



Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de Technologie

Département des Mines et Géologie

Memoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Mines

Option : Valorisation des Ressources Minérales

Présenté par

M^r LABBACI YACINE

M^{elle} HADJAL KAMILIA

Thème

***INFLUENCE DES AGREGATS OBTENUS DES
BETONS DEMOLIS DANS LA FABRICATION
DES BETONS RECYCLES SUR LES
PROPRIETES MECANIQUES DE BETON***

Soutenu le 04 / 07/2017 devant le jury composé de :

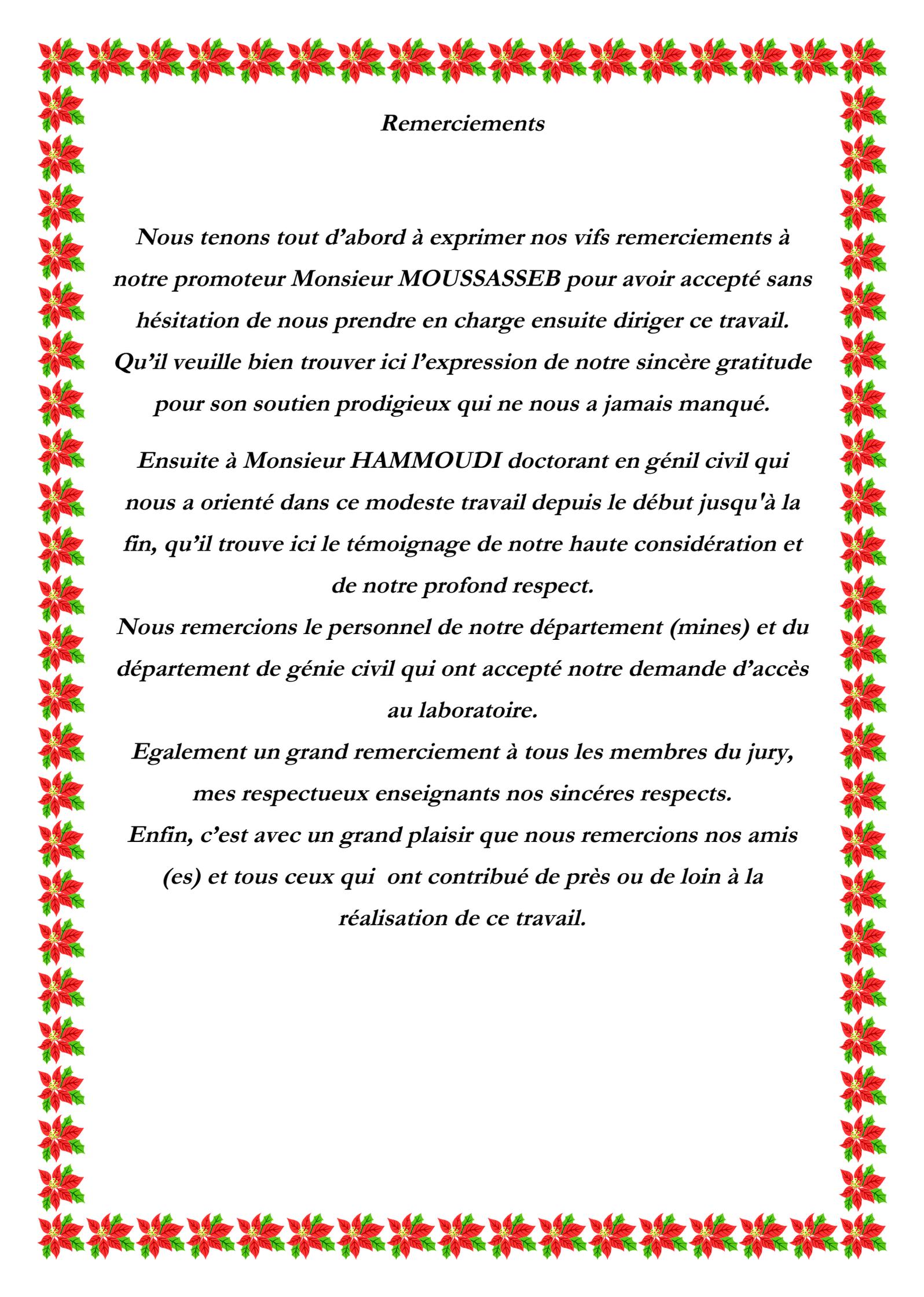
President: Mr BOUDRAHEM F MCA

Promoteur :Mr MOUSSASSEB K PROFESSEUR

Examineur:Mr BOUZEROURA M MCB

Corrigé par :Mr HAMMOUDI A/K DOCTORANT

Année Universitaire : 2016-2017



Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur Monsieur MOUSSASSEB pour avoir accepté sans hésitation de nous prendre en charge ensuite diriger ce travail. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de notre sincère gratitude pour son soutien prodigieux qui ne nous a jamais manqué.

Ensuite à Monsieur HAMMOUDI doctorant en génie civil qui nous a orienté dans ce modeste travail depuis le début jusqu'à la fin, qu'il trouve ici le témoignage de notre haute considération et de notre profond respect.

Nous remercions le personnel de notre département (mines) et du département de génie civil qui ont accepté notre demande d'accès au laboratoire.

Egalement un grand remerciement à tous les membres du jury, mes respectueux enseignants nos sincères respects.

Enfin, c'est avec un grand plaisir que nous remercions nos amis (es) et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



DEDICACE

A ceux qui nous ont tout donné sans rien au retour ;

*A ceux qui nous ont encouragé et soutenu dans nos moments les
plus difficiles ;*

Et ceux à qui nous devons tant ;

*A mes chers parents AMAR et BAYA pour leur amour et leur
support continu ;*

*Que ce travail soit le témoignage sincère et affectueux de notre
profonde reconnaissance pour tout ce que vous avez fait pour
nous.*

Ce travail est dédié aussi à mes très chers grands parents

SALEM et HEDDA ;

Mes frères MUSTAPHA, MOHAMED, AZZEDINE ;

Et mes sœurs Dalila, OUAHIBA, NADIA et SAFIA ;

Cousins et cousines, Oncles et tantes,

Mes amis (es)

LYLA, FARIDA, SABIHA, NADIR et SAAD

Enfin à ma binôme de ce mémoire HADJAL KAMILIA

Et à tous ceux qui nous sont chers.

Labbaci Yacine



DEDICACE

Je Dédie ce Mémoire :

A mes parents « Tassadith et Arab » a qui tout le mérite leur revient pour les sacrifices et le soutien moral et affectif, dont ils ont fait preuve tout au long de mon cursus d'étude.

Toute ma familles HADJAL pour son soutien sans relâche ; leur disponibilité et leur aide durant tout mon cursus universitaire jusqu' aujourd'hui.

A mes chères sœurs

Kahina et salwa et farida A mes chers frères Mohamed Nouredine et Yazid

A mes beaux frères Slimane et Mourad

A mes belles sœurs Tarkia et Aldjia

A mes neveux

Abd Errahim/Syphax /Arab/Dehbia

A ma chère tante Djedjiga

A toute ma famille sans exception.

A mes chères amies :

B.Ouazna/K.lyla / Sonia / Hayet /Amina/Souad/Tinhinane /Khouloud

A mon binôme de ce mémoire LABBACI YACINE

A tous mes collègues de promotion. (2016-2017)

Et à tous ceux qui sont absents dans les lignes mais présents dans le cœur.

Hadjal Kamília

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : exemple des étapes recyclage	7
Figure I-2 : Structure hétérogène du béton.....	22
Figure I-3 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams	27
Figure I-4 : Mesure de l'affaissement.	28
Figure I-5: Béton frais	29
Figure I-6 : les différents granulats	35
Figure II-1: matériels utilisés dans l'analyse granulométrique	51
Figure II-2: Courbe granulométrique de sable	53
Figure II-3: Courbe granulométrique de gravier 3/8.....	54
Figure II-4: Courbe granulométrique de gravier 8/15.....	55
Figure II-5: Courbe granulométrique de gravier 15/25.....	57
Figure II-6: matériels utilisés	60
Figure II-7 : représentation graphique de la courbe de référence de Faury	66
Figure II-8 : courbe de référence de Faury.....	68
Figure II-9 : courbe et pourcentage de chaque matériau	71
Figure II-10 : appareil de mesure de l'affaissement.....	75
Figure II-12 : Les différentes classes de consistance de l'essai d'affaissement.....	76
Figure II-13 : Eprouvette pour mesurer la masse volumique de béton frais	77
Figure II-14 : compression simple d'une éprouvette cubique.....	78
Figure II-15: traction par fondage d'une éprouvette	79
Figure II-16: schéma de mesure de l'ultrason.....	80
Figure II-17: mesure de l'ultrason.....	81
Figure II-18: mesure de module d'élasticité	83
Figure II-19: mesure de retrait	85
Figure III-1 : Variation de l'affaissement en fonction du taux de substitution de GBR	89
Figure III-2 : Variation de la masse volumique en fonction du taux de substitution de GBR. 92	
Figure III-3 : Variation de la compression en fonction du temps pour le dosage C=350 et E/C=0.55	94
Figure III-4 : Variation de la compression en fonction du temps pour le dosage C=300 et E/C=0.6	95
Figure III-5 : Variation de la compression en fonction du temps pour le dosage C=400 et E/C=0.5	96

Figure III-6 : Variation de la compression en fonction du temps pour le dosage C=300 et E/C=0.5	97
Figure III-7 : Variation de la compression en fonction du temps pour le dosage C=300 et E/C=0.55	98
Figure III-8 : Variation de la traction par fondage en fonction du temps pour le dosage C=350 et E/C=0.55.....	100
Figure III-9 : Variation de la traction par fondage en fonction du temps pour le dosage C=400 et E/C=0.5.....	101
Figure III-10 : Variation de la traction par fondage en fonction du temps pour le dosage C=400 et E/C=0.6.....	102
Figure III-11 : Variation de la traction par fondage en fonction du temps pour le dosage C=300 et E/C=0.5.....	103
Figure III-12 : Variation de la traction par fondage en fonction du temps pour le dosage C=300 et E/C=0.6.....	104
Figure III-13 : variation de la vitesse des ondes ultrasonores en fonction de temps.....	106
III-14 : variation de module d'élasticité en fonction de du taux de substitution de GBR	108
Figure III-15 : variation de la masse volumique en fonction de temps	110
Figure III-16 : courbe de retrait pour le taux de substitution en fonction de temps.....	112

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1:Types de béton en fonction de leur destination	23
Tableau I-2 : Types de béton en fonction de leur masse volumique.....	23
Tableau I-3 : Types de béton en fonction de D_{\max}	24
Tableau I-4: Types de béton en fonction de leur consistance	25
Tableau I-5 : Classes de résistance à la compression.....	25
Tableau I-6 : Ajouts cimentaires.	33
Tableau II-1: Analyse granulométrique des granulats de sable	52
Tableau II-2: Analyse granulométrique des granulats de gravier 3/8	53
Tableau II-3: Analyse granulométrique des granulats de gravier 8/15	55
Tableau II-4: Analyse granulométrique des granulats de gravier 15/25	56
Tableau II-5: la masse volumique absolue des granulats secs en kg/m^3	59
Tableau II-6: la masse volumique apparente des granulats secs en kg/m^3	61
Tableau II-7: Analyses chimiques.....	62
Tableau II-8: Composition du clinker	62
Tableau II-9 : Propriétés physiques.....	62
Tableau II-10 : Temps de prise de ciment.....	63
Tableau II-11 : Résistance à la compression de ciment	63
Tableau II-12 : Temps de prise.....	64
Tableau II-13 : Les points de la courbe de référence de Faury	66
Tableau II-14 : Les valeurs des paramètres A et B (NEPOMUCENO 1999).....	67
Tableau II-15 : volume des vides en fonction du diamètre max des granulats	68
Tableau II-16 : Les valeurs des paramètres K et K' [59]	70
Tableau II-17 : volume des constituants de la formulation témoin en m^3	72
Tableau II-18 : volume de chaque constituant en m^3	72
Tableau II-19 : masse de chaque constituant en kg.....	73
Tableau II-20 : masse de gravier de beton recyclé en kg	73
Tableau II-21 : masse de chaque constituant en kg pour les formulations de GBR à 50% ...	74
Tableau II-22: qualité de vitesse de son	80
Tableau III-1 : resultats obtenus de l'essai d'affaissement en (mm).....	88
Tableau III-2 : resultats de la masse volumique de béton frais en (kg/m^3).....	91
Tableau III-3 : resultats obtenus de l'essai de compression simple en (MPa)	93
Tableau III-4 : résultats de l'essai de la traction par fondage en (MPa)	99

Tableau III-5 : resultats obtenus de l'essai de l'ultrason en (m/s)	105
Tableau III-6 : resultats de l'essai de module d'elasticité.....	107
Tableau III-7 : resultats de la masse volumique des éprouvettes cylindres	109
Tableau III-8 : resultats obtenus de l'essai de retrait.....	111

TABLE DES MATIERES

Table des matières	
Liste des tableaux et figures	
Liste des abréviations	
Résumé	
Introduction générale.....	1
I Chapitre I Recherche bibliographique	2
Introduction.....	2
I.1 Les déchets	3
I.1.1 Définition de déchet	3
I.1.2 Origine de la production de déchets.....	3
I.1.3 Différents types de déchets	4
I.1.4 Recyclage des déchets.....	5
I.1.5 Gestion des déchets.....	8
I.1.6 Déchets utilisés comme granulats du béton	14
I.1.7 Réglementation sur les déchets en Algérie	19
I.1.8 Cadre réglementaire	21
I.2 Le béton	21
I.2.1 Définition	21
I.2.2 Types de bétons.....	22
I.2.3 Les différents types de bétons.....	25
I.2.4 Propriétés du béton	26
I.2.5 Les composants du béton	30
I.2.6 Principaux avantages et inconvénients du béton	46
Conclusion.....	47
II Chapitre II Programme expérimental	48
Introduction.....	49
II.1 Propriétés des matériaux utilisés	49
II.1.1 Les granulats	49
II.1.2 Le ciment.....	61
II.1.3 L'eau de gâchage.....	64
II.2 Formulations :.....	64

II.2.1	Formulation de béton témoin	64
II.2.1.1	Application de la méthode de Faury :	67
II.2.1.2	Détermination de volume des vides du béton	68
II.2.1.3	Volume des particules solide.....	69
II.3	Essais :	74
II.3.1	Etat frais	74
II.3.2	Etat durci	77
III	Chapitre III Résultats et discussion	86
	Introduction.....	87
III.1	Etat frais.....	87
III.1.1	Affaissement.....	87
III.1.2	La masse volumique.....	89
III.2	Etat durci.....	92
III.2.1	Compression simple	92
III.2.2	Traction par fondage	97
III.2.3	L'ultrason	103
III.2.4	Module d'élasticité.....	106
III.2.5	La masse volumique.....	108
III.2.6	Retrait	110
	Conclusion générale.....	113
	Références bibliographiques.....	114

Introduction générale

Le béton est le matériau le plus utilisé dans les constructions à travers le monde entier. En effet, sa rapidité de fabrication, sa mise en place, son faible cout et ses performances mécaniques ainsi que sa durabilité ont contribué à accroître son utilisation pour tous les ouvrages, comme immeubles d'habitation, ponts, centrales nucléaires...

La contribution à la valorisation de la fraction des matériaux de démolition et principalement les bétons comme substitut aux granulats naturels, dans la production de nouveaux bétons structurels, dans le but de :

- Contribuer à préserver l'environnement par l'élimination du dépôt sauvage des gravats.
- Répondre à la demande croissante en granulats dans les bétons en substitution des granulats naturels.

Cependant le comportement du béton est fortement modifié par la nature des granulats utilisés.

L'objectif de ce travail s'inscrit dans le cadre de l'étude de l'influence des agrégats de bétons démolis sur les propriétés mécaniques du béton. On s'intéresse plus à la compression simple, traction par fendage, masse volumique, ultrason, affaissement et module d'élasticité du béton à granulats naturels, granulats de béton recyclés et les deux en parallèle.

La première partie de ce travail est une recherche bibliographique sur les déchets et le béton. La deuxième partie est consacrée à l'étude expérimentale. Elle présente une synthèse des travaux réalisés sur les caractéristiques physiques et mécaniques des différents granulats, du ciment et de l'eau comme le module de finesse, les masses volumiques (absolue et apparente). Les analyses granulométriques de chacune des classes granulaires sable 0/3, gravier 3/8, 8/15, 15/25 ont été établies. Et les propriétés mécaniques et physiques des composants du béton (affaissement, masse volumique, compression simple, traction par fendage, ultrason, module d'élasticité et le retrait).

La troisième et dernière partie du mémoire nous mène aux résultats par l'interprétation de l'étude expérimentale menée sur quinze formules de béton par la méthode de Faury nous donne des éclaircissements sur l'influence des agrégats obtenus à partir des bétons démolis dans la fabrication des bétons recyclés sur les propriétés mécaniques du béton.

I Chapitre I

RECHERCHE

BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

Avant de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, l'analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps et évaluer sa traçabilité. Il s'agit donc de «mesurer pour connaître et connaître pour agir». L'approche globale du déchet permettra d'en définir son devenir, à savoir quel type de valorisation choisie.

I.1 Les déchets

I.1.1 Définition de déchet

Le déchet est défini comme « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substances, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destiné à l'abandonne ». [01]

➤ Juridique

Les termes de "bien meuble" et "abandon" font appel à des notions de droit civil appartenant à la terminologie du droit des biens.

Le terme "abandon" pourrait rattacher juridiquement le déchet "bien meuble" à la catégorie des "choses sans maîtres", choses volontairement délaissées par leur propriétaire.

Aussi, derrière tout déchet surtout générateur de nuisances, se trouve une personne physique qui le produit ou le détient et qui en est responsable jusqu'à son élimination finale. Et ce même si le déchet n'est plus physiquement entre ses mains.

➤ Descriptive

Le déchet est caractérisé par son origine, le procédé qui l'a généré et son utilisation au sens d'usage et de consommation. [01]

I.1.2 Origine de la production de déchets

La production des déchets est inéluctable (inévitabile) pour les raisons suivantes :

- **Biologiques** : Tout cycle de vie produit des métabolites (le métabolisme définit l'ensemble des réactions couplées produisant dans les cellules de l'organisme).
- **Chimiques** : Toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière et dès que on veut obtenir un produit à partir de deux autres on en produira un quatrième.
- **Technologiques** : Tout procédé industriel conduit à la production de déchet.
- **Économiques** : Les produits en une durée de vie limitée.

- **Écologiques** : Les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique.
- **Accidentelles** : les inévitables dysfonctionnements des systèmes de production et de consommation sont eux aussi à l'origine de déchets. [01]

I.1.3 Différents types de déchets

I.1.3.1 I.3.1 Déchets ultimes

Tout déchet ménager et assimilé brut issu du ramassage parallèle à la collecte sélective, le refus de tri, le déchet industriel banal issu des ménages et des déchetteries ainsi que les boues de stations d'épuration.

I.1.3.2 Déchets inertes

Déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante ; ne se décompose pas, ne brûle pas, et ne produit aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradable et ne détériore pas d'autres matières avec lesquelles il entre en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine.

Ces déchets sont admissibles dans les installations de stockage et proviennent essentiellement des chantiers de bâtiment et de et de travaux publics ou d'industries de fabrication de matériaux de construction. Ce sont notamment les déchets suivants : Les bétons, les tuiles et les céramiques, les briques, les déchets de verre, les terres, les enrobés bitumeux.

I.1.3.3 Déchets organiques

Les termes suivants recouvrent la même notion : biodéchets ou déchets fermentescibles ou FFOM (fraction fermentescible des ordures ménagères). Il s'agit de :

Déchets végétaux des parcs et jardins (déchets verts)

- Déchets organiques de la cuisine (restes de repas, épluchures, papiers essuie-tout, papier journal, fleurs coupées, marc de café, filtres à café, sachets de thé, coquilles d'œufs, etc....)
- Boues.

I.1.3.4 Déchets industriels banals (DIB)

Ils regroupent l'ensemble des déchets non dangereux produits par les industriels et par les entreprises du commerce, de l'artisanat, des services et de l'administration, de la métallurgie, la peinture, la chimie et la pétrochimie. Ce sont des déchets d'emballage, des déchets d'entretien et les matériels en fin de vie.

I.1.3.5 Déchets dangereux

➤ Déchets industriels spéciaux (DIS)

Ces déchets figurent en raison de leurs propriétés dangereuses, exemple : déchets contenant de l'arsenic, du plomb ; constitués de boues de peinture, d'hydrocarbures ; provenant de l'industrie pétrolière, etc....

➤ Déchets ménagers spéciaux (DMS)

Ce sont les déchets à risque contenus dans les déchets ménagers, tels que les colles, détergents, détachants insecticides, peintures, piles, tubes néon, produits de nettoyage.

[03]

I.1.4 Recyclage des déchets

I.1.4.1 Définition

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles.

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

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

Le **recyclage** apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par **enfouissement** et par **incinération**. Pour lutter contre l'augmentation des déchets, le recyclage est donc nécessaire, mais il doit être inclus dans une démarche plus large. [01]

I.1.4.2 Techniques de recyclage

I.1.4.2.1 Procédés du recyclage

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

- Le recyclage **chimique** utilise une réaction chimique pour traiter les déchets.
- Le recyclage **mécanique** est la transformation des déchets à l'aide d'une machine (concassage, broyage).
- Le recyclage **biologique** consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz.

I.1.4.2.2 La chaîne du recyclage

➤ Collecte de déchets

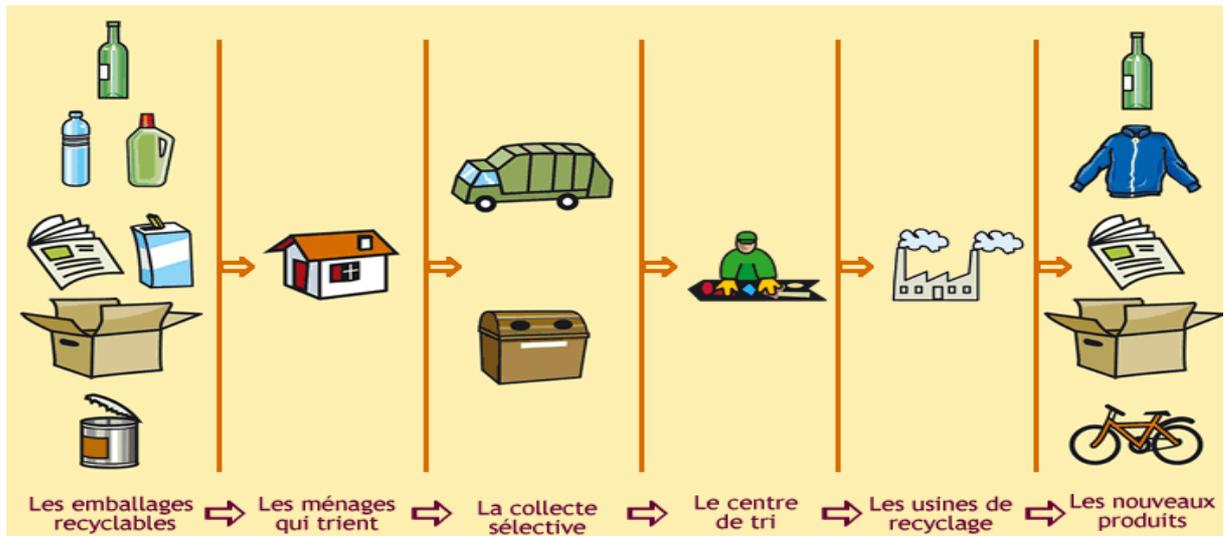
Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis aux centres d'enfouissement techniques. Les déchets collectés pour le recyclage sont à la transformation. La collecte sélective est souvent appelée à tort tri sélectif. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui crée le déchet le trie lui-même. À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Le tri manuel est une de ces opérations.

➤ Transformation

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

➤ Commercialisation et consommation

Une fois transformés, les produits finis issues du recyclage sont utilisés pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs et consommés. Pour être en fin de vie, à nouveau jetés, récupérés et recyclés. [04]



FigureErreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-1 : exemple des étapes de recyclage

I.1.4.3 Impacts du recyclage sur l'environnement

Les bénéfices économiques et environnementaux du recyclage sont considérables : il permet de protéger les ressources, de réduire les déchets, de créer des emplois, de protéger la nature et d'économiser les matières premières.

Le recyclage permet de réduire l'extraction de matières premières :

- l'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer ;
- chaque tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut ;
- le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité ;
- l'aluminium est recyclable à 100% ; 1 kg d'aluminium donne 1 kg d'aluminium (après avoir été fondu).
- chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois ; chaque feuille de papier recyclé fait économiser 11 l d'eau et 2,5 W d'électricité en plus de 15 g de bois.

[05]

I.1.4.4 L'intérêt de recycler le béton

Le procédé de fabrication du ciment réclame une combustion à 1500 degrés, réalisée notamment avec des combustibles fossiles qui émettent des gaz à effet de serre. De plus, la transformation chimique du calcaire en chaux hydraulique émet principalement du CO₂ mais aussi des oxydes d'azote (NO_x) et du dioxyde de soufre SO₂ qui participent à l'acidification de

l'atmosphère. Ainsi, 884 kilogrammes de CO₂ sont émis pour chaque tonne de ciment produite. [01]

I.1.5 Gestion des déchets

I.1.5.1 Définition

La gestion des déchets concerne tous les types de déchets, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux, chacun possédant sa filière spécifique. Les manières de gérer les déchets diffèrent selon les pays (développé ou en voie de développement, dans une ville ou dans une zone rurale), que l'on avait à faire à un particulier, un industriel ou un commerçant. L'accent a été mis, ces dernières décennies, sur la réduction de l'effet des déchets sur la nature et l'environnement et sur leur valorisation. [06]

Le recyclage des déchets solides est une pratique ancienne. Les instruments en métal étaient fondus et retravaillés dès le néolithique. Aujourd'hui, les matériaux recyclables sont récupérés à partir des déchets municipaux grâce à plusieurs techniques telles que le déchiquetage, la séparation magnétique des métaux, le classement par soufflage, qui sépare les morceaux légers des morceaux lourds, le filtrage et le lavage. Une autre méthode de récupération est le procédé de réduction en pulpe : les déchets sont mélangés avec de l'eau et concassés en une boue dans le dépulpeur qui ressemble à une grande poubelle de cuisine. En effet, le recyclage est un procédé par lequel les matériaux qui composent un produit en fin de vie (généralement des déchets industriels ou ménagers) sont réutilisés en tout ou en partie. Pour la plupart des gens dans les pays développés, le recyclage regroupe la récupération et la réutilisation des divers déchets ménagers. Ceux-ci sont collectés et triés en différentes catégories pour que les matières premières qui les composent soient réutilisées (recyclées).

I.1.5.2 Principe de gestion des déchets

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

La hiérarchie des stratégies (règle des trois R) :

- Réduire
- Réutiliser
- Recycler

I.1.5.3 Les techniques de gestion des déchets

I.1.5.3.1 La collecte et transport des déchets

La collecte des déchets ménagers est un service public respectivement récent, remontant du 19^e siècle dans les pays industrialisés. Elle doit se faire fréquemment une ou deux fois par semaines. Elle se fait normalement dans chaque habitation au niveau des villes. Cette collecte concerne aussi l'évacuation des déchets sauvages dans les rues de centres urbains. Elle peut être ouverte ou fermée.

La collecte des déchets verts produits par les ménages peut être effectuée soit :

- Par apport volontaire en déchetterie. Dans cette hypothèse, un broyage préalable est à effectuer avant transport sur la plate-forme de compostage. En effet, le transport des déchets verts bruts constitue une pratique à éviter, compte tenu des difficultés rencontrées pour une réalisation efficace, notamment pour les branchages (densité faible). Le broyage sur chantier ou sur site de dépôt doit donc être privilégié.
- Par collecte séparative en porte à porte avec les collecteurs, par substitution, par addition ou par collecte en bennes bi compartimentées.

La mise en œuvre d'une filière de traitement basée sur le compostage de la fraction fermentescible et la réalisation des objectifs relatifs à la valorisation de la matière des déchets recyclables impose la généralisation des collectes séparatives.

Le choix entre le développement des collectes en porte-à-porte ou la multiplication des points d'apport volontaire constitue l'alternative fondamentale.

Cette collecte assure une efficacité plus grande, en terme quantitatif, du tri sélectif à la source.

Le transport des déchets s'effectue de diverses manières : par camion benne de capacité différente ou variable équipés des dispositifs de tassement (stockage).

I.1.5.3.2 Le tri des déchets

Le tri des déchets ou tri sélectif est une méthode de tri qui permet de séparer les déchets en fonction de leur composition. Il est effectué par les particuliers et les industriels, puis affiné

dans des centres de tri spécialisés. Le tri conditionne la valorisation des déchets: il permet notamment de séparer les déchets recyclables des autres déchets .

I.1.5.3.3 Le traitement des déchets

Le traitement biologique et mécanique (TBM) est une technique qui combine un tri mécanique et un traitement biologique de la partie organique des déchets municipaux.

Le TBM est aussi parfois appelé TMB (Traitement Mécanique et Biologique) cela dépend de l'ordre dans lequel s'effectuent les opérations. [06]

La partie « mécanique » est souvent une étape de tri du vrac. Cela permet de retirer les éléments recyclables du flux de déchets (tels les métaux, plastiques et verre) ou de les traiter de manière à produire un carburant à haute valeur calorifique nommée combustible dérivé des déchets qui peuvent être utilisés dans les fours des cimenteries ou les centrales électriques. La partie « biologique » réfère quant à elle à une fermentation anaérobie ou au compostage. La fermentation anaérobie détruit les éléments biodégradables des déchets pour produire du biogaz et du terreau. Le biogaz peut être utilisé pour créer de l'énergie renouvelable. La partie « biologique » peut aussi faire référence à une étape de compostage. Dans ce cas les composants organiques sont traités par des micro-organismes à l'air libre. Ils détruisent les déchets en les transformant en dioxyde de carbone et en compost. Il n'y a aucune énergie produite par le compostage.

I.1.5.4 Elimination des déchets

Il existe trois techniques pour l'élimination des déchets : l'enfouissement, l'incinération et le traitement biologique des déchets biodégradables. [06]

I.1.5.4.1 L'enfouissement

L'enfouissement se pratique en tranchées. Les décharges contrôlées ne sont utilisées que lorsque l'on dispose d'espace suffisant et de moyens mécanisés [06]

➤ La décharge brute

La décharge est le moyen d'évacuation le plus satisfaisant et le plus économique, mais uniquement si le terrain approprié n'est pas trop éloigné du lieu de production des déchets;

généralement, le ramassage et le transport représentent septante-cinq pour cent du coût total de la gestion des déchets solides. [06]

Certains s'opposent aux décharges quelque soient les conditions ou le lieu, en expliquant qu'au final le stockage en décharge laissera une planète véritablement polluée avec plus aucune fissure ou espace sauvage. Certains futurologues ont déclaré que les décharges seront les « mines du futur » : comme certaines ressources s'appauvrissent, on pourra justifier qu'il est nécessaire de les extraire des décharges où elles avaient été enfouies considérée alors comme non valorisable. [05]

➤ **La décharge contrôlée**

Les déchets bruts sont versés en couche de deux mètres carrés environ. Ils sont compactés et nivelés au moyen d'un engin dont les roues sont équipées de lame. Le risque du milieu environnemental est lié aux paramètres géographiques : le risque de pollution de l'air, de l'eau, du sol et la modification naturelle suite aux dépôts. [01]

I.1.5.4.2 L'incinération

L'incinération est le processus de destruction d'un matériau en le brûlant. Elle est connue pour être une méthode pratique pour se débarrasser des déchets contaminés, comme les déchets médicaux biologiques. [06]

Elle est une technique éprouvée et répandue, en Europe comme dans les pays en voie de développement, même si elle est soumise à controverse pour plusieurs raisons. Les controverses concernent généralement les problèmes environnementaux et sanitaires liés aux incinérateurs qui ont fonctionné dans le passé, avant l'application des normes actuelles.

➤ **Le traitement biologique (compostage et méthanisation)**

Cette partie de l'étude est consacrée à une présentation des domaines de gestion et de traitement des déchets où la biodégradation a une incidence, qu'elle soit recherchée comme dans le cas du compostage ou de la méthanisation.

➤ **Biomasse et déchets organiques**

Les micro-organismes sont le dernier maillon de la chaîne de décomposeurs. A ce sens, leur rôle dans les écosystèmes et les cycles de la matière fondamentale. On appelle biomasse l'ensemble des végétaux et des animaux, ainsi que les déchets organiques qui leurs sont associés. Depuis très longtemps l'homme utilise la biomasse pour se nourrir, se loger, se meubler, se vêtir, se chauffer et cuisiner, et comme source de composés chimiques.

La notion de la biodégradation et de la biodégradabilité implique que le matériau ou le déchet solide soit transformable sous l'action des micro-organismes dans des conditions environnementales données, c'est à dire que la matière qui le constitue puisse être utilisé par les micro-organismes pour leurs permettent de vivre. Le terme biodégradation est généralement réservé aux composés organiques. Par conséquent, seuls les déchets contenant de la matière organique sont potentiellement biodégradables. Pour les minéraux susceptibles de subir des agressions microbiennes on parlera plutôt de bio-détérioration.

➤ **Compostage (traitement biologique aérobie)**

Le compostage est une technique permettant le retour de la matière organique dans le sol lorsqu'on l'utilise comme amendement organique des sols agricoles ou urbains. Les éléments dégradés, simplifiés, peuvent alors entrer à nouveau dans le cycle de la matière et notamment être réutilisés par les plantes. Il s'agit alors de la réintégration de la matière organique dans les cycles biogéochimiques de notre environnement. Comme le montre le schéma suivant, le processus de compostage se décompose en deux grandes étapes une fermentation chaude et une phase de maturation du compost.

Hormis les procédés de traitements mécanique et/ou physico-chimiques divers qui peuvent précéder et suivre le compostage, le processus de biotransformation de la matière organique au cours du compostage peut se décrire de la façon suivante.

La première étape biologique dite de fermentation de la chaude permet de réduire la masse du déchet à traiter.

La seconde étape est la phase de maturation (phase dite froide).

➤ **Méthanisation (traitement biologique anaérobie)**

La méthanisation est un procédé biologique de la digestion anaérobie. La digestion anaérobie est la transformation de la matière organique en méthane (CH₄), eau (H₂O) et gaz carbonique (CO₂) par un écosystème complexe fonctionnant en absence d'oxygène. Du point de vue industrielle, la méthanisation doit donc s'effectuer en système noyé (fosses, cuves fermés...). Pour favoriser l'anaérobiose ainsi que la syntrophie obligatoire entre les différentes populations microbiennes. La méthanisation s'applique donc préférentiellement à des déchets très humides alors il faut procéder à un ajout d'eau ou d'effluents liquides.

Enfin la méthanisation est un processus de digestion anaérobie pouvant répondre à un double objectif de valorisation énergétique par récupération de méthane et de stabilisation des déchets organiques. Le biogaz est utilisé comme combustible et digestat, produit solide de la digestion anaérobie, est utilisable comme amendement sur les terres agricoles.

➤ **L'épandage**

C'est une opération qui consiste à répandre du fumier, des engrais ou des amendements sur les champs en améliorant les sols ou pour la nutrition des cultures et des plantations. Les travaux de **H.P. RUSCH, (1996)** ont confirmé qu'une matière organique ne favorise la croissance des plantes que lorsqu'elle a subi une fermentation aérobie pendant une durée suffisante. Cette durée peut varier de quelques mois à plus de deux ans selon la nature des matières organiques et la forme sous laquelle elles sont apportées (**ANONYME, 1972**).

La gestion de la fertilité n'est possible qu'avec une étroite association agriculture élevage renforcée par l'utilisation des engrais verts pour une agriculture durable qui permet la conservation des terres cultivées. L'érosion des sols s'accélère sur tous les continents et elle concerne entre un cinquième et un tiers des terres cultivées. Elle représente une menace considérable pour l'approvisionnement en nourriture. Déchets utilisés comme granulats du béton

I.1.5.4.3 Laitiers

➤ Laitier de haut fourneau :

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Le laitier est ensuite refroidi lentement à l'air et donne un matériau cristallin et compact connu sous le nom de «laitier refroidi à l'air» ou bien il est refroidi rapidement et traité au moyen de jets d'eau pour obtenir un matériau léger désigné sous le nom de «laitier expansé».

Le laitier refroidi à l'air est approprié comme granulats pour le béton. La comparaison entre la résistance à la compression du béton constitué de granulats de laitier de haut fourneau et celle du béton constitué de gravier et de calcaire concassé indique que le béton de laitier est plus résistant.[07] Les fines du laitier peuvent être utilisées pour remplacer sans inconvénient le sable. La stabilité volumique, la résistance aux sulfates et la résistance à la corrosion par les solutions de chlorure font que le béton de laitier armé convient pour plusieurs applications.

La quantité de laitier expansé produit est bien plus faible que celle de laitier refroidi à l'air. Le laitier expansé est utilisé pour la fabrication du béton léger ayant une masse volumique apparente comprise entre 800 et 950 kg/ m³.

Les blocs de béton de laitier expansé sont utilisés pour la construction de murs porteurs et de murs non porteurs. Le béton de laitier expansé a une excellente résistance au feu et une conductivité thermique d'environ 75% de celle des autres bétons légers.

Le laitier expansé réduit en boulettes a été mis au point au Canada. On prétend que ce procédé de fabrication pollue moins l'air que le procédé normal de fabrication.

I.1.5.5 Sous-produits provenant des centrales thermiques

La combustion du charbon aux fins de la production d'électricité donne plusieurs sous-produits.

Dans les centrales électriques anciennes, les résidus de la combustion de la houille sont désignés sous le nom de «mâchefer». Dans les centrales modernes, on utilise du charbon broyé ou pulvérisé pour la production de vapeur. Les petites particules qui sont transportées par les gaz de combustion sont recueillies par précipitation électrostatique ou par un autre moyen quelconque. Ces particules sont appelées «cendres volantes». Certaines des particules

de cendres forment des scories qui tombent au fond du four. Dans les fourneaux à température élevée, il se produit également des résidus fondus appelés laitier de charbon.

➤ **Mâchefer**

Le mâchefer contient une proportion considérable de charbon non brûlé et d'autres impuretés. Il est utilisé principalement pour la fabrication de blocs de béton. Étant donné que le mâchefer contient des sulfates et des chlorures, il n'est pas recommandé pour le béton armé. Ce matériau risque de devenir de plus en plus rare à mesure que les centrales électriques anciennes passent à la combustion de charbon pulvérisé.

➤ **Scories de sole**

Ces résidus constituent environ 2.5% de la production totale de cendres. On prévoit que plus le charbon sera utilisé, plus on aura de cendres. La composition chimique des scories de combustion américaines est semblable à celle des cendres volantes, sauf que les scories ont une plus forte proportion d'alcalis et de sulfates. Les scories de charbon et le laitier de charbon peuvent être utilisés comme granulats légers pour la fabrication de blocs de béton. [07]

➤ **Cendres volantes**

Les cendres volantes pourraient constituer de très bons granules légers, mais elles ne sont pas beaucoup utilisées. Elles sont préférables par rapport à d'autres granulats légers étant donné qu'elles donnent une combustion plus efficace du fait que le carbone contenu dans les cendres produit la quantité de chaleur nécessaire pour éliminer l'humidité des boulettes et pour amener les boulettes à la température de frittage.

À l'origine, les cendres volantes étaient mélangées avec de l'eau et transformées en boulettes soit dans un tambour ou un cône rotatif, soit par extrusion. L'addition d'une faible quantité d'alcalis permet d'obtenir des boulettes ayant une meilleure résistance aux chocs thermiques et mécaniques. Lorsque le frittage se fait dans des fours à grille mobile, la température atteint environ 1150 à 1200°C et par conséquent, les petites particules de cendres volantes se fusionnent et forment un aggloméré. Cet aggloméré est ensuite brisé en boulettes. Les bétons qui contiennent de tels granules ont une résistance à la compression à 28 jours de l'ordre de 40 MN/m² et une masse volumique d'environ 1100 à 1800 kg/m³. Puisque ces granulats ont une forme adéquate et une bonne résistance, ainsi qu'une absorption d'eau modérée, ils conviennent à la fabrication de blocs de béton léger. [07]

I.1.5.6 Béton récupéré

Le béton constitue presque 75%, en poids, de tous les matériaux de construction. Il s'ensuit donc que la plus grande partie des rebuts de démolition soit du béton. Par ailleurs, les sinistres

fournissent des millions de tonnes de débris de béton. L'épuisement des sources courantes de granulats, les lois plus strictes relatives à la protection de l'environnement et les problèmes posés par la destruction des déchets sont tous des facteurs qui favorisent l'usage du béton récupéré. Les débris de chaussées en béton sont déjà utilisés pour la construction de la couche de fondation de nouvelles chaussées.

La résistance à la compression et le module d'élasticité du béton renfermant des granules recyclés est inférieure à ceux du béton ne contenant que des granulats ordinaires. Les différences sont encore plus grandes à des rapports eau-ciment inférieurs. Le fait de remplacer les fines du béton recyclé par du sable n'améliore pas pour autant la résistance du béton. Le béton qui contient des fines provenant de béton récupéré doit avoir un rapport eau: ciment plus élevé étant donné qu'il contient une plus grande proportion de particules de ciment hydraté.

L'addition de réducteurs d'eau et une teneur en ciment plus élevée augmentent la résistance du béton. Le retrait au séchage du béton constitué de béton récupéré est supérieur de 10 à 30% à celui du béton de référence. L'importance du retrait est fonction de la superficie totale ; dans le cas des granulats recyclés, on s'attend à ce que la superficie soit plus élevée à cause de la présence de pâte de ciment.

La tenue au gel et au dégel du béton contenant des granulats de béton récupéré est semblable à celle d'une éprouvette de béton de référence contenant des granules ordinaires. [07]

I.1.5.7 Déchets provenant de l'exploitation de mines et de carrières

L'exploitation des mines et des carrières produit de grandes quantités de déchets. Les déchets de minerais ne sont pas encore très utilisés étant donné qu'ils proviennent d'endroits très éloignés des régions peuplées. Ils pourraient cependant être utilisés pour la fabrication de briques, et de blocs de béton autoclave ou à granules légers. Un des problèmes relatifs à l'usage de ces déchets découle de la diversité de leur composition.

I.1.5.8 Déchets divers

➤ Déchets de mines de charbon

Dans les opérations d'extraction du charbon, environ la moitié du matériau est rejetée sous forme de déchets. Ceux-ci servent principalement de matériau de remblai pour les routes et peuvent aussi être utilisés comme granulats pour le béton léger. La température de chauffe de ces déchets susceptible de produire le gonflement ou la dilatation doit être contrôlée pour que les gaz s'échappant de l'argile ou de tout autre matériau soient bien emprisonnés dans les

granules ramollies. Tous les déchets ne vont pas nécessairement gonfler. Il est donc important de faire des essais préliminaires pour évaluer la capacité de gonflement des types particuliers de déchets. [07]

➤ **Verre de récupération**

Des millions de tonnes de verre sont récupérées chaque année. En général, la résistance du béton contenant du verre est inférieure à celle du béton contenant du gravier. La résistance est particulièrement faible lorsque du ciment à teneur alcaline élevée est utilisé. Le verre de récupération réagit en présence de granules alcalins. Une dilatation élevée est produite lorsqu'il est en contact avec du ciment à teneur alcaline élevée, ce qui explique la faible résistance des bétons à base de verre. Par exemple, pour une période de 12 mois, la dilatation du béton contenant du gravier est de 0,018%, alors que celle du béton contenant du verre est d'environ 0,3%.

Le verre de récupération peut aussi servir à la fabrication de granulats légers. La production des granules légers expansés d'une masse volumique de 528 kg/m³ par pelletisation d'un mélange de verre de récupération broyé, d'argile et de silicate de sodium chauffé à une température de 850°C. Le béton ainsi obtenu présente une résistance à la compression d'environ 17 MPa après une période de cure à la vapeur de 28 jours. [07]

Le verre récupéré est de composition variée et est souvent contaminé par de la saleté ou d'autres substances qui doivent être éliminées. Une fois broyé, le verre se présente sous forme de particules allongées et sa surface, tant des points de vue chimique que physique, le rend impropre à être utilisé comme granulats pour le béton.

➤ **Pneus usages**

L'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation avant localisation de la microfissure. Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des granulats en caoutchouc a une grande résistance à la fissuration de retrait malgré une amplitude plus élevée de ses variations dimensionnelles de retrait. Malgré les limites en termes de résistance en compression, le composite incorporant des granulats en caoutchouc est donc d'un intérêt évident dans toutes les applications où la lutte contre la fissuration due aux déformations est une priorité. [05]

I.1.5.9 Résidus d'incinérateurs

L'incinération des déchets domestiques et industriels entraîne la production de grandes quantités de résidus solides.

Ces résidus comportent toutefois certaines matières délétères, ce qui compromet leur utilisation en tant que composants du béton. Ainsi, l'aluminium entraîne la dilatation par suite de l'évolution de l'hydrogène, les métaux ferreux font tacher le béton et les sels de plomb et de zinc solubles nuisent à la prise du ciment. La présence de verre entraîne aussi la dilatation des granulats alcalins. [07]

➤ **Boues rouges**

Les boues rouges proviennent de l'extraction de l'alumine de la bauxite. Elles sont de consistance assez plastique pour être formées en boules. Chauffées à des températures de 1260 à 1310°C, elles sont transformées en granulats denses et résistants pouvant entrer dans la composition de bétons de résistances convenables.

La production de granules légers synthétiques à partir de boues rouges peut poser certaines difficultés parce que les boues rouges fondent seulement à des températures élevées et se ramollissent dans une gamme de températures assez restreinte. De plus, les gaz émis pendant le ramollissement ne sont pas toujours suffisants pour produire le gonflement. Dans certains cas, des granulats légers ont été fabriqués avec des additifs tels les cendres volantes, le laitier de haut fourneau et la pierre ponce.

➤ **Argile cuite**

Selon la méthode utilisée pour la fabrication et la manipulation des briques, il y a toujours un certain pourcentage de briques cassées, trop cuites ou mal cuites. Les briques concassées et bien cuites conviennent bien à la fabrication des blocs de béton. Le béton contenant de tels granulats est plus perméable et si les briques contiennent des sels solubles, il peut y avoir corrosion et efflorescence dans le béton. Le béton contenant de l'argile cuite comporte une résistance au feu beaucoup plus élevée que celle du béton à base de gravier naturel. [07]

➤ **Sciure de bois**

Le béton à base de sciure de bois est très peu utilisé à cause de sa faible résistance. Le béton contenant beaucoup de sciure de bois est inflammable. La sciure provenant du chêne rouge, du sapin de Douglas, du peuplier du Canada, de l'érable, du bouleau ou du cèdre rouge donne des bétons à faible résistance alors que la sciure d'épinette ou de pin rouge donne des bétons dont les propriétés sont acceptables. [07]

I.1.6 Réglementation sur les déchets en Algérie

A partir de 2001, le gouvernement Algérien a défini une stratégie nationale en matière de protection de l'environnement qui s'est traduite par le plan national d'action pour l'environnement et le développement durable (PNAE-DD).

Sur le volet déchet, le PNAE-DD s'est décliné en deux programmes :

- Progdem : Programme de gestion des déchets solides municipaux,
- Pnagdes : Plan national de gestion des déchets spéciaux.

A ce titre, le gouvernement s'est lancé sur tout un programme de mise à niveau notamment par :

- ❖ Renforcement de l'aspect réglementaire : promulgation de la loi 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
- ❖ Renforcement institutionnel :
 - par la création d'institutions dédiées à toutes les thématiques environnementales. C'est à ce titre que l'Agence Nationale des Déchets a été créé. Sa mission principale étant la promotion de la gestion intégrée des déchets.
 - Services déconcentrés : 48 directions de l'environnement de wilayas et inspections régionales.
- ❖ Introduction de la fiscalité environnementale : notamment la taxe d'enlèvement des ordures ménagères (TEOM) et la taxe sur les activités polluantes et dangereuses (TAPD).

L'Algérie, à travers le Progdem et le Pnagdes, a pour objectif de développer à terme une gestion intégrée des déchets. Pour ce faire :

- 135 centres d'enfouissement techniques pour DMA et DI ont été réalisés ou sont en cours de réalisation.
- La plus grande majorité des communes se sont dotées de schémas directeurs pour la gestion des DMA.
- Les grandes décharges publiques ont été éradiquées ou sont en cours de réhabilitation.
- Les pouvoirs publics incitent au tri et au recyclage à travers des actions pilotes de tri à la source.
- Aussi, des unités de tri et de déchetteries ont été réalisées.

- Un système public de reprise et de traitement des déchets d’emballages (Eco-Jem) a été instauré.

Après avoir fait face à une situation d’urgence de gestion des déchets, les pouvoirs publics passent vers une phase qualitative qui consiste en la prévention et au recyclage/valorisation.

La prévention et le recyclage/valorisation sont les deux axes majeurs de la gestion des déchets qui vont permettre à l’Algérie de réduire sa production des GES.

Néanmoins, il est proposé d’instaurer une approche participative avec tous les acteurs concernés pour l’élaboration d’un plan d’action en vue d’identifier les actions prioritaires à mettre en œuvre. [06]

I.1.7 Cadre réglementaire

- Loi N 01-19 du 12 Décembre 2001, relative à la gestion, au contrôle et l’élimination des déchets.
- Loi N 03-10 du 19 juillet 2003, relative la protection de l’environnement dans le cadre du développement durable.
- Décret N 02-372 du 11 novembre 2002, relatif aux déchets d’emballages.
- Décret N 02-175 du 20 mai 2002, portant création, organisation et fonctionnement de l’Agence Nationale des Déchets.

Décret N 04-199 du 19 juillet 2004, fixant les modalités de création, organisation, fonctionnement et de financement du système public de reprise et de valorisation des déchets d’emballages Eco-Jem. [06]

I.2 Le béton

Introduction

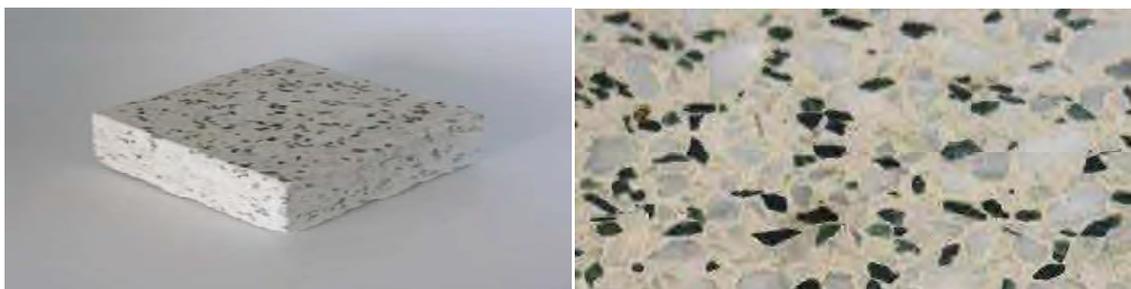
Le béton est un matériau composite. Il est constitué de plusieurs matériaux différents, qui deviennent homogènes entre eux, soit à la mise en œuvre (béton frais), soit après durcissement (béton durci). Ses composants sont déterminés dans des proportions étudiées afin d’obtenir des propriétés souhaitées telles que la résistance mécanique, la consistance, la durabilité, l’aspect architectural (formes, teintes, textures), la résistance au feu, l’isolation thermique et phonique, et ceci en utilisant des méthodes spécialisées dites « méthodes de formulation du béton »

I.2.1 Définition

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde pour les réalisations des ouvrages de génie civil. Il est caractérisé essentiellement par une bonne résistance à la compression. Ses inconvénients résident dans sa mauvaise résistance à la traction ainsi que sa masse volumique relativement élevée.

La structure du béton est composée de deux principaux constituants : les granulats et le ciment :

- Les granulats représentent en moyenne 70% à 80% du volume du béton, on les trouve sous forme de sables, de graviers ou de cailloux. Ils sont considérés comme un renfort mécanique, et ils sont traités comme des inclusions. Les granulats sont obtenus à partir des carrières de roches massives, de gisements alluvionnaires et artificiels tels que les laitiers expansés, les argiles expansées et les schistes expansés. Ils conditionnent la compacité du matériau ainsi que ses caractéristiques mécaniques.
- La matrice liante enrobe et lie les granulats entre eux. Elle est formée d'une structure complexe poreuse source d'échanges internes et externes. Il existe plusieurs types de matrice parmi lesquelles on trouve : la pâte de ciment, la résine et l'hydrocarbure. Un examen plus approfondi, montre que la structure du béton présente un caractère hétérogène sur un domaine de dimensions extrêmement étendu. La figure 1 montre la texture d'un même matériau granulaire à différents grossissements. [08]



a) Image originale

b) Détail agrandi.

Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-2 : **Structure hétérogène du béton. [08]**

I.2.2 Types de bétons

La classification des bétons se fait suivant différents critères, comme :

I.2.2.1 Leur destination

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-1: **Types de béton en fonction de leur destination [09]**

Types de béton	Destination
Bétons compactés au rouleau	bétons spéciaux pour réaliser certain type de barrage (barrages poids).
Bétons projetés	Pour réaliser les travaux miniers et souterrains, pour la réparation des ouvrages détériorés
Bétons de construction	destinés à la construction courante des bâtiments ou des ouvrages de faible importance
Bétons autonivelants (autoplaçants)	Pour les ouvrages présentant un ferrailage vraiment dense ou d'une forme variable difficile à mouler (courbures multiples).
Bétons coulables sous l'eau	Pour la construction ou la réparation des barrages, les structures portuaires, les tunnels
Bétons fibrés	Pour les dallages (fibres métalliques), piste d'aéroport ou des pièces techniques telles que les tuyaux, gaines (fibres de verre).

I.2.2.2 Leur masse volumique

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-2 : **Types de béton en fonction de leur masse volumique [10]**

Types de béton	Béton léger	Béton normal	Béton lourd
Masse volumique (kg/m³)	De 800 à 2000	De 2000 à 2600	Supérieure à 2600

I.2.2.3 Leur granularité

La classification se fait en fonction de la dimension maximale des granulats D_{\max} :

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-3 : **Types de béton en fonction de D_{\max}** [11]

Classes du béton	Béton fin	Béton moyen	Béton gros
Dimension maximale des granulats	$8 \leq$	$16 \leq D_{\max} < 31.5$	$31.5 \leq D_{\max} <$
D_{\max}	$D_{\max} < 16\text{mm}$	mm.	63

I.2.2.4 Leur consistance (cône d'Abrams)

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-4: **Types de béton en fonction de leur consistance** [12]

Affaissement (Aff.) en cm	Classe des bétons
0 à 2	Très ferme
3 à 5	ferme
6 à 9	plastique
10 à 13	mou
>14	Très mou

I.2.2.5 Leur résistance à la compression sur cylindre f_{ck}

La norme EN-206 classe les bétons en fonction de leur résistance caractéristique à la compression conformément au tableau 5. Dans ce tableau f_{ck-cyl} est la résistance caractéristique mesurée sur cylindres (c'est cette résistance qui correspond à la résistance caractéristique à laquelle il est fait référence dans l'Eurocode 2) ; $f_{ck-cube}$ est la résistance caractéristique mesurée sur cubes.

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-5 : **Classes de résistance à la compression** [13]

Classes	C 8/10	C 12/15	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 45/55
f_{ck-cyl} (N/mm ²)	8	12	16	20	25	30	35	45
$f_{ck-cube}$ (N/mm ²)	10	15	20	25	30	37	45	55

I.2.3 Les différents types de bétons

Les types de béton autres que le béton classique sont :

I.2.3.1 Bétons à hautes performances (BHP)

Un béton à hautes performances se définit par sa durabilité et sa résistance en compression à 28 jours (supérieure à 60 Mpa lorsqu'elle est mesurée sur cylindre) ou son rapport eau/liant inférieur à 0.40, pour obtenir un BHP ? Il est préférable de disposer de granulats de bonne qualité.

I.2.3.2 Bétons Auto-Plaçant (BAP)

Apparus au début des années 90 au Japon. Ces matériaux ont pour particularité d'être mis en place par le seul effet de la gravité, sans vibration ni compactage mécanique. En termes de composition, et par rapport à des bétons classiques, les BAP se caractérisent par un plus faible rapport gravillon/sable et un dosage en liant qui peut atteindre 450Kg/m³.

I.2.3.3 Bétons projetés

Les bétons projetés sont surtout utilisés en réparation, et pour des ouvrages provisoires, par exemple dans la construction des tunnels. Ils peuvent se mettre en œuvre par voie sèche, ou par voie humide. Dans le premier cas, le mélange de granulats et de ciment est acheminé dans une lance à air comprimé, et l'eau est introduire à la sortie de la lance. Le mouillage s'effectue pendant la projection. Le béton projeté par voie humide est fabriqué dans un malaxeur classique, et pompé dans une lance à projection

I.2.3.4 Bétons légers

Les bétons légers de structure présentent la même constitution que les bétons de densité normale, à la seule différence de la nature du gravillon. Celui-ci est un gravillon léger, soit d'origine naturelle (comme les pierres ponce), soit, le plus souvent, d'origine artificielle

(comme l'argile expansé). On peut également créer des vides par une réaction provoquant un dégagement gazeux ; c'est le cas du béton cellulaire.

I.2.3.5 Béton de fibres métalliques

On les fabrique en les incorporant un certain pourcentage volumique (0.4 à 1% environ) de fibres métallique, généralement en acier.

Les fibres permettent alors une meilleure répartition et une ouverture plus faible de la fissuration, ainsi qu'une augmentation de la résistance en flexion des dalles et des poutres.

I.2.4 Propriétés du béton

Le béton doit être considéré sous deux aspects :

- **le béton frais** : mélange de matériaux solides en suspension dans l'eau, se trouve en état foisonné à la sortie des appareils de malaxage et en état compacté après sa mise en œuvre dans son coffrage ;
- **le béton durci** : solide dont les propriétés de résistance mécanique et de durabilité s'acquièrent au cours du déroulement de réactions physico-chimiques entre ses constituants, d'une durée de quelques jours à quelques semaines

I.2.4.1 Propriétés du béton frais

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui est la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage complet du ferrailage[33]. L'ouvrabilité doit être telle que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité. Elle est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais. Dans le cas de béton ordinaire elle est principalement influencée par :

- La nature et le dosage du liant.
- La forme des granulats.
- La granularité et la granulométrie.
- Le dosage en eau.

L'ouvrabilité peut s'apprécier de diverses façons et en particulier par des mesures de plasticité. Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. Nous n'en citerons que quelques-uns, les plus couramment utilisés dans la pratique.

I.2.4.1.1 Affaissement au cône d'Abrams

Cet essai consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais où ce dernier est compacté dans un moule ayant la forme d'un tronc de cône. Lorsque le cône est soulevé verticalement, l'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance.

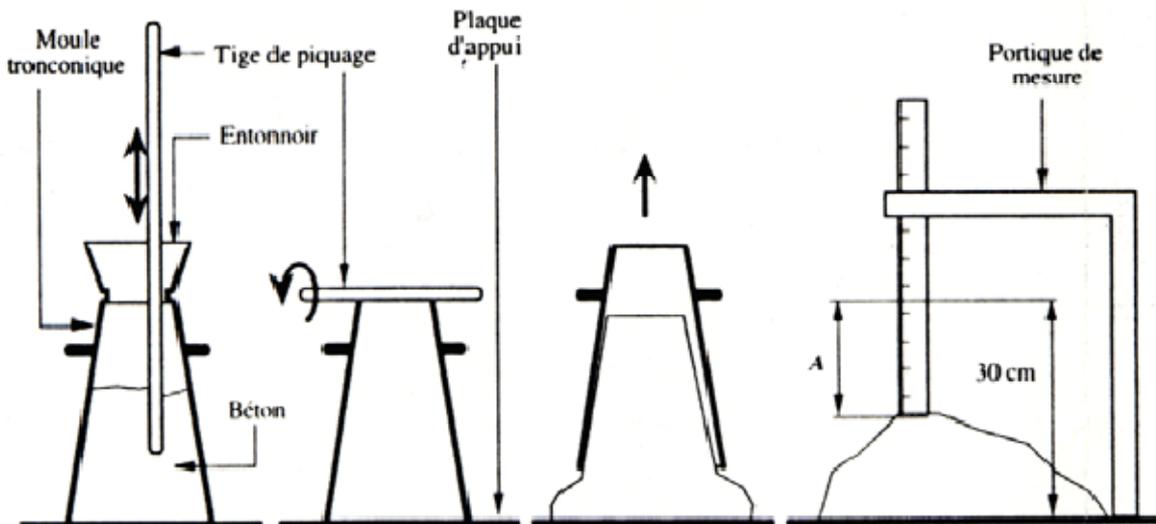


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-3 : **Essai d'affaissement au cône d'Abrams [13]**



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-4 : **Mesure de l'affaissement. [13]**

I.2.4.1.2 La masse volumique du béton frais

On mesure la masse volumique du béton frais à l'aide d'un récipient étanche à l'eau et suffisamment rigide. Le béton est mis en place dans le récipient et vibré à l'aide d'une aiguille vibrante, une table vibrante ou un serrage manuel en utilisant une barre ou tige de piquage,

après un arasement approprié. Le récipient et son contenu doivent être pesés afin de déterminer la masse volumique qui sera calculée en utilisant la formule suivante :

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

D : est la masse volumique du béton frais (kg/m^3).

m₁ : est la masse du récipient (kg).

m₂ : est la masse du récipient plus la masse du béton contenu dans le récipient (kg).

V : est le volume du récipient en mètre cube (m^3)

La masse volumique du béton est arrondie aux 10 kg/m^3 les plus proches



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-5: **Béton frais**

[13]

I.2.4.2 Propriétés du béton durci

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois, voire des années.

- La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité.
- Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci.
- Les phénomènes de retrait sont une caractéristique prévisible dans l'évolution du béton.
- Les caractéristiques de déformations sous charge du béton sont connues et peuvent être mesurées.

I.2.4.2.1 Résistance à la compression

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression uni-axiale a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale

de la qualité d'un béton, puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée. De plus, la résistance du béton en compression est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité.

Un béton est défini par la valeur de sa résistance caractéristique à la compression à 28 jours, f_{c28} . La résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale d'une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur. Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression, La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée.

La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante :

$$F_c = \frac{f}{A_c}$$

Où :

- **f_c** : résistance en compression, exprimée en méga pascal (Newton par millimètres carrés) ;
- **F** : charge maximale, exprimée en Newtons ;
- **A_c** : l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée, calculée à partir de la dimension nominale de l'éprouvette.

La résistance à la compression doit être exprimée à 0,5 MPa (N/mm^2) près.

I.2.4.2.2 Résistance à la traction par flexion

Des éprouvettes prismatiques de dimensions 7 x 7 x 28 cm sont soumises à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale enregistrée au cours de l'essai est notée et la résistance à la flexion est calculée.

$$R = \frac{F}{S}$$

I.2.5 Les composants du béton

La composition des bétons a pour but de déterminer les proportions des divers constituants (ciment, sable, gravier, eau) conduisant à des bétons dont l'ouvrabilité est compatible avec les moyens de mise en œuvre et qui possédera, après durcissement, les meilleures caractéristiques (étanchéité, résistance, faible retrait ...) [14]

Les compositions de béton sont :

I.2.5.1 Le ciment

Introduction

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté de 1450 à 1550 °C, température de fusion.

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau. Cette hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium, transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau.

I.2.5.1.1 Principe de fabrication ciment portland

La fabrication de ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes :

- préparation du cru
- cuisson
- broyage et conditionnement

Il existe 4 méthodes de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement du matériau :

- ☞ Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne).
- ☞ Fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide).
- ☞ Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée).
- ☞ Fabrication du ciment par voie semi-échéec (en partant de la voie sèche).

I.2.5.1.2 Le composé de base des ciments

Le composé de base des ciments actuels est un mélange de :

Silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃), et l'oxyde de fer (Fe₂O₃).

La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles.

Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier Fe₂O₃, l'oxyde ferrique.

I.2.5.1.3 Le principe de la fabrication du ciment

Calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker.

Un mélange d'argile et de calcaire est chauffé. Au début, on provoque le départ de l'eau de mouillage, puis au-delà de 100 °C, le départ d'eau d'avantage liée. A partir de 400°C commence la composition en gaz carbonique (CO₂) et en chaux (CaO), du calcaire qui est le carbonate de calcium (CaCO₃).

Le mélange est porté à 1450-1550 °C, température de fusion. Le liquide ainsi obtenu permet l'obtention des différentes réactions. On suppose que les composants du ciment sont formés de la façon suivante : une partie de CaO est retenue par Al₂O₃ et Fe₂O₃ en formant une masse liquide. SiO₂ et CaO restants, réagissent pour donner le silicate bicalcique dont une partie se transforme en silicate tricalcique dans la mesure où il reste encore du CaO non combiné.

I.2.5.1.4 Constituants principaux et additions

❖ Constituants du clinker

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker sont :

- Le silicate tricalcique 3CaO.SiO₂ (C₃S) (50-70% du clinker).
- Le silicate bicalcique 2CaO.SiO₂ (C₂S) (10-30% du clinker).
- L'aluminate tricalcique 3CaO.Al₂O₃ (C₃A) (2-15% du clinker).
- L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tétracalcique) 4CaOAl₂O₃.Fe₂O₃ (C4AF) (5-15% du clinker).

Le clinker contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis (Na₂O, K₂O), de la magnésie (MgO), et diverses traces de métaux. La teneur en alcalis et magnésie doit rester faible, car ces matières peuvent influencer défavorablement la stabilité du ciment durci. A l'aide du microscope, on peut distinguer la structure minéralogique du clinker en trois phases, auxquelles les chercheurs donnent les noms suivants :

- A = alite (phase cristallisée), se présente sous la forme de cristaux polygonaux assez grands (grains anguleux foncés) de l'ordre de 50μ.
- B = bélite (phase vitreuse), se trouve sous forme impure dans le clinker (grains légèrement arrondis et rayés).
- C = célite (phase vitreuse légèrement foncée et claire), se trouve dans le clinker sous forme impure et de phase vitreuse.

❖ Les autres constituants des ciments

Le ciment portland est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse, destiné à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute d'autres constituants associés au clinker pour leurs caractéristiques chimiques ou physiques spécifiques. Les constituants les plus utilisés sont :

Tableau **Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.**-6 : Ajouts cimentaires.

Constituants	Observations
Calcaires	- considérés comme les constituants principaux du ciment. Ils doivent présenter une proportion de carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75% en masse.
Laitier granulé de haut fourneau	- sous-produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques, obtenu par refroidissement rapide (trempe) de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.
Cendres volantes (V ou W)	- produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques. On distingue : Les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés pouzzolaniques et les cendres volantes calciques (W)
Schistes calcinés	- schistes portés à une température d'environ 800 °C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques.
Fumée de silice:	- sous-produit de l'industrie du silicium et de ses alliages. - formées de particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de 0,1 μm). Elles ont des propriétés pouzzolaniques.
Fillers:	- "constituants secondaires" des ciments, donc ils ne peuvent jamais excéder 5 % en masse dans la composition du ciment. - matières minérales, naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau).

I.2.5.1.5 Catégories de ciment

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale.

❖ En fonction de leur composition

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NFP15-301 et ENV 197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse):

- CEM I: Ciment Portland (CPA)
- CEM II: Ciment portland composé (CPJ),
- CEM III: Ciment de haut fourneau (CHF),
- CEM IV: Ciment pouzzolanique(CPZ),
- CEM V: Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

❖ En fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours ; des sous classes “R” sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées.

I.2.5.2 Les granulats

I.2.5.2.1 Définition des granulats

Le granulat 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 :

- fillers ;
- sablons ;
- sables ;
- graves ;
- gravillons ;
- ballast ;
- 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.

La nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi, chaque roche possédant des caractéristiques spécifiques en termes de résistance mécanique, de tenue au gel et des propriétés physico-chimiques. Les granulats les plus usuels pour la fabrication des mortiers et des bétons sont élaborés à partir de roches d'origine alluvionnaire (granulats roulés ou semi-concassés) ou à partir de roches massives (granulats concassés).

La taille d'un granulat répond à des critères granulométriques précis. Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis.

Le granulat est désigné par le couple d/D avec :

d: dimension inférieure du granulat

D: dimension supérieure du granulat



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-6 : les différents granulats [14]

I.2.5.2.2 Différents types de granulats

Un granulat, en fonction de sa nature et de son origine, peut être...

- **Naturel** : d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).
- **Artificiel** : d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.
- **Recyclé** : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.

On peut citer plusieurs types en fonction de plusieurs critères concernant le granulat lui-même.

I.2.5.2.2.1 En fonction de leur masse volumique réelle :

➤ Granulats légers

Ce sont les granulats dont la masse volumique réelle est inférieure à 2 t/m^3 , comme les argiles, les schistes, les laitiers expansés ou encore les pouzzolanes. Ils sont destinés à la préparation des bétons légers.

➤ Granulats courants

Ce sont les granulats dont la masse volumique réelle est entre 2 et 3 t/m^3 comme les matériaux naturels, alluvionnaires (silex, calcaire dur silico-calcaire) de densité entre 2.5 et 2.7, éruptifs ou sédimentaires (grés, porphyres, diorite, basaltes, ...etc.) de densité entre 2.6 et 3.

➤ Granulats lourds

Ce sont les granulats dont la masse volumique réelle est supérieure à 3 t/m^3 . Ils sont essentiellement employés pour la confection des bétons lourds utilisés pour construire des ouvrages nécessitant une protection biologique contre le rayonnement. On utilise en particulier les barytines, les magnétites qui ont une densité entre 3.4 et 5.1, aussi les riblons et les grenailles de fonte qui ont une densité entre 7.6 et 7.8.

I.2.5.2.2.2 En fonction de leur origine

➤ Les granulats naturels

Ce sont des matériaux purement naturels, ne subissant aucun traitement autre que mécanique tel qu'extraction, concassage, broyage, criblage, lavage...etc.

➤ Les granulats artificiels

Ce sont les granulats qui proviennent de la transformation thermique de roches, de minerais ou de sous-produits industriels (laitiers, scories), ou encore de la démolition d'ouvrages ou de bâtiments divers en béton souvent appelés granulats recyclés.

I.2.5.2.2.3 En fonction de la forme de leurs grains

➤ Les granulats concassés

Ce sont des granulats provenant du concassage des pierres et dont les grains ont une certaine angularité. Ils sont issus du concassage des roches de porphyres, grés, calcaires, quartzites, de galets concassés et de laitiers.

➤ **Les granulats roulés**

Ils représentent les granulats ayant subis une altération naturelle mécanique due à l'eau, au vent, à l'usure réciproque des granulats lors de leur transportation dans la nature. Il résulte que plus de 90% des surfaces des grains sont arrondies et de provenance alluvionnaire.

I.2.5.2.3 Caractéristiques

Les granulats sont caractérisés par des spécificités qu'ils doivent satisfaire pour réaliser une bonne utilisation dans différents domaines. Ces spécifications dites caractéristiques des granulats sont bornées par des normes et des exigences. Elles servent à prendre en compte l'utilisation, la fiabilité, l'économie en se basant sur les recherches et les expériences scientifiques. On distingue :

I.2.5.2.3.1 Caractéristiques intrinsèques

Ce sont les propriétés appartenant au granulat lui-même et qui sont inhérentes au temps. Elles sont liées à l'origine des roches ou des produits constituant le granulat. Parmi ces caractéristiques on cite les suivantes :

I.2.5.2.3.2 Caractéristiques physiques et mécaniques

➤ **Résistance à l'usure des gravillons**

Elle est déterminée par l'essai Micro-Deval en présence d'eau ou à sec. Cet essai consiste à reproduire dans un cylindre en rotation des phénomènes d'usure par frottement.

Cette résistance est caractérisée par le coefficient Micro-Deval qui représente la proportion d'éléments fins produits pendant l'essai (éléments inférieurs à 1.6mm). Plus le coefficient MD est faible, plus la résistance à l'usure des gravillons, est élevée. [15]

On peut aussi exploiter un autre coefficient pour évaluer la résistance à l'usure des gravillons et aussi des cailloux, c'est le coefficient Deval " D ", il est déterminée à partir d'un essai Deval qui a pour objet de définir la résistance à l'usure des gravillons et des cailloux par frottement mutuel dans un cylindre à sec ou en présence d'eau.

Il est donné par la formule suivante :

$$MDE = \frac{500 - m}{5}$$

Où m : la masse des éléments fins inférieurs à 1.6 mm produits lors de l'essai

➤ **Résistance à la fragmentation des gravillons**

Elle est déterminée par le coefficient Los-Angeles. Le principe de cet essai est la détermination du coefficient dit " Los-Angeles " pour évaluer la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques.

Il consiste à faire tourner les granulats dans un tambour fermé contenant des boulets métalliques. Le coefficient LA représente la proportion d'éléments fins produits au cours de l'essai. Plus le coefficient, est faible plus la résistance des gravillons, est élevée.

A l'aide d'un autre coefficient on peut également évaluer la résistance d'un granulat à la fragmentation, c'est le coefficient de fragmentation dynamique.

Il est déterminé à partir d'un essai qui consiste à mesurer la quantité d'éléments fins inférieurs à 1.6 mm produits en soumettant le matériau aux chocs d'une masse normalisée. La formule qui sert à calculer le coefficient de fragmentation dynamique est la même que celle du coefficient Los-Angeles.

➤ **Résistance au polissage des gravillons**

Cette résistance est évaluée à partir d'un coefficient de polissage accéléré des gravillons, ce dernier se calcule à partir d'un essai qui fournit une mesure relative caractérisant l'aptitude des gravillons à se polir. Plus le coefficient de polissage accéléré est élevé, plus la résistance au polissage est importante. [16]

➤ **Résistance des gravillons au gel-dégel**

La vulnérabilité du granulat dans le béton à l'action du gel-dégel est en fonction de sa nature, de son utilisation, des conditions climatiques et de la formulation du béton (utilisation par exemple d'air entraîné). Concernant le granulat lui-même la vulnérabilité est en fonction de trois critères, l'absorption d'eau, la résistance à la fragmentation après l'essai gel-dégel et sa sensibilité au gel. [17]

➤ **La masse volumique**

On appelle masse volumique d'un corps, la masse de l'unité de volume de ce corps. On distingue :

- ✓ Masse volumique apparente : masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.
- ✓ Masse volumique absolue : masse de l'unité de volume d'un corps sans tenir compte des vides qu'elle contient.
- ✓ Masse volumique réelle : masse de l'unité de volume absolue de corps, c'est-à-dire de la matière qui constitue le corps sans tenir compte du volume des vides intergranulaires.

➤ **La porosité**

La porosité est le rapport du volume des vides contenus dans les grains au volume des grains, exprimé en pourcentage. Elle influe sur l'aptitude de résister aux sollicitations mécaniques (compression statique, usure, abrasion...etc.), chimiques (attaque en ions solvants) et surtout à la tenue au gel-dégel ; c'est pour ça que la porosité est un critère important et sert à améliorer les performances des bétons notamment leur durabilité.

➤ **Teneur en eau**

Elle est égale au rapport de la masse d'eau contenue dans l'échantillon sur la masse sèche de l'échantillon, exprimée en pourcentage. La teneur en eau est un facteur important pour adapter les proportions des constituants lors de la formulation des bétons afin d'éviter le phénomène de foisonnement ou la perturbation de la consistance des bétons.

➤ **Coefficient d'absorption d'eau**

Il est défini comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon entraînée par imbibition partielle en eau à la masse de matériau sec.

I.2.5.2.3.3 Caractéristiques chimiques et diverses

➤ **Réaction alcali-silice (alcali-réaction)**

Sous ce terme se regroupent toutes les réactions qui peuvent se produire entre les granulats du béton et les alcalins de la pâte de ciment. [18] Les granulats doivent être inertes vis à vis de l'alcali-réaction lorsqu'il y a un risque identifié pour l'ouvrage ou un élément d'ouvrage en béton. Il doit être possible de connaître la teneur en alcalins actifs afin de pouvoir établir un bilan pour une formulation de béton et déterminer la présence de granulats partiellement réactifs ou non qualifiés. Les désordres occasionnés par l'alcali-réaction se présentent sous forme de faiçage ou d'éclatement du béton. [19]

➤ **Teneur en chlorure**

Les ions de chlorure modifient la cinétique d'hydratation du liant et favorisent la corrosion des armatures ou des câbles de précontrainte. Les normes fixent les limites de la teneur en chlorure des bétons en différenciant les bétons non armés, armés, ou précontraints. Dans le

cas où la valeur de la teneur en chlorure dépasse la limite recommandée, le producteur doit communiquer cette valeur pour permettre l'établissement du bilan des chlorures dans la formulation des bétons. [20]

➤ **Friabilité des sables**

La friabilité des sables est une mesure globale d'homogénéité appliquée aux sables alluvionnaires et aux produits de démolition. Une valeur élevée indique une forte proportion d'éléments tendres ou friables nuisibles à l'aspect des parements et à la durabilité des bétons surtout des dallages et des chaussées.

Le coefficient de friabilité des sables est le rapport de la masse m , des éléments inférieurs à 0.1 mm, produits au cours de l'essai de fragmentation du sable dans un cylindre en rotation à l'aide d'une charge et en présence d'eau, sur la masse de matériau soumis à l'essai. Le rapport est exprimé en pourcentage. [20]

✓ **Teneur en matière organique**

La présence de la matière organique peut perturber la prise des bétons, faire chuter les résistances surtout au jeune âge et donner lieu à des taches sur les parements. Pour les sables un test calorimétrique est réalisé et pour les sables non conformes, on fait des essais complémentaires : comparatifs de résistance sur mortiers.

✓ **Teneur en sulfates (SO_3)**

Les sulfates solubles (gypse, plâtre) en faible proportion peuvent perturber la prise et modifier les effets des adjuvants (réducteur d'eau). Cette action dépend en fait de la quantité de SO_3 présente dans le béton.

✓ **Teneur en soufre**

Les sulfures (pyrites) présents dans certains granulats (calcaires primaires notamment) peuvent s'oxyder et se transformer en sulfates pouvant donner lieu à des réactions expansives (formation d'ettringite) avec le ciment. Cette oxydation s'accompagne souvent de la production de taches de rouille sur les parements, et lorsque les grains de pyrites sont assez gros (millimétriques), on obtient des pustules et des éclatements.

✓ **Résistance au choc thermique**

Les granulats doivent être résistants à la chaleur.

I.2.5.2.3.4 Caractéristiques de fabrication

Ces caractéristiques résultent des conditions de fabrication, du processus d'élaboration (extraction, fragmentation, séparation granulaire, lavage, criblage ...etc.), de la performance et l'aptitude de travailler correctement au niveau du lieu de fabrication (capacités humaines et matérielles). Ce sont :

➤ **La granularité**

C'est la distribution dimensionnelle des grains contenus dans le granulat, elle sert à classer le granulat.

➤ **Classe granulaire**

La classe granulaire désigne un granulat selon son plus petit diamètre de grain représentatif et son plus grand diamètre de grain représentatif. Cela permet ainsi de différencier les granulats entre eux et de les classer. Cela indique aussi la plage des diamètres de grains couverte par un granulat. Elle est définie par le terme d/D, réservée à la désignation des granulats dont les dimensions s'étalant de d à D où d est la dimension la plus petite et D la dimension la plus grande des grains. L'appellation d/D doit satisfaire aux conditions sur les refus de tamis de maille de diamètre D et les tamis de maille de diamètre d.

➤ **Courbe granulométrique**

C'est la distribution pondérale des granulats. On trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamis sous les tamis dont les mailles sont indiqués en abscisse selon une graduation semi logarithmique. La série des diamètres de mailles des tamis utilisés est une progression géométrique de raison $\sqrt[10]{10} \approx 1,25$

L'intérêt de la courbe granulométrique est de donner des informations concernant :

- ✓ La courbure (granulométrie bien graduée ou mal graduée) à l'aide du coefficient de courbure Cc.
- ✓ L'uniformité (granulométrie serrée ou étalée) à l'aide du coefficient d'uniformité Cu.
- ✓ La continuité ou la discontinuité. [49]

➤ **Forme des granulats**

- ✓ **Coefficient volumétrique**

Pour un grain, c'est le rapport entre le volume v du grain considéré et la sphère circonscrite de diamètre d, d étant la plus grande dimension du grain.

Pour un grain

$$C = \frac{V}{\frac{\pi d^3}{6}}$$

Pour un granulats constitué d'un ensemble de grains.

$$C = \Sigma v / (\Sigma \pi d^3 / 6) = v / (\pi / 6 \Sigma d^3)$$

Un coefficient faible correspond à un granulats présentant un certain nombre d'éclats et d'aiguilles. Un coefficient élevé correspond à un granulats dit : "cubique" ou "arrondi".

✓ Coefficient d'aplatissement

L'effet négatif des éléments plats, sur l'ouvrabilité et le degré de compactage pour les bétons, et sur les performances des couches de roulement est connu. Il se crée le problème de manque de rugosité nécessaire et on est face à des couches de roulement trop glissantes. Les méthodes de fabrication des granulats, malheureusement, impose l'existence des plats et ne nous permet que de limiter le pourcentage de ces derniers afin d'obtenir un bon granulats. Pour cela le coefficient d'aplatissement sert comme test permettant d'évaluer la forme des granulats. [20]

Le coefficient d'aplatissement A est le rapport de la somme des masses de passant sur les grilles à fentes correspondantes d'écartement $D_i/2$ en gramme à la somme des masse des granulats élémentaires d_i/D_i en grammes. Ce rapport représenté ci-dessous est exprimé en pourcentage et arrondi au nombre entier le plus proche.

Plus A est élevée, plus le gravillon contient d'éléments plats. Une mauvaise forme a une incidence sur la maniabilité et favorise la ségrégation. On le note :

$$A = \frac{M2}{M1} * 100$$

Où

M2 : la somme des masses des granulats élémentaires d_i/D_i en grammes

M1 : la somme des masses de passant sur les grilles à fentes correspondantes d'écartement $D_i/2$ en gramme.

✓ L'indice de forme

L'indice de forme est défini comme étant la masse de grains dont le rapport des dimensions L/E est supérieure à 3, exprimé en pourcentage de la masse sèche totale des grains soumis à l'essai, où L est la longueur de grains de granulats et E son épaisseur.

➤ **Propreté des granulats**

L'appréciation de la propreté des granulats selon leur type, s'établit d'après les essais suivants : [23]

✓ **Équivalent de sable**

Il permet de mesurer la propreté de la quantité d'éléments fins contenus dans le matériau sans aucune distinction de nature. L'équivalent de sable est le rapport conventionnel volumétrique entre les grains fins et les autres, il permet donc de caractériser l'importance des fines par une valeur numérique.

Plus l'équivalent de sable est élevé, moins le matériau contient des éléments fins nuisibles. Il s'applique assez bien aux sols faiblement plastiques et peut s'appliquer à tous les matériaux grenus, il s'effectue sur les fractions inférieures à 5 mm. Pour calculer l'équivalent de sable il existe deux types d'essais : visuel ou au piston. Cet essai est effectué sur la fraction du sable passant au tamis à mailles carrées de 2 mm, mais il peut être réalisé sur la fraction 0/4.

✓ **Essai au bleu de Méthylène**

À cause de la nature des résultats du test d'équivalent de sable qui est quantitative et non qualitative on a besoin de connaître la nature des fines signalées par l'équivalent de sable. Pour cela on a recourt à l'essai au bleu de Méthylène, il nous permet de déterminer la présence d'argiles ou de matières organiques.

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

Il a pour but de révéler la présence de fines de nature argileuse et d'en déterminer la concentration. Il est généralement effectué après un essai de propreté des sables ou des gravillons lorsque le résultat de celui-ci est inférieur aux spécifications exigées.

On appelle valeur de bleu d'un sable ou des fillers la quantité en gramme de bleu de Méthylène adsorbée par 1 kg de fraction 0/2mm pour les sables et de fraction 0/0.125mm pour les fillers.

✓ Propreté superficielle des gravillons

Un granulat doit présenter une propreté satisfaisante, en effet si les grains des granulats sont enrobés par une quantité excessive d'éléments fins, généralement argileux, ceux-ci empêchent une bonne adhérence de la pâte liante, entraînant ainsi une chute des résistances mécaniques et des variations de propriétés rhéologique des mélanges.

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral de particules de dimensions inférieures à 0.5mm adhérente à la surface ou mélangée dans un granulat de dimension supérieure à 2 mm. Les éléments fins contenus dans le granulat à tester sont séparés par lavage sur un tamis d'ouverture 0.5mm. Leur pourcentage est déterminé par pesées après séchage du refus.

➤ Module de finesse

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat, ce module est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimé en pourcentage sur les tamis d'une série bien déterminée et normalisée. Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en élément fins. [22]

II.5.2.3 Classification des granulats

On peut classer les granulats en fonction de leur granularité déterminée par analyse granulométrique sur des tamis de contrôle à maille carrées dans une série normalisée. On distingue plusieurs familles de granulats

- Fillers 0/D où $D \leq 2$ mm et contenant au moins 70% de passant à 0.063mm.
- Sablons 0/D où $D \leq 1$ mm et contenant moins de 10% de passant à 0.063mm.
- Sable 0/D où $D \leq 6.3$ mm sauf les sables pour béton où $D \leq 4$ mm.
- Graves 0/D où $D > 6.3$ mm.
- Gravillons d/D où $d \geq 1$ mm et $D \leq 31.5$ mm.
- Cailloux d/D où $d \geq 20$ mm et $D \leq 125$ mm. [23]

Remarque

La famille dite ballast d/D où $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm est complètement contenue dans la famille dite cailloux d/D où $d \geq 20$ mm et $D \leq 125$ mm, c'est pour cela qu'elle n'est pas citée dans la classification précédente. .

I.2.5.3 Eau de gâchage

L'eau joue un double rôle dans la technologie du béton. D'une part, elle est nécessaire au durcissement du ciment, puisque la réaction chimique du ciment (hydratation) est induite par l'eau. D'autre part, elle est indispensable pour assurer l'ouvrabilité et une mise en place correcte du béton frais.

L'eau de gâchage est la quantité d'eau additionnée au mélange de ciment, d'addition et de granulats lors du malaxage du béton. Si des adjuvants ou des additions sont employés sous forme de solutions ou de suspensions, il faut tenir compte de leur apport d'eau à partir d'une quantité de 3L/m... La teneur en eau totale se compose de l'eau de gâchage, de l'eau apportée par les adjuvants et les additions ainsi que de l'eau adsorbée à la surface des granulats et l'eau absorbée par les granulats. On entend par eau efficace la somme de l'eau de gâchage, l'eau apportée par les adjuvants et les additions ainsi que l'eau adsorbée à la surface des granulats.

I.2.5.4 Adjuvants

Pour améliorer certaines propriétés des bétons on a recours à des adjuvants chimiques. Les adjuvants sont des produits organiques et inorganiques qui, quand ils sont ajoutés en petite quantité, modifient certaines propriétés des bétons. Les plus connus sont : Entraîneur d'air, Réducteur d'eau à moyen ou à forte action, accélérateur ou retardateur de prise etc....

L'addition de ces produits dans le béton engendre des phénomènes physico-chimiques très complexes.

On utilise les adjuvants surtout pour :

- Diminuer le coût des constructions en béton
- Donner au béton certaines caractéristiques plus efficacement que par d'autres moyens
- Assurer la qualité du béton durant le malaxage, le transport, la mise en place et la cure dans des conditions météorologiques défavorables
- Obéir à certaines urgences durant le bétonnage

I.2.5.5 Additions

Les additions sont généralement des additions minérales sous forme de poudre fine ou de fibres qui peuvent améliorer certaines propriétés du béton. A quelques exceptions près, elles peuvent être employées tant dans le ciment que dans le béton. Parmi les additions, on compte :

- Farine de roche (farine de calcaire et de quartz)
- Cendre volante

- Fumée de silice
- Schiste calciné
- Laitiers granulés de haut fourneau
- Pouzzolane
- Pigments
- Fibres

Les additions au ciment sont utilisées comme constituants principaux pour réduire la teneur en clinker du ciment. Elles sont incorporées au ciment en usine par mouture conjointe ou par mélange avec le clinker.

On obtient ainsi, non seulement un dosage précis et constant, mais également une répartition homogène des additions dans le ciment.

Les additions au béton sont ajoutées au mélange dans le malaxeur de la centrale de fabrication. Il est ainsi possible de choisir librement les proportions du mélange addition – ciment et de les adapter précisément aux exigences de la recette. Cet avantage ne va cependant pas sans quelques inconvénients. D’abord, le stockage séparé des additions nécessite des silos, des équipements de dosage et des contrôles supplémentaires. Ensuite, certaines additions ont tendance à former des grumeaux lors d’un stockage prolongé. Enfin, la confection d’un béton homogène requiert parfois une durée de malaxage plus longue.

I.2.6 Principaux avantages et inconvénients du béton [24]

I.2.6.1 Avantages du béton :

- Il est peu coûteux, facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien.
- Il épouse toutes les formes qui lui sont données. Des modifications et adaptations du projet sur le chantier sont faciles à effectuer.
- Il devient solide comme de la pierre. Correctement utilisé, il dure des millénaires. Il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles.
- Associé à des armatures en acier, il acquiert des propriétés nouvelles qui en font un matériau de construction aux possibilités immenses (béton armé, béton précontraint).
- Il convient aux constructions monolithiques. Les assemblages sont faciles à réaliser dans le cas de béton coulé sur place. Dans la plupart des cas, les dimensions des ouvrages et éléments d'ouvrage en béton sont suffisants pour ne pas poser de problème délicat de stabilité.

- Les ressources nécessaires pour sa fabrication existent dans de nombreux pays en quantités presque illimitées.
- Il exige peu énergie pour sa fabrication. [24]

I.2.6.2 Inconvénients du béton

Les principaux inconvénients du béton ont pu être éliminés grâce à son association à des armatures en acier ou à l'utilisation de la précontrainte. De toutes façons, il reste les quelques inconvénients suivants :

- Son poids propre élevé (densité de 2,4 environ qui peut être réduite à 1,8 dans le cas de bétons légers de structure et à moins de 1,0 dans le cas de béton légers d'isolation)
- Sa faible isolation thermique (elle peut être facilement améliorée en ajoutant une couche de produit isolant ou en utilisant des bétons légers spéciaux)
- Le coût élevé entraîné par la destruction du béton en cas de modification d'un ouvrage. [24]

Conclusion

L'étude bibliographique porte sur deux sujets complémentaires distincts : d'une part les déchets issus de la démolition des immeubles sont récupérés et réutilisés par reconstitution (béton recyclés), d'autre part le béton reconstitué à base de granulats issus des bétons démolis revient moins chère par rapport aux granulats naturels, pour conclure sur la problématique de l'influence des agrégats de béton recyclés sur les propriétés mécaniques de béton.

L'utilisation des divers déchets est fonction de leur rentabilité d'exploitation et de leurs propriétés. De nombreux types de déchets ne pourront peut-être pas être utilisés à une grande échelle étant donné la diversité de leurs caractéristiques physiques et chimiques.

Dans cette étude on s'intéresse aux déchets de béton pour l'utiliser en tant que granulats pour béton.

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

II Chapitre II

PROGRAMME

EXPERIMENTAL

Introduction

L'objet de ce chapitre est la présentation des matériaux utilisés pour la confection des différents mélanges des bétons étudiés et la méthodologie adoptée lors du travail de recherche expérimentale.

Nous avons analysé les caractéristiques des granulats recyclés (gravier de béton recyclé) et des granulats naturels (Sable de rivière roulé et Gravier concasser de $D_{\max}=25\text{mm}$) entrant dans la composition des bétons.

En effet, l'objet de notre étude est d'évaluer l'influence de l'utilisation de gravier de béton recyclé comme granulats dans le béton en substitution volumique, avec des taux de substitution de (50% et 100%) et d'analyser les comportements des bétons obtenus à l'état frais ainsi qu'à l'état durci.

I.3 Propriétés des matériaux utilisés

I.3.1 Les granulats

I.3.1.1 Analyse granulométrique

❖ Définition

Analyse granulométrique **consiste** à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

On appelle refus le matériau qui est retenu par le tamis, et tamisât (ou passant) le matériau qui passe. Les poids des différents refus sont cumulés et rapportés au poids initial du matériau ; les pourcentages obtenus sont reportés sur un graphique.[23]

❖ But de l'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique nous permet d'avoir quelques renseignements sur les matériaux tel que :

- Les limites d et D du matériau ;
- La continuité ou la discontinuité de la granularité (coefficient de HAZEN et de courbure).
- En déduire le module de finesse (M_f).

a. Coefficient de courbure (C_c)

Avec :

$$C_c = D_{60}/D_{10}$$

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

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

D_{10} : diamètre du tamis qui laisse passer 10% de l'échantillon.

Ces indices se déterminent directement sur la courbe granulométrique

$1 < C_c < 3 \rightarrow$ matériau bien gradué (la continuité est bien répartie).

$C_c < 1$ ou $C_c > 3 \rightarrow$ matériau mal gradué (la continuité est mal répartie).

b. Coefficient d'uniformité (C_u)

$$C_u = (D_{30})^2 / (D_{60} * D_{10})$$

Ce coefficient caractérise la plus ou moins uniformité des répartitions des diamètres des grains.

$C_u > 2 \rightarrow$ granulométrie étalée.

$C_u < 2 \rightarrow$ granulométrie uniforme ou serrée. [23]

c. Module de finesse (M_f)

C'est le centième de la somme des refus cumulés (exprimé en pourcentage de poids) aux tamis 0.08, 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2,4 et 5.

$$M_f = \frac{\text{Somme des pourcentages des refus cumulés des tamis concernés}}{100}$$

❖ Matériels utilisés pour la réalisation de l'essai

- Série de tamis normalisés AFNOR (NF X 1i-501).
- Vibro-tamis
- Un dispositif de lavage ;
- Pinceaux à poils doux (soie) ;

- Une balance dont la portée limite est compatible avec la masse total de l'échantillon et ayant une précision différente de 1g. Pour la masse supérieure à 10 Kg avec précision de 5 g peut être admise.



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-7: **matériels utilisés dans l'analyse granulométrique**

❖ **Mode opératoire**

- Peser l'échantillon sur la balance technique avec une précision de 0,01 g ;
- Mettre l'échantillon sur le tamis supérieur après quoi l'assortiment de tamis est mis sur le dispositif de serrage du secoueur ;
- Mettre en marche le secoueur avec une amplitude de vibration et une durée de tamisage fixée après consultation de l ;
- Après arrêt du secoueur mécanique, peser les restes d'échantillons sur chaque tamis et le fond avec une précision de 0,01 g ;
- Faire la somme de tous les restes (refus cumulés) et comparer avec le poids initial de l'échantillon. La différence ne doit pas dépasser 0,5 %, si cette condition n'est pas vérifiée il faut refaire le travail. [22]

❖ **Courbes granulométriques**

I.3.1.1.1 Sable de rivière roulé

Selon l'analyse faite au laboratoire, on a obtenu les résultats des passants cumulés et la courbe granulométrique correspondante représentés dans le tableau suivant :

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-7: **Analyse granulométrique des granulats de sable**

Poids utilisé pour l'essai (g)	Diamètre tamis (mm)	Module tamis	Poids du refus cumulé	Pourcentage refus cumulé	Complément A 100 des refus cumulés
1500	5	125.35	8.35	8.35	91.65
	4	90.20	6.01	14.36	85.64
	2	256.05	17.06	31.42	68.58
	1	265.40	17.68	49.10	50.9
	0.5	315.60	21.02	70.12	29.88
	0.25	291.05	19.39	89.51	10.49
	0.125	124.19	8.27	97.78	2.22
	0.08	22.45	1.49	99.27	0.73
	Fond	10.50	0.69	100	0.04

MF= 5.59

Cc=0.66 (matériau mal gradué)

Cu=6 (granulométrie étalée)

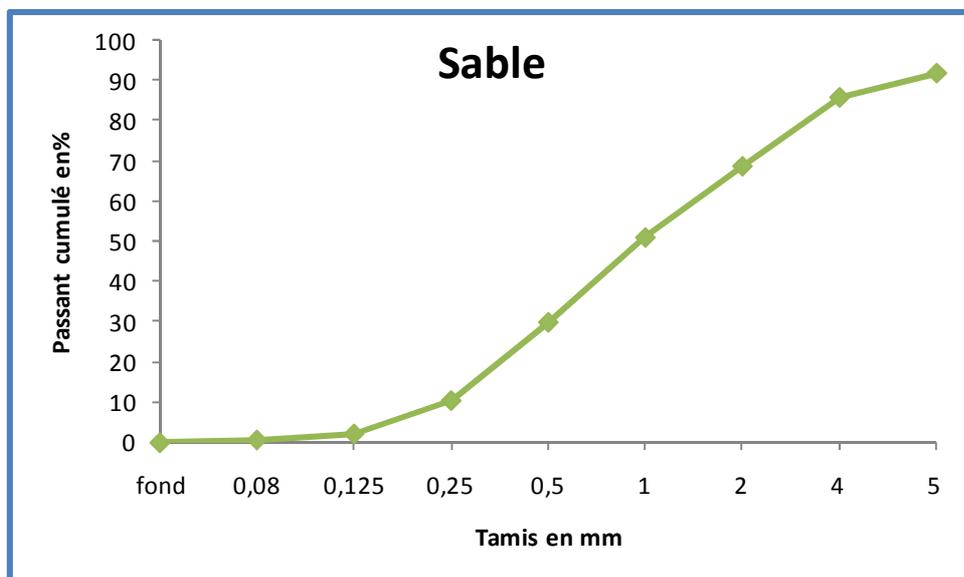


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-8: **Courbe granulométrique de sable**

I.3.1.1.2 Gravillon 3/8

Selon l'analyse faite au laboratoire, on a obtenu les résultats des passants cumulés et la courbe granulométrique correspondante représentés dans le tableau suivant :

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-8: **Analyse granulométrique des granulats de gravier 3/8**

Poids utilisé pour l'essai (g)	Diamètre tamis (mm)	Module tamis	Poids du refus cumulé	Pourcentage refus cumulé	Complément A 100 des refus cumulés
2000	10	0	0	0	100
	8	6.12	0.30	0.30	99.70
	5	1213.17	60.65	60.95	39.05
	4	556.67	27.83	88.78	11.22
	3.15	174.45	8.72	97.50	2.5
	2.5	29.6	1.47	98.97	1.03
	Fond	20.02	1	100	0.03

$C_c=0.94$ (matériau mal gradué)

$C_u=1.5$ (granulométrie uniforme ou serrée)

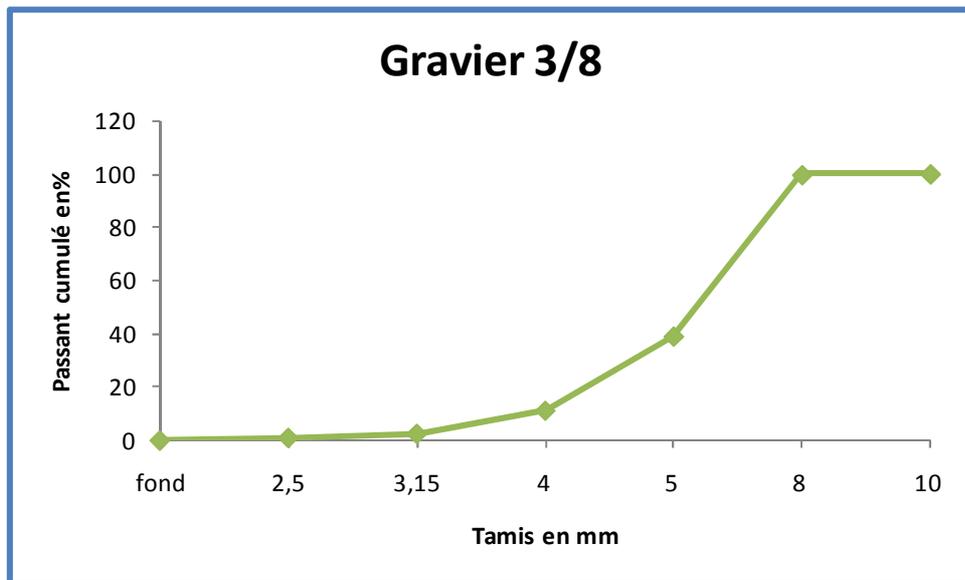


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-9: **Courbe granulométrique de gravier 3/8**

I.3.1.1.3 Gravillon 8/15

Selon l'analyse faite au laboratoire, on a obtenu les résultats des passants cumulés et la courbe granulométrique correspondante représentés dans le tableau suivant :

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-9: **Analyse granulométrique des granulats de gravier 8/15**

Poids utilisé pour l'essai (g)	Diamètre tamis (mm)	Module tamis	Poids du refus cumulé	Pourcentage refus cumulé	Complément A 100 des refus cumulés
2000	20	0	0	0	100
	16	31.30	1.56	1.56	98.44
	12.5	249.52	12.48	14.04	85.96
	10	449.77	22.50	36.54	63.46
	8	511.20	25.57	62.11	37.89
	5	708.05	35.42	97.53	2.47
	fond	48.30	2.41	100	0.06

Cc=0.83(matériau mal gradué)

Cu=1.63 (granulométrie uniforme ou serrée)

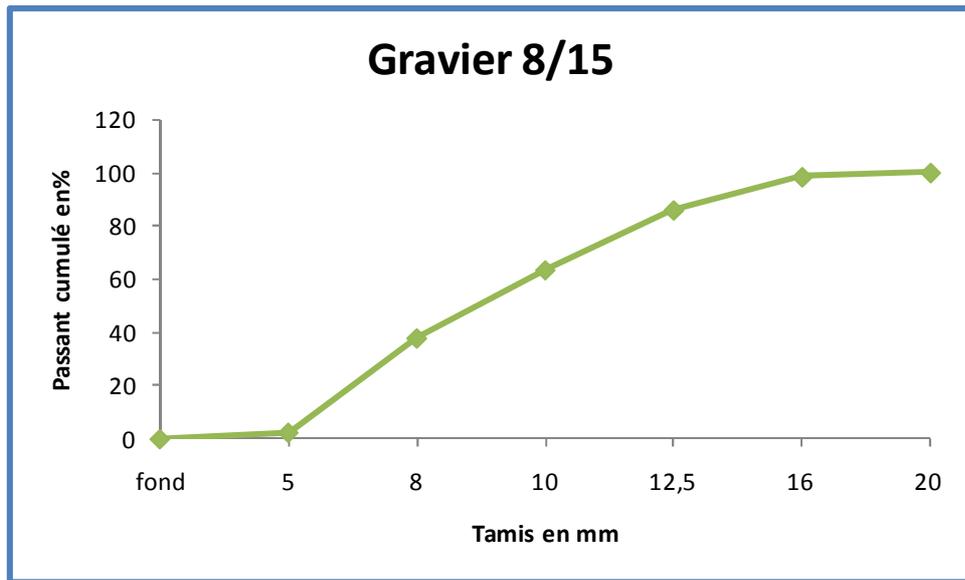


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-10: **Courbe granulométrique de gravier 8/15**

I.3.1.1.4 Gravillon 15/25

Selon l'analyse faite au laboratoire, on a obtenu les résultats des passants cumulés et la courbe granulométrique correspondante représentés dans le tableau suivant :

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-10: **Analyse granulométrique des granulats de gravier 15/25**

Poids utilisé pour l'essai (g)	Diamètre tamis (mm)	Module tamis	Poids du refus cumulé	Pourcentage refus cumulé	Complément A 100 des refus cumulés
2000	31.5	0	0	0	100
	25	167.45	8.37	8.37	91.63
	20	935.70	46.79	55.16	44.84
	16	695.75	34.79	89.95	10.05
	14	100.20	5.01	94.96	5.04
	12.5	75.90	3.79	98.75	1.25
	8	23.15	1.15	99.9	0.1
	fond	1.5	0.07	100	0.03

$C_c=2.57$ (matériau bien gradué)

$C_u=3.5$ (granulométrie étalée)

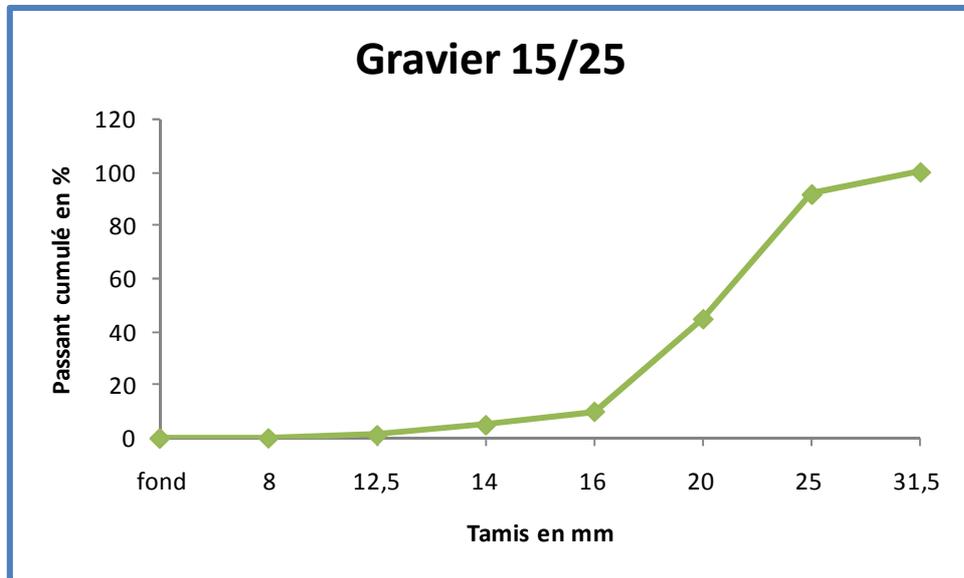


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-11: **Courbe granulométrique de gravier 15/25**

I.3.1.2 Masse volumique absolue

- ❖ **Définition :** La masse volumique absolue est la masse du matériau par unité de volume, exprimée en t/m^3 , en kg/dm^3 , ou en g/cm^3 . Cette masse volumique n'intègre que les grains de l'agrégat, donc sans les vides compris entre ces grains. La masse volumique absolue a la même valeur que la densité d'un même matériau, la seule différence étant que la densité n'a pas d'unité.

I.3.1.2.1 Sable

La masse volumique absolue du sable a été déterminée par la méthode de pycnomètre

- ❖ **Principe de l'essai**

Le flacon utilisé s'appelle un pycnomètre. Il est constitué d'un petit ballon (d'environ 50 cm^3) sur lequel vient s'adapter un bouchon rôdé creux surmonté d'un tube capillaire et d'une ampoule de garde.

- ❖ **Appareillage**

- Balance précise à 0,1 mg
- Pycnomètre de 50 ml
- Récipient thermorégulé
- Liquide d'immersion : eau distillée ou autre liquide convenable.

❖ Mode opératoire

- Poser le pycnomètre sur la balance, faire le zéro.
- Remplir le pycnomètre de liquide jusqu'au repère
- Peser le volume de liquide (m_0)
- Vider le pycnomètre
- Introduire le lot de matière à tester dans le pycnomètre
- Peser le lot (m_1)
- Compléter le remplissage du pycnomètre avec le liquide.
- Peser l'ensemble eau + matière (m_2)
 $m_2 = m_1$ (masse échantillon) + m_3 (masse d'eau)
- Répéter l'essai sur 3 échantillons.

On utilise la formule suivante :

$$\rho = m_1 * \rho_{eau} / (m_0 - m_3)$$

I.3.1.2.2 Gravier

La masse volumique absolue du gravier a été déterminée suivant la norme P18-554

❖ Appareillage

- **Etuve** ventilée réglée à 105 C +- 5 C
- **Balance** dont la portée limite est compatible avec les masses à peser et permettant de faire toutes les pesées avec une précision relative de 0.01%
- **Panier** en toile métallique à maille < 3 mm ou récipient en tôle perforée à perforation < 3 mm de dimensions adéquates, muni d'anses métalliques servant à le suspendre au fléau de la balance.
- **Récipient** dans lequel on peut suspendre librement le panier ou le récipient en tôle perforée.
- **Tamis** de 4 mm
- **Chiffons** absorbants de dimension adéquate.

❖ Mode opératoire

- **Détermination de la masse de l'échantillon à sa teneur en eau en l'état**
- Peser l'échantillon, soit M sa masse

- Noter en suite la masse M_s ' de cet échantillon, sèche sans lavage préalable.
 - **Détermination dans l'air de la masse sèche de l'échantillon**
- Laver l'échantillon sur le tamis de 4 mm.
- Sécher l'échantillon à l'étuve à 105 C jusqu'à masse constante c'est-à-dire jusqu'à ce que deux pesées successives de l'échantillon, séparées d'une heure, ne diffèrent pas de plus de 0.1%
- Le laisser refroidir et le peser, soit M_s sa masse
 - **Détermination dans l'air de la masse de l'échantillon**
- Immerger l'échantillon dans l'eau pendant 24 h à 20 C à la pression atmosphérique
- Peser ensuite l'échantillon après avoir épongé soigneusement avec un chiffon absorbant, soit M_a sa masse.
 - **Détermination dans l'eau de la masse de l'échantillon**

Placer l'échantillon dans le panier en toile métallique, le suspendre au fléau de la balance, l'immerger dans l'eau à 20 °C à l'aide du récipient prévu à cet effet, agiter le panier afin d'éliminer toute présence de bulles d'air avant la pesée.

Peser ensuite l'échantillon, soit M_a ' sa masse. [25]

❖ **Expression des résultats**

- **Masse volumique réelle**(en t/m³)

$$\rho = \frac{M_s}{M_a - M'_a}$$

❖ **Résultats obtenues**

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-11: la masse volumique absolue des granulats secs en kg/m³

Matériau	Masse volumique kg/m ³
Sable	2660
Gravier 3/8	2630
Gravier 8/15	2660
Gravier 15/25	2617
GBR 3/8	2270
GBR 8/15	2350
GBR 15/25	2390

I.3.1.3 Masse volumique apparente

❖ Définition :

La masse volumique apparente est la masse du matériau par unité de volume, exprimée en t/m^3 , en kg/dm^3 , ou en g/cm^3 . Cette masse volumique intègre les grains de l'agrégat ainsi que les vides compris entre ces grains. De ce fait, il ne faut pas la confondre avec la masse volumique absolue, qui elle ne tient compte que de la masse des grains constituant le matériau sans les vides pouvant exister entre les grains.

❖ Principe de l'essai :

Il suffit de remplir un récipient, dont on connaît le volume, en prenant de grandes précautions pour éviter tous phénomènes parasites que pourrait provoquer le tassement trop important ou trop faible donnerait un résultat erroné. Pour limiter ce risque d'erreurs, l'essai se fera sur plusieurs pesées, avec lesquels on fera une moyenne. On pèse ensuite l'échantillon, en ayant pris soin de déduire la masse du récipient. Enfin, la masse de l'échantillon est divisée par le volume du récipient. Le résultat final nous donne donc la valeur de la masse volumique apparente du matériau.

- La masse volumique apparente est donnée par :

$$\rho = m/v$$

- L'essai est répété 3 fois pour un volume de 1 litre et la moyenne de ces essais donne la valeur de la masse volumique apparente.



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-12: matériels utilisés

❖ Résultats obtenues

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-12: la masse volumique apparente des granulats secs en kg/m^3

Materiau	Masse volumique kg/m^3
Sable	1443
Gravier 3/8	1396
Gravier 8/15	1365
Gravier 15/25	1369
GBR 3/8	1072
GBR 8/15	1099
GBR 15/25	1124

I.3.2 Le ciment

❖ Définition

Le ciment utiliser dans cette présente étude est un ciment portland composé fabriqué à la cimenterie M'Sila. Il s'agit d'un ciment CPJ-CEM II 42.5 d'une couleur grise.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide

On trouve également l'alumine (Al_2O_3) et le fer (Fe_2O_3), ils sont rendus apte à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500 C, en présence de l'eau à lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés.

Matine présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conformement à la norme NA 442 EN197-1 et à la norme NF P 15-301/94.

❖ Analyses et caractérisation

Nous avons les caractéristiques du ciment utilisé lors de la confection :

- **Composition chimiques de ciment utilisé**

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-13: **Analyses chimiques**

Perte au feu	Résidus insolubles	Teneur en sulfates SO₃	Teneur en oxyde de magnésium MgO	Teneur en chlorures	Teneur équivalent en alcalin
9.75%	1.35%	2.35%	1.60%	0.03%	0.525%

- **Composition hypothétique du clinker**

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-14: **Composition du clinker**

Silicates tricalciques C₃S	Silicates bicalcique C₂S	Aluminates tricalciques C₃A	Aluminoferrites tetracalciques C₁AF
61%	15%	7%	11%

- **Propriétés physiques de ciment utilisé**

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-15 : **Propriétés physiques**

Consistance normale de la pâte du ciment	Finesse suivant la méthode de Blaine	Expansion	Retrait à 28 jours
26.75%	2700	1.4 mm	1000 um/m

- **Temps de prise de ciment utilisé**

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-16 :
Temps de prise de ciment

Début de prise	167.5 min
Fin de prise	242.5 min

- **Résistance à la compression de ciment utilisé**

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-17 :
Résistance à la compression de ciment

2 jours	>10 Mpa
28 jours	>42.5 Mpa

I.3.2.1 Essai de prise

❖ Définition

La présence de régulateur de prise dans la masse des liants hydrauliques offre à ces derniers, après gâchage, une prise qui commence après une période bien déterminée. Il est donc nécessaire de connaître la phase de début de prise des liants hydrauliques en vue de déterminer le temps disponible pour la mise en œuvre des mortiers et des bétons dont ils sont confectionnés.

❖ Principe

Il est nécessaire de connaître le début et la fin de prise des liants hydrauliques afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des bétons. Les essais de prise se font à l'aide de l'appareil de Vicat équipé d'une aiguille, Norme EN 196-3 .

❖ Conduite de l'essai :

- Régler l'appareil de Vicat muni de l'aiguille par abaissement de celle-ci jusqu'à la plaque de base plane et par ajustement du repère au zéro de l'échelle ;

- Relever l'aiguille en position d'attente ;
- Préparer la pâte de ciment comme pour l'essai de consistance en introduisant la quantité d'eau déterminée pour la pâte de consistance normalisée ;
- Introduire rapidement la pâte dans un moule tronconique sans tassement excessif (le moule étant placé sur la plaque de base plane) et placer l'ensemble dans l'axe de la sonde de l'appareil de Vicat ;
- Amener l'aiguille à la surface de l'échantillon ;
- Lâcher l'aiguille sans vitesse initiale, cette dernière s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), relever la distance séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base ;
- Recommencer l'opération à des intervalles de temps convenablement espacés (10 -15 mn) jusqu'à ce que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$. (nettoyer l'aiguille à chaque opération).

❖ Résultats obtenus

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-18 : **Temps de prise**

Début de prise	142.5 min
Fin de prise	208 min

I.3.3 L'eau de gâchage

On a utilisé une eau potable du robinet, ce qui est considéré comme appropriée pour la fabrication du béton

I.4 Formulations :

I.4.1 Formulation de béton témoin

La méthode de formulation du béton témoin utilisés dans cette étude est la méthode Faury.

La composition est calculée selon les données suivantes :

- Diamètre maximal des granulats $D_{\max} = 25 \text{ cm}$
- Les quatre classes granulaires : 0/3, 3/8, 8/15, 15/25.

- Ouvrabilité du béton : très plastique
- Serrage : vibration courante (Table vibrante).
- Dosage en ciment 350 kg/m³
- E/C =0.55

Trois types d'éprouvettes utilisées dans cette étude, cubiques de (15x15x15 cm³) pour l'essai de la compression simple et cylindriques de (16x32 cm) pour les essais de la traction par fendage et module d'élasticité ainsi que des éprouvettes de (15x15x15 cm³) pour l'essai de retrait. Les éprouvettes couvertes laissées à l'air libre sont démoulées après 24 heures et immergées sous l'eau à température ambiante.

Une moyenne de 3 éprouvettes de béton a été admise pour chaque essai.

I.4.1.1 Méthode de Faury

En s'inspirant d'une théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen. La loi de granulation qui en découle est une loi fonction de $\sqrt[5]{d}$: c'est pourquoi Faury adopta une échelle des abscisses gradué en $\sqrt[5]{d}$. La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est alors théoriquement une droite : cependant Faury a distingué les grains fin et moyen (<D/2) des gros grains (> D/2) et la pente de la droite de référence n'est pas la même pour chacune des deux catégories.

On trace donc pour l'ensemble du mélange, ciment compris, une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites si l'on opère sur graphique gradué, en abscisse en $\sqrt[5]{D}$, l'abscisse de point de rencontre de ces deux droites et fixée à D/2 et son ordonnée $Y_{D/2}$ est donnée par une formule tenant compte de la grosseur D du granulat et les paramètres A et B qu'on tire du tableau **Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.**-19

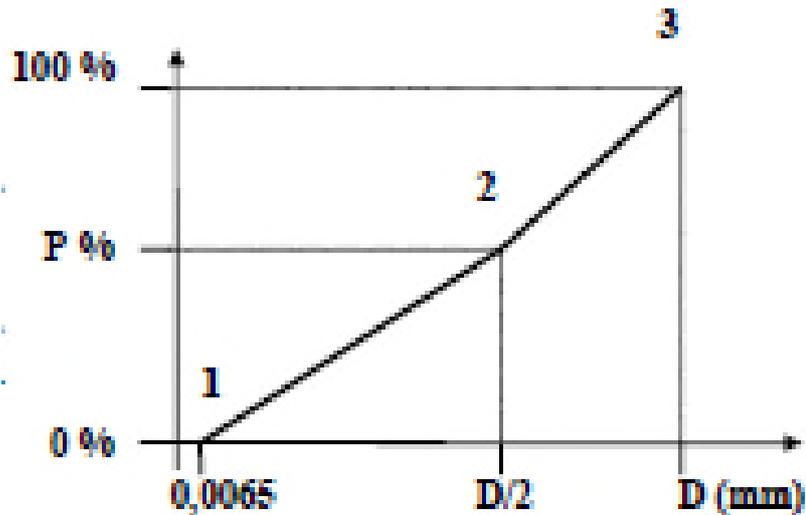


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-13 :
représentation graphique de la courbe de référence de Faury [26]

Avec $Y_{D/2} = A + 17 \cdot \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\left(\frac{R}{D}\right)^{-0.75}}$

Où:

A : constante, traduisant la maniabilité du béton.

B : constant traduisant l'importance du serrage du béton.

D : plus grande dimension de tamis.

R : rayon moyen démoûle

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-20 : **Les points de la courbe de référence de Faury [26]**

Point	Abscisse [mm]	Ordonnée [%]
1	0.0063	0
2	D/2	$Y_{D/2}$
3	D	100

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-21 : **Les valeurs des paramètres A et B (NEPOMUCENO 1999) [26]**

ouvrabilité	moyens placement	A			B
		Nature des agrégats			
		sable roulé		Le sable et gravier concassés	
		gravier roulés	gravier concassés		
sec	Vibration très puissante	≤ 18	≤ 19	≤ 20	1
Ferme	vibration puissante	20 à 21	21 à 22	22 à 23	1à1.5
plastique	vibration moyenne	21 à 22	23 à 24	25 à 26	1.5
Très plastique	Piquage	28	30	32	2
fluide	Rien	32	34	38	2

❖ **Application de la méthode de Faury :**

Données :

- Gravier concasser de $D_{\max}=25\text{mm}$
- Sable de rivière roulé
- Ouvrabilité : très plastique

Donc du tableau 2 $A=30$ $B=2$

$R/D=1$

$$D' \text{ où } Y_{D/2} = 30 + 17\sqrt[5]{25} + \frac{2}{(1)-0.75} = 70.36\%$$

Ce qui nous donne une courbe comme illustré sur la figure **Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-7**

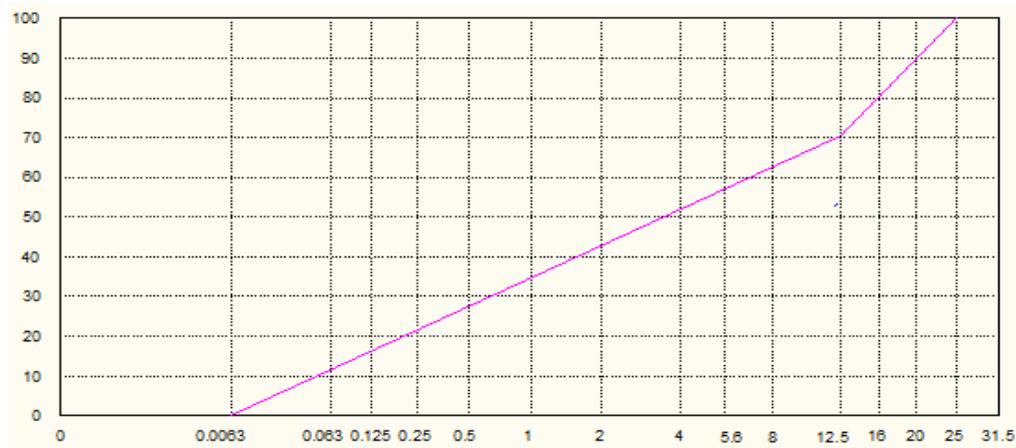


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-14 : courbe de référence de Faury

❖ Détermination de volume des vides du béton

Une estimation des vides peut être obtenue selon la dimension maximale des granulats conformément à l'article 613 ACI, comme indiqué dans le tableau 24.

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-22 : volume des vides en fonction du diamètre max des granulats [59]

Taille maximale des granulats D [mm]	volume de vide (V_v) [Litres par m ³ de béton]
9.5	30
12.7	25
19.1	20
25.4	15
38.1	10
50.8	5
76.5	3
152.4	2

Comme la dimension maximale de notre granulats est 25 mm ont doit faire une interpolation

Après calculs ont a eux $V_v=15.32 \text{ l/m}^3$

❖ Volume des particules solide

La courbe de référence ne représente que le volume des particules solide le ciment compris.

$$V_s = V_t - I_v$$

V_s : volume des agrégats

V_t : volume total du béton (m^3)

I_v : la somme de volume de l'eau et des vides

Expression générale de I_v est :

$$I_v = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{\frac{R}{D} - 0.75} \text{ [m}^3/\text{m}^3 \text{ du béton]}$$

K , K' : paramètres qui tien compte de la nature des granulats, la maniabilité et les moyen de mise en place qu'on tire du tableau **Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.**-23 .

$R/D = 1$

Tableau **Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.**-24 : **Les valeurs des paramètres K et K' [26]**

ouvrabilité	moyens placement	K			K'
		Nature des agrégats			
		sable roulé		Le sable et gravier concassés	
		gravier roulés	gravier concassés		
sec	Vibration très puissante	≤ 0.24	≤ 0.25	≤ 0.27	0.002
Ferme	vibration puissante	0.25 à 0.27	0.26 à 0.28	0.28 à 0.30	0.003

plastique	vibration moyenne	0.26 à 0.28	0.28 à 0.30	0.30 à 0.34	0.003
Très plastique	Piquage	0.34 à 0.36	0.36 à 0.38	0.38 à 0.40	0.003
fluide	Rien	≥ 0.36	≥ 0.38	≥ 0.40	0.004

D'où

$$I_v = \frac{0.37}{\sqrt[3]{25}} + \frac{0.003}{1-0.75} = 0.20636 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

Donc le volume des solides est :

$$V_s = V_t - I_v = 1 - 0.206 = 0.794 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

I.4.1.2 Tracer les courbes granulométriques et détermination des pourcentages de chaque matériau

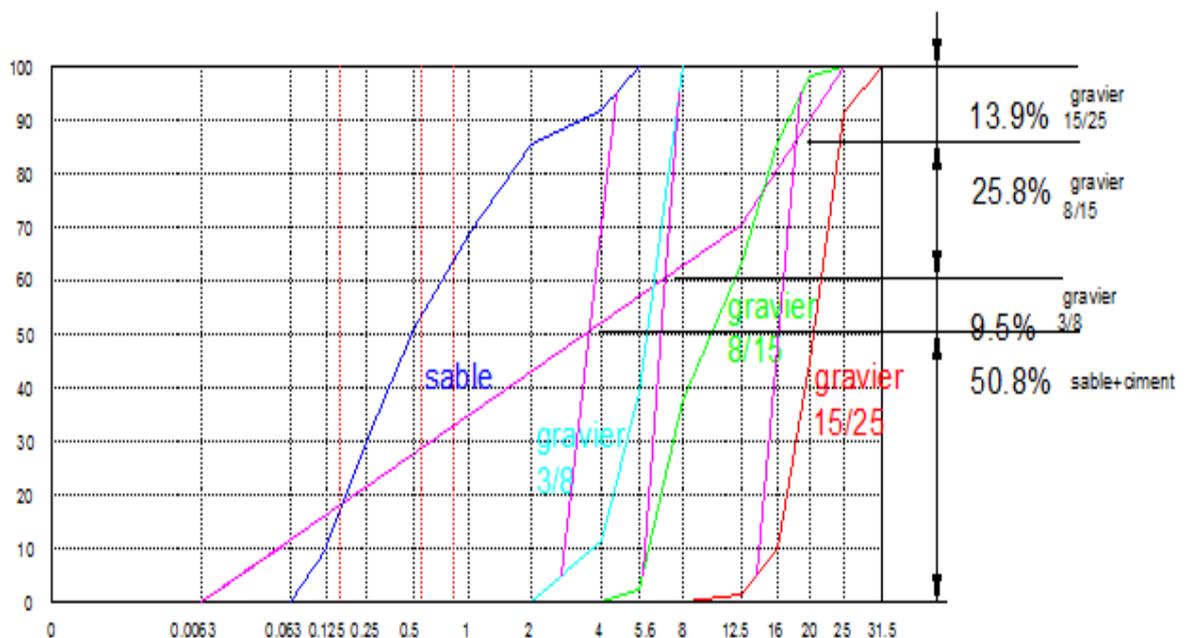


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-15 : courbe et pourcentage de chaque matériau

❖ Calcul de volume de chaque fraction

Sable + ciment = 50.8%

Gravier 3/8 = 9.5%

Gravier 8/15 = 25.8%

Gravier 15/25 = 13.9%

Sable 36.64%

Ciment 14.16%

I.4.1.3 Détermination des volumes de chaque matériau

$$1 \text{ m}^3 \text{ de béton} = V_{\text{eau}} + V_{\text{ciment}} + V_{\text{sable}} + V_{\text{gravier}} + V_{\text{vide}}$$

❖ Calcul de volume de vide

$$(25.4 - 19.1) / (15 - 20) = (25 - 19.1) / (V_v - 20)$$

$$V_v = [(15 - 20) / (25.4 - 19.1)](25 - 19.1) + 20 = 15.32 \text{ l}$$

$$V_v = 0.01532 \text{ m}^3$$

❖ Calcul de volume de l'eau

$$V_{\text{eau}} = C \times E / C$$

❖ Calcul le volume de chaque matériau

$$V_{s+g} = V_{\text{granulats}} - V_{\text{ciment}}$$

$$\text{Avec } V_c = m / m_v = m / 3120$$

$$V_s = V_{\text{granulat}} \times \% \text{ sable}$$

$$V_c = V_{\text{granulat}} \times \% \text{ ciment}$$

$$V_{3/8} = V_{\text{granulat}} \times \% 3/8$$

$$V_{8/15} = V_{\text{granulat}} \times \% 8/15$$

$$V_{15/25} = V_{\text{granulat}} \times \% 15/25$$

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-25 : **volume des constituants de la formulation témoin en m³**

C	E/C	V eau	Vc	Vs	V 3/8	V 8/15	V 15/25
350	0.55	0.1925	0,11217949	0,29033397	0,0752571	0,20438244	0,11011302

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-26 : **volume de chaque constituant en m³**

C	E/C	V eau	Vc	Vs	V 3/8	V 8/15	V 15/25
350	0.55	0.1925	0,11217949	0,29033397	0,0752571	0,20438244	0,11011302
300	0.5	0.15	0,09615385	0,30591022	0,0792946	0,21534744	0,11602052
300	0.6	0.18	0,09615385	0,29491522	0,0764446	0,20760744	0,11185052
400	0.5	0.2	0,12820513	0,28758522	0,0745446	0,20244744	0,10907052
400	0.6	0.24	0,12820513	0,27292522	0,0707446	0,19212744	0,10351052

I.4.1.4 Détermination des masses de chaque matériau

I.4.1.4.1 Le gravier naturel

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-27 : **masse de chaque constituant en kg**

C	E/C	M eau	Mc	Ms	M 3/8	M 8/15	M 15/25
350	0.55	192.5	350	772.28	197.92	543.65	288.16
300	0.5	150	300	813.72	208.54	572.82	303.62
300	0.6	180	300	784.47	201.04	552.23	292.71
400	0.5	200	400	764.97	196.05	538.51	285.43
400	0.6	240	400	725.98	186.05	511.05	270.88

I.4.1.4.2 Le gravier de béton recyclé

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-28 : **masse de gravier de béton recyclé en kg**

C	E/C	M 3/8	M 8/15	M 15/25
350	0.55	170.83	480.29	263.17
300	0.5	179.99	506.06	277.28
300	0.6	173.52	487.87	267.32
400	0.5	169.21	475.75	260.67
400	0.6	160.59	451.49	247.39

I.4.1.4.3 Le mélange entre le gravier naturel et le gravier de béton recyclé

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-29 : masse de chaque constituant en kg pour les formulations de GBR à 50% en kg

dosage		Gravier naturel			gravier de béton recyclé		
C	E/C	M3/8	M8/15	M15/25	M3/8	M8/15	M15/25
350	0.55	98,96	271,82	144,08	85,41	240,14	131,58
300	0.5	104,27	286,41	151,81	89,99	253,03	138,64
300	0.6	100,52	276,11	146,35	86,76	243,93	133,66
400	0.5	98,02	269,25	142,71	84,60	237,87	130,33
400	0.6	93,02	255,52	135,44	80,29	225,74	123,69

I.5 Essais

I.5.1 Etat frais

I.5.1.1 Affaissement

❖ Principe

Cet essai consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais. Ce dernier est compacté dans un moule ayant la forme d'un tronc de cône. Lorsque le cône est soulevé verticalement, l'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance. [21]

❖ Appareillage

- Moule pour former l'éprouvette : en métal non directement attaqué par la pâte de ciment, d'une épaisseur minimale de 1,5 mm. La paroi intérieure du moule doit être

lisse, sans aspérités. Le moule doit avoir la forme d'un tronc de cône creux aux dimensions intérieures suivantes :

- diamètre de la base : (200 ± 2) mm ;
 - diamètre du haut : (100 ± 2) mm ;
 - hauteur : (300 ± 2) mm ;
- Tige de piquage : de section circulaire, rectiligne, en acier, de $(16 \pm t_1)$ mm de diamètre, et de (600 ± 5) mm de longueur, dont les extrémités sont arrondies.
 - Entonnoir (facultatif) : en matériau non absorbant et non directement attaqué par la pâte de ciment, ayant un dispositif permettant à l'entonnoir d'être placé correctement sur le moule spécifié ci-dessus.
 - Règle : graduée de 0 mm à 300 mm, avec des graduations de 5 mm, le zéro étant situé à une extrémité de la règle.
 - Surface ou plateau de base : plateau ou autre surface, rigide, plat, non absorbant, sur lequel le moule sera posé.
- ❖ **Mode opératoire**
- Humidifier le moule et le plateau de base, puis placer le moule sur le plateau
 - Maintenir fermement le moule en place pendant le remplissage, en le solidarissant par les deux pattes de fixation.
 - Remplir le moule en deux couches, chacune correspondant approximativement, après serrage, au tiers de la hauteur du moule. Piquer chaque couche 25 fois avec la tige de piquage. Répartir les coups uniformément sur la section de chaque couche.
 - Enlever le béton qui s'est écoulé sur le plateau de base. Démouler le béton en soulevant verticalement le moule avec précaution.
 - Immédiatement après avoir retiré le moule, mesurer l'affaissement (h) en déterminant la différence entre la hauteur du moule et le point le plus haut du corps d'épreuve affaissé. [21]



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-16 : **appareil de mesure de l'affaissement**

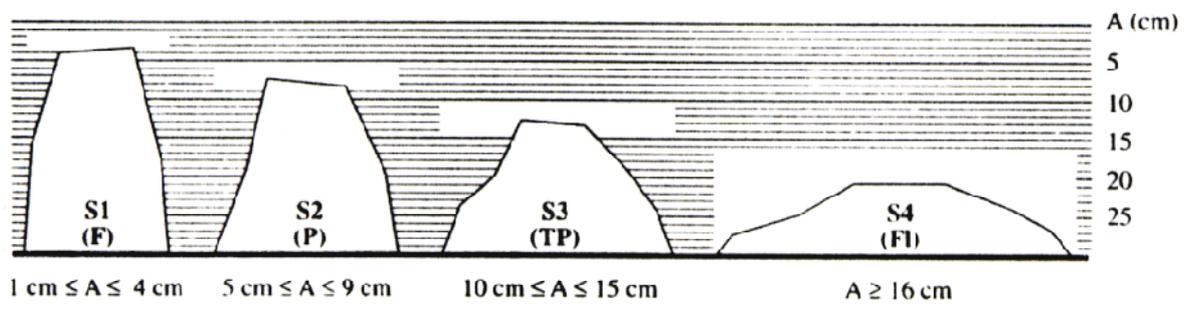


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-17 : **Les différentes classes de consistance de l'essai d'affaissement**

I.5.1.2 Masse volumique

❖ Mode opératoire

On mesure la masse volumique du béton frais à l'aide d'un récipient étanche à l'eau et suffisamment rigide. Le béton est mis en place dans le récipient et vibré à l'aide d'une aiguille vibrante, une table vibrante ou un serrage manuel en utilisant une barre ou tige de piquage, après un arasement approprié. Le récipient et son contenu doivent être pesés afin de déterminer la masse volumique qui sera calculée en utilisant la formule suivante :

Récipient de mesure capacité. 160 mm x hauteur 320 mm, épaisseur 4 mm en acier fond.

M₁ : la masse de récipient vide en kg

M₂ : la masse de récipient rempli avec le béton en kg

$$V = \frac{\pi D^2 h}{4} = 0.00643072 \text{ m}^3$$

D'ou

$$\rho = (M_2 - M_1)/V \text{ kg/m}^3$$



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-18 : **Eprouvette pour mesurer la masse volumique de béton frais**

I.5.2 Etat durci

I.5.2.1 Compression simple

❖ Principe

Le principe de l'essai est de soumettre une éprouvette cubique de 0.15 m^3 à une force croissante et constante jusqu'à rupture de celle-ci afin de déterminer sa résistance à la compression.

❖ Mode opératoire

La résistance est la qualité essentielle recherchée pour un béton, afin de déterminer cette dernière, on a mesuré selon la norme NEP 18-406 la résistance à la compression des éprouvettes à l'aide d'une presse électrique de type CONTROLS, avec une charge maximale de 2000 KN.

- Centrage de l'éprouvette sur le plateau de la presse ;
- Application de la charge de façon continue (600KN/mn) ;
- Attente de la rupture de l'éprouvette ;

- Relevé de la valeur indiquée par la presse ;[27]

La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

$$R_c = F/S \quad MPa$$

F : Valeur de la charge de rupture en "KN".

S : Section de l'éprouvette en mm^2 .



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-19 : **compression simple d'une éprouvette cubique**

I.5.2.2 Traction par fendage

❖ Principe

Cet essai est dérivé de l'essai de traction par fendage (essai Brésilien). Il s'agit de soumettre le bloc cylindre (16*32 cm) à une compression le long de deux baguettes situées de part et d'autre d'un bloc, ce qui se traduit par une contrainte de traction suivant une facette verticale passant entre ces deux baguettes.

- ❖ **But** : L'essai de résistance à la traction transversale ou essai brésilien permet d'estimer la résistance à la traction directe du béton sans avoir recours au système de chargement compliqué que nécessite l'essai de traction directe.

❖ Mode opératoire

L'essai consiste à appliquer une charge de compression centrée selon 2 génératrices de l'éprouvette. Les contraintes induites provoquent la rupture suivant un plan diamétral de l'éprouvette.

La charge est appliquée sur toute la longueur de l'éprouvette à l'aide d'une bande étroite, de contre-plaqué, de carton ou de matière analogue, avec $a = 0.08d$ à $0.1d$ et $t = 3$ mm. [26]

La résistance à la traction est déterminée par un essai de fendage sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm, conformément à la norme NF P 18-408. La presse est la même que celle utilisée pour l'essai de compression.[27]

La résistance à la traction transversale se calcule comme suit :

$$R_t = 2F / \pi DL \text{ MPa}$$

F : Valeur de la charge de rupture en "KN".

D : diamètre de l'éprouvette en mm

L : longueur de l'éprouvette en mm



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. **-20: traction par fendage d'une éprouvette**

I.5.2.3 Ultrason

❖ But

La mesure de la vitesse du son dans le béton permet d'évaluer sa résistance de manière non destructive. Cette méthode est intéressante lorsqu'il faut contrôler la régularité du béton d'un élément d'un ouvrage, par exemple, l'évolution d'un béton dans le temps. [27]

❖ Conduite de l'essai :

- Les capteurs (émetteur et récepteur) de l'ultrason doivent être montés de part et d'autre des surfaces opposées ;
- Mettre en fonction l'appareil après calibration à 32.3. Par la suite on enregistre le temps affiché par l'ultrason ;
- Choisir les surfaces les plus lisses et mettre un peu de gel sur les deux surfaces parallèles pour assurer un bon contact entre les transducteurs et le béton et relever par la suite le temps indiqué par l'ultrason ;

Calculer la vitesse du son dans le béton

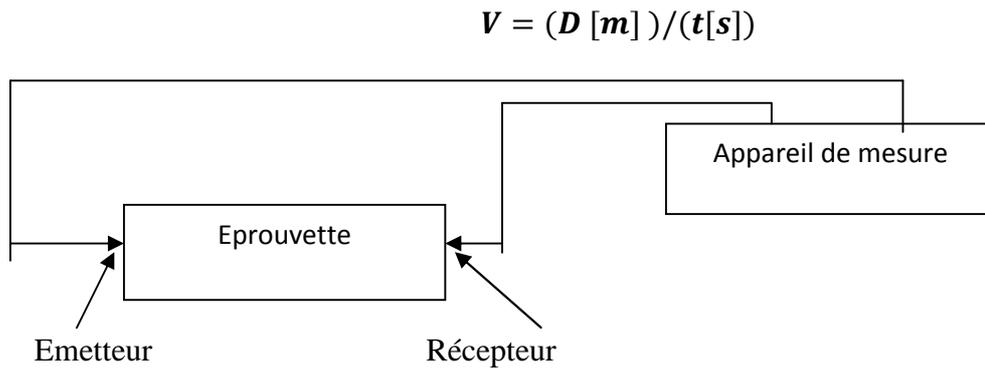


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-21: **schéma de mesure à ultrason**

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-30: **qualité de vitesse de son**

Vitesse de son en m/s	Appréciation de la qualité
> 4500	Excellent
3500 à 4500	Bon
3000 à 3500	Assez bon
2000 à 3000	Médiocre
< 2000	Très mauvais

Cette technique standardisée par la norme NF18-418, L'équipement utilisé pour la mesure de la vitesse de l'ultrason est l'appareil fabriqué par CONTROLS, qui donne le temps de parcours d'une impulsion traversant le matériau testé. A l'usage, un transducteur de transmission est placé sur un côté du béton à être mesuré et un transducteur réception placé directement en face de l'autre côté. Nous avons utilisé matière étanche (la graisse) comme milieu de couplage entre les transducteurs et le béton pour assurer un contact suffisant .La longueur du trajet doit ensuite être mesuré avec précision.

Les vitesses des ondes « V » peuvent être calculées par l'expression suivante :

$$V = (D [m]) / (t[s])$$

V : vitesse de l'onde sonique, (m/s)

D : longueur du trajet de l'onde sonique, (m)

t : temps, (s)



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-22: **mesure à ultrason**

I.5.2.4 Module d'élasticité

❖ Principe

Le module d'élasticité est une grandeur intrinsèque d'un matériau, définie par le rapport de la contrainte à la déformation élastique provoquée par cette contrainte. La déformation est exprimée comme une grandeur sans dimension. L'unité pratique souvent usitée du module est le MPa.

❖ Mode opératoire

Nous avons choisi de déterminer le module d'élasticité par mesure de vitesse de propagation d'ondes acoustiques à l'aide d'un appareil de test ultrasonique – Pundit lab selon la norme NF EN 12504-4. L'appareil envoie un signal électrique dans l'échantillon. Ce signal est transformé en ondes longitudinales par un transducteur piézoélectrique. L'onde se propage dans l'échantillon d'un transducteur à l'autre, puis est réfléchi vers le transducteur de départ. L'appareil mesure le temps t entre les deux échos successifs, à partir duquel on déduit la vitesse des ondes ultrasonores longitudinales :

$$V = L/T$$

Avec V la vitesse des ondes ultrasonores, et L la longueur de l'échantillon étudié.

La valeur de la vitesse permet de remonter au module d'élasticité dynamique du matériau grâce à l'équation suivante :

$$E = V^2 * \rho * ((1 + \nu) * \frac{(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)})$$

Avec E le module d'élasticité, V la vitesse des ondes ultrasonores, ρ la masse volumique du matériau étudié, et ν le coefficient de poisson ($\nu = 0,2$ pour le béton).

Les deux transducteurs sont couplés de façon alignée sur deux faces parallèles et égalisées par ponçage de l'échantillon. Il est important d'avoir un bon contact entre le béton et la face de chaque transducteur. Le contact acoustique transducteur/échantillon est assuré en utilisant de la vaseline et en appuyant le transducteur contre la surface du béton. La longueur de parcours de l'onde doit être supérieure ou égale à 10 cm. Nous travaillons sur des éprouvettes cylindriques $15*15*15 \text{ cm}^3$. Les résultats présentés dans ce chapitre sont les valeurs moyennes obtenues sur 3 échantillons par formulation à 28 jours. [26]



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-23: **mesure de module d'élasticité**

I.5.2.5 Masse volumique

I.5.2.5.1 Masse volumique de l'éprouvette cubique

❖ Principe

Mesurer la masse volumique de béton durci à partir des éprouvettes cubiques de diamètre 15 cm^3

❖ Mode opératoire

Faire peser les éprouvettes de béton dans 7, 14 et 28 jours depuis la confection de ces dernières

Calculer la masse volumique par la formule suivante :

$$\rho = M/V$$

Avec : M la masse de l'éprouvette en kg

V : volume de l'éprouvette en m³

I.5.2.5.2 Masse volumique De l'éprouvette cylindre

❖ Principe

Mesurer la masse volumique de béton durci à partir des éprouvettes cylindres de diamètre 16 cm et de longueur 32 cm.

❖ Mode opératoire

Faire peser les éprouvettes de béton dans 7, 14 et 28 jours depuis la confection de ces dernières

Calculer la masse volumique par la formule suivante :

$$\rho = M/V$$

Avec : M la masse de l'éprouvette en kg

V : volume de l'éprouvette en m³ ; $V = (\pi D^2 H)/4$

D : diamètre de l'éprouvette

H : longueur de l'éprouvette

I.5.2.6 Retrait

❖ Définition

C'est un phénomène de raccourcissement dû principalement au départ de l'eau libre interne, chimiquement, l'eau qui n'était pas nécessaire à la prise du ciment mais qui était indispensable pour faciliter sa mise en œuvre.

C'est-à-dire la diminution du volume apparent de la matière. On le mesure sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 50 cm de longueur et d'une section droite de 10* 10 cm, conservées à l'air à une température de 20 °C.

Les principaux paramètres agissant sur le retrait sont :

- La nature du ciment
- La proportion d'éléments fins ; le retrait si l'élément est fin.
- Le dosage en ciment ; le retrait augmente si la quantité du ciment augmente
- Le dosage en eau ; le retrait augmente si la quantité d'eau augmente
- La propreté et la nature des granulats
- Les dimensions de la pièce
- ❖ **Principe de l'essai** : on compare à différents temps t , la variation de longueur de l'éprouvette par rapport à sa longueur à un instant t_0 prise pour l'origine.
- ❖ **Mode opératoire**

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon en métal de longueur $L = 500\text{mm}$, soit $dl(t)$ la valeur lue sur le comparateur au temps t

Soit $l(t_0)$ la longueur de l'éprouvette au temps t_0 choisi comme origine. En général cette origine est prise au moment de démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes, la variation de la longueur au temps t sera :

$$Dl(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0)$$

La variation relative de la longueur est généralement désignée par ε et a pour expression : [28]

$$\varepsilon(t) = (dl(t)) / l = [dl(t) - dl(t_0)] / L$$



Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. -24: mesure de retrait

II Chapitre III

RESULTATS ET

DISCUSSION

Introduction

Nous présenterons dans ce chapitre les résultats des différents essais effectués sur les bétons confectionnés selon les différentes compositions mentionnées en détail dans le chapitre précédent. Avec l'influence de granulats de gravier de béton recyclé sur les propriétés mécaniques de béton.

Les essais réalisés sur le béton sont les suivants :

I.6 Etat frais

I.6.1 Affaissement

❖ Résultats obtenues

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-31 : **résultats obtenus de l'essai d'affaissement en (mm)**

formulation	C	E/C	% GBR	Affaissement (mm)
Form 1	350	0.55	0	205
Form 2	300	0.5	0	15
Form 3	300	0.6	0	50
Form 4	400	0.5	0	230
Form 5	400	0.6	0	280
Form 6	350	0.55	100	37
Form 7	300	0.5	100	0.5
Form 8	300	0.6	100	10
Form 9	400	0.5	100	25
Form 10	400	0.6	100	240
Form 11	350	0.55	50	180
Form 12	300	0.5	50	5
Form 13	300	0.6	50	40
Form 14	400	0.5	50	100

Form 15	400	0.6	50	240
---------	-----	-----	----	-----

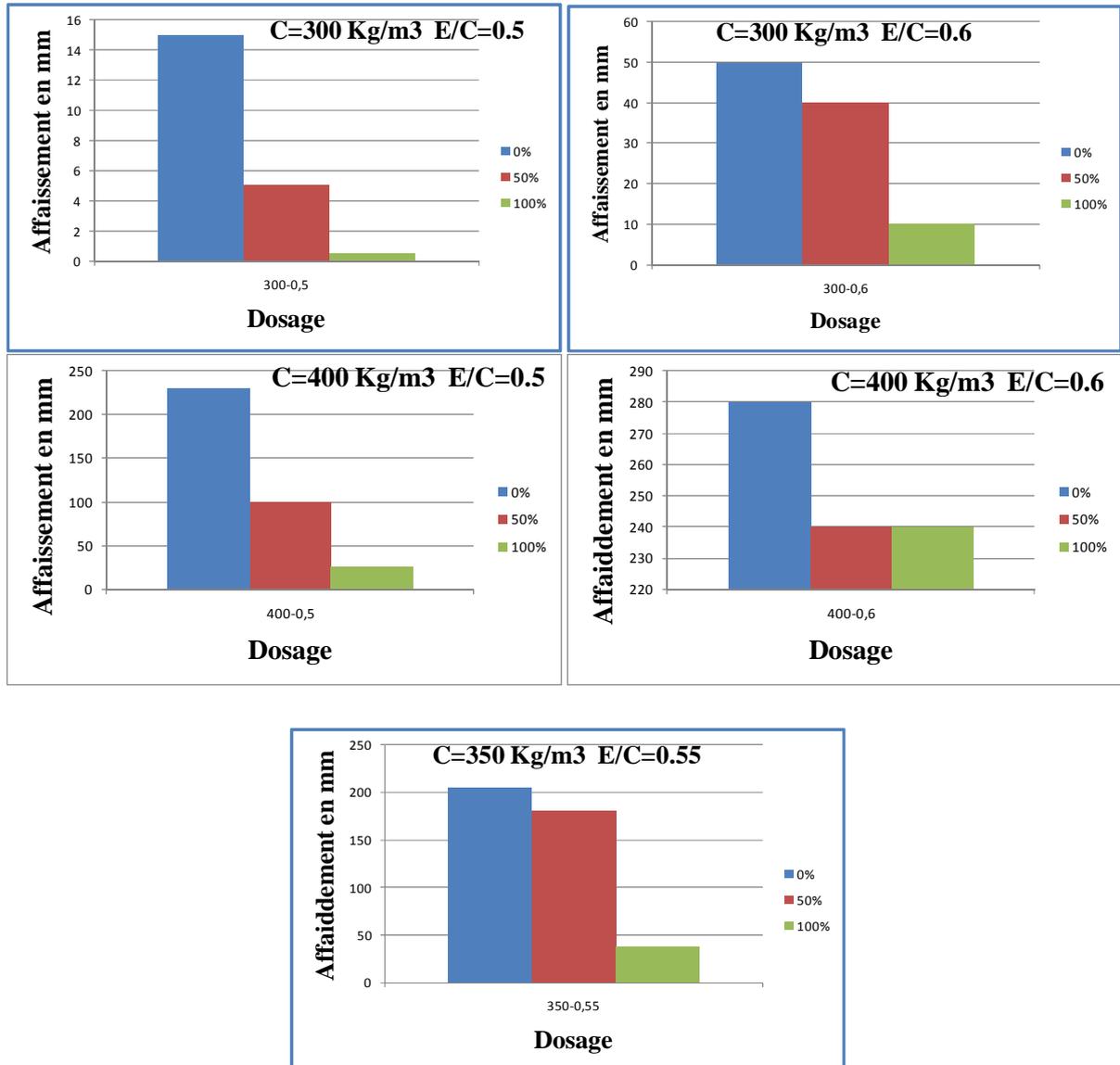


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-25 : **Variation de l'affaissement en fonction du taux de substitution de GBR**

- Pour la formulation $C=300 \text{ kg/m}^3$ et $E/C=0.5$ l'affaissement varie de 0 à 15mm, le béton constituant 50% de GBR représentent une diminution de l'affaissement de 67 % et celui constituer de 100% GBR est de 100% (affaissement égale à zéro) par rapport à celui qui constitue de gravier naturel.

- Pour la formulation $C=300 \text{ kg/m}^3$ et $E/C=0.6$ l'affaissement varie de 10 à 50mm, le béton constituant de 50% GBR représentent une diminution de l'affaissement de 20% et celui de 100% GBR est de 80% par rapport à celui qui constitue de gravier naturel.
- Pour la formulation $C=400 \text{ kg/m}^3$ et $E/C=0.5$ l'affaissement varie de 25 à 230mm, le béton constituant de 50% GBR représentent une diminution de l'affaissement de 56% et celui de 100% GBR est de 90% par rapport à celui qui constitue de gravier naturel.
- Pour la formulation $C=400 \text{ kg/m}^3$ et $E/C=0.6$ l'affaissement varie de 240 à 280mm, le béton constituant de GBR représentent une diminution de l'affaissement de 15% par rapport à celui qui constitue de gravier naturel
- Pour la formulation $C=350 \text{ kg/m}^3$ et $E/C=0.55$ l'affaissement varie de 37 à 205mm, le béton constituant de 50% GBR représentent une diminution de l'affaissement de 12% et celui de 100% GBR est de 81% par rapport à celui qui constitue de gravier naturel.

Les résultats illustrés sur la figure III-1 des affaissements varient avec le pourcentage de gravier de béton recyclé utilisé dans la formulation. Le mélange qui serait le plus ouvrable est le béton à base de gravier naturel, puisqu'il contient 50% GBR et enfin celui de 100%. Donc l'affaissement diminue avec l'augmentation de pourcentage de GBR.

La cause principale est due aux impuretés c'est pour ça qu'on a recours au lavage des granulats issus de la démolition. Pour conserver les mêmes caractéristiques que le béton constitué des granulats naturels.

Par contre le gravier naturel rend le béton plus plastique et assure une meilleure cohésion, du fait que les caractéristiques de la surface de ces grains sont plus lisses et absorbent peu d'eau au cours du malaxage.

I.6.2 La masse volumique

❖ Résultats obtenues

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. **-32 : résultats de la masse volumique de béton frais en (kg/m³)**

formulation	C	E/C	% GBR	Masse volumique kg/m ³
Form 1	350	0.55	0	2370
Form 2	300	0.5	0	2470
Form 3	300	0.6	0	2410
Form 4	400	0.5	0	2370
Form 5	400	0.6	0	2350
Form 6	350	0.55	100	2340
Form 7	300	0.5	100	2400
Form 8	300	0.6	100	2350
Form 9	400	0.5	100	2350
Form 10	400	0.6	100	2320
Form 11	350	0.55	50	2350
Form 12	300	0.5	50	2410
Form 13	300	0.6	50	2340
Form 14	400	0.5	50	2350
Form 15	400	0.6	50	2350

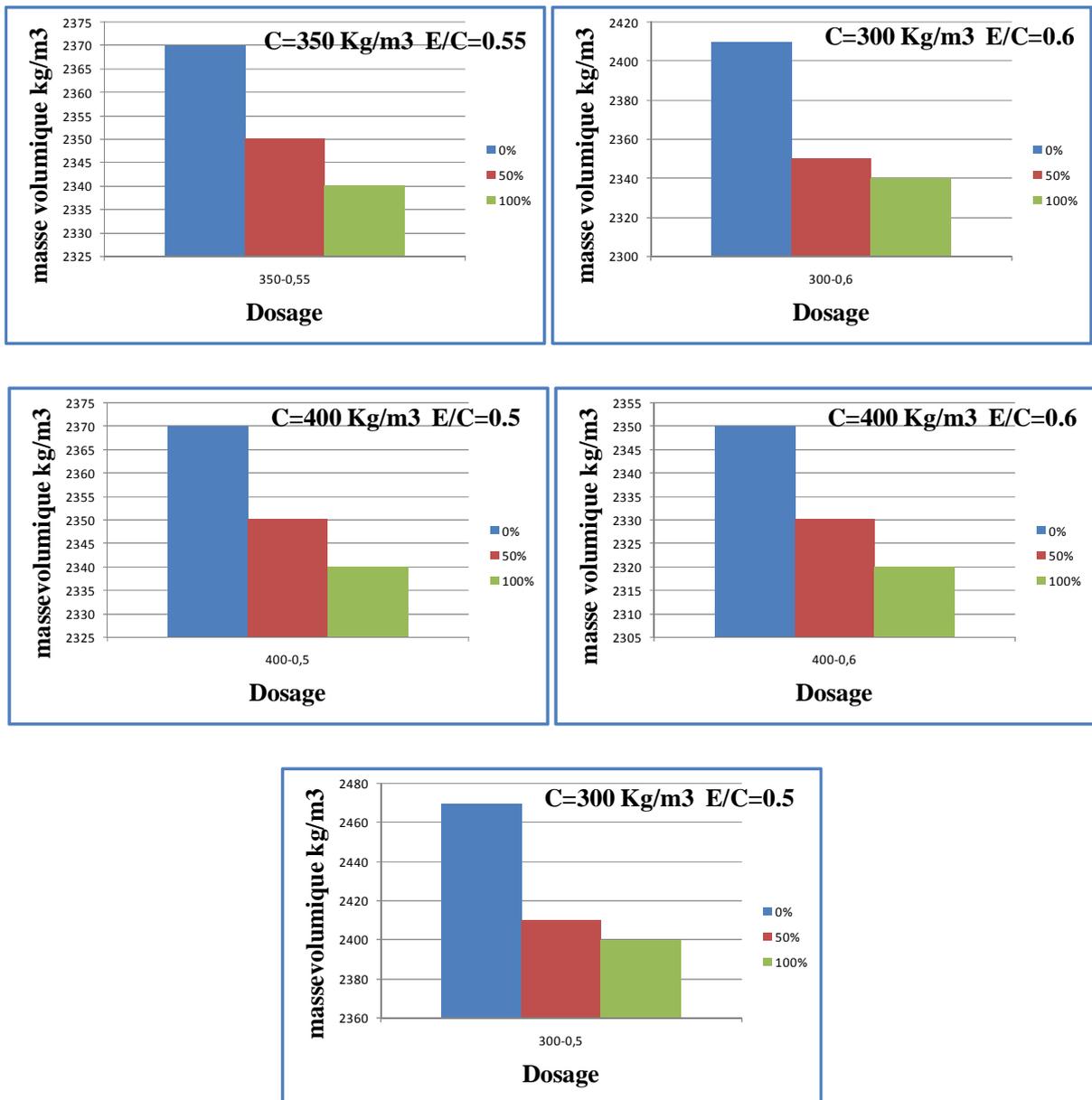


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-26 : Variation de la masse volumique en fonction du taux de substitution de GBR

- On constate d'après les résultats illustrés sur la figure III-2 qu'il n'y a pas de variation avérée de la masse volumique des mélanges. Les valeurs obtenues sont en général comprises entre 2340 et 2470 kg/m³.
- On constate aussi une légère diminution pour les bétons composés de gravier de béton recyclé à 50% et plus de diminution dans les bétons composés de gravier de béton recyclé à 100% environ 1 à 4% par rapport au béton composé de gravier naturel. Donc la masse volumique diminue avec l'augmentation de taux de GBR.

- Le béton à base des granulats recyclés présente une masse volumique inférieure à celui confectionné à partir les granulats naturels du fait que la masse volumique absolue de GBR est inférieure à celle de gravier naturel.

I.7 Etat durci

I.7.1 Compression simple

❖ Résultats obtenue

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-33 : résultats obtenus de l'essai de compression simple en (MPa)

formulation	C	E/C	% GBR	7 jours	14 jours	28 jours
Form 1	350	0.55	0	31.26	37.66	41.60
Form 2	300	0.5	0	45.47	46.19	51,42
Form 3	300	0.6	0	35.74	38.41	42,63
Form 4	400	0.5	0	36.76	40,24	41,6
Form 5	400	0.6	0	29.19	34,32	36,91
Form 6	350	0.55	100	35.98	39,73	40,4
Form 7	300	0.5	100	43,2	45.50	52,16
Form 8	300	0.6	100	33,88	36,78	39,68
Form 9	400	0.5	100	44.16	46.33	48,38
Form 10	400	0.6	100	31.71	34.06	36,47
Form 11	350	0.55	50	37.21	42,18	43,98
Form 12	300	0.5	50	45,86	48.44	54,24
Form 13	300	0.6	50	36.49	40.72	45,6
Form 14	400	0.5	50	38.74	41,11	41,97
Form 15	400	0.6	50	31.67	33.57	36.26

Remarque

- Entre 7, 14 et 28 jours, les résistances obtenues n'enregistrent pas d'augmentation sensible pour tous les mélanges de béton soit de gravier naturel ou de GBR (1 à 5 MPa).
- La valeur maximale de la résistance à la compression à 28 jours est de 51.42 MPa obtenue dans le béton de la formulation de dosage C= 300 kg/m³ et E/C=0.5.

- La valeur minimale de la résistance en traction à 28 jours est de 36,26 MPa obtenue dans le Béton de la formulation $C=400\text{kg/m}^3$ $E/C=0.6$

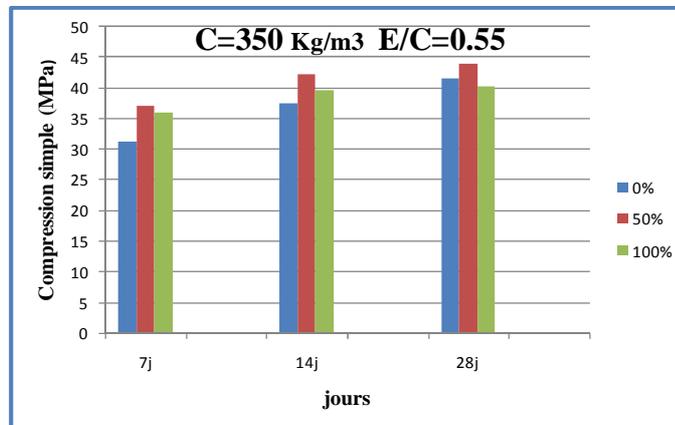


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-27 : **Variation de la compression en fonction du temps pour le dosage $C=350$ et $E/C=0.55$**

- On note que la résistance à la compression augmente de façon proportionnelle avec le temps, bien que le taux de variation ne soit pas similaire pour les trois mélanges de béton.
- On constate de la figure III-3 que les résistances à 7 jours des bétons constituent de 0%, 50 % et 100% de GBR atteignent (75%, 84%, 89% respectivement) par rapport aux résistances à 28 jours.
- Les mélanges à base de 50% GBR donnent les plus fortes résistances par rapport aux mélanges à base de granulats naturels et de 100% GBR et cela est probablement dû à l'hydratation de la pâte du ciment de GBR avec le gravier naturel et cela donne une résistance plus au béton par rapport au béton à base de gravier naturel.
- La résistance de béton à base de 100% GBR est supérieure à celle de béton de gravier naturel à 7 et 14 jours mais devient inférieure à 28 jours et cela revient à l'hydratation complétée de GBR avec la pâte de ciment.

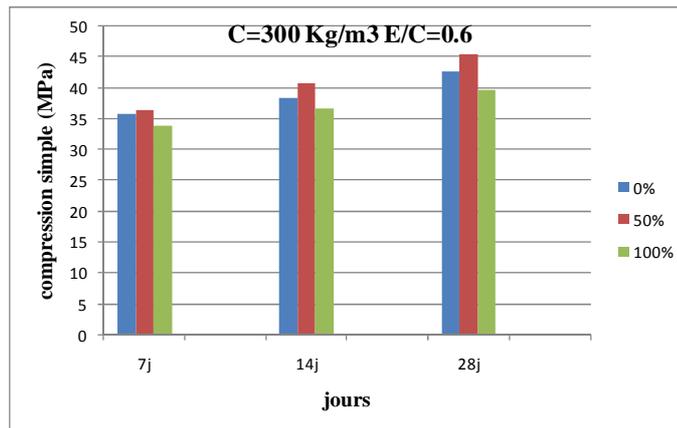


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-28 : **Variation de la compression en fonction du temps pour le dosage C=300 et E/C=0.6**

- On note que la résistance en compression augmente de façon proportionnelle avec le temps, bien que le taux de variation ne soit pas similaire pour les différents mélanges de béton.
- On constate de la figure III-4 que les résistances à 7 jours des bétons constituant 0%, 50 % et 100% de GBR atteignent (83%, 80%, 85% respectivement) par rapport aux résistances à 28 jours.
- Les mélanges à base de 50% GBR donnent des résistances élevées par rapport aux bétons à base de granulats naturels et cela est probablement dû à l'hydratation de la pâte du ciment de 50% GBR avec les granulats naturels et cela donne une résistance plus au béton constitué de 50% GBR par rapport au béton à base de granulats naturels.
- Par contre le béton à base de 100% GBR l'hydratation est complètement faite lors de l'ancienne confection et sa résistance reste inférieure à celle du béton de base de granulats naturels.

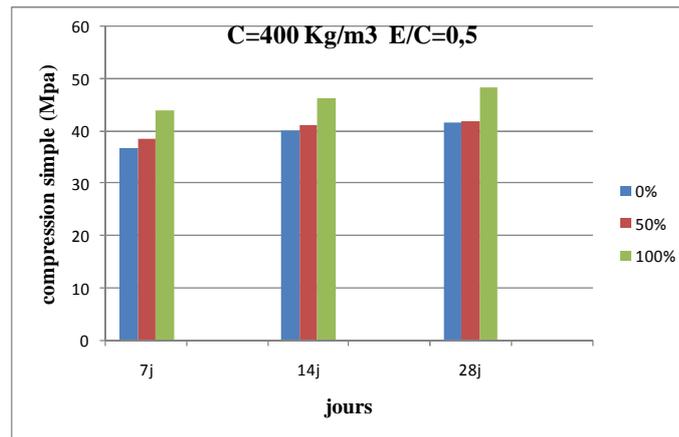


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-29 : **Variation de la compression en fonction du temps pour le dosage C=400 et E/C=0.5**

- On note que la résistance en compression augmente de façon proportionnelle avec le temps, bien que le taux de variation ne soit pas similaire pour les différents mélanges de béton.
- On constate de la figure III-5 que les résistances à 7 jours des bétons atteignent presque 90% par rapport aux résistances à 28 jours.
- Les mélanges à base de 100% GBR donnent les plus fortes résistances (48 MPa) par rapport aux mélanges à base de granulats de naturel et celui de 50% GBR et cela est probablement dû à la continuation de l'hydratation de la pâte du ciment de GBR et cela donne une capacité plus au béton.
- Par contre le béton à base de granulats naturels et celui de 50% GBR reste inférieure et donne presque la même résistance à 14 et 28 jours.

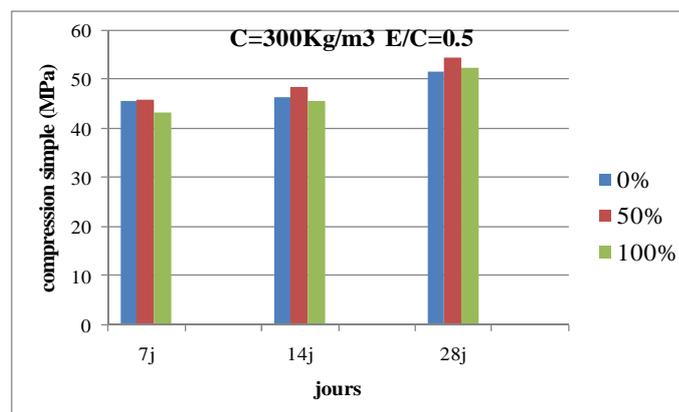


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-30 : **Variation de la compression en fonction du temps pour le dosage C=300 et E/C=0.5**

- On note que la résistance en compression augmente de façon proportionnelle avec le temps, bien que le taux de variation ne soit pas similaire pour les différents mélanges de béton.
- On constate de la figure III-6 que les résistances à 7 jours des bétons constituent de 0%, 50 % et 100% GBR atteignent (83%, 80%, 85% respectivement) par rapport aux résistances à 28 jours.
- Les mélanges à base de 50% GBR pour cette formulation donnent des résistances supérieure par rapport au mélanges à base de granulats de naturel (54 MPa) et cela est probablement dû à l'hydratation de la pâte du ciment de GBR avec le granulats naturels et cela donne une résistance plus au béton par rapport au béton à base de granulats naturels.
- Par contre le béton à base de 100% GBR sa résistance reste inférieure à celle de béton à base de granulats naturel à 7 et 14 jours, et devient supérieure à 28 jours a cause de l'hydratation lente.

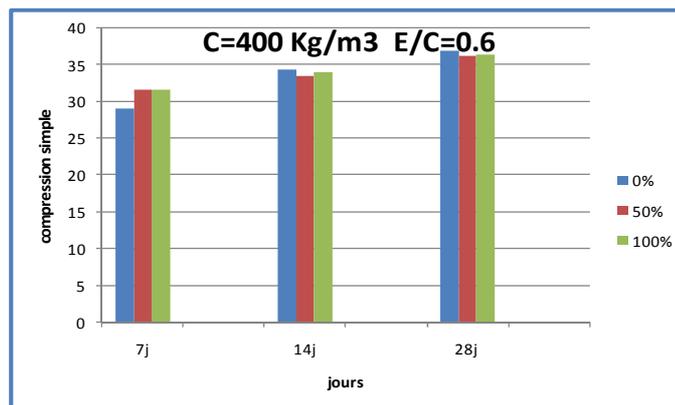


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-31 : **Variation de la compression en fonction du temps pour le dosage C=300 et E/C=0.55**

- La figure III-7 montre que cette formulation donne des résistances moins que les autres formulations et cela revient à la grande quantité de l'eau qui donne une formation liquide à ce béton
- La résistance à 7 jours dans le béton à base de GBR est supérieure à celle du béton à base de granulats naturels et cela revient au phénomène de l'hydratation, mais à 14 et à 28 jours, la résistance devient inférieure et cela parce que peut être le phénomène de l'hydratation est terminé avec des performances mécaniques et la bonne adhérence du granulat naturel avec la pâte de ciment. Et le durcissement retardé à cause de la grande quantité d'eau.

I.7.2 Traction par fendage

❖ Résultats obtenus

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-34 : résultats de l'essai de la traction par fendage en (MPa)

formulation	C	E/C	% GBR	7 jours	14 jours	28 jours
Form 1	350	0.55	0	3,47	3,82	4,05
Form 2	300	0.5	0	3,21	3,74	4,25
Form 3	300	0.6	0	3,37	3,85	3,93
Form 4	400	0.5	0	3,86	4,02	4,34
Form 5	400	0.6	0	2,97	3,24	3,55
Form 6	350	0.55	100	2,54	3,14	3,62
Form 7	300	0.5	100	2,69	3,45	3,74
Form 8	300	0.6	100	2,68	3,09	3,24
Form 9	400	0.5	100	2,81	3,11	3,25
Form 10	400	0.6	100	2,49	3,17	3,45
Form 11	350	0.55	50	2,83	3,14	3,68
Form 12	300	0.5	50	2,87	3,55	4,07
Form 13	300	0.6	50	2,88	3,69	3,86
Form 14	400	0.5	50	3,68	3,82	4,17
Form 15	400	0.6	50	2,88	3,08	3,53

Remarque

- Entre 7, 14 et 28 jours, les résistances obtenues n'enregistrent pas d'augmentation sensible pour tous les mélanges contenant du granulats naturels ou de GBR
- La valeur maximale de la résistance en traction à 28 jours est de 4,34 MPa obtenue dans le béton de la formulation de dosage $C=400\text{kg/m}^3$ et $E/C=0.5$.
- La valeur minimale de la résistance en traction à 28 jours est de 3,24 MPa obtenue dans le Béton de la formulation $C=300\text{kg/m}^3$ $E/C=0.6$

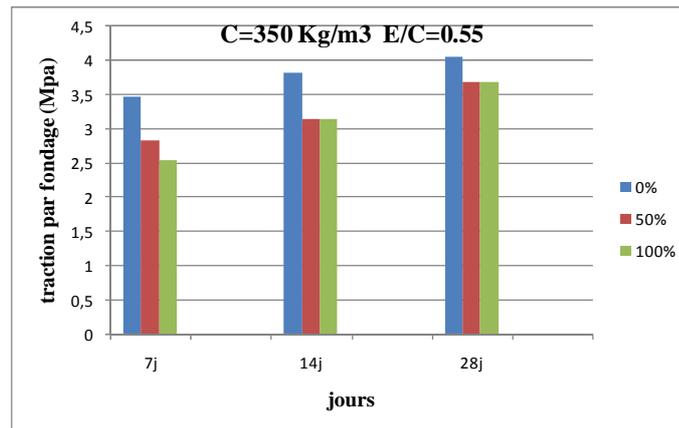


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-32 : Variation de la traction par fendage en fonction du temps pour le dosage C=350 et E/C=0.55

- La figure III-8 montre que la résistance à la traction augmente d'une façon proportionnelle entre 7, 14 et 28 jours, bien que le taux de variation ne soit pas similaire pour les trois différents mélanges de béton (entre 5 et 20%).
- La résistance en traction de béton à base de 50% GBR et 100% BGR représentent (81% et 73% respectivement) à 7 jours, (82% et 89% respectivement) à 14 et 28 jours.
- En ce qui concerne la résistance à la traction de béton à base de granulats naturel est plus importante que les bétons à base de GBR et cela est probablement dû à leurs meilleures résistances par rapport à celle de GBR et la meilleure adhérence de la pâte du ciment avec les granulats naturels.
- Le béton à base de 50% GBR est supérieur à celle de 100% GBR à 7 jours, mais donne presque la même résistance à la traction à 14 et 28 jours et reste inférieure à celle de béton à base de granulats naturels.

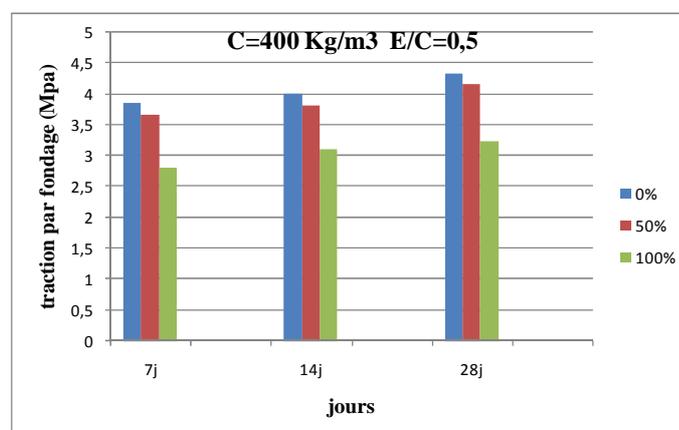


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-33 : Variation de la traction par fendage en fonction du temps pour le dosage C=400 et E/C=0.5

- La figure III-9 montre que la résistance en traction augmente de façon proportionnelle entre 7, 14 et 28 jours, bien que le taux de variation ne soit pas similaire pour les trois différents mélanges de béton (entre 5 et 10%).
- La résistance à la traction de béton à base de 50% et 100% GBR présente presque (95% 75% respectivement) à 7, 14 et 28 jours de béton à base de gravier naturel.
- En ce qui concerne la résistance à la traction de béton à base de gravier naturel est plus importante que les bétons à base de GBR, et celle de 50% GBR est supérieure à celle de 100% GBR, donc la résistance à la traction enregistrée diminuent avec l'augmentation du pourcentage de GBR, et cela est probablement dû à la faible hydratation de la pâte de ciment dans le béton à base de GBR et la très faible pour celui de 100% GBR.

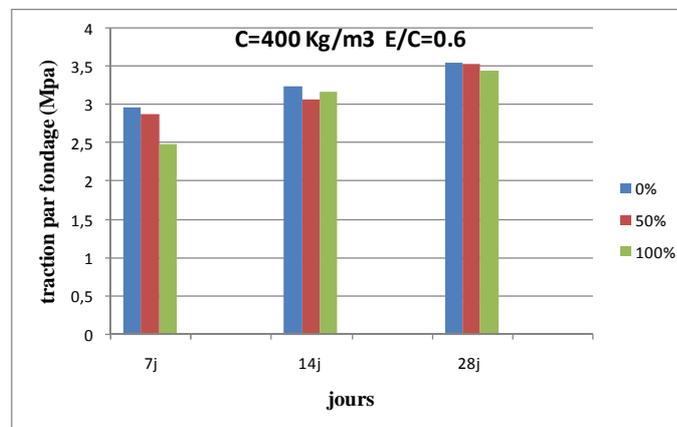


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-34 : **Variation de la traction par fendage en fonction du temps pour le dosage C=400 et E/C=0.6**

- La figure III-10 montre que la résistance en traction augmente de façon proportionnelle entre 7 à 14 et 14 à 28 jours, bien que le taux de variation ne soit pas similaire pour les trois mélanges de béton (entre 10 et 20%).
- La résistance à la traction de béton à base de 50% et 100% GBR présente presque (83% 96% respectivement) à 7journs, et (près de 97%) 14 et 28 jours de béton à base de gravier naturel.
- La résistance en traction de béton à base de gravier naturel est supérieure à celle de béton à base de GBR à 7 jours, mais on constate une augmentation agressive dans la résistance de béton à base de GBR à 14 et 28 jours et devienne presque la même résistance par rapport au béton à base de gravier naturel et cela est probablement dû à l'hydratation qui a effectuée lentement entre le GBR et la pâte de ciment.

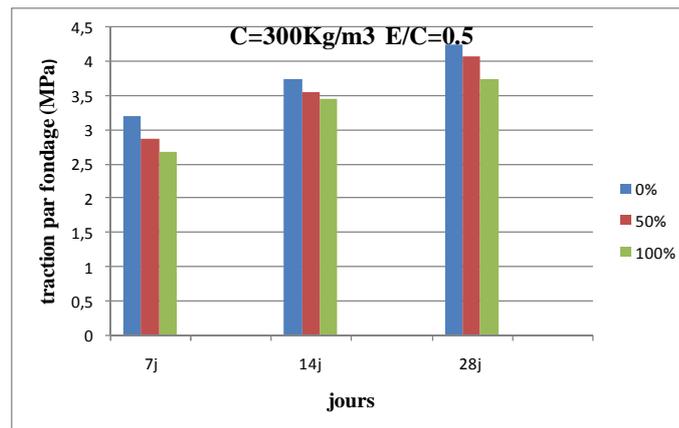


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-35 : Variation de la traction par fendage en fonction du temps pour le dosage C=300 et E/C=0.5

- La figure III-11 montre que la résistance en traction augmente de façon proportionnelle entre 7, 14 et 28 jours, bien que le taux de variation ne soit pas similaire pour les trois différents mélanges de béton (entre 10 et 20%).
- En ce qui concerne la résistance à la traction de béton à base de gravier naturel est supérieure à celle de béton à base de GBR, et celle de 50% GBR est supérieure à celle de 100% GBR, donc la résistance à la traction enregistrée diminue avec l'augmentation du pourcentage de GBR, et cela est probablement dû à la faible hydratation de la pâte de ciment dans le béton à base de GBR.

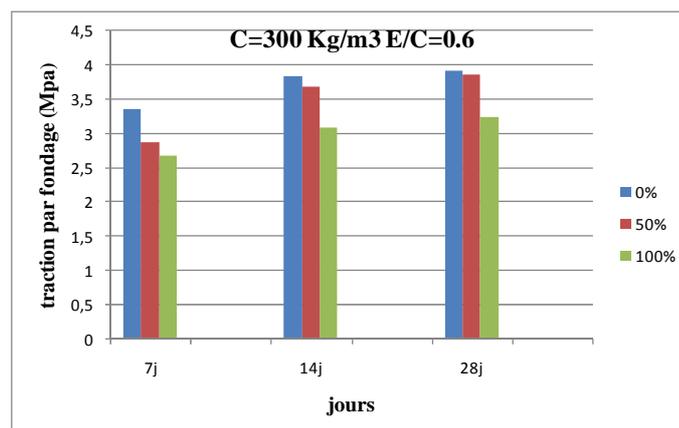


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-36 : Variation de la traction par fendage en fonction du temps pour le dosage C=300 et E/C=0.6

- La figure III-12 montre que la résistance en traction augmente de façon proportionnelle entre 7, 14 et 28 jours, bien que le taux de variation ne soit pas

similaire pour les trois différents mélanges de béton (augmentation de 13 à 20% de 7 à 14 jours et de 3 à 5% de 14 à 28 jours par rapport au béton à base de gravier naturel).

- La résistance à la traction de béton à base de GBR présente presque (80%) à 7 jours, et environ (90%) à 14 et 28 jours de béton à base de gravier naturel.
- En ce qui concerne la résistance à la traction de béton à base de gravier naturel est plus importante que les bétons à base de GBR, et celle de 50% GBR est supérieure à celle de 100% GBR, donc la résistance à la traction enregistrée diminuent avec l'augmentation du pourcentage de GBR, et cela est probablement dû à la faible hydratation de la pâte de ciment dans le béton à base de 50% GBR.

I.7.3 L'ultrason

❖ Résultats obtenus

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-35 : **résultats obtenus de l'essai de l'ultrason en (m/s)**

formulatio n	C	E/C	% GBR	7 jours	14 jours	28 jours
Form 1	350	0.55	0	4504,526	4639,42	4807,74
Form 2	300	0.5	0	4797,483	4967,463	5025,135
Form 3	300	0.6	0	4782,156	4824,433	4830,92
Form 4	400	0.5	0	4519,496	4792,33	4823,84
Form 5	400	0.6	0	4500,436	4559,296	4601,22
Form 6	350	0.55	100	4318,42	4429,95	4511,28
Form 7	300	0.5	100	4601,55	4730,2	4790,33
Form 8	300	0.6	100	4408,83	4482,313	467294
Form 9	400	0.5	100	4403,26	4509,83	4608,3
Form 10	400	0.6	100	4233,44	4451,11	4581,44
Form 11	350	0.55	50	4504,5	4587,15	4601,22
Form 12	300	0.5	50	4792,33	4807,69	4823,15
Form 13	300	0.6	50	4629,62	4633,08	4672,89
Form 14	400	0.5	50	4522,866	4529,953	4695,76
Form 15	400	0.6	50	4343,826	4431,223	4615,38

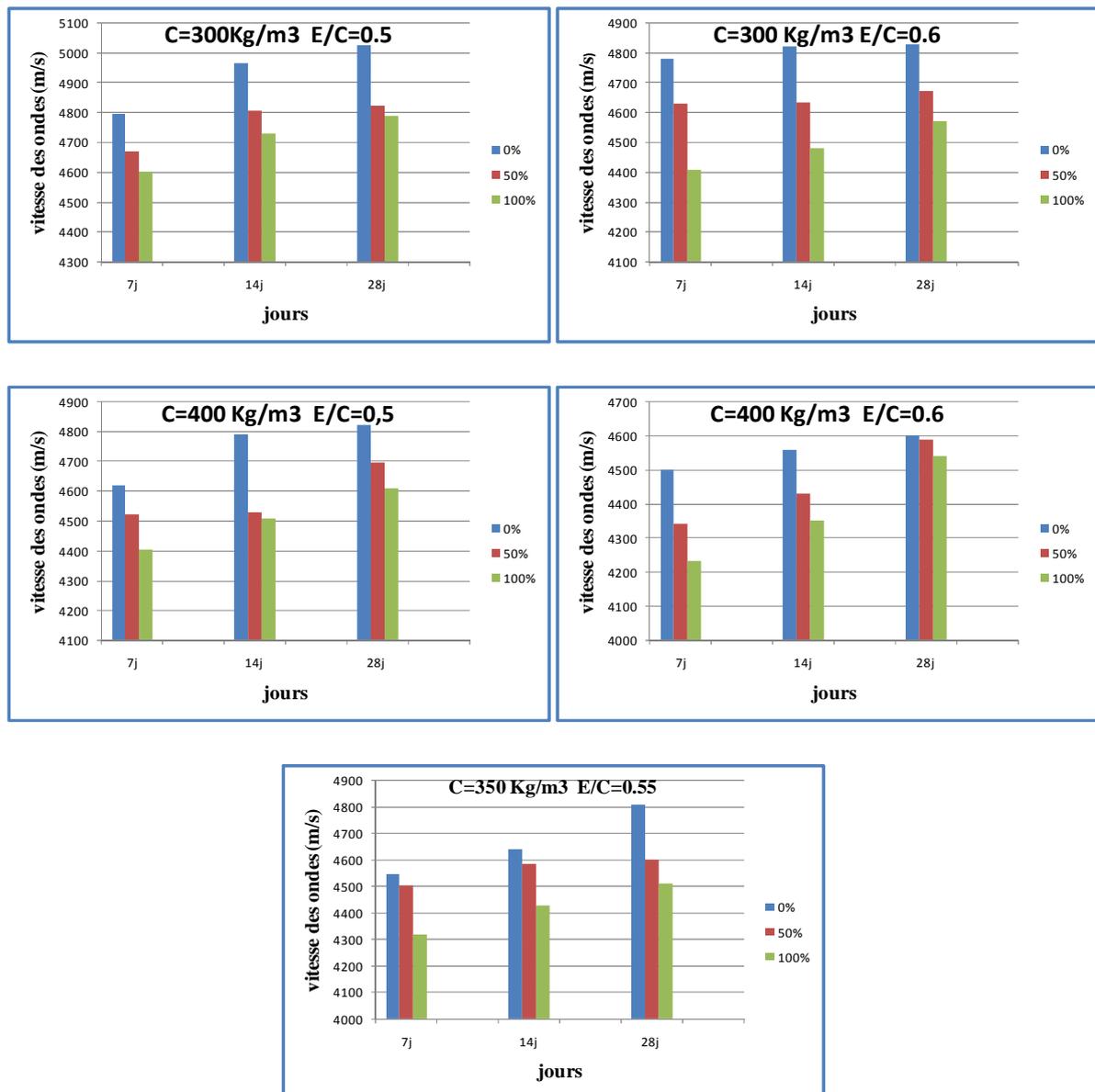


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-37 : variation de la vitesse des ondes ultrasonores en fonction de temps

- La vitesse des ondes ultrasonores augmente de 7, 14 et 28 jours pour toutes les formulations confectionnées et cela s'explique par l'hydratation continue des grains de ciment sachant que les éprouvettes ont été conservées dans l'eau, et cette hydratation fait continuer le phénomène de durcissement dans le temps.
- On constate d'après les résultats figure III-13 qu'il y a une variation de l'ultrason entre les mélanges. Les valeurs obtenues sont bonnes à excellentes en général comprises entre 4500 et 5000 m/s à 28 jours.

- On constate une légère diminution pour les bétons constituent de 50% GBR et plus de diminution dans les bétons constituent de 100% GBR par rapport au béton composé de gravier naturel. Donc la masse volumique diminue avec l'augmentation de taux de GBR
- Le béton à base des granulats recyclés présente une vitesse inférieure à celui confectionné à partir des granulats naturels et cela est probablement dû à des pores que contiennent les bétons à base de GBR et qui influent sur le temps de passage des ondes pour traverser la longueur de l'éprouvette, d'ici on conclut que l'augmentation du taux de GBR dans le béton, augmente les pores et les vides entre les grains et cela fait augmenter le temps pour traverser la longueur de l'éprouvette de béton, et cela fait diminuer la vitesse des ultrasons dans le béton.

I.7.4 Module d'élasticité

❖ Résultats obtenus

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-36 : résultats de l'essai de module d'élasticité

formulation	C	E/C	% GBR	Module d'élasticité
Form 1	350	0.55	0	49.511
Form 2	300	0.5	0	56.135
Form 3	300	0.6	0	50.829
Form 4	400	0.5	0	50.052
Form 5	400	0.6	0	44.110
Form 6	350	0.55	100	42.860
Form 7	300	0.5	100	49.772
Form 8	300	0.6	100	46.773
Form 9	400	0.5	100	45.392
Form 10	400	0.6	100	43.259
Form 11	350	0.55	50	44.967
Form 12	300	0.5	50	50.875
Form 13	300	0.6	50	47.165
Form 14	400	0.5	50	47.231

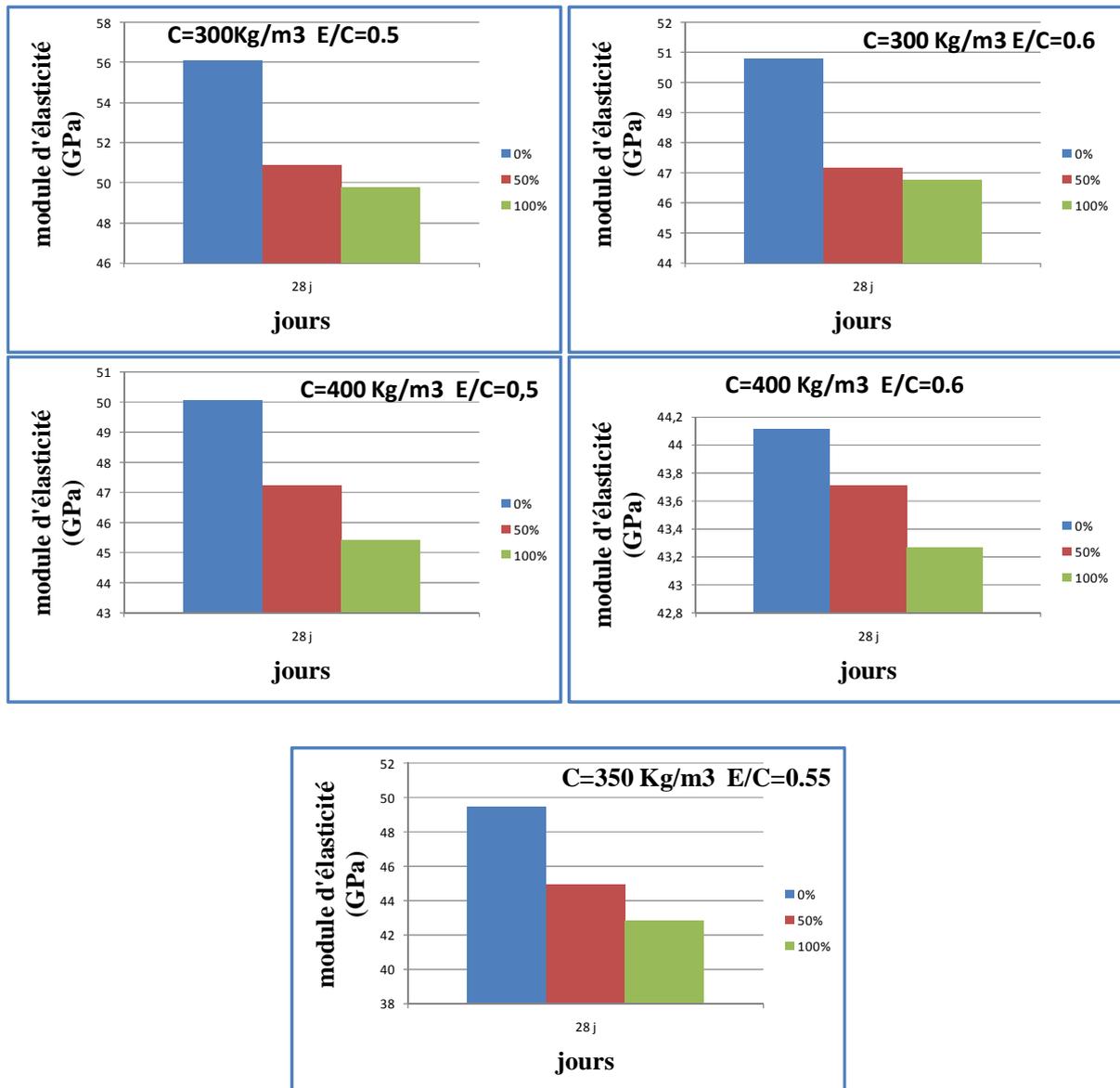
Form 15

400

0.6

50

43.705



Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. **-14:variation de module d'élasticité en fonction de du taux de substitution de GBR**

- On constate d'après les résultats figure III-14 qu'il y a une variation de module d'élasticité entre les mélanges. Les valeurs obtenues sont comprises entre 42 à 56 GPa.
- On constate une légère diminution pour les bétons constituent de 50% GBR et plus de diminution dans les bétons constituent de 100% GBR par rapport au béton de granulats naturel. Donc le module d'élasticité diminue avec l'augmentation de taux de GBR, et cela est probablement dû à la faible résistance des granulats de GBR par rapport aux granulats naturels.

I.7.5 La masse volumique

❖ Résultats obtenus

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document. **-37 : résultats de la masse volumique des éprouvettes cylindres**

formulation	C	E/C	% GBR	7 jours	14 jours	28 jours
Form 1	350	0.55	0	2370	2370	2380
Form 2	300	0.5	0	2460	2470	2470
Form 3	300	0.6	0	2410	2415	2420
Form 4	400	0.5	0	2350	2370	2390
Form 5	400	0.6	0	2290	2300	2315
Form 6	350	0.55	100	2340	2340	2340
Form 7	300	0.5	100	2380	2390	2410
Form 8	300	0.6	100	2355	2365	2380
Form 9	400	0.5	100	2340	2360	2375
Form 10	400	0.6	100	2255	2275	2290
Form 11	350	0.55	50	2350	2360	2360
Form 12	300	0.5	50	2410	2415	2430
Form 13	300	0.6	50	2370	2380	2400
Form 14	400	0.5	50	2345	2365	2380
Form 15	400	0.6	50	2270	2290	2305

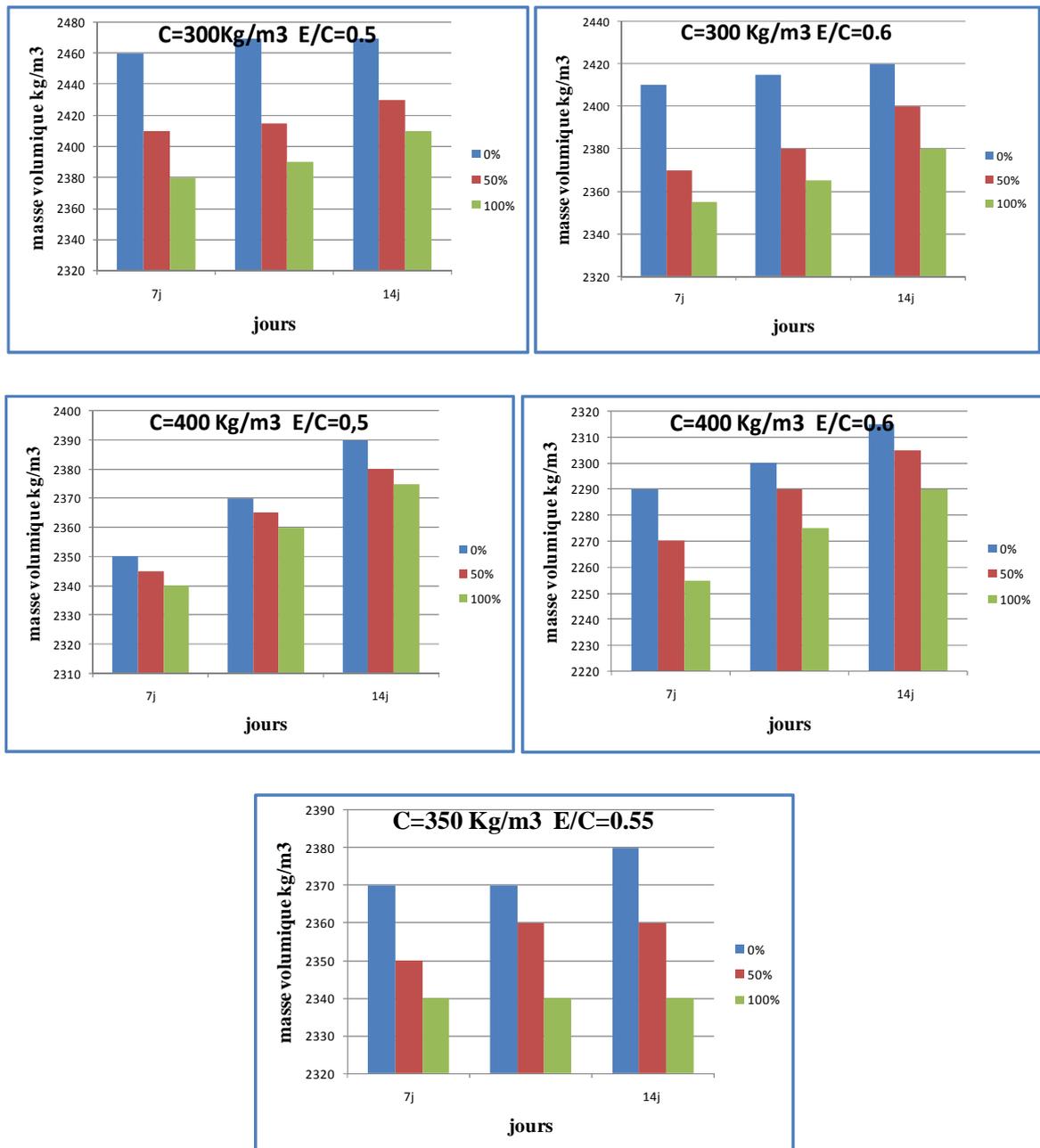


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-38 : variation de la masse volumique en fonction du temps

- La masse volumique augmente de 7, 14 et 28 jours pour toutes les formulations confectionnées et cela s'explique par l'hydratation continue des grains de ciment sachant que les éprouvettes ont été conservées dans l'eau.
- On constate d'après les résultats figure III-15 qu'il y a une variation de la masse volumique entre les mélanges. Les valeurs obtenues sont en général comprises entre 2290 et 2470 kg/m³.

- On constate une légère diminution pour les bétons constitués de 50% GBR et plus de diminution dans les bétons constitués de 100% GBR par rapport au béton composé de granulats naturels. Donc la masse volumique diminue avec l'augmentation du taux de GBR
- Le béton à base de granulats recyclés présente une masse volumique inférieure à celui confectionné à partir de granulats naturels du fait que la masse volumique absolue de GBR est inférieure à celle de granulats naturels.

I.7.6 Retrait

❖ Résultats obtenus

Tableau Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-38 : résultats obtenus de l'essai de retrait

Formulation	%GBR	E/C	C	1 jour	3 jours	7 jours	14 jours	28 jours
Form 1	0	0.55	350	0	4.3	11	18	22
Form 2	0	0.5	300	0	2.2	11	17	21
Form 3	0	0.6	300	0	2.5	11.88	19.8	21
Form 4	0	0.5	400	0	9.89	17.81	23.75	28
Form 5	0	0.6	400	0	10.5	20	25	28
Form 6	100	0.55	350	0	9.31	19.8	25	35.64
Form 7	100	0.5	300	0	5	11.2	24	28
Form 8	100	0.6	300	0	7.5	19.8	25	35.64
Form 9	100	0.5	400	0	17.82	25.74	33	38
Form 10	100	0.6	400	0	19.8	27	35.64	39
Form 11	50	0.55	350	0	7	13	23	29.68
Form 12	50	0.5	300	0	4.356	12.27	22.98	25.74
Form 13	50	0.6	300	0	6	14.89	23.78	26.5
Form 14	50	0.5	400	0	9.9	18	27.72	31
Form 15	50	0.6	400	0	11.2	22.3	31.2	37

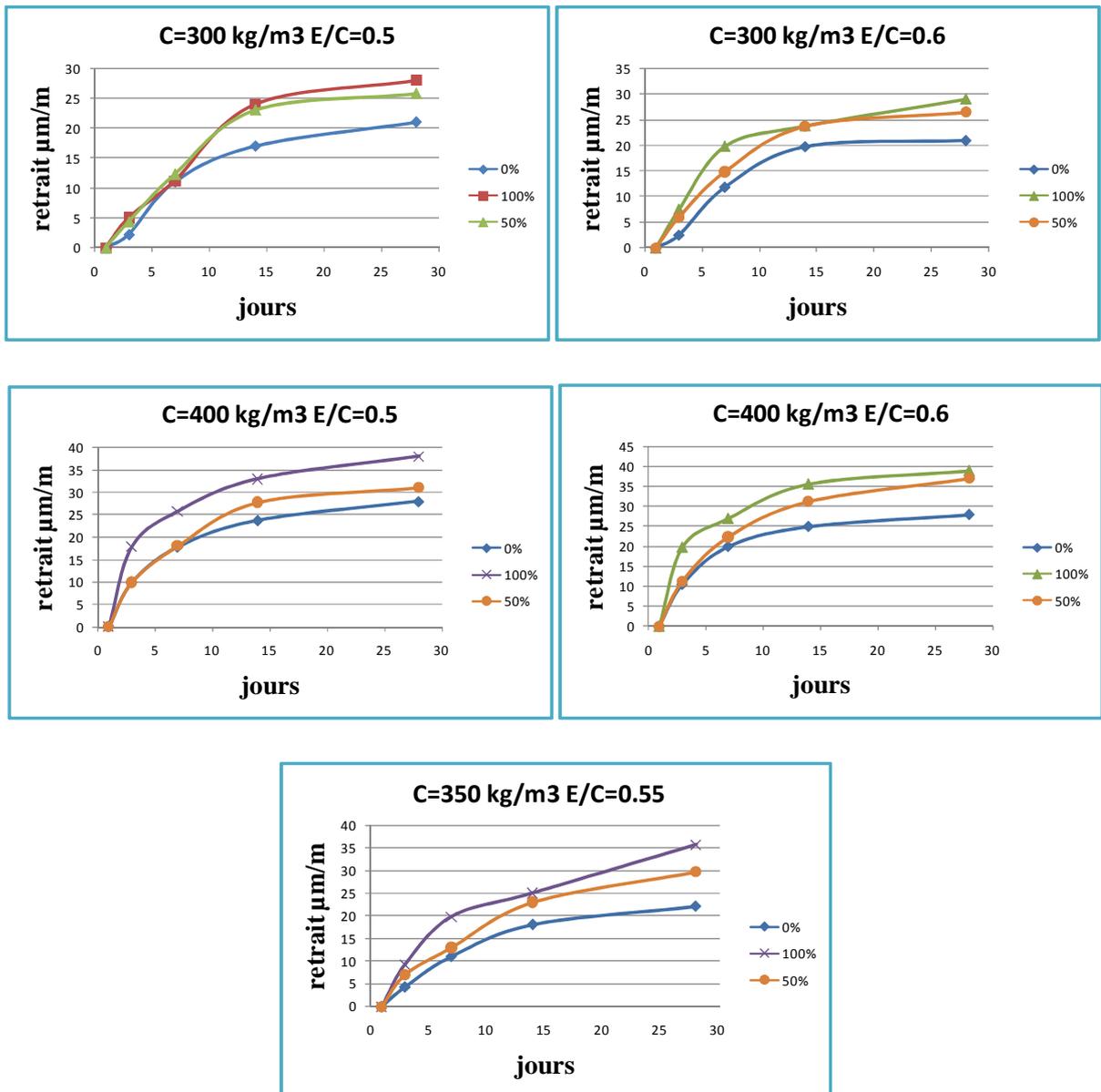


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-39 : **courbe de retrait pour le taux de substitution en fonction de temps**

Le béton commence à rétrécir dès que le processus de durcissement commence par la perte d'eau non consommée c'est-à-dire qu'il ne prend pas part à la réaction d'hydratation du ciment.

Les résultats illustrés sur les figures III-16 montrent que l'incorporation des GBR dans le béton augmente le retrait d'un pourcentage de 15 à 25% pour les formulations à 50% de GBR

et de 45 à 55% pour les formulations à 100% par rapport aux formulations de granulats naturels. L'augmentation de la pâte contenue dans le béton grâce à l'incorporation des granulats GBR pourrait être la raison principale de l'augmentation de retrait.

Les résultats aussi montrent que pour le même dosage en ciment le retrait augmente plus le rapport E/C augmente cela est bien sûr dû à la quantité importante d'eau évaporée.

Conclusion générale

Le béton est la ressource la plus consommée après l'eau dans le monde, l'impact environnemental de cette importante production est loin d'être négligeable. Cependant le recyclage du béton serait bénéfique sur différents plans :

- La réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- La réduction de consommation de combustibles.
- La réduction du prélèvement de ressources non renouvelables (granulats).
- La préservation des écosystèmes par un moindre recours aux carrières.
- La diminution du recours à la mise en décharges des déchets inertes.

Les granulats de béton recyclés présentent la caractéristique d'être composés de deux phases : le granulat naturel et le mortier qui l'enserme. Ce mortier est la cause des qualités moindres de ce type de granulats au regard des granulats naturels, dont les conséquences :

- Sur le béton frais : la demande en eau totale est accrue du fait de la présence du mortier dont l'absorption d'eau est importante. La rugosité de la surface (du fait de broyage) des granulats recyclés contribue elle-même à la croissance de la demande en eau totale, par une demande spécifique en eau efficace (hors absorption des granulats). Cette maîtrise de la demande en eau est la clé de la maîtrise des importants phénomènes de retrait que présentent les bétons de granulats recyclés.
- Sur le béton durci, les conséquences sont : la résistance à la compression et à la traction est moindre, la densité plus faible, module d'élasticité moindre et qui provoque un phénomène de déformation élevée qui est le retrait et le fluage.
- Enfin, la fraction mortier des granulats de béton recyclés peuvent contenir des espèces susceptibles qui provoquent des gonflements.

Aujourd'hui la filière usuelle de recyclage du béton de déconstruction est sa transformation en grave à usage routier (remblai, couche de forme). Le « retour du béton au béton » par l'usage différencié de sa phase granulat et sa phase matrice cimentaire permettrait un recyclage optimisé permettant sa réutilisation complète en tant que :

Granulat recyclé en technique routière, mais aussi au béton de structure et comme matière première (secondaire) de liant hydrauliques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

[01] : influences des déchets de marbre sur les caractéristiques et le retrait des bétons (mémoire de fin des études génie civile 2009/2010)

[03] : gestion des déchets (guides pour les établissements publique d'enseignements supérieurs ou de recherche)

[04] : les types de déchets et leur stockage (l'enfouissement par type d'ICPE quelque définition et abréviations utilisées la valorisation contacts utiles)

[05] : comportement des bétons à base des granulats recyclet (mémoire de magister filière : génie civil - option : le béton structurel arme et précontraint

[06] : recyclage et récupération de métaux ferreux et non ferreux (QUEBEC INC)

[07] : rapport de SARL ZIDANI MARBRE/BEJAIA réalisé au centre d'études et de service technologiques de l'industrie des matériaux de construction (CETIM) de boumerdes (rapport d'essai N°1097/07).2007

[08] : BERBAOUI.R: « Identification et analyse de l'endommagement par fatigue des matériaux granulaires a base polymère. » Soutenu le 21 janvier 2010 à l'université de Cergy Pontoise. Spécialité génie mécanique.

[09] : BARON. J et OLLIVIER.J : « Les bétons : bases et données pour leur formulation » Edition Eyrolles. 1999

[10] : OLLIVIER. J.P et VICHOT A. pour l'ATILH : « La durabilité du béton.»- Presses de l'école des Ponts et Chaussées - Paris - 2008.

[11] : Collection CIM béton .Fiches techniques. Tome 1 : 71 pages. Réf. G10. Editeur Cimbéton. Septembre 2005.

[12] : DREUX G., FESTA J. : 1995, "Nouveau guide du béton et de ses constituants", Huitième édition, Eyrolles.

[13] : Contexte normatif des bétons : Mise en page et réalisation : Amprincipe Paris (édition septembre 2005)

[14] : Simon Bernard - Grenoble Ecole de Management guide de béton- composition de béton

[15] : THIBAUT. B, BOUFFARD.M, HORLAIT.C, LACROIX.R : Projet IFIPS(2008)

[16] : DONGMO.E et BERTHE.J : « Caractérisation des déformations d'orniérage des chaussées bitumineuses. » Thèse : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005
[17/01/2006]

[17] : BRUNO.S : « Etude des mouvements d'eau dans les matériaux poreux appliquée à la résistance au gel et au comportement des crépis sur la maçonnerie. » Thèse No 848 (1990).
Département des matériaux. Ecole Polytechnique Fédérale de LAUSANNE pour l'obtention du grade de docteur es sciences techniques.

[18] : Fascicule de documentation de FD P 18-542 : « Granulats - Critères de qualification des granulats naturels pour béton hydraulique vis-à-vis de l'alcali-réaction. » Février 2004.

[19] : GUIDE METHODOLOGIQUE : Aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne, LCPC (2003).

[20] : GSM. ITALCEMENTI Group : Aide- mémoire qualité des granulats. 05/2009. www.gsm-granulats.fr

[21] : GHOMARI. F., BENDI – OUIS A : « Sciences des matériaux. » Université Aboubekr Belkaid. Département de génie civil.

[20] : (mémoire magister » étude comparative des caractéristiques et du comportement d'un béton de sable d dunes et d'un béton ordinaire modifiés à la poudre de caoutchouc » de l'école nationale polytechnique .2008.)

[21] : Caractéristiques fondamentales du béton (S-Laldji -Cours-ETS- hiver 2015)

[22] : « construire en béton » CLPC, collection du laboratoire central des ponts et chaussées de France 2002

[23] : LIBRAIRIE TECHNIQUE TECHNOSCIENCES : « Granulats sols ciments bétons. Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire. 03 / 2009. 344 pages.

[24] : (Caractéristiques fondamentales du béton) Steven H. Kosmatka ... et al. : «Dosage et contrôle des mélanges de béton». 8e éd. Association canadienne du ciment Portland, ISBN : 978-1-896553-22-1 A.Tagnit-Hamou : «Cours de microstructure», Université de Sherbrooke. Automne 2019 Technologie du béton : guf\formation\beton\technobeton v05_01-BETON Degussa Construction Chemicals France

[25] : Normalisation française P 18-554 décembre 1990 : Mesure des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et des cailloux.

[26] : Valorisation des déchets de chantier du BTP : comportement à haute température des bétons de granulats recyclés. Ecole doctorale Science et Ingénierie, spécialité Génie Civil

[27] : Mémoire de magister en génie civil : influence de la granularité sur les caractéristiques des granulats et sur les propriétés des bétons ordinaires

[28] : Mémoire magister (influence de déchet de marbre sur les propriétés de béton) département de génie civil, matériaux de construction

RESUME

Parmi les phénomènes de transport, l'absorption d'eau, la perméabilité à l'eau et les problèmes de variation dimensionnelle dus au retrait s'avèrent être primordiaux et d'une grande importance pour l'évaluation de la durabilité du béton recyclé à base de gros et fins granulats recyclés. Le gravier et le sable naturel sont remplacés partiellement (25, 50, 75 et 100%) par de gros, par de fins et par le mélange de gros et fins granulats à base d'ancien béton. Par comparaison avec un béton hydraulique à base de 100% de granulats naturels et selon les seuils proposés dans la littérature, les résultats de cette étude ont mis en évidence que l'absorption d'eau des bétons recyclés est élevée, la perméabilité à l'eau peut atteindre jusqu'au double de celle du béton de granulats naturels et le retrait est très important. Cette étude a aussi montré que le béton recyclé ayant l'absorption d'eau la plus grande et la perméabilité la plus élevée, correspond toujours au béton avec le plus grand retrait. Les propriétés physiques et mécaniques des bétons recyclés semblent être acceptables.

Mots clés

Granulats naturels, béton recyclé, résistance à la compression, traction par fendage, retrait, durabilité, ultrasons, affaissement, masse volumique, absorption, ciment.