

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 08 mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux en Génie civil

Présenté par :

Layada Samir

Khelaifia Khadidja

**Thème : Etude et caractérisation d'un béton à base
de recyclâts - Etat de l'Art -**

Sous la direction de : **Dr. Nigri Ghania**

Septembre 2020

Remerciements

"L'imagination est plus important que le savoir"

Au terme de ce travail, Nous remercions DIEU tout puissant pour nous avoir accordé le courage, la patience et la volonté qui nous a permis d'arriver à ce jour.

Nous tenons à remercier nos parents, sans eux, nous nous n'existerions pas, pour leur patience sans jamais douter de nos capacités. Nous remercions aussi nos familles pour leur soutien et leurs encouragements

Nous tenons à exprimer nos profondes gratitude et nos sincères remerciements à notre encadreur madame NIGRI GHANIA pour tout le temps qu'elle nous a consacré, et la confiance qu'elle nous a accordée en acceptant de nous encadrer. Son soutien constant, et ces précieux conseils, nous ont permis de mener à bien ce travail. Et que nous ne la remercierions jamais assez. Que DIEU lui protège et l'accorde de la santé et longue vie heureuse.

Mes sincères remerciements vont aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

J'adresse mes remerciements à tous mes collègues, tous mes amis et tous mes enseignants et les techniciennes du Laboratoire du Génie Civil et hydraulique (Samira et Sihem)

MERCI

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

A mes chers parents: ma mère et mon héros, qui ont participé à ma réussite, par leurs amour, leurs soutien, et aussi leur ses sacrifices et ses précieux conseils, à travers ce travail aussi modeste soit-il, je leurs expriment mes sentiments et mon éternelle gratitude ; que DIEU les gardent pour moi.

A mes frère DJAHID ; KARIM ; CHOUKI ; HOUSSEM et mes sœur ASSIA et SOUAD.

A mes neveux CHEMS ; ALLA ; ANIS ; BOUCHRA ; MAYA ; ASSIL et DOUDOU

A tous mes collègues et mes amis A mes frère DJAHID ; KARIM ; CHOUKI ; HOUSSEM et mes sœur ASSIA et SOUAD.

A mes neveux CHEMS ; ALLA ; ANIS ; BOUCHRA ; MAYA ; ASSIL et DOUDOU

A tous mes collègues et mes amis

RESUMES

Résumé

Le recyclage et la valorisation des déchets est la solution intelligente pour préserver l'environnement et les ressources naturelles, et la couverte du déficit entre la production et la consommation. Par conséquent, il est devenu nécessaire de rechercher de nouvelles sources dans le domaine des matériaux de construction et la possibilité de récupérer et de recycler les déchets dans le but de les utiliser dans la formulation du béton. Ce dernier qui consomme de grandes quantités de ciment et de granulats.

Dans ce mémoire, nous avons exposé les différents composants et les types de béton et les sous-produits de l'industrie qui peuvent être recyclés, ainsi que les résultats des travaux expérimentaux traitant la faisabilité, le potentiel et la caractérisation des bétons formuler à base de ces recyclât.

Mots clés : Déchets, Valorisation, Béton, Granulats recyclés, Recyclât.

ملخص

إن إعادة التدوير واستعادة النفايات يعتبر الحل الذكي للحفاظ على البيئة و على الموارد الطبيعية و تغطيت العجز بين الإنتاج و الاستهلاك. لذا أصبح من الضروري البحث عن مصادر جديدة في مجال مواد البناء و إمكانية استرجاع النفايات و إعادة تدويرها بغرض استخدامها في الخرسانة التي تستهلك كميات كبيرة من الإسمنت و الركام. في هذه المذكرة استعرضنا مكونات و أنواع الخرسانة و المنتجات الثانوية للصناعة التي يمكن إعادة تدويرها، كما سلطنا الضوء على نتائج الأبحاث العلمية التي تم التوصل إليها.

الكلمات المفتاحية: نفايات ، استرجاع ، خرسانة ، ركام معاد تدويره ، إعادة تدوير.

Abstract

Recycling and recovery of waste is the smart solution to preserve the environment and natural resources, and to cover the deficit between production and consumption. Therefore, it has become necessary to seek new sources in the field of building materials and the possibility of recovering and recycling wastes for the purpose of using them in the formulation of concrete. The latter which consumes large quantities of cement and aggregates.

In this thesis, we have exposed the different components and types of concrete and industry by-products that can be recycled, as well as the results of experimental work dealing with the feasibility, potential and characterization of formulated concretes based on of these recycling.

Keywords: Waste, valorisation, Concrete, Recycled aggregates, Recycling.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	i
ملخص.....	ii
Abstract.....	iii
Liste des figures.....	I
Liste des tableaux.....	III
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	
I.1. INTRODUCTION	2
I.2 HISTORIQUE DU BETON.....	2
I.3. LES CONSTITUANTS D’UN BETON.....	4
I.3.1. Le ciment.....	4
I.3.2. Les granulats	7
I.3.2.1. Catégories des granulats.....	7
I.3.2.2. Provenance des granulats.....	8
a) Granulats alluvionnaires	8
b) Granulats de roches massives	9
c) Granulats de transformation	9
d) Granulats de recyclage	10
I.3.2.3. Propriétés des granulats.....	10
Module de finesse du sable.....	11

Forme et texture des granulats	12
La propreté.....	13
Propriétés mécaniques des granulats.....	13
I.3.3. Les adjuvants.....	14
I.3.3.1. Les fluidifiants.....	14
I.3.3.2. Les retardateurs de prise de ciment.....	14
I.3.3.3. Les accélérateurs de prise du ciment.....	14
I.3.3.4. Les entraîneurs d'air.....	14
I.3.3.5. Les additions minérales.....	14
I.3.4. Eau de gâchage.....	15
I.4. DIFFERENTES TYPES DE BETON	15
I.4.1. Béton à haute performance BHP.....	15
I.4.2. Béton à très hautes performance (BHTP).....	16
I.4.3. Béton de granulats légers.....	16
I.4.4. Béton cellulaire.....	16
I.4.5. Béton lourds.....	17
I.4.6. Béton à base de résines.....	17
I.4.7. Béton de fibres.....	17
I.5. LES PROPRIETES DES BETONS	18
I.5.1. Les propriétés des bétons à l'état frais.....	18
I.5.1.1. Ouvrabilité.....	18
I.5.1.1.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	18
I.5.1.1.2. Essai à la maniabilité (LCPC).....	19

I.5.1.2. Masse volumique.....	20
I.5.2. Propriétés des bétons à l'état durci.....	21
I.5.2.1. Résistance mécanique.....	21
Essais destructifs.....	21
a) Résistance en compression.....	21
b) Résistance en traction.....	21
b.1) Résistance en traction directe.....	22
b.2) Résistance en traction par fendage.....	22
b.3) Résistance en traction par flexion.....	22
Essais non destructifs.....	22
a) Essai ultrasonique.....	23
b) Essai sclérométrique.....	24
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU PREMIER CHAPITRE.....	26

CHAPITRE 2 : VALORISATION DES DECHETS DANS LE DOMAINE DE LA COSTRUCTION

PARTIE 1 : LES DECHETS

II.1. INTRODUCTION.....	28
II.2. DEFINITION DU TERME « DECHET ».....	28
II.2.1. Définition économique	29
II.2.2. Définition juridique	29
II .2.3. Définition politique	30
II .3. DIFFERENTS TYPE DE DECHETS.....	30
II .3.1. Les déchets ménagers et assimilés.....	30

II .3.2. Les déchets des collectivités locales.....	30
II .3.3. Les déchets industriels.....	31
a - Déchets industriels banals (DIB)	31
b - Déchets industriels dangereux (DID)	31
c - Déchets industriels spéciaux (DIS).....	31
II .3.4. Les déchets inertes	31
II .3.5. Les déchets fermentescibles	32
II .3.6. Les déchets ultimes.....	32
II .3.7. Les déchets radioactifs.....	32
II .4. CONSTITUTION CHIMIQUE DU DECHET.....	32
II .5. GESTION DES DECHETS.....	33
II .5.1. Définition de la gestion des déchets.....	33
II .5.2. Principes de la gestion des déchets.....	33
II .5.3. Méthodes de gestion des déchets.....	34
II .5.3.1. L'enfouissement.....	34
II .5.3.2. L'incinération.....	35
II.5.3.3. La décharge contrôlée.....	35
II.5.3.4. Le compostage.....	36
II.5.3.5. Le recyclage.....	36
II.5.4. ASPECT REGLEMENTAIRE ET LEGISLATIVES DE LA GESTION DES DECHETS EN ALGERIE.....	37
• Sur le plan législatif et réglementaire.....	37
• . Sur le plan institutionnel.....	38

Lois Algériennes concernant les déchets.....	38
--	----

PARTIE 2 : LES RYCLATS DANS LE BETON

III.1. INTRODUCTION.....	40
III. 2. DEFINITION DU RECYCLAGE.....	40
III.3. AVANTAGES DU RECYCLAGE.....	40
III.4. LES PRINCIPES DE RECYCLAGE.....	41
III.5. TECHNIQUE DE RECYCLAGE.....	41
III.5.1. Procédés du recyclage.....	41
III.5.2. La chaîne du recyclage.....	42
a. Collecte de déchets.....	42
b. Transformation.....	42
c. Commercialisation et consommation.....	42
III.6. UTILISATION DES MATERIAUX RECYCLES DANS LES BETONS.....	43
III.6.1. Déchets de démolition.....	43
III.6.2. Boues rouges.....	44
III .6.3.Déchet de verre.....	45
III.6.4. Laitier expansé.....	46
III.6.5. Cendres volantes.....	46
III.6.6. Pneus usagés.....	47
III.6.7. Ciment durci.....	47
III.6.8. Résidus d'incinération.....	48
III.6.9. Déchets de production de l'industrie du béton.....	48
III.6.10. Déchets de briques.....	49
III.6.11. Sables de fonderies.....	51

III.6.12. Déchets de plastiques.....	51
III.6.13. Déchets de marbre.....	52
III.6.14. Scories du sol.....	53
III.6.15. Mâchefer.....	54
III.6.16. Laitier d'acier.....	55
III.6.17. Laitier de haut fourneau.....	56
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU DEUXIEME CHAPITRE.....	57

CHAPITRE 3 : VALORISATION DES DECHETS DANS LE BETON

IV.1. INTRODUCTION.....	60
IV.2. DECHETS VALORISES DANS L'INDUSTRIE DU BETON.....	60
IV.2.1. Déchets de brique.....	60
IV.2.2. Déchet de béton recyclé.....	63
IV.2.3. Déchets de verre.....	64
IV.2.4. Déchet du caoutchouc.....	66
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU TROISIEME CHAPITRE	69
CONCLUSION GENERALE.....	70

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: (a) Le Panthéon à Rome, (b) Pont du Gard construit par les Romains	2
Figure 1.2: Phare d'Eddy stone (1756).....	3
Figure 1.3 : Béton précontraint.....	3
Figure 1.4 : Bétons à Hautes Performances (BHP).....	4
Figure 1.5 : Désignation d'un ciment courant.....	7
Figure 1.6: Exemples de granulats d'origines différentes.....	8
Figure 1.7 : Granulats expansés : (a) Bille d'argile expansé; (b) Schiste expansé.....	10
Figure 1.8 : Éventail de grosseurs des granulats utilisés dans le béton.....	11
Figure 1.9 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.....	19
Figure 1.10 : Maniabilimètre LCPC.....	20
Figure 1.11 : Différents essais sur les résistances d'un béton en traction.....	22
Figure 1.12 : Appareil d'auscultation sonique.....	24
Figure 1.13 : Appareil d'auscultation sonique punditLab.	24
Figure 2.1: Les déchets solides... ..	29
Figure 2.2: Enfouissement des déchets... ..	34
Figure 2.3: Incinération en plein air et usine d'incinération	35
Figure 2.4 : Décharge contrôlée.....	36
Figure 2.5: Compostage de déchets organiques.....	36
Figure 2.6: Usine de recyclage des déchets.....	37
Figure 2.7: Recyclage du plastique.....	43
Figure 2.8: Déchets de démolition.....	44
Figure 2.9: Boues rouges... ..	45
Figure 2.10: Déchets de verres.....	45
Figure 2.11: Cendre volante.....	46
Figure 2.12: Stock de pneus usagés en Tarn-et-Garonne en 2007 (France).....	47
Figure 2.13 : Ciment durci.....	48
Figure 2.14 : Résidus d'incinération.....	48
Figure 2.15: Industrie du béton.....	49
Figure 2.16 : Briques en terre crue.....	50

Figure 2.17 : Briques en terre cuite.....	50
Figure 2.18 : Sable de fonderies.....	51
Figure 2.19 : Déchet de plastiques.....	52
Figure 2.20 : Déchets de marbres et déchets de marbre broyés.....	53
Figure 2.21 : Site de stockage scories.....	54
Figure 2.22 : Mâchefer	55
Figure 2.23 : Laitier d'acier	55
Figure 2.24 : Laitier de haut fourneau	56
Figure 3.1 : Résistance à la compression du béton avec gros granulats de brique	61
Figure 3.2 : Résistance à la compression du béton avec granulats fins de brique.....	61
Figure 3.3 : Résistance à la compression du béton avec gros et fin granulats de brique.....	61
Figure 3.4 : densité a l'état frais des bétons.....	62
Figure 3.5 : Résistance à la compression des éprouvettes traitées thermiquement à 300°C....	62
Figure 3.6 : Résistance à la compression des éprouvettes traitées thermiquement à 600°C....	63
Figure 3.7 : Influence du dosage en poudre de verre et E/L sur à la résistance mécanique....	65
Figure 3.8 : Observation au MEB de la surface externe des pates après trois mois de conservation dans l'eau de mer	66
Figure 3.9 : Résistances en flexion des variantes étudiées en fonction du temps	67
Figure 3.10 : Résistances en compression des variantes étudiées en fonction du temps.....	67

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Ordre de grandeur en proportions.....	4
Tableau 1.2 : Types de ciment selon la norme EN 197-1.....	6
Tableau 1.3 : Liste des différents types de ciments courants normalisés.....	6
Tableau 1.4 : Valeurs approximatives d'affaissement en fonction de la maniabilité.....	19
Tableau 1.5: Classification des bétons selon leur temps au maniabilimètre.....	20
Tableau 1.6: Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des impulsions.....	23

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Depuis plusieurs dizaines d'années, le volume des déchets dans le monde produit par habitant ne cesse pas d'augmenter. Cela représente une menace pour l'environnement, donc la seule solution était de détruire les déchets par incinération ou enfouissement. La valorisation des déchets dans le domaine du génie civil constitue une solution intelligente dans le traitement des déchets pour la protection de notre environnement (disparition des décharges sauvages, réduction des volumes des déchets dans les décharges, réduire les émissions de CO₂), pour la préservation des ressources naturelles non renouvelables (réduire les volumes d'extraction des carrières, et des gisements alluvionnaires) et pour l'économisassions d'énergie (soit par le transport, ou par extraction).

La valorisation des déchets trouve aussi une place dans l'industrie du béton qui occupe après l'eau, la deuxième substance exploitée par l'homme. Les granulats constituent l'ossature du béton, ils représentent, environ 80 % de son poids. Selon les statistiques, le bâtiment et les travaux publics ont besoin chaque année de 560 millions de tonnes de granulats et de matériaux assimilés. Par conséquent, leur extraction des rivières et des oueds ou bien des roches massives des montagnes a une grande incidence sur l'environnement. Plusieurs travaux de recherche montrent que la substitution des granulats naturels ou le ciment par des déchets (cendre volante, fumée de silice, le laitier de haut fourneaux, verre) améliore largement la qualité du béton surtout à long terme.

Dans le présent travail, on expose une recherche bibliographique sur les déchets exploités dans le domaine de génie civil.

Le présent manuscrit se compose de trois chapitres, le premier chapitre est une analyse de la bibliographie sur le béton (constituants, types, propriétés), Dans le second chapitre nous présentons en première partie un bref exposé sur les déchets d'une manière générale (définitions, types, gestion), alors que la deuxième partie est consacrée au recyclage (définition, techniques, principes et avantages). Dans le troisième chapitre, on expose les matériaux recyclés dans le domaine de la construction ainsi que les caractéristiques du béton formulés à base de ces déchets (résistance mécanique, durabilité). Enfin, le manuscrit est clôturé par une conclusion générale qui résume les principaux résultats publiés ainsi que nos perspectives envisagées.

CHAPITRE 1

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. INTRODUCTION

De nos jours le béton est le deuxième matériau le plus consommé dans le monde après l'eau. La réputation du béton à travers les âges s'explique par ses multiples qualités dont le principal est sa durabilité. Le béton est un matériau économique et polyvalent. Sans le béton on ne pourrait pas réaliser ce qu'on construit aujourd'hui, dans les secteurs du bâtiment et travaux publics (immeubles d'habitation, ponts, tunnels, aéroports, barrages, ports, etc.). Il est à la fois robuste et universel, on peut le faire partout à l'air à l'eau.

I.2. HISTORIQUE DU BETON

Il y a plus de 2000 ans, le béton était déjà connu par les Romains sous forme d'un mélange de cendres volcaniques et de chaux qui durcissait dans l'eau. Parmi denombreux exemples, on peut citer Le Panthéon à Rome (118-128 avant J.C), le Pont duGard (40-50 après J.C) au sud de France, qui sont des structures en pierres jointées aubéton à la chaux. Le principe de fabrication du béton moderne a été mis aupoint par l'ingénieur britannique John Seaton (1724-1792) en 1756 avec le phare deSeaton comme première réalisation. Cet ouvrage a marqué une étape majeure dans laconception des structures en béton. Depuis le XIXe siècle, le béton devientomniprésent dans le monde de construction.



Figure 1.1:(a) Le Panthéon à Rome possède la plus grande coupole en béton non armé de toute l'Antiquité, (b) Pont du Gard construit par les Romains avec des joint en mortier contenant ciment pouzzolanique



Figure 1.2: Phare d'Eddy stone, construit en 1756 par John Seaton.

En 1929, Eugène Freyssinet (1879-1962) va révolutionner le monde de la construction en inventant le « béton précontraint ».



Figure 1.3 : Béton précontraint

La fin des années 80 voit l'arrivée des « Bétons Hautes Performances (BHP) ».

Lors de la dernière décennie de nombreuses innovations ont révolutionné les constructions en béton, parmi lesquelles les « Bétons Auto plaçant (BAP) » et les « Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances (BFUHP) ».



Figure 1.4 : Bétons Hautes Performances (BHP)

I.3.LES CONSTITUANTS D'UN BETON

Le béton est l'union de matériaux hétérogène constitué de granulats, sable et de pâte (ciment, eau). La pâte de ciment représente 25% à 40% (voir le tableau 1.1) du volume total du béton. Chaque constituant joue un rôle bien défini: liant hydraulique pour la pâte de ciment, remplissage atténuateur de variations volumiques (retrait) est la source de la résistance pour les granulats.

Un béton hydraulique est constitué :

- d'une pâte pure (ciment, eau),
- d'un mélange granulaire,
- de produits additions (adjuvants, additions minérales)

On désigne habituellement sous le nom :

- De matrice ou de mortier :(liant+sable+eau),
- De squelette solide ou granulaire : mélange de granulats.

Tableau 1.1: Ordre de grandeur en proportions

	Eau %	Air %	Ciment %	Granulats %
Volume	14-22	1-6	7-14	60-75
Poids	5-9	/	9-18	63-85

I.3.1. Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau. Il forme une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide [1,2] Le ciment est composé

essentiellement de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO), de silice (SiO₂), d'alumine (Al₂O₃) et d'oxyde de fer (Fe₂O₃). La chaux nécessaire à la fabrication du ciment est extraite de la roche calcaire ; l'alumine, la silice et l'oxyde de fer sont extraits de l'argile. Le calcaire et l'argile contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier Na₂O, K₂O et MgO.

Les ciments courants ont pour constituant principal le clinker (norme EN197-1). Au clinker sont ajoutées, suivant la nature du ciment voulu, les additions minérales de différentes natures.

- Laitier granulé de haut fourneau (S)
- Pouzzolanes naturelles (Z)
- Cendres volantes (V et W)
- Fumées de silice (D)
- Calcaire (L)
- Schistes calcinés (T)
- Constituant secondaire.

Les ciments courants normalisés sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation Européenne, l'ancienne appellation est indiquée entre parenthèse (voir tableau 1.2).

Pour chaque ciment sont indiqués les désignations propres et les pourcentages respectifs de leurs constituants.

Il existe d'autres ciments, spéciaux, décrits par d'autres normes, généralement utilisés pour des ouvrages spéciaux ou dans des conditions spéciales. Parmi d'autres, nous avons :

- Ciment prompt naturel (CNP).
- Ciment alumineux fondu (CA)
- Ciment de laitier à la chaux (CLX)
- Ciment à maçonner (CM)

Tableau 1.2 : Types de ciment selon la norme EN 197-1

Désignations	Types de Ciment	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un des constituants (laitier, cendres, fumées de silice, pouzzolanes, calcaire, schistes)	Teneur en constituants secondaires
CEM I(CPA)	Ciment portland	95 à 100%	/	0 à 5%
CEM II/A (CPJ)	Ciment portland composé	80 à 94%	de 6 à 20 % de l'un quelconque des constituants, sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10 % (*) ;	0 à 5%
CEM II/B (CPJ)		65 à 79%	de 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus.	
CEMIII/A(CHF) CEMIII/B(CHF) CEMIII/C(CLK)	Ciment de haut-fourneau	35 à 64 % 20 à 34 % 5 à 19 %	36 à 65 % de laitier de haut-fourneau 66 à 80 % de laitier de haut-fourneau 81 à 95 % de laitier de haut-fourneau	/
CEMIV/A(CPZ) CEMIV/B(CPZ)	Ciment pouzzolanique	65 à 90 % 45 à 64 %	10 à 35 % de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10 %. 36 à 55 % comme si dessus	0 à 5%
CEM V/A(CLC) CEM V/A(CLC)	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 % 20 à 39 %	18 à 30 % de laitier de haut-fourneau et 18 à 30 % de cendres siliceuses ou de pouzzolanes. 31 à 50 % de chacun des constituants comme ci-dessus	0 à 5%

Les ciments sont classés aussi selon leur résistance nominale: La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours, conformément à la norme NF EN 196 – 1[3], elle est exprimée en MPa. Pour chaque type de ciment, trois classes de résistance sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours, ces classes sont notées, 32.5 ; 42.5 et 52.5.

Tableau 1.3 : Liste des différents types de ciments courants normalisés [4]

Désignation de la Classe de résistance	Résistance à court terme		Résistance courante à 28jours	
	Résistance à la compression (en MPA)			
	À 2 jours	À 7 jours		
32,5N	–	≥ 16	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5R	≥ 10	–		
42,5 N	≥ 10	–	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5R	≥ 20	–		
52,5N	≥ 20	–	≥ 52,5	–
52,5R	≥ 30	–		

Pour chaque classe de résistance normale, deux classes de résistance au jeune âge sont définies, une classe avec une résistance au jeune âge ordinaire (indiquée par la lettre N) et une classe avec une résistance au jeune âge élevée (indiquée par la lettre R).

Désignation et marquage :

La désignation complète d'un ciment courant est décrite dans la norme NF EN 197-1 ; voir l'exemple [CEM II / A – LL 32,5 R CE CP2 NF].

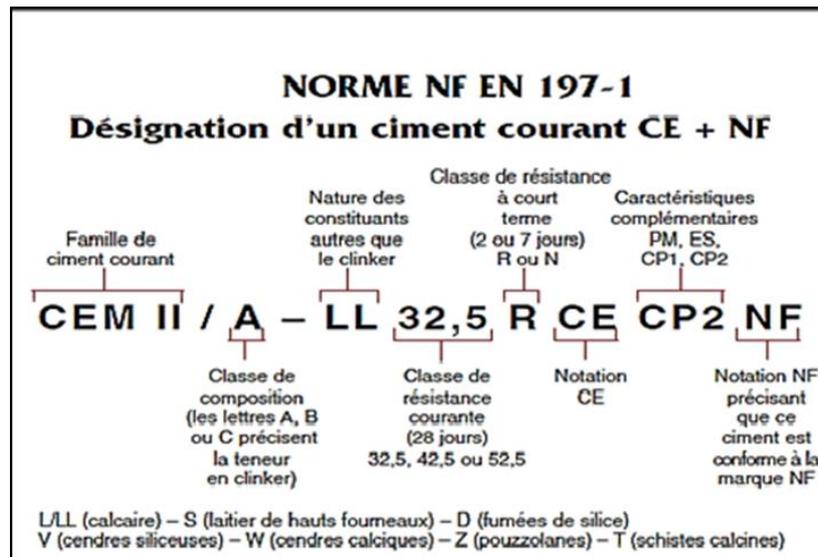


Figure 1.5 : Désignation d'un ciment courant [4]

Les ciments courants doivent être marqués CE. Ce marquage atteste de leur conformité à la norme harmonisée EN 197-1 et permet à ces ciments de circuler librement au sein de l'espace économique Européen.

I.3.2. Les granulats

On appelle «granulats» les matériaux inertes qui entrent dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125 mm dont l'origine peut être naturelle ou artificielle. Ces matériaux sont quelquefois encore appelés «agrégats», cependant cette appellation est abandonnée depuis fort temps. En effet, un agrégat est un assemblage hétérogène de substances ou éléments qui adhèrent solidement entre eux (le mortier ou le béton par exemple) [4].

I.3.2.1. Catégories des granulats:

En fonction de leur provenance, On distingue quatre catégories [5]:

- Les granulats d'origine alluvionnaire ; ils sont considérés comme roulés, ou semi concassés.

- Les granulats de roches massives; appelés aussi granulats concassés .
- Les granulats de transformation ayant subis des transformations physico-chimiques.
- Les granulats de recyclage.



Figure 1.6 : Exemples de granulats d'origines différentes [5]

I.3.2.2. Provenance des granulats

a) Granulats alluvionnaires [5]

Les gisements les plus habituels sont les lits de rivières déposés par les cours d'eau et les fonds marins. En fonction de la situation du gisement par rapport à la hauteur du cours d'eau ou de la nappe phréatique de l'endroit, l'exploitation a lieu soit à sec ou dans l'eau. La forme de ces granulats est roulée. Cette forme est acquise par l'érosion. Ces granulats sont criblés (séparés) en différentes classes granulaires. On peut distinguer :

- Sables et graviers alluvionnaires fluviaux : siliceux ou silico-calcaires déposés par les cours d'eau pendant l'ère quaternaire. Ils sont exploités tout au long du réseau hydrographique.
- Alluvions marines : exploitées entre 10 et 30 mètres de profondeur sur le plateau continental. Ces granulats ne sont immergés que depuis quelques milliers d'années par

suite de la remontée du niveau marin après la dernière glaciation (époque actuelle). En réalité, il s'agit d'anciennes alluvions fluviales et littorales.

- Couches de sables ou de sablons, roches sédimentaires non consolidées : déposées il y a des millions d'années.

b) Granulats de roches massives [5]

Les gisements de roches massives (carrières) correspondent à une multitude de situations géologiques (couches plus ou moins épaisses, filons, épanchements volcaniques, massifs de granite...) et à des localisations géographiques très différentes. La carrière peut être implantée en plaine sur un plateau ou en montagne au bord d'une falaise. L'exploitation s'effectue à flanc de coteau ou en puits, en fonction de la situation du niveau géologique utile. On peut ainsi extraire et produire des granulats avec des roches éruptives, des roches métamorphiques et des roches sédimentaires consolidées (calcaires...).

Ces granulats sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de pré-criblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent de l'origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage. On peut distinguer :

- Roches sédimentaires consolidées telles que les calcaires ou les degrés. On les exploite dans les bassins sédimentaires et dans les régions montagneuses.
- Roches métamorphiques dures telles que les quartzites ou les gneiss. Elles affleurent plus particulièrement dans les massifs montagneux anciens.
- Roches éruptives anciennes. Il s'agit de roches plutoniques à cristaux plus ou moins développés (granites, diorites, micro-diorites, gabbros...) ou de roches volcaniques (rhyolites...), exploitées dans les massifs montagneux anciens avec une répartition géographique analogue à celle des roches.
- Roches volcaniques récentes telles que le basalte, le trachyte ou l'andésite ; roches épanchées par le volcanisme récent du massif Central.

c) Granulats de transformation

Les granulats de transformation sont souvent d'origine minérale résultant d'un procédé de transformation industriel comprenant des modifications thermiques (cuisson) ou chimiques. Dans cette catégorie se rangent les granulats légers transformés, comme l'argile expansée (Figure 1.7. a), le schiste expansé (Figure 1.7. b).



Figure 1.7 : Granulats expansés : (a)Bille d'argile expansé; (b) Schiste expansé

La cuisson à des températures allant de 1000 à 1200 °C, dans un four rotatif, de nodules d'argile ou de schiste produit d'une part un dégagement gazeux au sein de chaque nodule sous l'effet de réactions chimiques, ce qui entraîne l'expansion du nodule, d'autre part une vitrification de la couche externe. On obtient alors un granulats plus gros, avec une grande porosité, donc plus léger [6].

d) Granulats de recyclage

L'emploi des déchets et des sous-produits industriels dans le secteur du bâtiment répond simultanément au souci d'économie des ressources naturelles en granulats [6].

I.3.2.3. Propriétés des granulats

Les propriétés des granulats sont intimement liées aux propriétés du massif rocheux d'origine, c.-à-d. la composition chimique et minéralogique, les caractéristiques pétrographiques, la densité, la dureté, la résistance, la stabilité physique et chimique, la structure des pores et la couleur. Par ailleurs, les granulats présentent un certain nombre de propriétés intrinsèque qui ne sont pas reliées à la nature du massif rocheux d'origine, telles la forme et la dimension des grains, la texture de surface et l'absorption, or toutes ces propriétés peuvent avoir une influence considérable sur la qualité du béton, autant à l'état frais qu'à l'état durci [7, 8].

D'après leur nature minéralogique, on distingue trois grandes classes:

- Les granulats siliceux ;
- Les granulats calcaires ;
- Les granulats granitiques (argileux ou schisteux)

Les granulats ont des effets sur les propriétés mécaniques et sur la consistance du béton de plusieurs manières [1, 9, 10].

- Par leurs propriétés de résistances mécaniques ;

- Par leur capacité d'adhérence à la pâte liante (pâte de ciment durcie);
- Par leur forme (roulés, concassés et semi-concassés);
- Par leur distribution granulaire et donc la compacité du mélange granulaire formé ;
- Par leur diamètre maximal, et leur volume par rapport au volume total du béton.

Dans une composition de béton, la dimension des granulats à utiliser passe des micromètres à quelques centimètres. La dimension maximale est variable, elle dépend du confinement des armatures et des dimensions des coffrages. On trie les granulats par dimension au moyen de tamis (mailles carrées) et de passoirs (trous circulaires). Les principales classes granulaires caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats sont (Norme XP P 18-540):

- ✓ Fillers 0/D \Rightarrow pour $D < 2$ mm et ayant au moins 70 % de grains passant au tamis de 0,63 mm
- ✓ Sablon 0/D \Rightarrow pour $D < 1$ mm et avec moins de 70 % de grains passant au tamis de 0,63 mm
- ✓ Sable 0/D \Rightarrow Pour $1 \text{ mm} < D \leq 6,3$ mm ;
- ✓ Gravies 0/D \Rightarrow Pour $D > 6,3$ mm
- ✓ Gravillons d/D \Rightarrow Pour $d \geq 1$ mm et $D \leq 125$ mm
- ✓ Ballast d/D \Rightarrow Pour $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm

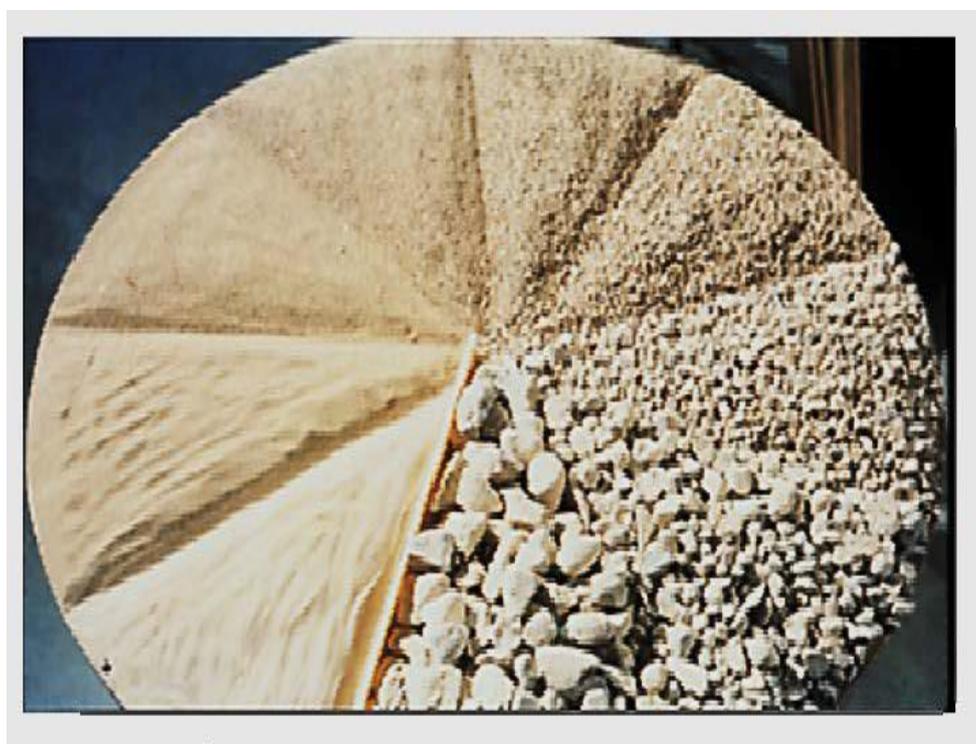


Figure 1.8 : Éventail de grosseurs de granulats utilisés dans le béton.

✓ **Module de finesse du sable**

Pour confectionner un béton de qualité, on utilise au moins deux classes de granulats différentes. Les principales divisions comprennent le sable et le gros granulat, dont les éléments mesurent au moins 5 mm de diamètre.

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion.

- ✓ S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton ;
- ✓ Si le sable est grossier, la plasticité du béton sera réduite et sa mise en place sera difficile.

Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par son module de finesse (MF). Celui-ci correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis (0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5).

La valeur du MF est d'autant plus élevée que le granulat est grossier. Un bon sable à béton doit avoir un MF d'environ 2.2 à 2.8. En dessous de 2.2 le sable a une majorité d'éléments fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau. Au-dessus de 2.8 le sable manque de fines et le béton perd en ouvrabilité [7, 1].

La quantité de pâte de ciment fraîche à introduire dans le béton doit être suffisante pour recouvrir la surface de tous les grains de sorte que, plus la surface spécifique des granulats est faible, moins il faut de pâte et conséquemment, plus la demande en eau est faible.

✓ **Forme et texture des granulats**

La forme et la texture ont des effets sur la compacité du béton à formuler, et donc sur l'ouvrabilité et maniabilité du béton.

La texture de la surface des granulats affecte sa liaison avec la pâte de ciment et influence la demande en eau du mélange. La forme en aiguille ou plate, mais aussi les granulats très anguleux sont à éviter, car elle nécessitent une quantité d'eau plus élevée, pour une même maniabilité du béton, ce qui peut nuire à la qualité du béton et peut provoquer des défauts d'aspect. La forme et la texture des granulats influencent [5].

- La demande en eau
- La maniabilité : facilité de mise en œuvre et le compactage du béton.
- La compacité
- du mélange, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment.
- L'adhérence du granulat à la pâte de ciment.

✓ **La propreté**

Les granulats utilisés dans le béton doivent être propres, débarrassés de tous corps polluants qui peuvent nuire à l'adhérence entre la pâte de ciment et les granulats et provoquer une fissuration précoce du béton [7, 1].

La propreté désigne d'une part, la teneur en fines argileuses ou autres particules adhérentes à la surface des grains, ce qui se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on frotte les granulats entre les mains, traces dues à la présence d'oxyde de fer, pyrite, argile...

Un granulat propre ne laisse pas de traces. D'autre part, les impuretés susceptibles de nuire à la qualité du béton, parmi lesquelles on peut citer les scories, le charbon, les particules de bois, les feuilles mortes.

Les granulats ne doivent pas contenir d'hydrocarbures, d'huiles végétales ou de matière organique. Les granulats doivent être exempts de sulfures sous forme de pyrites, de sulfates et de chlorures qui nuisent aux propriétés de durabilité du béton durci.

Il existe plusieurs essais de laboratoire pour le contrôle de la propreté des granulats :

- ✓ Essai de la perte au feu
- ✓ Essai d'équivalent de sable « ES »
- ✓ Tests chimiques ; les composants chimiques à utiliser dépendent du produit recherché.

Exemple de l'essai au bleu de méthylène qui permet de déterminer la teneur en argile du Sable : les fines d'origine argileuse retiennent le bleu de méthylène.

Les fines selon la norme NF P 18-540. désignent les particules passant au tamis de 0.08 mm Les fines peuvent provenir du sable, des gravillons et d'additifs divers. Dans le sable et gravillon concassé, leur pourcentage peut être élevé. Un excès de fines nécessite un dosage en eau plus élevé, mais un manque de fines conduit à des bétons peu maniables et de faible compacité. Leur nocivité est grande lorsqu'elles contiennent des matières argileuses, c'est pourquoi il faut les tester au bleu de méthylène [5].

✓ **Propriétés mécaniques des granulats**

En plus des propriétés de résistance à la compression, cisaillement, traction, les granulats sont testés vis-à-vis de la résistance à l'usure et au choc donc à l'écrasement. Pour certains usages les granulats peuvent également être caractérisés vis-à-vis de l'action du gel dégel et des températures d'usages très élevées [5].

I.3.3. Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques, incorporés au béton en faible quantité, permettant d'améliorer certaines de ses propriétés. Leurs efficacités sont liées à l'homogénéité de leur répartition dans le béton [11, 12]. Les principaux adjuvants sont :

I.3.3.1. Le fluidifiants (ou réducteur d'eau)

Ces produits jouent un double rôle. Ils sont utilisés pour fluidifier le béton et permettre le maintien du rapport E/C constant (ils doivent, par rapport au béton témoin, assurer une résistance à la compression de 110% minimum [13]) ils permettent aussi, dans certains cas, de réduire le rapport E/C (réduction de dosage en eau de 5%) pour avoir une meilleure résistance tout en ayant la même fluidité du béton [14]. Dans le premier cas l'ajout du fluidifiant va permettre d'avoir des bétons de même classe de résistance mais de consistance variable allant d'un béton ferme, béton plastique, très plastique jusqu'au béton auto-plaçant ; dans le cas des bétons auto-plaçants on utilise des super plastifiants qui sont des fluidifiants très puissants.

I.3.3.2. Les retardateurs de prise de ciment

Dans le cas de bétonnage en temps chaud ou des éléments massifs il est conseillé d'utiliser un retardateur de prise pour freiner les réactions d'hydratation et aussi réduire la chaleur dans le béton, de manière que les propriétés du béton soient préservées et le béton ne fissure pas. Ils sont aussi employés pour éviter toute discontinuité lors de reprises de bétonnage [15].

I.3.3.3. Les accélérateurs de prise du ciment

Pour le bétonnage en temps froid, on utilise les accélérateurs de prise pour provoquer l'hydratation et accélérer le durcissement freiné par la température ambiante. Les accélérateurs de prise permettent d'obtenir les résistances prévues pour 28 jours et à des âges avancés [15].

I.3.3.4. Les entraîneurs d'air

Ils permettent d'entraîner à l'intérieur du béton, des microbulles d'air parfaitement réparties qui serviront d'espace d'expansion de béton dans le béton durci. Ces microbulles permettent d'améliorer la durabilité du béton soumis à l'action de gel et améliore la résistance du béton sous l'action des incendies [15].

I.3.3.5 Les additions minérales

Il existe deux catégories de fines minérales :

- les fines actives à caractère pouzzolanique : Ce sont des particules de faible diamètre qui, ajoutées en quantité de l'ordre de 10% du poids du ciment, améliorent notablement les performances de résistance et de la durabilité du béton grâce à leurs propriétés pouzzolaniques (cendres volantes, fumée de la silice, laitier.) [16, 17].

- les fines inertes comme les fillers calcaires : l'objectif dans leur utilisation est d'améliorer la compacité du béton et donc sa résistance. Elles sont également utilisées pour améliorer la consistance des bétons notamment dans le cas des bétons auto plaçant qui nécessite une forte teneur pour assurer au BAP un compromis entre une bonne fluidité apportée par les fluidifiants et une bonne viscosité que l'on essaye d'avoir par l'introduction des fillers.

I.3.4. Eau de gâchage :

Pratiquement toute eau naturelle potable n'ayant pas une odeur ou un goût prononcé peut être employée pour la fabrication du béton. Cependant, certaines eaux non potables peuvent convenir.

Une eau de qualité douteuse peut être utilisée à condition que des cubes de mortier préparés avec cette eau donnent des résistances à 28 jours au moins égales à 90 % de celles obtenues sur des échantillons témoins préparés avec de l'eau que l'on sait potable.

Un excès d'impuretés peut influencer non seulement le temps de prise, la résistance et la stabilité volumétrique du béton, mais peut aussi faire apparaître des efflorescences, des taches, attaquer les armatures et réduire la durabilité.

Certaines limites peuvent donc être établies pour les chlorures, sulfates, alcalis et solides présents dans l'eau de gâchage ou l'on peut effectuer des essais appropriés pour déterminer l'effet de l'impureté sur diverses propriétés [18].

I.4. DIFFERENTES TYPES DE BETON

I.4.1. Béton à haute performance BHP

Ils présentent une résistance caractéristique à la compression à 28 jours (f_{c28}) supérieur à 50 MPa et un rapport pondéral E/C inférieur à 0.40.

Leurs principales propriétés sont [15] :

Sur le béton frais : une maniabilité accrue.

Sur le béton durci:

- une augmentation mécaniques (compression, traction, module d'élasticité) tant aux jeunes âges qu'à terme ;
- une plus grande imperméabilité à l'air et à l'eau, due à une compacité plus élevée ;
- une plus grande résistance aux agents agressifs d'où une meilleure durabilité ;
- une plus grande résistance à l'abrasion ;

-une meilleure tenue aux cycles de gel/dégel.

I.4.2. Béton à très hautes performance (BHTP)

Ils appellent bétons à très hautes performance, ou à très hautes résistance. Leur résistance caractéristique à la compression dépasse 200MPa. Outre que cette dernière, Les autres caractéristique sont améliorées, comme le coefficient d'élasticité, la résistance à l'attraction ou la compacité. Ayant une très faible porosité, leur teneur aux principales agressivités de l'environnement telles que carbonatation, pénétration aux ions chlore, cycle gel/dégel, tenue à l'abrasion, est excellente.

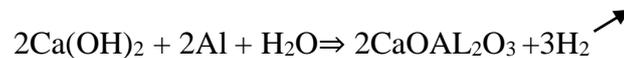
I.4.3. Béton de granulats légers

Dans la construction d'un certain nombre d'ouvrages, une réduction de poids est de nature à entrainer des économies générales. L'emploi de granulats légers permet de réaliser des bétons pour lesquels la densité peut varié de 0.5 à 2.0 mais dont la résistance en compression est d'autant plus faible que la densité est moins élevée. Elle n'est que de 2 à 5MPa pour des bétons de vermiculite de densité 0,5 en moyenne, mais elle peut atteindre 40MPa pour des bétons d'argile ou schiste expansé de densité 1.7 à 1.9 réalisés avec des granulats légers de bonne qualité. Plusieurs ouvrages importants tels que les ponts en béton armé et en béton précontraint, des immeubles, des couvertures en voile mince ont été réalisés avec des bétons légers. Cependant après une période de grande vogue, l'utilisation des bétons légers est assez ralentie surtout limité à des éléments préfabriqués [15].

I.4.4. Béton cellulaire

Il ne s'agit pas de bétons à proprement parler mais plutôt de mortiers. On rajoute à ce dernier :

- Soit une matière génératrice de gaz en présence du ciment (le plus souvent de l'hydrogène), comme par exemple de la poudre d'aluminium, ce qui donne un béton-gaz, la réaction chimique étant :



Ils sont destinés aux produits préfabriqués. A cette sujétion s'ajoute le fait qu'ils sont habituellement traités par étuvage ou autoclavage, ce qui présente l'avantage, en plus de la possibilité d'atteindre rapidement leur résistance, de diminuer dans de grandes proportions les inconvénients dus au retrait.

- Soit un produit moussant à base de savons ou de détersifs qui, en cours de malaxage, provoque une infinité de petites bulles, ce qui donne un béton mousse. Leur utilisation allant du comblement de grands volumes du type comblement de carrière, de puits [15].

I.4.5. Béton lourds

La fabrication de béton lourds a déjà été, depuis longtemps, envisagée mais l'emploi de ces bétons était très limité (contreponds de certains ponts basculants). Les bétons lourds ne diffèrent essentiellement des bétons classiques sauf par les granulats employés (sable 0/3mm, gravillon 3/7mm, gravier 7/15 et 15/30).

I.4.6. Béton à base de résines

Ces résines sont des produits synthétiques qui présentent, entre autres propriétés, une remarquable adhésivité, en présence d'un catalyseur, elles durcissent plus au moins rapidement par polymérisation (association de molécule identiques engendrant des molécules plus grosses). Ils sont employés comme liants pour confectionner certains bétons. Parmi les résines mieux adaptées, on distingue :

- Les résines polyester : provenant de l'industrie charbonnière.
- Les résines époxydes : issue de la chimie de pétrole.

Les bétons à base des résines peuvent présenter des résistances élevées en particulier en traction et elles sont atteintes en quelques jours, leur emploi est limité, restent dans le domaine de laboratoire (petits éléments). Ils présentent aussi un module d'élasticité deux fois plus faible à ceux des bétons de ciment et un fluage du même ordre lorsque la température ne dépasse pas 20°C (huit fois plus important que le béton de ciment) [15].

I.4.7. Béton de fibres

Il y a longtemps que l'on cherche à améliorer la résistance à la traction des bétons de ciment (ou de mortier) en y incorporant des fibres résistantes: les plaques de «fibrociment» sont un exemple bien connu de mortier de ciment comprimé et armé de fibres d'amiante qui ont une forte résistance à la traction. Actuellement plusieurs natures de fibres sont utilisées, elles doivent présenter des qualités suivantes [19]:

- Pouvoir adhérer parfaitement à la pâte de ciment ;
- Avoir une bonne résistance à la traction ;
- Ne risquer d'être attaqué par les milieux basiques du ciment ;
- Ne pas se dégrader dans le temps et conserver leurs qualités propres ;
- Ne présenter aucun danger pour la main d'œuvre qui les manipule ;
- Ne pas avoir d'incidence excessive sur le coût du béton.

Quelques fibres incorporées dans le béton :

- En acier, copeaux d'acier ;

- En fente ductile, leur intérêt, outre une bonne adhérence, de ne pas corroder ;
- En fibres de Carbone (cout élevé);
- En verre dont la composition chimique est étudié pour ne pas être attaqués par les alcalins du ciment.

I.5. LES PROPRIETES DES BETONS

I.5.1. Les propriétés des bétons à l'état frais

La période durant laquelle le béton demeure plastique n'est que temporaire. La résistance du béton, pour une composition donnée, est très affectée par le degré de compacité. Il est alors important que la consistance du béton soit ajustée de façon que le béton puisse être facilement transporté, mise en place, vibré et fini sans qu'il y ait de ségrégation [20].

I.5.1.1. Ouvrabilité

Un béton qui peut être mise en place et serré correctement est considéré comme ayant une bonne maniabilité.

On peut alors définir l'ouvrabilité ou la maniabilité par la propriété déterminant l'effort nécessaire pour manipuler une quantité de béton frais avec un minimum de perte d'homogénéité [21].

Mesure de la maniabilité du béton

Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. On n'en citera que quelques-uns qui sont les plus couramment utilisés dans la pratique.

I.5.1.1.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams

L'essai d'affaissement est le plus couramment employé pour le béton sur chantier. Cet essai est cependant très pratique pour détecter des variations de l'homogénéité d'un béton donné.

On utilise un moule normalisé de 300 mm de hauteur, placé sur une surface lisse, la petite ouverture vers le haut, le cône est rempli de béton en trois couches. Chacune des couches est compactée par 25 coups d'une tige métallique normalisée[20].

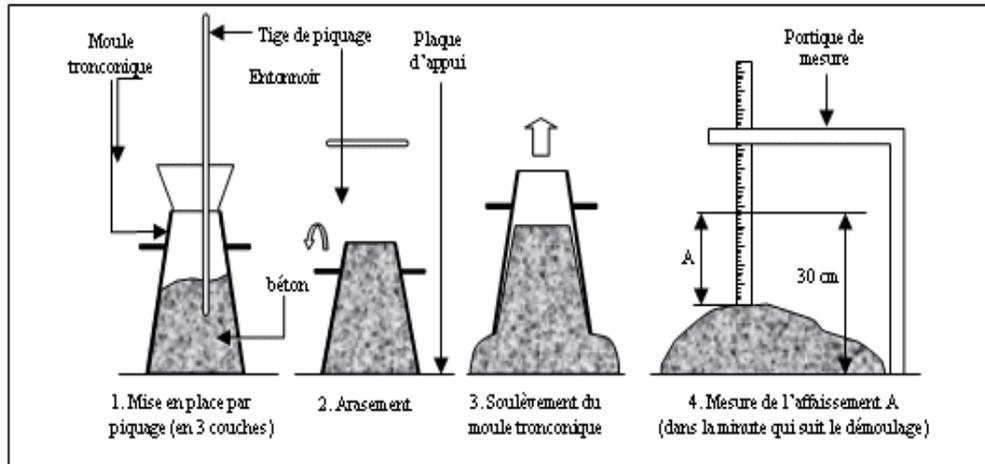


Figure 1.9 : Mesure de l’affaissement au cône d’Abrams.

Après remplissage, le cône est relevé lentement et le béton s'affaisse. La différence entre la hauteur du béton affaissé et la hauteur du cône est l'affaissement; il est mesuré à 5 mm près (voir figure 1.9).

Les valeurs approximatives d'affaissement en fonction de la maniabilité sont données dans le Tableau 1.4

Tableau 1.4 : Valeurs approximatives d'affaissement en fonction de la maniabilité

Classe de consistance	affaissement	Tolérance (cm)
Ferme f	0à 4	1
Plastique p	5à9	2
Très plastique TP	10à15	3
Fluide fl.	16	3

I.5.1.1.2.Essai de maniabilité (LCPC)

Il s’agit d’une méthode de remoulage utilisant le maniabilimètre Lesage mis au point au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) dans les années 1980. Son principe est très simple et veut simuler l’écoulement du béton dans un coffrage sous l’effet de vibrations. Cette aptitude à l’écoulement est repérée par le temps que met le béton pour atteindre un certain niveau. Cette méthode pratique permet avec cet outil de déterminer la maniabilité maximale du béton en fonction du rapport Sables sur Gravillons (S/G). Elle a l’avantage de mener à des bétons qui présentent des risques de ségrégation minimaux.

L'appareil est constitué d'un moule en forme de parallélépipède, ouvert sur sa face supérieure, et portant un vibreur sur son petit côté. Ce moule repose sur 4 amortisseurs. Son poids, vibreur compris, est d'environ 117 Kg. Le moule reçoit une paroi inclinée et amovible.

La théorie de Baron - Lesage est fondée sur les hypothèses suivantes qui ont été vérifiées par l'expérience (Rossi, 1998) [21]:

- pour un rapport E/C fixé, le béton le plus maniable est celui dont le squelette granulaire est le plus compact,
- le rapport S/G correspondant à cet optimum de compacité est indépendant de la quantité de pâte de ciment.

Il peut rendre de grands services dans les usines fabriquant des produits de béton.



Figure 1.10 : Maniabilimètre LCPC.

Tableau 1.5 : Classification des bétons selon leur temps au maniabilimètre.

Type de béton	Temps maniabilité
Béton très fluide	$t \leq 10$ secondes
Béton très plastique	$t \cong 15$ secondes
Béton de bonne ouvrabilité	$20 \leq t \leq 30$ secondes
Béton secs, peu maniables	$t \geq 40$ secondes

I.5.1.2. Masse volumique

Le béton ordinaire généralement employé pour les chaussées, les bâtiments et les autres ouvrages a une masse volumique de l'ordre de 2 200 à 2 400 kg/m³.

La masse volumique du béton varie en fonction de la quantité et de la densité des granulats, des quantités d'air emprisonné ou entraîné, du dosage en eau et en liants (qui dépend lui-même, de la taille maximale de gros granulat).

Le fait de réduire la teneur en pâte de ciment (d'accroître le volume de granulat) augmente la masse volumique. La valeur de cette dernière est importante dans le calcul des ouvrages en béton armé.

La mesure de la masse volumique est très simple. Il suffit de mesurer la masse de béton versé dans un contenant de volume bien déterminé. La masse volumique est donnée par le rapport de la masse de béton sur le volume du contenant. Il est clair que pour les bétons à air entraîné, la masse volumique diminue en fonction du pourcentage d'air [20].

I.5.2. Propriétés des bétons à l'état durci

I.5.2.1. Résistance mécanique

La résistance du béton est généralement considérée comme la propriété la plus importante bien que, dans nombreux cas pratiques, d'autres caractéristiques telles la durabilité et la perméabilité puissent en fait être plus importantes. Néanmoins, la résistance projette généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elle est directement reliée à la structure de la pâte de ciment hydraté. De plus, la résistance du béton est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité. Pour la mesure de la résistance mécanique, Il existe deux types d'essais pour la mesure de la résistance du béton, des essais destructifs et des essais non destructifs.

➤ Essais destructifs

Les résistances sont mesurées sur des éprouvettes cylindriques, cubiques ou prismatiques, les plus fréquemment utilisés sont les moules cylindriques [20].

a) Résistance en compression

On peut définir la résistance en compression comme la mesure de la résistance maximale d'une éprouvette cylindrique ou cubique de béton ou de mortier sous une charge axiale.

Elle est généralement exprimée en méga pascals (MPa).

Principe de l'essai :

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

b) Résistance en traction

Généralement le béton est un matériau travaillant bien en compression, mais on a parfois besoin de connaître la résistance en traction, en flexion, au cisaillement. La résistance en traction à 28 jours est désignée par f_{t28} . Plusieurs essais peuvent être réalisés:

b.1) Résistance en traction directe

La mesure se fait par mise en traction de cylindres identiques à celle de la résistance en traction par fendage, mais l'essai est assez délicat à réaliser car il nécessite, après sciage des extrémités, le collage de têtes de traction parfaitement centrées, l'opération devant avoir lieu sans aucun effort de flexion parasite.

b.2) Résistance en traction par fendage

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. Cet essai est souvent appelé "Essai Brésilien".

Si « p » est la charge de compression maximale entraînant l'éclatement du cylindre, « D » le diamètre nominal de l'éprouvette et « L » la longueur du cylindre, la résistance en traction par fendage sera [21].

$$F_{tj} = \frac{2P}{\pi.D.L}$$

b.3) Résistance en traction par flexion

Les essais les plus courants sont des essais de traction par flexion. Ils s'effectuent en général sur des éprouvettes prismatiques de côté a et de longueur 4a, reposant sur deux appuis: Soit sous charge concentrée unique appliquée au milieu de l'éprouvette (moment maximal au centre).

Soit sous deux charges concentrées, symétriques, égales, appliquées au tiers de la portée (moment maximal constant entre les deux charges) [21].

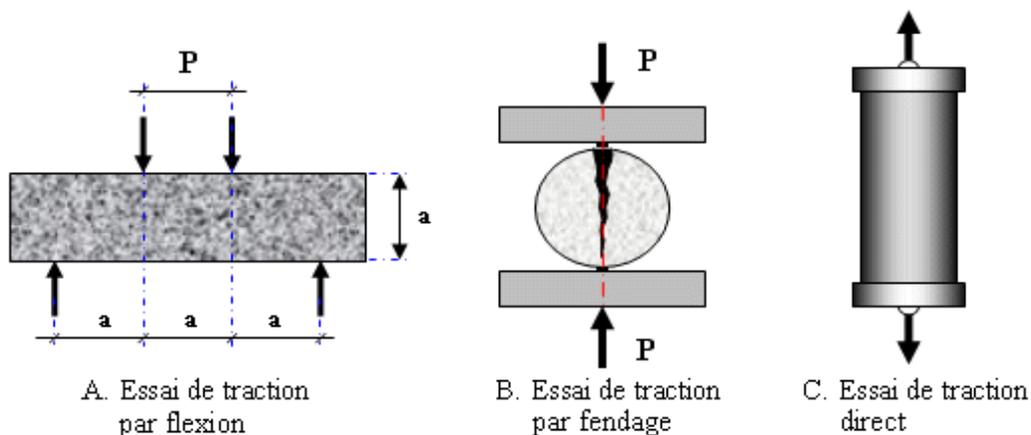


Figure 1.11 : Différents essais sur les résistances d'un béton en traction.

➤ Essais non destructifs

Les essais non destructifs sont des essais qui permettent d'évaluer la résistance d'un béton sans que l'on soit obligé d'aller jusqu'à la rupture des éprouvettes. C'est un avantage indéniable lorsque l'on est appelé à établir un diagnostic des ouvrages où les éprouvettes font défaut.

a) Essai ultrasonique

Le principe de la méthode des ultrasons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton. L'essai ultrasonique peut être effectué sur des éprouvettes de laboratoire, comme sur des ouvrages en béton terminés.

Tableau 1.6: Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des impulsions [20].

Qualité du béton	Vitesse de propagation (m/s)
Excellente	Supérieure à 4575
Bonne	3660 à 4575
Douteuse	3050 à 3660
Mauvaise	2135 à 3000
Très mauvaise	Inférieure à 2135

L'appareil d'auscultation dynamique est utilisé pour mesurer la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques à travers le béton. Par cette méthode, il est possible d'obtenir, de manière non destructive, des informations sur :

- L'uniformité et l'homogénéité du béton.
- Présence des fissures ou des cavités.
- La détérioration due au feu.
- La détermination du module d'élasticité dynamique.
- L'évaluation de la résistance du béton.

L'appareil d'auscultation dynamique génère des impulsions ultrasoniques qui sont transmises en contact avec la zone à évaluer, le temps de propagation à travers le béton est visualisé sur un afficheur digital [22].



Figure 1.12 : Appareil d'auscultation sonore.



Figure 1.13 : Appareil d'auscultation sonore punditLab [22]

b) Essai sclérométrique

Le scléromètre à béton a été introduit au début des années 1950. Il s'agit de l'appareil de mesures non destructives couramment utilisé pour évaluer rapidement l'état d'une structure. Au fil des années, son application s'est étendue aux tests de roche et aux tests de dureté de bobine de papier.

Il se présente sous forme d'un manchon cylindrique à l'intérieur duquel coulisse une tige de 10 à 20 mm de diamètre. Sur la face cylindrique du scléromètre il y a :

- Une règle de mesure avec index.
- Un bouton poussoir à l'opposé de la règle de mesure.
- Un abaque permettant le calcul de la résistance du béton en fonction du rebond de la bille.

Sur une des extrémités du scléromètre il y a une sonde.

But et principe d'utilisation

La mesure de dureté au choc permet d'évaluer la résistance d'un béton de manière non destructive. Cette méthode est intéressante en raison de sa simplicité, elle permet de faire rapidement des contrôles de régularité du béton d'un ouvrage, tester l'homogénéité du béton

in situ pour déterminer des zones de faible qualité, et d'obtenir une estimation rapide de la résistance du béton d'un ouvrage sans procéder à des prélèvements de béton durcit par carottage.

Le principe de cet appareil est basé sur le principe de Schmidt qui consiste à placer la tige contre la surface à tester, en appuyant fortement sur le manchon, on fait pénétrer la tige dans l'ouvrage, jusqu'au moment où un déclic se produit, libérant une masse qui frappe la tige contre la surface.

Un index donne alors la mesure de l'essai sur une règle graduée placée sur le manchon extérieur, ces valeurs sont appelées indices sclérométriques. Faire l'essai plusieurs fois sur la même surface.

Après avoir lu les indices sclérométriques, il faut calculer la moyenne arithmétique, puis déterminer la résistance en se reportant aux graphiques ou aux tableaux dessinés sur le manchon qui varient d'un appareil à un autre [5].

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU PREMIER CHAPITRE

- [1] Adam .M Neville ; « Propriétés de béton » ; Eyrolles Paris ; 2000.
- [2] Regourd. M ; L'hydratation du ciment portland le béton hydraulique ; P.E.N.P.Ch ; 1982.
- [3] AFN 196-NF EN 196-1 ; « Méthodes d'essais des ciments - Partie 1; Détermination des résistances mécaniques » ; Afnor Avril ; 2006.
- [4] Collection Technique CIM-béton ; «les Bétons constituants, mécanismes, propriétés à l'état frais et durci, comportements mécanique et dimensionnel » ; chapitre 3; Tome II ; Ecole Française du Béton.
- [5] Fali Imane ; Propriétés mécaniques des bétons à base de granulats en caoutchouc ; Master Académique ; Université Mouloud Mammeri de Tizi ousou ; 2016.
- [6] Taleb Karina ; Etude à l'état frais et à l'état durci de l'influence des fines de mortiers de démolition sur les propriétés des mortiers; Master Académique ; Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou ; 2016.
- [7] Dreux G; Fiesta J; « Nouveau guide du béton et de ses constituants» ; 8ème édition Eyrolles ; 2002.
- [8] Dupain N R, Saint Arroman J.C ; « Granulats sols ciments et bétons » ; 4ème Edition Casteilla ; 2009.
- [9] De Larrard F ; « Structures granulaires et formulation des bétons » ; Edition laboratoire central des ponts et chaussées ; 2000.
- [10] De Larrard F, Ferraris C ; « Béton frais remanié I et II et III » BLPC. N° 213 pp 73-89, Jav-fév ; 1998.
- [11] P.C.Aitcin ; L'emploi des fluidifiants dans les BHP ; Le Béton à ultr haut performance presse de l'ENPC.
- [12] A .M.Paillerie ; les Adjuvants le béton hydraulique presse de ENPC ; 1982.
- [13] George Dreux et Jean Festa ; Nouveau guide du béton et de ses constituant ; Edition Eyrolle ; 2002.
- [14] Florent Dalas ;Influence des paramètres structuraux de superplastifiantssur l'hydratation, la création de surfaces initiale ;THESEPour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Bourgogne ;Université de Bourgogne;2014
- [15] Bensaid Sofiane ; L'utilisation de la poudre de verre dans la composition du béton ; Master Académique ; Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ; Session 2015.
- [16] A.R. Kara ; Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances

Mécaniques des mélanges cimentaires, ThD, U Cergy Ponitoise ; décembre 2002.

[17] A.M.Nevile ; Propriétés des bétons ; Edition Eyrolle ; 2000.

[18] Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese Normand, F. MacLeod et Richard J. Mcgrath ; Dosage et contrôle des mélanges de béton ; 7ème édition canadienne 2004.

[19] Selma Boussaha ; Etude des propriétés du béton à base de polymère ; Master Académique ; Université 8 Mai 1945 Guelma, Algérie ; 2019.

[20] Chabi Makhlouf ; Valorisation de la poudre de verre dans un béton ordinaire destiné Pour la précontrainte ; Master académique ; Université de M'hamed Bougara –Boumerdes ; 2017.

[21] Georges Dreux, Jean Festa ; Nouveau guide du béton et de ses constituants 8^{ème} édition Eyrolles; Paris 1998.

[22] Controls; Instruction manual: ultrasonic pulse velocity tester; Mod. 58-E0048; 2002.

**CHAPITRE 2 : VALORISATION
DES DECHETS DANS LE
DOMAINE DE LA COSTRUCTION**

CHAPITRE 2 : VALORISATION DES DECHETS DANS LE DOMAINE DE LA COSTRUCTION

PARTIE 1 : LES DECHETS

II.1. INTRODUCTION

Dans le cadre d'une garantie de sécurité environnementale à long terme, la caractérisation des déchets est une phase préalable essentielle dans le choix du stockage ou de valorisation: elle permet de décrire le déchet, de le connaître et d'anticiper sur son comportement à venir.

Le recyclage est le procédé qui permet la fabrication de nouveaux produits à partir de la réutilisation partielle ou totale des matériaux en fin de vie « faire du neuf à partir du vieux » donc les déchets deviennent des matières premières [1].

II.2. DEFINITION DU TERME « DECHET »

Au sens de la loi en France, un déchet est défini comme " Tout résidu d'un processus de production, de transformation, ou d'utilisation, toute substance, matériau produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon et qui sont de nature à produire des effets nocifs sur le sol, la flore et la faune, à dégrader les sites ou les paysages, à polluer l'air ou les eaux, à engendrer des bruits ou des odeurs, et d'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement[2] . En matière de gestion, le mot déchet peut être défini de différentes manières selon le type de considération. Dans la littérature, quatre définitions sont proposées : une économique, une juridique, une matérielle et une environnementale [3].

Parmi celles-ci, retiennent les deux premières définitions qui mettent en exergue la valeur économique du déchet et l'enjeu juridique qui entoure sa gestion future [4].



Figure 2.1: Les déchets solides [5]

II.2.1. Définition économique

Un déchet est défini comme étant un objet ou une matière dont la valeur économique est nulle ou négative, pour son détenteur, à un moment et dans un lieu donné. Pour s'en débarrasser, le détenteur devra payer quelqu'un ou faire lui-même le travail (contrairement à un bien qui a une valeur économique positive et donc un acquéreur pour lequel on doit payer un prix). Cette définition de la nullité de valeur reste cependant relative car les déchets des uns peuvent servir de matières premières secondaires pour la fabrication d'autres produits voire même des biens pour d'autres personnes ou communautés aussi bien dans les pays développés ou industrialisés (PI) que dans ceux en développement selon l'expression « les résidus des uns font le bonheur des autres » [6].

II.2.2. Définition juridique

On distingue une conception subjective et une conception objective de la définition juridique du déchet. Selon la conception subjective, un bien devient un déchet lorsque son propriétaire a la volonté de s'en débarrasser. Il demeure lui appartenir tant qu'il n'a pas quitté la propriété de cette personne ou l'espace qu'elle loue. Ce bien devient une propriété de la municipalité lorsqu'il est déposé sur la voie publique ou dans une poubelle, car par cet acte son propriétaire peut avoir clairement signifié sa volonté d'en abandonner tout droit de propriété. Selon la conception objective, un déchet est un bien 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 la valeur économique du bien : les biens recyclables qui sont des matières premières secondaires entrent dans cette définition objective. Ainsi, le détenteur d'un bien est

soumis à la réglementation et il ne peut se décharger de ses responsabilités envers la gestion de ce déchet sous prétexte de sa valeur économique [7].

II.2.3. Définition Politique

Actuellement, le Ministère de l'Aménagement du territoire de l'Environnement [8] en Algérie est le premier responsable de la politique nationale de l'environnement. Il a été créé à la fin des années 1980 avec une dénomination variable dans le temps. Cependant, au cours de la dernière décennie, les directions ministérielles ont été systématiquement transformées (séparées ou fusionnées) à plusieurs reprises dans différents ministères et toutes ont transmis leurs pouvoirs, notamment ceux liés à la gestion des déchets, au Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement [8].

S'agissant de déchets, la direction générale de l'environnement et du développement durable est chargée de :

- Mettre en œuvre une politique moderne de développement durable ;
- Déterminer les objectifs en matière de gestion des déchets ;
- Élaborer et mettre en place un plan national de gestion intégrée des déchets ;
- Délivrer des autorisations des installations des déchets spéciaux ;
- Fixer les normes à respecter en cohérence avec la réglementation nationale.
- La politique de déchets vise un ensemble d'actions et de mesures notamment :
 - * Une réduction de la quantité de déchets ;
 - * Une gestion économique et environnementale [8].

II .3. DIFFERENTS TYPE DE DECHETS

On distingue généralement diverses sortes de déchets dont :

II .3.1. Les déchets ménagers et assimilés

Constitués essentiellement des ordures ménagères, de déchets urbains (nettoisement), de déchets verts et d'encombrants auxquels il faut ajouter les déchets des commerces, des artisans et entrepreneurs, des écoles et autres établissements d'enseignement et des hôpitaux et autres établissements de soins [9].

II .3.2. Les déchets des collectivités locales

Qui comprennent surtout les boues des stations d'épuration, les déchets verts, les résidus du nettoyage des rues et des marchés, les déchets des administrations publiques (papiers et autres documents)[9].

II .3.3. Les déchets industriels

Selon le rapport sur la gestion des déchets en Algérie[10], 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 [10].

Les déchets industriels peuvent classés en 3 catégories

a - Déchets industriels banals (DIB)

Les déchets 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.[11].

b - 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[11].

c - 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 [11].

II .3.4. Les déchets inertes

Comme leur nom l'indique est une catégorie de déchets évidemment non biodégradables, mais surtout non susceptibles de brûler ou de produire quelque réaction chimique que ce soit seuls

ou avec d'autres composés. Les gravats, les déchets de démolition entrent dans cette catégorie de déchets qui peuvent être mis en décharge ou servir de remblais ou de sous-couche pour des voies de circulation. Dans la réalité, ces matériaux ne sont pas anodins et en particulier, les eaux de pluie qui percolent au travers donnent lieu à des lixiviats pouvant polluer durablement des aquifères [9].

II .3.5. Les déchets fermentescibles

Sont des déchets biodégradables, c'est-à-dire se décomposant plus ou moins rapidement sous l'action de micro-organismes aérobies ou anaérobies (bactéries, moisissures). Les ordures ménagères contiennent une part importante de matières fermentescibles que l'on nomme la fraction fermentescible des ordures ménagères. Cette part peut être extrêmement réduite par le tri sélectif dès lors que l'on procède, quand on le peut, au compostage chez soi de cette fraction [9].

II .3.6. Les déchets ultimes

Est un déchet, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans des conditions techniques et économiques du moment, notamment par de la part valorisable ou part extraction de son caractère polluant ou dangereux (loi du 15 juillet 1975). Cette définition est plutôt ambiguë dans la mesure, par exemple, où on pourrait considérer qu'un déchet pour lequel on faisait des efforts pour le rendre moins nocif, on ne les fasse plus du jour, par exemple, où pour des motifs de rentabilité économique, on estime plus intéressant de s'en débarrasser à Abidjan [9].

II .3.7. Les déchets radioactifs

Les hôpitaux et les autres établissements de soins sont à l'origine de nombreux déchets. Certains de ces déchets sont banals et s'apparentent le plus souvent à des ordures ménagères (déchets de bureaux, de cuisines, restes de repas, déchets liés à l'entretien des locaux. D'autres déchets sont particuliers. Il s'agit principalement de déchets radioactifs, de déchets à risques infectieux et de médicaments [11].

II .4. CONSTITUTION CHIMIQUE DU DECHET

Les déchets sont pour la plupart constitués des mêmes molécules chimiques que celles des produits. Ce qui différencie les déchets des autres produits provient d'un certain nombre de particularités. Certains déchets résultent du traitement involontaire de molécules usuelles avec production de sous-produits de composition, a priori inconnu. Par ailleurs, le déchet peut se

retrouver dans un milieu dont il n'est pas issu en tant que produit et de ce fait auquel il n'est pas destiné. Enfin, le mélange au hasard des déchets peut conduire à la formation de produits nouveaux [12].

II .5. GESTION DES DECHETS

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 [11].

II .5.1. Définition de la gestion des déchets

La gestion des déchets est toute opération relative à la collecte, au tri, au transport, au stockage, à la valorisation et à l'élimination des déchets, y compris le contrôle de ces opérations (Loi 01-19). La réduction à la source, la réutilisation, le recyclage, la valorisation et l'élimination doivent être privilégiés dans cet ordre dans le domaine de la gestion des déchets [5].

II .5.2. 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):

- Réduire
- Réutiliser
- 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 Etats-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 [13].

II .5.3. 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 [11].

II .5.3.1. 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 [11].



Figure2.2: Enfouissement des déchets.

II .5.3.2. 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 2.3: Incinération en plein air et usine d'incinération.

II.5.3.3. 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 2.4 : Décharge contrôlée.

II.5.3.4. 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 [11].



Figure 2.5: Compostage de déchets organiques

II.5.3.5. Le recyclage

Le recyclage d'un déchet consiste à réutiliser là ou différentes matières qui entrent dans sa composition ce qui permet d'économiser des matières premières et de l'énergie [14].

Ce mode de traitement concerne surtout le verre, le papier-carton, les emballages et les métaux : ces déchets font l'objet d'une collecte séparée déjà bien établie depuis longtemps et suivie d'un traitement spécifique de valorisation sous forme de recyclage : il s'agit d'une récupération de matière première, sans véritable transformation [15].



Figure 2.6: Usine de recyclage des déchets.

II.5.4 ASPECT RÉGLEMENTAIRE ET LEGISLATIVES DE LA GESTION DES DÉCHETS EN ALGERIE

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 [16], 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 [10] :
 - 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 de la 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.

CHAPITRE 2 : VALORISATION DES DECHETS DANS LE DOMAINE DE LA COSTRUCTION

PARTIE 2 : LES RECYCLATS DANS LE BETON

III.1. INTRODUCTION

Le recyclage est utilisé dès l'âge du bronze. À cette époque, les objets usagés en métal sont fondus afin de récupérer leur métal pour la fabrication de nouveaux objets. Dans toutes les civilisations, l'art et la manière de « faire du neuf avec du vieux » existent. Par exemple, les vieux chiffons, puis le papier et cartons, sont récupérés pour faire de la pâte à papier. En 1970, le recyclage est mis en avant par des partisans de la défense de l'environnement. Dans cette partie, nous exposons les différents déchets susceptibles de remplacer les granulats ou le ciment dans le béton [9].

III. 2. DEFINITION DU RECYCLAGE

Le recyclage, est la transformation des débris en vue de leur utilisation comme matière première secondaire. Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent ; c'est alors le législateur qui intervient. Ainsi, en particulier depuis les années 70, le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés [17]

III.3. AVANTAGES DU RECYCLAGE

Parmi les biens faits environnementaux et économiques et du recyclage, on trouve :

- Protection de l'environnement, limiter la pollution de l'air et des sols et préservation de ressources naturelles.
- Réduction des volumes des décharges et de l'incinération, procédé qui favorisent la pollution des sols et de l'air,

- Réduction des nuisances liées aux transports des matières premières, limite la consommation du carburant et le dégagement du CO₂, limite la sollicitation du réseau routier et création d'emplois.
- Offre des ressources d'approvisionnement en matières premières alternatives aux autres sources, exemples :
 - ✓ L'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer ;
 - ✓ Une tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut ;
 - ✓ Le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité ;
 - ✓ Chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2.5 tonnes de bois ;
 - ✓ Chaque feuille de papier recyclé fait économiser 1 litre d'eau et 2.5 W d'électricité en plus de 15 g de bois.

III.4. LES PRINCIPES DE RECYCLAGE

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois principes:

- réduire, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets,
- réutiliser, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage.
- recycler, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.

Le recyclage apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par enfouissement et par incinération, mais il n'est pas suffisant pour contrer l'augmentation de la production des déchets ou y suffit à peine.

Ainsi, dans le cas du Québec, l'importante hausse du taux de recyclage, passant de 18 % à 42 % entre 1988 et 2002, est allée de pair avec une augmentation de la quantité de déchets à éliminer par habitant, passant de 640 kg/an/personne à 870 kg du fait d'une augmentation de 50 % de la production par habitant durant cette même période. En France, le volume de déchets a doublé entre 1980 et 2005, pour atteindre 360 kg/an/personne.

Pour lutter contre l'augmentation des déchets, le recyclage est donc nécessaire, mais il doit être inclus dans une démarche plus large

III.5. TECHNIQUE DE RECYCLAGE

III.5.1. Procédés du recyclage

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

Le recyclage dit « chimique » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants. Le recyclage dit « mécanique » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer. Le recyclage dit « organique » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz [13].

III.5.2. La chaîne du recyclage

a. Collecte de déchets

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets.

Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis en centres d'enfouissement techniques.

Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés ni 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 crée le déchet le trie lui-même.

À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Le tri manuel est une de ces opérations [18].

b. 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 [18].

c. Commercialisation et consommation

Une fois transformés, les produits finis issues du recyclage sont utilisés pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs et consommés.

Pour être en fin de vie, à nouveau jetés, récupérés et recyclés [18].

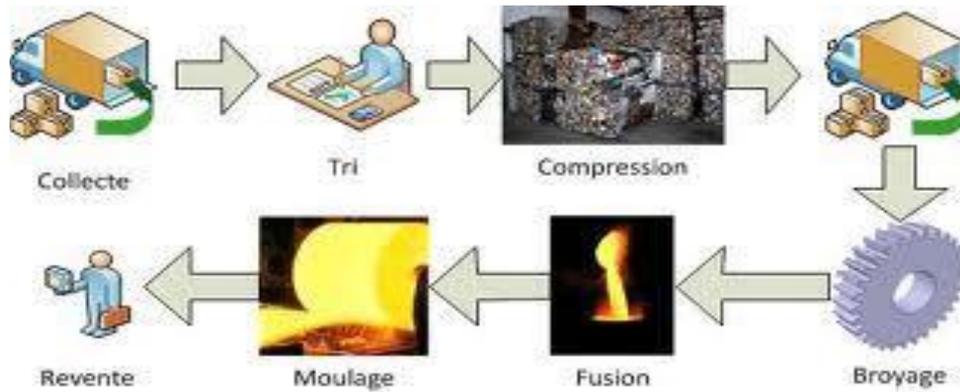


Figure 2.7 : Recyclage du plastique [17].

III.6. UTILISATION DES MATERIAUX RECYCLÉTS DANS LES BETONS

Afin de mieux préserver l'environnement, plusieurs actions de valorisation ont été entreprises, notamment dans le domaine des matériaux de construction. Plusieurs travaux concernant l'emploi des recyclats ont été réalisés. Les avantages que peut offrir l'incorporation de ce type de granulats dans le béton du point de vue mécanique et durabilité, de contribuer à la réduction de mise en décharges publiques de ces matériaux et de remplacer une proportion de granulats naturels qui sont des ressources épuisables par ces granulats alternatifs.

III.6.1. Déchets de démolition

Les domaines d'emploi des recyclats 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].



Figure 2.8: Déchets de démolition.

III.6.2. Boues rouges

Les boues rouges sont des résidus industriels issus du processus d'extraction d'aluminium à partir de la bauxite. Ces résidus selon [19] ont un pH supérieur à 12 et sont produits à un taux de 2 t/t d'aluminium commercialisé [20]. Les boues rouges sont stockées soit au fond des océans (France, Allemagne), soit près des usines comme au Canada [21].

La production des boues rouges en 2006 s'est chiffrée à 10 Mt dans le monde dont, 3 Mt au Canada et on prévoit une augmentation de production de 60 % par décennie [22]. Les grandes alumineries peuvent en générer jusqu'à 675 000 tonnes par année [22]. 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 2.9: Boues rouges [11].

III .6.3.Déchets de verre

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. En général, la résistance du béton contenant du verre est inférieure à celle du béton contenant du gravier [13]. Il est utilisé sous deux formes principalement : les granulats (taille > 4 mm) et les poudres (taille < 4 mm). Les granulats sont utilisés en remplacement des graves dans les bétons et lui procurent une résistance moindre. Les poudres (sables et fines) sont utilisées dans les mortiers en remplacement du sable mais aussi dans l'industrie du ciment pour fines. Ces différents points seront détaillés plus loin puisque un des recyclats utilisés dans l'étude est un recyclat de verre.



Figure 2.10: Déchets de verres.

III.6.4. Le laitier expansé

Le laitier expansé est utilisé pour la fabrication du béton léger ayant une masse volumique apparente de l'ordre de 800kg/m^3 . 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].

III.6.5. Cendres volantes

Les cendres volantes pourraient constituer de très bons granules légers, mais elles ne sont pas beaucoup utilisées. 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.

À l'origine, les cendres volantes étaient mélangées avec de l'eau et transformées en boulettes soit dans un tambour ou un cône rotatif, soit par extrusion. L'addition d'une faible quantité d'alcalis permet d'obtenir des boulettes ayant une meilleure résistance aux chocs thermiques et mécaniques. Lorsque le frittage se fait dans des fours à grille mobile, la température atteint environ 1150 à 1200°C et par conséquent, les petites particules de cendres volantes se fusionnent et forment un aggloméré. Cet aggloméré est ensuite brisé en boulettes. Les bétons qui contiennent de tels granules ont une résistance à la compression à 28 jours de l'ordre de 40MN/m^2 et une masse volumique d'environ 1100 à 1800kg/m^3 . Puisque ces granulats ont une forme adéquate et une bonne résistance, ainsi qu'une absorption d'eau modérée, ils conviennent à la fabrication de blocs de béton léger [24].



Figure 2.11 : Cendre volante.

III.6.6. Pneus usagés

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 de retrait malgré une amplitude plus élevée de ses variations dimensionnelles de retrait. Malgré les limites en termes de résistance en compression, le composite incorporant des granulats en caoutchouc est donc d'un intérêt évident dans toutes les applications où la lutte contre la fissuration due aux déformations est une priorité [25].



Figure 2.12: Stock de pneus usagés en Tarn-et-Garonne en 2007 (France)

III.6.7. 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 [11].



Figure 2.13: Ciment durci.

III.6.8. Résidus d'incinération

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 [11].



Figure 2.14: Résidus d'incinération.

III.6.9. 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 2.15: Industrie du béton.

III.6.10. 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 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 2.16: Briques en terre crue.

- **Briques en terre cuite**

Les briques en terre cuite 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 2.17: Briques en terre cuite.

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.

III.6.11.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».



Figure2.18: Sable de fonderies.

III.6.12.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 [26]).

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 2.19: Déchets de plastiques.

III.6.13. 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 ponce.

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

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



Figure2.20: Déchets de marbres et déchets de marbre broyés.

III.6.14. Scories de sole

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 pour la fabrication de blocs de béton [27].



Figure 2.21: Site de stockage scories.

III.6.15.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 (ex : verre, ferrailles, gros imbrûlés). Ils 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 » [22].



Figure 2.22: Mâchefer.

III.6.16. 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 bi calcique, 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 [11].



Figure 2.23: Laitier d'acier.

III.6.17.Laitier de haut fourneau

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 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 de «laitier expansé».

Le laitier refroidi à l'air est approprié comme granulats pour le béton. La comparaison entre la résistance à la compression du béton constitué de granulats de laitier de haut fourneau et celle du béton constitué de gravier et de calcaire concassé indique que le béton de laitier est plus résistant [27]. Les fines du laitier peuvent être utilisées pour remplacer sans inconvénient le sable. 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. La quantité de laitier expansé produit est bien plus faible que celle de laitier refroidi à l'air. Le laitier expansé est utilisé pour la fabrication du béton léger ayant une masse volumique apparente comprise entre 800 et 950 kg/ m³.

Les blocs de béton de laitier expansé sont utilisés pour la construction de murs porteurs et démurés non porteurs. Le béton de laitier expansé a une excellente résistance au feu et une conductivité thermique d'environ 75% de celle des autres bétons légers. Le laitier expansé réduit en boulettes a été mis au point au Canada. On prétend que ce procédé de fabrication pollue moins l'air que le procédé normal de fabrication.



Figure 2.24: Laitier de haut fourneau.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU DEUXIEME CHAPITRE

- [1] Taleb Karina ; Etude à l'état frais et à l'état durci de l'influence des fines de mortiers de Démolition sur les propriétés des mortiers ; Master Académique ; Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou ; 2016.
- [2] Journal officiel ; (n° 75-633) ; Algérie. 15 juillet 1975
- [3] Sané Y, (2002), La gestion des déchets à Abidjan: Un problème récurrent et apparemment sans solution ; Ajeam/Ragee 2002.
- [4] André M. et al; Gestion des déchets hospitaliers ; Projet DESS 'TBH', UTC, pp 51, URL : http://www.utc.fr/~farges/DESS_TBH/96-97/Projets/DS/DS.htm, 1997
- [5] Belmiloud Lilia, Yahiaoui-DBK; Recyclage des déchets inertes de marbre et de granite de la marbrerie dans la fabrication des dallages de sol ; Master Académique ; Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou ; 2017.
- [6] Anonyme, (2004-a), Recueil Activités Pédagogiques ; Québec-Cameroun, Mission 2003-2004.
- [7] Sahnoune Tayeb ; Vers un développement urbain durable phénomène de prolifération des déchets urbains et stratégie de préservation de l'écosystème; Master Académique ; Université Mentouri ; Constantine ; 2005.
- [8] Mate; Programme nationale de gestion intégré des déchets ménagers et assimilés volume I ; Algérie. , 2012.
- [9] Fali Imane ; Propriétés mécaniques des bétons à base de granulats en caoutchouc ; Master Académique ; Université Mouloud Mammeri de Tizi ouzou ; 2016.
- [10] Bourmate.N ; Granulats recyclés de substitution pour béton hydraulique ; thèse de doctorat ; Université des frères Mentouri ; Constantine ; Algérie 2017.
- [11] Dia Mouhamadou ,Soumah Mouloukou ; Etat de l'art sur les bétons à base de recyclât Perspectives pour l'Algérie ; Master Académique ; Université 8 Mai 1945 Guelma ; 2019.
- [12] Sperandiok ; Identification des facteurs mobilisateurs des stratégies de gestion des déchets ménagers mises en œuvre par les collectivités locales ; thèse de doctorat ; l'institut national des sciences appliquées de Lyon ; 2001.
- [13] Saadani Sabrina ; Comportement des bétons à base de granulats recyclent ; Master Académique ; Université Mentouri Constantine.
- [14] Molleta R, Le traitement des déchets ; 18-20,105p. 2009

- [15] Balet J.-M.; Gestion des déchets ; Aide-mémoire ; 4ème. Ed. DUNOD, France. 63,71p. 2014.
- [16] Belkbir.H ; Elaboration d'un béton autoplaçant léger à base des déchets de plastique ; Mémoire de DEUA ; Université de Boumerdes ; Algérie 2011.
- [17] Julien. B; De l'incinération des ordures ménagères, maîtrise sciences de l'environnement, milieux urbains et industriels ; Université de Cergy-Pontoise. 2011.
- [18] Belbali Amal, Bouchentouf Fatima ; Valorisation énergétique de déchet de déjection par méthanisation (mouton); Master Académique ; Universit ; d'Adrar ; 2016.
- [19] Doye, I, Duchesne, J; Neutralisation of acid mine drainage with alkaline industrial, 2003.
- [20] Résidus; Laboratory investigation using batch - leaching tests. Applied geochemistry. (18).1197. Cité dans (Shkelzen, 2010).
- [21] Vachon, P. Rajeshwar, D. Tyagi; Au Clair, J. - C. Wilkinson, Kevin J (1994); Chemical and Biological Leaching of Aluminum from Red Mnà. Environ. SCI. Techno. 28 (1) 26. Cité dans (Shkelzen, 2010).
- [22] Kharoune, M.; Séquestration du CO₂ par carbonatation minérale en réacteurs dynamiques ; 7ème Salon International des Technologies Environnementales. Americana. 2006.
- [23] Mamery Serifou ; Béton à base de recyclats : influence du type de recyclats et rôle de la formulation.
- [24] Ramachandran V-S ; Utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton, CBD-215-F, conseil national de recherches Canada ; juin 1981.
- [25] Bonnet S, Turatsinze A et Granju J-L ; Effets de l'incorporation de granulats en caoutchouc, issus du broyage de pneus usagés sur la résistance à la fissuration d'un mortier de ciment ; Annales du bâtiment et des travaux publics ; Décembre 2004-N° 6.
- [26] Belkbir.H ; Elaboration d'un béton autoplaçant léger à base des déchets de plastique ; mémoire de DEUA ; Université de Boumerdes ; Algérie 2011.
- [27] Ramachandran V-S ; Utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton, CBD-215-F ; conseil national de recherches Canada ; juin 1981.

CHAPITRE 3
VALORISATION DES DECHETS
DANS LE BETON

CHAPITRE 3 : VALORISATION DES DECHETS DANS LE BETON

IV.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, les résultats des recherches scientifiques traitant la valorisation de quelques déchets et sous-produit dans la formulation du béton seront présentés et discutés. Ces derniers sont incorporés soit sous forme de granulats, soit sous forme de poudre.

IV.2. DECHETS VALORISES DANS L'INDUSTRIE DU BETON

IV.2.1. Déchets de brique

Plusieurs travaux de recherches ont examiné expérimentalement l'effet de l'incorporation des de quelques déchets sur le comportement physico-mécanique du béton.

La substitution des granulats naturels gravier et sable par les déchets de brique a été réalisé par Debieb et al. 2008 [1]. Dans ce travail, les chercheurs ont formulés des bétons en substituent, 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 différents 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.

Due aux performances dégradées des bétons avec granulats recyclés de brique, les auteurs ont recommandé de limiter le pourcentage des agrégats recyclés à 25% et 50% des agrégats gros et fin respectivement et d'utiliser la formulation de Dreux pour avoir le maximum de performances.

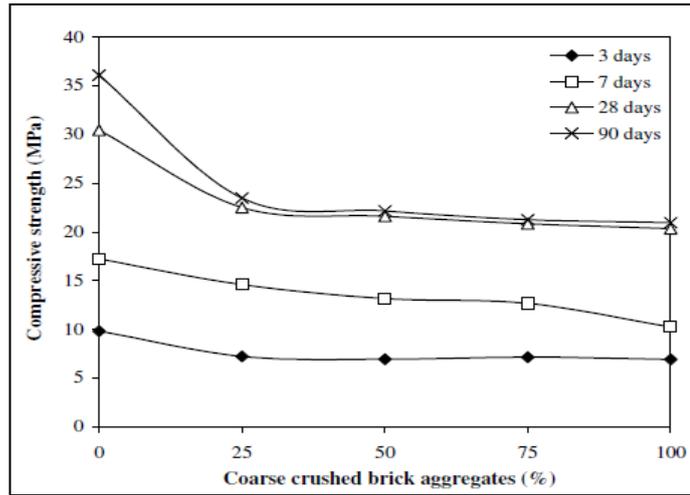


Figure 3.1: Résistance à la compression du béton avec gros granulats de brique [1]

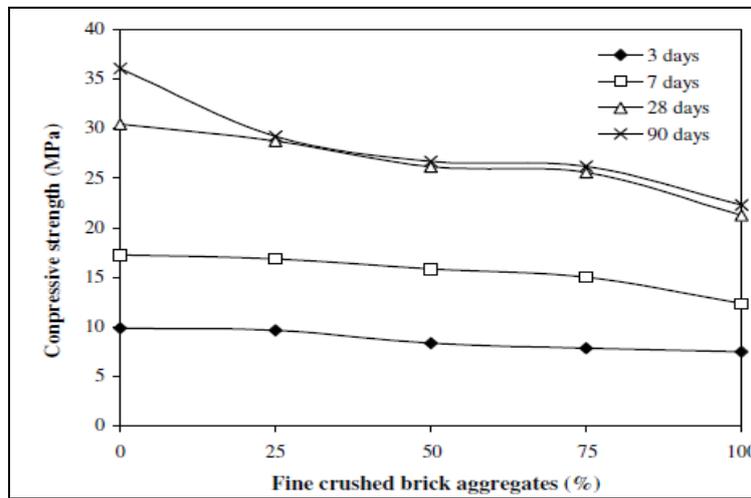


Figure 3.2: Résistance à la compression du béton avec granulats fins de brique [1]

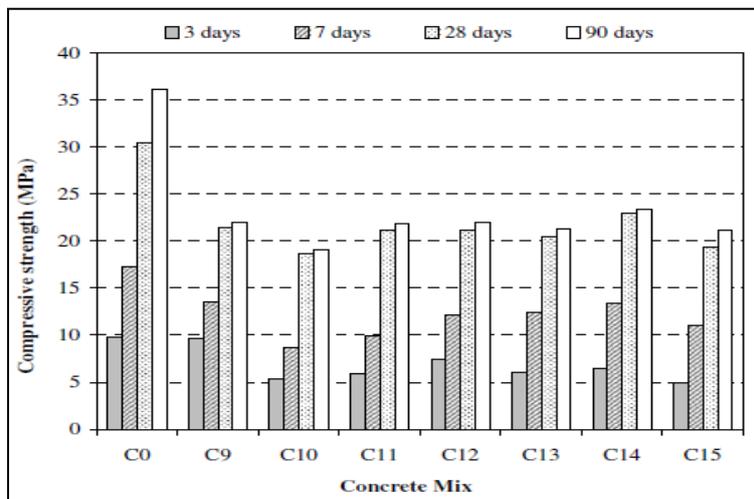


Figure 3.3: Résistance à la compression du béton avec gros et fin granulats de brique [1].

Paulo B. Cachim, 2008 [2], a mesuré la densité du béton à l'état frais selon la norme EN12350- 6 (2002). Les résultats obtenus montrent clairement une réduction de la densité du béton formulé à base de granulats recyclés de brique. La réduction est de l'ordre de 5 et 6% pour les bétons dont E/C =0,45 et 0.5 respectivement.

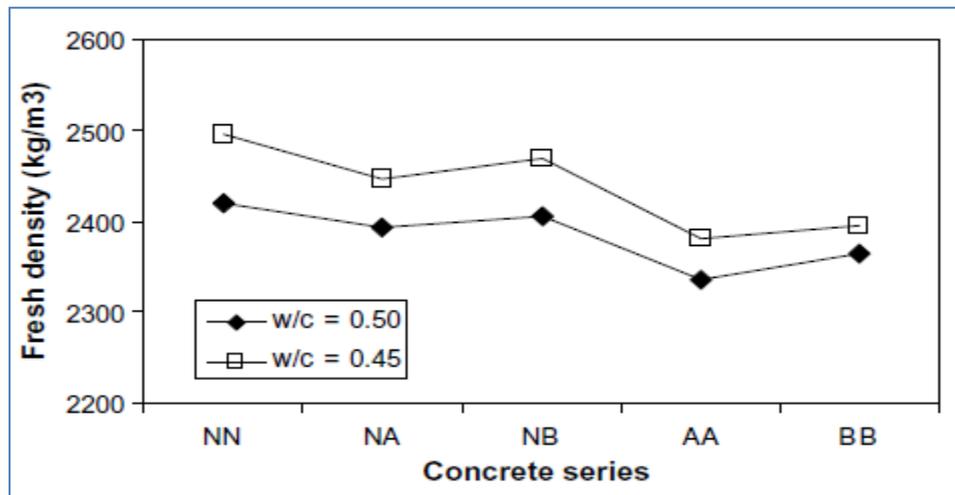


Figure 3.4: Densité a l'état frais des bétons [2]

Des résultats semblables ont été trouvés par Debieb et al 2008 [1], qui ont remarqué une diminution de la densité jusqu'à 17% lorsque les granulats naturels sont substitués par les granulats de brique.

Les résistances des bétons formulés à base des granulats de brique traités thermiquement à 300 °C et à 600 °C sont illustrés sur les figures 3.5 et 3.6 respectivement. [3]Les auteurs ont remarqué que :

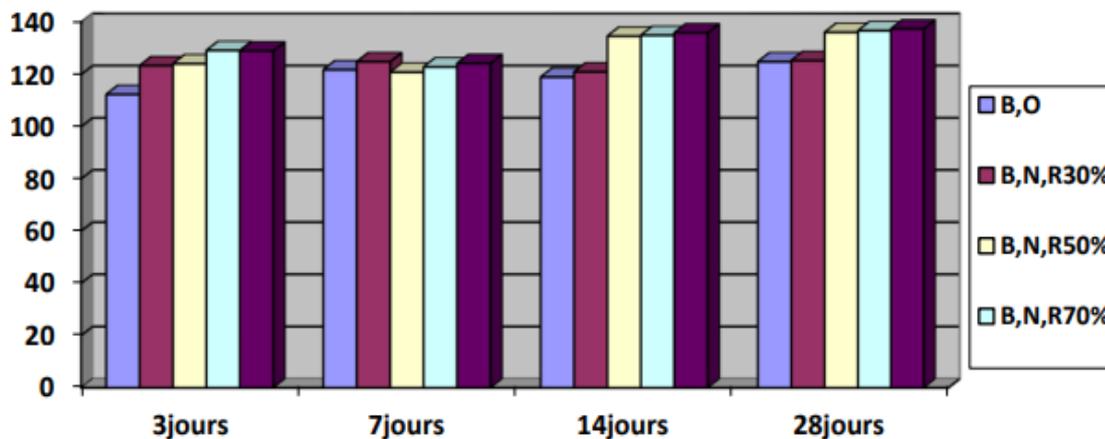


Figure 3.5: Résistance à la compression des éprouvettes traitées thermiquement à 300 °C [3]

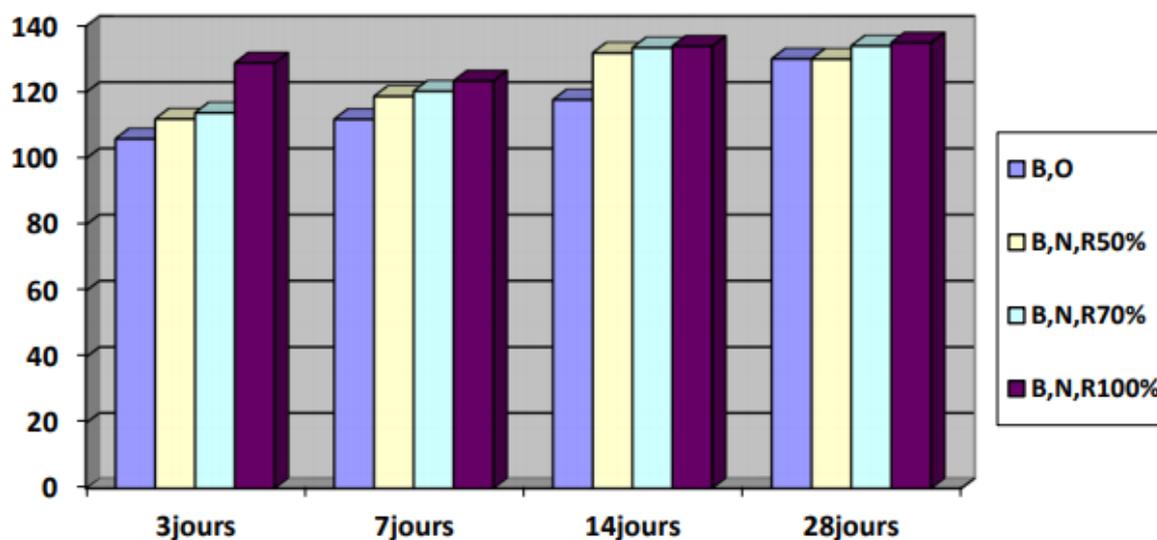


Figure 3.6: Résistance à la compression des éprouvettes traitées thermiquement à 600 °C [3].

- Les bétons formulés avec des granulats de brique présentent des résistances plus élevées que celles de l'échantillon de référence à tous les âges de cure.

- Les bétons avec forte pourcentage de granulats de briques ont les meilleures résistances: Plus le pourcentage des granulats de brique augmentent, les résistances augmentent aussi.

IV.2.2. Déchet de béton recyclé

La confection des nouveaux bétons de bâtiment avec du béton concassé recyclés a été largement étudiée ses dernière années. Les recherches traitant ce béton, ont trouvé que les granulats fabriqué par concassage de l'enceins bétons ont une absorption d'eau plus élevée, une masse volumique plus faible et une homogénéité moindre par rapport aux granulats naturels [4].

Ces différences engendrent une perte d'ouvrabilité du béton frais 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 [4].

La résistance à la compression et le module d'élasticité du béton renfermant des granules recyclés est inférieure à ceux du béton ne contenant que des granulats ordinaires. Les

différences sont encore plus grandes à des rapports eau-ciment inférieurs. Le fait de remplacer les fines du béton recyclé par du sable n'améliore pas pour autant la résistance du béton. Le béton qui contient des fines provenant de béton récupéré doit avoir un rapport eau sur ciment plus élevé étant donné qu'il contient une plus grande proportion de particules de ciment hydraté. L'addition de réducteurs d'eau et une teneur en ciment plus élevée augmentent la résistance du béton.

Le retrait au séchage du béton constitué de béton récupéré est supérieur de 10 à 30% à celui du béton de référence. L'importance du retrait est fonction de la superficie totale; dans le cas des granulats recyclés, on s'attend à ce que la superficie soit plus élevée à cause de la présence de pâte de ciment. La tenue au gel et au dégel du béton contenant des granulats de béton récupéré est semblable à celle d'une éprouvette de béton de référence contenant des granules ordinaires [5].

IV.2.3.Déchets de verre

En général, la résistance du béton contenant du verre est inférieure à celle du béton contenant du gravier. La résistance est particulièrement faible lorsque du ciment à teneur alcaline élevée est utilisé. Le verre de récupération réagit en présence de granules alcalins. Une dilatation élevée est produite lorsqu'il est en contact avec du ciment à teneur alcaline élevée, ce qui explique la faible résistance des bétons à base de verre. Par exemple, pour une période de 12 mois, la dilatation du béton contenant du gravier est de 0.018%, alors que celle du béton contenant du verre est d'environ 0.3 [5].

Le verre de récupération peut aussi servir à la fabrication de granulats légers. La production des granules légers expansés d'une masse volumique de 528 kg/m³ par pelletisation d'un mélange de verre de récupération broyé, d'argile et de silicate de sodium chauffé à une température de 850°C. Le béton ainsi obtenu présente une résistance à la compression d'environ 17 MPa après une période de cure à la vapeur de 28 jours [5].

Une fois broyé, le verre se présente sous forme de poudre intéressante de points de vue chimique que physique à être utilisé comme substituant du ciment pour la formulation des mortiers et des bétons. La mesure des résistances mécaniques à l'âge de 28 et 90 jours des bétons formulés par substitution du ciment en raison de 10 et 20%, montre que les échantillons contenant la poudre de verre présentent des faibles résistances à court terme (28 jours). Alors que à long terme, les résistances augmentent pour dépasser celles de l'échantillon de référence [6]. Ce comportement est expliqué par l'effet que la poudre de verre, tout comme d'autres ajouts cimentaires classiques, modifie la cinétique de développement de la résistance

des bétons. La poudre de verre exerce donc un effet physique combiné avec un effet chimique (réaction pouzzolanique et silice alcaline).

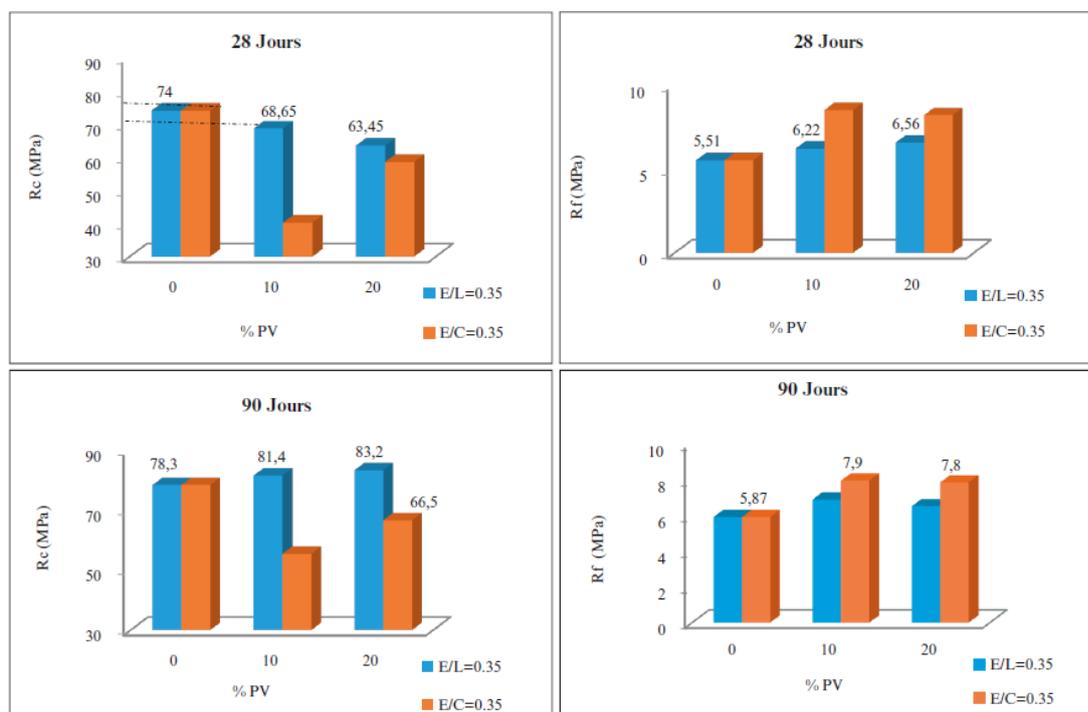


Figure 3.7 : Influence du dosage en poudre de verre et E/L sur à la résistance mécanique [7].

Le rapport E/L influence grandement la résistance, les résultats présentés ici montrent que le rapport E / L = 0.35 donne de meilleurs résultats que le rapport E / C = 0.35. Ce phénomène peut être expliqué par la différence de surface spécifique entre la poudre de verre et le ciment et par la plus faible absorption de l'eau de gâchage par cette poudre ce qui entraîne une augmentation de la quantité d'eau libre dans la matrice cimentaire favorisant ainsi la poursuite de l'hydratation.

La durabilité du béton formulé en substituant le ciment par la poudre de verre (80 μ m) en raison de 30% a donné les résultats suivants [8]:

- Après 3 mois de conservation des éprouvettes dans l'eau de mer, pour les éprouvettes de pâte de ciment sans ajout, la surface est fortement dégradée contrairement à celle avec ajout de poudre de verre. L'observation au microscope électronique à balayage montre que la pâte de ciment avec ajout de poudre de verre se caractérise par la présence de composés hydratés très massifs et riche en C-S-H, ce qui explique l'imperméabilité plus importante du béton à base de la poudre de verre [8].

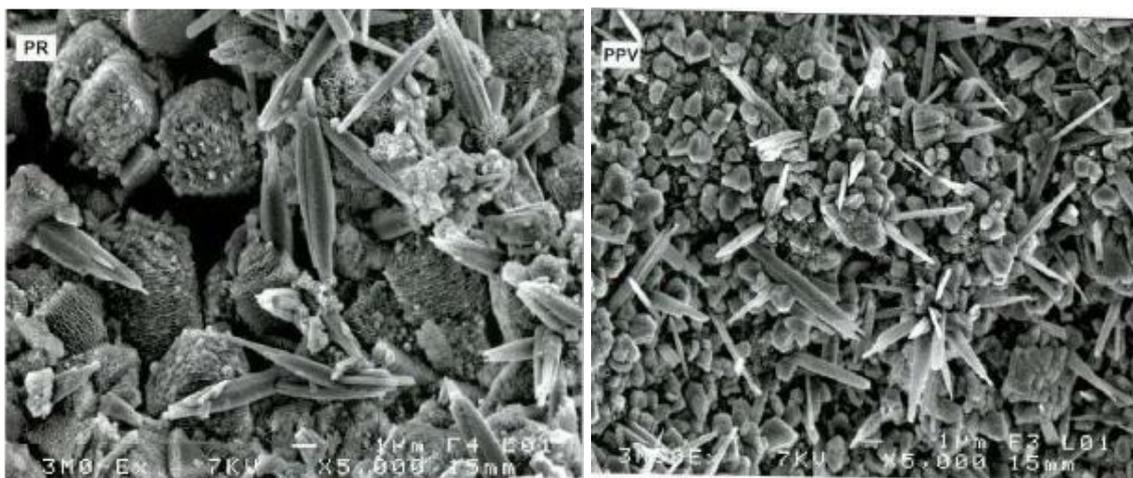


Figure 3.8 : Observation au MEB de la surface externe des pates après trois mois de Conservation dans l'eau de mer [8].

IV.2.4 Caoutchouc

L'introduction des granulats en caoutchouc(GC) dans le béton provoque une baisse des résistances mécanique des bétons. Pour 25 % de substitution en GC, la baisse des résistances à la compression est d'environ 50 % [9]. Les mêmes auteurs ont trouvé que pour les bétons à moins de 15 % de (GC), les résistances sont assez bonnes en comparaison au béton de référence. Pour le B25 GC la baisse en masse volumique est d'environ de 11 %. Les vitesses de propagation des ultra-sons sont inversement proportionnelles au pourcentage de GC dans le béton. Plus le béton est riche granulats naturel, plus les ondes vont moins vite. Pour l'aspect déplacements (déformations), plus le béton est riche en granulats en plus il présente un palier de ductilité plus large, donc le béton ne rompt pas directement à la fin de la phase élastique.

Les résultats des essais mécaniques en flexion et en compression des éprouvettes préparées avec la substitution du sable par (20 et 40%) de déchets de verre et (20 et 40%) de caoutchouc et un autre mélange avec (20% de verre et 20 % de caoutchouc) sont résumés dans les figure 3.9 et 3.10.

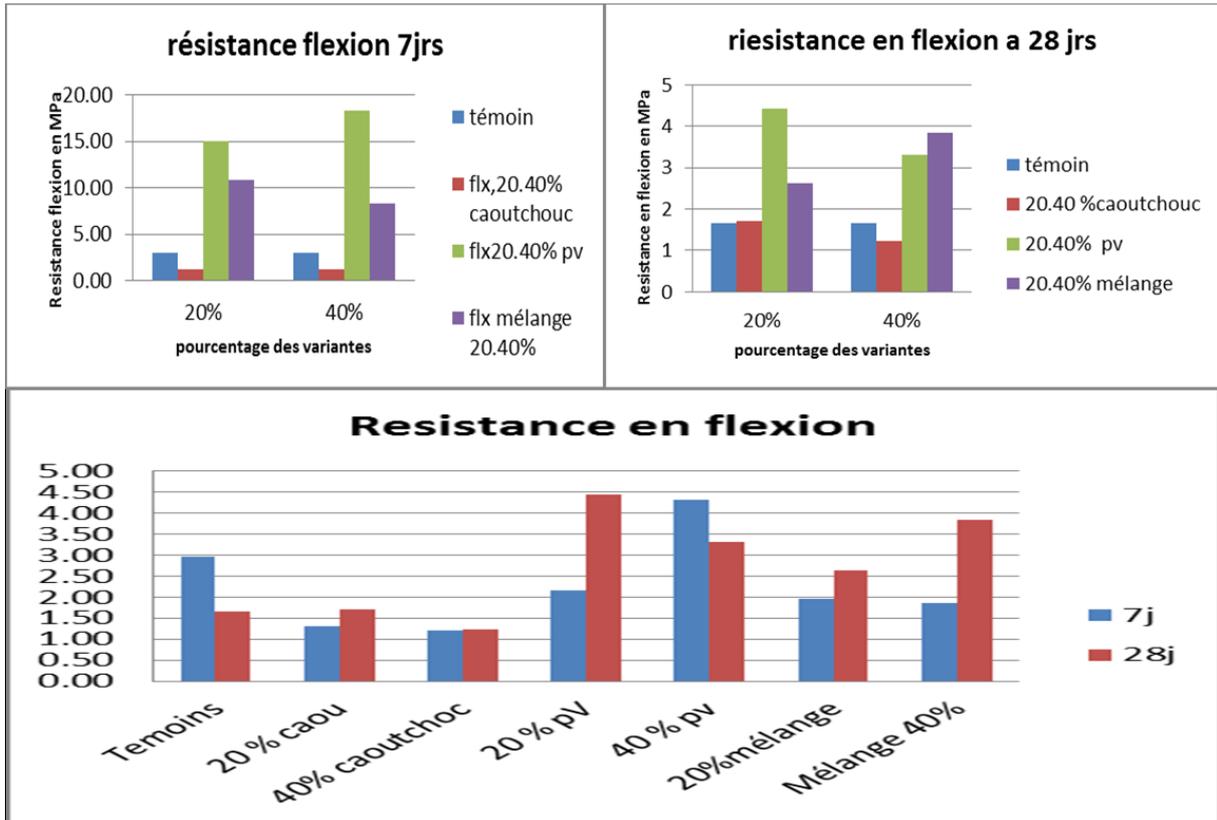


Figure 3.9: Résistances en flexion des variantes étudiées en fonction du temps [10].

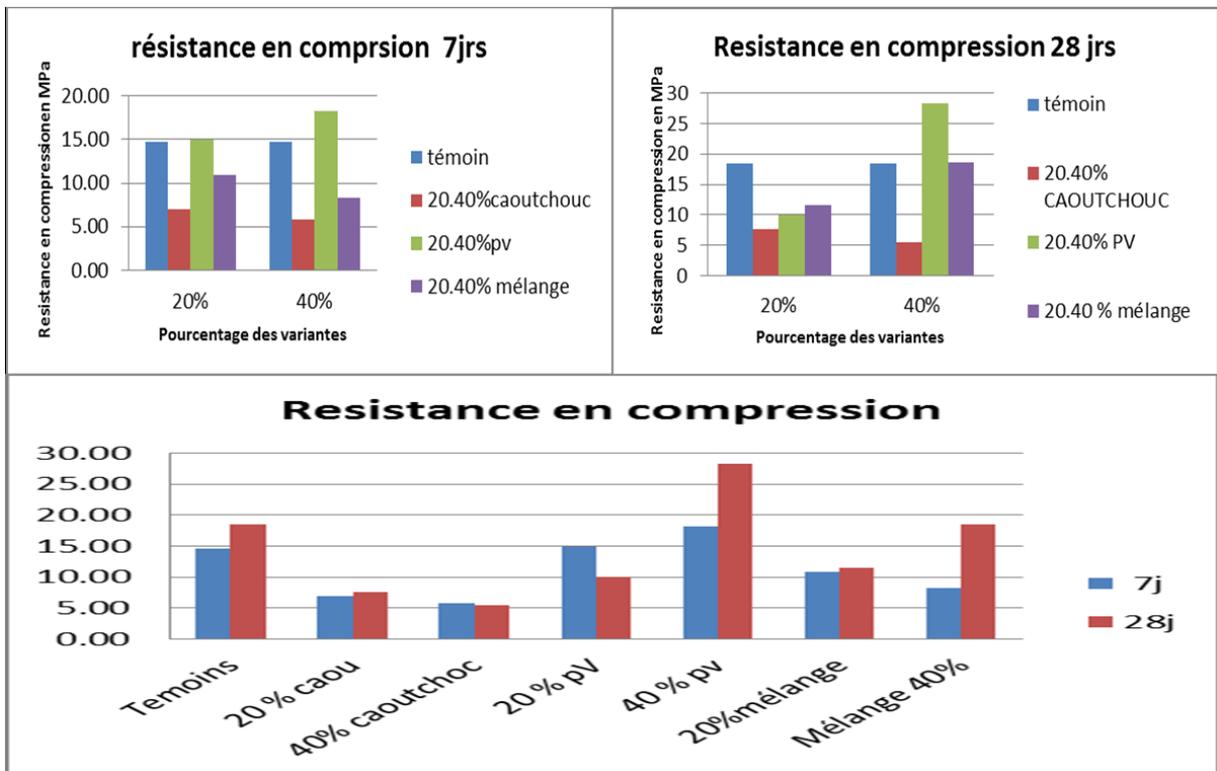


Figure 3.10 : Résistances en compression des variantes étudiées en fonction du temps [10].

Les résultats des propriétés mécaniques montrent que la substitution de sable par les deux types de déchets poudre et caoutchouc a déférente pourcentage (20% et 40%) dans les cas d'addition simultané ou séparé, montrent que [10] :

La résistance en flexion et en compression de déférentes variantes augmente d'une manière notable aux deux pourcentages 20% et 40 % de substitution de sable par la poudre de verre par rapport aux variantes témoin. Cela est expliqué par la diminution de la porosité car la poudre de verre utilisée dans ce travail est très fine ($\leq 100 \mu\text{m}$), cela va favoriser le remplissage des pores dans le matériau, ce qui présente un avantage pour la durabilité du matériau vis-à-vis les agents agressifs telles les gaz carboniques, les sulfates et les sels.

Dans le cas de déchets de caoutchouc la résistance en flexion et en compression diminue par rapport au témoin et celle avec le déchet de verre. Cela est expliqué par l'interface de la pâte cimentaire avec les grains de caoutchouc ce qu'influence négativement sur l'adhérence de la pâte à cause de glissement des grains de caoutchouc ce que diminue la résistance mécanique [9]. Dans le cas de mélange les variantes de deux types de déchets (poudre de verre et caoutchouc) avec (20et 40%) la résistance diminue par rapport au témoin. Cela est expliqué par la présence de déchets de caoutchouc.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU TROISIÈME CHAPITRE

- [1] Debieb F. Kenai S; The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete construction and *Building Materials* 22; 2008.
- [2] Paulo B. Cachim; Mechanical properties of brick aggregate concrete construction and *Building Materials* 23; (2009); 1292–1297.
- [3] Bensafi Boucif ; Belkacem Oussama Soufyan ; Valorisation des Bétons à base de granulats recyclés (granulats de brique) sous l'effet de température ; Mémoire de fin d'étude Master Académique ; Universités Belhadj Bouchaïb d'Ain-Temouchent ; 2018.
- [4] Adams.C. Lamborn.M. Shuler.S; Asphalt-Rubber Binder Laboratory Performance; Report FHWA/TX-8571, 347-1F, Texas Department of Highways and Public Transportation; 1985.
- [5] Medine.M ; Etude expérimentale des bétons légers incorporant des granulats issus du broyage des pneus usés ; Thèse de doctorat ; Université Djillali Liabès; Algérie; 2018.
- [6] Ramachandran V-S ; Utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton, CBD-215-F; Conseil national de recherches Canada ; juin 1981.
- [7] Rachid Mehaddene, Yacine Bouchnab ; Substitution du ciment CPA par la poudre de verre dans les mortiers à hautes performances ; Mémoire de fin d'étude; Master Académique Université ; Mouloud Mammeri ; Tizi ousou.
- [8] Rabah Chaïb , Hamid Zeroub et Damine Rangeard ; Indicateurs de durabilité des bétons avec ajout de poudre de verre en milieu marin ; Mémoire de fin d'étude ; Master Académique Université Mhamed Bougrara ; Boumerdes Algérie.
- [9] Fali Imane; Propriétés mécaniques des bétons à base de granulats en caoutchouc; Mémoire de fin d'étude ; Master Académique ; Université Mouloud Mammeri de Tizi ousou ; 2016.
- [10] Hamlaoui Charef Amira, Moussaoui Hassiba; Valorisation des déchets de caoutchouc des pneus et déchets de verre dans le béton de sable; Mémoire de fin d'étude ; Master Académique; 2019.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le but de cette étude est d'exposé un état de l'art sur la valorisation et le recyclage des déchets industriel dans le domaine de génie civil et plus particulièrement dans la formulation des bétons.

Les travaux entrepris concernant les propriétés à l'état frais et durci des bétons, formulés à base de ces déchets montrent que :

- L'utilisation des recyclâts dans la formulation du béton modifie la rhéologie du béton: l'ajout de la poudre de verre ou du caoutchouc améliore les propriétés à l'état frais des bétons.

- La durabilité des bétons formulés à base de ces déchets est aussi améliorée par la combinaison de deux facteurs : la réaction pouzzolanique et l'effet filler qui contribuent à la densification des structures des matériaux cimentaires.

- Les résistances mécaniques à cours et à moyen terme des bétons contenant les déchets sous forme de poudre sont généralement faibles, alors qu'à long terme, une augmentation des résistances est enregistrée, par contre, l'incorporation du déchet de caoutchouc engendre une diminution des résistances à tous les âges.

Enfin, Cette recherche bibliographique, nous a permet de collecter plusieurs informations sur le recyclage et la valorisation des déchets dans notre domaine. Ces informations nous ont donné la volonté pour réaliser un travail expérimental dans cet axe de recherche. Espérons que ce modeste travail pourra être une introduction à d'autres travaux scientifiques.