



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Génie Civil

Option : Structure

Présenté par :

BELLAHCENE Rania Khadra

SASA Rafika

Sujet du mémoire

**VALORISATION DES MATÉRIAUX
GRANULAIRES RECYCLÉS DANS LE
BÉTON ORDINAIRE**

Soutenu publiquement le 06/10/2020 devant le jury composé de :

Mr, H. BEKKI

Président

Mme, A. DRAOUI

Rapporteur

Mr, B. SERBAH

Examineur

Melle, Z. RENNAK

Examineur

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

*A la mémoire de mon très cher et adorable père Baghdad
nchallah rabi yrahmah*

A ma chère mère Rima pour son soutien constant.

*A ma très chère mon père et mon mari Daham Amar Farouk
que ma beaucoup aidé soutenu encouragé.*

A mes chers frères et sœurs Hadjer et DHikra

Et mon collègue Rania

A mes meilleurs amis, à tous mes proches.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mon très cher père,

*Je voudrais partager ce succès avec lui, Que dieu le protège et
le garde.*

Très chère maman,

*Que dieu la protège pour moi, je ne pourrai jamais la
remercier assez*

Pour ce qu'elle fait pour moi.

A ma sœur, À ma chère sœur Houaria et à mon frère meddah

Qui sont très présents pour me soutenir

À mon proche collèguesa rafika

À mon amie intime Sarah

Qui m'a aidé, m'a soutenu et m'a beaucoup encouragé

Remerciements

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

Les travaux ont été réalisés sous la direction de l'enseignante DRAOUI Aicha à qui nous adressons nos profonds et sincères remerciements pour son aide, sa disponibilité et sa compréhension dans tous les précieux moments qu'elle a su nous consacrer.

Nous tenons à renouveler nos remerciements à notre encadreur Draoui Aicha, et mon père Daham Amar Farouk et monsieur Boutaiba Abdelkader et l'équipe LTPO, qui ont grandement contribué, avec leur esprit de synthèse, à la réalisation de ce travail. Nous les remercions également pour les nombreux moments qu'ils nous ont consacrés, et en particulier pour leur aide précieuse dans l'interprétation des résultats et la production de ce document.

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

Nous remercions à l'ensemble du corps enseignants et administratif du département de génie civil et d'hydraulique de la faculté des sciences et de la technologie de l'Université IBN KHALDOUN de TIART.

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

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

المخلص

إن إعادة إستعمال الخرسانة المهدامة عبارة عن مجموعة من التقنيات المستخدمة لإعادة دمج النفايات الخاملة الناتجة عن هذه الأخيرة، و هذا عند هدم الهياكل الخرسانية، كانت بقايا الخرسانة تنقل سابقا بالشاحنة إلى مدافن النفايات،بدلا من استعمالها في الوقت إن لديها العديد من المزايا البيئية، ومن الممكن إعادة استخدام الخرسانة المهدامة لصنع الخرسانة مرة أخرى ، يتطلب صنع خرسانة الاسمنت والرمل و الحصى يمكن استبدال المكونات الأخيران من نفايات الخرسانة إلى مكان المواد ذات الأصل الطبيعي.

في دراستنا ، تم تطوير الخرسانة التقليدية من خلال تغيير معدلات استبدال الحصى المعاد تدويره من خرسانة التدمير من 0-25- و 50٪ بجرعة أسمنتية: 350 كجم / م³. تتم مقارنة النتائج بما تم تحقيقه بالفعل في الأبحاث السابقة.

الهدف الأساسي المرجو من هذه الدراسة هو إيجاد الحلول لنقص و نفاذ مادة الحصى لصناعة الخرسانة وكذا رسكلة المواد الخاملة لبقايا عمليات الهدم و خصوصا مادة الخرسانة الصلبة.

الكلمات الرئيسية: الخرسانة، الرسكلة، المقاومة الميكانيكية، البيئة.

RÉSUMÉ

Le recyclage du béton est un ensemble de techniques utilisées afin de revaloriser les déchets inertes produits par le béton, par exemple, lorsque les structures en béton sont démolies. Autrefois transporté par camion vers des décharges pour enfouissement, le recyclage du béton est une alternative de plus en plus valorisée. Il présente de nombreux avantages sur le plan écologique à l'heure de la convergence des problèmes environnementaux, réutiliser du béton recyclé pour fabriquer à nouveau du béton c'est possible. La fabrication de béton nécessite du ciment, de l'eau, du sable et des gravillons. Ces deux derniers constituants peuvent provenir de déchets de béton et se substituer aux matériaux d'origine naturelle.

Dans notre étude, l'élaboration des bétons était en faisant varier les taux de substitution en graviers recyclés de béton de démolition de 0- 25- et 50 % avec un dosage en ciment : 350 Kg/m³. Les résultats sont comparée avec ce qui déjà réaliser dans littérature.

Dans ce contexte, ce travail s'inscrit dans l'optique d'apporter des réponses aux soucis de manque en granulats pour béton. Il a pour objectif aussi la valorisation de la fraction inerte des matériaux de démolition et principalement les bétons comme source de granulats pour la fabrication de nouveaux bétons hydrauliques.

Les mots clés : Le béton, les granulats de recyclage, les résistances mécaniques, l'environnement.

ABSTRACT

Concrete recycling is a set of techniques used to recycle inert waste produced by concrete, for example, when concrete structures are demolished. Formerly transported by truck to landfills for landfill, concrete recycling is an increasingly valued alternative. It has many ecological advantages at a time of convergence of environmental problems, reusing recycled concrete to make concrete again is possible. Making concrete requires cement, water, sand and gravel. These last two constituents can come from concrete waste and replace materials of natural origin.

In our study, the development concretes was by varying the substitution rates of recycled gravel in demolition concrete from 0-25- and 50% with a cement dosage: 350 Kg / m³. The results are compared with what already achieved in literature.

In This context, this work is conducted in order to answer the concerns of lack aggregates for concrete. Its objective is also the recovery of the fraction of inerte demolition materials and mainly as a source of concrete aggregates for the construction of new hydraulic concrete.

Key-Words: concrete, Recycled aggregates, mechanical strength, environment.

SOMMAIRE

Résumé.....	i
Sommaire.....	iv
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	ix
Liste des abréviations.....	x
Liste des notations.....	xii
Introduction générale.....	1

Chapitre I : PROPRIÉTÉS ESSENTIELLES DU BÉTON

I.1 Introduction	4
I.2ouvrabilité.....	5
I.3RÉSISTANCE.....	5
I.3.1 Résistance en Compression.....	6
I.3.2 Résistance en Traction	7
I.3.2.1 Essai en Traction Directe.....	8
I.3.2.2 Essai de Traction par Fendage.....	9
I.3.2.3 Essai de Traction par Flexion.....	10
I.3.3 Moules et Éprouvettes Utilisés.....	11
I.3.4 Résistance Caractéristique en Compression	15
I.3.5 Résistance Caractéristique à la traction.....	17
I.4 ÉLASTICITÉ	17
I.5 PERMÉABILITÉ	18
I.6RETRAIT.....	21
I.6.1 Différents Types de Retrait.....	22
I.6.1.1 Retrait Avant et en Cours de Prise	22
I.6.1.2 Retrait Thermique	22
I.6.1.3 Retrait hydraulique.....	23
I.7 DURABILITÉ	24
I. 7.1 Résistance aux Agents Agressifs.....	28
I.8 Conclusion.....	30

Chapitre II : GRANULATS RECYCLES ET BETON

II.1 Introduction	32
II.2 Déchets et environnement	32
II.2.1 Déchets en Algérie	32
II.2.2 Naissance d'une véritable politique environnementale.....	33
II.2.3 Problématiques des déchets	34
II.2.4 Lois Algériennes concernant les déchets.....	36
II.3 Origine des granulats	36
II.4 Granulats de recyclage	38
II.4.1 Béton de démolition	38
II.4.1.1 Caractéristiques des granulats recyclés de béton.....	39
II.4.1.2 Caractéristiques morphologique Physiques.....	44
II.4.1.3 Domaines d'utilisation des granulats recyclés de béton.....	45
II.4.1.4 Incorporation de granulats de béton de démolition dans le béton.....	47
II.4.1.5 Etudes antérieures sur les granulats recyclés de béton de démolition....	54
II.5 Conclusion	57

Chapitre III : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

III.1 Introduction	59
III.2 Matériaux de base utilisée pour le béton.....	59
III.2.1 Equivalent de sable	59
III.2.2 Les masses volumiques.....	61
III.2.2.1 La masse volumique absolue.....	61
III.2.2.2 La masse volumique apparente	62
III.2.2.3 Granulats (0/5, 3/8, 8/15, 15/25).....	63
III.2.3 Analyse granulométrique	63
III.2.4 La résistance mécanique de ces granulats est caractérisée par le coefficient Los Angeles LA	65
III.3 Granulats de Béton de démolition.....	66

III.4 le ciment	67
III .4 .1 Pâte de ciment	67
III .4.2 Essai de consistance.....	67
III.4.3 Essai de prise	68
III.5 La finesse de mouture.....	69
III.6.Conclusion	71

Chapitre IV : Analyse des résultats et discussions

IV.1 Introduction	73
IV.2 Composition des bétons ordinaires	73
IV.2.1. Méthode de Dreux-Gorisse	73
IV.2.2 Mélanges retenus	74
IV.2.2.1 Béton ordinaire	74
IV.3 Béton a base de granulats de démolition.....	76
IV.3.1 Ouvrabilité	76
IV.3.2 Résistance à la compression.....	78
IV.4 CONCLUSION.....	80
CONCLUSIONS GENERALES.....	82
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	84

Liste des figures

Figure I.1 Eprouvette du béton.....	5
Figure I.2 Schéma d'un béton soumis à un effort de compression.....	7
Figure I.3 Schéma d'un béton soumis à un effort de traction.....	8
Figure I.4 Evolution de la résistance du béton à la compression et à la traction.....	8
Figure I.5 Essai en traction directe.....	9
Figure I.6 Chargement de l'éprouvettes et allure des contraintes σ_{xx} dans la section verticale lors de l'essai de traction indirecte appelé essais de fendage.....	9
Figure I.7 Essai de traction par flexion.....	10
Figure I.8 Essai en traction directe /Essai de traction par fendage /Essai de traction par flexion.....	11
Figure I.9 Evolution de la résistance à la traction f_{tj} en fonction de celle à la compression f_{cj}	13
Figure I.10 Moules cubiques.....	14
Figure I.11 Moules prismatiques.....	14
Figure I.12 Evolution de la résistance à la traction.....	17
Figure I.13 La carbonatation du béton.....	25
Figure I.14 La corrosion des armatures.....	26
Figure II.1 Composition des granulats recyclés.....	38
Figure II.2 forme des granulats recyclé.....	39
Figure II.3 granulométrie des granulats recyclés.....	40

Figure II.4 Masse volumique apparente et absolue des granulats naturels et recyclés.....	42
Figure II.5 Interface granulat naturel / pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton....	45
Figure III.1 appareil agitateur.....	60
Figure III.2 équivalente de sable.....	60
Figure III.3 La masse volumique absolue.....	61
Figure III.4 la masse volumique apparente.....	62
Figure III.5 les classe du Gravier.....	63
Figure III.6 Analyse granulométrique.....	64
Figure III.7 Analyse granulométriques des granulats.....	65
Figure III.8 Los Angeles.....	66
Figure III.9 pâte de ciment.....	67
Figure III.10 Essai de consistence.....	68
Figure III.11 appareille de Blaine.....	70
Figure IV.1 composition granulométrique du béton.....	74
Figure IV.2 Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire.....	75
Figure IV.3 Cône d'Abrams pour la détermination d'Affaissement.....	76
Figure IV.4 Affaissement par cône d'Abrams du Béton a base de granulats de démolition Pour les trois dosages à 28j.....	77
Figure IV.5 Dispositif de l'essai de compression.....	78
Figure IV.6 Résistance de Béton a base de granulats de démolition Pour les trois dosages à 28j.....	79

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Retrait Avant et en Cours et après de Prise.....	22
Tableau II.1 Granulats Origines et caractéristiques.....	38
Tableau II.2 Masse volumique apparente et absolue des granulats naturels et recyclés.....	40
Tableau II.3 Masse volumique apparente et absolue des granulats naturels et recyclés.....	41
Tableau II.4 Caractéristique mécaniques des granulats naturel et recyclés.....	43
Tableau III.1 Résultats de l'équivalent de sable	61
Tableau III.2 Résultats les masses volumiques.....	62
Tableau III.3 Analyse granulométrique des granulats ordinaires.....	64
Tableau IV.1 Composition des mélanges pour confection 3 éprouvettes de dimensions 16X 32 cm ²	75
Tableau IV.2 Affaissement par cône d'Abrams du Béton a base de granulats de démolition Pour les trois dosages.....	76
Tableau IV.3 Résistance de Béton a base de granulats de démolition Pour les trois dosages à 28j.....	78

LISTE DES ABREVIATIONS

Md : Dynamique moléculaire

PNAE-DD : le Plan National d'actions pour l'Environnement et le Développement Durable

FEDEP : politiques sont appuyées par le Fonds National de l'Environnement et de dépollution.

PROGDEM : Le programme national de gestion intégrée des déchets municipaux

Mva : Masse volumique apparente

Mvs : Masse volumique absolue

SR : Sable Recyclé

GR : Gravier Recyclé

E/C : Rapport Eau/ciment

Ab : Le coefficient Absorption d'eau

LA : Coefficient Los Angeles

MDE : Coefficient micro-deval

NF : Norme Française

NF P : Norme Française applicable au bâtiment et génie civil

PUNR : pneus usagés non réutilisables

BAP : Béton Auto Plaçant

BHP : Béton Haute Performance

BUHP : Béton Ultra Haute Performance

e/c : rapport volumique

PdE : Les Plans d'Expériences

MEC : le Modèle d'Empilement Compressible

MSS : Modèle de Suspension Solide

MDC : Modèle Linéaire de Compacité

BR : Béton Recycle

ES: Equivalent de Sable

Esp : Equivalent de sable piston

C : la compacité

V : pourcentage des vides

Mf : Module de finesse des sables

M : la masse du matériau

m : la masse des éléments inférieurs

CaO : l'oxyde de calcium

SiO₂ : dioxyde de silicium

A : Affaissement

K : Terme correcteur

LISTE DES NOTATIONS

$k_{\text{Féret}}$: coefficient de Féret

$P_{\text{Fuller Thompson}}$: porosité du mélange granulaire Fuller Thompson

D : grande dimension

d : petite dimension

K_{Abrams} : coefficient d'Abrams

P_{Bolomey} : porosité du mélange granulaire Bolomey

V : volume des vides

\sqrt{t} : la surface est proportionnelle

γ_d : La masse volumique apparente sèche

γ_s : la masse spécifique

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le béton est le matériau de construction le plus important sur la planète, Par conséquent, il est devenu nécessaire d'utiliser du béton recyclé au profit de l'économie et de l'environnement.

Devant les besoins croissant des ressources en matériaux et aux exigences de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et d'étudier toutes les possibilités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous-produits industriels notamment dans le domaine de génie civil. Les contraintes d'ordre économique et écologique de ces dernières années ont rendu nécessaire la valorisation et le recyclage des déchets. Le besoin universel de conserver les ressources, de protéger l'environnement et de bien utiliser l'énergie doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie du béton. Par conséquent, on accordera beaucoup d'importance à l'usage de déchets et de sous-produits pour la fabrication du ciment et du béton.

L'objectif de cette étude est de contribuer à la l'utilisation des granulats recyclés dans le béton. Cela permet d'éliminer les déchets par recyclage et utilisation d'où la protection de l'environnement, et aide à résoudre certains problèmes liés au manque de granulats, Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité pour les collectivités.

Ainsi, à travers cette étude, nous présentons les chiffres pour répondre à la question suivante : Le béton recyclé a-t-il des propriétés que le béton ordinaire ?

Et nous pouvons y répondre sous des formes à travers les chapitres que nous avons traités dans cette mémoire. Ce mémoire se compose d'une partie d'introduction générale et de quatre chapitres.

Le premier chapitre : Nous avons abordé les propriétés essentielles du béton ordinaire,

Le deuxième chapitre : Nous avons discuté du concept, des caractéristiques du béton recyclé et des agrégats de déchets, et de la façon d'utiliser des granulés recyclés.

Dans le troisième chapitre, nous traitons la partie expérimentales, ce chapitre décrit en détails tous les essais réalisés au cours de la présente recherche, les matériaux utilisés ainsi que les résultats de leur caractérisation (physique et mécaniques) en les comparants aux différentes valeurs imposées par les normes. Afin d'étudier le comportement de ces bétons recyclés à l'état frais et durci.

Le quatrième chapitre, présente les éléments essentiels de l'étude de ces bétons à l'état frais (utilisation le cône d'Abrams) et à l'état durci (résistance de compression) avec des matières premières algériennes et dans un contexte de développement durable.

Enfin, nous achevons le mémoire par une conclusion générale qui synthétise les résultats obtenus, à travers cette recherche ainsi que dans le domaine du recyclage du béton.

Chapitre I : PROPRIÉTÉS ESSENTIELLES

I.1 Introduction :

Le béton est aujourd'hui le matériau le plus utilisé dans le monde, plus que tous les autres matériaux réunis. Sans le béton, on ne pourrait pas réaliser ce qu'on construit aujourd'hui en matière de logement, d'écoles, d'hôpitaux et d'infrastructures. A la fois robuste et universel, L'ampleur et l'étendue de ses performances mécaniques et physiques augmentent sans cesse, Etsa formulation, jusqu'aujourd'hui très empirique, est en passe de devenir une démarche rationnelle, avec des outils d'ingénieurs construits sur des bases scientifiques qui font appel à Toutes les disciplines qui entrent dans ce qu'on appelle la Science des matériaux.

Le béton est un matériau artificiel obtenu en mélangeant en proportions convenables et deManière homogène, du ciment (liant), un granulat (sable + gravier), de l'eau et éventuellement des adjuvants.

Le liant peut être « hydraulique » (car il fait prise par hydratation ; ce liant est courammentAppelé ciment) ; on obtient dans ce cas un béton de ciment. On peut aussi utiliser un liantHydrocarboné (bitume), ce qui conduit à la fabrication du béton bitumineux.Le coulis est un mélange très fluide de ciment et d'eau. Enfin, lorsque les granulats utilisésAvec le liant hydraulique se réduisent à des sables, on parle alors de mortier.La réaction chimique qui permet au béton de ciment de faire prise est lente : à peine 50% de la résistance mécanique finale au bout de 7 jours. La valeur prise comme référence dans les Calculs de résistance est celle obtenue à 28 jours (80% de la résistance finale).

Il est possible de modifier (accélérer ou, au contraire, retarder) la vitesse de prise enIncorporant au béton frais des adjuvants (additifs). Il existe d'autres types d'adjuvants qui permettent de modifier certaines propriétés physico-chimiques des bétons

I.2ouvrabilité :

L'ouvrabilité est, en effet, la capacité du béton à pouvoir être mis en œuvre facilement (remplissage des coffrages et enrobage des armatures) : elle caractérise, avant que le matériau ne durcisse, la fluidité du béton. [1]



Figure I.1 Eprouvette du béton[2]

➤ **LA MESURE DE L'OUVRABILITÉ :**

Une des grandeurs définissant l'ouvrabilité est la consistance. Elle peut être mesurée facilement par un essai d'affaissement en utilisant le cône d'Abrams, du nom de son inventeur ou "Slumptest".

En mesurant la hauteur d'affaissement après le démoulage du cône, on obtient une indication sur l'ouvrabilité du béton, plus la hauteur d'affaissement est importante, plus le béton est fluide.

En ajustant la composition des bétons (principalement par l'emploi d'adjuvants), il est possible de modifier la consistance du béton ainsi que la durée pendant laquelle le béton reste "ouvrable".

La formulation d'un béton doit aboutir à un béton qui possède la plus grande ouvrabilité, le plus faible frottement interne avec la quantité d'eau minimum. Cette aptitude du béton à la déformation est aussi traduite par les termes consistance et maniabilité.[1]

I.3RÉSISTANCE :

Le béton un matériau qui a su devenir incontournable au cours du temps principalement grâce à sa grande résistance à la compression. C'est cette importante

résistance qui nous permet aujourd'hui de construire des immeubles en béton et d'utiliser ce matériau pour résister à d'énormes contraintes.

Le béton est un nom générique, mais sous celui-ci se cache une palette de matériaux avec lesquels vous allez pouvoir construire. Les sous-ensembles du béton présentent chacun des caractéristiques très précises, surtout au niveau de la résistance, et c'est un point auquel vous allez devoir faire attention avant d'entamer votre construction.

D'une manière générale, il existe trois types de contraintes auxquelles peut être soumis votre béton, la compression (comme les poutres chargées par exemple), la traction (comme les suspentes) et la flexion (comme les poutres). Le type de contrainte à laquelle l'élément en béton armé sera soumis sera donc déterminant pour la résistance du béton à choisir.[3]

I. 3.1 Résistance en Compression :

Le béton seul est un matériau naturellement résistant à la compression, d'autant plus s'il est armé, c'est donc sous ce type de charge qu'on essaiera de le soumettre au maximum plutôt qu'à la traction. C'est pour cette raison que le béton n'est que très rarement utilisé seul, mais qu'il est plus souvent armé avec des barres en acier qui, elles, vont reprendre les efforts de traction. Peu importe le béton que vous choisirez, il sera donc particulièrement adapté pour construire des éléments soumis à la compression.

La classe de résistance du béton nous donne directement sa résistance à la compression, en effet la classe de résistance du béton est notée C X/Y où X représente la résistance à 28 jours d'un éprouvette cylindrique béton alors que Y représente la résistance à 28 jours d'une éprouvette rectangulaire. Ces valeurs normées seront donc des plus utiles pour choisir votre béton en fonction des charges qu'il devra supporter. Les bétons classiquement utilisés sur les chantiers ou pour votre maison sont des C25/30 ou C30/37 alors que les classes de résistance supérieure sont réservées à des construction de beaucoup plus grande ampleur.[3]

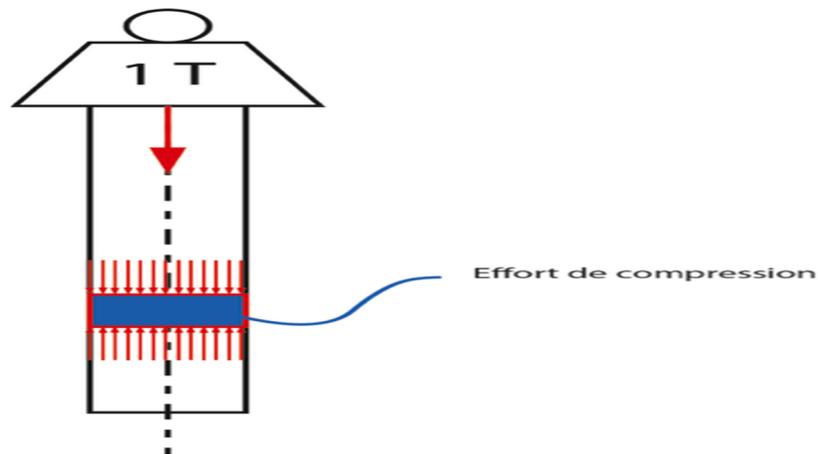


Figure I.2 Schéma d'un béton soumis à un effort de compression [3]

I. 3.2 Résistance en Traction :

Quand on évoque béton et traction ensemble, c'est généralement pour parler d'un accident de construction plutôt que pour évoquer les grandes capacités du béton à reprendre ces types d'efforts. En effet, la traction n'est vraiment pas le domaine d'application favori du béton. S'il n'est pas armé, le béton peut être même cassant comme du verre lorsqu'il est soumis à de la traction.

C'est une des raisons pour laquelle le béton armé a été développé. L'acier étant très résistant à la traction, c'est pour cette raison que Joseph Louis Lambot a décidé d'associer ces deux matériaux en vue de récupérer leurs deux caractéristiques principales et ainsi d'obtenir le matériau parfait.

L'utilisation de béton seul pour résister à des efforts de traction est donc impossible, car les méthodes de calcul du BAEL ou même des Eurocode négligent complètement la résistance à la traction du béton pour des problèmes de sécurité. Il faudra donc faire bien attention lors de la conception de vos constructions à ce qu'un minimum d'éléments en béton (comme des suspentes) soit en traction et surtout à bien dimensionner les armatures en acier qui vont reprendre ces efforts. Plus vous aurez de tractions, plus vous devrez ferrailer vos éléments et plus le prix de votre construction sera élevé ! [3]

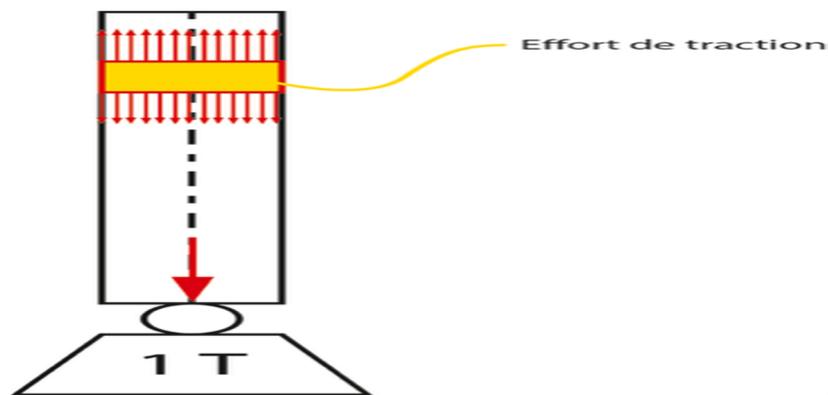


Figure I.3 Schéma d'un béton soumis à un effort de traction [3]

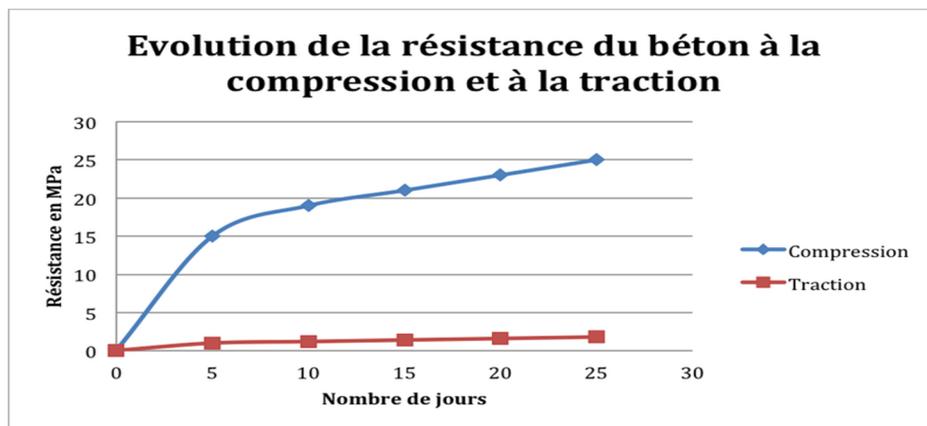


Figure I.4 Evolution de la résistance du béton à la compression et à la traction [3]

I. 3.2.1 Essai en Traction Directe :

L'essai de traction directe est le plus préconisé pour caractériser le comportement d'un matériau sous un effort longitudinal de traction, Cependant la complexité de la réalisation d'un essai de traction directe sur des éprouvettes en béton fait que cet essai est souvent remplacé par un essai de fendage ou de traction par flexion, il s'agit dans le cadre de ce travail de réaliser des essais de traction directe sur des éprouvettes en béton de fibres métalliques en vue de caractériser le comportement de ce dernier, Ce béton de fibres dont la composition optimale a été déterminée par l'essai de maniabilité est obtenu par l'ajout de déchets d'usinage métalliques (copeaux d'usinage) au béton nu ,

La résistance et la longueur des fibres assurant un bon ancrage des copeaux.[4]

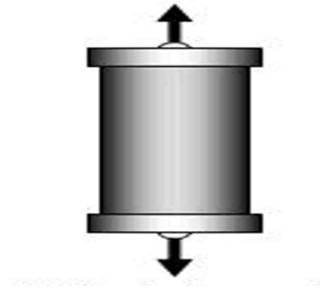


Figure I.5 Essai en traction directe [5]

I. 3.2.2 Essai de Traction par Fendage :

Une éprouvette cylindrique est soumise sur toute sa génératrice à un effort de compression appliqué sur une zone étroite.

Les contraintes de traction orthogonales qui en résultent provoquent la rupture de l'éprouvette par traction.

L'essai de fendage est un essai de traction indirect consistant à comprimer radialement l'éprouvette (figure I.6), créant alors, par effet Poisson, des contraintes de traction horizontales au sein du matériau. Cet essai fonctionne à condition que l'effet Poisson provoque la rupture du matériau avant les contraintes de compression. On considère en général que la résistance à la traction du matériau doit être plus de trois fois inférieure à sa résistance en compression pour que cet essai permette d'estimer la résistance en traction. [6]

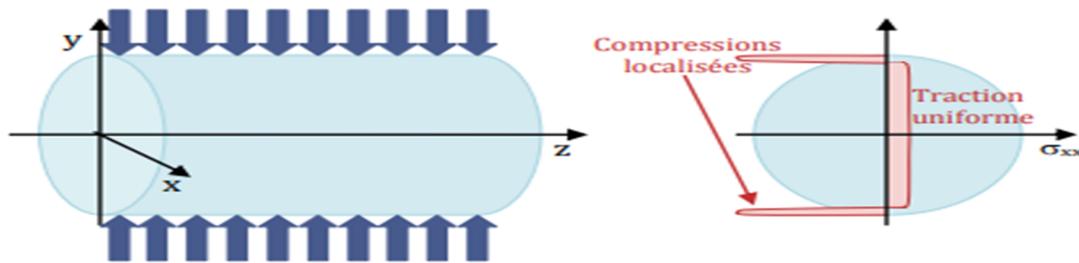


Figure I.6: Chargement de l'éprouvette et allure des contraintes σ_{xx} dans la section verticale lors de l'essai de traction indirecte appelé essai de fendage. [7]

Environ 80% de la section de l'éprouvette est soumise à des contraintes de traction (figure I.6). La fissure de l'éprouvette s'initie au centre de celle-ci dans le plan d'application des efforts. On obtient ainsi un faciès de rupture plan, hormis aux zones d'application du chargement, où l'on observe des irrégularités en raison de zones de compression localisées. Ces zones se situent au niveau des interfaces éprouvette/presse : elles subissent donc directement les contraintes de compression appliquées par la machine.

À partir de la charge maximale moyenne à la $F_{rupt.moy}$ rupture, la résistance moyenne à la traction du béton peut être calculée à l'aide de la formule suivante déduite d'un résultat analytique : [6]

$$f_{ctm} = \frac{2F_{rupt.moy}}{\pi.D.L} \quad \text{Eq.I-1}$$

I.3.2.3 Essai de Traction par Flexion :

Cet essai permet de reproduire le type de sollicitation en traction le plus fréquent dans les ouvrages : la flexion

Le dispositif utilisé est un dispositif de flexion 3 points.

La résistance à la traction est obtenue en appliquant la formule de la résistance des matériaux :

$$\sigma . f_l = 6M/a^3 \quad \text{Eq.I-2}$$

Avec : $M = P_a / 2$

M : le moment de la rupture enregistré.

σ : la cote de la section carrée de l'éprouvette. [8]

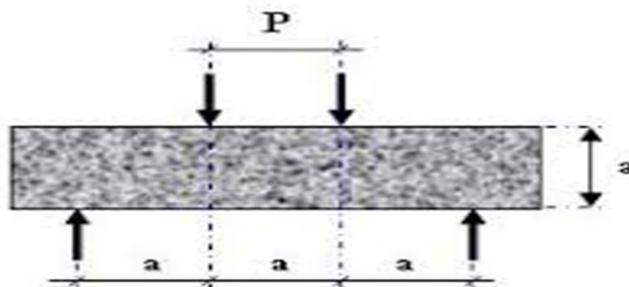


Figure I.7 : Essai de traction par flexion [5]

Résistance en traction :

- Essai en traction directe
- Essai de traction par fendage
- Essai de traction par flexion

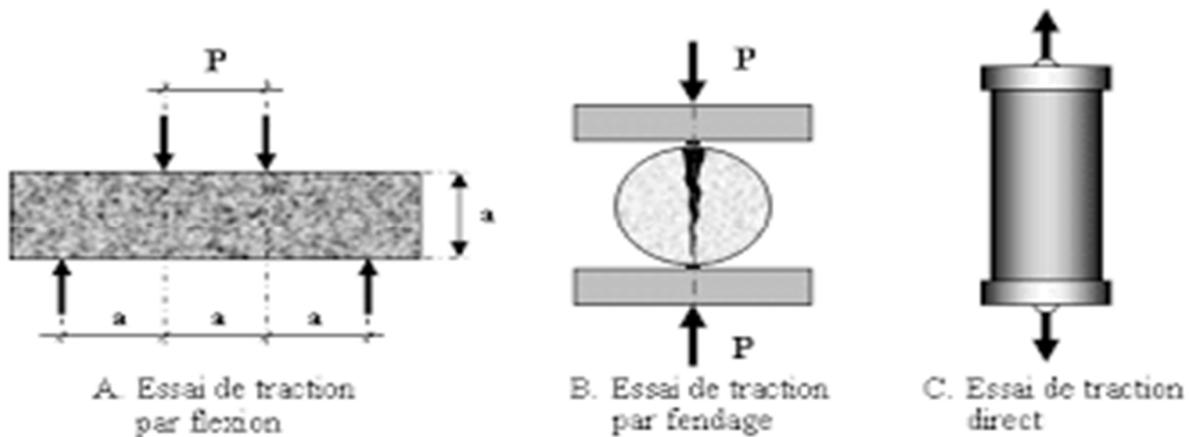


Figure I.8 résistance par traction [5]

I.3.3 Moules et Éprouvettes Utilisés :

Utilisation des éprouvettes :

- Les éprouvettes cylindriques sont utilisées pour :
 - Les essais de compression
 - Les essais de fendage
 - Les essais de traction directe
- Les éprouvettes cubiques sont utilisées pour :
 - Les essais de compression
- Les éprouvettes prismatiques sont utilisées pour :
 - Les essais de flexion
- Choix du format des moules :

Le choix du format des moules est conditionné par la dimension D du granulats. La dimension d définissant la section du moule, ne doit pas être inférieure à « 25 racine carrée

de D » pour les moules cylindriques et ne doit pas être inférieure à « 20 racine carrée de D » pour les moules cubiques et prismatiques.

➤ Remplissage des moules :

Les moules doivent être remplis par couches vibrées ne dépassant pas 100mm. Toutefois un moule doit être rempli en au moins deux couches.

Le volume de béton nécessaire correspondant au volume de l'éprouvette doit être majoré d'au moins 25%.

Cela représente approximativement un volume de béton de 10l pour une confection d'éprouvette.

Il faut élaborer une échelle qui permette selon la valeur mesurée sur cette échelle noté « A » de connaître avec une précision suffisante l'ouvrabilité requise pour la mise en œuvre du béton.

Cette mesure sera élaborée par un essai normalisé par la norme NFP 18-451 indiquant toute la procédure de l'essai et le matériel à utiliser pour garantir cette échelle de mesure et donner du sens à la valeur mesurée. Cette mesure est définie grâce à un appareil appelé le cône d'Abrams.[9]

➤ Vibration :

La durée de vibration doit permettre de mettre en place le béton dans l'éprouvette sans entrainer l'air et sans ségrégation.

La vibration peut se faire mécaniquement par une aiguille ou table vibrante ou manuellement par une tige de serrage en appliquant au minimum 25 coups par couche.

Moules cylindriques :

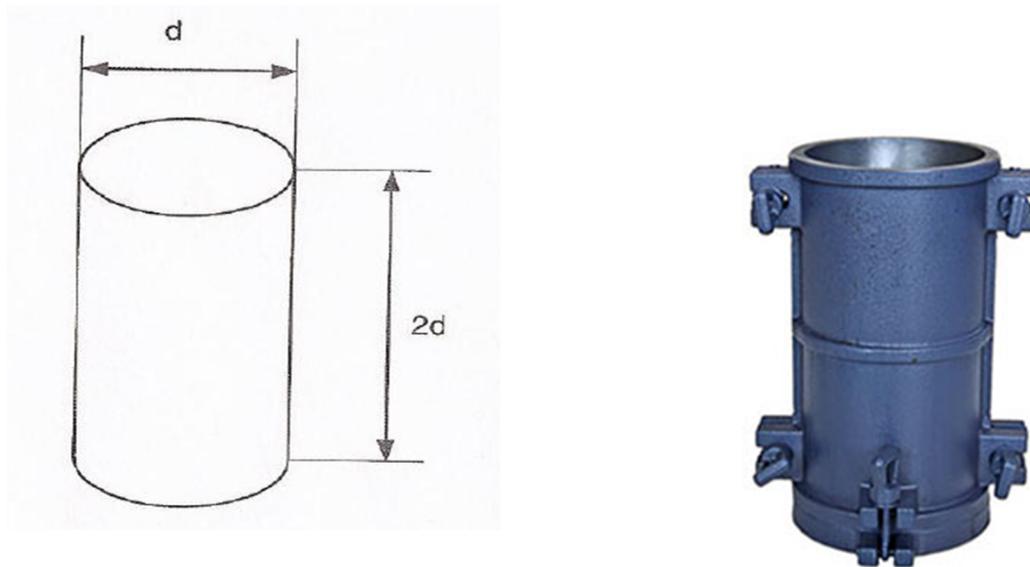


Figure I.9 Moules cylindriques [10]

D (max)	100	113	150	200	250	300
---------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Les dimensions réelles des moules peuvent être choisies $\pm 10\%$ dans la plage des dimensions ci-dessus.

Les moules $\varnothing 11 \times 22$ cm et $\varnothing 16 \times 32$ cm peuvent être utilisés.

Moules cubiques :

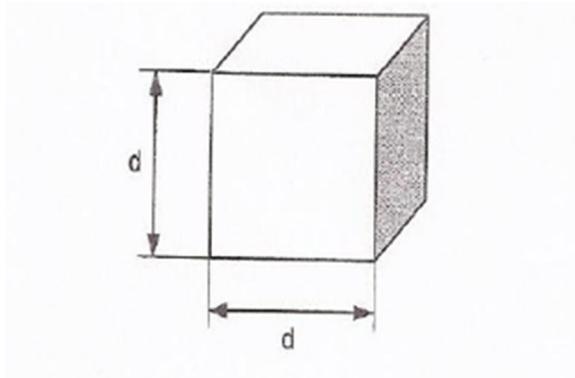


Figure I.10 Moules cubiques [10]

D(mm)	100	150	200	250	300
-------	-----	-----	-----	-----	-----

→

Les dimensions réelles de l'éprouvette ne doivent pas être différentes des dimensions ci- dessus.

Les coefficients de correspondance entre cylindres et cubes sont donnés dans le module QM 21 « Les éprouvette en béton – leurs essais »

Moules prismatiques

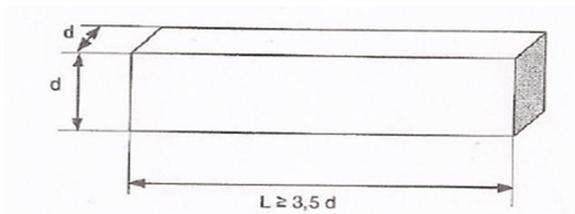


Figure I.11 Moules prismatiques [10]

D(mm)	100	150	200	250	300
L(mm)	> 350	>525	>700	>875	>1050

Les dimensions réelles de l'éprouvette ne doivent pas être différentes des dimensions ci-dessus.

Annexe 2 :

Normes de référence relatives aux différents essais des éprouvettes en bétonMoules :

Types et dimensions des moules.....NF EN 12390-1

Confection :

Confection et conservation des éprouvettes..... NF EN 12 390-2

Essai d'affaissement (au cône d'Abrams) NF EN 12 350-2[9]

ESSAIS :

Essais	Compression	Flexion	Fendage
Principe de l'essai	NF EN 12 390-3	NF EN 12 390-5	NF EN 12 390-6
Machine d'essais	NF EN 12 390-4		
Préparation des surfaces	NF EN 12 390-3	_____	_____

I. 3.4 Résistance Caractéristique en Compression :

La résistance à la compression, à l'âge de 28 jours, dite "valeur caractéristique " se mesure par des essais de compression simple sur éprouvettes cylindriques de section 200 cm² et de hauteur double de leur diamètre (les éprouvettes sont dites "16-32").

Elle est notée f_{c28} et s'exprime en MPa et correspond dans la norme à la valeur de la résistance au-dessous de laquelle peuvent se situer au plus 5% de la population de tous les résultats des essais. Cette résistance caractéristique est donc bien inférieure à la valeur moyenne des résultats d'essai.[11]

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \text{Eq.I-3}$$

Exemple : moyenne = 35 Mpa

Écart-type = 5 Mpa, valeur

Caractéristique = 27 MPa

Fractile = 5%

On introduit la loi normale centrée réduite par :

$$\phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad \text{Eq.I-4}$$

La loi normale décrivant la densité de probabilité de la variable aléatoire « résistance mécanique » est ainsi modélisée par :

$$P(x) = \frac{1}{\sigma} \phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \quad \text{Eq.I-5}$$

La résistance caractéristique X est telle que la probabilité d'apparition d'une résistance x plus petite que X est inférieure à 5%

$$P(x < X) = 0.05 = \int_0^x \frac{1}{\sigma} \phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) dx = \int_0^{\frac{x-\mu}{\sigma}} \phi(u) du \quad \text{Eq.I-6}$$

On introduit la fonction « erf » telle que:

$$\text{erf}(x) = \int_0^x \phi(u) du \quad \text{Eq.I-7}$$

Ainsi :

$$P(x < X) = \text{erf}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) = 0.05 \quad \text{Eq.I-8}$$

Or :

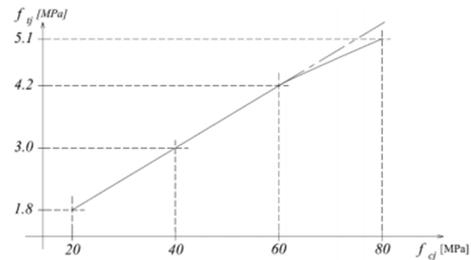
$$\text{erf}(-1.64) = 0.05 \quad \text{Eq.I-9}$$

Donc :

$$X = \mu - 1.64 \cdot \sigma \quad \text{Eq.I-10}$$

I.3.5 Résistance Caractéristique à la Traction :

$$\begin{cases} f_{tj} = 0.6 + 0.06f_{cj} & \text{si } f_{c28} \leq 60 \text{ MPa} \\ f_{tj} = 0.275f_{cj}^{2/3} & \text{si } f_{c28} > 60 \text{ MPa} \end{cases} \quad \text{Eq.I-11}$$



Evolution de la résistance à la traction f_{tj} en fonction de celle à la compression f_{cj}

Figure I.12 Evolution de la résistance à la traction [12]

I.4 ÉLASTICITÉ :

Le module de Young, module d'élasticité (longitudinale) ou module de traction est la constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et le début de la déformation d'un matériau élastique isotrope.

Dans les ouvrages scientifiques utilisés dans les écoles d'ingénieurs, il a été longtemps appelé module d'Young.

Le module d'élasticité E est défini par le rapport :

Pour les projets courants, on admet :

$$E = \frac{\text{contrainte unitaire}}{\text{déformation relative}} \quad \text{Eq.I-12}$$

$E_{ij} = 11\,000 f_{cj} / 3$ (module de déformation longitudinale instantanée du béton) avec $f_{cj} =$ résistance caractéristique à « j » jours. $E_{vj} = 3\,700 f_{cj} / 3$ (module de déformation différée) avec $f_{cj} = 1,1 f_{c28}$. Il s'ensuit que :

$$E_{vj} \approx \frac{1}{3} \text{ de } E_{ij} \quad \text{Eq.I-13}$$

Notes : E_{ij} , E_{vj} , f_{c28} , f_{cj} sont exprimés en MPa.

_Le module d'élasticité de l'acier est de l'ordre de : 200 000 N/mm², soit 2 000 000 dan/cm².

Effet « Poisson » :

En compression comme en traction, la déformation longitudinale est aussi accompagnée d'une déformation transversale. [13]

I.5 PERMÉABILITÉ :

La perméabilité d'un matériau se définit comme son aptitude à se laisser traverser par un fluide (eau ou gaz par exemple) sous l'effet d'un gradient de pression. Elle s'exprime au moyen de la relation de DARCY qui est valide en régime d'écoulement laminaire.

$$Q = -K \frac{A}{\mu} \cdot \frac{dP}{dz} \quad \text{Eq.I-14}$$

Avec : Q = débit volumique du fluide de viscosité μ

K = perméabilité du milieu (m²)

A = aire apparente du matériau

$dp/dz =$ gradient de pression [14]

La perméabilité K est une caractéristique intrinsèque du matériau dans la mesure où certaines conditions sont satisfaites. Elle s'exprime en m². L'écoulement doit se faire dans des conditions données (température et caractéristiques constantes du matériau en fonction du temps) et il ne doit pas y avoir d'interactions physiques et chimiques entre le fluide et le matériau (c'est rarement vrai dans le cas du béton !).

La perméabilité K peut être utilisée pour estimer l'aptitude du matériau à se laisser traverser par un fluide. Plus la valeur de K est élevée, plus le matériau est perméable et, inversement, plus la valeur de K est faible, plus le matériau est imperméable.

Dans le cas du béton, on peut mesurer expérimentalement la valeur K en utilisant des appareils spécialement conçus à cet effet.

En pratique, la perméabilité K peut être utilisée pour caractériser la perméabilité à l'eau et au gaz du béton.

Très souvent, on utilise, à tort, la notion de perméabilité aux ions chlore. En fait, le concept de perméabilité aux ions chlore n'existe pas. Dans le béton, la pénétration des ions chlore dans le béton n'est pas le résultat d'un gradient de pression mais plutôt d'un gradient de concentration.

N : Le coefficient de diffusion

Les molécules de gaz peuvent circuler dans la porosité non saturée du béton sous l'effet d'un gradient de concentration. Les ions en solution peuvent aussi se déplacer dans la porosité saturée du béton sous l'effet d'un gradient de concentration.

Le processus de diffusion, en régime permanent, est décrit par l'équation de Fick.

$$J = -De \frac{\partial C_i}{\partial x} \tag{Eq.I-15}$$

Avec :

J = Flux (mol/cm².s)

De = Coefficient de diffusion effectif (cm²/s)

$\frac{\partial C_i}{\partial x}$ = Gradient de concentration (mol/cm²)

Le coefficient de diffusion D permet de caractériser la capacité qu'ont certains ions à diffuser au travers d'un milieu donné.

En régime non permanent, la variation de la concentration C, en un point donné dans le béton, varie en fonction du temps. La résolution de l'équation de conservation, appelée deuxième loi de Fick, permet de calculer cette concentration.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} \tag{Eq.I-16}$$

Avec : D_a = Coefficient de diffusion apparent

Cette équation peut aussi être utilisée pour déterminer un coefficient de diffusion à partir des profils de concentration en chlorure en fonction du temps et de la profondeur sous la surface du béton.

Lorsqu'on considère la diffusion des ions chlore dans un matériau cimentaire, il faut apporter des modifications aux expressions précédentes pour tenir compte de l'interaction de l'ion avec le milieu.

Le coefficient de diffusion est alors une caractéristique évolutive qui dépend de la concentration en ions chlore, de l'âge, du degré d'hydratation et de la température.

Les interactions sont décrites par un isotherme d'interaction qui exprime la quantité d'ions chlore fixés à l'équilibre sur le solide, en fonction de la quantité d'ions chlore en solution. Université de Sherbrooke GCI 714 - Durabilité et réparations du béton 69 ° La deuxième loi de Fick doit alors être modifiée pour tenir compte de ces interactions (il s'agit en fait de la capacité de la pâte de ciment à fixer les chlorures qui y pénètrent).

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{D_e}{\left[p + (1-p)\rho_s \frac{\partial C_s}{\partial C} \right]} \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} \quad \text{Eq.I-17}$$

Avec :

$\frac{\partial C_i}{\partial C}$ = Capacité de fixation (pente de l'isotherme d'interaction)

D_e = Coefficient de diffusion effectif

P = Porosité

ρ_s = Masse volumique

La perméabilité au gaz du béton (air ou O_2) :

Pour certaines applications, la perméabilité au gaz du béton peut être une propriété importante. Par exemple, elle constitue une propriété cruciale dans le cas des réservoirs de gaz naturel ou des enceintes de confinement des centrales nucléaires. On utilise aussi la

perméabilité au gaz pour caractériser la perméabilité des matériaux réactifs avec l'eau (béton) ou très faiblement perméables (béton à hautes performances).

Le rapport E/C :

Le rapport E/C, en raison de son influence sur la structure du réseau de pores capillaires, exerce une grande influence sur la perméabilité à l'air.

La perméabilité à l'eau du béton :

Lorsque le fluide s'écoulant à travers le béton sous l'effet d'un gradient de pression est de l'eau, on utilise généralement le coefficient de perméabilité que l'on désigne par K_w . Il est défini par :

$$K_w = K \cdot w_e / \mu_e \quad \text{Eq.I-18}$$

Avec

w_e = poids volumique de l'eau (à 20 °C = 104 N/m³)

μ_e = viscosité de l'eau (à 20 °C = 10⁻³ N.s/m²)

K = Perméabilité du matériau (équation de DARCY)

K_w = Coefficient de perméabilité à l'eau (m/s)

n : Paramètres d'influence

Le rapport E/C :

Le rapport E/C exerce une très grande influence sur la perméabilité à l'eau de la pâte de ciment hydraté. [14]

I.6 RETRAIT :

Le retrait du béton correspond à des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant ou après la prise du béton. Lorsqu'elles ne sont pas maîtrisées par un ferrailage approprié et par des joints, ces variations dimensionnelles engendrent l'apparition de fissures. Les fissures dues au retrait ne doivent pas être confondues avec les fissures liées à la fonctionnalité des ouvrages (dues à l'application d'efforts trop importants par exemple). Celles-ci étant maîtrisées par les règles de calcul du béton armé. [15]

I.6.1 Différents Types de Retrait :**I. 6.1.1 Retrait Avant et en Cours de Prise :****Tableau I.1** : Retrait Avant et en Cours et après de Prise

Causes et constatation	Remèdes
Le retrait avant–prise est causé par L'évaporation d'une partie de l'eau que Contient le béton Des fissures peuvent S'ensuivre car le béton se trouve étiré dans sa Masse.	Il s'agit de s'opposer au départ brutal de l'eau Par : - la protection contre la dessiccation. - l'utilisation d'adjuvants ou de produits de cure.
Retrait pendant la prise du béton C'est un retrait interne provoqué par la densification du réseau de pores plus petits qui extraient l'eau de pores plus grands. Ce réseau de pores subit alors une dépression et provoque une diminution de volume par dessiccation interne.	/
Après la prise, il se produit : - Le retrait thermique dû au retour du béton à la température ambiante après dissipation de la chaleur de prise du ciment. On constate une Légère diminution de longueur	Il faut éviter de surdoser en ciment. Les Ciments de classe 45 accusent moins de retrait Que ceux de classe 55 de durcissement plus Rapide.

Estimation du retrait : $\Delta L = 3\% \times L$. ΔL - est le raccourcissement. L-est la longueur de l'élément. Si une corniche en béton armé a une longueur de 15 cm, le retrait est de l'ordre de : $3\% \times 15000\text{cm} = 0.45\text{cm}$.

I.6.1.2 Retrait Thermique :

Est lié au retour à température ambiante du béton après sa prise. Les réactions chimiques d'hydratation du ciment, qui sont très intenses au moment de la prise du ciment, sont toujours accompagnées d'un important dégagement de chaleur (réaction chimique exothermique). Après la prise, l'intensité des réactions d'hydratation décroît si bien que la température du béton diminue progressivement pour revenir à une température ambiante. Ce retour à température ambiante est accompagné d'une contraction thermique qui génère des déformations empêchées

au sein de l'élément en béton. Ces déformations empêchées peuvent conduire à l'apparition de fissures.

Ce type de retrait ne concerne que les pièces massives, d'épaisseur supérieure à 60cm (exemple : éléments d'ouvrage d'art).

Précautions pour limiter le retrait thermique :

- a. Limiter la chaleur dégagée en utilisant un ciment à faible chaleur d'hydratation.
- b. Eviter les très forts dosages en ciment.
- c. Ne pas utiliser des matériaux trop chauds (ciment pas trop chaud – refroidir les granulats l'été).
- d. Mettre des fibres dans le béton.
- e. Ne pas décoffrer trop vite.
- f. Utiliser des coffrages isolants.

I. 6.1.3Retrait Hydraulique :

Le retrait de séchage (aussi appelé retrait hydraulique ou de dessiccation) :

C'est le plus connu. Il se développe dans le béton au cours de son durcissement, pendant les premiers mois. Il est plus important en surface que dans la masse du béton. C'est un retrait du béton durci causé par l'évaporation de l'eau contenue dans la porosité du béton, à partir des surfaces libres soumise à l'air ambiant ayant un degré d'humidité inférieur à celui du béton. Ce processus de séchage génère une diminution de volume du béton. La perte d'eau est progressive et décroissante au cours du temps.

D'un point de vue pratique, ce n'est pas tant le retrait de séchage qui est important, mais plutôt la fissuration qu'il peut provoquer. Le mécanisme de fissuration est le suivant : le retrait de séchage commence toujours à se développer au niveau de la surface du béton exposée à l'air sec. Les forces de tension, qui apparaissent alors près de la surface, sont équilibrées par des forces de compression intérieures au béton. Des fissures s'ouvrent dès lors que les efforts de tensions dépassent la résistance à la tension du béton. Ces efforts de tension étant libérés chaque fois que la partie extérieure du béton se fissure.[15]

I.7 DURABILITÉ :

La durabilité du béton s'explique, en grande partie, par la difficulté de pénétration des agents agressifs dans le réseau poreux du béton, une structure durable est celle qui continue à remplir ses fonctions tout au long de sa durée de vie sans que ces propriétés soient effectuées. Il en résulte que le béton doit être en mesure de résister aux agents de détérioration auquel il peut être exposé par son environnement

La porosité est le paramètre du premier ordre de la durabilité,

En effet, les caractéristiques du réseau poreux (porosité, distribution des tailles de pores ...) déterminent les mécanismes de transfert sous forme liquide ou gazeuse des agents potentiellement agressifs pour le béton ou les armatures (chlorures, sulfates, gaz carbonique...)[16]

➤ **Porosité et absorption d'eau :**

Du fait de la présence de mortier résiduel entourant la particule de GR et de la présence de fissures en surface des mêmes particules (conséquence de la phase de concassage), le béton incorporant ce type de présente une porosité et une absorption supérieure à un béton à base de gravillons naturels. La porosité et la capacité d'absorption d'eau du béton ont tendance à augmenter avec le taux de substitution en masse de graviers recyclés [Thomas et al., 2013]. Ces deux propriétés sont d'autant plus élevées que le rapport E/C est important.

Pour un rapport E/C de 0,65 le coefficient d'absorption d'eau augmente de 6,2% à 8,4% (+35%) lorsque la totalité des graviers naturels est remplacée par des graviers recyclés.

Les mêmes observations sont faites par [Gómez-Soberón, 2002 ; Katz, 2003 ; Levy and Helene, 2004].

➤ **La carbonatation :**

La carbonatation est un phénomène chimique présent dans l'épiderme du béton tout au long de sa vie. C'est l'ensemble des processus engagés par l'action du gaz carbonique sur les composés hydratés du ciment. Le béton qui est presque toujours en contact avec l'air ambiant, est donc soumis à l'action du gaz carbonique (CO₂) car, l'air contient 0.03% en volume de ce gaz, et peut atteindre jusqu'au 0.10%, cette teneur en dioxyde dépend de la pression et de la température. Ce gaz ne réagit pas directement avec le béton, il doit d'abord

se dissout dans l'eau pour se transformer en un acide faible de forme H_2CO_3 . La carbonatation a pour effet d'abaisser le pH (le pH d'un béton carbonaté est d'environ 9, d'où le béton sain a un pH d'environ 13 ce qui constitue un milieu protecteur pour les armatures en acier et permet la formation d'une couche d'oxydes passifs). A ces valeurs de pH, le film passif est détruit et la corrosion peut se développer



Figure I.13 La carbonatation du béton [17]

Une des conséquences principales de la carbonatation est de favoriser la corrosion des armatures, lorsque le front de carbonatation les atteint. Elle se traduit la plupart du temps par l'apparition d'épaufrures laissant apparaître des armatures oxydées

➤ **L'attaque des chlorures :**

Les ions chlorures sont les plus agressifs, vis-à-vis des armatures. Une teneur élevée en ion chlore (>0,5% de la masse de ciment) provoque la corrosion si le béton est dans un environnement humide (avec une présence suffisante de O_2 et H_2O pour soutenir la réaction). Dans les bétons carbonatés, même une très faible teneur en chlorures peut provoquer la dé passivation des aciers d'armatures.

➤ **La corrosion des armatures :**

Les armatures sont généralement placées à une dizaine de centimètres de la surface. Si les armatures entrent en contact avec l'air ou l'eau, différentes réactions chimiques se produisent au voisinage de ces armatures. Le volume d'oxyde produit par la corrosion est, environ, huit fois celui du métal duquel il est issu, ce qui provoque des fissures et des épaufrures (ACI COMMITTEE 224, 1984).

Les dommages dus à la corrosion se manifestent par figure I.14

Des expansions qui conduisent à la formation des fissures qui provoquent éventuellement du couvert du béton.

Perte de l'adhérence des barres et la diminution de leur diamètre effectif, qui engendrent une perte de capacité en traction.

Un éclatement de béton, car la rouille résulte de la formation de produits fortement gonflants qui dépendent de l'état de l'oxydation dont le volume peut être jusqu'à six fois supérieures au volume initial Perte de section des barres d'acier.



Poutre de tablier



Pile en zone de marnage

Figure I.14 La corrosion des armatures [18]

➤ Indicateurs de durabilité :

Pour assurer la durabilité d'un béton de structure vis-à-vis d'agressions chimiques extérieures, les normes actuelles EN 206-1 [1] imposent des exigences en termes de moyens de formulation, portant sur le E/C maximum et le dosage en ciment minimum à utiliser en fonction de l'environnement extérieur. Ces critères constituent un progrès par rapport à l'époque où seule la résistance mécanique était considérée. Ils sont toutefois insuffisants pour traduire la durabilité des bétons actuels. De plus, ces paramètres de formulation sont inadaptés pour quantifier le phénomène de pénétration des chlorures et pour servir de données dans l'utilisation des méthodes physico-chimiques de prédiction de la durée de vie. Ce faisant, on s'oriente de plus en plus vers l'utilisation d'indicateurs de durabilité physiques et chimiques qui expriment directement les performances du matériau en termes de durabilité (Baroghel, 2004). On présente ici les indicateurs physico-chimiques dite parfois performanciels qui conditionnent la cinétique de pénétration des chlorures.

- **Indicateurs physico-chimiques de durabilité :**

La nouvelle approche de la durabilité requiert des indicateurs de durabilité. Il s'agit de paramètres relatifs au matériau constitutif béton, qui apparaissent comme fondamentaux pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité du matériau et de la structure interviennent par exemple dans les équations régissant les phénomènes et figurent parmi les données d'entrée des modèles de prédiction de la durée de vie. Cette première condition permet d'assurer leur pertinence théorique. Une seconde condition doit en outre être vérifiée : ces paramètres doivent être facilement quantifiables à partir d'essais de laboratoire pratiqués sur éprouvettes ou sur prélèvements, selon des modes opératoires bien définis et validés. Les méthodes d'essai doivent de plus présenter une reproductibilité, une précision, une simplicité et une rapidité adéquates (Baroghel, 2004).

On peut distinguer deux catégories d'indicateurs :

D'une part, les indicateurs de durabilité généraux (porosité accessible à l'eau ; coefficient de diffusion (apparent ou effectif) des ions chlorure ; perméabilité aux gaz ; perméabilité à l'eau liquide ; teneur en portlandite Ca(OH)_2), qui sont valables pour différents types de dégradation (corrosion des armatures, alcali-réaction...)

D'autre part, les indicateurs de durabilité spécifiques à un processus de dégradation donné (teneur en C-S-H ; Indicateurs chimiques microscopiques ; quantité de silice ; concentration en alcalins), par exemple l'alcali-réaction ou le gel.

- **Techniques et méthodes de durabilité :**

Il n'existe pas encore de véritables recommandations consensuelles de la communauté scientifique sur le mode opératoire à utiliser ; néanmoins, il existe plusieurs techniques de quantifier ou plutôt de qualifier la durabilité d'un béton. Encore inenvisageable il y a quelques années, l'application d'une approche performancielle semble désormais possible et nécessaire. Possible car admise dans les documents normatifs tels que la norme française NF EN 206-1 et la norme européenne dont elle dérive. En outre les travaux préalables à une normalisation sont en cours pour les essais liés à la pénétration des chlorures dans le béton. Le mode opératoire de l'essai de migration des chlorures en régime permanent et transitoire

ont été harmonisés dans le cadre des projets français GranDuBé et européen Chlortest, et il fait l'objet d'une norme Nordtest .

Possible, le recours à une application d'une approche performancielle est aussi nécessaire dans certains cas. En effet, l'approche traditionnelle fondée sur les valeurs limites de teneur en liant et de rapport eau efficace/liant peut s'avérer satisfaisante pour un liant donné, mais l'approche du liant équivalent, conçue du point de vue de la résistance mécanique, est restrictive et souvent mise en défaut du point de vue de l'évaluation de la durabilité. Pour comparer les performances de bétons de liants, de volumes de pâte voire de granulats différents, il était donc nécessaire de disposer d'une méthodologie à la fois moins restrictive et plus discriminante.

Enfin, pour des ouvrages de grande envergure ou importants avec de très hautes exigences de durabilité, en particulier en matière de résistance aux chlorures, et pour lesquels des bétons avec des ciments Portland composés (ciment Portland avec cendres volantes, laitier ou fumée de silice) ou avec des ajouts sont employés, il convient d'effectuer dans le cadre des essais préliminaires des mesures plus poussées pour l'amélioration de la résistance aux chlorures avec l'âge du béton.[16]

I. 7.1 Résistance aux Agents Agressifs :

Dans des conditions normales, les armatures enrobées d'un béton compact et non fissuré sont protégées naturellement des risques de corrosion par un phénomène de passivation qui résulte de la création, à la surface de l'acier, d'une pellicule protectrice Fe_2O_3CaO (dite de passivation).[19]

- **Action des eaux agressives :**

Un ouvrage peut être soumis à de multiples agressions engendrées par l'action des sels ou des gaz en solution dans l'eau (eaux souterraines, eaux de mer, pluie, etc.). Les eaux peuvent être chargées en sels minéraux les plus divers en fonction des sols traversés. Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (chlorures, nitrates, et surtout sulfates de sodium, de calcium ou de magnésium).

L'agressivité des milieux dans lesquels peuvent se trouver les ouvrages en béton est liée à la présence d'eau et à l'aptitude de celle-ci à réagir avec certains minéraux de la matrice cimentaire du béton. En effet, les agents agressifs dissous dans l'eau constituent une solution chimiquement agressive pour le béton qui peut provoquer plusieurs types de phénomènes lorsque la formulation du béton n'est pas optimisée.

- **Attaques acides :**

Le béton présente un caractère basique élevé induit par les composés hydratés de la pâte de ciment (la phase interstitielle contenue dans le béton a un pH très élevé). Il peut donc présenter une certaine réactivité vis-à-vis des solutions acides telles que les pluies acides, les eaux naturelles chargées en dioxyde de carbone, les eaux résiduaires, les eaux des industries agroalimentaires ou industrielles contenant des acides organiques, les eaux chargées en acides minéraux, mais aussi les eaux pures.

- **Lixiviation :**

Dans une structure en béton exposée à l'air ambiant, l'eau ne s'évapore que sur une épaisseur limitée à quelques centimètres. Les pores sont saturés lorsque le béton est en contact de manière prolongée avec l'eau. Des ions en provenance du milieu extérieur peuvent alors transiter, dans la phase liquide interstitielle du béton. En fonction de la nature des éléments chimiques qui pénètrent dans le matériau, il peut en résulter des réactions chimiques de dissolution/ précipitation et donc une lixiviation progressive des hydrates. Les eaux pures ou très peu chargées ont un grand pouvoir de dissolution, elles peuvent dissoudre les constituants calciques du béton (laportlandite notamment).

- **Un béton compact et peu perméable :**

Les qualités intrinsèques du béton, sa compacité et sa perméabilité conditionnent sa durabilité. Le béton résiste d'autant mieux à l'action des eaux agressives que sa porosité et sa perméabilité sont faibles.

Les principaux facteurs prépondérants au niveau de la formulation d'un béton pour obtenir une compacité élevée (donc une faible porosité) sont :

- Un dosage en ciment adéquat ;

- Une faible teneur en eau .
- Une granulométrie comportant des éléments fins, en quantité suffisante pour remplir les espaces
- Entre les plus gros granulats
- L'optimisation de la vibration, du traitement thermique éventuel et de la cure. Une formulation adaptée

Un dosage suffisamment élevé en ciment, un rapport E/C faible et le respect des exigences sur la composition chimique permettent de maîtriser les principales agressions.

- **Une conception de l'ouvrage adaptée :**

L'ouvrage doit être conçu de manière à éviter, dans la mesure du possible, de créer des zones d'accumulations et de stagnations d'eau et de cheminements préférentiels dus aux ruissellements.[19]

I.8 Conclusion :

Le béton est un matériau de construction les plus utilisés dans le monde, il fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par ces performances, sa souplesse d'emploi ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects. Le béton est un matériau très en demande et son utilisation ne cessera de croître au cours des années à venir. Afin d'assurer la croissance de ce matériau de construction indispensable, l'approche du développement durable doit être intégrée à la production du ciment et du béton. Cette approche consiste à optimiser l'utilisation des ajouts cimentaires des résidus industriels, afin de remplacer le ciment dans le béton, et d'utiliser les matériaux recyclés pour la réalisation des bétons, ce qui permettra d'augmenter la production de ce dernier à un coût compétitif, et protéger la nature des stocks grandissants des résidus industriels.

**Chapitre II : GRANULATS
RECYCLES ET BÉTON**

II.1 Introduction:

La consommation de béton devient de plus en plus importante en raison d'une urbanisation accrue nécessitant la réhabilitation et la construction de bâtiments et d'infrastructures. Néanmoins, la production de béton qui doit accompagner le développement urbain entraîne des problèmes environnementaux relatifs à la préservation des ressources naturelles qui ne sont pas inépuisables. Malgré des efforts de recyclage, la plupart des matériaux recyclés sont généralement utilisés pour les travaux routiers ou de remblai. Ce travail de mémoire a pour objectif d'apprécier la valorisation du recyclage des matériaux issus des bétons déconstruits en les intégrant dans de nouveaux bétons. [20]

II.2 Déchets et environnement :

De nos jours l'utilisation intensive et abusive des ressources et le rejet des déchets dans l'environnement contribuent à détériorer notre milieu. Ce changement a un impact sur la société, la santé humaine, l'économie, les espèces vivantes, la production alimentaire, le tourisme et l'écologie.

Chaque jour la pollution de notre environnement augmente, la santé humaine est de plus en plus mise en danger, mais nous nous n'en préoccupons pas. Comme l'on ne voit pas directement les conséquences de nos actes, on s'en préoccupe peu. C'est pourquoi nous ne pourrions pas diminuer le rejet des déchets tant que l'on n'exploitera pas les ressources d'une façon intelligente et en prévenant le gaspillage inutile. [21]

II.2.1 Déchets en Algérie :

L'environnement urbain et le milieu naturel en Algérie sont confrontés à de grands risques environnementaux après avoir été balayés à grande échelle par des déchets solides, et causé de graves dommages à la négligence des équipes de contrôle et des protecteurs de l'environnement, et la faiblesse des mesures de protection au niveau municipal, qui a pris la position du spectateur sur la destruction continue qui est exposée. Il a des sites verts dans les villes et les villages et dans le centre naturel.

En Algérie, la quantité de déchets ménagers et assimilés a connu une augmentation substantielle au cours des dernières décennies en raison d'une croissance démographique galopante conjuguée à une urbanisation non maîtrisée. Ce phénomène est accentué en raison d'insuffisance de moyens et d'équipements appropriés. [22]

II.2.2 Naissance d'une véritable politique environnementale :

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

- Sur le plan de la politique environnementale, le Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAEDD) fixe les différents programmes environnementaux du pays pour 2001-2010.

- Ces politiques sont appuyées par le Fonds National de l'Environnement et de dépollution (FEDEP) qui intervient notamment pour aider les entreprises industrielles à réduire ou à éliminer leurs pollutions et les unités de collecte, de traitement et de recyclage des déchets, ainsi que par la nouvelle fiscalité écologique basée sur le principe du pollueur payeur afin d'inciter à des comportements plus respectueux de l'environnement.

- Sur le plan législatif et réglementaire, plusieurs lois ont été promulguées :

- Loi n°01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.

- Loi n°01-20 du 12 Décembre 2001 relative à l'aménagement du territoire dans le cadre du développement durable.

- Loi n°02-02 du 05 février 2002 relative à la protection et à la valorisation du littoral.

- Loi n°03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'Environnement dans le cadre du développement durable.

- Loi n°04-03 du 23 Juin 2004 relative à la protection des zones de montagne dans le cadre du développement durable.

- Loi n°04-09 du 14 août 2004 relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable.

- Loi n°04-20 du 25 Décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable [23]

II.2.3 Problématiques des déchets:

La rapidité avec laquelle la densité de la population a augmenté ainsi que l'amélioration du niveau de vie, produisent une augmentation permanente des déchets solides en quantité et en qualité. La forte urbanisation, le gaspillage par abandon, l'introduction sur le marché de nouveaux produits non biodégradables tels que les plastiques ainsi le faible taux de récupération en sont les principales causes.

La quantité des déchets produits peut s'exprimer en poids ou en volume, toutefois et en raison de leur compressibilité, seul le poids constitue une donnée fiable mesurable facilement à l'aide d'un pont bascule. On exprime alors les quantités produites en Kg/Habitant/jour ou par an.

Les quantités d'ordures ménagères ainsi exprimées en poids ou en volume produites par habitant et par jour varient naturellement suivant les pays.

Le taux passe de 0,35Kg/hab/jour dans les pays les moins avancés à 1,1 ou 1,2 Kg/hab/jour dans les grandes villes des pays industrialisés. Les données disponibles, convergent vers le taux annuel de l'ordre de 200Kg/hab/an, soit environ 5 millions Kg/an de déchets urbains. Ce chiffre est à multiplier par deux si l'on considère l'ensemble des déchets solides (ordures ménagères et assimilés et déchets industriels).

Il est clair que la croissance démographique, la forte urbanisation et l'amélioration du cadre de vie engendreront dans le futur des volumes de plus en plus élevés de déchets.

A l'échelle nationale, les quantités moyennes d'ordures ménagères produites sont estimées à 0,7Kg/hab/jour dans les grands centres urbains (Alger), on admet le taux de 1,2 Kg/hab/jour.

En référence au contexte algérien, il y a lieu de constater que les conditions de ramassage, d'évacuation et d'élimination des déchets municipaux se détériorent de jour en jour.

Les moyens humains, matériels et techniques mobilisés pour l'accomplissement de cette mission de service public ne sont plus adaptés. Cette situation ne semble pas connaître d'amélioration. Elle tend au contraire à s'accroître dans toutes les villes du pays.

C'est la raison pour la quelle le gouvernement tend à faire de la gestion des déchets municipaux (urbains) un axe de travail prioritaire dans sa stratégie et son action environnementale.

La loi n° 01/19 du 12/02/2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets constitue à cet égard le point de départ et le cadre de référence de la nouvelle politique en la matière.

Le programme national de gestion intégrée des déchets municipaux (PROGDEM), se veut une démarche graduelle de cette loi cadre pour sa mise en œuvre. [24]

II.2.3.1 Déchets industriels dangereux :

Les déchets industriels dangereux, sont ceux qui sont classés comme tels par le décret. Ce catalogue tire sa légitimité des connaissances de l'art dans les pays avancés en matière de protection de l'environnement, sur le niveau de danger des déchets, d'une part et les données sur lesquelles le législateur se base pour cataloguer un déchet.

Globalement les déchets dangereux sont des produits chimiques qui peuvent générer des nuisances pour l'homme ou son environnement. Ils peuvent présenter une ou plusieurs propriétés de danger énumérées ci-après, ce qui implique certaines précautions particulières. [25]

II.2.3.2 Déchets industriels banals (non dangereux) :

C'est un ensemble de déchets non inertes et non dangereux générés par les entreprises tels que les ferrailles, les métaux non ferreux, papiers et cartons, verre, textiles, bois, plastiques, etc. L'absence de danger de ces déchets, ne doit pas minimiser leur coût de gestion, d'autant plus qu'ils sont généralement produits en plus grandes quantités que les déchets dangereux.[26]

II.2.3.3 Les déchets inertes :

Un déchet inerte ou déchet non dangereux inerte est pour tous les États-membres de l'Union européenne (depuis 1999). Un déchet inerte est un déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, qui ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physique ou chimique, n'est pas biodégradable et ne détériore pas les matières avec lesquelles il entre en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine .[27]

II.2.4 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 [28]

II.3 Origine des granulats :

Le granulats est constitué d'un ensemble de grains minéraux qui selon sa dimension (comprise entre 0 et 125 mm) se situe dans l'une des 7 familles suivantes:

- a. fillers.
- b. sablons.
- c. sables.
- d. graves.
- e. gravillons.
- f. ballast.
- g. enrochements.

Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives)

ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition. Leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production.[29]

II.3.1 Les granulats de roche massive :

Sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de précriblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres: origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage. [29]

II.3.2 Les granulats de roche meuble :

Les roches meubles utilisées comme granulats sont surtout des dépôts alluvionnaires trouvés dans le lit présent ou passé d'une rivière actuelle ou passée (en mer éventuellement).

On a ainsi exploité directement le lit des rivières, on exploite encore, en eau, des gisements dans leur lit majeur, des dépôts du quaternaire récent (postérieur à la dernière glaciation), mais on doit exploiter de plus en plus souvent des alluvions du début du quaternaire parfois très éloignés de rivières actuelles. On exploite aussi des dépôts marins à des profondeurs de plus en plus importantes. [30]

II.3.3 Les granulats de recyclage :

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

Les bétons recyclés concassés sont surtout destinés à la fabrication de graves routières, les croûtes ou les fraisats d'enrobés sont recyclés dans la fabrication de graves-bitumes ou d'enrobés routiers. [30]

Tableau II.1 : Granulats Origines et caractéristiques [31]

Roche d'origine	Transformation			Usage
	aucune	Concassage criblage	thermique	
Argiles			Argiles expansées	Mortiers
Limons	Tout-venant			Béton hydraulique
Sables		Fines	Verres expansés	Graves traitées ou non
Graviers		Sable		Enrobés
Pouzzolanes		Gravillons		Enduits. Clous
Roches massives		Cailloux ballasts	Schistes expansés	Ballasts Filtres .Drains
Minerais			laitiers	
Autre origine		Fines sable gravillons etc..		

II.4 Granulats de recyclage:

II.4.1 Béton de démolition:

La démolition des structures en béton génère chaque année des quantités considérables de déchets dont une grosse partie pourrait être concassée puis recyclée sous forme de granulats. Dans le Nord de la France et en Wallonie, la brique cuite constitue un parement largement utilisé dans les habitations individuelles mais aussi dans les bâtiments industriels. Si une partie de ces briques peut être directement valorisée sous forme de produit de seconde main au moment des travaux de démolition par un démontage approprié, une autre partie se retrouve dans les produits recyclés, sous forme de granulats ou de fines, difficilement valorisables dans les bétons à cause de leur grande porosité et de leur finesse.[32]

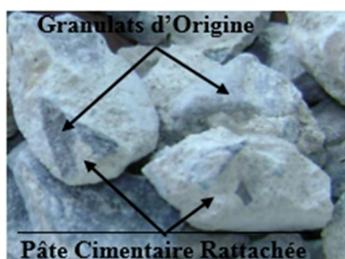


Figure II.1 Composition des granulats recyclés [28]

II.4.1.1 Caractéristiques des granulats recyclés de béton:

Les granulats sont les principaux composants du béton (70% en poids). Les performances mécaniques des granulats vont donc conditionner la résistance mécanique du béton et leurs caractéristiques géométriques et esthétiques, en particulier, l'aspect des parements des ouvrages. Le choix des caractéristiques des granulats est déterminé par les contraintes mécaniques, physico-chimiques et esthétiques du projet à réaliser et de mise en œuvre de béton.

Pour obtenir une bonne qualité de béton contenant des granulats recyclés, il faut que ces derniers soient aussi de bonne qualité. Les propriétés acceptables granulats sont un élément de base pour un béton recyclé de qualité. Cependant, les proportions adéquates de mélange et la méthode de production sont aussi importantes pour avoir la qualité recherchée du béton. Les granulats recyclés, fabriqués à partir des déchets de démolition des constructions, ont plusieurs formes (Figure II.2)

- a. Un grain de gravier enrobé par la pâte de ciment.
- b. Une pâte de ciment seule.
- c. Un grain de gravie naturel.

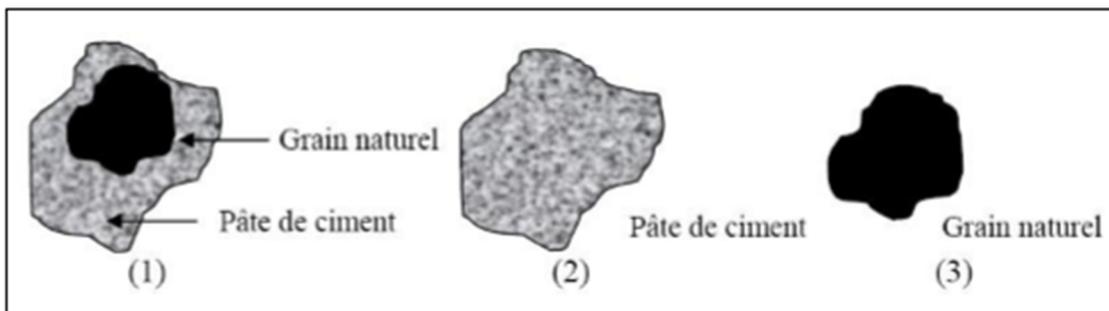


Figure II.2 : forme des granulats recyclés.[33]

La présence aléatoire du vieux mortier collé aux granulats complique la caractérisation exacte des granulats recyclés. Cette présence est inévitable et les propriétés physico-mécanique des granulats démolition seront dépendantes du volume de mortier collé aux granulats a montré que la quantité du mortier attaché aux granulats est proportionnelle à la fraction fine et elle croit en fonction de la résistance du béton concassé. [33]

II.4.1.1.1 La granulométrie :

Les courbes granulométrique des granulats recyclés ont la même distribution granulaire que les granulats naturels (figure II.3).

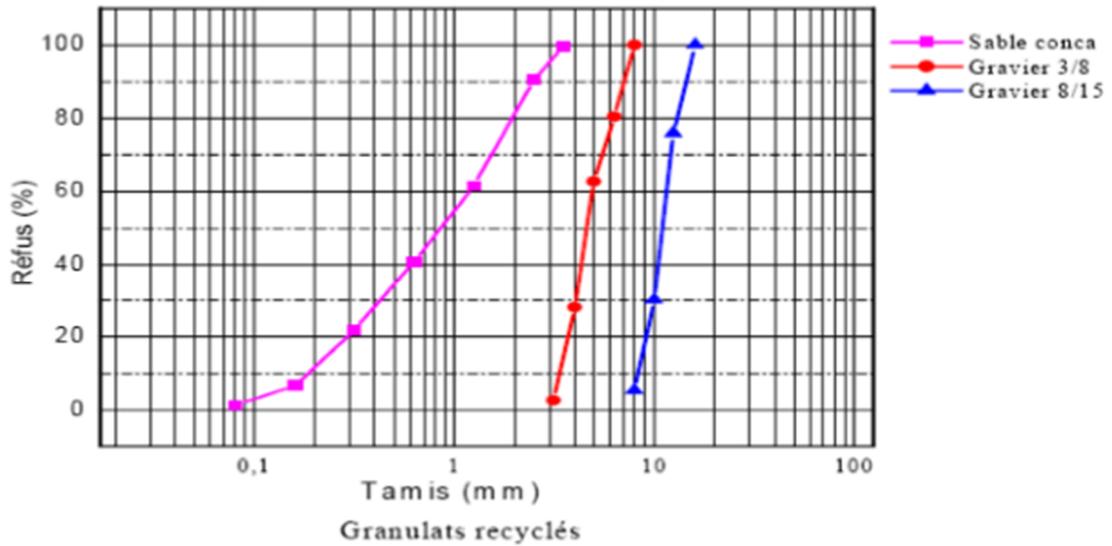


Figure II.3 granulométrie des granulats recyclés.

A trouvé que le sable recyclé est grossier par rapport au sable naturel et il est constitué en majorité de petit gravillon et une faible proportion de sable moyen ainsi qu'une quantité importante du ciment dans ces fines.

Ont trouvé que le module de finesse du sable recyclé (2,69) est inférieur à celui de sable naturel (3,47). Par contre, a constaté que le module de finesse de sable recyclé est supérieur à celui de naturel (3,33 et 2,72) respectivement

Des résultats similaires ont été reporté par, dont un module de finesse de 5,80 a été trouvé pour le sable recycle et de 2,59 pour le sable naturel. [33]

II.4.1.1.2 Masse volumique :

Une chute de la masse volumique des granulats recyclé qui sont assez peu compacte et par conséquent beaucoup plus poreux par rapport au gravier naturel a été reporté (Tableau II.2). [33]

Tableau II.2 : Masse volumique apparente et absolue des granulats naturels et recyclés.

	Granulats naturels	Granulats de béton recyclé
Mv apparente(Kg/m ³)	1600	1244
Mv absolue (Kg/m ³)	2650	2500

Les masses volumiques (apparente et absolue) diminuent avec l'augmentation de la fraction granulaire. Aussi, les granulats naturels et les granulats recyclés ayant des masses volumiques absolues semblables. Par contre, les masses volumiques apparentes des granulats recyclés sont inférieure à celles des granulats naturelles (Tableau II.3).

Tableau II.3 : Masse volumique apparente et absolue des granulats naturels et recyclés.

	Granulats Naturels			Granulats recyclés		
	8/15	3/8	S.C.N	8/15	3/8	S.C.N
M _{va}	1.33	1.36	1.30	1.18	1.22	1.18
M _{vs}	2.46	2.54	2.65	2.43	2.56	2.52

Une diminution des masses volumique absolues et apparentes a été observée sur le sable (SR) et le gravier (GR) recyclé en comparant avec les sables et les graviers naturels (Figure II.4).

Les masses volumiques des granulats recyclés sont nettement plus faible que celles des granulats naturels. Des résultats similaires ont été rapportés par Cette diminution peut être expliquée par la présence des pores dans les granulats recyclés. Selon, la masse volumique du béton source des granulats recyclés peut influencer la masse volumique de ces dernières, avec un rapport E/C inférieur à 0,70. [36]

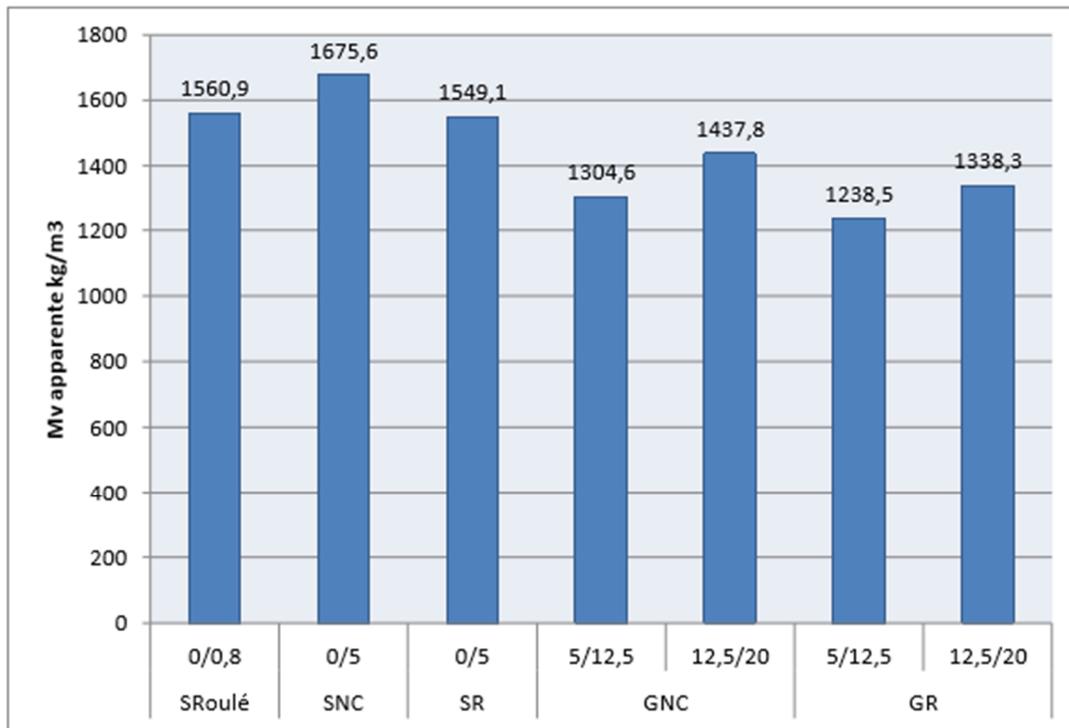


Figure II.4 : Masse volumique apparente et absolue des granulats naturels et recyclés.[33]

II.4.1.1.3 Absorption d'eau :

Le coefficient d'absorption d'eau (A_b) représente la capacité d'absorption d'eau d'un granulat. Plus il est élevée, plus le matériau est absorbant. La propriété principale des granulats recyclés est la capacité élevée d'absorption d'eau en comparaison avec les granulats naturels. Ceci est dû à la présence de la pâte de ciment autour d'un granulat recyclé. Les bétons des granulats recyclés nécessitent une quantité d'eau plus importante, pour maintenir le même affaissement (étalement), par rapport à un béton à base de granulats naturel. [33]

II.4.1.1.4 Dureté :

La résistance à la fragmentation (dureté) est déterminée par le coefficient Los Angeles. le principe de cet essai est la détermination de la fragmentation par chocs et à l'usure par frottement réciproques. L'essai consiste à faire tourner les granulats dans un tambour fermé contenant des boulets métalliques. Le coefficient Los Angeles représente la proportion d'éléments finis produits au cours de l'essai. Plus le coefficient LA est faible, plus la résistance des gravillons est élevé. Le coefficient de Los Angeles trouvé pour les granulats recyclé est supérieur à celui des granulats naturel (Tableau II.4). Même résultats ont été rapporté par DEBIEB , GASTI, ET PANI et al HACHANA et al ont aussi remarqués que la valeur du coefficient de Los Angeles des granulats du béton concassé (31,62%) est supérieure à celle des granulats naturels(23,50). Par conséquent, les granulats recyclé sont moins résistant que les granulats naturels, mais acceptable selon la norme qui exige $LA < 40\%$. [33]

Tableau II.4 : Caractéristique mécaniques des granulats naturel et recyclés.

	Essai Micro-Deval (MDE)		Essai Los-Angeles (L.A)	
	G.Naturel	G.Recyclé	G.Naturel	G.Recyclé
Fraction (4-6.3)	18.4	36.5	--	--
Fraction (6.3-10)	24.04	38.6	31.4	38.88
Fraction (10-14)	--	--	30.58	36.52

II.4.1.2 Caractéristiques morphologique Physiques:

II.4.1.2.1 La Granulométrie et le module de finesse :

En général, les granulats recyclés se caractérisent par un fuseau granulaire homogène et continu, mais les sables recyclés sont sensiblement plus grossiers que les sables naturels utilisés dans les bétons ordinaires (Hansen - 92, Morel - 93, De Vries - 93, Québaud - 96, Delwar - 97, Orsetti – 97) Un autre aspect important de la granulométrie est la teneur en fines. Les fines présentes dans les granulats recyclés sont essentiellement constituées de ciment ancien et peuvent influencer aussi bien les caractéristiques des bétons frais (demande en eau, maniabilité, délais de la prise), que celles des bétons durcis (adhérence nouvelle pâte de ciment- granulats) La propreté des sables caractérise la teneur en fines argileuses dans le pourcentage global en fines, car les fines argileuses peuvent rendre la mise en place du béton plus difficile et peuvent altérer l'adhérence des grains à la pâte de ciment.[34]

II.4.1.2.2 Forme et état de surface

La forme des grains et leur état de surface ont une influence considérable sur l'ouvrabilité des bétons et leurs propriétés mécaniques.

II.4.1.2.3 Masses volumiques et porosité

Du fait de la faible densité de la gangue de ciment, de la porosité plus élevée et des impuretés légères présentes dans les granulats recyclés, leur masse volumique est plus faible que celle des granulats naturels silico-calcaires d'utilisation courante dans les bétons.

La porosité des granulats recyclés est beaucoup plus élevée que celle des granulats naturels courants.

Mesbah a déterminé, à l'aide d'un prosimètre à mercure, la porosité des différentes fractions du sable recyclé. La porosité de la fraction inférieure à 1 mm était de l'ordre de 14%, alors que celle de la fraction supérieure à 1 mm était de 11,5%. La porosité globale du sable recyclé a été évaluée à 13%.

En fait, du point de vue du comportement des granulats dans le béton, la porosité totale joue un rôle secondaire. Le rôle primordial appartient à la répartition des tailles des pores et à leur interconnexion, ce qui se reflète directement sur le coefficient d'absorption d'eau des granulats. [34]

II.4.1.2.4 L'absorption d'eau par les granulats recyclés

Deux effets principaux de l'absorption d'eau par les granulats recyclés peuvent être considérés :

- sur la plasticité et l'ouvrabilité du béton frais.
- sur la formation du réseau poreux du béton et, par conséquent, les caractéristiques mécaniques et la durabilité du béton durci.

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

- En créant des fissures, le concassage contribue à une augmentation de l'absorption d'eau.
- Les fissures dans la partie hydratée du ciment primaire est responsable de la forte absorption d'eau (Orsetti – 97). Photo II.5 [34]

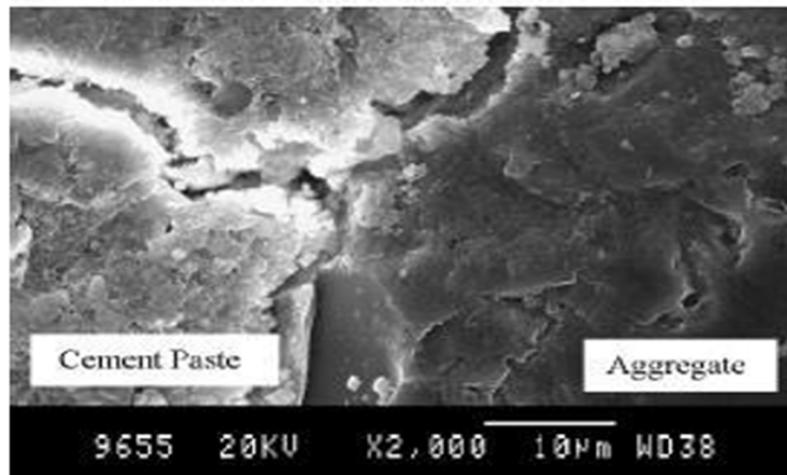


Figure II.5 Interface granulat naturel / pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton.

II.4.1.3 Domaines d'utilisation des granulats recyclés de béton:

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 certaine norme.

Pour confectionner de nouveaux bétons de bâtiment, l'étude bibliographique réalisée (Raphaël, 2003) montre que 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. 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 (0/4 mm). 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 63 mm 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 (IDRRIM, 2011).

Es graves de recyclage GR0 et GR1 sont utilisées en terrassement, ce qui est donné par la norme NF P 11 – 300.

Dans le domaine du génie civil, les pneus usagés sont utilisés entiers ou découpés pour constituer des parements ou renforcer les remblais allégés (techniques PNEUSOL, PNEURESIL).

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

D'après les travaux des auteurs comme (Sglavo et al., 2000 ; Gupta et al., 2001 ; Brunori et al., 05 ; Li et al., 06), les boues rouges sont utilisées dans les domaines suivants:

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

De plus, la poudre de verre comme ajout cimentaire peut remplacer jusqu'à 30 % du ciment dans le béton (**Micronisation du verre, 2012**). Cette initiative novatrice pour la récupération et le recyclage du verre en Amérique du Nord a plusieurs avantages. En plus d'offrir un débouché au recyclage du verre, elle améliore la qualité du béton de construction. Les intérêts ne sont pas seulement de nature environnementale puisque les propriétés de ce produit lui permettent de remplacer les ajouts cimentaire classiques en améliorant les performances des bétons.

II.4.1.4 Incorporation de granulats de béton de démolition dans le béton:

Les granulats recyclés sont incorporés dans la formulation de béton en remplacement des granulats naturels dans des proportions variant de 0 à 100 %. Des bétons témoins sont toujours fabriqués pour établir un point de comparaison.

Ainsi, les approches pour formuler un béton sont nombreuses, chacun fixant les paramètres utiles pour comparer et observer l'effet des granulats recyclés sur le comportement physique des bétons. Certains choisissent de travailler à ouvrabilité constante (**Debieb et al, 2010**) (**Levy, 2004**) tandis que d'autres auteurs s'intéressent aux temps de malaxage, au degré d'humidité des granulats recyclés et à la quantité d'eau globale et effective à mettre en œuvre (**Evangelista, 2010**) (**Gomez, 2002**). Pour certaines études le remplacement est massique ou volumique sans modifier les autres paramètres de composition (quantité de ciment, rapport E/C, etc) (**Olorunsogo, 2002**). Enfin, certains chercheurs travaillent avec une méthode de mortier équivalent. Dans cette méthode, on considère que la matrice cimentaire présente dans les granulats recyclés rentre en ligne de compte dans la matrice cimentaire du nouveau béton (**Abbas et al, 2009**).

En général il n'existe pas de méthode de composition du béton qui soit universellement reconnue comme étant la meilleure. La composition du béton est toujours le résultat d'un compromis entre une série d'exigences généralement contradictoires. Cependant, une méthode de composition du béton pourra être considérée comme satisfaisante si elle permet de réaliser un béton qui respecte le cahier des charges. [35]

II.4.1.4.1 Influence de la granulométrie :

La dimension d'un élément granulaire est donnée par l'ouverture de la maille carrée d'un tamis, exprimée en millimètres, à travers laquelle il passe facilement. La granulométrie est caractérisée par la distribution dimensionnelle des éléments. Elle est déterminée par l'analyse granulométrique par tamisage dans laquelle on détermine la quantité de matériaux utilisés entre chacun des tamis d'une série.

Des études expérimentales ont montré que la granulométrie et la taille maximale des granulats influent sur les proportions relatives des granulats, les quantités de liant et d'eau nécessaires, la maniabilité, la pompabilité, la porosité, le retrait et la durabilité du béton. Toute variation de granulométrie influence sérieusement l'uniformité du béton d'une gâchée à l'autre. Les sables très fins sont souvent peu économiques, tandis que les sables et granulats

très grossiers peuvent produire des mélanges raides et peu maniables. Selon **(Mehta et Monteiro, 1993)**, les granulats ne souffrant ni d'une grande carence ni d'un excès de particules de diamètre donné et présentant une courbe granulométrique régulière donnent les meilleurs résultats. La variété dans la dimension des particules contribue à réduire le volume total des vides entre les granulats. [35]

II.4.1.4.2 Influence de la forme des granulats :

(Noureddine, 1996) a montré qu'un granulat comportant une forte proportion de particules plates et allongées se compacte difficilement et possède un indice des vides intergranulaires plus élevé qu'un granulat similaire constitué de particules plus arrondies. L'indice des vides du mélange granulaire est un paramètre important de formulation d'un béton car il influence plusieurs de ses propriétés dont notamment sa compacité, sa maniabilité et ses propriétés mécaniques. Il faut donc porter une attention particulière aux caractéristiques du mélange granulaire, car un mélange ayant un indice des vides élevé donnera un béton moins économique, moins maniable ou nécessitant une plus grande quantité de matières cimentaires pour satisfaire les exigences de performance (maniabilité, propriétés mécaniques, perméabilité, durabilité). En général, les granulats les plus désirables pour le béton sont ceux qui présentent des proportions élevées en particules cubiques (augmentation de la compacité du squelette granulaire) et rugueuses (augmentation de l'adhérence pâte-granulat).[35]

II.4.1.4.3 Généralités sur la formulation des bétons :

La diversité des bétons actuels (Béton Auto Plaçant BAP **(Assié, 2004, El Barak, 2005)**, Béton Haute Performance BHP **(Gramont-Garnier 1992)**, Béton Ultra Haute Performance BUHP, bétons avec granulats de caoutchouc **(Garros, 2007)**, bétons fibr ,etc.), aux propriétés extrêmement variables, ne permet pas d'imaginer un principe de formulation unique. Généralement, la base de la formulation est orientée par les propriétés principales demandées au matériau et adaptée en fonction des propriétés secondaires recherchées. Il faut donc raisonner par catégorie de béton même si certains principes peuvent être retenus. Plusieurs méthodes ont été développées. Même s'il reste beaucoup d'empirisme, toutes reposent sur les mêmes principes de compacité optimale. Mais au préalable, il est nécessaire de faire un historique des différentes méthodes de formulation afin de comprendre les procédés actuels. [35]

a. Méthodes de formulation traditionnelles :

Historiquement, les principes régissant les concepts de formulation commencent à se rationaliser à la fin du XIX^{ème} siècle (**Franck, 2007**). En 1892, Féret (**Féret, 1892**) auquel on attribue les premières recherches, travaille sur un principe de compacité optimale. Initialement, une compacité est déterminée sur un mélange ternaire de sables puis une matrice cimentaire y est insérée. Cette méthode donne un mortier avec une granularité discontinue sans obtenir le matériau le plus compact à l'état durci. Au travers de l'équation I-1, Féret relie une résistance en compression aux proportions volumiques et notamment en utilisant le rapport volumique e/c .

$$f_c = K_{Féret} \left(\frac{1}{1+(e+v)/c} \right) \quad \text{Eq. II-1}$$

Où $k_{Féret}$ coefficient de Féret relatif à la nature du ciment et de l'âge du mortier En 1907, Fuller et Thompson (**Fuller, 1907**) basent aussi leur méthode sur une compacité maximale mais sur un mélange à granulométrie continue. L'aspect novateur de la méthode se situe dans la prise en compte du ciment mais aussi des dimensions extrêmes des grains d (plus petite dimension) et D (plus grande dimension) (équation I-2). En revanche, la forme des grains n'intervient pas dans la méthode.

$$P_{Fuller\ Thompson} = 100 \times \sqrt{\frac{d}{D}} \quad \text{Eq. II-2}$$

Où $P_{Fuller\ Thompson}$ porosité du mélange granulaire selon Fuller Thompson. En 1918, Abrams (**Abrams, 1923**) définit empiriquement une méthode dans laquelle le dosage en ciment et la dimension maximale des granulats sont les paramètres prépondérants (équation I-3) et fait intervenir au travers de K_{Abrams} $k_{Féret}$ amélioré la nature et la forme des granulats.

$$f_c = K_{Abrams} \frac{1}{0.75(1.5\frac{E}{C})} \quad \text{Eq. II-3}$$

Où K_{Abrams} coefficient d'Abrams relatif à la nature du ciment et de l'âge du mortier. En 1925, Bolomey (**Bolomey, 1925**) propose une courbe granulaire continue de référence incluant le ciment (équation I-4).

$$P_{Bolomey} = A_{Bolomey} + (100 - A_{Bolomey}) \times \sqrt{\frac{d}{D}} \quad \text{Eq. II-4}$$

Où $P_{Bolomey}$ porosité du mélange granulaire selon Bolomey La différence avec l'équation de Fuller et Thompson, intervient au travers de $A_{Bolomey}$ qui dépend de la forme des granulats

ainsi que de la consistance du béton. La résistance en compression par Bolomey établie selon l'équation I-5, est une variante de la loi de Féret.

$$f_c = K_{\text{Bolomey}} \left(\frac{c}{E+V} - 0.5 \right) \quad \text{Eq.II-5}$$

Où K_{Bolomey} coefficient de Bolomey relatif à la nature du ciment et de l'âge du mortier.

En 1937, Caquot (**Caquot, 1937**) généralise sa recherche de compacité maximale à un nombre infini de classes granulaires à partir de la courbe de l'indice des vides d'un mélange de deux granulats de tailles différentes. Il définit expérimentalement une relation en prenant comme principe que le volume des vides dépend essentiellement des diamètres d et D (équation I-6). Il obtient donc une granulométrie infinie. Mais, en réalité, les dimensions des grains sont bornées ce qui entraîne une correction sur la proportion des plus petits et des plus gros granulats. De plus, il introduit l'effet de paroi engendré par les granulats de grosses dimensions.

$$V = V_0 \sqrt{\frac{d}{D}} \quad \text{Eq.II-6}$$

Où V volume des vides du mélange granulaire borné par d et D ; V_0 : constante définie expérimentalement selon Caquot. D et d sont respectivement le diamètre du plus gros et du plus petit granulat.

En 1942 et en 1952, Faury (**Faury, 1944**) et Joisel (**Joisel, 1952**) s'inspirent des travaux de Caquot et y apportent des modifications. Le premier prolonge l'étendue granulaire jusqu'à 6,5, en y incorporant le ciment, et prend aussi en compte l'effet de paroi. Joisel donne une droite de référence (avec une échelle complexe) prenant en compte le ciment, l'eau, les vides, la taille des grains et la compacité des classes granulaires.

En 1970, Dreux et Gorisse (**Dreux, 1995**) mettent en œuvre une méthode, basée sur l'optimum granulaire encore couramment utilisée pour des bétons ordinaires. C'est une approche empirique selon une courbe granulaire de référence (2 segments de droite dans un diagramme semi logarithmique). Contrairement à Faury, le ciment ne fait pas partie de la courbe de référence du mélange, sa quantité massique C étant déterminée séparément. Il s'agit d'une méthode complète dans le sens où elle prend en compte un grand nombre de paramètres (équation I-7): la géométrie de la pièce à couler, le type et le dosage du ciment, la finesse, la forme, la qualité et les dimensions de granulats, la consistance et la résistance du béton, etc.

$$f_{c28} = G_{\text{Dreux}} \times \sigma_{c28} \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad \text{Eq.II-7}$$

Où G_{Dreux} représente le coefficient granulaire de Dreux et est la classe vraie du ciment relatif à Dreux.

En 1976, Baron et Lesage (**Baron, 1976**) proposent une technique d'optimisation du squelette granulaire selon le principe liant un temps d'écoulement minimum déterminé au maniabilimètre LCL selon (**Norme NF P18-452**) avec une quantité optimale de granulat pour des proportions de ciment et d'eau fixée.[35]

b. Méthodes de formulation novatrices :

En 1996, Baron et Olivier (**Baron, 1996**) développent une méthode de formulation dérivée de celle de Dreux-Gorisse avec des modifications pour une adaptation aux bétons actuels. Cette méthode permet d'englober un grand nombre de paramètres déjà cités avec, en plus, la prise en compte de l'adjuvantation et l'incorporation d'additions minérales.

En parallèle à des méthodes basées sur des critères de performances mécaniques ou de consistance à l'état frais, de nouveaux paramètres sont visés. La durabilité du matériau dans son environnement de service est un critère essentiel. En 2004, l'AFGC (**AFGC, 2004**) propose une méthodologie pour la mise en œuvre d'une démarche performancielle, globale et prédictive de la durabilité des structures en béton, basée sur la notion d'indicateur de durabilité. Cette approche combine des mesures en laboratoire et des codes de calcul (modèle).

En marge de ces méthodes réelles de formulation, des approches d'optimisation sont utilisées. En 2004, l'approche dite du Mortier de Béton Equivalent (MBE) voit le jour dans le projet CALIBRE (**Calibé, 2004**). Le principe de la méthode repose sur le fait qu'il existe une corrélation simple reliant les propriétés rhéologiques d'un béton à celle du mortier qui le compose (**Schartzentruber, 2000**). La méthode MBE demande à identifier la composition granulométrique des sables et des granulats, à calculer la surface de chaque tranche granulaire, et à conserver les fractions fines (en général le sable initial) de manière à reconstituer un mortier équivalent qui aura la même surface granulaire totale que celle du béton initial. Cette méthode permet de pouvoir tester efficacement à l'état frais certains couples de constituants (ciment/adjuvant).

Les Plans d'Expériences (PdE) sont bien adaptés à la recherche-développement chaque fois qu'intervient un grand nombre de paramètres (**Aïtcin, 1994; Louvet, 1996**). Bien utilisés, ils permettent de réduire fortement le nombre d'essais tout en parvenant à un résultat encore mieux assuré. Leur application au béton peut s'imposer à la formulation lorsque l'on veut concilier au mieux de nombreux exigences. Les éléments indispensables à cette démarche sont:

- la planification des essais et la qualité de l'expérience.
- la maîtrise de l'outil mathématique (régressions linéaires multiples) .
- l'apport des statistiques pour la validation globale des modèles et la détermination des effets significatifs. [35]

c. Méthodes de formulation numériques :

Des méthodes de formulation novatrices utilisant des modèles numériques émergent: René LCPC, BétonLab et BétonLab Pro2...

Les premières théories traitant d'une compacité maximale des mélanges granulaires (**Féret, 1892, Caquot, 1937**) ne prennent pas en compte explicitement les interactions des grains et de leurs tailles entre eux. De Larrard (**de Larrard, 2000**) au travers du modèle d'empilement compressible fait intervenir des notions nouvelles comme le serrage, l'effet de paroi et l'effet de desserrement.

Historiquement, le Modèle d'Empilement Compressible (MEC) est le résultat de plusieurs années de recherche au LCPC. Le MEC est une évolution du Modèle de Suspension Solide (MSS) lui-même dérivé du Modèle Linéaire de Compacité (MDC). Le MDC (**Stovall, 1986**) décrit des surfaces d'isocompacité mais l'existence de limites de performance dans les zones de mélange optimum apparaissent lors de la validation expérimentale. Le MSS (**de Larrard, 2000**) est un modèle lié à la notion de viscosité d'un mélange sec mais il n'est pas validé par des séries expérimentales de vérifications. Finalement, le MEC est développé (**de Larrard, 2000**) avec les équations revues du MSS. La notion d'indice de serrage fournie au système est introduite.

Le logiciel BétonLab Pro2 est basé sur le MEC. Son intérêt réside dans sa configuration entrée/sortie. En effet, les paramètres d'entrée sont des caractéristiques qualifiant les constituants de base (ciments, granulats, adjuvants, etc.) qui peuvent être mesurées en laboratoire, obtenues auprès des fournisseurs ou dans la littérature. Par ailleurs, le logiciel utilise des modèles analytiques relativement sophistiqués sur une interface de type tableur

pour présenter les résultats. En aval, les valeurs de sortie sont associées à certaines caractéristiques du béton. A titre d'exemple, les équations I-8 à I-11 présentent le modèle relatif à la résistance mécanique:

$$f_c(j) = \frac{P \times f_{cm}(j)}{q \times f_{cm} + 1} \quad \text{Eq.II-8}$$

$$EMP = D_{\text{Max}} \left(\sqrt{\frac{g^*}{g}} - 1 \right) \quad \text{Eq.II-9}$$

$$C_{\text{eq}}(28j) = c \times \left[1 + 1.1 \left(1 - e^{-\frac{\varepsilon K p, i(28j) \times P z i}{c}} \right) + 0.17 t_{c3A} \left(1 - e^{-79 \frac{\varepsilon f_{ij}}{\tau_{c3A} \times c}} \right) \right] \quad \text{Eq.II-10}$$

$$f_{cm}(28j) = 13.4 \times R_{c28} \left[d(t) - 0.0023 \frac{d(t)}{t} \times \frac{\varepsilon S_{pi} \times f_{ij}}{c} + \left(1 + \rho_c \frac{w+a}{c e q} \right)^{-2.85} \right] \times EMP^{-0.13} \quad \text{Eq.II-11}$$

La liste des symboles se trouve en annexe 1.

D'autres caractéristiques du béton, moins accessible par des méthodes plus traditionnelles, peuvent être obtenues par cette méthode d'optimisation. Ce sont:

- les propriétés rhéologiques du mélange à l'état frais.
- les propriétés physiques du mélange.
- les propriétés mécaniques du matériau à l'état durci.
- les propriétés de déformations différées dans le temps.

Les différentes méthodes trouvent leurs intérêts dans un traitement des données en amont en laboratoire (caractéristiques des constituants) par rapport à des essais de calage faits sur site. Bien sûr, tous les résultats obtenus théoriquement doivent être confirmés par des gâchées réelles pour vérifier l'exactitude des méthodes utilisées. Après la phase de validation, la formule ainsi obtenue peut être adaptée au site de production avec les jeux de constituants étudiés en laboratoire. De plus, le béton et ses constituants doivent malgré tout répondre à des critères normatifs et aux certifications, gage de qualité des produits finis. Toutefois, pour ce projet de thèse nous avons utilisé la méthode de formulation du béton Dreux-Gorisse (**Dreux, 1998**). Car, cette formulation ne prend pas en compte l'ajout d'adjuvant. [35]

II.4.1.5 Etudes antérieures sur les granulats recyclés de béton de démolition:

(Hansen;1992) a étudié la possibilité d'utiliser partiellement ou totalement les granulats de déchets de béton et de briques de démolition comme substitution des granulats naturels dans la fabrication du béton hydraulique, l'étude expérimentale a porté sur les taux de substitution (0, 25, 50, 70 et 100%) pour chaque type de granulats recyclés ainsi qu'une combinaison des deux types à proportions égales. Il conclut que la résistance à la compression diminue nettement dès que le taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés dépasse 30% et que cette diminution peut dépasser 10% de la résistance du béton témoin (100% agrégats naturels). Cette réduction de résistance est due principalement à l'effet du mortier de l'ancien béton inerte qui est attaché aux granulats provenant du béton concassé, et de la matière d'origine argileuse pour les granulats de brique concassé ce qui gêne le bon déroulement de l'hydratation de ciment, les bétons préparés à base d'agrégats recyclés issus de la démolition présentent un rapport E/C élevé ce qui se traduit par une forte porosité et par conséquent une baisse de résistance. [34]

(Hallshow et Levacher ; 2000) ont fait une étude sur la valorisation des granulats issus de bétons de démolition dans la fabrication de nouveaux bétons, cette étude est basée sur l'introduction de sables recyclés dans le mortier et le gravier recyclé dans le béton; les résultats indiquent une chute de la résistance en compression de l'ordre de 11% pour les bétons de granulats recyclés. [34]

(Corinaldesi ; 2005) a étudié le comportement mécanique et les propriétés élastiques de bétons recyclés. Ces bétons ont été préparés avec deux fractions de granulats recyclés provenant d'une usine de recyclage dans lequel les décombres de la démolition sont collectés et traités convenablement. Plusieurs mélanges de béton ont été préparés en utilisant uniquement des granulats vierges (comme référence), Le taux de substitution est de 30% en granulats recyclés (gravier fin et grossier). Cinq différents rapports d'eau/ciment ont été adoptés comme suit: 0,40, 0,45, 0,50, 0,55 et 0,60. L'ouvrabilité du béton était de l'ordre de l'affaissement de 190-200 mm. Des essais de compression ont été effectués après 28 jours de cure à l'eau. En outre, un module d'élasticité du béton et le retrait de séchage ont été évalués. Les résultats obtenus ont montré que les structures en béton armé jusqu'à une classe de résistance C32/40 peuvent être fabriquées par le remplacement de 30% d'agrégat vierge avec granulats recyclés en béton. [34]

(Etxeberria ; 2007) Dans son étude, les gros granulats recyclés obtenus par le béton concassé ont été utilisés pour la production de béton. Quatre différents bétons de granulats recyclés ont été produits; faits avec 0%, 25%, 50% et 100% de graviers recyclés, respectivement. Les proportions de mélange des quatre bétons ont été conçues en vue d'atteindre les mêmes résistances à la compression. Les granulats recyclés ont été utilisés à l'état humide, mais pas saturé, L'influence du pourcentage de matériaux utilisés dans la production de béton (fait avec granulats recyclés) à l'égard de l'amélioration de sa résistance à la traction a été analysée. Le module d'élasticité est plus faible que celui des bétons traditionnels. [34]

(Evangalista;2007) a conclu que les Granulats fins recyclés sont considérés comme le dernier choix en matière de recyclage pour la production de béton. Dans la recherche expérimentale menée, différents mélanges de béton (avec augmentation des taux de substitution des granulats naturels fins - sable - avec granulats recyclés fins de béton concassé) ont été préparés et testés. Les résultats ont ensuite été comparés avec ceux d'un béton de référence avec exactement la même composition et courbe granulométrique, mais sans granulats recyclés. Les principaux résultats de cette recherche pour l'absorption d'eau par immersion et la capillarité, la pénétration des chlorures, et la résistance à la carbonatation, ont été tirés. [34]

(Akash ; 2007) a examiné les différents aspects du problème de recyclage des déchets en tant que granulats de substitution en béton. Il a étudié les propriétés mécaniques des granulats recyclés, et l'effet de leur utilisation sur les propriétés du béton frais et durci. Il a également identifié certains des principaux obstacles à une utilisation plus répandue de béton de granulats recyclés, y compris le manque de sensibilisation, le manque de soutien du gouvernement, la non-existence de spécifications / codes pour réutiliser ces agrégats dans le béton. [34]

(Sanchez de juan ; 2009) les granulats de béton recyclés diffèrent principalement des granulats naturels parce qu'ils sont composés de deux matériaux différents: Agrégat naturel et la gangue de ciment. Il est bien connu que la teneur en mortier de ciment affecte d'autres propriétés des granulats recyclés: l'absorption est plus élevée, Los coefficient d'abrasion Angeles est plus faible, etc. L'objectif de cette étude a été d'obtenir des relations expérimentales entre le contenu du mortier adhérent et d'autres propriétés de granulats recyclés, couvrant un large éventail de différentes qualités de granulats

Dans sa recherche, il a été conclu que seuls les granulats recyclés avec le contenu de mortier moins de 44% pourraient être utilisés dans le béton de structure. Avec ce critère, les agrégats

avec la densité spécifique supérieure à 2160 kg/m^3 , l'absorption d'eau inférieure à 8% et la perte à l'abrasion de Los Angeles de moins de 40%, sont obtenus.

Les résultats peuvent également être utiles pour les usines de recyclage, car ils peuvent ajuster les procédés de fabrication en utilisant les relations pour obtenir un agrégat avec des propriétés pré-sélectionnées en réduisant la teneur en mortier, par exemple, au moyen de plusieurs procédés de broyage

Les résultats montrent que les propriétés principales du béton sont défavorablement affectées par le contenu du mortier-adhérent à savoir la densité, l'absorption et le coefficient de Los Angeles, les corrélations entre eux et la nature du mortier ont été discutées en détail par l'auteur. [34]

[Domingo-Cabo ; 2009] a présenté les résultats de la recherche expérimentale du béton produit par le remplacement des granulats naturels avec granulats recyclés provenant de déchets de construction et de démolition. L'objectif principal de son travail était de déterminer le fluage et le retrait et les variations rencontrées dans le béton à base de granulats recyclés, fabriqué par le remplacement de la fraction principale de l'agrégat naturel avec un agrégat recyclé provenant de déchets de béton et en le comparant à un béton témoin. Les pourcentages de substitution étaient de 20%, 50% et 100%. Il a été possible de constater que l'évolution de la déformation par retrait et fluage est similaire à celle d'un béton classique, bien que les résultats après une période de 180 jours ont montré l'influence du pourcentage de substitution des granulats recyclés présents dans le mélange. Dans le cas où le taux de substitution arrive à 100% il y'a eu une augmentation des déformations par fluage de 51% et en retrait de 70% par rapport à celles subies par le béton témoin. [34]

[Berredjem, Arabi ; 2015] leur travail est une contribution expérimentale à l'étude de la durabilité des différentes compositions de bétons ordinaires (naturels/recyclés) avec différentes combinaisons granulaires (sable et gravier). Et, pour se faire réaliser des caractérisations physico-chimiques et mécaniques, des granulats en particulier les recyclés et des bétons ont été menées. Les essais ont été réalisés sur une formulation de béton type : un dosage en ciment constant $C=400\text{kg/m}^3$, une même maniabilité du béton frais ($A_{ff} = 70 \pm 20\text{mm}$) et une classe de béton cible C25/30. La procédure expérimentale consiste à comparer les résistances mécaniques à long terme, des bétons conservés dans trois types de solutions (eau du robinet, Eau déminéralisée et eau très salée), ainsi que les indicateurs de durabilité les plus déterminants pour ces bétons à savoir : la porosité, la perméabilité et la lixiviation au nitrate d'ammonium avec deux concentrations (faible et forte). [34]

II.5 Conclusion :

Le présent chapitre traite des granulats de béton recyclés et aborde divers aspects. En partant de la phase de démolition et de déconstruction.

Nous passerons également en revue les principales propriétés techniques des granulats. Nous abordons les aspects pratiques à considérer pour la production du béton.

D'utiliser les matériaux recyclés pour la réalisation des bétons, ce qui permettra d'augmenter la production de ce dernier à un coût compétitif, et protéger la nature des stocks grandissants des résidus industriels.

Chapitre III : MATÉRIAUX ET PROCEDURES EXPÉRIMENTALES

III.1 Introduction :

Ce chapitre décrit en détails tous les essais réalisés au cours de la présente recherche, les matériaux utilisés ainsi que les résultats de leur caractérisation en les comparant aux différentes valeurs imposées par les normes.

Le programme expérimental utilisé dans l'étude des bétons ordinaires à base de granulats recyclés : on a fait varier le taux de substitution des granulats ordinaires par des granulats issus de béton de démolition : 0%, 25% et 50% pour confectionner les bétons BR0, BR25 et BR50 respectivement afin d'étudier le comportement de ces bétons à l'état frais et durci.

En adoptant la méthode Dreux-Gorisse pour la composition des différents bétons (le béton ordinaire et le béton issu des granulats de démolition)

III.2 Matériaux de base utilisés pour le béton :

Le béton est un mélange de graviers, ciment, sable et eau de gâchage. Les analyses au laboratoire des caractéristiques physiques des granulats donnent les résultats suivants :

III.2.1 Equivalent de sable [Norme NFP 18-598] :

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

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 fragments de racine.

Les granulats employés pour le béton doivent être propres, car les impuretés perturbent l'hydratation du ciment.

Permet de mettre en évidence la proportion relative de poussière fine nuisible ou d'éléments argileux dans les sols ou agrégats fins. Pour un béton, ces fines risquent d'inhiber l'hydratation du liant et gênent l'adhérence avec les agrégats.



Figure III.1 appareil agitateur.

Dans le cas des sables, le degré de propreté est fourni par un essai appelé équivalent de sable piston (Esp) qui consiste à séparer le sable des particules très fines qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage. L'essai est fait uniquement sur la fraction de sable 0/2 mm.

Le lavage à l'eau ne donnerait pas des résultats précis et fidèles lors de l'essai. On utilise une solution composée d'eau distillée et de désinfectant qui permet la floculation des éléments fins et en régularise la sédimentation.



Figure III.2 équivalente de sable

On déduit l'équivalent du sable qui par convention égale à :

$$ES = 100h_1/h_2$$

Eq .III-1

Tableau III.1 : Résultats de l'équivalent de sable

Equivalent de sable	Observation
69.9% > 65%	Sable légèrement argileux -de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait.

III.2.2 Les masses volumiques

Cet essai a pour but de déterminer la masse contenant dans un volume donné d'une fraction Granulaire, permettant d'obtenir ainsi une composition optimale du béton.

Il permet de définir, dans un volume donné, le poids de tout échantillon. C'est une mesure Indirecte appliquée dans les chantiers comme argument de contrôle de dosage des constituants.

III.2.2.1 La masse volumique absolue (masse spécifique) [Norme NA 255/1990] :

Elle est indiquée, par unité de volume, la masse absolue de chaque matériau sans tenir Compte les vides existants qu'ils soient dans ou entre les grains.

Des caractéristiques intrinsèques des matériaux telles que la résistance à la compression et le module d'élasticité sont fonctions de la masse spécifique λ_s

Par ailleurs, la connaissance simultanée de la masse spécifique δ_s et de la masse volumique Apparente sèche δ_d permet de calculer la compacité C et le pourcentage des vides V dans un Échantillon.

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

Equipements nécessaires : Eprouvette graduée, Balance de précision 0,1g, Tare.



Figure III.3 La masse volumique absolue

III.2.2.2 La masse volumique apparente [Norme NA255/1990]

Qu'on indique aussi dans l'appellation « masse volumique en vrac », qui est une masse de constituants secs par unité de volume où les vides entre les grains sont inclus.

La masse volumique apparente sèche δ_d des granulats est nécessaire lors de l'établissement d'une composition de béton.

- Elle permet également d'estimer la masse d'une charge d'exploitation (exemple : hall de stockage de matériaux ...).

- Elle sert également à déterminer les capacités réelles des engins de terrassement.

L'équipement nécessaire : Balance, Récipient, Tare, Règle



Figure III.4 la masse volumique apparente

Les résultats de la masse volumique absolue et apparente dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Résultats les masses volumiques

La masse volumique absolue (g/cm^3)	La masse volumique apparente (g/cm^3)
Classe 0/5 :1.70	Classe 0/ 5: 2.65
Classe 3/8 :1.38	Classe 3/8 : 2.28
Classe 8/15 :1.29	Classe 8/15 : 2.688
Classe 15/25 :1.32	Classe15/25 : 2.651

- La masse volumique est donc : $M_{v,abs} = M / (V2 - V1)$ *Eq .III-2*

- La masse volumique apparente est : $M_{v,app} = M/V$ *Eq .III-3*

III.2.2.3 Granulats (0/5, 3/8, 8/15, 15/25) :

Les classes granulaires ont été utilisées pour la confection de notre béton recyclé : classe (0/5) pour le sable et (3/8 et 8/15 et 15/25) pour le gravier, La figure III.5 montre une photographie de ces classes de



Figure III.5 les classe du Graviers.

III.2.3 Analyse granulométrique [Norme NA 2607 1992-08-01] :

L'analyse granulométrique a trois buts :

- ✓ Déterminer les dimensions des grains.
- ✓ Déterminer les proportions de grains de même dimension (pondéral).
- ✓ En déduire le module de finesse (Mf)

La granulométrie est l'un des paramètres les plus importants à considérer dans l'établissement d'une formulation de béton. Sa connaissance permet d'établir avec précision le dosage en granulats de manière à optimiser le squelette granulaire et ainsi réduire sa compacité selon les méthodes usuelles de formulation. L'analyse granulométrique permet également d'évaluer la teneur en éléments fins à travers la valeur du module de finesse. La continuité et la régularité de la granularité.

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon. L'essai consiste à classer les différents grains qui constituent l'échantillon en utilisant des tamis. Emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis



Figure III.6 Analyse granulométrique.

Les résultats de ces analyses granulométriques pour le sable (0/5) et les graviers (3/8 et 8/15, 15/25) sont résumés dans le Tableau :

Tableau III.2 Analyse granulométrique des granulats ordinaires.

Tamis	Module	Granulats ordinaires (%)			
		0/ 5	3/8	8/15	15/25
0,08	20	18			
0,16	23	25			
0,63	29	30	1		
1,25	32	41	2		
2,5	35	62	3	0	
4	37	83	17	1	
5	38	100	35	2	0
6,3	39	100	77	3	1
8	40		98	19	2
10	41		99	35	3
12,5	42		100	67	4
16	43			97	27
20	44			100	86
25	45				100

Module de finesse : C'est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du gravier, il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumules des tamis de mailles.

$$Mf = 2.53 \text{ (Sable normal)} \quad 1.8 \geq MF \geq 3.2 \text{ (norme)}$$

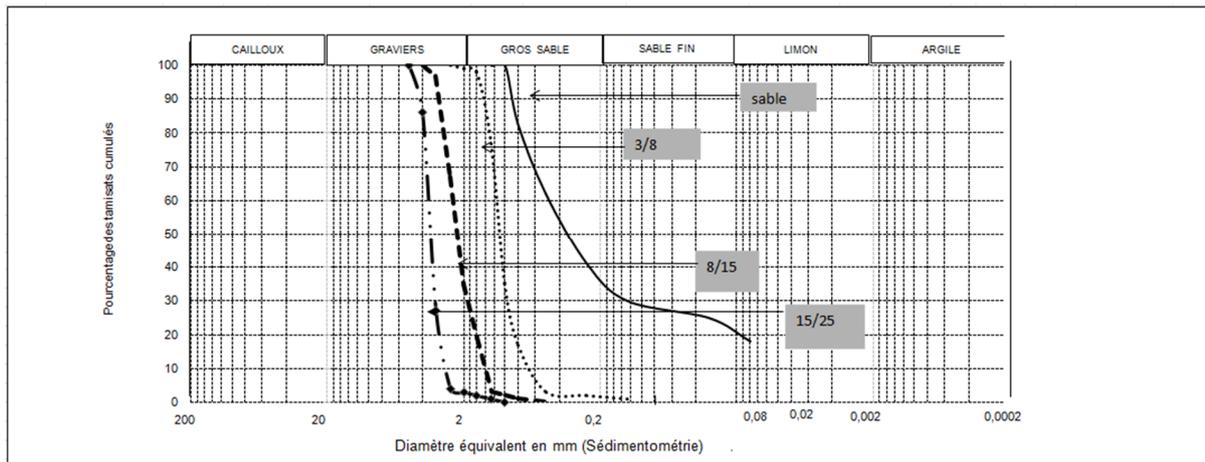


Figure III.7 : Analyse granulométrique des granulats

III.2.4 La résistance mécanique de ces granulats est caractérisée par le coefficient Los Angeles LA [Norme NA 458/1990 (*)]:

L'essai Los Angeles permet de mesurer les résistances combinées aux chocs et à la détérioration progressive par frottement réciproques des éléments d'un granulat. Ce mode opératoire s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des chaussées et bétons hydrauliques.

Lors de la fabrication d'un béton, le malaxage est source de frottements intenses entre grains. Si ceux-ci ne sont pas assez résistants, ils peuvent se casser en produisant des sables ou des éléments fins. Il est donc nécessaire de procéder à des essais de résistance au choc, afin que les granulats puissent répondre aux spécifications de fabrication des bétons.

L'essai consiste à mesurer la masse m d'éléments inférieurs à 1.6 mm, produits par la fragmentation du matériau testé et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le Cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations. La résistance à la fragmentation aux chocs s'exprime par le coefficient Los Angeles LA :

$$L_A = \frac{m}{M} 100 \quad \text{Eq. III-4}$$

Avec :

M : la masse du matériau soumis à l'essai.

m : la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm produits au cours de l'essai.

A partir du coefficient LA, les granulats sont qualifiés comme suit :

- $LA < 15$: très bon
- $15 \leq LA < 20$: bon à moyen.

- $20 \leq LA < 30$: moyen à faible.

- $LA \geq 30$: médiocre.

Equipement nécessaire : Tamis 1.6 mm, Balance, Machine Los Angeles, Charge de boulets : la charge est constituée par des boulets sphériques de $47 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de Diamètre et pesant entre 420 et 445 g, en acier Z 30 C 13.



Figure III.8 : Los Angeles

Le résultat de La résistance mécanique de ces granulats est caractérisé par le coefficient Los Angeles dans le tableau suivant :

Los Angeles LA	Observation
Classe 8/15: 29%	Moyen à faible
Classe 15/25: 25%	Moyen à faible

III .3 Granulats de Béton de démolition

Pour les granulats recyclés, on a choisi des éprouvettes de laboratoire qui ont subi des tests Destructifs, et dont on dispose des renseignements sur la composition de leurs bétons, la qualité des granulats et leurs caractéristiques. Les granulats recyclés utilisés dans les études sont donc des granulats concassés de trois classes : gravier 15/25.

La préparation et l'obtention des classes granulaires se fait par concassage, criblage et tamisage.

Les analyses au laboratoire donnent les résultats suivants :

	Densité apparente (g/cm^3)
Granulats recyclées	Classe 15/25 :1.21

III.4 le ciment :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui mélangée avec l'eau forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse.

III .4 .1 Pâte de ciment :

La pâte de ciment correspond à l'ensemble (ciment + eau + air + additions+ adjuvants). La pâte présente à l'intérieur du béton, joue à la fois le rôle de liant et de remplissage. Elle contribue à l'écoulement suivant un processus rhéologique lié essentiellement à sa viscosité [Nguyen T.L.H, 2007]. Celle-ci peut être présentée schématiquement comme une suspension des particules suspendues dans un liquide newtonien qui est l'eau.

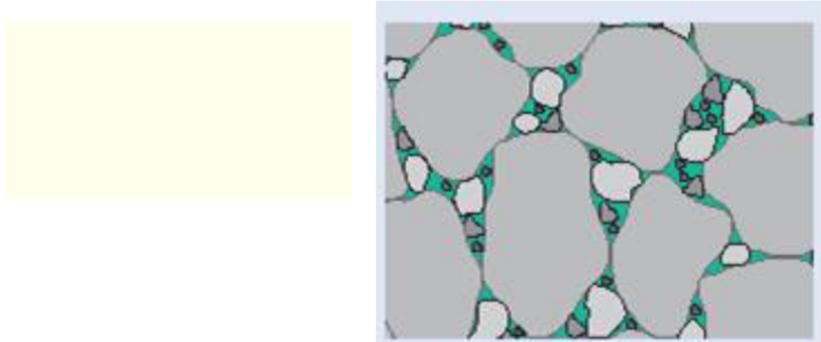


Figure III.9 pâtes de ciment

III.4.2 Essai de consistance :

L'attention des utilisateurs est de plus en plus attirée par les propriétés des mortiers et des bétons à l'état frais, avant la prise et le durcissement. Les caractéristiques du mortier et du béton sont fondamentales et varient avec la nature du liant, le dosage en eau et le mode de préparation. La pâte de ciment de consistance normalisée a une résistance spécifiée à la pénétration d'une sonde normalisée. L'eau nécessaire à une telle pâte est déterminée par des essais de pénétration sur pâte à quantités d'eau différentes, L'état pâteux intermédiaire entre

liquide et solide est caractérisé par sa consistance qui peut être molle, plastique ou bien ferme. L'essai de consistance doit être réalisé suivant les prescriptions ordinaires, c'est à dire à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et à une hygrométrie supérieure à 65%.

L'essai de consistance permet de déterminer la quantité d'eau optimale pour gâcher un liant afin d'obtenir une pâte normale. La pâte obtenue a une résistance spécifiée à la pénétration d'une sonde normalisée.

L'essai est réalisé pour trouver la quantité d'eau qui doit être mélangé toujours suivant le même processus avec une masse de liant, dans laquelle la sonde de l'appareil de Vicat ne s'enfonce que de (6 ± 1) mm du fond du moule.



Figure III.10 Essai de consistance

III.4.3 Essai de prise :

Les réactions qui se passent dès l'instant où l'eau est ajoutée au ciment et qui se poursuivent dans le temps sont très complexe. L'hydratation est modifiée lorsque le ciment reçoit des constituants secondaires (laitier de haut fourneau, cendres volantes de centrale thermiques, etc.), ou des adjuvants chimiques. Les constituants anhydres du ciment, mis en présence d'eau donneraient naissance à une solution sursaturée. Des hydrates se formeraient dans cette solution et précipiteraient en donnant des microcristaux : cela correspondrait au début de prise. L'essai de prise doit être réalisé à une température de 20°C et à une hygrométrie supérieure à 90%.

L'essai de prise permet de déterminer le temps de prise, ce qui correspond au temps écoulé du moment de gâchage du ciment jusqu'au début de prise.

L'essai est réalisé pour mesurer le début de prise sur pâte à consistance normalisée à

l'aide d'un appareil simple de laboratoire qui est l'appareil classique de Vicat équipé d'une aiguille de diamètre 1.13 mm. (Charge de $300\text{g} \pm 1\text{g}$) Le début de prise est l'intervalle de temps passé entre l'instant de gâchage du liant et celui où l'aiguille de Vicat s'arrête à une distance du fond du moule de (4 ± 1) mm La fin de prise est obtenue lorsque l'enfoncement de la sonde n'est que 0.5 mm.

Propriétés physiques du ciment :

Le ciment utilisé pour l'étude de cette variété de bétons est le ciment de type CEM II/A 42,5 :

Temps de prise : début \longrightarrow 55min

Fin \longrightarrow 4h 11min

III.5 La finesse de mouture (finesse de Blaine) :

Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm^2/g). Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3000 à 3500 cm^2/g . Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes, par contre plus le ciment est sensible à l'éventuellement et plus le retrait est important. En outre, la finesse de mouture influence la plasticité et la cohésion de la pâte de ciment à l'état frais, ainsi que son pouvoir de rétention d'eau et la ressuée. La surface massique de ciment étudié n'est pas mesurée directement, mais par comparaison avec un ciment de référence dont la surface massique est connue. Il s'agit de faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment. Toutes choses étant égales par ailleurs, plus la surface massique de cette poudre est importante et plus le temps t mis par l'air pour traverser la poudre est longue, Dans les conditions normalisées décrites, la surface est proportionnelle à \sqrt{t} . L'appareil utilisé pour déterminer la finesse de mouture de ciment est appelé « Perméabilimètre de Blaine ». Cet appareil sur figure III.11, Il se compose pour l'essentiel d'une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester et d'un manomètre constitué d'un tube en verre en forme de U rempli, jusqu'à son repère inférieur (N° 4) d'une huile légère. La cellule est équipée d'une grille en sa partie inférieure.



Figure III.11 appareille de Blaine

Surface spécifique (BLAINE) = 3891 Cm²/g (Un ciment fin)

Eau de gâchage :

Toutes les eaux ne peuvent être utilisées pour gâcher les bétons, l'eau potable est toujours utilisable, mais dans certains cas l'eau contient des impuretés, ce qui nécessite une analyse chimique pour déterminer les impuretés qui s'y trouvent. Ces impuretés sont soit des composés chimiques qui peuvent être actifs vis-à-vis du ciment, des granulats ou des armatures, soit des particules en suspension qui sont indésirables.

L'excès d'impuretés détériore les propriétés du béton : les propriétés physiques et mécaniques (prise et résistance), les propriétés esthétiques (tâches, efflorescences), la durabilité (corrosion des armatures). La teneur en chlorures admise ne doit pas dépasser 500mg. Les chlorures peuvent provenir de l'eau de gâchage, du ciment, des granulats et éventuellement de l'adjuvant. Les chlorures en faible proportion peuvent modifier légèrement la prise et le durcissement du ciment, par contre la forte proportion peut réagir avec le ciment et compromettre la durabilité du béton, leurs effets sont néfastes sur les armatures dont la corrosion provoque l'éclatement du béton. Dans notre cas on a utilisé l'eau de robinet.

III.6. Conclusion :

A partir des essais réalisés dans cette étude expérimentale, nous pouvons conclure quant à l'intérêt (technique et économique) de l'utilisation des bétons de recyclage, étudier les propriétés physico-mécaniques des granulats ordinaires et recyclés.

Une synthèse sur les caractéristiques de ces granulats, les essais physique (analyse granulométrique, équivalent de sable, les masses spécifiques et apparentes, la finesse de ciment et les temps de début et fin de prise...), ainsi que les essais mécaniques (le coefficient Los Angeles LA ...) était nécessaire pour identifier les matériaux de base afin de formuler nos bétons (ordinaires et béton par utilisation des granulats de recyclage).

Chapitre IV : Analyse des résultats et discussions

IV.1 Introduction :

La thématique des bétons classiques à base de granulats recyclés est un sujet très vaste qui couvre un grand nombre d'études. Cette partie expérimentale présente les éléments essentiels à l'étude de ce béton à l'état frais et la caractérisation de ses propriétés mécaniques à l'état durci avec des matières premières algériennes et dans un contexte de développement durable.

IV.2 Composition des bétons ordinaires

IV.2.1. Méthode de Dreux-Gorisse

C'est une méthode pratique qui simplifie la formulation du béton. Elle consiste à rechercher conjointement la résistance à la compression et l'ouvrabilité désirée à partir des données de base essentielles pour la formulation du béton telle que la dimension des granulats.

Les quantités optimales de matériaux (eau, ciment, sable, gravillon et gravier) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton sont déterminées conformément au cahier des charges. Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires pour l'obtention de la formulation théorique de béton.

Pour la composition des bétons à base de granulats de béton de démolition, on a adopté la méthode « Dreux-Gorisse », qui a pour but de déterminer d'une façon simple et rapide une formule de composition du béton étudié.

On a les données suivantes :

- Dimension maximale des granulats $D = 25 \text{ mm}$
- Granulats concassés de quatre classes : 0/5, 3/8, 8/15 et 15/25
- Module de finesse $M_f = 2.58$
- Plasticité : béton plastique
- Serrage : vibration courante
- Affaissement A en Cm : 6 à 9
- Nombre de chocs : 15 à 25
- Dosage en ciment 350 Kg/m^3
- Terme correcteur $K = +2$
- Les pourcentages des différentes classes de granulats sont:
 - Sable : (0/5: 30%).
 - Gravier (3/8): 25%.
 - Gravier (8/15): 29%.
 - Gravier (15/25): 16%.

- E/C = 0.6

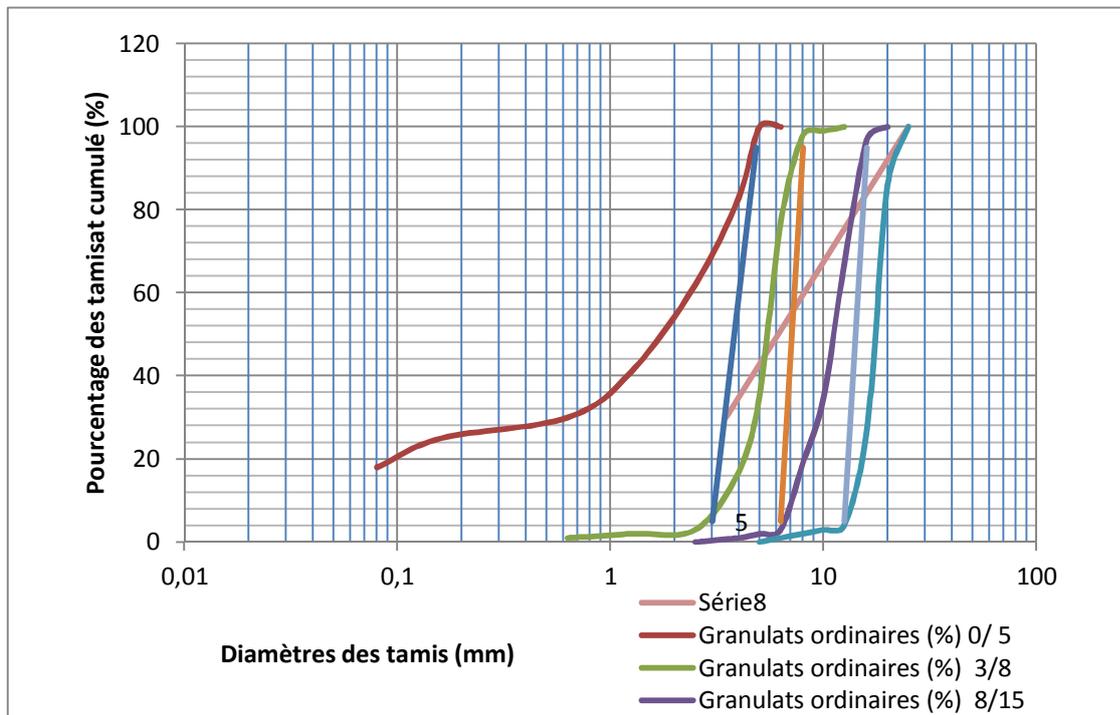


Figure IV.1 composition granulométrique du béton

IV.2.2 Mélanges retenus :

IV.2.2.1 Béton ordinaire :

Le béton est un matériau composite constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable), de ciment et d'eau. Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit.

La pâte de ciment hydraté et le sable constituent le mortier. Celui-ci a pour rôle de se lier avec les gros granulats pour former un conglomérat solide.

Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.

Sa masse volumique se situe aux alentours de 2 500 Kg/m³. Les bétons peuvent être armés ou non, ou même précontraints.

Le béton ordinaire est caractérisé par sa résistance à la compression qui se situe entre 20 MPa = f_{c28} = 50 MPa.

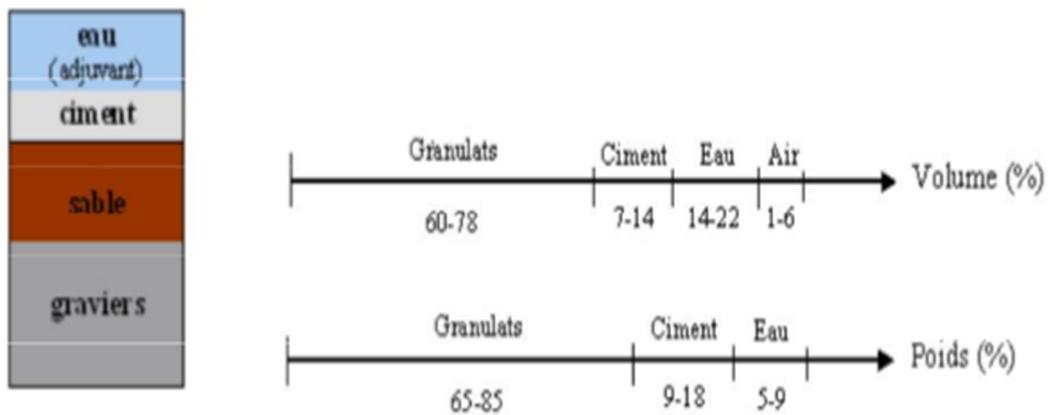


Figure IV.2 Constituents et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire

Tableau IV.1 Composition des mélanges pour confection 3 éprouvettes de dimensions 16X 32 cm²

Bétons	Matériaux (Kg)						
	0/5	3/8	8/15	15/25		Ciment	Eau (L)
				granulats ordinaire	granulats de démolition		
Béton BR0	10.37	2.952	5.310	14.15	/	10.83	6.5
Béton BR25	10.37	2.952	5.310	10.62	3.53	10.83	6,5
Béton BR50	10.37	2.952	5.310	7.08	7.07	10.83	6,5

IV.3 Béton a base de granulats de démolition

IV.3.1 Ouvrabilité

La demande en eau est définie comme étant le dosage en eau efficace nécessaire pour obtenir l’ouvrabilité souhaitée, Les mélanges de béton sont préparés avec un affaissement imposé (entre 6 et 9 cm) fourchette des bétons plastiques ce qui est plus répandu dans les chantiers de coulage de béton. Les résultats de l’influence du taux de substitution sur la demande en eau des bétons confectionnés pour une maniabilité constante sont présentés dans les courbes de la figure IV.2



Figure IV.3 Cône d'Abrams pour la détermination d’Affaissement

Tableau IV.2 Affaissement par cône d’Abrams du Béton a base de granulats de démolition
Pour les trois dosages

	Affaissement par cône d’Abrams
Béton BR0	9
Béton BR25	8

Béton BR50	7.5
------------	-----

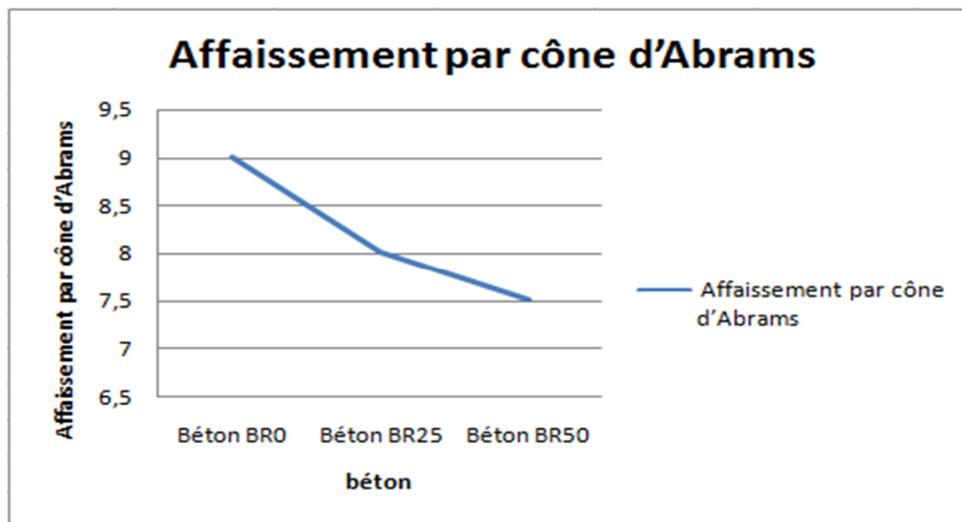
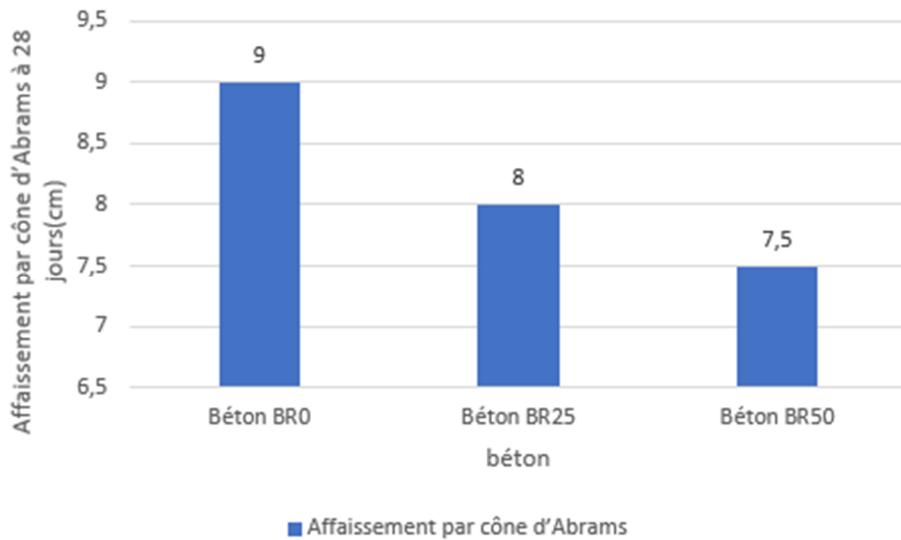


Figure IV.4 Affaissement par cône d'Abrams du Béton a base de granulats de démolition
Pour les trois dosages à 28j

La demande en eau de tous les bétons étudiés augmente avec le taux de substitution en granulats recyclés, par conséquent une augmentation du rapport Eau/Ciment est inévitable,

Cette absorption est constatée dans les compositions à base de ces granulats, Pour s'affranchir de celle-là, une quantité d'eau supplémentaire est indispensable pour conserver une ouvrabilité plastique similaire. L'absorption est la conséquence de la présence d'une structure alvéolaire de l'ancien mortier collé aux granulats.

Lors de la confection des bétons à base de granulats recyclés de béton, il est remarqué une certaine difficulté de mise en œuvre par rapport à celle des bétons ordinaires probablement due à l'absorption d'eau élevée de ces granulats, une moins bonne adhérence entre la pâte de ciment et ces granulats a été confirmée par Hansen.

Certains auteurs préconisent d'ailleurs de pré-saturer par immersion dans l'eau les granulats recyclés avant utilisation en béton prêt-à-l'emploi (Kashino et Takahashi, 1988)

IV.3.2 Résistance à la compression

Résistance à la compression c'est une Contrainte maximale admissible par un matériau soumis à une charge d'écrasement. La résistance à la compression d'un matériau dont la rupture s'effectue par éclatement peut être déterminée en tant que propriété isolée avec une assez bonne précision. Par contre, la résistance à la compression d'un matériau dont la rupture ne s'effectue pas par éclatement ne peut être déterminée que par l'amplitude de la contrainte nécessaire pour lui provoquer une déformation d'amplitude conventionnelle. Dans un essai de compression, la résistance à la compression est égale au quotient de la charge maximale par l'aire initiale de la section de l'éprouvette.



Figure IV.5 Dispositif de l'essai de compression

Tableau IV.3 Résistance de Béton a base de granulats de démolition

Pour les trois dosages à 28j

	Résistance de béton a 28 jours (MPa)
Béton BR0	22.58
Béton BR25	19.47
Béton BR50	15.38

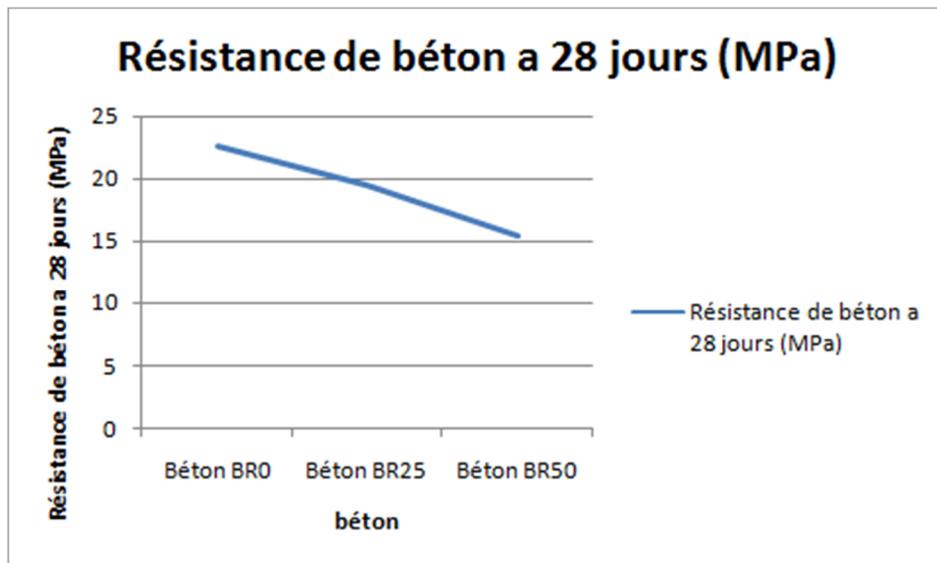
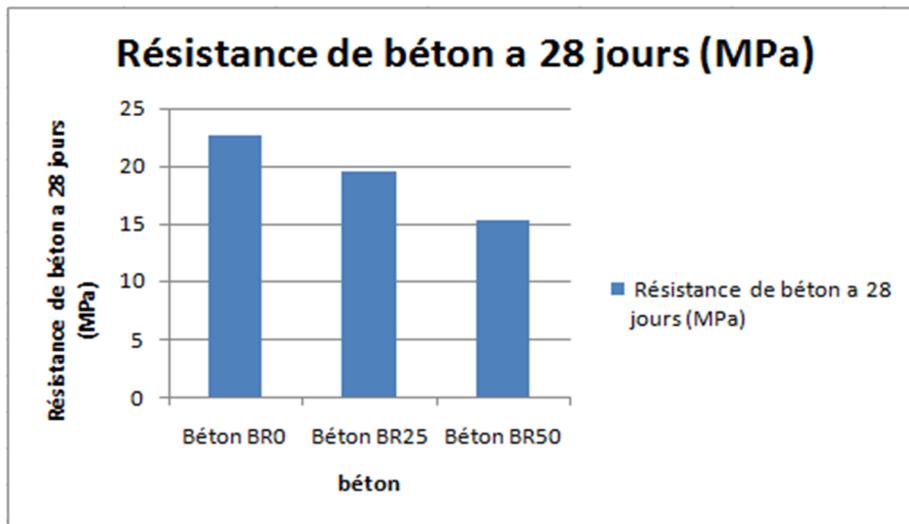


Figure IV.6 Résistance de Béton a base de granulats de démolition
Pour les trois dosages à 28j

Les résultats de l'essai de compression sur éprouvettes en béton à base de granulats recyclés (béton démolé) sont présentés dans la Figure IV.6.

La résistance à la compression des bétons diminue lorsque le pourcentage en granulats recyclés augmente. En effet, il a été montré que le rapport Eau/ciment est le facteur le plus important qui conditionne la résistance à la compression d'un béton, ainsi que la qualité du béton. L'adhérence entre le mortier et le gros granulat influence considérablement la résistance à la compression, ce qui traduit la diminution de la résistance du béton à base de granulats recyclés.

IV.4 CONCLUSION

Cette étude expérimentale a pu toucher une composition différente de bétons classiques et un béton à base de granulats recyclée. Nos résultats sur le comportement des bétons incluant les granulats recyclés s'accordent en général avec les données expérimentales présentées dans les travaux antérieurs. Les résultats trouvés permettent de mettre en évidence que les bétons de granulats recyclés de béton présentent des performances systématiquement inférieures à celles des bétons ordinaires. L'influence du taux de substitution en granulats recyclés (béton démolé) sur le comportement du béton à l'état frais et durci a été étudiée : Un béton à base de granulats ordinaire présente un meilleur résultat par rapport un béton recyclée mais généralement les résultats sont proches ce qui implique d'utiliser ce béton dans des ouvrages de moins résistance.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Ce travail de recherche rentre dans le cadre de la valorisation des déchets et sous produits de la construction/démolition.

Le granulat recyclé est le granulat résultant de la transformation de matériaux inorganiques antérieurement utilisés en construction. Dans cette catégorie se rangent des granulats, comme le béton concassé, résoudre le manque de granulats naturels, et de réduire les déchets mis en décharge.

En Algérie, la quantité de déchets solides générée annuellement de déchets de construction ou de démolition est générée mais rarement recyclée.

Le béton fabriqué avec des granulats provenant du recyclage, présente généralement de bonnes qualités de maniabilité, durabilité et de résistance à l'action selon les résultats des travaux antérieurs. La résistance en compression varie selon la résistance du béton initial et le rapport eau/ ciment du nouveau béton. On peut l'accroître en utilisant une teneur plus élevée et en remplaçant une partie du béton recyclé par des granulats ordinaires. Le béton neuf aura aussi une masse volumique plus faible. Comme pour toute nouvelle source de granulats, il faut contrôler, la granulométrie et les autres propriétés des granulats recyclés.

A mis en évidence dans quelle mesure l'utilisation de granulats recyclés influence les propriétés physiques et mécaniques des bétons selon le rapport E/C de la matrice. L'influence de la qualité du granulat recyclé a également été analysée, en comparant des bétons réalisés avec des granulats recyclés de laboratoire et des granulats industriels. Tous les mélanges de Béton à base des granulats recyclés présentent des résistances mécaniques à la compression et à la flexion plus faibles que les mélanges de Béton à base des granulats naturels. Néanmoins les mélanges de béton à base de 25% et 50% des granulats recyclés présentent des résistances mécaniques proches que le béton ordinaire.

Proches à celle de Béton à base des granulats naturels. La perte des résistances mécaniques est de l'ordre de 13% a 30% au maximum. Donc on peut conclure que ces formulations peuvent être utilisées pour des constructions de structure, et dont l'intérêt environnemental et écologique permet l'utilisation des granulats recyclés des bétons.

**RÉFÉRENCE
BIBLIOGRAPHIQUE**

Références bibliographiques

- [1] **ouvrabilité des bétons frais** – planète TP « <http://www.planete-tp.com/ouvrabilite-des-betons-frais-a670.html> »
- [2] <https://www.google.com/search?q=Eprouvette+du+b%C3%A9ton&sxsrf=>
- [3] **Guide Béton-** Résistances du béton . « <http://www.guidebeton.com/resistances-beton#> »
- [4] Caractérisation en traction directe du béton de fibres métalliques .ARTICLE in MATERIAUX & TECHNIQUES JANUARY 2011, « http://www.univ-tebessa.dz/fichiers/tizi-ouzou/Djebali_Mat »
- [5] <https://www.google.com/search?q=Essai+en+traction+du+b%C3%A9ton&tbm>
- [6] Essais destructifs sur éprouvettes en béton et acier d'armature, Xavier JOURDAIN – Hélène HORSIN MOLINARO François SOLEILHET Edité le 12/11/2018, « <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/pedagogiques/10342/10342> »
- [7] Essais destructifs sur éprouvettes en béton et acier d'armature Xavier JOURDAIN – Hélène HORSIN MOLINARO François SOLEILHET
- [8] Mlle SAADANI Sabrina, « comportement des bétons A base de granulats recycle » MEMOIRE DE MAGISTER, Université Mentouri Constantine Département de génie civil
- [9] Nouveau guide du béton et de ses constituants, Huitième édition 1998/ troisième tirage 2007 Jean FESTA Georges DREUX / EDITIONS EYROLLES 61.bd Saint-Germain 75240 paris Cedex 05 / www.edition-eyrolles.com
- [10] www.editioneyrolles.com <https://www.google.com/search?q=moules+cylindriques+du+b%C3%A9ton>
- [11] Mécanique du béton licence de Génie civil (L3) /Université Paul sabatier Toulous 3/ <<cours -Ex amens .Drg /umage /An -2015/ETUDE -Supérieures /Béton /cours /Mécanique DU Béton -PART2.pd .F
- [12] **Caractéristiques des matériaux**, <http://dSPACE.univ-djelfa.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/>
- [13] <http://mdevmd.accesmad.org/mediatek/mod/page/view.php?id=3023>

- [14] cours-Béton ETS > PDF / www.cours.Examens.org> Durabilité chap2-2 /béton pdf .livre /
- [15] Nouveau guide du beton et de ses constituants TOUT SUR LE BETON .FR / LE-BA -BA-DU-BETON/LE-RETRAIT-DU-BETON/ ---- « <https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/nouveau-guide-du-beton-et-de-ses-constituants-9782212102314/> »
- [16] Mémoire -Magister-Touil .pdf
- [17] <https://www.google.com/search?q=La+carbonatation+du+b%C3%A9ton&tbm>
- [18] <https://www.google.com/search?q=La+corrosion+des+armatures>
- [19] infociments.fr/bétons/resistance-auxagents-agressifs
- [20] **Nguyen, Vu Nam** , « : Valorisation de fines et granulats issus de bétons recyclés comme matériaux cimentaires» , Université TOULOUS III Paul Sabatier, 2016
- [21] **Apprendre en ligne Traveux en élèves**
<https://www.owl-ge.ch/travaux-d-eleves/>
- [22] Rapport sur la gestion des déchets solides en Algérie
- [23] **DIA Mouhamadou Bassirou SOUMAH Mouloukou Souleymane**, « : Etat de l'art sur les bétons à base de recyclât: Perspectives pour l'Algérie » , Mmoire de Master , à l'Université 8 Mai 1945 Guelma, Juin 2019
- [24] **Arezki CHENANE**, MA, faculté des sciences économiques et de gestion, « : Analyse des coûts de la gestion des déchets ménagers en Algérie à travers la problématique des décharges publiques : Cas des communes de la wilaya de Tizi-Ouzou», Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. - M.A.T.E : Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement.
- [25] DECHETS INDUSTRIELS Les Guides CGEM Guides d'information.
- [26] https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9chet_inerte
- [27] GUIDE DE BONNES PRATIQUES DE LA GESTION DES DECHETS DANGEREUX
- [28] **BERREDJEM Layachi**, « :Le recyclage des béton de démolition, Solution pour le développement durable, Formulation et comportements physique et mécanique des béton à base de ces recyclés» , Mémoire de Majster , Annaba - Mokhtar Badji U, Annaba 2009.

[29] CHAPITRE 2 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

file:///C:/Users/pc2020/Downloads/CHAPITRE%202.pdf

[30]GMS HEIDELBERG CEMENT Group

https://fr.wikipedia.org/wiki/Granulat#Production_%C3%A0_partir_de_roches_meubles

[31]Chapitre 3 - Granulats, origines et caractéristiques

<http://thesis.univ-biskra.dz/1105/5/Chapitre%2003.pdf>

[32] MINES Douai, « :Valorisation des fines de recyclage des matériaux silicatés (tuiles et briques) », Université de Liège .MINES Douai.

[33] Amina DEBBIH, « : Performances d'un béton autoplacant a base de granulats recycles, laitier et pouzzolane naturelle », Mémoire de Majster , à l'Université SAAD DAHLAB DE BLIDA, avril 2012.

[34] BOURMATTE Nadjoua, « : GRANULATS RECYCLES DE SUBSTITUTION POUR BETONS HYDRAULIQUES BETON DE DEMOLITION - DECHETS DE BRIQUES - DECHETS DE VERRE », DOCTORAT EN SCIENCES En Génie Civil , UNIVERSITE DES FRERES METOURI CONSTANTINE FACULTE DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL N, 12 Mars 2017.

[35] SERIFOU MAMERY, « Béton à base de recyclats : influence du type de recyclats et rôle de la formulation », DOCTORAT, L'UNIVERSITE FELIX HOUPHOUET BOIGNY ET DE L'UNIVERSITE BORDEAUX 1, Le 23 DECEMBRE 2013