

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## Mémoire de Master

Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : MATERIAUX EN GENIE CIVIL

Présenté par : KOUARTA HAYTHEM

SALAH YUCEF

---

**Thème : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DE LA  
DURABILITE DES BETONS A BASE DE DECHETS  
DE MARBRES**

---

Sous la direction de : Pr, BELACHIA MOULOUD

---

Septembre 2020

---

# DEDICACE

**Nous dédies ce modeste travail :**

**A mes chers parents**

**A mes chers grands parents**

**A mes sœurs**

**A toutes ma familles : **kouartaet Salah****

**A tous mes amis**

**«Mirou» «Lawina» «Loli» «Bilal» «Kadirou» «Seifou»**

**«issam»«rey»«sachinka»**

**«elmechbouh» «chouaib»**

**«nadir»**

**D. Haythem.**

**Youcef.**

# REMERCIEMENT

Nous remercions de tous nos coeurs notre encadreur monsieur *Belachia Mouloud* qui nous a aidé à élaborer notre mémoire de fin cycle.

Nous adressons nos vifs remerciements à monsieur chef de département de Génie Civil et Hydraulique ainsi que nos autres professeurs et enseignants .

Nous exprimons également notre gratitude aux membres du jury, qui nous ont honorés en acceptant de juger notre travail.

Nous Remercions tous ceux qui ont participé de près ou de loin, et aidé à réaliser ce modeste travail.

A stylized logo consisting of a blue arc on the left and right sides, with a cluster of blue squares of varying sizes and orientations in the center, resembling a globe or a network.

# SOMMAIRE

# SOMMAIRE

Dédicace	
Remerciement	
Sommaire	
Résumé	
Abstract	

## INTRODUCTION GENERAL

### CHAPITRE I: VALORISATION, RECYCLAGE ET ENVIRONNEMENT

I.1. Valorisation des déchets.....	01
I.1.1. Introduction .....	01
I.1.2. Type de valorisation des déchets.....	01
I.1.3. Différents types des déchets.....	01
I.1.3.1. Déchets ultimes.....	02
I.1.3.2. Déchets inertes.....	02
I.1.3.3. Déchets assimilés.....	02
I.1.3.4. Déchets verts.....	03
I.1.3.5. Déchets organiques.....	03
I.1.3.6. Déchets industriels banals.....	03
I.1.3.7. Les déchets dangereux .....	03
I.2. Recyclage des déchets.....	03
I.2.1. Techniques de recyclage .....	04
I.2.2. La chaîne du recyclage.....	04
I.2.3. Déchets recyclés.....	05
I.3. Gestion des déchets.....	06
I.3.1. Introduction.....	12
I.3.2. Principes de gestion des déchets.....	12
I.3.2.1. Le déchet, une ressource à valoriser.....	12
I.3.2.2. Le recyclage des déchets .....	13
I.3.3. Techniques de gestion des déchets.....	13
I.3.3.1. Les décharges.....	13
I.3.3.2.L'incinération .....	14
I.3.3.3. Point d'apport volontaire.....	14
I.3.3.4.Les déchetteries .....	15
I.3.3.5. Les filières de recyclage.....	15
I.3.3.6. Les trafics de déchets .....	15
I.3.3.7. Compost et fermentation.....	15
I.4. Déchets utilisés dans le domaine de génie civil.....	15
I.4.1. Les laitiers .....	16
I.4.2. Sous-produits provenant des centrales thermiques.....	16
I.4.3. Béton récupéré.....	17
I.4.4. Déchets provenant de l'exploitation de mines et de carrières.....	18
I.4.5. Déchets divers.....	19
I.5. Déchets en Algérie.....	19
I.5.1. Valorisation et recyclage des déchets en Algérie.....	21
I.5.2. Importance de déchets.....	21
I.5.3. Solution a adopté.....	22

I.5.4. Utilisation des déchets dans le domaine du génie civil.....	23
I.4.Travaux antérieurs et matériaux utilisés.....	24
I.4.1. Introduction .....	25
I.4.2. Déchets de marbre.....	25
I.4.3.Les méthodes de formulation du Béton.....	25
I.4.3.1. Méthode des Abaques de Dreux .....	27
I.4.3.2. Méthode de Bolomey.....	33
I.5. Conclusion .....	36

## CHAPITRE II: TRAVAUX ANTERIEUR ET MATERIAUX UTILISES

II.1. Introduction .....	38
II.2. LES MATERIAUX UTILISÉS.....	40
II.3. ESSAIS SUR LES GRANULATS.....	40
II.3.1. Analyse Granulométrique.....	40
II.3.1. 1.Coefficient d’aplatissement.....	45
II.3.2. Masse Volumique.....	48
II.3.2. 1.Masse volumique apparente.....	48
II.3.2. 2.Masse volumique absolue .....	50
II.3.3. Le Coefficient d’Absorption d’Eau .....	52
II.3.4. L’équivalent de sable.....	53
II.3.5. Essai Los-Angeles .....	55
II.3.6. Essai Micro-Deval.....	59
II.4. L’Adjuvant.....	60
II.5. Eau de gâchage .....	62
II-6. Le ciment.....	62
II.6.1. Caractéristique physique .....	63
II.6.2. Caractéristiques mécaniques.....	64
II.6.3. Composition chimique.....	64
II.6.4. Compositions minéralogiques .....	65
II.7. FORMULATION DU BETON.....	65
II.7.1. Programme expérimental.....	65
II.7.2 Formulation de béton ordinaire de référence .....	67
II.7.3 Les méthodes de formulation du Béton.....	68
II.7.4. Confection Des Éprouvettes.....	68
II.8. PRÉSENTATION DES ESSAIS EXPERIMENTAUX .....	69
II.8.1. Essai Sur Béton Frais .....	69
II.8.1.1. Mesure de la consistance .....	69
II.8.1.2. Masse volumique à l’état frais.....	73
II.8.1.3. Essai teneur en air occlus.....	73
II.8.2. Essais Sur Béton Durci.....	74
II.8.2.1. Masse volumique à l’état Durcis.....	74
II.8.2.2. Essais destructifs .....	75
II.8.2.2.1. Essai de compression .....	75
II.8.2.2.2. Essai de flexion .....	77
II.8.2.3. Essais non destructifs.....	78
II.8.2.3.1. Essai au scléromètre.....	79
II.8.2.3.2. Essai d’auscultation dynamique.....	80
II.9. Conclusion .....	84
Conclusion générale	

**Liste des figures**  
**Liste des tableaux**  
**Bibliographique**

## Résumé :

L'objectif de cette étude est d'étudier la possibilité d'utilisation des déchets de marbre comme substituant massique partiel ou total du gravillon dans la composition d'un béton ordinaire. Les granulats issus de la valorisation de déchets de Marbre ont été ajoutés au mélange en remplacement partiel du volume total du granulat à différents pourcentages (0, 25, 50, 75, et 100%). L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'influence du granulat sur les propriétés du béton ordinaire à l'état frais (masse volumique, ouvrabilité et teneur en air) et à l'état durci (résistances mécaniques dans différents milieux de conservation). Les résultats obtenus montrent que la présence de ces granulats est non préjudiciable vis-à-vis de la rhéologie du matériau. Ce travail confirme que la présence du granulat de marbre dans le béton ordinaire conduit à une augmentation de la résistance mécanique de ce dernier.

## ملخص:

الهدف من هذه الدراسة هو دراسة إمكانية استخدام نفايات الرخام كبديل جزئي أو كلي لكتلة الحصى في تركيب الخرسانة العادية. تمت إضافة الركام الناتج عن استرجاع نفايات الرخام إلى الخليط كبديل جزئي للحجم الكلي للركام بنسب مختلفة ( 0 ، 25 ، 50 ، 75 ، و 100%). الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة تأثير الركام على خصائص الخرسانة العادية في الحالة الطازجة (الكثافة، قابلية التشغيل ومحتوى الهواء) وفي الحالة المتصلبة (المقاومة الميكانيكية في بيئات مختلفة). تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن وجود هذه الركام ليس ضارا فيما يتعلق بانسيابية المادة. يؤكد هذا العمل أن وجود ركام الرخام في الخرسانة العادية يؤدي إلى زيادة المقاومة الميكانيكية للخرسانة.

## Summary :

The aim of this study is to study the possibility of using marble waste as a partial or total substitute for gravel mass in regular concrete installation. Aggregates from marble waste recovery were added to the mixture as a partial substitute for the total volume of aggregates in different proportions (0, 25, 50, 75, and 100%). The main objective of this work is to study the effect of aggregates on the properties of normal concrete in the fresh state (density, workability and air content) and in the hardened state (mechanical resistance in different environments). The results obtained show that the presence of these aggregates is not harmful to the smoothness of the material. This work confirms that the presence of marble aggregates in normal concrete increases the mechanical resistance of the concrete.



## **Abstract:**

The exhaustion of the natural aggregate layers and the difficulties to open new careers force to seek new sources of supply.

The recycling and the valorization of waste are today regarded as a solution with a future in order to answer the deficit between production and consumption and to protect the environment.

This memoir seeks to highlight the possibility of using the marble scrap like aggregates for hydraulic concrete.

In order to formulate the studied concretes, the characteristics of the aggregates recycled (marble scrap) were been analysed.

The study consists in comparing the properties of a concrete of reference at the fresh and hardened state, those of the concretes incorporating of the marble aggregates in substitution of a voluminal fraction from sand, gravels and both whole with rates of substitution of (0%, 25%, 50%, 75%, 100%).

The work shows the main interest which could have the development and the provision of the experimental results concerning the use of the marble scrap like aggregates recycled for hydraulic concretes.

Key words: Aggregates, Recycling, Valorization, Environment, Marble, Characterization, Concretes, Tests.

## **INTRODUCTION GENERALE**

L'activité du bâtiment et des ouvrages d'art consomme des ressources naturelles et génère des quantités non négligeables de déchets, le besoin en bétons nouveaux pour répondre à la demande des grands projets d'aménagement nécessite de puiser davantage dans les carrières de granulats alluvionnaires, Ceci peut entraîner comme conséquence la pollution de nappes d'eau souterraines et la transformation des sites naturels, de plus la réglementation sur l'ouverture de nouvelles carrières, oblige à chercher des solutions dans le domaine du recyclage.

L'utilisation de granulats recyclés, bien qu'ils ne représentent qu'une faible part de la production, ne cesse de progresser. Leur réemploi dans le mortier et le béton conduit à une économie de granulats alluvionnaires. Le recyclage paraît d'autant plus intéressant qu'il génère un secteur d'activité nouveau prisent charge par l'ensemble« activités locales et industriels».

La présente étude porte sur l'analyse des caractéristiques et le réemploi des granulats recyclés de béton et de contribuer à la réutilisation des déchets et sous-produits dans la fabrication des bétons et mortiers, Le programme de cette recherche comprend donc des travaux portant sur la valorisation de ces matériaux avec intégration de matières premières algériennes, Valoriser ces granulats issus des bétons de démolition ou d'autres déchets pour la fabrication d'un béton hydraulique peut étendre leur domaine d'utilisation actuel. Malgré plusieurs études de recherche pour une éventuelle utilisation avec des liants hydrauliques pour la construction d'ouvrages ou de bâtiments, les granulats recyclés trouvent peu d'application en tant que granulats de béton. Néanmoins des Pays comme la Suisse ou encore le Danemark ont adopté des normes pour la fabrication de béton de granulatsrecyclés.

Cette valorisation présente un intérêt d'ordre économique. En effet, le réemploi des matériaux de démolition pourrait être envisagé directement sur site ou sur les plateformes de recyclage chargées du traitement. Ces plateformes pourraient alors s'occuper de la fabrication de bétonà base de ces granulats recyclés. La diminution des coûts de transports des granulats et des déchets de démolition constitue l'enjeu économique principal de ce projet, les granulats n'étant pas toujours disponibles à proximité des chantiers deconstruction.

Par ailleurs, ces granulats recyclés pouvant se substituer aux granulats naturels, ceci diminuerait l'épuisement des ressources naturelles.

En outre, le code de l'environnement (modifié par ordonnance le 17 décembre 2010) précise que « tout producteur ou détenteur de déchets est responsable de la gestion de ces déchets jusqu'à leur élimination

ou valorisation ». De ce fait, le recyclage et le réemploi des déchets inertes représentent des solutions intéressantes et s'intègrent au concept de développement durable.

L'évolution actuelle de la réglementation en matière d'environnement conduit les producteurs de déchets à les valoriser ou les réutiliser en particulier dans différents domaines de la construction et par voie de conséquence de limiter la mise en décharge uniquement des déchets ultimes après stabilisation.

Les voies actuelles de valorisation des granulats recyclés sont des applications qui n'exigent pas de performances très élevées, telles que les blocs préfabriqués de construction, le béton de fondation, le béton de propreté. Ces granulats sont également réutilisés comme fond de forme dans les constructions routières, comme remblai et comme fond de tranchée ou drainage de plate-forme.

Plusieurs recherches à travers le monde ont permis de poser le problème de la faisabilité des bétons à base de granulats recyclés, les résultats obtenus à cet effet sont encourageants, cependant la substitution partielle ou totale des granulats naturels par des granulats recyclés conduit à des bétons présentant des performances inférieures à celles des bétons classiques.

La condition fondamentale pour la valorisation de ces granulats est qu'ils remplissent la fonction requise dans la position qu'ils occupent et qu'ils continuent à remplir celle-ci durant toute l'existence de la construction sans manifester d'effets secondaires négatifs qui conduisent à des désordres dans l'ouvrage.

Afin d'atteindre nos objectifs, notre thèse a été structurée sur base de deux grandes parties : La première partie fait l'objet d'une recherche bibliographique tandis que la deuxième partie concerne l'approche expérimentale.

Dans le premier chapitre, nous présentons une revue bibliographique détaillée sur les déchets, la politique et l'utilisation de ces produits dans le génie civil ainsi que l'intérêt et l'activité de

Recyclage des matériaux de construction et de démolition sont présentes. L'aspect normatif du recyclage et la situation en Algérie sont également soulignés.

Le deuxième chapitre présente les propriétés et l'utilisation des granulats recyclés dans les bétons, une banque de données sur les études antérieures nous a permis de faire une confrontation de résultats.

Nous tenons à signaler que le chapitre trois, qui devrait être réservé aux résultats et discussion n'a pas pu être réalisé faute de disponibilité des laboratoires, qui étaient initialement programmés, à savoir les

Laboratoires pédagogiques et de recherche de l'université de Guelma, les laboratoires LTPEst et LNHC.

Enfin, les conclusions générales ainsi que les recommandations pour de futurs travaux sont présentées.

# **Chapitre I :**

## **Valorisation**

### **Recyclage et Environnement**

## **I.1. Valorisation des déchets**

### **I.1.1. Introduction**

Un déchet tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériaux, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon (loi française du 1975 du code de l'environnement)

La nouvelle politique de gestion des déchets ménagers, initiée par les pouvoirs publics dans le respect du cadre réglementaire, oblige les collectivités locales à privilégier la valorisation des déchets.

Elle consiste dans « **le réemploi, le recyclage ou toutes autres actions visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie** » (loi française du 13/07/1992). Cette valorisation peut prendre plusieurs formes: organique, matière et énergétique. 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 traficabilité.

L'approche globale du déchet permettra d'en définir son devenir ,à savoir quel type de valorisation choisir.

### **I.1.2. Type de valorisation des déchets**

Il existe plusieurs types de valorisation des déchets :

- **Le recyclage:** Il permet un gain de matière cependant, le tri est indispensable .Toutes les matières ne sont pas recyclables d'un point de vue technique ou économique .Le coût de la matière recyclée est lié à celui de la matière première.

Même les déchets dangereux tels que les peintures ou solvants sont recyclables. Seuls les déchets de matériaux à base d'amiante sont interdits dans cette filière.

-**Le compostage:** C'est une bonne méthode de valorisation biologique qui permet la formation d'un apport organique le compost.

-**L'épandage ;** des boues issues des stations d'épuration plus particulièrement ,permet un amendement organique des terres agricoles.

-**L'incinération avec récupération d'énergie:** Cette valorisation énergétique permet la production de chaleur et / ou d'électricité tout en réduisant considérablement le volume de déchets .L'énergie issue de déchets ménagers pourra être de 1, 5 millions de MW par an.

**-La réutilisation ou le réemploi :** Cela permet un gain de consommation d'énergie et de matière .Ainsi, l'apparition du déchet est différée. La récupération de l'eau de pluie, par exemple, permet de prévenir d'une sur consommation d'eau lorsqu'on lave sa voiture ou on arrose son jardin .Ainsi, on évite de créer des déchets en surconsommant mais on en crée en récupérant.

**- Le stockage :** en centre de stockage de déchets ultimes(CSDU) ou centre d'enfouissement technique (CET).

Pour que cette valorisation se fasse dans des conditions optimales, il est très important qu'un tri des déchets soit effectué. Ainsi, les différents types (ou catégories) de déchets peuvent être envoyés vers les filières de valorisation leur correspondant .

### **I.1.3. Différents types des déchets**

#### ***I.1.3.1. Déchets ultimes***

Le déchet ultime est un déchet dont on a extrait, par collectes séparatives ou tri:

-Des matériaux,

-La fraction biodégradable en vue du traitement biologique ou de l'épandage agricole,

-Des produits usagés faisant l'objet de filières dédiées : Véhicules hors d'usage, vêtement...

#### ***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 bio dégradables et ne détériorent 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 proviennent essentiellement des chantiers de bâtiment 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 et granulats non pollués et sans mélange, les enrobés bitumeux, sans goudron...

### ***1.1.3.3. Déchets assimilés***

Les déchets ménagers et assimilés recouvrent les ordures ménagères qui proviennent des ménages et tous les déchets générés comme tels par les collectivités locales (déchets des artisans ou commerçants).

### ***1.1.3.4. Déchets verts***

Déchets végétaux des parcs et jardins (gazon, branchages...)

### ***1.1.3.5. Déchets organiques***

Il s'agit de :

- Déchets végétaux des parcs et jardins (déchets verts)
- Déchets organiques de la cuisine (restes de repas, épluchures, papiers, papier journal, fleurs coupées, marc de café, filtres à café, sachets de thé, coquilles d'œufs, etc....)
- Boues

Ces déchets sont valorisables par réduction à la source (compostage individuel), compostage des déchets collectés pour revente du compost, traitement pour épandage agricole, méthanisation...).

### ***1.1.3.6. Déchets industriels banals***

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

Ils sont assimilables aux ordures ménagères et suivent des traitements similaires : recyclage, valorisation énergétique, stockage.

### ***1.1.3.7. Les déchets dangereux***

- **Déchets industriels spéciaux:** Ces déchets figurent en raison de leurs propriétés dangereuses sur une liste fixée en conseil d'Etat. Exemples : déchets contenant de l'arsenic, du plomb ; constitués de Boues de peinture, d'hydrocarbures ; provenant de l'industrie pétrolière, etc....

- **Déchets ménagers spéciaux:** Ce sont les déchets à risques contenus dans les déchets ménagers, tels que les aérosols, colles, détergents, détachants insecticides, peintures, piles, tubes néons, produits de nettoyage.



Il peut s'agir de ce qu'on appelle également les DTQS : Déchets toxiques en quantité dispersée.

Les déchets dangereux ne peuvent pas être déposés dans des installations de stockage recevant d'autres catégories de déchets .Ils doivent faire l'objet de valorisation de matière (solvants, piles, batteries, hydrocarbures.....) et valorisation énergétique des déchets incinérés (production de vapeur et /ou d'électricité) .

## **I.2. Recyclage des déchets**

### ***Pourquoi faut-il recycler ses déchets ?***

- Préserver nos ressources naturelles qui ne sont pas infinies,
- Réduire la mise en décharge,
- Donner une seconde vie à nos déchets,
- Recycle, c'est maîtriser les coûts d'élimination de nos déchets.

### ***Les avantages***

Le recyclage des déchets présente un double avantage, Il permet d'abord d'économiser de la matière première et donc de préserver les ressources naturelles de notre planète .Il permet également de réduire le volume et le poids de nos poubelles et donc de limiter les risques de pollution de l'air et des sols.

Une loi Française a donc vu le jour sur le plan national le 13 juillet 1992 pour inciter et encadrer le tri des déchets recyclables et susciter un changement de comportement de la part de tous les citoyens.

Cette politique s'étend sur 10 ans et stipule qu'aucun déchet récupérable ne devra être stocké ou détruit après 2012. Les seuls déchets admis dans les centres d'enfouissement seront les déchets qui ne peuvent être valorisés et que nous appelons les "déchets ultimes".

### **I.2.1. Techniques de recyclage**

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage :

- Le recyclage dit « chimique » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants.

- Le recyclage dit « mécanique » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer.

-Le recyclage dit « organique » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais ou du carburant tel que le biogaz.

### **I.2.2. La chaîne du recyclage**

#### **Étape 1: Collecte de déchets**

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

La collecte sélective, dite aussi « séparative » et souvent appelée à tort « tri sélectif » est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui jette le déchet le trie lui-même.

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

#### **Étape 2: Transformation**

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

#### **Étape 3: Commercialisation et consommation**

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

En fin de vie, ces produits seront probablement jetés, et certains d'entre eux pourront être à nouveau récupérés et recyclés .

### I.2.3. Déchets recyclés

Les déchets recyclés et leur procédés de recyclage sont présentés dans les tableaux suivant :

<b>Produit</b>	<b>Procédés</b>
Eau	Récupérée et transportée par les réseaux d'égout. Traitée dans des stations d'épuration pour être à nouveau consommée.
Acier	Repris en l'état par des sociétés de récupération de métaux. Fabrication des pièces de moteur, des outils, des boîtes de conserve, etc.
Aluminium	Repris en l'état par des sociétés de récupération de métaux. Fabrication des canettes, du « papier » d'emballage, des constituants d'automobile (culasses, jantes, boîtes de vitesses, etc.)
Caoutchouc	Repris en l'état par des sociétés de récupération. Les pneus hors d'usage sont utilisés pour produire des bacs à fleurs, des tréteaux, des panneaux d'insonorisation, des tuiles de revêtement de sol, l'asphalte caoutchuté, etc.
Carton	Repris en l'état par des sociétés de récupération. Fabrication d'autres types de papier et de carton.
Gravats	Repris en l'état par des sociétés de récupération. Broyés sous forme de granulats employés à nouveau dans le secteur de bâtiment ou le secteur industriel.
Papier	Repris en l'état par des sociétés de récupération. Fabrication d'autres types de papier et de carton, dalles pour faux-plafonds.

Tableau I-1: Produits recyclés et leurs procédés de recyclage (partie 1)

<b>Produit</b>	<b>Procédés</b>
Plastique	Repris en l'état par des sociétés de récupération. Fabrication de sacs, de récipients et couvercles pour produits non alimentaires, de meubles de jardin, de vêtements, de jouets,

	de mobilier urbain, de clôtures, de tuyaux, de pièces d'automobile (pare-chocs, batteries, ...), d'éléments de signalisation routière, de cônes de voirie, etc.
Textile	Repris en l'état par des sociétés de récupération. Fabrication de textile et de pâte à papier.
Verre	Repris en l'état par des sociétés de récupération. Refonte des articles en verre pour en faire des neufs.
Brique alimentaire	Repris en l'état par des sociétés de récupération. Les briques broyées, lavées, essorées et séchées, sont triées en papier est transformé en bidon, bouteille, tuyau, etc.
Equipement électrique et électronique	Les appareils sont récupérés, démantelés, déchetés et broyés, au moyen d'une chaîne. Les fragments valorisables sont récupérés sous forme de métaux ferreux, non-ferreux, câbles, plastiques, etc.
Déchets liquides à composante minérale. Tels que déchets de revêtement de surface, boues résultant du travail des métaux, dépollution d'eau, etc.	Traitement physico-chimique minéral : neutralisation des acides et des bases, transformation des produits toxiques solubles en composés insolubles précipités au sein de la solution, séparation des solides et des liquides par décantation ou par filtre.
Déchets liquides polyphasiques. Tels que résidus de lavage et de dégraissage des cuves et des sols.	Traitement physico-chimique organique en deux étapes : séparation par décantation et séchage par incinération.
Déchets organiques. Tels que huile, peinture, vernis, etc.	Incinération avec valorisation énergétique : production d'énergie et destruction des déchets peu combustibles. Avant rejet à l'atmosphère, les gaz restants sont traités au charbon actif par adsorption, et neutralisés.
Déchets synthétiques.	Incinération avec valorisation énergétique : production d'énergie

Huile synthétique, produits de nettoyage des automobiles.	et destruction des déchets peu combustibles
---	---

Tableau I-1: Produits recyclés et leurs procédés de recyclage(partie2)

<b>Produit</b>	<b>Procédés</b>
Boues de déchets industriels	Chauffage des déchets dans le but d'en réduire la masse et de valoriser les sous-produits. Il s'agit de techniques de séchage ou séchage par incinération en utilisant différentes techniques. La vapeur issue du séchage peut être recyclée comme source de chaleur dans le procédé à partir d'une chaudière. En fonction des résidus obtenus par séchage, ceux-ci peuvent être stockés pour une utilisation ultérieure.
Déchets liquides biodégradables. Tels que les eaux issues d'un traitement physicochimique, eaux de pollution accidentelle, ...	Traitement biologique qui consiste à transformer la matière organique en une boue par des moyens physiques. Les micro-organismes dégradent et assimilent certaines substances organiques par sécrétion d'enzymes. La boue biologique est extraite de l'eau par décantation ou flottation. Pour accélérer le processus de dépollution dans les procédés aérobiques, on utilise un apport d'oxygène (de l'air ambiant, ou pur) dans les bassins.
Les hydrocarbures liquides sont en particulier des résidus de nettoyage de fond de bac ou des concentras huileux provenant d'opérations physico-chimiques (filtration, décantation).	Séparation de l'eau, des hydrocarbures et des sédiments par des procédés physiques (décantation, débouage, centrifugation, filtration). Valorisation thermique des hydrocarbures récupérés.
Hydrocarbures solides. Concerne les	Les déchets d'hydrocarbures sont mélangés à des réactifs neutralisants. Ce processus lent produit une séparation des

<p>hydrocarbures pâteux et/ou solides tels que les déchets d'hydrocarbures issus de raffinerie et de dépôts pétroliers ; ou tels que les déchets pétroliers d'activités portuaires : boues de station de déballastage, boues de curage de bassins, déchets de marée noire, etc.</p>	<p>hydrocarbures sous forme simple (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O). Combinée avec des réactifs, cette matière sous forme physique homogène devient stable, hydrophobe, oléophile et commode à entreposer. La matière finale servira comme terre de recouvrement, absorbant oléophiles, ou incorporée aux enrobés routiers.</p>
---	---

Tableau I-1: Produits recyclés et leurs procédés de recyclage(partie3 )

<b>Produit</b>	<b>Procédés</b>
<p>Métaux. Concerne les métaux tels que fûts, conteneurs, emballages légers, mâchefers, sels d'argent de bains photographiques, etc.</p>	<p>Les fûts, conteneurs, emballages légers (en fer blanc) qui ne sont pas réutilisés en l'état après nettoyage sont compactés et transportés aux aciéries). Les mâchefers, dépollués et ôtés de tout élément métallique sont réutilisés par l'industrie métallurgique. Les sels d'argent sont stockés et transférés dans un réacteur agité, pour précipiter le sulfure d'argent. Après séparation, on obtient une boue qui sera calcinée pour la récupération de lingots d'argen</p>
<p>Les PCB ou polychlorobiphényles sont des dérivés chimiques chlorés plus connus sous le nom commercial de « Pylène »]. Les PCT</p>	<p>Incinérés et détruits à très haute température dans des unités spécifiques. Dans certaines unités, le chlore contenu dans le PCB est recyclé par incinération, sous forme d'acide chlorhydrique.</p>

(polychloroterphényles) sont des produits proches.	
PCB des transformateurs et condensateurs contenant du pyralène.	Chaque appareil ou équipement est vidé de son contenu liquide, démonté, et traité suivant la nature des parties actives, noyaux, bobines, cuve, etc. Après décontamination, le cuivre et le papier sont séparés et réemployés.
Solvants. Cétones, hydrocarbures aliphatiques, méthylbenzène, esters, glycols et solvants chlorés (trichloroéthane) issus d'activités industrielles légères (ateliers de réparation automobile) ou lourdes (métallurgie, construction automobile).	La régénération de solvants utilise la distillation simple, puis par distillation fractionnée sur colonne, pour séparer les différents constituants des solvants usés. Après distillation, les solvants sont « séchés ». L'eau résiduelle est extraite par fixation sur un support ne réagissant pas chimiquement avec le solvant. Valorisation thermique des hydrocarbures récupérés.
Sédiments provenant de marées noires tels que tout déchet ramassé sur une côte polluée en hydrocarbures.	Les déchets organiques sont lavés avec un solvant adapté, puis rincés. Le sable récupéré servira de sable de recouvrement, ou sera incorporé aux enrobés routiers. Les hydrocarbures extraits contribuent à la valorisation thermique et énergétique.

Tableau I-1: Produits recyclés et leurs procédés de recyclage (partie4)

Produit	Procédés
Lixiviat	Valorisation du biogaz de décharge afin d'évaporer les lixiviats et d'oxyder thermiquement les vapeurs. L'objectif est de proposer un traitement «zéro rejet liquide» et d'adapter une technique souple et susceptible de traiter tout type de lixiviats. Étapes de traitement :

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• combustion du biogaz par torchère ;</li> <li>• récupération de l'énergie contenue dans les gaz</li> <li>• évaporation de l'eau</li> <li>• traitement par oxydation thermique des vapeurs issues de l'évaporation</li> </ul>
Sol pollué tel que les anciennes décharges.	Les techniques de traitement et de reconstitution des sites et sols pollués sont appliquées selon les polluants en présence, par forage, échantillonnage et analyse.
Tube fluorescent	Les tubes en verre et les culots métalliques sont démontés, séparés, stockés dans des conteneurs spécifiques avant la phase de démercurisation. Le verre et les poudres sont récupérés et les parties métalliques sont cédées à des spécialistes du retraitement des métaux.
Pile alcaline et pile saline	<p>1/ Préparation au traitement mécanique. Le procédé utilisé est un procédé hydro métallurgique (attaque chimique/traitement à froid) qui permet une valorisation de 80 % des composants de la pile.</p> <p>À la réception des lots, les piles sont triées afin de séparer les piles salines et alcalines traitées sur place. Les autres modèles (piles boutons) sont dirigées vers des installations spécialisées. Les piles sont broyées afin d'obtenir un mélange, puis tamisé pour séparer les poudres de charbon, de zinc, de manganèse, de potassium, de mercure, des autres parties plus denses. Ces dernières sont dirigées vers un séparateur magnétique qui extrait la partie métallique (fer) revendue à l'industrie métallurgique, et vers un séparateur qui dissocie, le papier et le plastique, du cuivre et du zinc.</p> <p>2/ Préparation au traitement chimique. La poudre de pile est attaquée à l'acide sulfurique et le magma obtenu est filtré sur filtre presse. On obtient deux produits distincts : un résidu carboné composé de graphite et un liquide contenant des</p>



	<p>sulfates mixtes dissouts dans l'eau.</p> <p>Le mercure est extrait de ce liquide sous forme métallique à une pureté de 99 %, par un procédé appelé "cémentation", et est envoyé ensuite en affinage. Le liquide purifié est neutralisé puis concentré et évaporé afin d'obtenir des sulfates de zinc et de manganèse en poudre, produits finis directement commercialisables. Le mercure, le zinc et le ferromanganèse sont extraits des piles et réutilisés dans la fabrication de nouveaux produits.</p>
--	---

Tableau I-1: Produits recyclés et leurs procédés de recyclage (partie 5)

### **I.3. Gestion des déchets**

#### **I.3.1. Introduction**

La gestion des déchets est la collecte, le transport, le traitement (le traitement de rebut), la réutilisation ou l'élimination des déchets, habituellement ceux produits par l'activité humaine, afin de réduire leurs effets sur la santé humaine, l'environnement, l'esthétique ou l'agrément local. L'accent a été mis, ces dernières décennies, sur la réduction de l'effet des déchets sur la nature et l'environnement et sur leur valorisation .

La gestion des déchets concerne tous les types de déchets, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux, chacun possédant sa filière spécifique. Les manières de gérer les déchets diffèrent selon qu'on se trouve dans un pays développé ou en voie de développement, dans une ville ou dans une zone rurale, que l'on ait affaire à un particulier, un industriel ou un commerçant. La gestion des déchets non toxiques pour les particuliers ou les institutions dans les agglomérations est habituellement sous la responsabilité des autorités locales, alors que la gestion des déchets des commerçants et industriels est sous leur propre responsabilité .

La gestion des déchets est un processus qui intègre à la fois la production des déchets et leur traitement.

#### **I.3.2. Principes 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):

-La Réduction de la production de déchets,

-La Réutilisation des déchets,

- Le Recyclage,

### **I.3.2.1. Le déchet, une ressource à valoriser**

Une idée relativement récente consiste à considérer les déchets comme une ressource à exploiter et non comme des rebuts dont il faut se débarrasser. Ce processus de valorisation des déchets s'appelle valorisation matière, ou recyclage, si on récupère des matériaux réutilisables, et valorisation énergétique si on obtient à la place de l'énergie. Traiter les déchets comme des matières premières devient de plus en plus courant, en particulier dans les agglomérations où l'espace pour ouvrir de nouvelles décharges se raréfie. L'opinion publique évolue sérieusement vers la position estimant que, sur le long terme, on ne peut pas se contenter de se débarrasser des déchets alors que les matières premières ne sont disponibles qu'en quantité limitée .

### **I.3.2.2. Le recyclage des déchets**

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) .

Afin que les déchets recyclables puissent être effectivement recyclés, il est nécessaire qu'un pré-tri soit effectué en amont. Ce dernier a pour objectif principal d'éviter un souillage des déchets recyclables par des déchets non recyclables. En effet, ceci pourrait les rendre impropres au recyclage. D'autre part, il permet d'orienter les différents déchets vers la bonne destination .

### **I.3.3. Techniques de gestion des déchets**

Traditionnellement, la gestion des déchets urbains, industriels et commerciaux consistait à les récupérer puis à les stocker. Une fois collecté, divers traitements peuvent être appliqués aux déchets. Le but de ces traitements peut être de réduire la dangerosité des déchets, de revaloriser les matériaux par le recyclage, de produire de l'énergie à partir des déchets .

Les méthodes de récupération varient beaucoup entre les différents pays et régions. Dans les agglomérations canadiennes le tri sélectif est la méthode la plus répandue de récupération des déchets et/ou des recyclables et des déchets organiques suivant un planning défini. En Australie, la méthode la plus courante de stockage des déchets solides est la décharge, car le pays est vaste et la densité de population est faible. À l'opposé au Japon il est plus fréquent d'incinérer les déchets car le pays est petit et la place est rare .

### **I.3.3.1. Les décharges**

Stocker les déchets dans une décharge est la méthode la plus traditionnelle de stockage des déchets, et reste la pratique la plus courante dans la plupart des pays. Mettre les déchets en décharge a été longtemps une solution pratique et peu coûteuse. Les inconvénients des décharges sont; les nuisances pour le voisinage, risques de fuites dans les sols et les cours d'eau. Utiliser une décharge qui minimise les impacts sur l'environnement peut être une solution saine et à moindre coût pour stocker les déchets .

### **I.3.3.2. L'incinération**

Est le processus de destruction d'un matériau en le brûlant; est une technique de destruction par le feu. Elle est connue pour être une méthode pratique pour se débarrasser des déchets contaminés, comme les déchets médicaux biologiques. Beaucoup d'organisations utilisent aujourd'hui l'exposition des déchets à haute température pour les traiter thermiquement (cela inclut aussi la gazéification et la pyrolyse). Cette technique inclut la récupération du métal et de l'énergie des déchets solides municipaux comme le stockage adapté des résidus solides (mâchefers) et la réduction du volume des déchets.

L'incinération est critiquée parce que des dioxines cancérigènes sont produites par les incinérateurs, surtout par les installations anciennes. Afin de contrôler les quantités de ces dioxines, une norme française s'applique depuis le 28 décembre 2005 sur tous les incinérateurs, fixant un seuil limite d'émission de dioxine.

L'amélioration du tri de ces déchets à forte teneur en eau permettrait de limiter les quantités de déchets incinérés d'une part et de faciliter leur combustion d'autre part.

Les mâchefers sont les résidus solides de l'incinération des déchets. 25% des quantités entrantes ressortent sous forme de mâchefers. Ce sont des mélanges de métaux, de verre de silice, d'alumine, de calcaire, de chaux d'imbrûlés et d'eau. Ils subissent un tri par aimant et courant afin de retirer les

différents métaux qui peuvent ensuite être recyclés. Suivant leur qualité et leur stabilité, le reste des mâchefers est soit stocké en décharge, soit utilisé en remblais pour les routes.

#### **I.3.3.3. Point d'apport volontaire**

Il s'agit de conteneur permettant un recyclage spécifique mais limité en général aux verres, papier-cartons et parfois les emballages (plastique et métaux).

Ce système de collecte est déchetterie permet le tri sélectif de manière plus efficace (les déchets sont alors triés dès le départ).

#### **I.3.3.4. Les déchetteries**

Sont un moyen simple d'évacuer des déchets encombrants, déchets de bricolage ou déchets spéciaux, Une déchetterie accueille différents types de déchets, que les usagers déposent dans différentes bennes en fonction du déchet. Ces déchets sont ensuite orientés selon leur type vers une filière de valorisation, de recyclage ou vers un incinérateur ou un centre d'enfouissement, pour la partie des déchets non recyclables. On trouve en général dans les déchetteries des bennes pour les différents déchets suivants : bois, ferrailles, cartons, déchets verts, gravats, encombrants.

#### **I.3.3.5. Les filières de recyclage**

Depuis 1992, une grande majorité des collectivités françaises ont mis en place une **collecte sélective des emballages ménagers**. Elle concerne en général les bouteilles en plastiques, les emballages en cartons, les briques alimentaires, les emballages métalliques (boîtes de conserve, boîtes de boisson), les journaux-magazines et le verre.

#### **I.3.3.6. Les trafics de déchets**

En Europe, le traitement des déchets devient de plus en plus réglementé et est très coûteux. La solution : se débarrasser de ses déchets en Afrique et certains pays d'Asie. Le traitement des déchets y coûte beaucoup moins cher (surtout lorsqu'il n'y a aucun traitement et que les déchets sont tout simplement stockés).

#### **I.3.3.7. Compost et fermentation**

Les déchets organiques, comme les végétaux, les restes alimentaires, ou le papier, sont de plus en plus recyclés. Ces déchets sont déposés dans un composteur ou un digesteur pour contrôler le

processus biologique de décomposition des matières organiques et tuer les agents pathogènes. Le produit organique stable qui en résulte est recyclé comme paillis ou terreau pour l'agriculture ou le jardinage .

#### **I.4. Déchets utilisés dans le domaine de génie civil**

##### **I.4.1. Les 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 [I 26]. 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.

Le laitier expansé est utilisé pour la fabrication du béton léger ayant une masse volumique apparente comprise entre 800 et 950 kg/m<sup>3</sup>. 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.

**Laitier d'acier:** Ce laitier est formé par l'élimination des impuretés contenues dans la fonte brute. Il est riche en phosphate ou en calcium et contient du silicate bicalcique; il est donc utilisé uniquement comme matériau de remblai pour les routes.

**Autres laitiers métallurgiques:** Les applications possibles du laitier provenant de la fusion réductrice du cuivre, du zinc, du plomb, du nickel et de l'étain n'ont pas encore été explorées à fond. On a toutefois déjà étudié la possibilité d'utiliser les laitiers au zinc/plomb comme granulats pour le béton bitumineux .

#### **I.4.2. 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[I26].

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

Les bétons qui contiennent les cendres volantes se forme d'aggloméré ont une résistance à la compression à 28 jours de l'ordre de 40 MN/m<sup>2</sup> et une masse volumique d'environ 1100 à 1800 kg/m<sup>3</sup>. 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 et du béton léger.

[I26].

### **I.4.3. 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 sont inférieurs 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 .

D'après une étude des bétons à base des granulats des déchets de démolition (déchets de briques et bétons), on peut conclure que la résistance à la compression diminue nettement dès que le taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés dépasse 30% et que cette diminution peut dépassé 10% de la résistance du béton témoin (100% granulats naturels).

On peut fabriquer des bétons à base des granulats de démolition (jusqu'à un taux de substitution de 50%) avec des résistances comparables sous réserve d'augmenter de 16% la teneur en ciment pour les granulats de concassé de béton et 33% pour les granulats de brique.

Cette réduction de résistance est due principalement à l'effet du mortier de l'ancien béton inerte qui est attaché aux agrégats provenant du béton concassé, et de la matière d'origine argileuse pour les granulats de brique concassé ce qui gêne le bon déroulement de l'hydratation de ciment.

Il faut noter aussi que les bétons préparés à base d'agrégats recyclés issus de la démolition présentent un rapport E/C élevé ce qui se traduit par une forte porosité et par conséquent une baisse de résistance [I26].

#### **I.4.4. 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 [I26].

#### **I.4.5. 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 .

**-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. On remarque la même tendance dans le cas de la résistance à la flexion. En remplaçant le ciment par des cendres volantes dans une proportion de 20 à 30%, on parvient à compenser cette perte de résistance.

Le verre de récupération réagit en présence de granules alcalins. On remarque une dilatation élevée 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. On a produit des granules légers expansés d'une masse volumique de 528 kg/m<sup>3</sup> par pelletisation d'un mélange de verre de récupération broyé, d'argile et de silicate de sodium chauffé à une température de 850C°.



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 [I26].

**-Résidus d'incinérateurs:** L'incinération des déchets domestiques et industriels entraîne la production de grandes quantités de résidus solides. La composition chimique des résidus varie selon la méthode de traitement des matériaux et selon la saison. Ces résidus comportent toutefois certaines matières, ce qui compromet leur utilisation en tant que composants du béton. La présence de verre entraîne aussi la dilatation des granulats alcalins [I26].

**-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 1310C°, elles sont transformées en granulats denses et résistants pouvant entrer dans la composition de bétons de résistances convenables [I26].

**-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 [I26].

**-Sciure de bois:** Le béton à base de sciure de bois est très peu utilisé à cause de sa faible résistance. Le béton à base de sciure de bois a de bonnes propriétés isolantes, une bonne souplesse et une faible conductivité thermique et peut être scié et cloué. Toutefois, il absorbe de grandes quantités d'eau et se dilate lorsqu'il est en contact avec de l'eau. Le béton contenant beaucoup de sciure de bois est inflammable [I26].

**-Caoutchouc:** L'évaluation des propriétés du composite cellulaire ciment-caoutchouc, élaboré à base de poussières de caoutchouc pour des teneurs allant de 0 à 50 %. L'allègement a été effectué suivant un procédé d'allègement par moussage protéinique, mis au point au laboratoire, en vue de l'utilisation du composite dans le domaine d'application des bétons cellulaires. L'étude du composite à l'état frais a montré une amélioration de la maniabilité, avec une bonne stabilité des bulles d'air dans la matrice. L'étude du composite à l'état durci a montré une nette réduction de la masse volumique, avec des propriétés mécaniques compatibles avec l'utilisation en isolant porteur. L'effet de l'agent entraîneur d'air protéinique sur les liaisons matrice/caoutchouc dans la résistance

du composite a été mis en évidence. L'étude de l'absorption par capillarité du composite a montré que l'ajout de poussières de caoutchouc réduit la sensibilité à l'eau du composite .

**-Brique:** La brique, le béton peuvent être concassés et utilisés comme granulats dans la construction d'assises routiers, comme matériaux de remblais pour l'aménagement et pour d'autres applications dans le domaine de la construction .

## **I.5. Déchets en Algérie**

### **I.5.1. Valorisation et recyclage des déchets en Algérie**

L'Algérie est en train de connaître un développement économique et démographique sans précédent. Le taux élevé d'accroissement de la population a ainsi engendré une urbanisation accélérée, le plus souvent de manière anarchique qui a vu la prolifération de l'habitation précaire.

Cela ne s'est pas fait sans conséquences sur l'environnement.

Face à la gravité des problèmes environnementaux, le gouvernement algérien a décidé en 2001 de consacrer une enveloppe financière importante, de près de 970 Md, pour atteindre les objectifs inscrits dans le Plan National d'actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAEDD), prévu jusqu'en 2010.

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

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

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

- Loi n° 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
- Loi n°01-20 du 12 Décembre 2001 relative à l'aménagement du territoire dans le cadre du développement durable.

- Loi n°02-02 du 05 février 2002 relative à la protection et à la valorisation du littoral.
- Loi n°03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.
- Loi n°04-03 du 23 Juin 2004 relative à la protection des zones de montagne dans le cadre du développement durable.
- Loi n°04-09 du 14 août 2004 relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable.
- Loi n°04-20 du 25 Décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable .

L'Algérie affronte aujourd'hui de nombreux problèmes liés à:

- la gestion des ressources naturelles : eau, espaces,
- la lutte contre les pollutions et les nuisances,
- la protection et la préservation des patrimoines .

### **I.5.2. Importance de déchets**

Les régions de l'Est détiennent la palme en matière de pollution en Algérie. 45% du total national des déchets spéciaux, soit 145.000 tonnes/an, sont produits dans ces régions, dont le stock est estimé aujourd'hui à 1.100.800 tonnes, ce qui représente 55% des déchets en stock au niveau national. Les wilayas de Annaba et de Skikda se sont ces dernières années particulièrement caractérisées par une forte proportion de déchets et de stocks, notamment le complexe mercuriel de Azzaba et les activités pétrochimiques, le transport des hydrocarbures et ISPAT Annaba qui arrivent en tête de liste dans la production des déchets spéciaux .

Avec 98.550 tonnes/an, soit 30% du total des déchets générés, la région Ouest arrive en deuxième position: 521.800 tonnes sont actuellement en stock, soit 26% du total national. La zone industrielle d'Arzew est la plus forte génératrice de déchets avec 65.760 tonnes/an et ceci uniquement pour la raffinerie d'Arzew, suivie juste après par AlzincGhazaouet avec 18.500 t/an. Le sud du pays, quant à lui, malgré la concentration de l'industrie pétrolière et pétrochimique, ne produit que 4.500 t/an, ce qui représente 1,4% du total national. Seulement 0,4% de déchets sont stockés actuellement dans le sud de l'Algérie, ce qui est quasiment insignifiant par rapport à toute la pollution générée dans le Nord. Il faut savoir que 86% des déchets industriels spéciaux sont générés

par quatre secteurs, à savoir les hydrocarbures (34%), la chimie, le caoutchouc et le plastique (23%), la sidérurgie et la métallurgie (16%) et les mines (13%) .

Selon l'agence nationale des déchets en Algérie, la production de déchets ménagers est estimée à 7millions de tonnes/ an, chiffre en constante augmentation. Les estimations chiffrées font état de 0,7kg/ hbt/ jour dans les grandes villes, contre 0,5kg/ hbt/ jour dans les villes plus moyennes.

D'après, le ministre de l'environnement; il existe pas moins de 12.000 tonnes de produits pharmaceutiques périmés. Ces genres de produits, très nocifs pour la santé de l'homme, ont durant des années été incinérés dans la nature, avec tous les risques de contamination des ressources naturelles et de l'environnement .

### **I.5.3. Solution a adopté**

L'Algérie connaît actuellement une grave crise liée au traitement des déchets spéciaux et des restes de produits dangereux. La mission française, spécialisée dans le secteur des déchets, a évalué la quantité des déchets industriels spéciaux entassés en Algérie à plus de 2, 8 millions de tonnes, alors que la production de déchets spéciaux a atteint 325 000 tonnes, incluant l'amiante et les insecticides. Malheureusement, l'Algérie ne dispose pas actuellement des techniques nécessaires au traitement de ces déchets.

Afin d'améliorer la gestion des déchets spéciaux dangereux et assurer une «traçabilité» effective du produit chimique dans tout le cycle de vie de la matière, le gouvernement a institué une loi obligeant tous les industriels, producteurs de déchets dangereux, à déclarer aux services de l'environnement leurs déchets selon une nomenclature de classification systémique suivant trois paramètres, à savoir l'attribution d'un numéro de code structuré, l'identification de la classe des déchets et enfin le ciblage de la dangerosité du déchet.

Le plan national de gestion des déchets spéciaux (PNAGDES), institué par la loi relative à la gestion, le contrôle et l'élimination des déchets n° 01/19 du 12 décembre 2001, oblige les producteurs de ces déchets à s'acquitter d'une taxe de 10.500 dinars pour chaque tonne de déchet stocké, une manière d'inciter les « pollueurs » à déstocker leurs déchets. Un moratoire de deux années est accordé aux détenteurs de déchets spéciaux dangereux pour se conformer à la loi. Ce plan sera élargi à travers toutes les wilayas d'Algérie .

La solution technique retenue par l'Algérie pour le traitement des déchets ménagers est l'enfouissement, c'est pourquoi 65 centres d'enfouissement technique (CET) ont été lancés. Cependant la mission a dénoncé le fait que les CET à peine construits, sont déjà dépassés et « les mêmes problématiques se profilent: fuite de lixiviats, contamination des nappes phréatiques, et inadéquation des méthodes de traitement à la typologie des déchets ».

#### **I.5.4. Utilisation des déchets dans le domaine du génie civil**

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

En effet, les pneumatiques usagés constituent un gisement de matières premières secondaires, leur récupération et leur valorisation constituent pour notre pays un impératif économique. La valorisation de ce déchet industriel est à ses premiers balbutiements. Un premier chantier expérimental a été initié par le département ministériel, concernant l'utilisation des pneus réformés en tant que soutènement d'un talus de remblai dans un projet routier (contournement de Bou Smail). Les travaux déjà finalisés ont permis de mettre en œuvre 3500 pneus mis à disposition par Michelin Algérie dans les travaux de stabilisation d'un talus de remblai d'une hauteur de 5 m environ avec une largeur de 50 m [I22].



Figure I-1: Protection d'un talus par les pneus réformés

**-Déchets de la construction/démolition:**Le béton recyclé est simplement du vieux béton broyé pour produire des granulats. Il peut être utilisé dans les couches de fondation comme dans du béton maigre et comme seule source de granulats ou remplacement partiel des granulats dans du béton neuf.

Les granulats de béton recyclé sont généralement plus absorbants et moins denses que les granulats ordinaires. La forme des particules est semblable à celle de la pierre concassée. Le béton fabriqué avec des granulats provenant du recyclage, présente généralement de bonnes qualités de maniabilité, durabilité et résistance à l'action du gel-dégel. La résistance en compression varie selon la résistance du béton initial et le rapport eau/liants du nouveau béton.

Le mortier fabriqué avec des sables provenant de déchets de briques, présente généralement de bonnes résistances à l'action du gel-dégel, à l'action du séchage et aux eaux usées [19].

**-Déchets de marbre:** Les déchets des carrières à bloc de marbre sont les bocains, chutes et moellons, Ces déchets sont concassés pour obtenir des granulats et poudre qui sont utilisés dans la fabrication de carreau en granito de marbre. Le tout venant de marbre des carrières dérivées (marbre de différentes classes granulaires) est destiné à la confection des routes.

Les déchets de l'usine de transformation (chutes des carreaux) sont utilisés dans le revêtement des sols.

#### **I.4.Travaux antérieurs et matériaux utilisés**

##### **I.4.1. Introduction**

On présente au cours de cette étape quelques résumés des études sur le recyclage des déchets de marbre et quelques types de granulats substitués dans le béton hydraulique, on présente aussi les matériaux utilisés à savoir les granulats ordinaires et les granulats recyclés et les essais de caractérisations pour chaque type de matériaux.

##### **I.4.2. Déchets de marbre**

Un marbre est un calcaire ayant subi un faible métamorphisme, la densité du marbre est élevée en moyenne de 2,7. En atmosphère sèche, ils sont pratiquement inaltérables, bien que leur dureté soit médiocre dans l'air humide ou légèrement acide, ils ont tendance à s'effriter.

Le degré de pureté du marbre et responsable de sa couleur et de son aspect, ces couleurs proviennent essentiellement d'oxyde métalliques du fer, il est blanc si la roche dont il provient était uniquement composée de calcite .

Le produit marbrière Algériens sont extraits et transformés conformément aux normes européennes : Italienne et françaises en particuliers. Les procédés utilisés en Algérie pour le travail du marbre sont ceux utilisés dans le monde.

Les marbres en Algérie sont exploités par l'entreprise nationale du marbre « ENAMARBRE » par six carrières à bloc, cinq carrière de granulats et dérivés de marbre et cinq unités de transformation.

Le taux de déchets est de 50.000m<sup>3</sup> (carrière à bloc) et 12000t dérivés de marbre à Oran, 10.000m<sup>3</sup> (carrière à bloc) à Guelma et 8.000m<sup>2</sup> (usine de transformation) à Sig.

Dans cette étude nous avons introduit les déchets de marbre du gisement de FIL-FILA, Ce gisement se trouve à 25Km à l'Est de la ville de Skikda.

Le gisement de FIL-FILA est divisé en deux carrières :

-Une carrière à blocs de marbre blanc et réséda vert, les déchets de cette carrière sont les bocains, chutes et moellons ayant différentes formes géométriques, le taux de déchets est de 56% de la production.

Les déchets de l'usine de transformation ce sont les chutes de tailles des blocs et les chutes des carreaux et dalles et poudres de marbre, le taux de déchets est de 22m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, le stock est de l'ordre de 20.000m<sup>3</sup>.

-Une carrière dérivée de CHATT, les déchets de cette carrière est un tout venant (marbre de différentes classes granulaires), le taux de déchets est de 19% de la production et le stock est de l'ordre de 18000t.

Dans cette étude nous avons récupérés les déchets de marbre blanc de la carrière à bloc dans le béton hydraulique, nous avons introduit les fillers de déchets de marbre dans la pâte de ciment et les granulats recyclés de déchets de marbre dans le béton.

### I.4.3. Les méthodes de formulation du Béton

Le béton est un mélange dont la composition a une profonde influence sur ses caractéristiques ; mais si les caractéristiques attendues sont la plupart du temps bien définies, la mise au point d'un béton approprié peut s'avérer plus délicate. Les paramètres sont en effet nombreux :

Les données du projet : caractéristiques mécaniques, dimensions de l'ouvrage, ferrailage, etc.

Les données du chantier : matériel de mise en œuvre, conditions climatiques, etc.

Les données liées aux propriétés du béton : maniabilité, compacité, durabilité, aspect, etc.

On mesure donc l'importance de l'étude de la formulation du béton, d'autant plus nécessaire que les caractéristiques requises sont élevées.

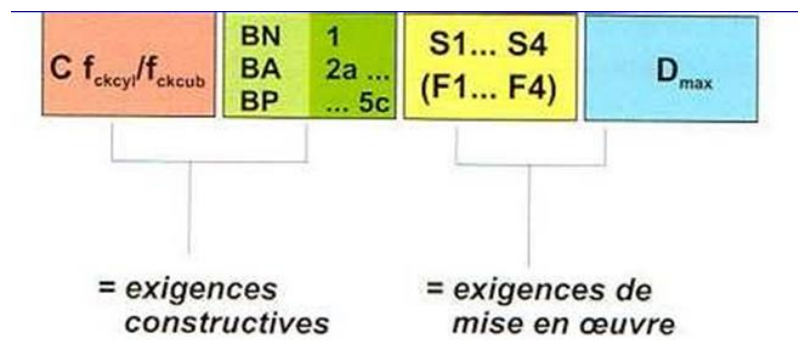


Figure I-2 : Formulation de béton

### Comment déterminer la composition du béton ?

L'obtention des caractéristiques requises pour le béton passe impérativement par l'adoption et l'optimisation de sa formulation aux exigences appropriées à l'ouvrage et à son environnement. C'est la raison pour laquelle la démarche retenue comporte les plus souvent deux phases :

Approche d'une composition, soit de façon graphique à partir de méthodes telles que celle de Faury ou de Dreux, soit de façon expérimentale (par exemple à partir de la méthode LCPC de Baron et Lesage). Il faut préciser que ces différentes méthodes sont basées sur la recherche d'une compacité maximale conformément aux théories de Caquot sur la composition granulaire des mélanges, que les connaissances actuelles sur le béton ont confirmées pour l'essentiel.



La deuxième phase consiste à ajuster expérimentalement cette formulation en fonction des résultats obtenus par des essais effectués en laboratoire (essais d'étude) ou dans les conditions du chantier (épreuves de convenance).

L'approche de la formulation Dosage en ciment

Pour bien comprendre le caractère primordial du dosage en

Ciment, il faut rappeler que celui-ci remplit deux fonctions essentielles dans le béton.

### **La fonction de liant**

Elle est déterminante dans la résistance du béton, qui dépend de la nature du ciment, de sa propre résistance et de l'évolution de son durcissement.

La fonction filler : Le ciment complète la courbe granulométrique du béton dans les éléments fins. Il faut noter que le développement dans le temps des hydrates du ciment colmate progressivement les capillaires, contribue à diminuer la porosité d'ensemble du béton et améliore notablement sa durabilité.

Les abaques de Dreux, exposées au paragraphe suivant, reposent sur cette approche qui privilégie la « fonction liant », donc la résistance. Dans cette démarche, le ratio C/E (dosage en ciment sur dosage en eau) est calculé à partir de la formule :

$$Rb_{28} = G RC (C/E - 0,5)$$

$Rb_{28}$  ; résistance à la compression du béton à 28 jours, RC = résistance réelle du ciment ;

G : coefficient compris entre 0,35 et 0,65

### **Dosage en eau**

Le dosage en eau est un facteur très important de la composition du béton. On ressent bien l'influence qu'il a sur la porosité du béton par les vides créés, lorsque l'eau s'élimine pour différentes raisons (évaporation, combinaison chimique, absorption par les granulats).

Par exemple, avec un E/C, couramment utilisé, de 0.55, on estime que la moitié de l'eau de gâchage sert à l'hydratation du ciment, l'autre moitié est une eau de mouillage interstitielle qui contribue à la plasticité du béton requise pour sa mise en œuvre. Ce schéma est modifié par l'emploi croissant

d'adjuvants contribuant à améliorer la plasticité sans nécessiter une présence d'eau en excès, nuisible aux caractéristiques finales du béton durci.

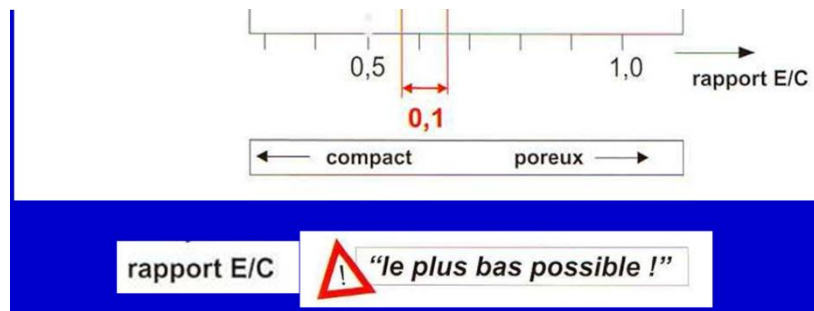


Figure I-3 : Dosage de béton

Une fois déterminée la dimension maximale des granulats compatible avec les exigences géométriques précédemment déterminées de l'ouvrage (espacement des armatures entre lesquelles doit pouvoir passer le béton, épaisseur d'enrobage, forme de la pièce à mouler), on doit résoudre les deux problèmes suivants :

### Choix des classes granulaires

La plupart du temps, la composition d'un béton présente une courbe granulaire discontinue obtenue à partir de deux classes granulaires : un sable de type 0/5 et un gravillon 5/16 ; 5/25 ou 5/40, par exemple. On peut également utiliser deux classes de gravillons dans des compositions plus élaborées, lorsqu'on cherche à se rapprocher d'une granulométrie continue. Pour répondre à des performances particulières, il existe des bétons spéciaux qui font appel à davantage de classes.

### Choix des granulats

Deux facteurs ont longtemps été considérés comme ayant une influence sur les propriétés du béton :

La proportion relative gravillons/sable traduite par le facteur G/S que les études récentes ont fait apparaître comme moins importante qu'on ne le pensait auparavant, dans la mesure où ce facteur reste inférieur à la granulométrie du sable caractérisée, par exemple, par son module de finesse. Le module de finesse d'un sable pour béton est généralement compris entre 2,2 et 2,8.

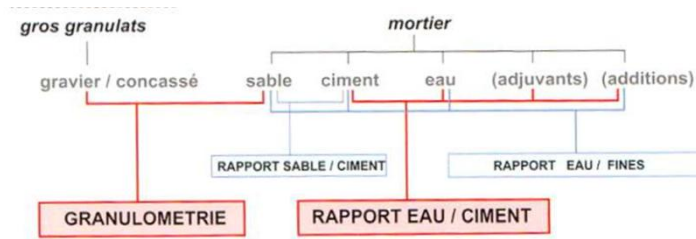


Figure I-4 : Détermination de la composition de béton

### Dosage en adjuvant

Selon la propriété recherchée pour le béton, on aura recours à l'adjuvant approprié : accélérateur de prise, plastifiant, entraîneur d'air, etc.). Compte tenu de la diversité des produits disponibles, on se conformera aux prescriptions du fabricant pour leur emploi et leur dosage, et on vérifiera leur compatibilité avec le ciment.

#### I.4.3.1. Méthode des Abaques de Dreux

Les abaques de Dreux, permettent une approche pratique d'une composition de béton répondant à des objectifs déterminés, moyennant quelques hypothèses facilitant la démarche. Il est bien évident qu'une fois déterminée cette composition, elle devra, ainsi qu'il a été souligné, être soumise à l'expérimentation afin d'affiner les dosages indiqués.

### Données retenues

En général, les données suivantes sont déterminées par le cahier des charges du projet, les conditions du chantier ou la disponibilité des matériaux.

### La résistance à la compression du béton

Le domaine d'application des abaques est celui des bétons courants présentant une résistance à 28 jours, comprise entre 15 MPa et 40 MPa., La maniabilité du béton

En fonction des caractéristiques de l'ouvrage et des moyens du chantier, on fixe pour le béton une maniabilité caractérisée par sa consistance et mesurée par l'essai au cône d'Abrams.

### Granulats choisis

Pour l'établissement des abaques, trois classes granulaires ont été retenues :

- Un sable 0/5;

- Trois graviers 5/16, 5/25 et 5/40.
- Le ciment choisi est de classe 42,5 selon les hypothèses de la théorie de Dreux.

### Considérations pratiques

Compte tenu des conditions de chantier les plus courantes, certaines hypothèses pratiques ont été retenues. Les quantités de granulats sont exprimées en volume, ce qui est suffisant pour la plupart des bétons courants.

Pour tenir compte de l'apport d'eau dû au degré d'humidité des granulats, les abaques introduisent un correctif défini dans le tableau suivant :

Degrés d'humidité des granulats					
		Sec	Humide	Mouillé	Trempé
Aspect		Mat Un peu poussiéreux	Brillant Légère adhérence sur la main	Très humide Dépôt d'eau sur la main	L'eau ruisselle sur les granulats qui sont saturés
% d'eau	Sables	0 à 3 %	4 à 7 %	8 à 11 %	12 à 15 %
	Gravillons	1 %	3 %	5 %	6 %

Tableau I-2: Degrés d'humidité des granulats

Les abaques donnent une indication sur la réduction d'eau procurée par l'emploi d'un adjuvant de type plastifiant réducteur d'eau, mais il est évident que la valeur réelle de réduction d'eau sera à déterminer selon l'adjuvant utilisé et son dosage.

Utilisation des abaques



Figure I-5 : Organigramme démonstratif d'utilisation des abaques

CAS D'UN BÉTON FIN = 12.5 mm, (Abaque n°1).

On désire :

- Un béton très plastique (affaissement 10cm)
- Une résistance moyenne : 20 MPa(environ)

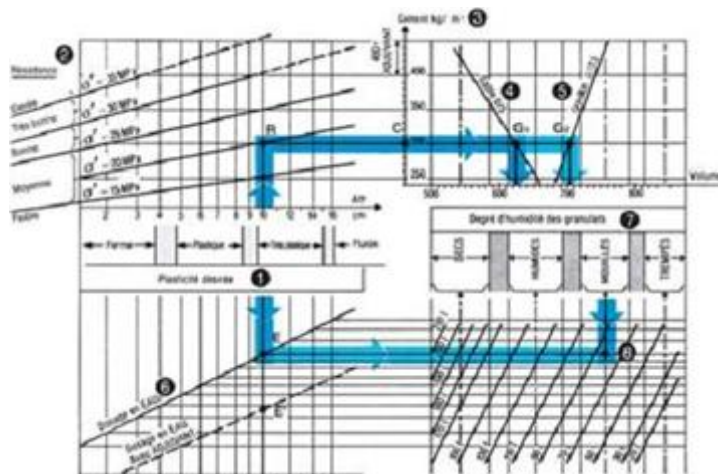


Figure I-6 : Abaque n°1

- Classe 42,5) ..... 300 kg/m<sup>2</sup>
- Sable 0/5 mm à l'état sec ..... 625 litres 5. Gravillons 5/12,5 mm ..... 705 litres
- Dosage en eau – point E
- On suppose que les granulats sont « mouillés »

La lecture sur la grille donne 80 litres d'eau environ à ajouter.

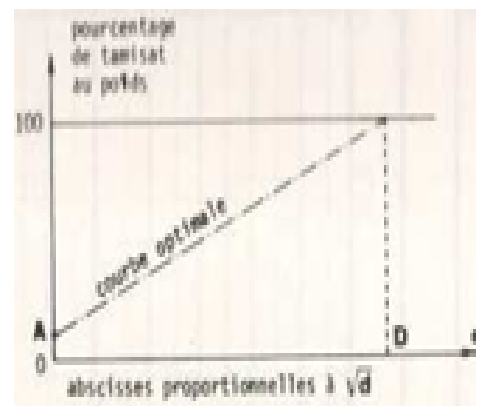
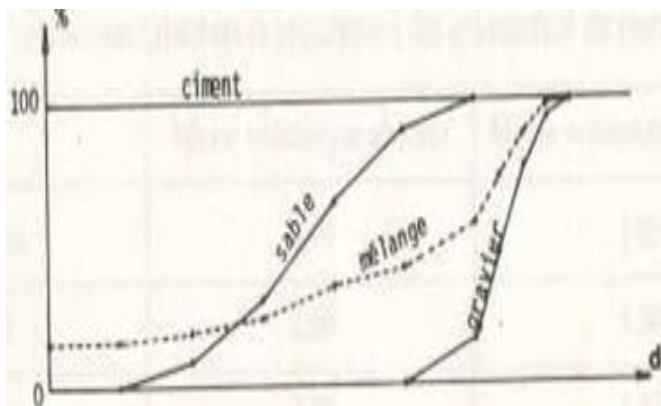
#### I.4.3.2. Méthode de Bolomey:

La méthode de Bolomey a le mérite d'avoir ouvert la voie aux études de béton. Toutefois, elle ne peut être appliquée qu'aux granulats dont la masse volumique absolue est comprise entre 2,5 et 2,7 kg/m<sup>3</sup> ; ce sont d'ailleurs les granulats les plus courants.

Considération expérimentale : on se ce cas aux courbes granulométriques des constituants secs. Un mélange quelconque de ces constituants à des proportions définies a lui aussi une courbe granulométrique. En fonction des quantités des constituants secs à mettre en œuvre on a une infinité de mélanges donc une infinité de courbes granulométriques. Le problème est de trouver qui correspond à un bon béton pour le travail à exécuter ; cette courbe sera dite “ courbe optimale ”.

#### Principe de la méthode consiste à :

- Déterminer la courbe optimale du mélange des éléments secs,
- Calculer les pourcentages de ces constituants qui permettent de donner un mélange sec dont la courbe soit aussi voisine que possible de la courbe optimale,



- Déduire la composition d'un mètre cube de béton

Figure I-7 : Méthode de Bolomey

**Courbe optimale**

L'équation qui régit cette courbe est

Exprime par la relation

$$P = A + (100 - A)\sqrt{d/D}$$

A et D sont des constantes. L'équation est sous la forme d'une droite :  $y = a + b \cdot x$  qui passe par les Points :  $d = 0$  et  $P = 0$  ;  $d = D$  et  $P = 100$ .

Représente le pourcentage d'éléments très fins contenus dans le mélange sec, éléments qui ont une incidence sur la maniabilité du béton. La valeur de cette constante dépend de la consistance souhaitée pour le béton et de la provenance des granulats

Consistance du béton	Granulats roulés	Granulats concassés
Béton damé	6 □ 8	8 □ 10
Béton armé	10	12 □ 14
Béton coulé	12	12 □ 14

D : est la dimension du tamis qui serait tout juste suffisante pour laisser passer la totalité des granulats.

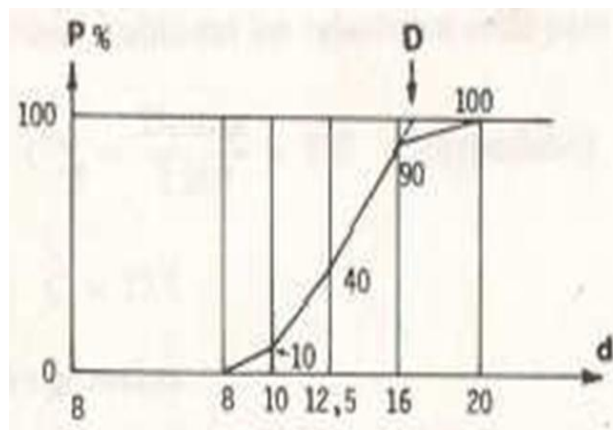


Figure I-8 : Courbe optimal.

Dans l'exemple suivant, la valeur de D est comprise entre 16 et 20 mm, pour l'obtenir il suffit de prolonger l'avant dernier tronçon de la courbe du plus gros granulats.

On remarque que cette construction n'est possible que lorsque l'on se trouve en présence d'une queue de granulométrie (cas très fréquent) ; si le point était situé au-delà de 2/3 de l'intervalle 16-20 où la droite de 20 ; c'est 20 qui serait la valeur retenue de D

### **Calcul du pourcentage des constituants**

#### **Cas du ciment :**

$$c (\%) = \frac{\text{masse du ciment}}{\text{masse totale des éléments secs}} \times 100$$

#### **Cas des granulats :**

Une méthode graphique nommée la "Méthode de Joisel" est appliquée. Cette dernière est universelle, applicable à tous granulats ; toutes les courbes optimales et tous modes de graduation des axes.

Si on considère le cas le plus simple, mélange de deux granulats ( $d_1/d_2$ ) ; ( $d_3/d_4$ ) ; ces courbes tracées : 3 cas seulement sont possibles :

- $d_3$  au coin de  $d_2$  : juxtaposition des deux granulats,
- $d_3$  à gauche de  $d_2$  : superposition partielle,
- $d_3$  à droite de  $d_2$  : discontinuité des deux granulats.



### **I.5. Conclusion**

Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité pour les collectivités. Le déchet est par définition «matière» et à ce titre la biophysicochimie, la mécanique et la thermique sont au premier chef sollicitées pour le traiter.

Cette matière n'est pas banale. Elle a une vie, elle a souvent muté au cours de son existence pour se retrouver dans les poubelles et les décharges. Avec une telle diversité moléculaire, qu'il est nécessaire de trouver les moyens pour en extraire les fractions valorisables ou pour atténuer les capacités de nuisances.

Plusieurs types de déchets et de sous-produits peuvent être utilisés comme granulats. Le laitier de haut fourneau et les cendres volantes sont déjà exploités commercialement.

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 marbre et pour l'utiliser en tant que granulats pour béton et fillers pour ciment et mortier.

**Chapitre II :**  
**Travaux**  
**Anterieur**  
**et Materiaux Utilises**

## **II.1. Introduction**

Le besoin universel de protéger l'environnement et de bien gérer les ressources, nécessitent d'établir des nouvelles lois et d'adapter des nouveaux concepts. La valorisation et le recyclage des déchets est un moyen efficace face aux contraintes d'ordres économiques et écologiques de ces dernières années. Les déchets constituent un réel problème, inévitable à toute vie biologique et à toute activité industrielle. Le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement. Le recyclage a deux conséquences écologiques bénéfiques : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. On estime que seulement 30% des matériaux utilisés dans la construction sont actuellement recyclés, alors que la pratique dans certains pays européens, démontre que 90% sont réutilisables. En France la loi du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets et la protection de l'environnement interdit à partir de l'an 2002 la mise dans les anciennes décharges des déchets tels que les matériaux de démolition. Le Danemark dispose d'une loi spécifique depuis 1990 concernant l'utilisation des granulats recyclés. En 2007, l'Europe a élaboré une législation pour encadrer la gestion des déchets. L'Algérie compte un déficit important en matériaux de construction et en particulier le ciment. Face à la gravité des problèmes environnementaux dû à la surexploitation des ressources, le gouvernement algérien a décidé en 2001 de consacrer une enveloppe financière importante, de près de 970 millions de dinars, pour atteindre les objectifs inscrits dans le Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement Durable.

L'objectif de cette étude expérimentale est d'étudier la possibilité de l'utilisation de déchet de marbre comme substituant massique partiel ou total du gravillon concassé 3/8 à des taux allant de 0%, 25%, 50%, 75% à 100% respectivement dans la composition d'un béton ordinaire.

## II.2. LES MATERIAUX UTILISÉS

Nous avons utilisé pour la confection du béton des matériaux locaux dont les caractéristiques sont déterminées expérimentalement au laboratoire pédagogique de l'université 08 Mai 1945 - Guelma -

Les matériaux utilisés pour cette étude sont :

- Ciment CEM II/A 42.5 de Ben Azouz.
- Sable concassé 0/4 de Ain Abid.
- Gravillon 3/8 d'Ain Abid.
- Gravier 8/15 d'Ain Abid.
- Superplastifiant SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12.
- Gravillon de marbre de felffa.



3/8



8/15



Sable 0/4



Ciment

Figure II.1 : Les matériaux utilisés

## II.3. ESSAIS SUR LES GRANULATS

### II.3.1. Analyse Granulométrique

La connaissance de la courbe granulaire des granulats est nécessaire pour déterminer la composition optimale du béton [III].

#### **But de l'essai :**

L'analyse granulométrique permet, à l'aide de différents tamis, de déterminer précisément la composition d'un matériau afin d'en déduire ses caractéristiques mécaniques. Elle permet également de vérifier un matériau élaboré en carrière, en comparant sa courbe granulométrique avec le fuseau de prescription correspondant.

Les informations que fournit l'analyse granulométrique permettent de savoir dans quels types de tâches employer les matériaux analysés.

#### **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à classer les différents grains consistant 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 les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne des tamis.

**Références normatives :** EN 933-1 et EN 933-2

#### **Equipement nécessaire**



**Figure II.2 : Un jeu de tamis**



**FigureII.3 : Une balance électrique de grande précision (0.001 g).**



**FigureII.4 : Étuve pour le séchage des granulats.**



**FigureII.5 : Une tamiseuse électrique.**

### Mode opératoire

L'analyse granulométrique se déroule en trois phases :

- Prélever un échantillon de matériaux et le préparer pour l'analyse : le quartage
- Procéder à l'examen du matériau : étuvage, tamisage, refus...
- Tracer la courbe granulométrique du matériau.

### Examen du matériau

- Peser l'échantillon humide pour déterminer le poids humide « Ph ».
- Etuver l'échantillon à 105° pendant 24 heures pour éliminer l'humidité.
- Peser l'échantillon sec obtenu pour déterminer le poids sec « Ps ».
- Calculer « W% » la teneur en eau du matériau.
- Laver l'échantillon à l'eau claire pour éliminer les particules fines (<0.063mm).
- Etuver l'échantillon à 105° pendant 24 heures pour éliminer l'humidité.



FigureII.6 : l'essai granulométrique

### Calculs et résultat

Les résultats de l'analyse granulométrique obtenus des différents granulats sont présentés dans le tableau ci-dessous

#### a) Gravier 8/15

Ouverture tamis en	Masse des refus	Refue cumulés	Tamisas cumulés
--------------------	-----------------	---------------	-----------------

millimètre	cumulés « Rn » en (g)	(Rn / M <sub>1</sub> ) 100 en (% )	100- (Rn / M <sub>1</sub> )100 %
20.000	0.00	0.00	100.00
16.000	284.00	9.46	90.53
12.500	771.00	25.70	74.30
8.000	1754.00	58.46	41.53
6.300	2461.00	82.03	17.96
4.000	2782.00	92.73	7.26
2.000	2976.00	99.20	0.80

**Tableau.II.1. Résultats d'analyse granulométrie du Gravier 8/15**

**b) Gravier 3/8**

Ouverture tamis en millimétré	Masse des refue cumulés « Rn » en (g)	Refue cumulés (Rn / M <sub>1</sub> ) 100 en (% )	Tamisas cumulés 100- (Rn / M <sub>1</sub> )100 %
12.500	0.00	0.00	100.00
8.000	142.00	8.87	91.12
6.300	461.00	28.81	71.18
4.000	742.00	46.37	53.62
2.000	1131.00	70.68	29.31



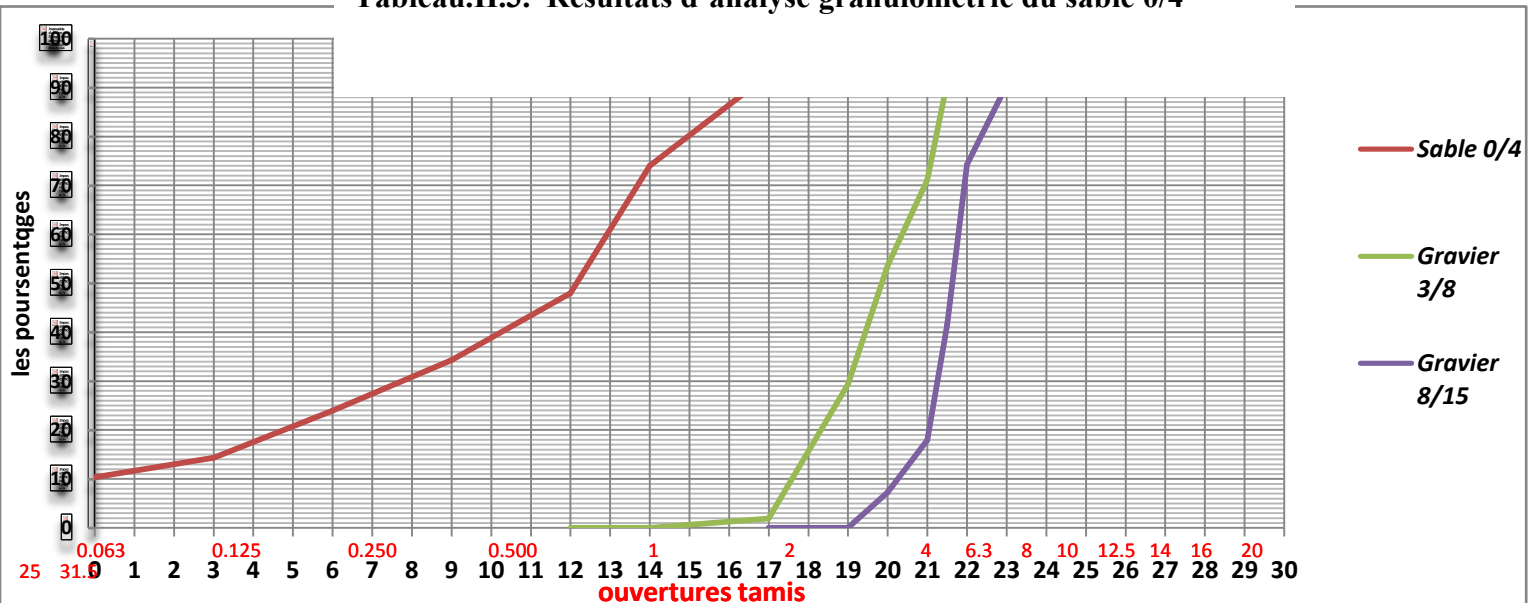
1.000	1569.00	98.06	1.93
-------	---------	-------	------

Tableau.II.2. Résultats d'analyses granulométrie du Gravier 3/8

C) sable 0/4

Ouverture tamis en millimétré	Masse des refue cumulés « Rn » en (g)	Refue cumulés (Rn / M <sub>1</sub> ) 100 en (%)	Tamisas cumulés 100- (Rn / M <sub>1</sub> )100 %
6.300	0.00	0.00	100.00
4.000	22.00	7.33	92.66
2.000	78.00	26.00	74.00
1.000	156.00	52.00	48.00
0.500	197.00	65.66	34.33
0.250	228.00	76.00	24.00
0.125	257.00	85.66	14.33
0.063	269.00	89.66	10.33

Tableau.II.3. Résultats d'analyse granulométrie du sable 0/4



FigureII.7 : Courbe granulométrique

### **II.3.1. 1.Coefficient d'aplatissement**

#### **Définition**

La détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme des granulats [III].

**Références normatives :** NF EN 933-3

#### **Mode opératoire**

##### **Echantillon à analyser :**

A partir de l'échantillon global on prélève la quantité nécessaire à l'essai

##### **Choix des tamis ou passoires :**

Pour un gravier on peut prendre tous les tamis compris entre 4 et 80 mm

##### **Préparation de l'analyse :**

- Les tamis utilisés sont emboîtés les uns dans les autres, les dimensions croissant de bas en haut
- Dessous on met un récipient a fond plein pour recueillir les fines
- Au-dessus, on ferme avec un couvercle pour éviter la dispersion des poussières.

##### **Tamisage**

- L'échantillon pour l'essai est verse sur le tamis supérieur.
- Mettre la colonne complète (tamis + fond plein + couvercle) sur la tamiseuse.
- Lancer le tamisage.

##### **Pressée des refus – Expression des résultats**

- Peser et éliminer tous les grains passant au tamis 4 mm et retenus sur celui de 80 mm
- Prendre le premier tamis est peser son refus : soit  $d_i/D_i$  la classe granulaire de ce refus
- Tamiser ce granulat élémentaire  $d_i/D_i$  sur la grille a fentes correspondantes. Ce tamisage doit être effectuée manuellement et doit être considère comme termine lorsque le refus ne varie pas de plus de 1% pendant 1 min de tamisage.

- Pour ce granulat élémentaire, peser le matériau passant à travers la grille a fentes correspondantes.
- Recommander les différentes opérations décrites ci – dessus pour les tamis suivants.



FigureII.8 : Série de grilles.

### Calculs et résultat

Le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire est donné par :

$$A_i = \frac{m_i}{R_i} \times 100 \%$$

Le coefficient d'aplatissement global est donné par :

$$A = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \%$$

Le tableau suivant résume les résultats de calcul de Coefficient d'aplatissement pour les différents matériaux utilisés :

Tamisage sur tamis d'essai		Tamisage sur grilles a fentes		
Granulat élémentaire di /Di (mm)	Massa Ri du granulat élémentaire di /Di (g)	Ecartement nominal des fentes de la grille (mm)	Passant sur grille a fentes m <sub>i</sub> (g)	A <sub>i</sub> = m <sub>i</sub> / Ri 100
16/20	0	10	0	0
12.5/16	1145	8	114	9.95
10/12.5	809	6.3	74	9.14

8/10	402	5	52	12.93
6.3/8	509	4	61	11.98
4/6.3	96	3.15	12	12.5
2/4	/	2.5	/	/
$M1 = \sum R_i$	2961	$M2 = \sum m_i$	313	
$A = \frac{M2}{M1} 100 = 10.57$				

**Tableau.II.4. Résultats d'essai de coefficient d'aplatissement**

### II.3.2. Masse Volumique (NF P 94-064)

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. Comme on distingue le volume absolu et le volume apparent, il faut aussi distinguer de même :

#### II.3.2. 1.Masse volumique apparente :

##### Définition

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules [II2].

La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté

La masse volumique apparente sèche  $P_d$  est la masse de granulats secs ( $M_s$ ) occupant un volume apparent (volume des solides :  $V_s$ + volume des vides  $V_v$ )



**FigureII.9 : La masse volumique apparente**

**Références normatives :** NF P18-555

### **Matériel nécessaire**

Un récipient cubique ou cylindrique de volume connu et dont la taille est adaptée aux granulats:

- Granulats de dimension maximale  $D \leq 20$  mm : récipient de capacité 1 L
- Granulats de dimension maximale  $D > 20$  mm : récipient de capacité  $> 1$  L
- Une règle à araser métallique.
- Une main écope pour le remplissage
- Une balance de portée  $\geq 5$  kg, précision 1 g
- Des bacs en plastique pour effectuer les essais

### **Matériaux utilisés**

- Un échantillon de 15 kg de gravillons secs
- Un échantillon de 6 kg de sable sec ·

Remarque : Utiliser des granulats échantillonnés et séchés préalablement à l'étuve

### **Mode opératoire**

- Déterminer le volume du récipient =  $V$
- Noter la masse du récipient propre et vide =  $M_o$
- Placer le récipient dans le bac en plastique
- Verser les granulats secs, par couches successives et sans tassement : utiliser les mains comme entonnoir naturel

- Araser à l'aide de la règle métallique par un mouvement horizontal de va et vient
- Noter la masse du récipient rempli=  $M_1$
- Vider les granulats dans un autre bac en plastique
- Renouveler l'opération au moins deux (2) fois avec un autre échantillon du même type

### Calculs et résultat

La masse volumique apparente est donnée par

$$\frac{M_1 - M_0}{V}$$

Remarque : L'essai est répété au minimum 2 fois et la moyenne de ces essais donne la valeur de la masse volumique apparente.

Le tableau suivant résume les résultats de l'essai des masses volumiques apparente pour les différents matériaux utilisés :

		Caractéristique physique des granulats (g/cm <sup>3</sup> )		
		Sable 0/4	Gravillon 3/8	Gravillon 8/15
Masse volumique apparentes		2.61	2.64	2.67

**Tableau.II.5. Masse volumique apparente des granulats**

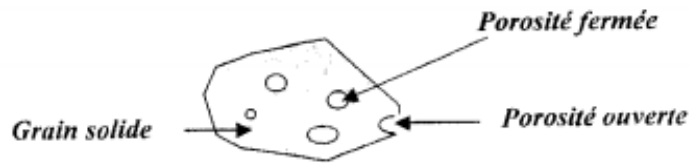
### II.3.2. 2.Masse volumique absolue

#### Définition

La masse volumique absolue  $p_s$  est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains

La masse spécifique est la masse de granulats secs ( $M_s$ ) rapportée au volume absolu (uniquement volume de solides  $V_s$ )

La mesure du volume des solides ne tient pas compte des pores fermés contenus par les granulats.



**Références normatives :** NF EN 1097-6

### **Matériel nécessaire**

- Des éprouvettes graduées en plastique.
- Une tige agitatrice
- Un entonnoir pour le remplissage
- Une balance de portée  $\geq 5$  kg, précision 1g.
- Des bacs en plastique pour effectuer les essais.

### **Matériaux utilisés**

- Un échantillon de 3 kg de gravillons secs.
- Un échantillon de 3 kg de sable sec.

Remarque : Utiliser des granulats échantillonnés et séchés préalablement à l'étuve

### **Mode opératoire :**

Méthode de l'éprouvette graduée

- Placer l'éprouvette dans le bac en plastique.
- Verser de l'eau dans l'éprouvette (presque demi hauteur) et noter  $V_1$ .
- Préparer un échantillon de granulats secs de masse  $M$  (environ 300 g).
- Verser l'échantillon dans l'éprouvette à l'aide d'un entonnoir et provoquer le départ des vides (air) en remuant le mélange avec la tige agitateur.
- Noter le nouveau volume d'eau dans l'éprouvette  $V_2$ .
- Vider les granulats dans un bac en plastique et jeter son contenu.
- Renouveler l'opération au minimum 2 fois.



**FigureII.10 : la masse volumique absolue**

**Calculs et résultat**

La masse volumique apparente est donnée par

$$\frac{M}{V_2 - V_1}$$

Remarque : L'essai est répété au minimum 2 fois et la moyenne de ces essais donne la valeur de la masse volumique absolue.

Le tableau suivant résume les résultats de l'essai des masses volumiques Absolue pour les différents matériaux utilisés :

Caractéristique physique des granulats (g/cm <sup>3</sup> )			
	Sable 0/4	Gravillon 3/8	Gravillon 8/15
Masse volumique Absolue	2.75	2.79	2.82

**Tableau.II.6. Masse volumique absolue des granulats**

On remarque d'après le tableau III.1, III.2 que :

- Les masses volumiques absolues sont presque égales entre elles. La valeur la plus élevée est



celle du gravier 8/16, tandis que la plus faible est celle du la plus petite coupure (sable 0/4).

### II.3.3. Le Coefficient d’Absorption d’Eau

#### Définition

Le coefficient d’absorption d’eau  $A_b$  représente la capacité d’absorption d’eau d’un granulat. Plus il est élevé, plus le matériau est absorbant.

**Références normatives :** NF P 18-554

#### Mode opératoire :

- Mettre l’échantillon dans le récipient rempli d’eau. La température de l’eau égale à celle de la salle.
- Laisser reposer pendant 48 h
- Ensuite enlever le reste de l’eau de la surface des échantillons à l’aide d’une étoffe humide. Peser l’eau découlant de l’échantillon

#### Calculs et résultat

L’absorption  $A_b$  est calculée, à 1% près, par la formule suivante :

$$\rho_{abs} = \frac{100 * (M1 - M2)}{M2}$$

- M1 : poids L’échantillon sèche en surface
- M2 : poids L’échantillon à l’étuve

Le tableau suivant résume les résultats de l’essai d’absorption pour les différents matériaux utilisés :

	M1(g)	M2(g)	Résultats %
0/4 3/8 8/15	561	550	2
3/8	561	550	2
8/15	561	550	2

**Tableau.II.7. Résultats d’essai d’absorption d’eau**

Le coefficient d’absorption d’eau est très faible pour des granulats (=2 %) ce qui indique une faible porosité intra granulaire de ces matériaux. Les valeurs sont conformes aux spécifications de la

norme [XP P 18-545], qui préconise une absorption d'eau maximale de 5 % pour les granulats à bétons. Les quantités d'eau absorbées par les granulats seront prises en compte dans les formules de béton de manière à maîtriser l'eau efficace.

#### **II.3.4. L'équivalent de sable**

##### **Définition et But de l'essai.**

L'essai permet de mettre en évidence la proportion relative de poussière fine nuisible ou d'éléments argileux dans les sols ou agrégats fins. Pour un béton, ces fines risquent d'inhiber l'hydratation du liant et gênent l'adhérence avec les agrégats [II3].

##### **Principe.**

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

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

Machine à secouer les éprouvettes d'Es Cette solution est composée pour 1 l de solution de :

- 111 g  $\pm$  1 g de chlorure de calcium,
- 480 g  $\pm$  5 g de glycérine,
- 12 à 13 g de solution aqueuse de formaldéhyde.

La solution est à compléter à 5 litres avec l'eau distillée pour être conservée entre 2 à 4 semaines.

**Références normatives :** NF p 18-597

##### **Matériel utilisé**

- Eprouvettes, en matière plastique, avec 2 traits repères.
- Entonnoir, tamis, spatule, balance, thermomètre, récipients,
- Machine agitatrice électrique ou manuelle,
- Réglet de mesure et piston taré comporte 3 vis formant des butées (masse 1 kg).



FigureII.11 : Machine agitatrice électrique

### Mode opératoire

- Remplir les 2 éprouvettes de solution lavante jusqu'au 1<sup>er</sup> repère, ensuite verser la quantité de sable tarée,
- Eliminer les bulles d'air en frappant chaque éprouvette contre la paume de la main et laisser reposer 10 minutes,
- Boucher les éprouvettes et les agiter d'un mouvement rectiligne, horizontal, sinusoïdal de 20 cm d'amplitude à l'aide d'une machine à secouer (90 allers et retours en 30 secondes).
- Laver et remplir les éprouvettes avec le tube laveur en rinçant le bouchon, lavant les parois intérieures de toutes les éprouvettes et laver la masse du sable en y faisant remonter et descendre lentement le tube ainsi les fines remontent en surface, on ferme le robinet lorsque la solution atteint le 2<sup>ème</sup> trait (supérieur) et on sort le tube laveur.
- On laisse reposer 20 minutes en évitant toute vibration,
- On mesure à vue les hauteurs  $h_1$  et  $h_2$  ( $h_2$  est entachée d'incertitude) pour effectuer la mesure

### Calculs et résultat

L'équivalent de sable visuel (ESV) est défini par :

$$ESV = \frac{H_2}{H_1} \times 100 \%$$

L'équivalent de sable est défini par

$$ES = \frac{H_2}{H_1} \times 100 \%$$

Le tableau suivant résume les résultats de l'essai d'équivalent de sable pour les différents matériaux utilisés :

N ° Eprouvette	Hauteur H <sub>1</sub> (cm)	Hauteur H <sub>2</sub> (cm)	ESV = (H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> ) 100
1	11.50	7.20	62.60
2	11.20	7.10	63.39

**Tableau.II.8. Résultats d'essai de l'équivalent de sable**

On remarque d'après le tableau III.3.que

- La valeur de l'équivalent de sable (= 63%) respecte les spécifications des sables à bétons de la norme [NF P 18-598], qui doit être supérieure à 60 pour les sables argileuse risque de retrait ou de gonflement a rejeter pour des bétons qualités.

### II.3.5. Essai Los-Angeles

« La Résistance à la Fragmentation par Chocs et à l'Usure par Frottement des Granulats »

#### Définition et But de l'essai

Ce mode opératoire est issu de l'essai américain défini par la norme ASTM C.131.55 L'essai permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat.

Il s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des assises de chaussée, y compris les couches de roulement [II4].

Le matériau évolue pendant l'essai, d'une part par suite du choc des boulets sur le granulat (rupture fragile des éléments), d'autre part par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine et sur les boulets.

#### Principe

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi six granularités types, de la

classe granulaire 4/6,3 mm - 6,3/10 mm - 10/14 mm - 10/25 mm - 16/31,5 mm et 25/50 mm, se rapprochant au mieux de la granularité du matériau tel qu'il sera mis en œuvre.

Le poids de la charge de boulets varie en fonction du type de granularité. Si P est le matériau soumis à l'essai, p le poids des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, la résistance combinée à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques s'exprime par la quantité :  $LA = 100 \times p / P$

Cette quantité sans dimension est appelée, par définition, "coefficient Los Angeles" du matériau.

**Références normatives :** NF EN 1097-2

### **Matériel utilisé**

- La machine Los Angeles comporte :

1/ Un cylindre creux en acier de  $12 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$  d'épaisseur, fermé à ses deux extrémités, ayant un diamètre intérieur de  $711 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  et une longueur intérieure de  $508 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ . Le cylindre est supporté par deux axes horizontaux fixés à ses deux parois latérales, mais ne pénétrant pas à l'intérieur du cylindre ; le montage est tel que le cylindre peut ainsi tourner sur son axe qui doit être horizontal,

2/Une ouverture de 150 mm de largeur, sur toute la longueur du cylindre, permet d'introduire l'échantillon. Pendant l'essai, cette\* ouverture est obturée d'une façon hermétique aux poussières par un couvercle amovible tel que la surface intérieure reste bien cylindrique.

Cette dernière est coupée par une tablette en saillie placée à une distance de 40 cm du rebord du couvercle, distance mesurée le long du cylindre dans le sens de la marche. Cette tablette démontable, en acier dur est de section rectangulaire (longueur égale à celle du cylindre, largeur de  $90 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ , épaisseur de 25 mm). Elle repose, suivant un plan diamétral, le long d'une génératrice et est fixée par des boulons sur les parois latérales. Elle doit avoir des arêtes vives,

3/ La charge est constituée par des boulets sphériques de 47 mm de diamètre environ et pesant 420 et 445 g. Ces boulets ne doivent pas s'user de façon trop irrégulière,

4/ Un moteur d'au moins 0,75 kW, assurant au tambour de la machine une vitesse de rotation régulière comprise entre 30 et 33 tours/minute,

5/ Un bac destiné à recueillir les matériaux après essai,

6/ Un compte tours de type rotatif, arrêtant automatiquement le moteur au nombre le tour voulu.

- Un jeu de tamis de 1,6 - 4 - 6,3 ~ 10 - 14 mm. Leur diamètre ne devra pas être inférieur à 250mm,
- Une balance précise au gramme, de portée au moins égale à 10 kg,
- Une étuve à 105 °c,
- Des bacs et des truelles,
- Des bacs d'environ 40 x 30 x 5 cm, à perforation inférieur à 1,6mm.

### **Préparation du matériau.**

Effectuer l'essai sur un granulat, ayant une granularité conforme à l'une des six classes granulaires type, lavé et séché à l'étuve à 105°C jusqu'à poids constant (5 heures au minimum). La prise d'essai sera de 5 kg. La préparer de la façon suivante :

- Si deux essais sont envisagés, préparer, à partir de 15 kg, deux échantillons identiques par quartage à sec,
- Sinon, tamiser l'échantillon à sec sur chacun des deux tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand. Recueillir dans un bac 51 00 g environ du matériau tamisé. Ce poids supplémentaire de 1 00 g servant à compenser celui des poussières ou de la gangue terreuse. Laver cette quantité recueillie sous un jet d'eau et la remuer à la truelle jusqu'à ce que l'eau soit claire. Après lavage, verser le matériau dans un bac perforé et égoutter quelques instants. Sécher l'ensemble à l'étuve à 105 °c, jusqu'à poids constant. Retirer le bac perforé de l'étuve et laisser refroidir. Enlever l'excédent de matériau pour ajuster le poids à  $P = 5 \text{ kg} \pm 2 \text{ g}$ , exigé pour l'essai.

### **Mode opératoire.**

- Replacer le couvercle et serrer les boulons de fixation.
- Mise en route de l'essai en faisant effectuer à la machine 500 rotations à une vitesse régulière comprise entre 30 et 35 tr/mn pour toutes les classes à l'exception de la classe 25-50 mm où le nombre de rotations est de 1000.
- Enlever le granulat après l'essai. Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de granulat.

- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1,6 mm; le matériau étant pris en plusieurs fois afin de faciliter l'opération.
- Laver le refus à 1,6 mm dans un bac, bien remuer à l'aide d'une truelle. Puis verser dans le bac perforé, égoutter et sécher à l'étuve jusqu'à poids constant.
- Peser ce refus une fois séché, soit P' le résultat de la pesée.  $p = P - P' = 5000 - P'$

### Calculs et résultat

Le coefficient de Los-Angeles est défini par :

$$LA = ((5000 - P') / 5000) \times 100 \%$$

1) Eprouvette      M = 5000g      M<sub>1</sub> = 3982.20

$$LA = \frac{(5000 - 3982.20) \times 100}{5000} = 20.35$$

2) Eprouvette      M = 5000g      M<sub>1</sub> = 4012.30

$$LA = \frac{(5000 - 4012.30) \times 100}{5000} = 19.75$$

$$LA = \frac{20.35 + 19.75}{2} = 20.05$$

15% < LA < 20%      bon à moyen

Le tableau suivant résume les résultats de l'essai de los Angeles :

N° éprouvette	Classe granulaire	Masse totale la charge (g)	Masse du refus à 1.6mm Mr (g)	LA (%)
1	10/14	5000	3982.20	20.35
2	10/14	5000	4012.30	19.75

**Tableau.II.9. Résultats d'essai de los Angeles**

On remarque d'après le tableau II.9

- La résistance au choc Los Angeles (LA) des granulats, mesurée selon la norme [NF P18-573] sur la classe 10/14 du gravillon G8/16 est égale à 23.16. Cette valeur est inférieure à la valeur spécifiée par la norme [NF P18-540], qui préconise une valeur limite supérieure (Vs) de 40 pour les granulats destinés à la confection de bétons courants.

### II.3.6. Essai Micro-Deval

#### Définition et But de l'essai

L'essai micro-Deval a pour but la détermination de la résistance à l'usure par le frottement réciproque des éléments d'un granulat [Net 2].

#### Principe de l'essai

Le matériau soumis à cet essai évolue par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine en rotation et sur les boulets (charge abrasive)

**Références normatives :** NF EN 1097-1

#### Préparation de l'échantillon

La granulométrie de l'échantillon doit être conforme à l'une des classes granulaires types : 4-6,3 ; 6,3-10 ; 10-14 ; 25-50.

- Laver l'échantillon et le faire sécher à l'étuve jusqu'à une température de 105 °C et un poids constant (5 h au minimum).
- Pour une granulométrie qui varie de 4-14 mm prendre 500 g de l'échantillon et pour celle variant entre 25-50 mm prendre 10 kg de l'échantillon.

#### Mode opératoire

Concernant l'essai sur les gravillons compris entre 4-14 mm, la charge de boulets relative à la classe granulaire choisie :

<b>Classes granulaires (mm)</b>	<b>Poids échantillon (g)</b>	<b>Poids de la charge (g)</b>
<b>4-6,3</b>	<b>500</b>	<b>2000</b>
<b>6,3-10</b>	<b>500</b>	<b>4000</b>



<b>10-14</b>	<b>500</b>	<b>5000</b>
--------------	------------	-------------

En présence de l'eau, on rajoute 2.5 L d'eau.

### Calculs et résultat

$$M_D = [(500 - M_r) / 500] * 100$$

Micro Deval (MD) = la moyenne des  $M_D$  (i)

$$\text{Micro Deval (\%)} = 18$$

Le tableau suivant résume les résultats de l'essai de Micro Deval:

N° Eprouvette	Masse des refus à 1.6mm Mr (g)	Micro Deval MD (i)
1	408.60	18.28
2	411.00	17.80

**Tableau.II.10. Résultats d'essai de Micro Deval**

### II.4. L'Adjuvant

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau dit « TEMPO 12 », conforme à la norme NF EN934-2, fabriqué par SIKA.

Le TEMPO 12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

Le TEMPO 12 permet la fabrication de béton plastiques à autoplaçant transportés sur de longues distances et pompés.

Forme	Liquide
Couleur	Brun clair
PH	6.0 ± 1
Densité	1.06 ± 0.01
Teneur en ions Cl	≤ 0,1%
Teneur en Na <sub>2</sub> O Eq	≤ 1%
Extrait sec	30,2 ± 1,3 %

**Tableau.II.11. Caractéristiques physiques de TEMPO 12**



**FigureII.12 : TEMPO 12**

### **Dosage**

Plage d'utilisation recommandée : 0,2 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.

Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant.

### **Mise en œuvre**

SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

### **Domaines d'applications**

- Bétons à haute performance.
- Bétons autoplaçant.
- Bétons pompés.
- Bétons précontraints.
- Bétons architecturaux.

### **Propriétés et effets :**

Grâce à ses propriétés le TEMPO 12 permet :

#### **Sur béton frais**

- L'obtention d'un E/C très faible.
- Béton plastiques à fluides.
- D'éviter le ressuage et la ségrégation.
- De faciliter la mise en œuvre du béton.

#### **Sur béton durci**

- D'augmenter la durabilité du béton.
- D'augmenter les résistances mécaniques.

- Diminution de la perméabilité.
- Diminution la retraite

## II.5. Eau de gâchage

L'eau utilisée dans nos essais c'est l'eau potable approvisionné au niveau du laboratoire de LNHC.

Composition	Valeur	Unité
Chlorures (CL <sup>-</sup> )	56,80	Mg/L
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>- -</sup> )	102,75	Mg/L
PH à 15.5°C à l'émergence	07,55	/
Matières en suspension	<4ml	/
Odeur	Absence totale d'odeur d'hydrogène sulfuré	/
Couleur	Absence de couleur jaune pale	/
Matières Humiques	Absence de couleur brun jaunâtre	/
Huiles et Graisses	Aucunes traces visibles	/
Détergents	Absence de mousses	/

**Tableau.II.12. Composition de l'eau**

L'échantillon d'eau prélevé de réservoir du laboratoire est conforme pour le gâchage de béton selon **NF EN 1008 du 07/2003**.

- ❖ L'eau notée (E)

## II-6. Le ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un CEM II-A de hadjar el ssoud



Figure II.13 : SAC DE CIMENT

II.6.1. Caractéristique physique :

Caractéristique	Résultats	Unités
La masse volumique apparente	1.04	g/cm <sup>3</sup>
La masse volumique absolue	3.08	g/cm <sup>3</sup>
La surface spécifique de Blaine	3213	cm <sup>2</sup> /g
La perte au feu	7.5	%
La chaux libre	2	%
Consistance normale	28.6	%
Expansion « le Chatelier »	0	mm
Début de prise	186	Min
Fin de prise	228	Min

Tableau II.13 : caractéristique physique du ciment

On remarque d'après le tableau que :

- Le temps de début de prise est conforme à la norme qui exige 60 minutes.
- La stabilité du ciment est satisfaisante car la valeur obtenue est inférieure à 10 mm.

### II.6.2. Caractéristiques mécaniques :

	Age (jours)		
	2 j	7 j	28 j
<b>Compression (MPa)</b>	17.2	38	48
<b>Traction par Flexion (MPa)</b>	3.90	6.31	7.47

**Tableau.II.14 : caractéristique mécanique du ciment**

- Les mesures de résistances mécaniques montrent que notre ciment respecte la norme pour le ciment classe 42.5.

### II.6.3. Composition chimique

Désignation	Résultats en %
CaO	60.25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.52
SiO <sub>2</sub>	22.21
MgO	1.12
Na <sub>2</sub> O	0.16
K <sub>2</sub> O	0.80
Cl <sup>-</sup>	0.003
SO <sub>3</sub>	2.45
P.A.F	7.5
CaO libre	2.4

**Tableau.II.15 : composition chimique du ciment**

D'après les analyses chimiques on constate que :

- La chaux libre respecte la norme qui exige une valeur inférieure ou égale à 2%.
- MgO < %

#### II.6.4. Compositions minéralogiques

Désignations	Résultats en %
C <sub>3</sub> S	61.28
C <sub>2</sub> S	15.72
C <sub>3</sub> A	7.85
C <sub>4</sub> AF	11.37

**Tableau.II.16 : Composition minéralogiques du ciment**

#### II.7. FORMULATION DU BETON

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des granulats, où l'on dispose le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités sont celles recherchées pour la construction de l'ouvrage désiré :

Plusieurs méthodes de formulation ont été élaborées par : ABRAMS, BOLOMEY, CAQUOT, FAURY...etc.

Dans notre cas, nous avons choisi la méthode ((DREUX-GORISSE)) parce qu'elle est une méthode assez simple et facile à utiliser

##### II.7.1. Programme expérimental

Dans le programme expérimental nous avons étudié une série d'essais à savoir :

- 1 - La substitution de gravillon utilisé dans ce cas est un mélange en masse de 25% de gravillon de marbre et 75% de gravillon 3/8 d'Ain Abid, (E/C=0.50) constant.
- 2 La substitution de gravillon utilisé dans ce cas est un mélange en masse de 50% de gravillon de marbre et 50% de gravillon 3/8 d'Ain Abid, (E/C=0.50) constant.
- 3 La substitution de gravillon utilisé dans ce cas est un mélange en masse de 75% de gravillon de marbre et 25% de gravillon 3/8 d'Ain Abid, (E/C=0.50) constant.

<b>B1 (0%)</b>	BO de référence à base de 100% de gravillon 3/8 d'Ain abid.
<b>B2 (25%)</b>	BO à base de 75% de gravillon concassé et 25% de gravillon de marbre
<b>B3 (50%)</b>	BO à base de 50% de gravillon concassé et 50% de gravillon de marbre
<b>B4 (75%)</b>	BO à base de 25% de gravillon concassé et 75% de gravillon de marbre
<b>B5 (100%)</b>	BO à base de 100 % de gravillon de marbre

**Tableau.II.17 : Différentes compositions utilisées dans l'étude. \*Série d'essai : Substitution de gravillon**

N°	Notation	E /C	C	E	S 0/4	G Marbre	G 3/8	G8/15	G16/25
1	<b>BAP 1</b>	0,5	380,00	190,00	776,66	0,00	187,60	341,33	574,93
2	<b>BAP 2</b>	0,5	380,00	190,00	582,49	194,16	187,60	341,33	574,93
3	<b>BAP 3</b>	0,5	380,00	190,00	388,33	388,33	187,60	341,33	574,93
4	<b>BAP 4</b>	0,5	380,00	190,00	194,16	582,49	187,60	341,33	574,93
5	<b>BAP 5</b>	0,5	380,00	190,00	0,00	776,66	187,60	341,33	574,93

**Tableau.II.18 : Masses des constituants**

<b>Masse volumique des matériaux (Kg/m3)</b>	
ciment	3,1
S 0/4	2,75
G 3/8	2,79
G8/16	2,82
G15/25	2,85

**Tableau.II.19 : Masse volumique des matériaux**

Et à chaque fois on observe le comportement du béton frais et durcis.

On a effectué sur le béton frais des mesures de la Masse volumique, l'air occlus et l'affaissement au cône d'ABRAMS ; et sur le béton durci des mesures de la résistance à la compression et la

résistance à la traction par flexion à 2, 7 et 28 jours respectivement ainsi que l'Essai au scléromètre à et l'Essai d'auscultation dynamique à 28 jours respectivement.

### II.7.2 Formulation de béton ordinaire de référence

Le béton « témoin », **BO** étudié est un béton ordinaire de :

Données	Melange
E/C	<b>0,50</b>
<b>C (fixé)</b>	<b>380,00</b>
E	190,00
<b>volume pate = la somme des volumes ci-dessous</b>	<b>327,58</b>
$V_c$	122,58
$V_e$	190,00
$V_{air}$ (1,5%)	15,00
<b>Volume Granulats G+S= 1000- <math>V_{pate}</math></b>	<b>672,42</b>
$V_s = 42\%$ volume Granulats	282,42
$V_{G1} = G \ 3/8$ (10% $V_G$ )	67,24
$V_{G2} = G \ 8/16$ (18% $V_G$ )	121,04
$V_{G1} = G \ 16/25$ (30% $V_G$ )	201,73
<b>Vérification : <math>V = V_c + V_f + V_{air} + V_e + V_{adj} + V_s + V_{G1} + V_{G2}</math></b>	<b>1 000,00</b>

Données de base	Description (valeur)
E/C	0.50
Consistance	Béton plastique (5-9 cm).
Dimension maximale de	25 mm
Forme des granulats	Granulats concassés.



Qualité des granulats	Courante.
Serrage	Vibration normale (courante).
Dosage en ciment	C = 380 kg/m <sup>3</sup>
Coefficient granulaire G	0,5

**Tableau.II.20 : Formulation de béton ordinaire de référence**

N°	Notation	E /C	C	E	S 0/4		G 3/8	G8/15	G16/25
1	BO 1	0,5	122,58	190,00	282,42		67,24	121,04	201,73

**Tableau.II.21 : Volumes des constituants en litres D'un m<sup>3</sup> de béton témoin**

#### II.7.4. Confection Des Éprouvettes

Conformément à la norme NF EN12390-1, et pour les besoins de notre étude et selon la nature de l'essai à réaliser, on a utilisé des moules cubiques (10×10×10) cm<sup>3</sup> et des moules prismatiques (7x7x28) cm<sup>3</sup>, pour la confection des éprouvettes.

Le malaxage est exécuté à l'aide d'une bétonnière, les étapes de malaxage sont :

- Introduction de tous les granulats dans le malaxeur (sable, gravillon et granulats en caoutchouc) et faire le malaxage pendant 3 min afin d'assurer une bonne dispersion des G.C. parmi les éléments traditionnels du béton
- Introduction du ciment et faire le malaxage pendant 1min
- Introduction du l'eau et faire le malaxage pendant 2min



**FigureII.14 : Bétonnière utilisée**

## II.8. PRÉSENTATION DES ESSAIS EXPERIMENTAUX

Différents essais ont été effectués :

### II.8.1. Essai Sur Béton Frais

#### II.8.1.1. Mesure de la consistance :

Le contrôle de l'ouvrabilité est effectué à l'aide de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams

#### Définition le cône d'Abrams

Le cône d'Abrams est un cône en acier galvanisé utilisé pour la mesure de la consistance d'un béton frais. Il mesure 20 cm à sa base et 10 cm à son sommet. Il porte le nom de son inventeur Duff Abrams [Net 1].

L'essai réalisé avec cet appareil est normalisé selon la norme NF EN 12350-2, désigné par essai de consistance ou plus généralement par essai d'affaissement au cône d'Abrams

#### Principe

Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids. Plus cet affaissement sera grand et plus le béton sera réputé fluide.

L'observation visuelle de la consistance du béton permet de définir quatre classes de consistance et de les désigner par des lettres :

Ferme	Plastique	Très plastique	Fluide
S1	S2	S3	S4

Mais cette approche peut être plus précise en quantifiant l'ouvrabilité. Pour cela il faut élaborer une échelle qui permette selon la valeur mesurée sur cette échelle de connaître avec une précision suffisante l'ouvrabilité requise pour la mise en œuvre du béton.

Cette échelle de valeur a été arbitrairement élaborée par la mesure au cône d'Abrams. Cet essai de mesure est normalisé. La norme NFP 18-451 indique toute la procédure de l'essai et le matériel à utiliser pour garantir cette échelle de mesure et donner du sens à la valeur mesurée. Globalement, il s'agit de former un cône de béton dans un moule. Au démoulage du cône, le béton frais s'affaisse.

L'importance de cet affaissement dépend de la consistance du béton ainsi que de la façon dont a été mis en place le béton dans le moule. La mise en place du béton est normalisée de façon à être constante. Ainsi l'importance de l'affaissement ne dépend plus que de la consistance du béton. La mesure en cm de la hauteur d'affaissement peut donc être liée à la consistance du béton. L'échelle de mesure et de grandeur est ainsi créée. Cette valeur d'affaissement prend du sens et indique plus précisément que l'œil l'état de consistance du béton. Elle est notée A, affaissement au cône d'Abrams. La précision de cette échelle est le cm. L'observation visuelle de la consistance peut être précisée par autant de valeurs intermédiaires.

Observation	A	Classe
ferme	De 0 à 4cm	S1
plastique	De 5 à 9cm	S2
très plastique	De 10 à 15cm	S3
fluide	Supérieur à 16cm	S4



### Mode Opératoire

- Nettoyer parfaitement le moule et son socle.
- Humidifier le socle à l'aide d'une pissette.
- Huiler la paroi intérieure du moule et le fixer sur son socle.
- Placer l'entonnoir sur le moule.



- A l'aide d'une pelle à coque, introduire le béton dans le moule en 3 couches, chacune ayant une hauteur égale au tiers de la hauteur du moule tronconique.
- Piquer chaque couche 25 fois, à l'aide de la tige de piquage, en répartissant les enfoncements uniformément sur la surface du béton.



- Le cône est arasé en faisant rouler la tige de piquage sur le bord supérieur du moule.
- Eviter un compactage supplémentaire du béton pendant cette opération.



- Le cône de béton est démoulé en soulevant le moule avec Précaution, lentement, à la verticale et sans secousses. Le béton s'affaisse selon sa consistance.



- L'affaissement du béton est mesuré en cm à l'aide du réglé sur portique. Cet affaissement est la hauteur entre le haut du cône et le point le plus haut du béton affaissé.



### Ajustement en eau

La mesure de l'affaissement permet de vérifier si l'ouvrabilité du béton est conforme à l'ouvrabilité souhaitée. Le dosage en eau du béton peut être ajusté selon le résultat de l'essai. Ce dosage est majoré pour un affaissement trop faible mais cela nous emmène à des problèmes de ségrégation, par contre si on lui rajoute un plastifiant le béton gardera sa cohésion tout en ayant une grande fluidité [II 4].

#### II.8.1.2. Masse volumique à l'état frais

Pour déterminer la masse volumique d'un béton frais, il faut suivre les étapes suivantes :

- Remplir en béton frais un récipient de volume  $V_r$  et de masse  $M_r$ . Le remplissage est exécuté en deux couches.

- Araser le haut du récipient.
- Peser le récipient rempli du béton, soit  $M_t$ .

La masse volumique du béton frais  $\delta_f$  est donnée par la relation suivante :

$$\delta_f = \frac{(M_t - M_r)}{V_r}$$



Figure II.15 : la masse volumique à l'état frais

#### II.8.1.3. Essai teneur en air occlus

La mesure de l'air occlus a été effectuée selon la norme NF P 18-353. L'appareillage utilisé est un aéromètre (figure). Le béton est placé en 3 couches consolidées avec 25 coups de pilon. La surface supérieure du béton est ensuite arasée à l'aide de la règle. La masse du contenant rempli de béton – la tare divisée par le volume du contenant donne la masse volumique du béton.

À l'aide de l'air mètre on mesure le volume d'air occlus ou entraîné du béton.



Figure II.16 : Essai teneur en air occlus

## II.8.2. Essais Sur Béton Durci

### II.8.2.1. Masse volumique à l'état Durcis

La masse volumique d'un béton ordinaire utilisé dans les chaussées, les bâtiments et autres structures usuelles est comprise entre 2240 à 2400 kg/m<sup>3</sup>. Elle dépend de la quantité et de la densité des matériaux, des quantités d'air emprisonné et entraîné. Le béton combiné avec des armatures donne naissance à un béton armé de masse volumique généralement accepté dans les calculs de 2400 kg/m<sup>3</sup>.

La masse d'un béton sec est égale à la masse du béton frais – la masse d'eau évaporable.

Une partie de l'eau de gâchage se combine chimiquement avec le liant pour former des hydrates et une autre partie est emprisonnée dans les pores et capillaires qui s'évaporent lentement dépendamment des conditions environnantes du béton. À une HR = 50%, l'eau qui s'évapore est estimé à environ 0,5 à 3% de la masse du béton. On rencontre aussi des bétons de masse volumique différente :

- Béton lourd
- Béton léger
- Béton isolant

La masse volumique à sec a été mesurée par pesée hydrostatique, les mesures ont été effectuées après conservation des éprouvettes cubiques 10x10x10 cm<sup>3</sup> dans l'eau à température ambiante jusqu'à l'échéance de 28 jours

Après séchage des éprouvettes jusqu'à une masse constante, On mesure la masse de l'éprouvette dans l'air, puis dans l'eau, la différence des deux pesées correspond au volume de l'éprouvette et la masse volumique égale à :

$$\rho_b = \frac{P_{air}}{(P_{air} - P_{imm})}$$

$\rho_b$  : masse volumique

$P_{air}$  : masse de l'éprouvette dans l'air

$P_{imm}$  : masse de l'éprouvette dans l'eau



**FigureII.17 : pesée hydrostatique**

## II.8.2.2. Essais destructifs

### II.8.2.2.1. Essai de compression

Un essai de compression est réalisé sur trois des éprouvettes cylindriques afin de déterminer la résistance en compression moyenne  $f_{cm}$  du matériau, ainsi que son module d'élasticité longitudinal, ou module d'Young moyen  $E_{cm}$ .

**Références normatives :** NF EN 18-455

#### Description de l'essai

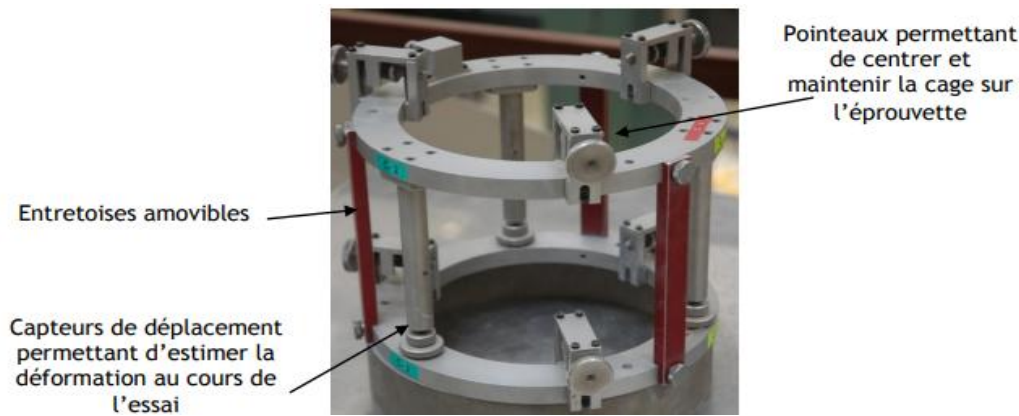
Cet essai consiste à appliquer une contrainte de compression sur les éprouvettes cylindriques posées verticalement. Les éprouvettes sont au préalable surfacées afin que le contact avec les plateaux de la presse engendre le moins de frottements possible.

L'objectif est d'appliquer une contrainte homogène dans toute la section durant l'essai. Le risque de voir apparaître des concentrations de contraintes, pouvant causer une rupture prématurée de l'éprouvette, est ainsi limité. Le surfacage permet ainsi d'assurer la reproductivité et la fiabilité de l'essai et surtout de diminuer l'effet de freinage. Cet effet est dû à la diminution de l'effet de Poisson



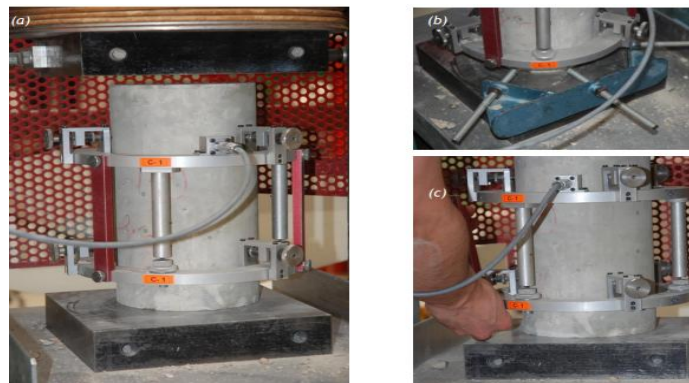
due aux frottements entre les plateaux de la presse et l'éprouvette. Les parties en contact se retrouvent ainsi en tri-compression, or une éprouvette en béton résistera mieux à une sollicitation en tri-compression qu'en compression uniaxiale. L'objectif étant ici d'estimer la résistance à la compression uniaxiale, il faut logiquement essayer de diminuer au maximum ce biais.

Les mesures au cours de l'essai de compression sont assurées par les trois capteurs de déformation de la cage extensométrique développée au sein du Département Génie Civil dans les années 70. L'éprouvette est installée dans la cage encore munie de d'entretoises assemblant provisoirement les deux anneaux de la cage. Les entretoises permettent de garantir la distance initiale entre les plans passant par les pointeaux. Le déplacement relatif entre ces plans est mesuré avec trois capteurs de déplacement permettant de calculer la déformation moyenne sur la hauteur de mesure. La cage et l'éprouvette sont centrées à l'aide de pointeaux.



**FigureII.18 : Cage extensométrique**

L'ensemble éprouvette et cage est alors installé sur le plateau de la machine de compression, parfaitement centré à l'aide d'un dispositif puis les capteurs sont câblés et enfin les entretoises sont ôtées. L'essai peut alors commencer.



**FigureII.19 : (a) Installation éprouvette et cage sur la machine, (b) centrage et (c) démontage des entretoises**

L'essai est piloté en effort et reste dans le domaine élastique du béton, l'éprouvette ne sera pas détruite. L'identification du module d'Young du matériau se base sur le domaine élastique, où l'évolution des contraintes est linéaire par rapport aux déformations et obéit à la loi de Hooke :

$$\sigma(\varepsilon) = E_c \cdot \varepsilon$$

Afin de s'assurer d'être dans le domaine de validité de la loi de Hooke, le module est calculé sur l'intervalle de contraintes limité par :  $\sigma \in [0 ; 0,3 \cdot \max]$ . À l'aide de capteurs de déplacement permettent de calculer la déformation longitudinale moyenne, l'évolution de l'effort appliqué par la presse sur le matériau en fonction de sa déformation longitudinale, est mesurée. Le diagramme contraintes/déformations  $\sigma(\varepsilon) = f(\varepsilon)$  du béton peut ainsi être tracé. Une fois le module élastique estimé, soit la cage est laissée afin de tracer le diagramme jusqu'à rupture (possible uniquement avec des bétons ordinaires) soit la cage est retirée afin de pouvoir mener l'essai jusqu'à rupture. C'est le cas notamment pour les bétons hautes performances qui vont exploser et risquerait d'endommager la cage extensométrique. L'essai terminé, les entretoises sont remises en place et l'ensemble éprouvette et cage extrait de la machine. Le retrait des pointeaux de la cage extensométrique permet de sortir l'éprouvette endommagée.



**FigureII.20 : Éprouvettes après essais encore équipées de la cage extensométrique**

#### **II.8.2.2.2. Essai de flexion**

L'essai de flexion est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm<sup>3</sup>, il s'agit de déterminer la résistance à la flexion (3 points) de l'éprouvette soumise à un effort centré exercé à l'aide d'une presse hydraulique.

**Références normatives : NF P.18-407**

La résistance à la traction par flexion est calculée à partir de la formule suivante :

$$\sigma_t = \frac{1,5 FL}{B^3}$$

$\sigma_t$  : résistance à la traction par flexion en (MPa)

F : la charge appliquée à la rupture en (N)

L : la distance entre les appuis (L = 210 mm)

B : le coté de la section carrée de l'éprouvette (B = 70 mm)



**FigureII.21 : l'essai de flexion a l'état durci**

### **II.8.2.3. Essais non destructifs**

Des essais non destructifs permettant d'estimer la résistance sont réalisés sur une éprouvette à l'aide d'un scléromètre ou d'un appareil à ultrason.

L'avantage des essais non destructifs est, comme leur nom l'indique, de pouvoir être utilisés dans les études préliminaires à la réhabilitation d'un bâtiment par exemple sans avoir besoin de carotter la structure.

Le béton est un matériau poreux et non homogène. Il est donc nécessaire de réaliser plusieurs mesures sur un minimum une trentaine de tests, en différents points sur la surface latérale d'une des éprouvettes cylindriques. Les mesures sont réalisées sur la paroi latérale, éprouvette posée sur sa base.

### II.8.2.3.1. Essai au scléromètre

#### Objectif de l'essai

Cet essai permet de tester l'homogénéité du béton in situ et d'obtenir une estimation rapide de la résistance du béton d'un ouvrage, sans procéder à des prélèvements de béton durci par carottage [Net 1].

**Références normatives :** NF EN 12504-2

#### Description du dispositif

Le scléromètre projette une bille sur la surface à tester à l'aide d'une énergie test et relève la hauteur de rebond de la bille ; la mesure se reporte sur le scléromètre dans sa partie graduée. L'énergie cinétique de rebond initiale est donnée dans le scléromètre comme une mesure permettant d'estimer la rigidité du béton afin d'en déduire sa résistance.

À partir de cette mesure, il est ainsi possible d'estimer la résistance en compression,  $c$  du béton (résistance en compression d'une éprouvette cubique de 100 mm de côté) à partir d'abaques expérimentaux.



**Figure II.22 : Essai de dureté à l'aide du scléromètre**

Après plusieurs essais sur toute la surface latérale de l'éprouvette, l'estimation de  $f_{ckcub}$  se base sur la valeur moyenne du rebond  $R_{moy}$ . À partir de  $f_{ckcub}$ , et en fonction de la position du scléromètre lors de la mesure.

#### Inconvénients de la méthode Sclérométrique

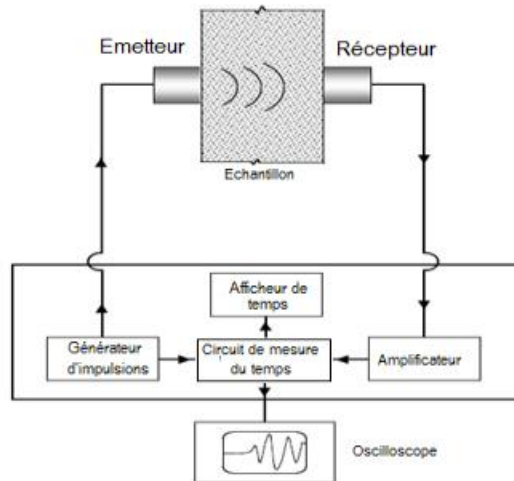
La méthode sclérométrique constitue une voie directe utilisée pour la détermination du degré d'homogénéité du béton et la dureté de la surface de l'élément en béton. Bien que l'essai au scléromètre soit utile, il ne constitue nullement une mesure fiable de la résistance du béton compte tenu des paramètres influants la précision de détermination de cette résistance. Plusieurs méthodes sont utilisées pour la transformation des indices sclérométriques en résistance mécanique à la compression du béton.

### **Les avantages de la méthode Sclérométrique**

- C'est une méthode peu coûteuse, simple et rapide. FELDMAN (1977).
- L'essai au scléromètre est comparatif, il est utile pour évaluer l'homogénéité du béton dans une structure ou lors de la fabrication d'éléments semblables des éléments préfabriqués NEVILLE (2000)
- L'essai peut aussi être utilisé pour vérifier si la valeur de l'indice de rebondissement a atteint la valeur désirée correspondant à la résistance du béton, ce qui peut aider à décider du moment où l'on peut mettre la structure en service.
- Une utilisation de cet essai est de pouvoir vérifier si le développement de la résistance d'un béton a été affecté par le gel au jeune âge. (Selon la norme ASTM C 805-85 un béton encore gelé peut donner un indice de rebondissement très élevé).
- Une application particulière de l'essai au scléromètre consiste à évaluer la résistance à l'abrasion des planchers de béton, qui dépend largement de la dureté de surface.

### **II.8.2.3.2. Essai d'auscultation dynamique**

Cette méthode permet de mesurer le temps de propagation d'une impulsion ultrasonique traversant le béton. Les principales caractéristiques de tous les appareils disponibles sur le marché sont très semblables. Ces appareils comprennent un générateur et un récepteur d'impulsions. Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc. Des cristaux semblables sont utilisés dans le récepteur. Le temps de propagation de l'impulsion dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques [II5].



**FigureII.23 : diagramme schématique du circuit de l'auscultation dynamique**



**FigureII.24 : appareil à ultrason**

Les essais consistant à mesurer la vitesse de propagation des impulsions peuvent être effectués sur des éprouvettes de laboratoire comme sur des ouvrages en béton réalisés. Certains facteurs influent toutefois sur la prise de mesures : 1. La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, et une substance de contact telle une mince couche de paraffine est indispensable. 2. Le parcours doit être préférablement d'au moins 30 cm de façon à prévenir toute erreur occasionnée par l'hétérogénéité du béton. 3. Une augmentation de la vitesse des impulsions se produit à des températures sous le point de congélation à cause du gel de l'eau. En revanche, entre 5 et 30°C, la vitesse des impulsions n'est pas subordonnée à la température. 4. La présence d'acier d'armature dans le béton a un effet appréciable sur la vitesse des impulsions. Il est par conséquent souhaitable et souvent indispensable de choisir des parcours

d'impulsions qui ne sont pas influencés par la présence d'acier d'armature ou d'effectuer des corrections si de l'acier se trouve sur le parcours de l'impulsion.

**Références normatives :** NF P 18-418

### Applications et limites

La méthode consistant à mesurer la vitesse de propagation des impulsions est une méthode idéale pour déterminer l'homogénéité du béton. Elle peut être utilisée autant sur les ouvrages achevés que sur ceux en construction. Habituellement, lorsque de grands écarts de la vitesse de propagation de l'impulsion sont découverts sans causes apparentes dans l'ouvrage, il y a lieu de soupçonner que le béton est défectueux ou altéré. Une vitesse élevée de propagation des impulsions indique généralement un béton de bonne qualité. Une relation générale entre la qualité du béton et la vitesse de diffusion des impulsions est décrite au tableau 1.1

Qualité du béton	Vitesse de propagation des impulsions, m/s
Excellente	supérieure à 4575
Bonne	3660 - 4575
Douteuse	3050 - 3660
Mauvaise	2135 - 3050
Très mauvaise	inférieure à 2135

**Tableau.II.22 : Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions**

La méthode consistant à mesurer la vitesse de propagation des impulsions a été utilisée pour étudier les effets sur le béton du gel et dégel, des attaques par les sulfates et les eaux acidifiées. Généralement, la réduction de la vitesse de propagation des impulsions est subordonnée à l'importance des dommages. Les fissures peuvent aussi être détectées. L'exploitation des résultats de l'essai d'auscultation dynamique, dans le but de déterminer l'importance des dommages, doit être faite avec grand soin puisque ces résultats sont souvent difficiles à interpréter. Il arrive quelquefois que les impulsions ne se propagent pas dans la partie endommagée du béton. Cette méthode peut aussi être utilisée pour évaluer le degré de durcissement et de développement de la résistance du béton au début de la prise, et permet donc de déterminer le moment où les coffrages peuvent être enlevés. Des ouvertures doivent être pratiquées dans le coffrage pour que le transducteur soit en contact direct avec la surface du béton. Lors du vieillissement du béton, le taux d'accélération des impulsions diminue beaucoup plus rapidement que le taux de croissance de la résistance, de sorte

que lorsque le béton possède une résistance supérieure à 13.6-20.4 MPa, il est possible de déterminer la résistance avec un degré de précision inférieur à  $\pm 20\%$ . La précision des résultats est fonction de la précision de l'étalonnage et de l'uniformité de la composition du béton de l'ouvrage et du béton des éprouvettes utilisées pour l'étalonnage.

### **Les avantages**

- C'est une méthode idéale pour déterminer l'homogénéité du béton.
- L'essai peut être utilisée autant sur les ouvrages complétés que sur ceux en construction
- La mesure des ondes sonores présente l'énorme avantage de donner des informations sur l'intérieur d'un élément de béton. Et selon CHUNG ET LAW l'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour détecter la fissuration (mais les fissures parallèles au déplacement de l'onde), les vides détériorations dues au gel ou de feu et l'uniformité du béton dans des éléments semblables. L'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour suivre les changements microstructuraux en un élément par exemple à la suite de cycles répétés de gel dégel.
- ELVERY ET IBRAHIM pendant leurs études sur la relation de la vitesse et la résistance dans plusieurs âges ont montrés que l'essai peut aussi être utilisé pour évaluer la résistance du béton à très jeune âge, à partir de trois heures et plus, ce qui peut être intéressant dans le domaine de la préfabrication du béton ou comme outil de décision



## **II.9. Conclusion**

Cette étude apporte un éclairage sur la valorisation des sous-produits et devrait aider, à terme, à la mise en place des règles de formulation de bétons à base de granulats de substitution. La base de cette étude est de déterminer les performances de chaque composition qui permet de comprendre le comportement de gravillon de déchets de marbre dans le béton. L'étude de la faisabilité de cette utilisation passe par plusieurs étapes, leur influence sur l'ouvrabilité et résistances mécaniques, sont les aspects les plus importants dans cette étude.

## CONCLUSIONS GENERALE

L'analyse des caractéristiques et le réemploi des déchets de marbre dans la confection des bétons et de contribuer à la réutilisation des déchets et sous-produits dans la fabrication des bétons. Valoriser ces granulats issus des déchets de l'industrie de marbre pour la fabrication d'un béton hydraulique peut étendre leur domaine d'utilisation actuel. Malgré plusieurs études de recherche pour une éventuelle utilisation avec des liants hydrauliques pour la construction d'ouvrages, les granulats de déchets d'une manière générale trouvent peu d'application en tant que granulats de béton.

Ce travail devrait porté essentiellement sur l'étude de la possibilité de récupération des déchets de marbre (gravier) de substitution dans la fabrication du béton, Une étude expérimentales a été programmé de façon à confirmer certain travaux de recherche avancée dans le domaine et d'améliorer sa maîtrise par l'apport de l'effet d'un certain nombre de facteurs tous indispensables pour sa qualification et son évaluation. Ainsi le programme initialement arrêté consisté a opéré des remplacements de la tranche gravier par des pourcentages (25%, 50%, 75% et 100%), comparé avec un béton ordinaire 0% de substitution. les propriétés physiques et mécaniques des bétons ordinaires à base de gravier naturels, les propriétés du béton ordinaire à l'état frais (masse volumique, ouvrabilité et teneur en air) et à l'état durci (résistances mécaniques dans différents milieux de conservation). Nous avons pu présenter la caractérisation des matériaux censés être utilisé dans le programme expérimental en se basant sur les fiches techniques fournies par le Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction de «L.N.H.C» Unité de Skikda.

D'après la recherche bibliographique qui confirme que la présence du granulats de marbre dans le béton ordinaire conduit à une augmentation de la résistance mécanique de ce dernier.

Pour conclure, malheureusement le programme expérimental initialement fixé n'a pas pu être réalisé pour cause de Pandémie COVID-19, car les laboratoires ont étaient fermés que ce soit celui de l'université ou ceux des laboratoires étatiques (LTP Est et LNHC). Ainsi notre manuscrite s'est limité à la partie recherche bibliographique, ce qui nous a obligé de recadrer le titre de notre mémoire.

## BIBLIOGRAPHI

- [9] BOURMATTE N : granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques, thèse de magister, université de Constantine, 2004.
- [22] Ministère des Travaux Publics : valorisation des pneus usagés et les déchets plastiques dans le domaine des travaux publics, journée scientifique, novembre 2005.
- [26] RAMACHANDRAN V-S : utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton, CBD-215-F, conseil national de recherches Canada, juin 1981
- [II1] KOUDJA, A. : « Corrélation entre Essais non Destructifs et Essais Destructifs du Béton à Faible Résistance » Mémoire de magister Université Hassiba Ben Bouali Chlef (2010).
- [II2] GADRI, K et GUETTALA, A. : « évaluation du module d'élasticité à l'aide des techniques non destructive » 22ème Congrès Français de Mécanique, Lyon, 24 au 28 Aout 2015.
- [II3] LANCHON, R. : « Cours de laboratoire : Granulats, Bétons, Sols » Tome1-Casteilla, Paris (1989)
- [II4] NBN B 15-215. « Essais des bétons : absorption d'eau par immersion ». Janvier 1989.
- [II5] HANI, A : « Etude de Comportement d'un Béton Hydraulique Modifié (déchets des pneus) » mémoire de master Université Kasdi Merbah-Ouargla (2016).
- Netographie
- [Net 1] : [https://www.memoireonline.com/01/09/1871/m\\_Fissuration-en-beton-avec-referance-particuliere-au-beton--haute-performance8.html](https://www.memoireonline.com/01/09/1871/m_Fissuration-en-beton-avec-referance-particuliere-au-beton--haute-performance8.html)
- [Net 2] : [https://www.researchgate.net/figure/3-Variation-de-la-masse-volumique-a-letat-frais\\_fig36\\_301221235](https://www.researchgate.net/figure/3-Variation-de-la-masse-volumique-a-letat-frais_fig36_301221235)

## **LISTE DES FIGURES**

<b>Figure I-1 : Protection d'un talus par les pneus réformés.....</b>	<b>24</b>
<b>Figure I-2 : Formulation de béton.....</b>	<b>27</b>
<b>Figure I-3 : Dosage de béton.....</b>	<b>29</b>
<b>Figure I-4 : Détermination de la composition de béton.....</b>	<b>30</b>
<b>Figure I-5 : Organigramme démonstratif d'utilisation des abaques .....</b>	<b>32</b>
<b>Figure I-6 : Abaque n°1.....</b>	<b>32</b>
<b>Figure I-7 : Méthode de Bolomey.....</b>	<b>33</b>
<b>Figure I-8 : Courbe optimal.....</b>	<b>34</b>
<b>FigureII.1 : Les matériaux utilisés.....</b>	<b>39</b>
<b>FigureII.2 : Un jeu de tamis.....</b>	<b>40</b>
<b>FigureII.3 : Une balance électrique de grande précision (0.001 g).....</b>	<b>41</b>
<b>FigureII.4 : Essai teneur en air occlus.....</b>	<b>41</b>
<b>FigureII.5 : Une tamiseuse électrique.....</b>	<b>41</b>
<b>FigureII.6 : l'essai granulométrique.....</b>	<b>42</b>
<b>FigureII.7 : Courbe granulométrique.....</b>	<b>45</b>
<b>FigureII.8 : Série de grilles .....</b>	<b>46</b>
<b>FigureII.9 : La masse volumique apparente.....</b>	<b>48</b>
<b>FigureII.10 : la masse volumique absolue.....</b>	<b>51</b>

<b>FigureII.11 :</b>	<b>Machine agitatrice électrique.....</b>	<b>54</b>
<b>FigureII.12 :</b>	<b>TEMPO 12.....</b>	<b>61</b>
<b>FigureII.13 :</b>	<b>SAC DE CIMENT.....</b>	<b>63</b>
<b>FigureII.14 :</b>	<b>Bétonnière utilisée.....</b>	<b>68</b>
<b>FigureII.15 :</b>	<b>la masse volumique à l'état frais.....</b>	<b>73</b>
<b>FigureII.16 :</b>	<b>Essai teneur en air occlus.....</b>	<b>74</b>
<b>FigureII.17 :</b>	<b>pesée hydrostatique.....</b>	<b>75</b>
<b>FigureII.18 :</b>	<b>Cage extensométrique.....</b>	<b>76</b>
<b>FigureII.19 :</b>	<b>(a) Installation éprouvette et cage sur la machine, (b) centrage et (c) démontage des entretoises.....</b>	<b>76</b>
<b>FigureII.20 :</b>	<b>Éprouvettes après essais encore équipées de la cage extensométrique .....</b>	<b>77</b>
<b>FigureII.21 :</b>	<b>l'essai de flexion a l'état durci.....</b>	<b>78</b>
<b>FigureII.22 :</b>	<b>Essai de dureté à l'aide du scléromètre.....</b>	<b>79</b>
<b>FigureII.23 :</b>	<b>diagramme schématique du circuit de l'auscultation dynamique.....</b>	<b>81</b>
<b>FigureII.24 :</b>	<b>appareil à ultrason.....</b>	<b>81</b>

## Liste des Tableaux

<b>Tableau I-1: Produits recyclés et leurs procédés de recyclage (partie1).....</b>	<b>06</b>
<b>Tableau I-1: Produits recyclés et leurs procédés de recyclage (partie2).....</b>	<b>06</b>
<b>Tableau I-1: Produits recyclés et leurs procédés de recyclage(partie3) .....</b>	<b>08</b>
<b>Tableau I-1: Produits recyclés et leurs procédés de recyclage (partie4) .....</b>	<b>10</b>
<b>Tableau I-1: Produits recyclés et leurs procédés de recyclage(partie5) .....</b>	<b>12</b>
<b>Tableau I-2: Degrés d'humidité des granulats .....</b>	<b>31</b>
<b>Tableau.II.1 : Résultats d'analyse granulométrie du Gravier 8/15 .....</b>	<b>43</b>
<b>Tableau.I-2 : Résultats d'analyses granulométrie du Gravier 3/8 .....</b>	<b>43</b>
<b>Tableau.II.3 : Résultats d'analyse granulométrie du sable 0/4 .....</b>	<b>44</b>
<b>Z</b>	
<b>Tableau.II.4 : Résultats d'essai de coefficient d aplatissement .....</b>	<b>47</b>
<b>Tableau.II.5 : Masse volumique apparente des granulats .....</b>	<b>49</b>
<b>Tableau.II.6 : Masse volumique absolue des granulats .....</b>	<b>52</b>
<b>Tableau.II.7 : Résultats d'essai d'absorption d'eau .....</b>	<b>53</b>
<b>Tableau.II.8 : Résultats d'essai de l'équivalent de sable .....</b>	<b>55</b>
<b>Tableau.II.9 : Résultats d'essai de los Angeles.....</b>	<b>58</b>
<b>Tableau.II.10 : Résultats d'essai de Micro Deval.....</b>	<b>60</b>
<b>Tableau.II.11 : Caractéristiques physiques de TEMPO 12.....</b>	<b>60</b>
<b>Tableau.II.12 : Composition de l'eau.....</b>	<b>62</b>
<b>Tableau.II.13 : caractéristique physique du ciment.....</b>	<b>63</b>
<b>Tableau.II.14 : caractéristique mécanique du ciment.....</b>	<b>64</b>
<b>Tableau.II.15 : composition chimique du ciment.....</b>	<b>64</b>
<b>Tableau.II.16 : Composition minéralogiques du ciment.....</b>	<b>65</b>
<b>Tableau.II.17 : Différentes compositions utilisées dans l'étude. *Série d'essai : Substitution de gravillon.....</b>	<b>66</b>
<b>Tableau.II.18 : Masses des constituants.....</b>	<b>66</b>
<b>Tableau.II.19 : Masse volumique des matériaux.....</b>	<b>66</b>

<b>Tableau.II.20 :</b>	<b>Formulation de béton ordinaire de référence.....</b>	<b>68</b>
<b>Tableau.II.21 :</b>	<b>Volumes des constituants en litres D'un m3 de béton témoin .....</b>	<b>70</b>
<b>Tableau.II.22 :</b>	<b>Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions .....</b>	<b>82</b>