571, 347-1F, Texas Department of Highways and Public Transportation.
- [14] <https://www.djazairress.com/fr/elwatan/36836>; 29/04/2019.
- [15] <https://sudhorizons.dz/fr/les-news/les-manchettes/17327-le-recyclage-des-pneus-usages-bute-faute-d-approvisionnement>
- [16] Bucchi.R., Features on the role of minor compounds in cement clinker, Part II, World Cement Technology., vol. 12, N°6, p. 258-273. 1981.
- [17] Malmek.A., Caractéristiques physico - chimiques du laitier de haut fourneau ». Séminaire sur la valorisation des laitiers et des coproduits sidérurgiques - Annaba, Algérie; 29 et 30 Novembre 1998.
- [18] Document technique de la direction de la recherche appliquée du complexe sidérurgique d'El Hadjar, 1989.
- [19] Document technique, statistiques de production de COPROSID, Janvier 2003.
- [20] Boudjellali.A., 'Utilisation du laitier en techniques routières», Séminaire sur la valorisation des laitiers et des coproduits sidérurgiques - Annaba, Algérie 29 et 30 Novembre. 1998, p 44 - 48.
- [21] Behim.M., 'Utilisation du laitier de haut fourneau d'El Hadjar en cimenterie, Thèse de Magister, Université d'Annaba – Algérie, 1987, pp 118.
- [22] Mechoiuak., 'utilisation des laitiers granulés a la cimenterie de Hadjar Soud, Séminaire sur la valorisation des laitiers et des coproduits sidérurgiques - Annaba 29 et 30 Novembre. 1998 (Algérie), p 80 – 90.
- [23] Document technique du laboratoire de la cimenterie de Hadjar Soud, Décembre 2002.
- [24] <http://revue.umc.edu.dz/index.php/b/article/view/187>, site consulté le 02/05/2019.
- [25] http://www.ecocem.ie/index.php?p=abo_ut&q=case_studies, site consulté le 02/05/2019.
- [26] Menadi.S., Contribution à l'étude des caractéristiques mécaniques des bétons de laitier, thèse de magister, Université Dadjji Mokhtar d'Annaba, département de génie civil, 1994.

[27] Guetteche.N., Valorisation des laitiers dans les ciments et les bétons, thèse de doctorat, Université des frères Mentouri de Constantine, département de génie civil, 2002.

[28] <https://afrique.latribune.fr/entreprises/industrie/2017-12-20/algerie-montee-en-puissance-de-la-production-siderurgique-762441.html> ; 05/04/2019.

[29] Laneyrie.C., Valorisation des déchets de chantier du BTP : comportement à haute température des bétons de granulats recyclés; thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, France, 15 décembre 2014.

[30] Use of recycled materials as aggregates in the construction industry (Vol 2), 2000, The ETN Recycling in Construction.

[31] Tolido Filho.RD., Gonçalves.IP., Americano.BB., Fairbairn.R., Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil, Cement and Concrete Research 37 (2007) 1357-13650.

[32] Tolido Filho.RD., Gonçalves.IP., Americano.BB., Fairbairn.EM.R., Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil, Cement and Concrete Research 37 (2007) 1357-13650.

[33] Berredjem.L.; Le recyclage des bétons de démolition, Solution pour le développement durable Formulation et comportements physiques et mécaniques des bétons recyclés; thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar – Annaba, Algérie, 2009.

[34] Vivian.W.Y., Tam, Economic comparison of concrete recycling: A case study approach, Resources, Conservation and Recycling 52 (2008) 821–828.

[35] <https://www.usinenouvelle.com/>, site consulté le 04/05/2019.

[36] Nigri G., Etude de l'influence des ajouts minéraux sur la qualité et les propriétés du ciment. Mémoire de Magister, Université 8 Mai 45, Guelma, Algérie. (2005).

[37] Tolido Filho.RD., Gonçalves.IP., Americano.BB., Fairbairn.EM.R., Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil, Cement and Concrete Research 37 (2007) 1357-13650.

[38] Debieb.F., Kenai.S., The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. Construction and Building Materials 22 (2008) 886–893.

[39] Norme Algérienne NA/442, Liants hydrauliques - Définition, classification et spécification des ciments, IANOR, 1994.

[40] Entreprise nationale des granulats, rapport d'analyse du laboratoire central N°84, du 02-08-2012.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire de fin d'études s'articule principalement autour d'une recherche bibliographique entreprise sur la valorisation de certains déchets, en vue de les recycler dans le domaine du génie civil et plus précisément dans l'élaboration des bétons, des ciments composés ou sous formes d'ajouts cimentaires.

Le premier chapitre a exposé dans sa première partie des généralités sur les déchets, notamment leur classification normalisée, les méthodes techniques de leur gestion ainsi que les textes réglementaires qui les régissent en Algérie au Sénégal et en Guinée. Dans la seconde partie nous avons établi une synthèse globale sur les déchets potentiellement recyclable dans le domaine génie civil. Ces déchets recyclables en construction comprennent notamment : les laitiers de haut fourneau, les mâchefers, les scories, les cendres volantes, la poudrette de verre, les pneus usagés, le ciment durci, les résidus d'incinérateurs, les boues rouges, les déchets de démolition, les déchets de briques, les sables de fonderies, les déchets plastiques, les fillers et les déchets de marbre. Certains de ces déchets utilisés dans d'autres pays ne sont pas disponibles au niveau local.

Dans le deuxième chapitre on a montré, à travers les résultats de plusieurs recherches entreprise, qu'une partie (jusqu'à 50%) des granulats traditionnels (sable et graviers), qui constituent entre 63 et 85% du poids du béton, peut être remplacée par des recyclât issus notamment des bétons recyclés (BR), des pneus usagés et du laitier de haut fourneau. Les résultats de ces études, montre que l'opération de substitution partielle de la phase inerte (sable+graviers) par des recyclât ne s'accompagne pas de changement majeurs du comportement du béton aussi bien à l'état frais que durci. La durabilité elle-même n'est pas trop affectée. Ainsi le remplacement d'une partie des granulats traditionnels par ces déchets peut s'avérer très intéressant d'un point de vue économique, car les recyclât sont souvent des produits à faible coût, mais également écologique (leur utilisation massive permet la réduction les émissions en CO₂, qui reste l'un des facteurs les plus aggravant de notre environnement).

La substitution d'une partie du clinker par des ajouts comme le laitier de haut fourneau, les fillers calcaires, etc. permet une réduction du prix des ciments. De même que l'utilisation des ajouts cimentaires (jusqu'à 30% dans certains cas) permet une réduction notable de la consommation en ciment, qui reste le matériau le plus chère dans l'industrie du béton.

Le troisième chapitre qui expose une synthèse d'études scientifiques met en évidence ces deux points. La synthèse montre qu'en plus des ajouts cimentaires normalisés (Fillers de calcaires, pouzzolanes, laitiers de haut fourneau, fumée de silice, cendres volantes et schistes calcinés) d'autres matériaux issus du recyclage peuvent être également utilisés. C'est le cas notamment de la partie fine des bétons de démolition, de la poudrette de verre, des fines issues de l'industrie du marbre et de déchets de briques rouges.

PERSPECTIVES

En Algérie, on estime à plus de 23 millions de tonnes de déchets générés par les ménages et les différentes industries annuellement. Seulement 10% sont recyclés, ce qui reste très faible comparativement à d'autres pays, comme l'Allemagne par exemple, où le taux de recyclage dépasse les 40%. Des efforts doivent être consentis donc en vue d'augmenter le taux de recyclage.

Concernant les perspectives de recyclage des matériaux au niveau national, l'utilisation pratique de certains recyclât, malgré l'existence d'un fort potentiel (voir les chiffres exposés dans le tableau suivant) reste très timide pour ne pas dire inexistante. Concernant le béton, les informations recueillies montrent qu'aucune application pratique n'a été effectuée jusqu'à ces jours et ce malgré que plusieurs recherches ont été entreprises dans le cadre de mémoire de master, de magister ou de doctorat. Cette même remarque s'applique à l'industrie cimentaire qui continue à utiliser les deux ajouts traditionnels que sont le laitier de haut fourneau et la pouzzolane. Cette absence d'utilisation pratique par les professionnels peut trouver son explication pour plusieurs causes : absence de procédure quant à l'utilisation de ces recyclât, manque de normes locales spécifiques à ces sous-produits.

Il est donc vivement souhaitable pour l'Algérie d'engager des thèmes de recherches spécifiques avec comme objectif d'établir des protocoles pratiques d'utilisation, notamment dans le domaine de l'élaboration, mise en œuvre, etc. (à l'instar du projet européen Seramco (Secondary Raw Materials for Concrete Precast Products) mais également de procéder à la mise en place de normes spécifiques à l'utilisation des recyclât dans béton à l'instar de certains pays européens, qui ont élaboré une norme qui autorise depuis 2014, jusqu'à 50% de gravillons recyclés dans les bétons selon la classe d'exposition du béton et la qualité du granulats recyclé.

A partir des données recueillies (voir quelques exemples présentés dans l'annexe B) et des expériences dans d'autres pays, nous reproduisons dans le tableau suivant, les domaines d'utilisation actuelle de certains recyclât ainsi que les domaines potentiels futurs en Algérie.

Conclusion générale et perspectives

Désignation du recyclât	Quantité disponible (par an)	Domaines d'utilisations actuelles	Domaines d'utilisations potentielles
Laitiers de haut fourneau	600000 tonnes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fabrication des ciments composés ▪ Fabrication des chaussées 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Granulats pour béton
Déchets de briques	3000000 tonnes	//	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fabrication des ciments composés ▪ Granulats pour béton
Bétons de démolition	1100000 tonnes	Remblai	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fabrication des ciments composés ▪ Granulats pour béton
Pneus usagés	50000 tonnes	Stabilisation des talus	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Granulats pour béton ▪ Chaussée de routes ▪ Liant dans les bitumes
Fillers	//	Fabrication des ciments composés	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ajouts cimentaires ▪ Compléments granulaires
Déchets plastiques	2000000 tonnes	//	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fabrication des corps de chaussées
Déchets de marbre	//	//	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Granulats pour béton ▪ Ajouts minéraux
Déchets de production de l'industrie du béton	//	//	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fabrication des ciments composés ▪ Granulats pour béton
Déchets de verre	//	//	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fabrication des ciments composés ▪ Ajouts cimentaires
Ciment durci	//	//	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Granulats pour béton
Sables de fonderie	//	//	//
Boues rouges	//	//	//
Résidus d'incinérateurs	//	//	
Mâchefer	//	//	//
Scories	//	//	//
Cendres volantes	//	//	//

ANNEXE A

Laboratoire de Génie Civil et Hydraulique (LGCH)

FICHE TECHNIQUE

CIMENT CPJ – CEM II / A 42,5 (NA 442)

Valeurs moyennes

Composition chimique

	(%)
Perte au feu	3,23
Teneur en CaO libre	2,00
Teneur en sulfates SO ₃	2,23
Teneur en chlorures (Cl)	0,01
Teneur en oxyde de magnésium MgO O	1,72
Résidus insolubles (%)	7,89

Composition minéralogique du clinker (Bogue)

	(%)
Silicate tricalcique C ₃ S	60
Silicate bicalcique C ₂ S (%) :	16
Aluminate tricalcique C ₃ A (%) :	10
Aluminoferrite tetracalcique C ₄ AF(%)	9

CIMENT CPJ-CEM II/A 42.5N -NA442-

Propriétés physiques

	(%)
Masses volumiques apparentes (g/dm ³)	930
Masses volumiques absolues (kg/m ³)	3040
Expansion (mm)	0,13
Temps du début (min)	220
Temps de fin (min)	283
Consistance normale (%)	25,6
Retrait à 28 jours	
Surface spécifique (m ² /g) :	4080

Propriétés mécaniques

	(%)
Résistance à la compression à 2 jours (MPa)	16,6
Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	47,2
Résistance à la compression à 90 jours (MPa)	56,2
Résistance à la flexion 2 jours (MPa)	3,69
Résistance à la flexion 28 jours (MPa)	7,47
Résistance à la flexion 90 jours (MPa)	7,83

Le **CIMENT CPJ-CEM II/A 42.5N -NA442-** est un ciment résultant de mouture de 85% du clinker, 10% de déchets de brique et 5% de gypse.

Ce ciment répond aux exigences des normes Algériennes **NA442 et NA443**.

Domaine d'utilisation

Le **CIMENT CPJ-CEM II/A 42.5** est préconisé pour tous les travaux de bétons.

Laboratoire de génie civil et hydraulique (LGCH)

Université 08 Mai 1945 Guelma, Algérie

ANNEXE B

Quelques indicateurs de production et de besoin, en Algérie, au Sénégal et en Guinée

Production Algérienne en Acier [1]

La production sidérurgique annuelle en Algérie sera portée à 12 millions de tonnes à l'horizon 2020, contre 2,5 millions de tonnes enregistrées en 2016, grâce à l'entrée en exploitation des projets publics et privés en cours de réalisation.

Ainsi, aux 3,5 millions de tonnes annuelles de capacité installées actuellement, sans le complexe El Hadjar, viendront s'ajouter les 8,5 millions de tonnes par an des projets en cours. Selon le ministre, si le complexe El Hadjar arrive à atteindre son niveau de production de 1,2 million de tonnes par an, la capacité globale prévue pourrait augmenter à 13,2 millions de tonnes par an en 2020[1].

[1] <https://afrique.latribune.fr/entreprises/industrie/2017-12-20/algerie-montee-en-puissance-de-la-production-siderurgique-762441.html>.

Production Algérienne en ciment [2]

La production du ciment en Algérie, qui oscille actuellement entre 25 et 30 millions de tonnes, atteindra les "40 millions de tonnes par an en 2020". "Cette augmentation de la production nationale permettra l'exportation de 10 millions de tonnes de ciments.

[2] <http://www.radioalgerie.dz/news/fr/article/20181023/153303.html>.

Production Sénégalaise en ciment [3]

La production de ciment du Sénégal au terme de l'année 2017 a atteint 6.441.100 tonnes, a appris APA auprès de la Direction de la Direction de la prévision et des études économiques (DPEE). Cette structure s'est basée sur les données établies par deux cimenteries (Sococim et Cimehttps).

[3] [https://www.journaldebrazza.com/senegal-la-production-de-ciment-depasse-6440-millions-de-tonnes-en-2017/nts du Sahel](https://www.journaldebrazza.com/senegal-la-production-de-ciment-depasse-6440-millions-de-tonnes-en-2017/nts%20du%20Sahel)) sur les trois que compte le pays.

Production Guinéenne en ciment [4]

La Guinée dispose de 4 usines de cimenterie avec une production annuelle de 1.400.000 tonnes.

[4] <https://www.africaguinée.com> > article, consulté le 25/05/2019.

Production Algérienne en briques rouges [5]

Le secteur de la briqueterie a connu un développement important ces dernières années en réalisant une grande quantité de produits rouges en particulier, les briques, en passant de 5 millions de tonnes par an

à plus de 40 millions de tonnes par an. Si les briquetiers ont rempli leurs obligations en améliorant la production, répondant au programme national de construction, les pouvoirs publics ont quelque peu négligé le secteur en optant pour d'autres matériaux de construction. Cet état de fait n'a pas été sans conséquence sur les produits rouges d'où une mévente qui a été constatée sur le marché induisant un impact négatif sur toute la filière qui risque de disparaître si des décisions ne sont pas prises par les pouvoirs publics pour sauver et encourager ce secteur indispensable à la construction.

[5] www.reporters.dz › Non classé

Consommation Algérienne en plastique [6]

La consommation de plastique en Algérie a augmentée d'environ 9% au cours des dix dernières années, passant de 10,0kg en 2007 à 23,1kg en 2017 et est estimée à 25,5kg en 2020. La consommation du plastique du pays a donc augmentée de 11% par an sur la même période; elle a presque triplé, passant de 338 kilo tonnes à 955 kilo tonnes.

[6] <https://www.liberte-algerie.com/actualite/le-potentiel-du-marche-algerien-du-plastique-est-considerable-288636>.

Consommation Sénégalaise en plastique [7]

Le Sénégal produit chaque année 193 milles tonnes de déchets plastiques dont seulement 8000 tonnes sont recyclées.

[6] xalimasn.com › seules 8000 tonnes consulté le 25/05/2019.

Besoin en matériaux de construction en Algérie [8]

Concernant les besoins du marché national, le directeur général du logement auprès du ministère de l'Habitat, de la ville et de l'urbanisme, estime à un total de 11 millions d'unités de portes, de 92 millions de tonnes de granulats, de 2,7 millions de tonnes d'acier rond à béton, de 27 millions de tonnes de ciment, de 54 millions de tonnes de sable, de 24 millions de tonnes de brique rouge, de 98 millions de m² de revêtement de sol, de 9 millions de fenêtres et porte-fenêtre.

[8] <http://ehorizons.dz/fr/les-news/les-manchettes/25723-construction-100-algerien-en-2018>.