

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA - BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Mémoire de Master

Option : Structures

Thème

Valorisation des granulats du gisement de Baryte de Bou-caïd, (Wilaya de Tissemsilt) Exploité par le groupe ENOF dans le domaine du génie civil

Réalisé par :

MATEM Ahlem

HERROUDJ Khedoudja

Encadré par :

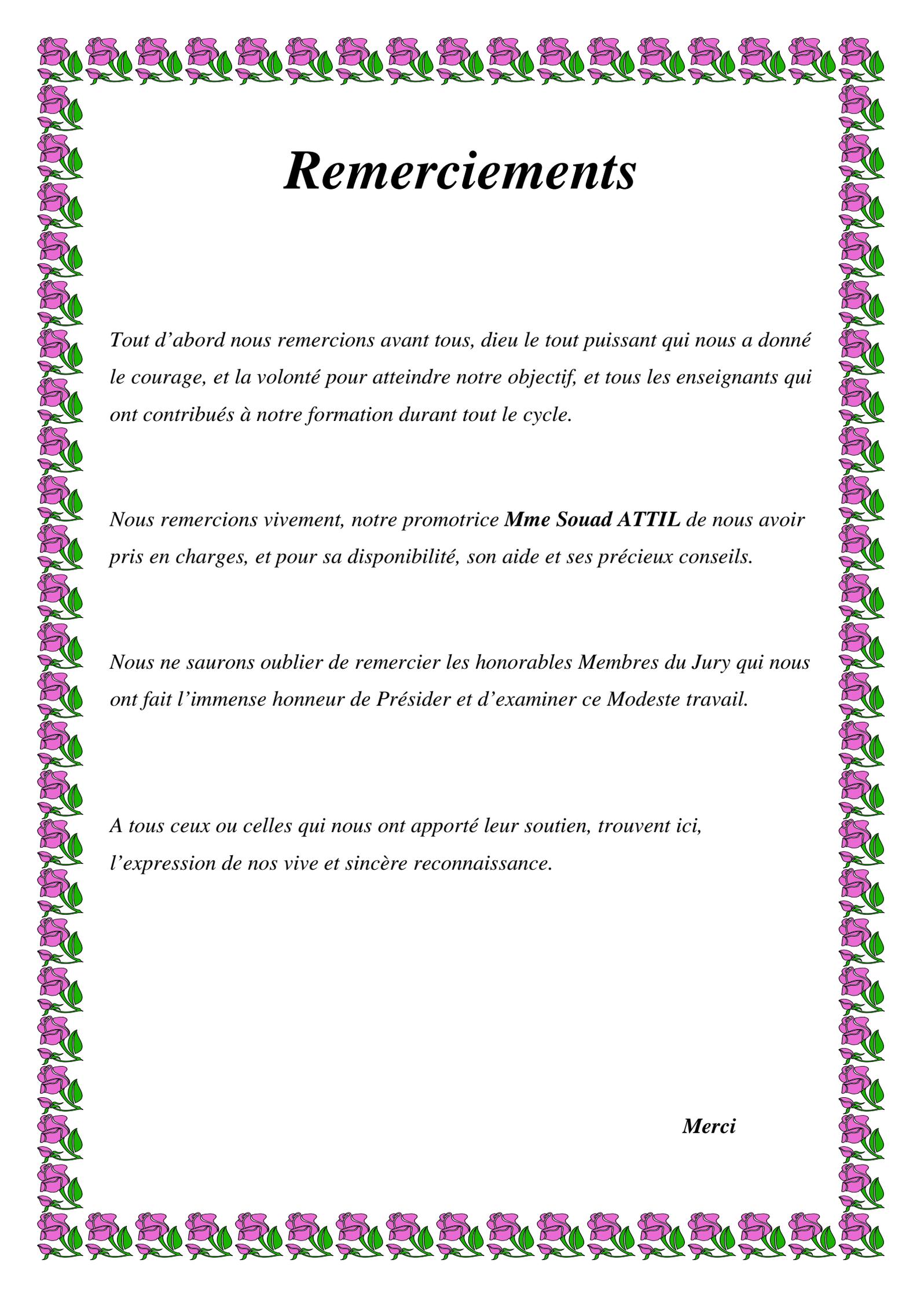
Mme. ATTIL Souad

Soutenu le 16/09/2020 devant le jury composé de :

Président : Mr Chellouah Nacer

Examinatrice : Mme Sellami Asma

Année Universitaire : 2019 - 2020



Remerciements

Tout d'abord nous remercions avant tous, dieu le tout puissant qui nous a donné le courage, et la volonté pour atteindre notre objectif, et tous les enseignants qui ont contribués à notre formation durant tout le cycle.

*Nous remercions vivement, notre promotrice **Mme Souad ATTIL** de nous avoir pris en charges, et pour sa disponibilité, son aide et ses précieux conseils.*

Nous ne saurons oublier de remercier les honorables Membres du Jury qui nous ont fait l'immense honneur de Présider et d'examiner ce Modeste travail.

A tous ceux ou celles qui nous ont apporté leur soutien, trouvent ici, l'expression de nos vive et sincère reconnaissance.

Merci



Dédicace

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

Je dédie ce mémoire :

-  *A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.*
-  *Ames chers frères et sœurs.*
-  *A ma tante et à mes oncles.*
-  *A tous mes cousins et cousines.*
-  *Ames meilleurs amis et à tous ceux qui me sont chère.*

AHLEM



Dédicace

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

Je dédie ce mémoire :

-  *A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.*
-  *A mes chers frères et sœurs.*
-  *A ma tante et à mes oncles.*
-  *A chaque cousins et cousines.*
-  *A mes meilleurs amis et à tous ceux qui me sont chère.*
-  *A mon mari et ma deuxième famille kinzi*

KHEDOUDJA

Table de matières

Sommaire :

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des notations

Résumé.....1

Introduction générale.....2

Etude bibliographique

Chapitre I : Généralités sur les bétons

I.1. Introduction.....3

I.2. Historique.....3

I.3. Les composants d'un béton.....4

I.3.1. Ciment.....5

I.3.1.1. Définition.....5

I.3.1.2. Classification des ciments.....5

 ➤ Classification suivant la composition.....6

 ➤ Classification suivant les résistances à la compression.....7

I.3.2. L'eau de gâchage.....7

I.3.3. Adjuvants et additifs.....8

I.3.4. Granulats.....9

I.3.4.1. Généralités sur les granulats utilisées dans le béton.....9

 ➤ Introduction.....9

 ➤ Définition.....10

I.3.4.2. Les différents types de granulats.....10

I.3.4.3. Les caractéristiques des granulats.....	14
I.3.4.4. Utilisation des granulats.....	20
I.4. Propriétés essentielles d'un béton.....	20
I.4.1. Propriétés du béton frais	21
I.4.2. Propriétés du béton durci.....	21
I.5. Les méthodes de formulation des bétons.....	21
I.5.1. Méthode de Bolomey.....	21
I.5.2. Méthode de Faury.....	22
I.5.3. Méthode de Valette.....	22
I.5.4. Méthode de Dreux-Gorisse.....	22
I.7. Conclusion.....	22

Chapitre II : Les granulats lourds

II.1. Introduction.....	23
II.2 Définition.	23
II.3. Production mondiale.....	26
II.4. Les bétons lourds.	27
II.4.1. Propriétés	27
II.4.2. Utilisation du béton lourd.....	27
II.4.3. Composition du béton lourd.....	28
II.4.4. Formules de bétons	28
II.4.5. Mise en œuvre du béton lourd	29
II.4. 6. Avantages du béton lourd.	30
II.4. 7. Inconvénients du béton lourd.	30

II.5. Les conditions de fabrication du béton lourd.	31
II.6. Le béton lourd comme protection contre les radiations.	31
II.7. Conclusion.....	32
 Chapitre III : Exploitation de la barytine	
III.1. Introduction.....	33
III.2. Définition.....	33
III.3. Origines de la barytine.....	33
III.4. Aspect de la barytine	33
III.5. Formation de la barytine.....	34
III.6. Types de gisement.....	34
III.6.1. Les gisements filoniens et de remplissage de cavité.....	34
III.6.2. Les gisements stratiformes.....	34
III.6.3. Les gisements stratiformes de couverture sédimentaire.....	35
III.6.4. Les gisements stratiformes d'origine hydrothermale-exhalative.....	35
III.6.5. Les gisements résiduels.....	35
III.7. Méthodes d'exploitations de la barytine.....	35
III.8. Pétrographie et minéralogie de la barytine	35
III.9. Caractéristiques physico-chimiques de la baryte.....	36
III.10. Domaines d'utilisations de la barytine.....	36
III.10.1. Au niveau national.....	36
III.10.2. Au niveau mondial.....	37
III.11. La production de baryte en constante augmentation par Somibar (groupe ENOF).....	40
III.11.1. Au niveau national.....	40

III.11.2. Au niveau mondial.....	42
III.12. La consommation de la barytine.....	42
III.12.1. Au niveau national.....	42
III.12.2. Au niveau mondial.....	43
III.13. Les prix de barytine.....	43
III.14. Les réserves de la barytine.....	43
III.14.1. Les réserves de la barytine au niveau national.....	43
III.14.2. Les réserves de la barytine au niveau mondial.....	44
III.15. Les méthodes de traitement de minerai barytique.....	44
III.15.1. Au niveau national à l'usine de Bou-caïd (Tissemsilt).....	45
III.15.2. Au niveau mondial.....	47
➤ La barytine de Bulgarie.....	47
III.16. Utilisation de la barytine dans le béton en Algérie	49
III.17. Les effets de la barytine sur la santé et l'environnement.....	50
III.17.1. Les effets de la barytine sur la santé.....	50
III.17.2. Les effets de la barytine sur l'environnement.....	50
III.18. Conclusion.....	51

Chapitre IV: Résultats de bibliographie et discussions

IV.1. Introduction.....	52
IV.2. Les différentes recherches effectuées sur le minerai de la barytine.....	52
IV.2.1. Méthode de traitement de la baryte de l'unité de Bou-caïd (Tissemsilt).....	52
IV.2.2. Les techniques de traitement.....	53
IV.2.3. Pulvérisation et conditionnement du produit fini.....	53

IV.2.4. Contrôle de qualité.....	54
IV.2.5. Les analyses effectuées au niveau du laboratoire de l'unité de Bou-caïd.....	55
IV.2.6. Résultats et discussions.....	56
IV.2.6.1 Résultats des différentes propriétés de la Baryte de Bou-caïd.....	56
IV.2.6.2 Interprétation.....	60
IV.3. Effets de la baryte en poudre sur la durabilité d'un béton hydraulique.....	61
IV.3.1 introduction.....	61
IV.3.2. Compositions des bétons.....	62
IV.3.3 Indices de durabilité des bétons formules.....	62
IV.3.4 Résultats et discussions	65
IV.4 Irradiation d'un béton avec des rayons gamma issus d'une source Radioactive type ^{60}Co : effet de l'ajout de la baryte sur l'efficacité Du blindage	66
IV.4.1 introduction.....	66
IV.4.2 Composition des bétons étudiés.....	67
IV.4.3 Détermination de l'efficacité des blindages	67
IV.4.4 Résultats et discussion	67
IV.4.5 Discussion.....	69
IV.5 Conclusion.....	70
Conclusion Générale.....	71

Liste Des Figures

Liste Des Figures :

Etude Bibliographique

Chapitre I : Généralités sur les bétons

Figure I.1 : Les constituants d'un béton.....4

Figure I.2 : Exemple des granulats naturels.....11

Figure I.3 : Exemple des granulats alluvionnaires naturels.....13

Chapitre II : Les granulats lourds

Figure II.1 : béton lourds.....23

Figure II.2 : Production mondiale de barytine en 2014.....26

Figure II.3 : Béton lourd de masse volumique de 4760 kg/m³ avec sable de fer (fractions Granulométriques 0,1-0,2 mm, 0,3-0,6 mm et 0,5-1,0 mm) comme granulats lourds.....27

Figure II.4 : Béton lourd dans le secteur nucléaire.....28

Figure II.5 : Partie de mur en béton lourd (à l'arrière) et béton ordinaire (bloc de Radioprotection pour deux accélérateurs linéaires à l'hôpital cantonal de Lucerne).....32

Chapitre III : Exploitation de la barytine

Figure III.1 : Cristal de baryte.....33

Figure III.2 : Boue de forage.....37

Figure III.3 : Fabrication des papiers.....40

Figure III.4 : Absorption du rayon X.....40

Figure III.5 : la production mondiale de la barytine en 2014 (USGS).....42

Figure III.6 : Cellules de flottation dans l'usine de Chaillac-France.....45

Figure III.7: séparation gravimétrique du minerai barytique de Bou-caïd (Tissemsilt-Algérie).....45

Figure III.8 : La chaîne de traitement de minerai barytique de Bou-caïd- Tissemsilt.....46

Figure III.9 : Schéma technologique de traitement de minerai barytique de Kremikovtzi Bulgarie.....49

Chapitre IV : Résultats de bibliographie et discussions

Figure IV.1: Baryte de Hammam Zriba.....61

Figure IV.2 : Courbes granulométriques des matériaux61

Figure IV.3 : Absorption par immersion.....64

Figure IV. 4 : Coefficient d'absorption capillaire.....64

Figure IV. 5 : Mesure de carbonatation.....64

Figure IV.6 : Vitesse de carbonatation naturelle Et accélérée.....64

Figure IV.7 : Mesure de la pénétrabilité aux ions chlorure.....65

Figure IV 8. Variation du débit de dose en fonction de l'épaisseur.....68

Figure IV. 9:-a-Coefficient d'atténuation linéique ;-b- épaisseurs (1/2) et (1/10) en fonction du taux massique de baryte.....69

Liste Des Tableaux

Liste Des Tableaux :

Etude Bibliographique

Chapitre I : Généralités sur les bétons

Tableau I.1 : la teneur des constituants du béton en poids et en volume.....4

Tableau I.2 : Les classes de résistance de ciments.....7

Tableau I.3. Les constituants des granulats naturels.....11

Tableau I.4. Teintes des granulats en fonction de leur nature minéralogique.....19

Chapitre II : Les granulats lourds

Tableau II.1 : Densités de granulats lourds et effet de blindage des bétons fabriqués avec ces granulats24

Tableau II.2 : Propriété chimique et physique des minéraux constituant les granulats denses (Foucault et Raoult, 2010)25

Tableau II.3 : Quelques compositions pour obtention des bétons lourds de masse volumique $\geq 3500 \text{ kg/m}^3$29

Chapitre III : Exploitation de la barytine

Tableau III.1 : les caractéristiques physico-chimiques de la barytine.....36

Tableau III.2 : la production mondiale de la barytine.....42

Tableau III.3 : La consommation mondiale de la barytine.....43

Tableau III.4 : Les réserves mondiales de la barytine en 2015.....44

Tableau III.5 : La composition chimique de la barytine brut de Kremikovtzi.....48

Tableau III.6: La composition chimique du concentré obtenu après le traitement de l'usine de Kremikovtzi Bulgarie.....48

Chapitre IV: Résultats de bibliographie et discussions

Tableau IV.1 : L'échantillonnage d'un produit traité.....	54
Tableau IV.2 : Les différentes analyses effectuées par le service du laboratoire.....	57
Tableau IV.3 : Résultats de la densité effectué sur les échantillons.....	57
Tableau IV.4 : résultats de taux de Ca^{+} (%) effectué sur les échantillons.....	58
Tableau IV.5 : le taux de résidu dont la dimension est supérieur à $75 \mu m$ dans des échantillons de produit fini selon les exigences de la norme(A.P.I).....	58
Tableau IV.6 : Le taux des particules inférieures à $6 \mu m$	59
Tableau IV.7 : Résultats de la densité de tout-venant effectué sur les échantillons.....	60
Tableau IV.8 : Résultats de la densité de concentré effectué sur les échantillons.....	60
Tableau IV.9 : Composition des formulations retenues.....	62
Tableau IV.10 : Evolution de la résistance à la compression à moyen termes.....	62
Tableau IV.11 : Composition des formulations retenues.....	67
Tableau IV.12 : Débit de Dose ($\mu Sv/h$)pour les différents bétons étudiés irradiés par une source de ^{60}Co	67
Tableau IV.13 : Coefficient d'atténuation linaire.....	68

Liste Des Notations

Liste Des Notations :

BHP : Béton à Hautes Performances.

C₃S : Silicate tricalcique.

C₂S : Silicate bi calcique.

C₃A : Aluminate tricalcique.

C₄AF : Alumino ferrite tetracalcique.

NF EN : Norme Française, (AFNOR).

NF P : Norme Française.

AFNOR : Association Française de Normalisation.

CPA : Ciment Portland Artificiel.

CPJ : Ciment Portland composé.

CHF : Ciment de Haut Fourneau.

Fe₂O₃ : l'oxyde de fer.

SiO₂ : Oxyde de Silice.

Al₂O₃ : Oxyde d'aluminium.

CaO : Oxyde de calcium.

Cru : Farine de grande finesse obtenue par le broyage de calcaire et d'argile, dans une proportion voisine de 80% - 20%.

Lafarge : Groupe français de matériaux de construction, leader mondial dans son secteur.

E/C: le rapport Eau sur Ciment

d/D: Rapport dimensions minimales sur Dimensions maximales des granulats.

MF: Le module de finesse des sables.

M_{vapp}: la masse volumique apparente

M_{vabs} : la masse volumique absolue

ES : Equivalent de sable

LA : Coefficient Los Angeles

FS : Friabilité des sables

M_{DE} : Coefficient Micro-Deval

A : Coefficient d'Aplatissement.

C_{pa}: Coefficient de polissage accéléré

BAP : Béton auto plaçant

D_{max} : Dimension maximale des granulats

BaSO₄ : Sulfate de baryum.

ENOF : Entreprise Nationale des Produits Minières Non Ferreux et des Substances Utiles.

SONAREM : Société Nationale des Recherches et des Exploitations Minières.

SOMIBARE (SMBA) : Société des Mines de Baryte d'Algérie.

BaO : l'Oxyde de baryum.

SrSo₄ : Célestine.

API : American Petroleum Instituté.

BPE : Béton prête à l'emploi.

BTP : Bâtiment et travaux publics.

CCTP : Cahier des clauses techniques particulières.

PGC : Plan Général de Coordination.

Résumé

Résumé :

La barytine ($BaSO_4$) est le principal minéral de baryum exploité et produit en grande quantité au niveau mondial, en tant que matière première et produits dérivés, pour ses propriétés particulières et ses nombreuses applications industrielles.

Au niveau mondial, la barytine joue un rôle important dans de nombreuses industries, elle est surtout destinée à la confection de boues de forages pour la recherche pétrolière et gazière. Les utilisations dans le secteur de la construction, dans le domaine de la chimie et comme charge minérale sont moindres en volume.

L'objectif de notre étude consiste à valoriser les granulats du gisement de la barytine de la mine de la commune Bou-caïd à Tissemsilt (Algérie) dans le domaine du génie civil et de connaître l'influence de ses plusieurs paramètres (haute densité, inertie chimique, indice de blancheur élevé, dureté faible) sur les caractéristiques des matériaux de construction.

Abstract:

Barytin ($BaSO_4$) is the principal mineral of barium exploited and produced in large quantities worldwide, as a raw material and by-products, for its particular properties and its numerous industrial applications.

At the global level, barite plays an important role in many industries; it is mainly intended for the manufacture of drilling sludge for oil and gas research. The uses in the construction sector, in the chemical sector and as mineral filler are less in volume.

The objective of our study is to valorize the aggregates of the barytine deposit of the Bou-caïd commune mine in Tissemsilt (Algeria) in the field of civil engineering and to know the influence of its several parameters (high density, chemical inertia, high whiteness index, low hardness) on the characteristics of the building materials.

ملخص

الباريت ($BaSO_4$) هو معدن الباريوم الرئيسي الذي يتم استغلاله وإنتاجه بكميات كبيرة في جميع أنحاء العالم ، كمادة خام ومنتجات ثانوية ، لخصائصه الخاصة وتطبيقاته الصناعية العديدة

علاصعيدالعالمي، يلعب الباريت دوراً مهماً في العديد من الصناعات، فهو مخصص بشكل أساسي لإعداد حمأة الحفر لأبحاث النفط والغاز

الاستخدامات في قطاع البناء، في القطاع الكيميائي وكمواد حشو معدنية أقل في الحجم.

الهدف من دراستنا هو تطوير مجاميع رواسب البارييت في منجم بلدية بو كايد في تيسمسيلت (الجزائر) في مجال الهندسة المدنية ومعرفة تأثير عواملها المتعددة (كثافة عالية ، الخمول الكيميائي ، مؤشر البياض العالي ، الصلابة المنخفضة) على خصائص مواد البناء.

Introduction Générale

Introduction générale :

Aujourd'hui le béton occupe une importante place dans le domaine de la construction, son intérêt réside dans sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance en compression, sa durabilité, son ouvrabilité et son cout acceptable. Ces facteur ont contribué à accroitre son utilisation pour tous les ouvrages comme des immeubles de bureaux ou d'habitation, des ponts, des routes, des tunnels, des aéroports, des barrages, et des ports ...etc. [1].

Le béton est un matériau composite et hétérogène résulte d'un mélange intime de ciment, de granulats, d'eau, et présente des propriétés mécaniques qui peuvent être très supérieures à celles des roches naturelles [1]. Le granulat est une matière première essentielle entrant dans la composition du béton. Elle est produite et utilisée en très grandes quantités dans tous les pays du monde.

Ce matériau (béton) se compose du sable, qui permet d'assurer une continuité granulaire nécessaire entre le ciment et le gravier pour une meilleure cohésion. La demande sans cesse croissante sur les granulats à provoquer un épuisement rapide des sablières et une exploitation anarchique des sables de mer causant ainsi un grave préjudice à l'équilibre de l'environnement [1].

En Algérie, la plupart des bétons courants sont actuellement fabriqués avec des granulats siliceux alluvions, qui sont épuisables et les gisements sont soumis à des contraintes environnementales de plus en plus rigides faisant croitre leur cout d'exploitation déjà élevé.

L'objectif de ce travail, est la valorisation des granulats du gisement de baryte de Bou-caïd, wilaya de Tissemsilt exploité par le groupe ENOF dans la formulation des bétons.

Ce projet donc consiste à étudier les caractéristiques physico mécaniques et chimiques des granulats de ce gisement, ainsi que les propriétés des bétons à base de ces granulats, afin de pouvoir les utiliser dans certains domaines de la construction.

Ce mémoire est composé de Quatre (04) chapitres, tels que :

- Le 1^{er} chapitre est consacré aux Généralités sur les bétons ;
- Le 2^{ème} chapitre consiste à présenter Les granulas lourds;
- Le 3^{ème} chapitre traite l'Exploitation de la Barytine ;
- Le 4^{ème} chapitre présente des Résultats de bibliographie et leurs discussions.

Finalement, on termine notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les

bétons

I.1. Introduction

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

Le béton est un matériau artificiel formé par un mélange de granulats, de sable, d'eau aggloméré par un liant hydraulique (ciment), éventuellement complété par des adjuvants et des additions. Ce mélange, qui est mis en place sur le chantier ou en usine à l'état plastique, peut adopter des formes très diverses parce qu'il est modulable : il durcit progressivement pour former finalement un monolithe selon le choix du ciment et son dosage par rapport aux granulats, selon la forme des granulats, selon l'utilisation d'adjuvants, les bétons obtenus peuvent avoir des caractéristiques très diverses leurs mises en œuvre et leurs traitements de surface peuvent également faire varier leurs performances et leurs aspects. Le béton est une pierre reconstituée, également appelée (pierre liquide).

I.2. Historique

L'histoire du béton montre que sa technique, bien fixée empiriquement par les Romains, avec la chaux grasse et la pouzzolane, a évolué seulement au 19^{ème} siècle après l'apparition des chaux hydrauliques et des ciments.

L'invention de la chaux hydraulique par Louis Vicat en 1817, celle du ciment portland par Aspdin en Ecosse en 1824 et l'installation des premiers fours par Pavin de Lafarge au Teil en France en 1830 préparent l'avènement du béton [2].

A l'origine, le béton était constitué d'un mélange de trois matériaux : le ciment, les granulats et l'eau. Dans la plupart des cas, le ciment était du ciment portland obtenu par mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer cuit à la température de linéarisation puis broyé par la suite, de petites quantités d'adjuvants chimiques ont été ajoutées au mélange afin d'améliorer certaines des propriétés du béton à l'état frais ou durci[1].

Au 20^{ème} siècle, le béton se développera considérablement avec l'évolution de ses techniques : usage croissant des adjuvants, béton prêt à l'emploi, matériel de mise en œuvre, mise au point du béton précontraint par Eugène Freyssinet.

I.3. Les composants d'un béton

Le béton est un matériau composite aggloméré constitué de granulats durs de diverses dimensions collés entre eux par un liant. Dans les bétons courants, les granulats sont des grains de pierre, sable, gravier, cailloux et le liant est un ciment, généralement, un ciment portland. Les composants sont très différents : leur masse volumique vont, dans les bétons courants de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m³. Si le type de liant utilisé n'est pas un ciment, on parle alors, selon le liant utilisé, de béton de résine, de béton d'hydrocarboné, de béton d'argile...etc.

Dans les bétons où une très grande compacité est recherchée (tels que les bétons à hautes performances (BHP), par exemple), la dimension des éléments les plus fins peut descendre en dessous de 0,1µm (fillers, fumée de silice).

De même les granulats très légers ont des masses volumiques inférieures à 100Kg /m³. Ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton courant, présentés dans le tableau ci-dessous [3].

Tableau I.1 : la teneur des constituants du béton courant en poids et en volume [3]

<i>Constituants</i>	<i>Eau</i>	<i>Air</i>	<i>Ciment</i>	<i>Granulats</i>
<i>Volume (en%)</i>	14-22	1-6	7-14	60-78
<i>Poids (en %)</i>	5-9	-	9-18	65-85

La confection d'un béton approprié à sa destination consiste, à partir d'études graphiques ou expérimentales, à déterminer et à optimiser la composition granulaire et le dosage des divers constituants.

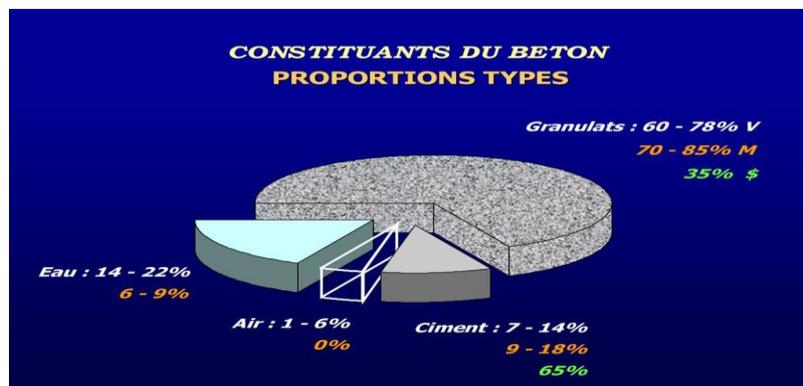


Figure I.1 : Les constituants d'un béton

I.3.1. Ciment**I.3.1.1. Définition :**

Le ciment est l'ingrédient essentiel pour la formulation d'un béton. C'est par définition une matière pulvérulente, à base de silicate et d'aluminate de chaux, obtenue par cuisson, en proportions variables selon les matières premières utilisées :

- Silicate tricalcique, ou C_3S ($3CaO, SiO_2$)
- Silicate bi calcique, ou C_2S ($2CaO, SiO_2$)
- Aluminate tricalcique, ou C_3A ($3CaO, Al_2O_3$)
- Aluminoferriite tétracalcique, ou C_4AF ($4 CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3$)

Formant avec l'eau ou avec une solution saline, une pâte plastique liante, capable d'agglomérer, en durcissant des substances variées. Il sert à désigner aussi dans un sens plus large, tout matériau interposé entre deux corps durs pour les lier [4].

Les matières premières essentielles sont la roche calcaire et l'argile. Elles sont broyées et éventuellement additionnées de produits secondaires, le mélange obtenu s'appelle le cru et est composé d'environ 80% de calcaire et d'environ 20% d'argile.

La pâte du ciment est le constituant à l'origine de la cohésion du béton, elle représente 20% à 50% du volume total, se caractérise par sa capacité à s'hydrater et à former une matrice solide qui lie les granulats entre eux [1]. Elle se constitue du ciment anhydre, d'eau et d'éventuels adjuvants additifs [5].

I.3.1.2. Classification des ciments :**➤ Classification suivant la composition :**

Suivante la norme européenne **EN -197-1** publiée par l'**AFNOR** sous la référence **NF EN197-1**.

Les ciments courants peuvent être classés en cinq grandes familles et vingt-sept variantes principales :

- **CEM I**: Ciment Portland Artificiel (CPA).
- **CEM II** : Ciment Portland composé (CPJ).
- **CEM III** : Ciment de Haut Fourneau (CHF).
- **CEM IV** : Ciment Pouzzolanique.
- **CEM V** : Ciment aux Laitiers et aux Cendres **ou** ciment composé.

Ces ciments sont différents par le type d'ajout et sa teneur, incorporé dans le but de modifier certains de leurs propriétés en raison des conditions d'environnement ou de performances mécaniques aux quelles ces ciments sont destinés. Les différents types d'ajouts normalisés sont :

- **Le laitier de haut fourneau** : produit granulé qui est obtenu par le refroidissement brusque (rapide) de la gangue en fusion des hauts fourneaux. Constituant à hydraulicité latente, *c.-à-d.* que l'hydratation doit être activée. [6].
- **Matériaux Pouzzolaniques** : Sont des substances naturelles ou artificielles siliceuses ou silico alumineuses, ou une combinaison de celles-ci contenant de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres oxydes mais la teneur en (SiO_2) réactif doit être au moins égale à 25% en masse.
- **Filler Calcaire** : Constituant inerte, il a pour rôle de remplir les vides entre les sables et les graviers, tout en présentant une certaine activité physico-chimique en favorisant l'hydratation des silicates tricalciques [7].
- **Fumée de silice** : provient de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique. Elle est formée de particules sphériques contenant au moins 85% en masse en silice amorphe [8].
- **Schiste calciné** : Il est produit dans un four spécial à une température avoisinant les 800°C , composé de silicate bi calcique et d'aluminate mono calcique, ainsi que de petites quantités de chaux libre et de sulfate de calcium, le schiste calciné finement broyé présente, outre des propriétés pouzzolaniques, des propriétés fortement hydrauliques.
- **Cendres volantes** : produits pulvérulents de grande finesse proviennent du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques. On distingue deux familles [9] :
 - Cendres volantes siliceuses (notée V) : Ce sont principalement des particules sphériques ayant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont constituées essentiellement de silice (SiO_2) réactive et d'alumine (Al_2O_3), d'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres composants. La teneur en oxyde de calcium (CaO) doit être inférieure à 10% en masse, la teneur en silice réactive doit être supérieure à 25% en masse.
 - Cendres volantes calciques (notée W) : Elles présentent des propriétés hydrauliques et /ou pouzzolaniques, contenant une teneur en oxyde de calcium (CaO) réactif supérieure à 10% en masse, le reste étant de la silice réactive, d'alumine, d'oxyde de fer et d'autres composants.

➤ **Classification suivant les résistances à la compression :**

Les ciments sont répartis en trois classes, **32.5 ; 42.5 ; 52.5** définies par la valeur minimale de la résistance normale du ciment à 28 jours. La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours conformément à la norme **NF EN 196-1** et exprimée en **N/mm²** (1N/mm²=1MPa=10 daN/cm²=10 bars).

Tableau I.2 : Les classes de résistance de ciments [10].

Classe de résistance	Résistance à la compression (en MPA)			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	à 2 jours	à 7 jours	à 28 jours	
32.5N	–	≥16.0	≥32.5	≤52.5
32.5R	≥10.0	–		
42.5N	≥10.0	–	≥42.5	≤62.5
42.5R	≥20.0	–		
52.5N	≥20.0	–	≥52.5	–
52.5R	≥30.0	–		

I.3.2. L'eau de gâchage :

L'eau joue un double rôle dans la technologie du béton. D'une part, elle est nécessaire au durcissement du ciment, puisque la réaction chimique du ciment (hydratation) est induite par l'eau.

D'autre part, elle est indispensable pour assurer l'ouvrabilité et une mise en place correcte du béton frais.

L'eau de gâchage est la quantité d'eau additionnée au mélange de ciment, d'addition et de granulat lors du malaxage du béton. Si des adjuvants ou des additions sont employés sous forme de solutions ou de suspensions, il faut tenir compte de leur apport d'eau à partir d'une quantité de 3 l/m³. La teneur en eau totale se compose de l'eau de gâchage, de l'eau apportée par les adjuvants et les additions ainsi que de l'eau adsorbée à la surface des granulats et l'eau absorbée par les granulats. On entend par eau efficace la somme de l'eau de gâchage, l'eau apportée par les adjuvants et les additions ainsi que l'eau adsorbée à la surface des granulats.

La teneur en eau du béton frais, déterminée par séchage, correspond à la teneur en eau totale.

En Suisse, on emploie surtout l'eau potable, aussi appelée eau du réseau, ainsi que de l'eau récupérée comme eau de gâchage. L'eau récupérée de la fabrication du béton, appelée eau

recyclée, comprend l'eau de lavage des restes de béton des malaxeurs, des tambours mélangeurs, des pompes à béton et l'eau météorique. Elle est prélevée dans les bassins prévus à cet effet (bassins de décantation ou munis d'équipement de brassage).

En général, l'eau de gâchage est un élément essentiel pour la fabrication du béton. Elle est ajoutée lors du mélange afin d'hydrater le ciment et permet de lier les constituants du béton entre eux. L'eau rend également le mélange bien plus maniable, ce qui facilite l'application du béton. Élément indispensable pour obtenir du béton, l'eau utilisée doit absolument être propre et ne doit pas être ajoutée avec excès. Si ces deux conditions ne sont pas respectées, Le béton, risque d'être fragile et ses performances seront altérées.

- **Les exigences normatives :**

La norme **SN EN 1008** règle les exigences à l'égard de l'eau de gâchage. L'eau potable peut être utilisée sans contrôle comme eau de gâchage. Tous les autres types d'eau comme les eaux récupérées dans les centrales à béton, l'eau de la nappe phréatique, les eaux superficielles naturelles ainsi que les eaux à usage industriel doivent au contraire être soumises à des analyses en conformité avec la norme **SN EN 1008**. Pour être utilisées comme eau de gâchage, elles ne doivent pas contenir une quantité trop importante de substances, nuisibles susceptibles d'engendrer les phénomènes suivants :

- ✓ Ralentissement ou suppression du processus de prise et de durcissement (ex : sucres et acides humiques).
- ✓ Entraînement excessif d'air impliquant une baisse de résistance du béton (ex : micro-organismes, huiles, graisses, suspensions, certains sels minéraux).
- ✓ Corrosion des armatures.

I.3.3. Adjuvants et additifs

Différents adjuvants et additions peuvent être mélangés au ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci [11] :

- **Les adjuvants :**

Sont des matériaux actifs ajoutés en très petite quantité (souvent liquide) dans le but d'influencer certaines propriétés par une action chimique ou physique. Ils ne doivent pas modifier défavorablement la durabilité du béton ou toute autre propriété du béton armé (ex : les entraîneurs d'air, rétenteur d'eau, accélérateur de prise, retardateur de prise, hydrofuge de masse, super plastifiant, etc....).

- **Les additifs :**

sont des matériaux en fines particules qui peuvent être ajoutés en quantités limitées pour influencer certaines propriétés ou obtenir des propriétés particulières, Les principales sont ; les fillers calcaires, la fumée de silice, la pouzzolane naturelle, le laitier de haut fourneau. Ils sont à prendre en compte dans la composition volumétrique. On peut distinguer les additifs à caractère hydraulique latent (ex: cendres volantes...) qui renforcent le pouvoir de liaison ciment et les additifs neutres (ex : poudres colorantes...). Ces additifs doivent bien sûr être sans danger pour le béton.

I.3.4. Granulats :

I.3.4.1. Généralités sur les granulats utilisés dans le béton

➤ **Introduction :**

La construction de l'habitat et l'aménagement de l'environnement font appel à trois grands secteurs d'activités, qui sont les industries de carrière et matériaux de construction, le bâtiment et les travaux publics. Tous les travaux liés à ces secteurs d'activités utilisent des matières premières naturelles en tant que morceaux de roches ou alluvionnaires (sous forme de sable et graviers), soient obtenues artificiellement par traitement de roches naturelles ou des déchets industriels et parfois l'utilisation des déchets inertes. Leur nature et leur forme varient en fonction des gisements et des techniques de production. Elles sont destinées à être mises en œuvre sans aucun apport de liant pour les solidariser (ballast des voies de chemin de fer, couche de fondation des routes, remblais ...) soient agglomérées à l'aide d'un liant (ciment pour le béton, bitume pour les enrobés) [12].

Les granulats sont un constituant essentiel des bétons qui conditionne à la fois leurs caractéristiques et leur coût. Leur élaboration relève des industries extractives. Les granulats sont définis par la norme **P18-540**, comme un ensemble de grains minéraux, destinés à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondations, de bases de roulement des chaussées et des assises et des ballasts de voies ferrées.

On peut distinguer les granulats naturels, issus de roches meubles ou massives extraites in-situ et ne subissant aucun traitement autre que mécanique (c'est-à-dire concassage, broyage, criblage, lavage, sélection) et artificiels qui proviennent de la transformation thermique de roches, de minerais, de sous-produits industriels (laitiers, scories, etc.) ou encore de la démolition d'ouvrage de bâtiments divers en béton, souvent appelés granulats recyclés [13].

La minéralogie des granulats en Algérie est essentiellement d'origine calcaire, en raison du caractère géologique du nord du pays. Actuellement, l'Algérie compte 1043 unités en

exploitation dont 933 carrières et 110 sablières, avec une capacité de production effective de 32 millions de tonnes /an.

➤ **Définitions :**

Les granulats, c'est l'ensemble des grains minéraux de dimensions comprises entre 0 et 125mm. Elles peuvent être d'origine naturelle (sables et graviers de mer et de rivières), artificiels (argile expansée) ou issue du recyclage de déchets de l'industrie (laitier de haut fourneaux). Ils constituent l'ossature du béton et occupent 70 à 80% environ du volume d'un béton. Ils sont en principe inertes mais peuvent, dans certains cas, favoriser certaines réactions d'hydratation de certains minéraux du clinker c'est l'exemple des silicates tricalciques C₃S en présence de filler d'origine calcaire.

Leur utilisation pour la confection d'un béton est motivée par le faible cout économique, par une meilleure durabilité et stabilité volumétrique par rapport au mélange (ciment/eau). En effet la nature, la quantité, la forme, la granulométrie, la propreté, l'état de surface et le type de granulats sont des facteurs ayant une influence sur les caractéristiques du béton, aussi bien à l'état durci qu'à l'état frais.

Des granulats de bonne qualité offrent les avantages suivants :

- Résistance généralement plus élevée.
- Meilleure durabilité.
- Stabilité volumique en présence d'humidité, d'où un effet favorable sur le retrait du béton (réduction).
- Absorption d'une partie de la chaleur d'hydratation, d'où un effet régulateur sur le processus de prise.

I.3.4.2. Les différents types de granulats :

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

- ❖ **Naturel :** d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions fluviales ou marines) ou de roches massives (roches éruptives, calcaires, métamorphiques...), n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).
- ❖ **Artificiel :** d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant par exemple des transformations thermiques : sous-produits industriels, granulats réfractaires.

- ❖ **Recyclé** : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments ou des structures de chaussées.

1/ Les granulats naturels :

Les granulats naturels sont issus de diverses roches (massives ou meubles), qui sont essentiellement constituées de silice, de silicate et de carbonate :

Tableau I.3.Les constituants des granulats naturels [14]

Principal minéral	Exemples de roches
Silice	Quartz, granite, gneiss, grés, silex, chailles
Silicate	Feldspaths, micas, argile, diorites, gabbros, basaltes
Carbonate	Calcite, dolomite



Figure I.2 : Exemple des granulats naturels.

Donc on classe les granulats naturels en deux catégories :

A. Les roches massives [14] :

Les roches massives susceptibles de fournir des granulats viennent surtout des gisements épais de roches dures. Il s'agit surtout de calcaires de formations géologiques plus anciennes, ou de roches d'origine magmatiques, sédimentaires et métamorphiques. Les gisements des roches massives, correspondent à une multitude de situations géologiques (couches plus ou moins épaisses, filons, épanchements volcaniques, massifs granitiques...) et à des localisations géographiques très différentes. L'exploitation de ces gisements se fait en carrières qui peuvent être implantées en plaine, sur un plateau, en montagne ou au bord d'une falaise.

A.1. Les roches magmatiques [14] :

Elles se sont formées lors du refroidissement plus ou moins rapide d'un mélange fondu, appelé magma.

On parle de roches plutoniques, si le refroidissement s'est effectué en profondeur et lentement (ex : granites, diorites, syénites, gabbros...). On parle de roches volcaniques, si le refroidissement s'est effectué rapidement, près de la surface (ex : basaltes, andésites, rhyolites...).

Les roches magmatiques sont composées essentiellement de silice (SiO_2) et de combinaisons de la silice avec d'autres éléments (aluminium, fer, magnésium).

A.2. Les roches sédimentaires [14] :

Elles se forment à la surface de l'écorce terrestre par des processus de géodynamique externe : altération, érosion des roches éruptives ou des dépôts de sédiments marins, transport et sédimentation. On les rencontre souvent sous la forme de roches meubles telles que les alluvions siliceuses, silico-calcaires ou calcaires. On distingue les roches sédimentaires : silicatées (grés, grés quartzites, silex, chailles, sédiments glaciaires...) et carbonatées (calcaires, dolomies...).

A.3. Les roches métamorphiques [14] :

Elles se sont produites suite à des phénomènes tectoniques. Elles proviennent de la transformation des roches éruptives ou sédimentaires, sous l'action de la température, de la pression ou de l'apport de substances chimiques : quartzites, gneiss, schistes, micaschistes, marbre... Elles affleurent plus particulièrement dans les massifs montagneux anciens.

B. Les roches meubles [14] :

Les roches meubles (matériaux alluvionnaires), sont exploitées le long des fleuves et des rivières. Elles sont des dépôts anciens ou actuels résultant d'un processus d'érosion, d'altération et de sédimentation de roches massives. Les gisements alluvionnaires correspondent à des matériaux non consolidés, généralement déposés pendant l'ère quaternaire par les glaciers, les cours d'eau ou sur les fonds marins peu profonds (entre 10 et 30m). Le site géographique le plus habituel est celui du lit ou de l'ancien lit d'une rivière. Leur granularité est fonction de leur position par rapport au cours du fleuve. Les éléments dominants sont, en général, ceux qui sont les moins altérables (quartz, silex, grés, calcaires) [15].



Figure I.3 : Exemple des granulats alluvionnaires naturels.

2/ Les granulats artificiels (leurs catégories)[14] :

On distingue plusieurs types de granulats artificiels qui peuvent être utilisés pour des usages spécifiques :

- ✓ **Sous- produits industriels, concassés ou non ;** Les plus employés sont le laitier cristallisé concassé et le laitier granulé de haut fourneau obtenus par refroidissement à l'eau.

Nota : le laitier est un coproduit de la fusion en haut fourneau du minerai de fer.

- ✓ **Granulats à hautes caractéristiques ;** élaborés industriellement, Il s'agit de granulats élaborés spécialement pour répondre à certains emplois, notamment des granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallage industriels (granulats ferreux...) ou des granulats réfractaires.

3/ Les granulats légers [14] :

Les granulats légers sont utilisés pour la confection de bétons légers. Leurs masses volumiques sont inférieures à $2t/m^3$. Ils présentent une forte absorption d'eau et cette dernière a toujours été considérée par les constructeurs comme une grosse difficulté sur les chantiers car elle entraîne d'importantes variations de plasticité et d'ouvrabilité des bétons. Parmi les granulats légers, on trouve l'argile expansée, schistes expansés, laitier expansé, pierre ponce, pouzzolane, vermiculite, perlite,...etc.

4/ Les granulats lourds [14] :

Les granulats lourds ont des masses volumiques supérieures à $3t/m^3$. Ils sont essentiellement employés pour la confection des bétons lourds utilisés pour la construction d'ouvrages nécessitant une protection biologique contre les rayonnements produits, par exemple, dans les

accélérateurs et piles atomiques ; la protection est d'autant plus efficace que l'épaisseur est plus grande et la densité du béton plus élevée. Par exemple :

- La barytine : matière opaque plus ou moins blanche à structure lamellaire, Sa densité moyenne est de 4.5
- La magnétite : oxyde de fer dont la densité varie de 4 à 5.
- La limonite de densité 3.7
- La pyrite de fer de densité 5
- Les déchets ferreux dont la densité varie de 7.4 à 7.7
- L'ilménite (densité 5), la galène (densité 7.6), le corindon (densité 4), la serpentine, la pan dermite, la colemanite, ...etc.

I.3.4.3. Les caractéristiques des granulats :

Les granulats utilisés dans les travaux de bâtiment et de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage. Les propriétés des granulats sont liées aux caractéristiques intrinsèques des roches originales et aux caractéristiques de fabrication [16].

1. Les caractéristiques géométriques :

❖ La Granulométrie [17] :

La granulométrie permet de déterminer l'échelonnement des dimensions des grains contenus dans un granulats.

Elle consiste à tamiser le granulats sur une série de tamis à mailles carrées emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Et à peser le refus sur chaque tamis. Les ouvertures carrées des tamis sont normalisées et s'échelonnent de 0.08 mm à 80mm.

❖ Classes granulaires :

On trie les granulats par dimension au moyen de tamis (mailles carrées) et de passoirs (trous circulaires) et on désigne une classe de granulats par un ou deux chiffres. Si un seul chiffre est donné, c'est celui du diamètre maximum (D) exprimé en (mm) ; si l'on donne deux chiffres, le premier désigne le diamètre minimum (d), des grains et le deuxième le diamètre maximum (D).

Un granulats est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D.

Lorsque (d) est inférieur à 2 mm, le granulats est désigné par 0/D.

La norme **XP P 18-540** indique la terminologie usuelle des granulats selon leur dimension :

- Les fillers 0/D pour $D < 2$ mm avec au moins 85% de passant à 1.25mm et 70% de passant à 0.063mm.
- Les sables 0/D pour $1 < D \leq 6.3$ mm.
- Les gravillons d/D pour $d \geq 1$ mm et $D \leq 125$ mm.
- Les Sablons 0/D pour $D < 1$ mm.
- Les graves 0/D pour $D > 6.3$ mm.
- Ballast d/D pour $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm.

❖ **Module de finesse (MF) :**

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il ya trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis de modules 23, 26, 29, 32,35, 38.

❖ **La forme des granulats [18] :**

Une bonne forme des granulats est essentielle pour éviter des chutes de résistances des bétons par suite du risque d'apparition de plans de glissements potentiel.

La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques :

- La longueur **L**, distance maximale de deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulat.
- L'épaisseur **E**, distance minimale de deux plans parallèles tangents au granulat.
- La grosseur **G**, dimension de la maille carrée minimale du tamis qui laisse passer le granulat

❖ **Coefficient d'aplatissement (A)[19] :**

Coefficient d'aplatissement caractérise la forme du granulat à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur. Il est déterminé par un double tamisage d'abord au travers de la série de tamis à mailles carrée utilisée pour l'étude de la granulométrie. Puis par un second tamisage des refus retenus sur les différents tamis sur une série de grilles à fentes parallèles.

Ce coefficient est déterminé selon La norme **NF EN 933-3**.

❖ **Angularité [16] :**

L'angularité des granulats est conventionnellement estimée par les valeurs des indices et rapport de concassage. Mais peut être mesurée aussi par le temps d'écoulement d'un certain

volume de granulats à travers un orifice donné caractérisant ainsi un coefficient d'écoulement des gravillons. Il en va de même pour les sables, la méthodologie étant la même, seul diffère les dimensions de l'appareillage de mesure [16].

2. Les caractéristiques physiques :

❖ La masse volumique apparente :

C'est la masse du granulat sec occupant l'unité de volume, exprimée en t/m^3 , en kg/dm^3 , ou en g/cm^3 . Cette masse volumique intègre les grains de l'agrégat ainsi que les vides compris entre ces grains. De ce fait, il ne faut pas la confondre avec la masse volumique absolue, qui elle ne tient compte que de la masse des grains constituant le matériau sans les vides pouvant exister entre les grains [20].

La masse volumique apparente donnée par la formule suivante :

$$M_{Vapp} = (M_2 - M_1) / V$$

❖ La masse volumique absolue [20] :

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

La masse volumique absolue donnée par la formule suivante :

$$M_{Vabs} = M / (V_2 - V_1)$$

❖ La porosité :

C'est le rapport du volume des vides contenu dans les grains au volume des grains, exprimé en pourcentage.

La porosité des granulats courants est en général très faible. Cependant, la porosité est importante dans le cas des granulats légers.

La mesure de la porosité se fait selon les normes (NF P 18 554 et EN 1097-3), [21,22].

La présence de pores internes dans les granulats est en rapport direct avec la densité des granulats. Certains pores sont complètement à l'intérieur des granulats et d'autres débouchent à la surface [23].

❖ L'absorption d'eau des granulats :

La plupart des granulats stockés dans une atmosphère sèche pendant un certain temps, peuvent par la suite absorber de l'eau. Le processus par lequel le liquide pénètre dans la roche et l'augmentation de poids qui en résulte est appelé absorption.

L'absorption peut varier dans de très larges mesures suivant la nature du granulat. Elle peut varier de 0 à plus de 30% du poids sec pour granulat léger.

En général, les granulats naturels utilisés pour la confection du béton sont peu poreux et n'absorbent pratiquement pas d'eau lorsqu'ils sont gâchés avec le ciment et l'eau. Par contre, des granulats artificiels, tels que agrégats légers expansés d'argile, sont poreux. Il faut alors tenir compte de l'absorption de l'eau par les granulats lorsque l'on détermine la quantité d'eau requise pour fabriquer le béton.

La mesure du coefficient d'absorption d'eau se fait selon la norme (NF P 18 554 et 18 555).

❖ La Propreté des granulats :

La qualité des granulats utilisés dans les bétons est un facteur très important. Trois grandes catégories d'impuretés peuvent être rencontrées dans les granulats : matières organiques, les argiles et les matériaux fins (issues du concassage ou du broyage des roches). Leur présence à la surface des granulats interférant avec le processus d'hydratation du ciment et empêche la bonne adhérence granulats-liants, entraînant ainsi une chute des résistances mécaniques et des variations de propriétés rhéologiques des mélanges. De telles impuretés semblent être plus courantes dans les sables que dans les gros granulats, plus facilement lavés [24].

Pour les cailloux et gravillons : c'est le pourcentage de passant au tamis de 0.5 mm ; le seuil est fixé à 2% et 5% pour des granulats concassés [NF P18-591].

Pour un sable : la propreté est définie par l'essai d'équivalent de sable(ES) [25].

3. Les caractéristiques mécaniques :**❖ Résistance à la fragmentation « Essai de Los Angeles » :**

Dans les bétons, les granulats sont soumis à des contraintes pouvant entraîner leur rupture : La mesure de leur résistance à la fragmentation s'obtient par l'essai Los Angeles (LA). Il fait l'objet de la norme NF P 18-573. C'est un essai de résistance aux impacts, basé sur la mesure de la dégradation granulométrique des matériaux soumis aux chocs et à l'usure par frottements réciproques. L'essai consiste à faire tourner les granulats dans un tambour fermé contenant des boulets métalliques.

Le coefficient Los Angeles est calculé à partir du passage au tamis de 1.6mm, mesuré en fin d'essai, caractérise le granulat ; et la résistance à la fragmentation est d'autant meilleure que sa valeur est petite.

L'essai de friabilité des sables, adapté à la granulométrie fine de ces derniers, mesure la résistance des sables à la fragmentation. Le coefficient caractéristique (**FS**) est d'autant plus élevé que le sable est friable.

❖ **Résistance à l'attrition et à l'usure « Essai Micro-Deval humide »:**

C'est une caractéristique très importante pour les matériaux entrant dans la composition des assises de chaussées, soumises à des déformations périodiques dues au passage des véhicules et induisant un effet d'attrition entre les granulats.

L'essai Micro Deval (norme **NF P 18-572**) est un essai dont le principe est de reproduire, dans un cylindre en rotation, des phénomènes d'usure par frottements. Cette résistance est caractérisée par le coefficient Micro-Deval **M_{DE}** qui représente la proportion d'éléments fins produits pendant l'essai.

Les granulats résistent d'autant mieux à l'attrition que la valeur du coefficient Micro Deval est faible.

❖ **Résistance au polissage des gravillons :**

Cette caractéristique concerne les granulats utilisés pour la réalisation de couches de roulement. Plus le coefficient de polissage accéléré (**C_{pa}**) est élevé, plus la résistance au polissage est importante [26].

❖ **Effets du gel-dégel :**

La vulnérabilité du granulat dans le béton à l'action du gel-dégel est en fonction de sa nature, de son utilisation, des conditions climatiques et de la formulation du béton (utilisation par exemple d'air entrainé). Concernant le granulat lui-même la vulnérabilité est en fonction de trois critères, l'absorption d'eau, la résistance à la fragmentation après l'essai gel-dégel et sa sensibilité au gel [27].

4. Les caractéristiques chimiques :

Les caractéristiques chimiques des granulats sont :

- La teneur en chlorures.
- La teneur en composés contenant du soufre.
- La teneur en alcalins (sodium, potassium).
- La teneur en silice libre.

5. Les caractéristiques esthétiques [26] :

Les granulats contribuent à la teinte des parements des bétons. Ils sont mis en valeur en fonction du traitement de surface appliqué. On utilise indifféremment en fonction des disponibilités et de l'aspect recherché des granulats roulés, concassés ou semi-concassés. Les sables et les gravillons sont disponibles dans une large variété de teintes naturelles.

La teinte des bétons ayant subi un traitement de surface (béton lavé, béton désactivé, béton bouchardé, béton poli) est liée à la couleur des gravillons et des gros grains de sable.

La teinte des mortiers peut s'harmoniser avec celle des granulats ou au contraire créer un contraste faisant ressortir la couleur des gravillons. Le traitement de surface peut aussi faire apparaître, de façon plus ou moins marquée, la teinte des grains fins du sable ou celle des gros grains. La taille et la forme des granulats ont aussi un impact déterminant sur la texture des bétons traités. La granulométrie doit donc être compatible avec l'aspect recherché.

Tableau I.4. Teintes des granulats en fonction de leur nature minéralogique [26].

Nature minéralogique des granulats	Teintes
Calcaires durs	Noir, bleu, rose, beige, blanc, vert
Granites	Jaune, rose, gris, vert
Basaltes	Noir ou bleu-noir
Grés	Gris, rouge, beige
Diorites	Bleu ou rose
Quartzites	Rose, gris, blanc
Silex	Beige ou bistre

6. Propriétés thermiques des granulats :

Trois propriétés thermiques importantes des granulats sont : le coefficient de dilatation thermique, de la chaleur spécifique et la conductivité [28].

Si la différence entre les coefficients de dilatation thermique des granulats et de pâte de ciment hydraté est importante, une variation notable de la température peut occasionner des mouvements différentiels et rompre ainsi l'adhérence entre les granulats et la pâte [24].

Si les températures extrêmes sont prévues, les propriétés thermiques des granulats doivent être connues [28].

I.3.4.4. Utilisation des granulats :**A. L'application des granulats dans les secteurs bâtiment et construction :**

Les granulats et les agrégats sont des fragments de roche utilisés en général dans 3 grands secteurs : le bâtiment, les travaux publics, les ouvrages d'art et le génie civil. Il existe plusieurs types de granulats qui se différencient suivant leurs caractéristiques [23].

Par exemple, les granulats utilisés pour la construction de route doivent avoir plus de résistance contre les frottements et doivent témoigner d'une plus grande adhérence. Les granulats sont sollicités dans de nombreux domaines. Ils sont par exemple très utilisés dans le bâtiment, pour fabriquer du béton.

➤ Exemples d'utilisation des granulats dans les travaux publics :

- Voies ferrées : la construction d'un Km de voie ferrée nécessite 30.000 tonnes de granulats (ballast).
- Equipements collectifs : il faut de 20.000 à 40.000 tonnes pour édifier un hôpital ou un lycée.
- Routes et autoroutes : 80% des granulats produits sont absorbés par la construction des routes, alors sans béton, donc sans granulats, les avions ne décolleraient pas (une piste « encaisse » des pressions considérables lors de l'atterrissage d'un gros porteur).

➤ Exemples d'utilisation des granulats dans les ouvrages d'Art et le Génie civil :

- Barrages, enrochements, ouvrages de protection des côtes, ports avec digues, viaducs, ponts et ouvrages d'art ne peuvent être réalisés sans intégration de roches ou de granulats le plus souvent au sein de béton.

Ainsi, le viaduc de Millau, plus haut pont du monde aujourd'hui en service, fait appel notamment à des bétons de hautes performances.

I.4. Propriétés essentielles d'un béton [30]

Le béton doit être considéré sous deux aspects :

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

I.4.1. Propriétés du béton frais :

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui est la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage complet du ferrailage[30]. L'ouvrabilité doit être telle que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité. Elle est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais.

I.4.2. Propriétés du béton durci [29] :

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

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

➤ Résistance à la compression [29] :

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression uni-axiale a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée. De plus, la résistance du béton en compression est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité.

I.5. Les méthodes de formulation des bétons

L'étude de la composition du béton a pour but de déterminer le dosage en ciment, granulats (agrégats fins : sable et gros agrégats : gravier ou pierres concassées) et en eau pour un dosage de 1m³ de béton frais, afin d'obtenir un mélange homogène et d'une compacité élevée, ainsi qu'une résistance mécanique voulue (exigée).

I.5.1. Méthode de Bolomey [31] :

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/m³ ; ce sont d'ailleurs les granulats les plus courants.

I.5.2. Méthode de Faury [31] :

Cette méthode est venue en 1941 compléter la méthode de Bolomey. La méthode de Faury donne des bétons comportant moins de sable et plus de gravier. Ces bétons sont plus raides et conviendront à des travaux pour lesquels une très bonne maniabilité n'est pas indispensable. Les bétons Faury auront souvent une résistance mécanique supérieure aux bétons Bolomey correspondants.

I.5.3. Méthode de Valette :

Valette [23] a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite certains nombres de calculs préparatoires. Cette méthode est souvent désignée par « dosage des bétons à compacité maximale » ou « dosage des bétons à minimum de sables » ou « dosage des bétons à granularité discontinue ».

I.5.4. Méthode de Dreux-Gorisse:

Cette méthode a pour but de définir d'une façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton étudié, mais seules quelques gâchées d'essai et la confection d'éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition à adopter définitivement en fonction des qualités souhaitées et des matériaux effectivement utilisés.

Cette méthode est une synthèse de ce qui nous est apparu comme le plus valable et le plus intéressant dans les méthodes existantes connues (Bolomey, Faury, etc...).

I.6. Conclusion

Le contenu de ce chapitre présente le matériau béton et ses éléments de constitution, des définitions et des généralités.

Chapitre II

Les granulats lourds

II.1. Introduction :

Les Granulats lourds à haute densité destinés à la fabrication des bétons lourds. Les déchets ferreux sont les plus recherchés dans cette catégorie. L'ilménite, la galène, la pyrite de fer, la magnétite, la barytine et bien d'autres minéraux en font aussi partie. Généralement, l'eau est faiblement dosée dans la composition de ces bétons. Ils sont utilisés pour la protection contre les radiations (centrales nucléaires, salle de radiologie...) et même contre les explosions. Ils doivent être capables de résister des vagues hautes températures. Enfin, ils sont également utilisés pour la réalisation de culées et de contrepoids.



Figure II.1: béton lourds

II.2. Définition : [43]

Les granulats lourds permettent de produire des bétons de masse volumique que de 2800 à env. 5900 kg/m³. Ils peuvent être divisés en groupes, comme suit:

- granulats à granulation naturelle (baryte, magnétite).
- granulats naturels fragmentés mécaniquement (baryte, magnétite, hématite).
- granulats artificiels (particules d'acier, minerais agglomérés, ferrosilicium).

Les principaux granulats lourds et les masses volumiques du béton qu'ils permettent d'obtenir, ainsi que leur effet en tant que matériau de blindage, figurent dans le **tableau II.1**. Le plomb et les roches plombifères ne conviennent pas comme granulats lourds, car ils réagissent avec le Ciment et peuvent nuire à la prise.

Tableau II.1: Densités de granulats lourds et effet de blindage des bétons fabriqués avec ces granulats [42].

Granulats	Densités [kg/dm ³]	Blindage contre
Spath pesant, baryte (BaSo ₄)(matériau cristallin et amorphe)	4,0 - 4,3	rayon X, rayons gamma
Magnétite (Fe ₃ O ₄)	4,65 - 4,8	rayons gamma
Fer oligiste, hématite (Fe ₂ O ₃) très dur	4,7 - 4,9	rayons gamma
ilménite (FeTiO ₃) fer titane	4,55 - 4,65	rayons gamma
Ferro-phosphore sous-produits de l'extraction du phosphore	5,8 - 6,2	rayons gamma
Ferro silicium sous-produits de la fabrication de corindon fondu, bon matériau à résistance mécanique élevée pour chapes et bétons résistant à l'abrasion	6,0 - 6,2	rayons gamma
Granulats ferreux	6,8 - 7,5	rayons gamma
Grenaille d'acier granulométrie 0,2-3 mm	7,5	rayons gamma

➤ **Utilisation des granulats lourds [45] :**

Les granulats lourds entrent dans la fabrication de plusieurs matériaux tels que le béton lourd, les bassins de filtration de l'eau et les matériaux de charge. Ils peuvent également servir à faciliter le stockage de la chaleur.

✓ **La barytine**

peut être utilisée dans plusieurs domaines : [46].

- Industrie pétrolière : comme additif dans les boues de forage ;
- Industrie chimique : pour la fabrication des dérivés de baryum tels que les carbonates, chlorures et oxydes ;

- Industrie métallurgique : pour améliorer la durée de vie des fours électriques ou encore comme durcisseur d'acier et de fondant de soudure ;
- Industrie de l'automobile : comme charge inerte dans les matériaux de friction
- Industrie de la construction : notamment pour la production de béton dense

✓ **La magnétite**

Peut être utilisée pour la filtration de l'eau et comme additif dans le béton. Sous forme d'agrégat dans la portion d'un mélange de béton, la magnétite augmente de deux fois la densité par rapport à celle d'un béton standard. Cette propriété en fait un matériau usuel pour la construction des centrales nucléaires ainsi que pour la fabrication de briques de constructions ayant la propriété d'atténuer les effets des rayons « X », en salle de radiologie. De plus, le béton lourd peut être utilisé comme contrepoids pour les grues de levage et autres équipements de ce type [47]. L'utilisation de granulats denses dans les lits de sable et de gravier par les usines de traitement des eaux municipales permet de réaliser une filtration plus efficace. Par exemple, les agrégats de magnétite favorisent un meilleur nettoyage. La magnétite peut être ajoutée sous forme de poudre très fine au mélange de plastique pour en augmenter le poids. Il s'agit d'un marché relativement nouveau. Il est basé sur la recherche de certains plastiques denses pour un produit à usage final spécifique où un poids élevé est nécessaire.

✓ **L'hématite**

Est utilisée dans la production de fer métallique et dans la fabrication de pigments rouges, de peinture et de colorant pour béton. L'hématite de variété spéculaire (spécularite) est utilisée comme abrasif dans le sablage au jet [48].

On l'utilise également dans les bétons de haute densité, les boues de forage pétrolier ainsi que dans les pigments minéraux comme produits anticorrosifs. L'hématite entre dans la production de fer métallique et dans la coloration du béton [48].

Tableau II.2: Propriétés chimiques et physiques des minéraux constituant les granulats denses [49]

Nom	Formules chimiques	Densité	Couleur
Magnétite	Fe_3O_4	5.2	Noir métallique à noir brunâtre
Barytine	BaSO_4	4.5	Blanc ou incolore
Hématite	Fe_2O_3	5.2	Noir à gris acier
Ilménite	FeTiO_3	4.7	Noir brun

II.3. Production mondiale [43] :

Il existe très peu de statistiques concernant la production de granulat dense. La Commission géologique des États-Unis (USGS) traite uniquement de la barytine.

La production minière mondiale de barytine en 2014 a été estimée à 9,26Mt. Ce sont la Chine (44%), l'Inde (17%) le Maroc (11%) et les États-Unis (8%) qui produisent 80% de la quantité de barytine (**Figure II.2**). La majorité de la consommation de barytine aux USA est utilisée comme produit de charge dans les fluides pour les forages d'huile et de gaz naturel.

En 2013, le prix moyen à la tonne aux USA était de 113\$ US. La Chine qui produit de la barytine de grade chimique coûte à l'importation aux USA de 161\$ à 180\$ la tonne.

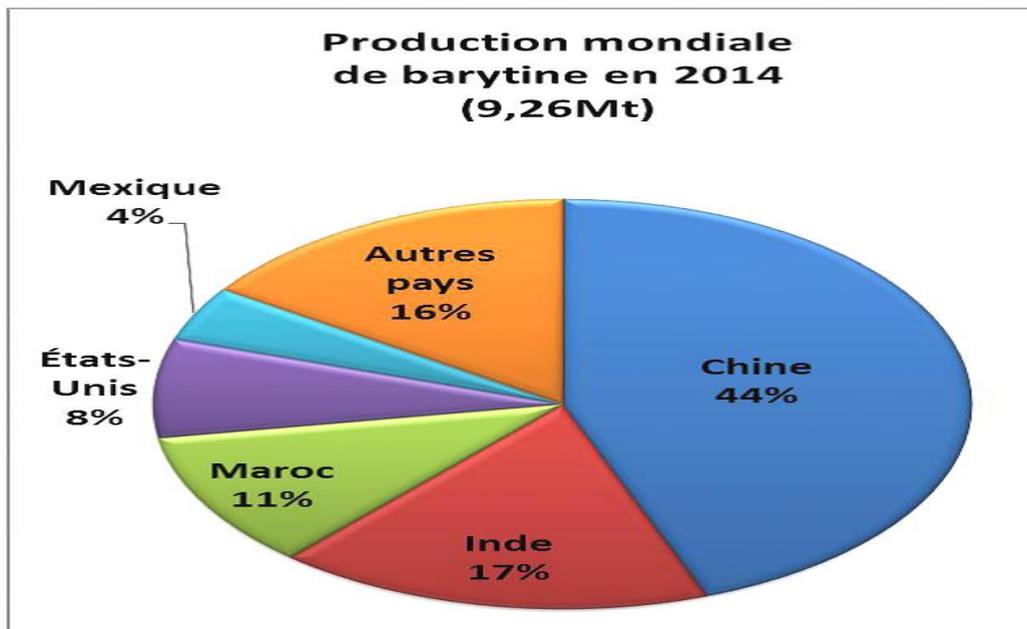


Figure II.2: Production mondiale de barytine en 2014. [43]

II.4. Les bétons lourds [42].

Les bétons lourds sont des bétons de masse volumique apparente $\rho_0 > 2800 \text{ kg/m}^3$. Ils sont utilisés principalement comme béton de radioprotection, c'est-à-dire pour faire écran aux rayons X et aux rayons gamma. D'autres applications sont en particulier les fondations lourdes, les contrepoids pour excavateurs et grues, et les bétons pour coffres-forts.

Les bétons lourds ne peuvent pas être fabriqués avec les granulats utilisés habituellement, dont la densité se situe aux environs de $2,65 \text{ kg/dm}^3$; ces granulats doivent être remplacés Entièrement ou partiellement par des granulats lourds.



Figure II.3: Béton lourd de masse volumique de 4760 kg/m^3 avec sable de fer (fractions Granulométriques $0,1-0,2 \text{ mm}$, $0,3-0,6 \text{ mm}$ et $0,5-1,0 \text{ mm}$) comme granulats lourds. [42]

II.4. 1. Propriétés :

En comparaison avec le béton normal, le béton lourd :

- est plus cher ;
- nécessite un matériel de malaxage adapté pour sa fabrication ;
- nécessite le renforcement de son coffrage lors de sa mise en œuvre
- a généralement une résistance mécanique proche

II.4. 2. Utilisation du béton lourd [44]:

Le béton lourd permet la réalisation des culées des ponts et des lests ou contrepoids. Avec l'émergence du secteur nucléaire, ce béton est aussi sollicité pour protéger des radiations dangereuses qui sont libérées des centrales ou des systèmes d'accélération de particules. Il

offre également une barrière efficace contre les rayons X, les rayons Gamma et les autres émanations radioactives.



Figure II.4. : Béton lourd dans le secteur nucléaire [44].

II.4. 3.Composition du béton lourd [44]:

Comme tout autre béton, le béton lourd est fabriqué à base de ciment, d'eau et de granulats. Notamment, il est composé de granulats **très denses** et possédant une **viscosité plus élevée**. On utilise souvent de **la magnétite, de l'hématite, de la barytine** ou encore du **plomb**. Il est également possible de recourir à des **déchets ferreux** tels que les grenailles ou les riblons. Généralement, l'eau est faiblement dosée dans la composition de ce type de béton.

II.4.4.Formules de bétons [42]:

Les mélanges de granulats lourds, de graviers et de sable naturel donnent des bétons lourds de masse volumique allant jusqu'à environ 3 800 kg/m³. Pour obtenir des masses volumiques proches de 5 900 kg/m³, il faut ajouter du fer ou de l'acier.

Bien que les granulats ferreux se trouvant à la surface du béton soient corrodés sur une profondeur de quelques millimètres, aucun dégât causé par des éclatements dus à la rouille n'a été observé, même à l'extérieur.

Pour l'élaboration des formules de béton, on se réfère fréquemment à des valeurs empiriques provenant d'autres projets de construction ou à des formules indicatives données par les fournisseurs de granulats lourds.

Le besoin en eau des granulats lourds naturels ne diffère généralement pas de celui des granulats ordinaires. Les granulats artificiels ferreux témoignent même d'un plus faible besoin en eau, si le pourcentage de fines (0-2 mm) n'est pas trop élevé. Souvent les éléments de construction en béton lourd sont également des éléments massifs.

On peut utiliser pour ces éléments des ciments dont la chaleur d'hydratation est aussi faible

que possible. Les quantités d'eau de gâchage aussi réduites que possible entraînent le danger de fissures de retrait, ce qui généralement exige l'utilisation d'adjuvants (plastifiants ou super fluidifiants).

Ci-dessous quelques compositions pour avoir des bétons lourds de masse volumique comprise entre 3 500 et 4 200 kg/m³ :

Tableau II.3. Quelques compositions pour obtention des bétons lourds de masse volumique ≥ 3500 kg/m³ [44].

Matières	Masse des matières pour la masse volumique du béton (kg/m ³)			
	>3500	>3500	> 3800	4200
Ciment (kg/m³)	300	300	300	300
Eau (L/m³)	170	170	170	170
Gravier/Sable (kg/m³)	420	-	-	-
Baryte (kg/m³)	-	1610	-	-
Hématite (kg/m³)	2680	1490	3470	2860
Granulats ferreux (kg/m³)	-	-	-	940

II.4.5. Mise en œuvre du béton lourd [44] :

Pour les bétons lourds, on applique généralement les mêmes principes de base appliqués lors de la réalisation du béton ordinaire. La différence est surtout au niveau des différences de densité.

1/ Malaxage :

Les bétons lourds sont fabriqués dans des mélangeurs horizontaux ou à bacs usuels. La durée du malaxage est un facteur critique et doit être déterminée au moyen d'essais préliminaires. Si la durée du malaxage est trop courte, le béton frais n'est pas homogène et si elle est trop longue, l'abrasion des granulats peut s'amplifier.

2/ Transport et mise en place :

Pendant le transport, les bétons lourds doivent être en mouvement afin de ne pas entrer en ségrégation. Le risque de ségrégation est particulièrement grand avec les bétons lourds à granulats de différentes masses volumiques granulaires. Lors de la mise en place, ne pas répartir le béton avec le vibreur. Cela peut se faire avec les procédés usuels.

3/ Compactage :

Le béton lourd de bonne composition se prête bien au compactage. Le rayon d'action des vibrateurs est toutefois plus petit que dans le cas du béton ordinaire. En effet, seuls des essais préalables permettent de trouver les appareils de fréquence et les diamètres appropriés des aiguilles. Pendant le vibrage, les granulats lourds descendent plus rapidement que les granulats ordinaires mais la ségrégation peut être évitée dans une large mesure si, dans le béton frais, le mortier est visqueux et pauvre en eau. Le vibrage doit être en outre d'aussi courte durée que possible, et effectué avec des espacements et des profondeurs de pénétration aussi faibles que possible. Le béton des éléments de construction minces peut être vibré avec des vibrateurs de surface ou vibrateurs de coffrage. Les joints de reprise doivent être évités dans toute la mesure du possible. Lorsque des interruptions sont inévitables, il faudrait reprendre le bétonnage après 4 à 8 heures au plus tard. Il faut alors commencer par éliminer au jet d'eau sous pression la laitance de la couche de béton précédente, jusqu'à ce que les gros grains soient à nu. L'eau restante doit être ensuite.

4/ Traitement de cure :

Le traitement de cure du béton ne doit jamais être négligé et il faut particulièrement le soigner pour le béton de radioprotection qui ne doit pas présenter de fissures. Les procédés possibles sont :

- le maintien humide.
- les délais plus longs pour le décoffrage.
- l'application de curing compound...
- le recouvrement avec des feuilles plastiques ou autres.

Si la cure consiste à maintenir humide le béton de radioprotection, ce qui est très efficace, le traitement doit durer au moins 14 jours.

II.4. 6. Avantages du béton lourd [44] :

- C'est une construction solide et stable qui résiste très bien au temps.
- Il offre également une barrière efficace contre les rayons X, les rayons Gamma et les autres émanations radioactives.

II.4. 7. Inconvénients du béton lourd [44] :

- Le système de construction se prête beaucoup moins à une architecture plus classique et traditionnelle.
- Les adeptes d'architectures écologiques apprécient moins même si le béton est entièrement recyclable.

II.5. Les conditions de fabrication du béton lourd:

Parce que la masse volumique est supérieure, le béton lourd se fabrique dans des conditions spécifiques. Il faut alors prévoir des coffrages particulièrement rigides, étant donné les hautes pressions exercées. Au cours de la fabrication, une attention particulière doit être portée à la ségrégation du béton. En effet, la compacité du béton lourd doit être totale et il faut éviter à tout prix les fissures (que celles-ci soient causées par un phénomène de dilatation thermique ou par un retrait). Pour y remédier, il faut entre autres prévoir un **apport en eau faible**. Il est même envisageable de faire appel à un réducteur d'eau.

Il est important de faire appel à un maçon professionnel. Cet expert du bâtiment a le savoir-faire et la connaissance des techniques pour un travail de qualité et un résultat pérenne. Contrairement au béton léger, il est plus difficile de donner un prix. Le béton lourd demande un mélange de plusieurs éléments et il est livré souvent par camion toupie.

II.6. Le béton lourd comme protection contre les radiations. [42]

Le rayonnement radioactif modifie la structure et les propriétés des matériaux. Cela s'applique également au béton, dont la résistance au rayonnement est déterminée pour l'essentiel par celle des Granulats. Plus la densité d'un béton est élevée, plus l'effet protecteur contre le rayonnement gamma est grand. Dans le béton lourd, l'effet d'écran au rayonnement radioactif entraîne une élévation de la température, qui peut se traduire par une réduction du module d'élasticité ainsi que de la résistance à la compression et, encore plus accentuée, à la traction. Il influe beaucoup moins sur la dilatation thermique et la conductivité thermique.

Pour les abris de protection civile, le béton est généralement le meilleur matériau. En raison de son prix élevé, le béton lourd n'est utilisé qu'exceptionnellement dans ce domaine, ce qui n'est pas le cas pour les réacteurs atomiques.



Figure II.5 : Partie de mur en béton lourd (à l'arrière) et béton ordinaire (bloc de Radioprotection pour deux accélérateurs linéaires à l'hôpital cantonal de Lucerne) [42].

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les granulats lourds et leurs utilisations pour la fabrication du béton lourd, ainsi que ces bétons lourds et leurs utilisations et leur mise en œuvre.

Chapitre III

Exploitation de la barytine

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on traite les définitions, les différentes caractéristiques ainsi que les différentes exploitations de la Barytine.

III.2. Définition :

La barytine est un sulfate de baryum naturel ($BaSO_4$), ou le nom dérive du grec (barys=lourd). Minéral largement utilisé dans nombreuses filières industrielles du fait de propriétés particulières : forte densité ($d=4.48$ quand elle est pur), neutralité chimique, blancheur élevée, faible abrasivité... En anglais ce minéral est désigné sous les termes 'baryte' ou 'barite', alors qu'en français la dénomination baryte désigne l'oxyde de baryum BaO , les principaux minéraux de baryum.

La barytine présente souvent avec d'autres minéraux de la même famille angleso-baryte contenant du plomb, calcaire-baryte contenant du calcium, célesto-baryte contenant du strontium [32].



Figure III.1 : Cristal de baryte.

III.3. Origine de la Barytine

La barytine se forme par voies différentes mais seulement dans des conditions de pression partielles d'oxygène élevée et de température relativement basse, elle est assez fréquente dans les gîtes hydrothermaux, elle se rencontre dans plusieurs gîtes de sulfate de manganèse et de fer [32].

III.4. Aspect de la Barytine

Les cristaux de barytine peuvent être développés et présentés de belles facettes de formes tabulaires très aplaties, réunies sous le faciès de « barytine crêtée ». Mais le plus souvent la barytine se présente en concrétion globulaire ou fibreuse, ou en masses lamellaires plus ou moins translucides, généralement blanches, parfois grisâtres ou jaunâtres. Les barytines

fortement colorées sont plus rares : les couleurs jaunes, rouge, marron etc., sont dues à des inclusions de matières étrangères : principalement des oxydes de fer, des sulfures et des matières organiques [33].

III.5. Formation de la barytine :

La barytine est un minéral assez ubiquiste, présente dans des formations géologiques très vastes, aussi bien dans les socles que dans les bassins sédimentaires :

- ✓ Dans les roches métamorphiques, magmatiques et volcaniques comme granites et basaltes, cas le plus fréquent, les occurrences et les gisements sont de types filonien et parfois stratiformes. La barytine étant généralement associée à d'autres minéraux tels la fluorine, la Célestine (**SrSo₄**), le quartz, les sulfures de plomb-zinc.
- ✓ Dans les roches sédimentaires, comme les grés, calcaires, dolomies et marnes, la barytine se présente en lentilles stratiformes, mais aussi en petits filons dans des fissures de ces roches, les occurrences et les gisements étant moins fréquent que dans les roches de socles...

Il existe également des gisements résiduels, issus de la dégradation de gisements primaires, ou des gisements piégés dans des structures géologiques favorables après remaniement et transport [33].

III.6. Types de gisement

On distingue généralement trois types de gisement de barytine :

- les gisements filoniens et de remplissage de cavité
- les gisements stratiformes de couverture sédimentaire et les gisements stratiformes d'origine exhalative;
- les gisements résiduels.

III.6.1. Les gisements filoniens et de remplissage de cavité :

Dans le cas des gisements filoniens et de remplissage de cavité, la barytine est transportée par les fluides hydrothermaux et déposée dans les failles, fractures, joints, cavités, plans de stratification et toute autre ouverture (karsts) existante au moment du dépôt [34].

III.6.2. Les gisements stratiformes : [34].

Les gisements stratiformes comprennent les gisements stratiformes de couverture sédimentaire et les gisements stratiformes d'origine exhalative

III.6.3. Les gisements stratiformes de couverture sédimentaire : [34].

Les gisements sont associés à des fractures d'extension régionales qui affectent le socle et la couverture. La barytine se retrouve en concentration stratiforme (couche) ou stratoïde (niveaux à nodules et géodes) dans un environnement sédimentaire évaporitique, lagunaire ou lacustre.

III.6.4. Les gisements stratiformes d'origine hydrothermale-exhalative : [34].

Les couches et amas de barytine sont parfois associés aux gisements de sulfures massifs d'origine exhalative. La formation des dépôts est liée à des sources hydrothermales sous-marines en relation avec une activité volcanique importante plus ou moins discrète.

Les plus grands dépôts de barytine au monde appartiennent à la catégorie des gisements d'origine hydrothermale-exhalative.

III.6.5. Les gisements résiduels : [34].

La barytine provient de la destruction des gisements préexistants qui sont généralement encaissés dans les dolomies.

III.7. Méthodes d'exploitations de la barytine

L'exploitation de la barytine dépend du type de gisement (filoniens, stratiformes, résiduels) et de leur morphologie. Elle se fait donc soit en souterrain par galeries, soit en carrières à ciel ouvert. Dans les pays industrialisés, l'extraction en souterrain étant coûteuse, ce type d'exploitation a généralement cessé et ce sont les carrières à ciel ouvert qui sont surtout en activité. En France le gisement de Chaillac – Les Redoutières dans l'Indre, qui a été exploité jusqu'en 2006, se trouvait dans ce cas.

Dans les pays où la main d'œuvre est nombreuse et à faible coût, les exploitations artisanales et semi industrielles en galeries souterraines, ou celles de petites dimensions à ciel ouvert, dans des contextes difficiles, peuvent se maintenir.

III.8. Pétrographie et minéralogie de la barytine

La barytine cristallise dans le système orthorhombique. Elle forme généralement des concrétions globulaires, fibreuses ou lamellaires, blanche ou moins translucide. Des cristaux bien individualisés, Ces minéralisations parfois colorées selon la nature des impuretés (oxydes

de fer, sulfures, matières organiques...) contiennent souvent des traces de Sr, Ca, Mg, et Pb [35].

III.9. Caractéristiques physico-chimiques de la baryte :

Le baryum est un métal alcalino-terreux mou argenté qui fond à 850°C. Il se trouve dans la nature sous forme de barytine $BaSO_4$, de bantonite $(Ba,Sr)_6(Ca,Mg,Mn)_7(CO_3)_{13}$ de norséthite $BaMg(CO_3)_2$, de sanbornite $BaSi_2O_5$ et de withérite $BaCO_3$. On ne trouve pas le baryum sous la forme d'élément natif en raison de sa très grande réactivité avec l'oxygène. Son protoxyde BaO est appelé baryta ou baryte anhydre.

Le tableau suivant représente quelques caractéristiques physico-chimiques de la baryte :

Tableau III.1 : les caractéristiques physico-chimiques de la barytine [35, 36].

Formule chimique	$BaSO_4$ (Sulfate de Baryum)
Nomenclature	Barytine appelée communément baryte dans le domaine pétrolier
Classe minéralogique	Sulfates
Système cristallin	Orthorhombique
Forme des cristaux	Pyramide – sphénoïde
Densité	4.48 La baryte est remarquable par son poids exceptionnel et la perfection de ses cristaux.
Dureté	3 à 3.5 sur l'échelle de Mohs
Température	1580°C
Clivage	Parfait dans une direction, faible dans les autres. La barytine grossière constitue divers agrégats, en général clivables.
Fracture	Conchoïdale (comme celle du verre).
Trace	Blanche
Eclat	Vitreux
Fluorescence	La baryte n'est pas ou très peu fluorescente, par contre, chauffée, elle devient luminescente.

III.10. Domaines d'utilisations de la barytine

III.10.1. Au niveau national :

La barytine algérienne, est utilisée seulement dans le domaine pétrolier où la barytine est l'alourdissement le plus utilisé dans les boues de forages, afin d'augmenter la densité [35].

III.10.2. Au niveau mondial :

Le sulfate de baryum, oxyde cristallin, blanc, n'est pas soluble dans l'eau, sous forme de poudre blanche, il couvre un vaste domaine d'application. Certaines formes sont toxiques.

Les utilisations industrielles de la barytine sont basées sur leur densité, stabilité chimique, blancheur, et son abondance relative dans la nature, elles concernent trois grands secteurs de l'industrie [37].

a) Industrie pétrolière :

Ce secteur correspond aujourd'hui, environ 75% à 80% de la consommation mondiale.

Dans l'industrie pétrolière, sous forme de boue lourde, il augmente la densité des fluides de forages afin d'éviter les fuites de gaz. Il est possible de porter la densité des boues de bentonite qui est d'environ 1.05 à 2.5.

Une solution concentrée de sulfate de baryum ($BaSO_4$) est utilisée comme boue de forage dans les forages réalisés dans les nappes de pétrole et de gaz. De par sa densité élevée (4.5), elle empêche les morceaux de pierre de pénétrer dans les trous de forage par flottation. 80% de la baryte produite sont utilisés à cet effet.



Figure III.2 : Boue de forage.

b) Industrie chimique :

L'industrie chimique absorbe près de 16% de la consommation mondiale.

La baryte est le principal minéral pour la fabrication des dérivés du baryum : Carbonate, chlorures, oxydes, hydroxyde, nitrates, peroxydes, et sulfates de baryum.

- **Le carbonate de baryum** : est le sel le plus utilisé, il entre dans la composition des verres spéciaux et notamment le verre des écrans, des tubes cathodiques, les verres optiques, les verres anti rayonnement, les vernis céramique. Il est aussi utilisé dans la fabrication de produits en terre cuite tels que les tuiles et briques afin de contrôler les effets dus à la présence de gypse ou de sulfate de magnésium ; pour diminuer la porosité et prévenir la décoloration.
- **Le sulfate de baryum** : précipité chimiquement pur, est appelé (blanc fixe) il est utilisé comme charge blanche dans les peintures, caoutchoucs, encres...etc. le sulfate de baryum extrêmement pur, ou (blanc baryte) est donné pour 99% de blancheur (100%= blanc idéale). Il sert d'étalon pour l'évaluation de la blancheur d'un produit. Il est obtenu par traitement d'une solution de sulfure de baryum par une solution de sulfate de sodium. Il est utilisé comme charge blanche dans les peintures, caoutchouc, encres autres produits qui exigent un degré de pureté supérieur à celui que l'on peut obtenir par adjonction de barytine.
- **Le lithopone** : est le résultat d'une double précipitation d'une solution de sulfate de zinc par une solution de sulfate de baryum. Le produit final contient du sulfate de baryum et de 30% à 60% de sulfure de zinc. La fabrication de lithopone requiert en général une tonne de barytine par tonne de produit. Ce pigment blanc a été longtemps apprécié pour la peinture grâce à ses propriétés : blancheur, résistance aux intempéries, son pouvoir couvrant et son affinité pour l'huile. Dans le passé il a été fabriqué en gros tonnage, mais actuellement il est largement remplacé par des oxydes de titane.
- **Le chlorure de baryum** : est utilisé dans le traitement de surface comme durcisseur de l'acier, dans la purification des eaux, dans le traitement du cuir et des tissus et dans la fabrication du magnésium métal. Par électrolyse du chlorure de baryum, on obtient de baryum métal.
- **Le nitrate de baryum** : est utilisé en pyrotechnie (couleur vert), dans la fabrication de balles traçantes de détonateurs et démaux.
- **L'oxyde de baryum** : permet d'améliorer le rendement des fours électriques, dans la métallurgie.
- **L'hydroxyde de baryum** : ou bien (le titanate de baryum) ; permet d'améliorer le rendement des fours électriques, dans la métallurgie et aussi l'hydroxyde de baryum

entre dans la fabrication de composés électroniques et d'équipement de communication.

- **Le baryum métal** : le métal est utilisé comme capteur de gaz dans les tubes sous-vide. Il entre dans les alliages pour bougies et dans les tubes électroniques d'émission d'éléments.
- **Les ferrites de baryum** : sont utilisées pour la fabrication des aimants permanents des petits moteurs électriques à courant continu très utilisés dans l'automobile. La production de carbonate de baryum exige une qualité correspondant à un minimum de 97 à 98% de BaSO₄. Les impuretés restantes représentent des frais pour le chimiste et des pénalités pour le producteur. Les oxydes de fer ou la silice ne doivent pas dépasser le seuil de 1% ; ce qui correspond, en prix de revient, à une diminution de plusieurs pourcents de BaSO₄. Le ratio SrSO₄/ BaSO₄ exprimé en % doit être aussi faible que possible, environ de 1%. La teneur en CaF₂ doit correspondre à des traces ; quelques centaines de ppm. Les chimistes veillent à utiliser des concentrés à faibles contenus en sulfures de plomb et de zinc, en cuivre, en nickel, terre rares et carbonates.

c) La barytine comme charge minérale :

Usage le plus important de la barytine est le domaine des charges minérales pour papiers, peintures, plastiques, et caoutchoucs. Le marché automobile est le premier consommateur de ces produits sous forme d'insonorisant (tapis et caisses d'habitacle) et d'autres composants (plaquettes de frein,...). En peinture automobile, la barytine entre comme charge dans couches d'apprêt pour contribuer à l'aspect lustré de la dernière couche.

- **Dans l'industrie papetière**, la barytine est utilisée comme support des couches sensibles pour impression photographique.
- **Dans l'industrie automobile**, la barytine est employée comme charge inerte dans les matériaux de friction, tel que les plaquettes de freins et les disques d'embrayage.
- **Dans l'industrie de la construction**, la barytine entre dans la fabrication des bétons denses utilisés dans la construction de port ou de terminaux pétroliers. Ce type de béton est également employé comme contrepoids de ponts, stabilisateur de conduits sous-marins, ballast de bateaux et barrière de protection contre d'éventuelles radiations. Il sert aussi dans la construction de laboratoire, de centrales nucléaires et de base militaires atomique.



Figure III.3 : Fabrication des papiers.

d) Industrie pharmaceutique :

On s'en sert aussi en médecine, surtout dans la radiologie médicale en tant que contrastant et modifie l'absorption des rayons X, la radiologie conventionnelle détecte des contrastes, ainsi il plus facile de visualiser les os ou les poumons par exemple [36].



Figure III.4 : Absorption du rayon X.

III.11.La production de baryte en constante augmentation par Somibar (groupe ENOF)

III.11.1 : Au niveau national :

La production de l'unité d'exploitation des gisements de baryte affiliée à la société des mines de baryte d'Algérie (Somibar) qui est une membre du groupe ENOF, est satisfaisante. En effet environ 11.400 tonnes de baryte à été produite durant le premier semestre de l'année en cours à partir des gisements de Sidi Lakhdar dans la commune de Bou-caïd, et aux champs « Sidi Bel Abbés » et « Nord » relevant de la commune de Sidi Slimane.

La société exploitante compte 228 employés et couvre 40% des besoins du marché national, la baryte étant notamment utilisée dans le forage des puits de pétrole. L'unité de Bou-caïd procède à l'exploitation du minerai de Baryte, en souterrain (galeries, cheminées et chambres magasins), à son traitement, son conditionnement et à la commercialisation de la baryte marchande (produit fini), avec une capacité de production de 40.000 tonnes de baryte en sacs

et en Big-bags. A ce titre, Somibar détient 3 permis d'exploitations de petites et moyennes mines (Sidi Lakhdar, zone nord et Sidi Bel Abbés) au nom de l'ENOF délivrés en janvier 2004 pour 10 ans. Un autre site dit « El KimaOulia » (Haut sommet), dans la commune de Bou-caid, fait actuellement l'objet de travaux d'exploration en vue d'augmenter les capacités de production de la SMBA à 32000 tonnes/an. La première entrée en exploitation des trois sites miniers opérationnels remonte à 1915, époque où ils renfermaient également du plomb et du zinc. En outre, six gisements de tufs seront exploités, avant la fin de l'année en cours, dans les communes de khemisti, layoun et Sidi Abed. L'impact escompté porte notamment sur l'approvisionnement des chantiers de construction et de travaux publics. Notons par ailleurs que la Somibar dispose d'autres unités situées dans les wilayas de Tlemcen et de Khenchela. A Tlemcen, la Somibar détient une unité située dans la commune de Beni Snous.

Cette unité initialement installée pour le traitement de la baryte, assure actuellement le traitement du carbonate de calcium sous forme de prestation (broyage, ensachage) avec une capacité de 25000 tonnes de produits finis. A Khenchela, l'unité de Ain Mimoun est située dans la commune de Tamza(wilaya de Khenchela à 22 Km au nord au nord du chef-lieu de wilaya de Khenchela et distante de 208 Km du port de Skikda.Sa capacité de production est de 40000 tonnes de baryte en sacs et en Big-bags. Notons que Somibar détient 1 permis d'exploitation de petites et moyennes mines au nom de l'ENOF délivrés en janvier 2002 pour 10 ans.

L'entreprise a pour vocation la recherche, l'exploitation, la production, le développement, la commercialisation et l'exportation en l'état ou après transformation de la baryte et de tous produits miniers et substances minérales non métalliques. Elle est certifiée ISO 9001 version 2000 par l'organisme AFAQ-ASCERT international. Leader national dans la production et commercialisation de la baryte en Algérie, Somibar produit plus de 55000 tonnes de baryte destinée principalement au secteur pétrolier. L'entreprise bénéficie d'un capital d'expérience important en matière d'exploitation minière (souterraine et à ciel ouvert). Aussi la société capitalise une expérience dans le management de la qualité avec la certification des systèmes mis en place au niveau des unités opérationnelles conformes à la **norme ISO 9001 version 2000 [38]**.

III.11.2. Au niveau mondial :

La production mondiale de la Barytine est distribuée sur les différents pays comme le montre la figure ci-dessous :

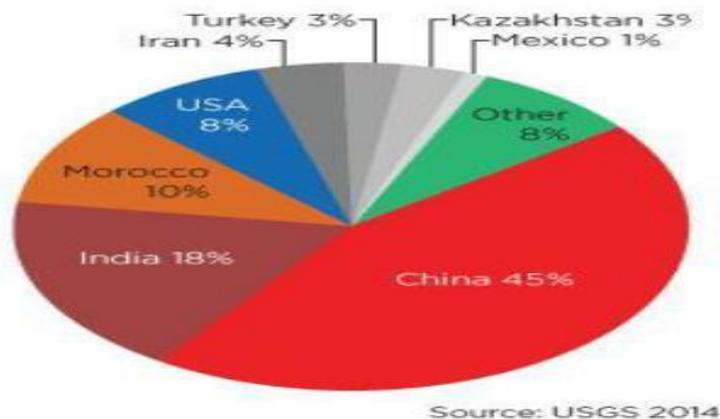


Figure III.5 : la production mondiale de la barytine en 2014 (USGS) [35].

Tableau III.2 : la production mondiale de la barytine [39].

Pays	La production ($\times 10^3$ tonnes)	
	En 2013	En 2014
Chine	4.000	4.100
Kazakhstan	250	250
Turquie	250	270
Inde	1.740	1.600
Iran	270	270
Etats-unis	700	720
Maroc	1.000	1.000
Algérie	40	50
Mexico	344	400
Pakistan	118	75
Autres pays	558	575

III.12. La consommation de la barytine :

III.12.1. Au niveau national :

La consommation de la barytine en Algérie en 2015 a atteint 250000 tonnes. Une part de 100000 tonnes est assurée par les producteurs locaux et le reste par l’importation.

III.12.2. Au niveau mondial :

La consommation de la barytine dans certains pays est beaucoup plus élevée, le tableau ci-dessous désigne son utilisation :

Tableau III.3 : La consommation mondiale de la barytine [35].

Pays	La consommation (×10³ tonnes)
Chine	1450
Etats-Unis	2690
Pays de golfe	700
Amérique du sud	370
Inde	330
Russe	330
Afrique	290
Malaisie	210
Union européen	670
Monde	8400

III.13. Les prix de barytine :

Les prix pratiques sont très variables et dépendent de la qualité du matériau et des procédés de traitement plus au moins sophistiqués qui sont utilisés pour répondre aux besoins des consommateurs.

La barytine brute pour le forage vaut environ 40 dollars par tonne (FOB Maroc). La barytine broyée qualité forage coute 75 dollars du tonne (CIF USA). En Europe, le cout moyen de la barytine broyée pour la chimie varie de 75 à 95 dollars par tonne, la barytine broyée pour charges et verrerie coute entre 130 et 135 dollars par tonne [35].

III.14. Les réserves de la barytine :**III.14.1. Les réserves de la barytine au niveau national :**

Les gisements barytiques présentant un intérêt économique sont localisés au Nord du pays à Bou-caïd (W. Tissemsilt), Ain Mimoun (W. Khenchela), Mellal (W. Tlemcen), Mesloulou (W. Tébessa) et KoudiatSafia (W. Médéa).

Par ailleurs, des travaux de recherche minière ont permis de mettre en évidence plusieurs gisements dans le Sud-ouest algérien près de Béchar. Il s'agit des gisements de DraissaSud-ouest, Djebel Draissa, DraissaNord-est et DraissaGuelb El Tahtani. Cet ensemble de gisement totalise des réserves prèsde 07 Mln de tonnes de baryte.

Le gisement d'Ichmoul (W .Batna) : le site minier est localisé au versant nord du djebel Ichmoul, à 12 Km au nord du chef-lieu d'Arris. La structure est considérée favorable. Des travaux été effectués en 1971 et avaient conclu l'existence d'un corps barytine BaSO₄ dont le taux était entre 30% et 50% avec des réserves qui peuvent atteindre 1.548.280 tonnes [14].

III.14.2. Les réserves de la barytine au niveau mondial :

Il n'y a aucun système mondial admis pour classer les réserves, un système développé aux Etats-Unis (US Bureau of Mines & US Geological Survey, 1981 ; US Geological Survey, 1982) définit les réserves en tant que « ressources identifiées en minerai qui peut être extrait de manière profitable au moyen de la technologie existante et dans les conditions économiques actuelles ». Le tableau suivant donne les importants pays qui ont des grandes réserves de barytine.

Tableau III.4 : Les réserves mondiales de la barytine en 2015 [39].

Pays	Réserves ($\times 10^6$ tonnes)
Chine	100
Kazkhistane	85
Turquie	35
Inde	32
Thaïlande	18
Etats-Unis	15
Russie	12
Maroc	10
Algérie	07
Mexico	07

Pakistan	01
Autres pays	66
Total	358

III.15. Les méthodes de traitement de minerai butyrique :

Dans certains gisements, le minerai est suffisamment pur et peut être simplement criblé et concassé. En général, la barytine primaire est obtenue par triage manuel, ou après concentration par flottation, gravimétrie, séparation magnétique, séparation radiométrique... puis séchage, broyage et classification [35].



Figure III.6 : Cellules de flottation dans l'usine de Chaillac-France-[35].



Figure III.7 : séparation gravimétrique du minerai butyrique de Bou-caïd (Tissemsilt-Algérie).

III.15.1. Au niveau national à l'usine de Bou-caïd (Tissemsilt) :

Le champ minier de Bou-caïd est situé à 70 Km au Nord-est du Chef-lieu de la wilaya de Tissemsilt et à 250 Km Au Sud-ouest de la capitale et 900 Km de Hassi Messaoud. L'usine de Bou-caïd traite, enrichit et transforme le Tout-venant Barytique provenant des différents

quartiers dont le but est d'obtenir un produit marchand conforme aux normes API (American Petroleum Institute) [40].

Le Tout-venant avec une grosseur maximale de 500 millimètres et une teneur minimale de 60% en BaSO₄ passe dans Trois stations.

- Station de concassage
- Station d'enrichissement
- Station de pulvérisation et conditionnement

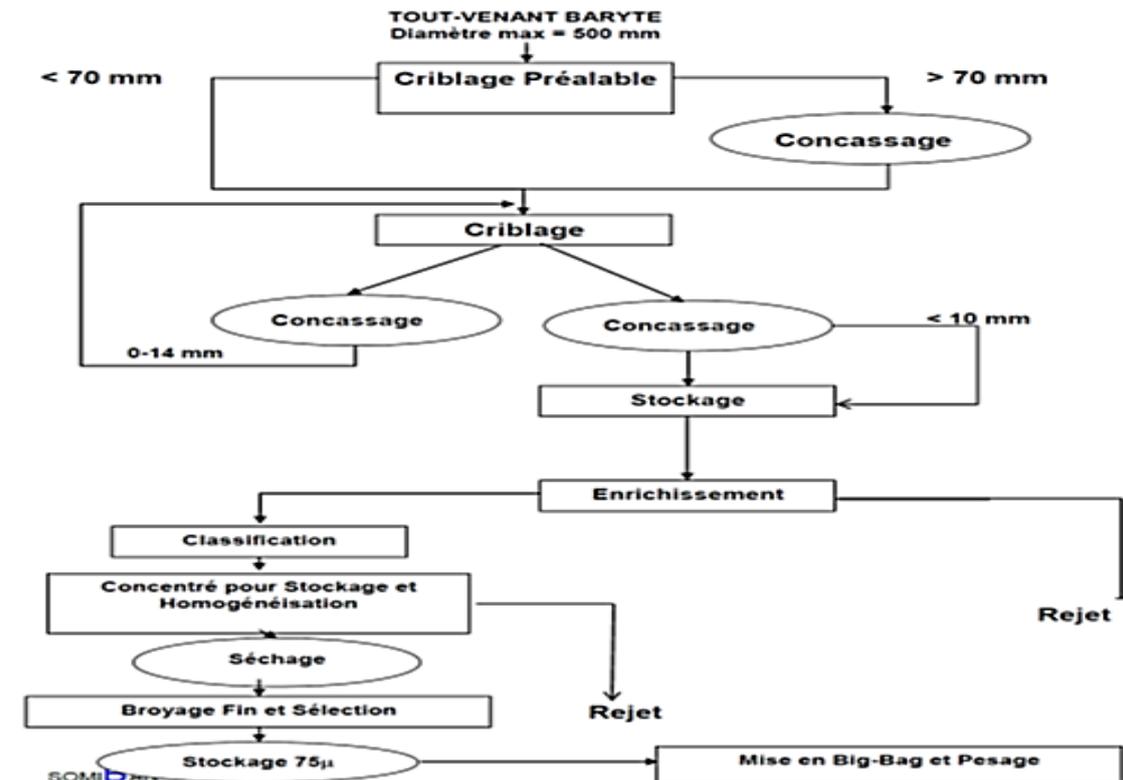


Figure III.8 : La chaîne de traitement de minerai barytique de Bou-caid- Tissemsilt.

1. Station de concassage :

Cette étape consiste à réduire le Tout-venant jusqu'à une grosseur admise par la prochaine étape pour pouvoir l'enrichir.

Le Tout-venant est chargé à l'aide d'une pelle chargeuse dans une trémie réceptrice de capacité de 120 tonnes à partir d'une aire de stockage pouvant atteindre jusqu'à 5000 tonnes.

Le Tout-venant avec une grosseur maximale de 500 mm à l'alimentation subit trois opérations de réduction de grosseur :

- Réduction à 70 mm à l'aide d'un concasseur primaire à mâchoires à simple effet type VB67 BERGEAUD.

- Criblage et réduction de grosseur à 14 mm dans un groupe mobile broyeur crible SYMENS. Cette opération de séparation des granulats entre 10 et 14 mm passe par un crible à 03 étages et qui facilite la séparation et le concassage de cette étape.
- Réduction à 6 mm dans un concasseur à cylindres lisse type BCR 60X80.

Le Tout-venant réduit à une grosseur inférieure à 6 mm et stocké dans trois trémies tampons de 120 tonnes de capacité à chacune.

2. Station d'enrichissement :

Le Tout-venant réduit à une dimension inférieure à 6 mm subit une séparation gravimétrique humide dans un appareil appelé Remer-Jig de marque WEMCO.

Le produit lourd (la barytine) est récupéré du bas de l'appareil dans un classificateur spiral puis évacué vers des chambres pour l'égouttage.

Le produit léger (les rejets) est acheminé en surface avec l'eau vers une digue pour une décantation, stockage et recyclage de l'eau clarifiée.

Le produit lourd représente le concentré est déposé à proximité dans une aire de stockage allant jusqu'à 9000 tonnes de capacité.

3. Station de pulvérisation et conditionnement :

Cette opération permet de transformer le concentré à un produit fini marchand conforme aux normes.

Le concentré avec une humidité maximale de 2 à 5 % à l'entrée subit une opération de séchage dans un sécheur rotatif de 14 mètres de long et de 2 mètres de diamètre ou il est ramené à un taux inférieur à 0.1% à la sortie du séchage.

Le produit séché subit un broyage fin dans un broyeur pendulaire BP16 à un rendement moyen de 14 tonnes/heure et une séparation en granulométrie dans un séparateur statique où les particules inférieures à 75 Microns sont stockées dans une trémie de stockage de produit fini.

Le produit réduit à 75 microns est mis en Big-Bag des ensacheuses de marque TESTUT et pesé dans une balance électronique.

Le produit conditionné dans des Big-Bags de 1.5 tonne représente le produit fini de l'usine. il est destiné pour l'utilisation comme boue de forage pétrolier.

III.15.2. Au niveau mondial :

➤ La barytine de Bulgarie :

Le schéma technologique pour la production du concentré de la barytine des minéraux ferreux et de la barytine brut dans la mine de Kremikovtzi est représenté dans la Figure III.9 cette

figure synthétisée basée sur les recherches des mines pas seulement dans la Bulgarie mais aussi dans d'autres pays

Tableau III.5 : La composition chimique de la barytine brute de Kremikovtzi[41].

Le composant	Les teneurs (%)
BaSO4	30.4
CaO	15.9
Fe	12.4
SiO2	9.6
Mn	2.5
Pb	1.21

Les éléments ferreux sont récupérer au départ à l'aide du schéma sélective. la chaîne opposé est destinée pour l'extraction de la barytine des minerais bruts. La barytine est récupérer préalablement chez les particules ayant la taille optimale pour la flottation. Le développement de cette technologie est approuvé. L'introduction de la séparation magnétique à haute intensité SMHI pour récupérer les éléments ferreux des résidus de flottation de la barytine est concevoir.

La composition chimique du concentré obtenu après cette chaîne de traitement est représentée dans le tableau suivant ;

Tableau III.6 : La composition chimique du concentré obtenu après le traitement de l'usine de Kremikovtzi Bulgarie [41].

Les éléments chimiques	Les teneurs %	
	Le concentré obtenu	Le concentré exigé
BaSO4	97.08	>90.00
SiO2	0.44	< 2.50
Fe ₂ O ₃	0.60	<0.15
CaO	0.05	...
MnO	0.90	...
Pb	0.07	...
CaF ₂	...	<1.00

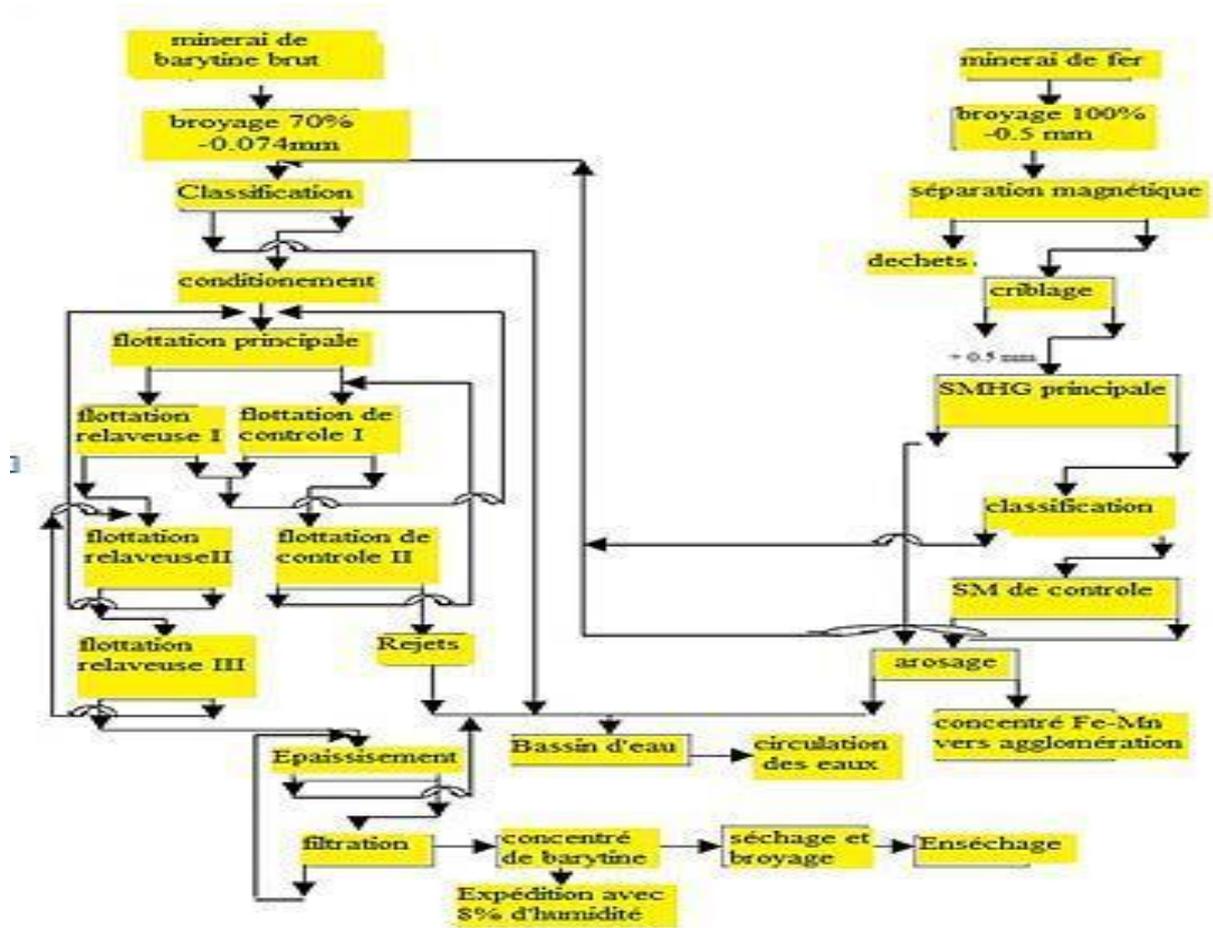


Figure III.9: Schéma technologique de traitement de minerai barytique de Kremikovtzi Bulgarie [41].

III.16. Utilisation de la barytine dans le béton (béton baryté) en Algérie

Le béton baryté présente une densité bien supérieure au BPE classique (environ 3200 kg /m3), ce qui nécessite des coffrages « bien » dimensionnés. Ceci aura une incidence sur les installations générales de chantier (passerelles, soutènement, ancrages). L'utilisation de ces bétons, généralement prescrite pour des ouvrages servant de protection aux différents rayonnements, demande une mise en œuvre particulièrement soignée (temps de mise en œuvre, béton généralement « fluidifié », matériel de vibration adapté). Ces points sont traités directement dans le CCTP.

Les points de vigilances sont de la responsabilité de l'entreprise de gros-œuvre et du prescripteur. Il n'y a à priori pas lieu de répercuter ces obligations dans le PGC car cela ne concerne qu'un seul lot, dans le cadre de ses règles de l'art.

III.17. Les effets de la barytine sur la santé et l'environnement**III.17.1. Les effets de la barytine sur la santé :**

Les niveaux de Baryum naturellement présent dans l'environnement sont très faibles. On ne peut trouver des grandes quantités de baryum que dans les sols et les aliments tels que les noix, les algues les poissons et certaines plantes. La quantité de baryum qui est détectée dans la nourriture ou l'eau n'est en général pas assez élevée pour devenir un souci pour la santé.

Les personnes ayant un plus grand risque d'exposition au baryum, avec des conséquences pour la santé sont celles qui travaillent dans l'industrie du baryum. La plupart des ennemis de santé qu'ils peuvent subir sont provoqués par le fait de respirer de l'air qui contient du sulfate de baryum ou du carbonate de calcium.

Beaucoup de sites de déchets dangereux contiennent une certaine quantité de baryum. Les gens vivant à proximité peuvent être exposés à des niveaux nocifs. On peut alors être exposé en respirant de la poussière, et mangeant des plantes ou de la terre ou en buvant de l'eau polluée par du baryum. Il peut aussi y avoir contact avec la peau.

Les conséquences du baryum sur la santé dépendent de la solubilité dans l'eau des composés.

Les composés du baryum qui se dissolvent dans l'eau peuvent être nocifs pour la santé.

De petites quantités de ces composés peuvent provoquer des difficultés respiratoires.

III.16.2. Les effets de la barytine sur l'environnement :

Le baryum est un métal blanc argenté qui peut être trouvé dans l'environnement, où il existe naturellement. Il y est présent en combinaison avec d'autres produits chimiques tels que le soufre, le carbone et l'oxygène.

Les composés du Baryum sont utilisés par les industries du pétrole et du gaz dans les boues de forage. Les boues de forage simplifient le forage dans les roches en lubrifiant la foreuse. Les composés de Baryum sont aussi utilisés pour faire des peintures, des briques, des tuiles, des verres et du caoutchouc.

A cause de l'utilisation intensive du baryum dans l'industrie, des quantités importantes de baryum ont été ajoutées dans l'environnement. Par conséquent, dans certains lieux, les concentrations de baryum dans l'air, l'eau et le sol peuvent être plus élevées que les concentrations que l'on trouve naturellement.

Le baryum pénètre dans l'air lors des procédés d'exploitation minière, de raffinage, et lors de la production des composés de baryum. Il peut aussi se retrouver dans l'air lors de la combustion du charbon et du pétrole.

Certains composés du baryum qui sont libérés lors des procédés industriels se dissolvent facilement dans l'eau et on peut les trouver dans les lacs, les fleuves et les rivières. Comme ils sont solubles dans l'eau, ces composés peuvent parcourir de longues distances. Lorsque les poissons et autres organismes aquatiques absorbent les composés de baryum, le baryum s'accumule dans leur corps. Les composés de baryum qui sont persistant restent en général à la surface des sols ou dans les sédiments au fonds des eaux. En général, on trouve des niveaux faibles de baryum dans les sols, ces niveaux peuvent être plus élevés dans les sites de déchets dangereux.

III.18. Conclusion

La barytine est un sulfate de baryum naturel largement utilisé dans différents secteurs Industriels pour ses propriétés particulières : densité élevée, neutralité chimique, blancheur, Absence d'abrasivité.

Les réserves exploitables mondiales sont importantes. La consommation de barytine dans le Monde est directement liée au nombre colossal de forages pour la recherche D'hydrocarbures, Cette consommation est donc en étroite liaison avec le prix du pétrole.

Il existe plusieurs gisements barytique autre que Bou-caïd mais ne sont pas mis en exploitation (Berouaghia, Ichmoul, Dhraïssa...etc) et qui peuvent être exploités.

Ce chapitre à donné les différentes exploitations locales et mondiales.

Chapitre IV
Résultats de
bibliographie et
discussions

IV.1. Introduction

La baryte est l'un des minéraux industriels les plus importants. Grâce à ses applications diverses, ses réserves importantes et son exploitation intensive, elle contribue largement aux développements économique et industriel du pays. Le domaine d'utilisation de ce minéral est polyvalent, elle est utilisée principalement par les industries : pétrolières comme additif à forte densité pour les boues de forage ; chimique elle sert particulièrement dans la fabrication des dérivés de baryum, tels les carbonates, chlorures, oxydes, hydroxydes, peroxydes, nitrates et sulfates de baryum ; métallurgique, l'oxyde de baryum permet d'améliorer le rendement du four électrique. Le chlorure de baryum est utilisé comme durcisseur d'acier et de fondant de soudure. Entre autre, Il peut être utilisé comme capteur de gaz pour tubes à vide, lubrifiant (additif), matière de charge et colorant pour papier. Elle se caractérise par une densité élevée qui varie de 4.2 à 4.6, une dureté faible, de 2,5 à 3.5 selon l'échelle Mohs. Un point de fusion élevé (1580°C). Une neutralité chimique, une blancheur et une absence d'abrasif. Grâce à ses propriétés particulières, Elle Est utilisée comme charge minérale dans une grande variété de produits dont les peintures, le papier, le verre, le caoutchouc, les plastiques, les matériaux de friction ainsi que les barrières de protection contre le rayonnement.

Ce chapitre est consacré à la présentation des différents résultats obtenus sur la valorisation des granulats de gisement de baryte dans le domaine de construction.

IV.2. Les différentes recherches effectuées sur le minerai de la barytine**IV.2.1. Méthode de traitement de la baryte de l'unité de Bou-caïd (Tissemsilt) [36] :**

L'usine de traitement de Baryte est important dans l'industrie Algérienne de la baryte provenant des différents chantiers dans un but d'obtenir un produit fini marchand conforme aux normes API.

L'étude s'intéresse à l'exploitation de la baryte, commençant par le traitement de la matière première afin d'arriver aux produit fini, passant par la station de concassage, enrichissement jusqu'à la fin pulvérisation et conditionnement du produit fini, qui est passé sur une série d'essais au laboratoire avant la commercialisation afin de vérifier leurs caractéristiques et leurs conformité aux normes API. Le travail concerne l'exploitation du gisement de minerai de baryte à savoir sulfate de baryum. Le minerai de baryum se trouve en forme de deux

espèces l'un à cristaux grossiers qui donne des émanations allongées et agrégats à structure fibreuse, l'autre à cristaux fins forme de grains isométriques, voici les caractéristiques du gisement :

- La teneur en baryte varie de 60 à 95%.
- Profondeur des filons varie de 0.8 à 6m.
- La dureté est de 3 à 4 pour la baryte.
- La profondeur des filons arrive jusqu'à 120m et même plus.

IV.2.2. Les techniques de traitement

Le tout-venant provenant des différents chantiers d'exploitation, avec une grosseur max de 500mm à l'alimentation subit trois opérations de réduction mécanique de grosseur :

1. Le concassage (concassage primaire- concassage secondaire- concassage tertiaire).
2. Enrichissement (séparation gravimétrique humide « Jig REMER »).
3. Pulvérisation et conditionnement du produit fini (séchage- broyage- conditionnement et mise en Big-Bag).

IV.2.3. Pulvérisation et conditionnement du produit fini

Cette opération permet de transformer le concentré à un produit fini marchand conforme aux normes.

- **Séchage**

Le concentré avec une humidité maximale de 12% à l'entrée du four, subit une opération de séchage dans un sécheur rotatif de 14 m de longueur et 2 m de diamètre doté d'un brûleur à gaz naturel de la marque GUENOD ou l'humidité de concentré est ramenée à un taux inférieur à 1% à la sortie du séchage.

Le produit issu du séchage transporté par un élévateur à godet pour être stocker dans une trémie de 30t de capacité. A l'aide d'un alimentateur alvéolaire le produit séché est envoyé dans un broyeur pendulaire ou le produit atteint la finesse recherché et prés réglée (soit 97% à la granulométrie de 74 microns) à partir d'un séparateur statique se trouvant dans la partie supérieur du broyeur.

- **Broyage**

Le produit séché subit un broyage fin dans un broyeur pendulaire BP16 de la marque SOUDRON SACRE, ainsi une séparation en granulométrie dans un séparateur statique ou les particules inférieures à 75 µm sont stockées dans une trémie de stockage de produit fini, le

rendement moyen de cette étape est de 14 tonnes/heure.

Le broyeur pendulaire Soudron SACRE BP16 est alimentés par la trémie de produit sec ($d < 10 \text{ mm}$), ce dernier est broyé jusqu'à une finesse de 3 % max refus de la classe $75\mu\text{m}$, le produit broyé passe à une trémie de stockage par une voie d'air (aspiration par un ventilateur à grande capacité), les schlamms du broyeur sont aspirées et stockées.

- **Conditionnement et mise en BigBag**

Le produit réduit à $75 \mu\text{m}$ est mis en Big-Bag de 1500 kg à l'aide des ensacheuses de marque TESTUT et pesé dans une balance électronique.

Chaque lot de 19.5 tonnes est constitué de 13 Big-Bag, sera analysé selon la norme API 13 A section 2 au laboratoire de l'unité.

IV.2.4. Contrôle de qualité

Le contrôle qualité est l'une des fonctions les plus importantes dans une unité de production, c'est le moyen qui nous permet de dire que notre produit fini est conforme aux normes API.

L'American Petroleum Institut exige que le produit fini de la baryte doit satisfaire quatre paramètres essentiels. Les différentes analyses sont effectuées par le service du laboratoire.

Le contrôle de qualité se fait à travers un échantillonnage et des analyses comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau IV.1: L'échantillonnage d'un produit traité [36].

Nature de l'échantillon	Lieu de prélèvement	Quantité prise	Fréquence	Type d'analyse
Tout-venant	Avant stockage	0.5kg	1 heure	Densité et humidité
Concentré	Avant stockage	0.5kg	1 heure	Densité et humidité
Rejet (stérile)	Sortie du JIG	0.5kg	1heure	Densité
Produit fini	Sortie usine	1.3kg	Lot de 1.9 ou de 20 tonnes	Densité, métaux alcalino terreux, résidus supérieurs $75\mu\text{m}$ et particules

IV.2.5. Les analyses effectuées au niveau du laboratoire de l'unité de Boucaid [36]

- **Densité**

La mesure de la densité est effectuée sur les échantillons prélevés aux différentes étapes (Recherche et évaluation géologique, roulage, concassage du tout-venant, enrichissement et conditionnement).

Cette étape est effectuée par la Méthode de Chatelier (développée dans ce mode opératoire).

La densité est calculée comme suit :

$$\text{Densité (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{poids de la baryte (g)}}{\text{volume final} - \text{volume initial (cm}^3\text{)}}$$

- **Métaux alcalino-terreux**

Cette analyse consiste à mesurer le rapport de calcium en milligramme contenu dans un kilogramme de produit fini.

Le taux de calcium par la relation suivante :

$$\text{Ca (mg/kg)} = 400 \frac{\text{volume d'EDTA}}{\text{volume de l'échantillon}}$$

- **Résidu supérieurs à 75 μm**

Cette méthode permet de déterminer le taux de résidu dont la dimension est supérieure à 75 μm dans des échantillons de produit fini selon les exigences de la norme (A.P.I).

Le taux de résidus supérieurs à 75 μm est donné par la relation suivant :

$$\text{Résidu 75 (}\mu\text{m}\%) = \frac{\text{poids de résidus}}{\text{poids de l'échantillon}} \times 100$$

- **Particules inférieures à 6 μm**

Le taux des particules inférieures à 6 μm est calculé par la relation suivante :

$$S6\% = \left[\frac{SH - SL}{DH - dl} (6 - D) \right] + SL$$

DH : diamètre équivalent des particules immédiatement supérieurs à 6 μm .

DL : diamètre équivalent des particules immédiatement inférieurs à 6 μm .

SH : pourcentage cumulatif des points immédiatement supérieurs à 6 μm .

SL : pourcentage cumulatif des points immédiatement inférieurs à 6 μm

- **Humidité**

Cette opération permet de déterminer le taux de l'eau dans les échantillons des différents produits.

Le taux d'humidité est défini comme suit :

$$\frac{p1 - p2}{p1} \times 100$$

Avec :

P1 : échantillon humide.

P2 : échantillon sèche après séchage au four.

IV.2.6. Résultats et discussions

IV.2.6.1 Résultats des différentes propriétés de la Baryte de Bou-caid :

- **La norme L'American Petroleum Institut sur le produit fini [36]**

Tableau IV.2 : Les différentes analyses effectuées par le service du laboratoire [36].

Le Test	Requis
La densité	4.20
Métaux alcalino-terreux	250(mg/kg)
Résidu supérieurs à 75 μm	3%
Particules inférieures à 6 μm	30%

Les tests permettent de trouver les valeurs suivantes :

- **Le produit fini**
- **La densité**

Tableau IV.3 : Résultats de la densité effectuée sur les échantillons [36].

Echantillon	Volume initial (cm³)	Volume final (cm³)	La densité (g/cm³)
1	0.1	19.6	4.102
2	0.2	19.8	4.080
3	0.0	19.4	4.123
4	0.0	19.5	4.145

➤ Métaux alcalino-terreux

Tableau IV.4 : résultats du taux de Ca^+ (%) effectué sur les échantillons [36].

Echantillon	Volume initial (EDTA) (cm^3)	Volume final(EDTA) (cm^3)	Le taux de Ca^+ (%)
1	48.2	50	72
2	11.4	15.3	156
3	41.1	44.8	148
4	44.8	47.7	116

➤ Résidu supérieurs à $75\mu\text{m}$ **Tableau IV.5:** le taux de résidu dont la dimension est supérieur à $75\mu\text{m}$ dans des échantillons de produit fini selon les exigences de la norme (A.P.I) [36].

Echantillon	Poids de la capsule(g)	Poids (capsule+résidu)(g)	Résidu $>75\mu\text{m}$
1	97.63	100.17	2054
2	97.63	99.84	2.32
3	96.63	100.76	2.60
4	97.63	100.54	2.78

➤ Particules inférieures à $6\mu\text{m}$

DH : diamètre équivalent des particules immédiatement supérieurs à $6\mu\text{m}$.

DL : diamètre équivalent des particules immédiatement inférieurs à $6\mu\text{m}$.

Tableau IV.6 : Le taux des particules inférieures à 6 μm [36].

La densité (g/cm^3)	Temps (s)	Température ($^{\circ}\text{C}$)	Dégradation de l'hydromètre	Diamètre (μm)	Sh (%)	Particule < 6 μm .
4.08	10	22.3	1.018	110.41	20.33	17.35
	20	22.8	1.015	7.91	18.68	
	30	23.2	1.012	6.98	17.03	
	40	23.3	1.010	5.61	17.02	
4.123	10	20.1	1.019	10.52	21.92	21.92
	20	21.3	1.017	7.49	21.92	
	30	22.4	1.015	6.17	21.92	
	40	22.6	1.013	5.46	21.92	
4.145	10	20.6	1.019	10.44	21.89	21.98
	20	21.2	1.017	7.49	21.98	
	30	21.6	1.015	6.21	21.98	
	40	22	1.013	5.48	21.98	
4.102	10	19.9	1.020	10.44	23.60	21.95
	20	20.2	1.017	7.62	21.95	
	30	21.1	1.015	6.26	21.95	
	40	22	1.013	5.51	21.95	

➤ **Tout-venant****Tableau IV.7** : Résultats de la densité effectués sur les échantillons [36].

Echantillon	Volume initial (cm ³)	Volume final (cm ³)	La densité (g/cm ³)
1	0	21.9	3.652
2	0	22.3	3.587
3	0	22	3.630

➤ **le concentré****Tableau IV.8** : Résultats de la densité effectués sur les échantillons [36].

Echantillon	Volume initial (cm ³)	Volume final (cm ³)	La densité (g/cm ³)
1	0	19.5	4.102
2	0	19.6	4.08
3	0	19.4	4.123

IV.2.6.2 Interprétation

Les valeurs de la norme sont appliquées juste sur le produit fini.

D'après les analyses ; tous les paramètres sont conformes à part la densité ($4.102 < d < 4.20$) où ils ont rencontrés un problème de chute de qualité qui va se régler par la suite :

Les analyses de tout-venant et le concentré sont faites juste pour contrôler la qualité pendant toutes les étapes de traitement. Ça veut dire qu'ils n'ont pas une valeur fixe pour la densité de tout-venant alors que pour le concentré (produit semi fini) la densité doit être la même que le produit fini 4.20.

La densité est l'une des propriétés bien connues de la barytine elle est liée directement à son usage dans plusieurs domaines.

IV.3.2. Compositions des bétons

Tableau IV.9 : Composition des formulations retenues [50].

Bétons	Ciment (Kg)	Sable (Kg)	gravier (Kg)	baryte (Kg)	eaux(L) frai	à l'état durci	fraction massique Baryte (état durci)
B0	403.01	633.19	1103.2 3	0.00	207.26	178.58	00.00%
B1	401.77	649.96	1066.5 3	34.21	211.73	189.54	01.46%
B2	392.05	426.19	1108.9 2	284.09	224.71	205.76	11.75%
B3	382.62	215.60	1132.2 3	503.06	243.44	229.49	20.38%
B4	375.99	0.00	1210.7 8	641.61	259.27	252.62	25.86%

IV.3.3 Indices de durabilité des bétons formules

- Résistance à la compression à moyen terme

Pour suivre l'évolution de la résistance à la compression à moyen terme, des essais ont été effectués sur trois éprouvettes cylindriques 10 x 20 cm de chaque formulation conformément à la norme NT 21.113 [56]. Le Tableau IV.10 expose les résultats aux échéances de 28j, 1 an 3ans et cinq ans.

Pour un âge donné, la résistance à la compression est maximale pour le mélange B1. A 28 jours, Pour les bétons : B3 et B4, la résistance à la compression diminue par rapport à celle de B0. Les valeurs à 1 an, 3 ans et 5 ans nous indiquent aussi qu'il n'y a pas d'effet néfaste sur la résistance à moyen terme, ce qui donne un premier indice sur la durabilité de ces bétons. Par ailleurs la diminution de la résistance à la compression n'a pas dépassé 10%.

Tableau IV.10 : Evolution de la résistance à la compression à moyen termes [50].

bétons	fc28j	fc 365j	fc 3ans	fc 5ans
B0	32.4 ±0.6	38.5 ±1.3	39.7 ±1.3	40.1 ±0.9
B1	36.6 ±0.9	41.2 ±1.5	42.4 ±1.8	42.8 ±1.1
B2	32.3 ±0.8	37.4 ±1.2	38.5 ±1.1	39.3 ±1.9
B3	29.0 ±0.9	34.5 ±0.8	35.5 ±0.6	35.6 ±0.8
B4	29.8 ±0.5	34.8 ±0.9	35.8 ±0.6	36.0 ±0.9

- Absorption d'eau par immersion et Absorption par capillarité

Le but de cet essai est la détermination de la masse d'eau absorbée par immersion totale sous l'eau en effectuant la différence entre la masse à l'état saturé (m_{humide}) et la masse à l'état sec ($m_{\text{sèche}}$). L'essai a été réalisé conformément à la norme NBN B 15-001:2004 sur des éprouvettes de dimension 7x7x20 cm. L'absorption "AEI" s'exprime en pourcentage du rapport d'eau par masse du béton sec, elle est donnée par la relation (1)

Le coefficient d'absorption par capillarité "CA_{cap}(t)" à un instant t donné s'exprime par la relation (2), « A » étant la surface de l'éprouvette en contact avec l'eau.

$$AEI = \frac{m_{\text{humide}} - m_{\text{sèche}}}{m_{\text{sèche}}} \times 100 \quad (1) \quad CA_{\text{cap}}(t) = \frac{m - m_i}{A} \times (g/cm^2) \quad (2)$$

En comparant l'absorption totale par immersion des bétons contenant de la baryte en poudre au béton de référence ayant une absorption égale à 4,7% (**Figure IV.3**), observation une diminution de "AEI" d'environ 0,35% pour B1 puis une augmentation progressive avec le taux croissant de baryte pour atteindre 6,24% pour le béton B4. Ce résultat est attendu puisque l'absorption d'eau est liée directement au rapport E/C, qui est plus élevé pour les bétons contenant plus de baryte en poudre.

La (**Figure IV. 4**) permet clairement l'identification de trois phases. La première phase est linéaire, elle s'étend uniquement sur les 8 premières heures. La deuxième phase qui s'étend sur environ les 28 heures suivantes est aussi linéaire mais avec une pente plus faible. La troisième phase est non linéaire, et à la fin de laquelle le coefficient d'absorption tend à se stabiliser. D'après la littérature [57,58], la première phase correspond au remplissage des capillarités les plus larges que l'eau pénètre en premier, les phases suivantes correspondent à la saturation des capillarités plus étroites, l'eau requiert plus de temps pour les remplir. A la fin de l'essai, toutes les capillarités tendent vers la saturation.

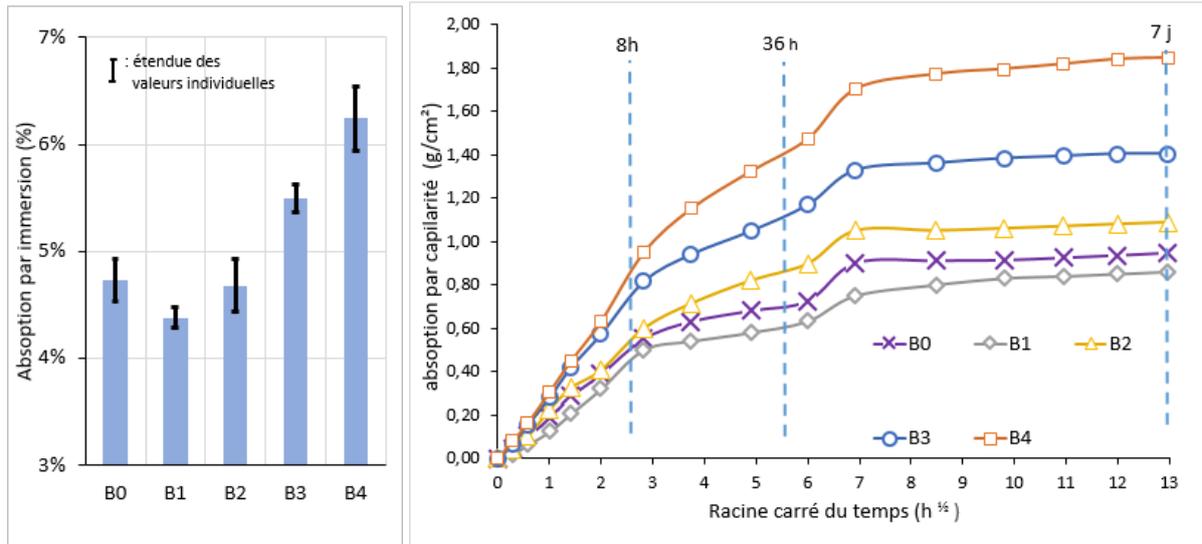


Figure IV.3 : Absorption par immersion [50]. Figure IV.4 : Coefficient d'absorption capillaire

• Carbonatation naturelle et carbonatation accélérée

La carbonatation naturelle évolue par diffusion du CO₂ présent dans l'air ambiant et sous la pression atmosphérique. Après 7 jours de cure humide, deux éprouvettes prismatiques de dimension 7×7×28 cm de chaque béton ont été conservées à l'intérieur puis mesurées au laboratoire à l'âge de 4 mois, 8 mois, 16 mois, 30 mois et 40 mois.

La carbonatation est accélérée par l'élévation du taux du CO₂ et par le maintien des conditions de température et d'humidité favorisant la diffusion au cœur des pièces de béton, ces conditions ont provoqué une profondeur de carbonatation plus prononcée (Figure IV. 5).

Selon la (Figure IV. 6), observation que les allures des courbes de variation des vitesses de carbonatation (naturelle et accélérée) avec le taux de la baryte en poudre dans le béton sont semblables.

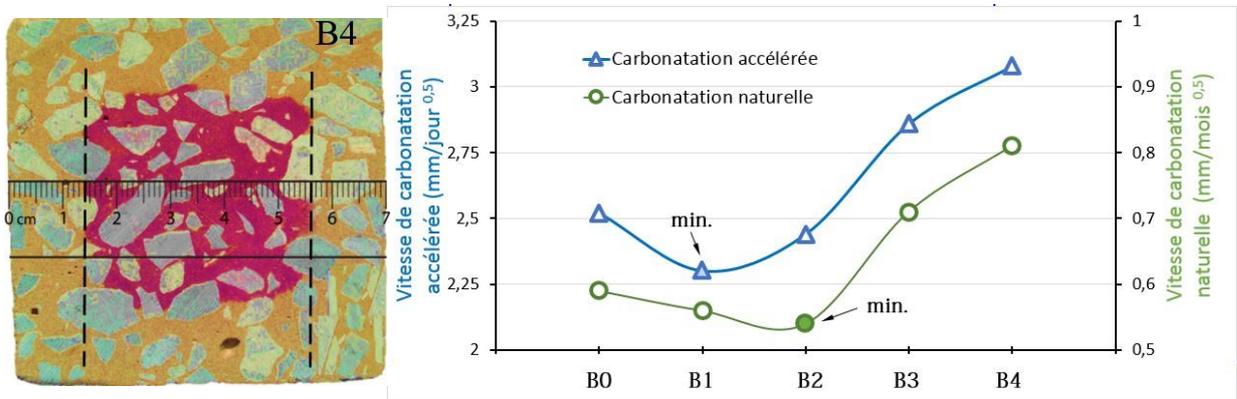


Figure IV. 5 : Mesure de carbonatation Figure IV.6 : Vitesse de carbonatation naturelle et accélérée [50].

• Essai de pénétration des ions chlorure

L’essai consiste à déterminer la conductance électrique du béton pour avoir une indication sur sa résistance à la pénétration des ions chlorure. L’essai a été réalisé selon la norme ASTM C1202-12[59] sur des éprouvettes cylindriques d’épaisseur 50mm et de diamètre 100mm. Les résultats de la perméabilité aux ions chlorures sont reportés dans la (Figure IV.7), les barres d’erreur représentent l’étendue des valeurs individuelles des trois mesures sur les trois éprouvettes de chaque formulation. ils constatent que la charge passante décroît sensiblement puis croît avec le taux de la baryte dans le béton, cependant, elle demeure inférieure à la valeur de 1000 coulomb, ce qui correspond à une très faible pénétrabilité aux ions chlorure. Ces résultats sont en concordance avec les essais d’absorption d’eau et de carbonatation.

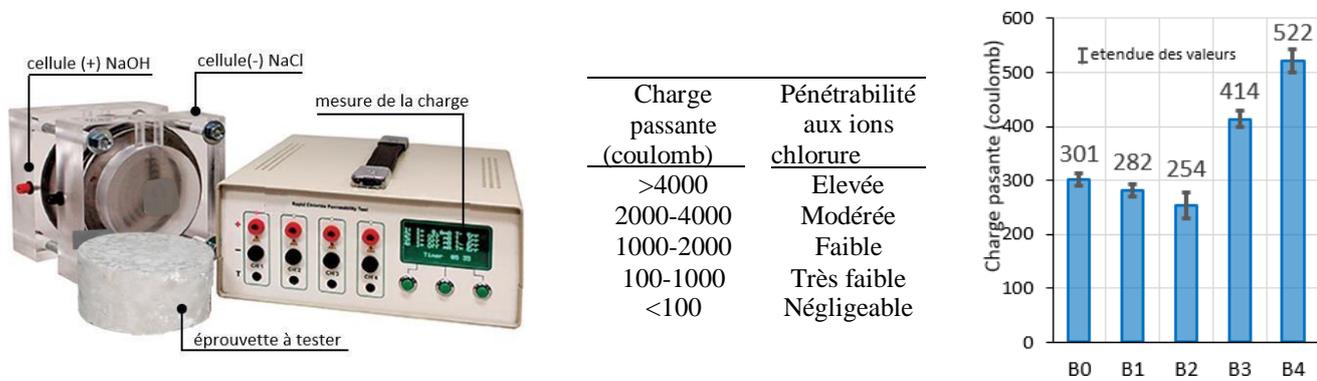


Figure IV.7 : Mesure de la pénétrabilité aux ions chlorure [50].

IV.3.4 Résultats et discussions :

Les résultats d’absorption de carbonatation et de pénétration des ions chlorure montrent l’effet de la baryte en poudre sur l’évolution de la porosité qui gouverne la durabilité du béton. Le maximum des performances est enregistré pour le béton B1 caractérisé par des absorptions plus faibles même que celles du béton de référence. Cependant une dégradation a été enregistrée pour les taux de baryte élevés (B3 et B4) ceci étant en concordance avec la résistance à la compression. D’un côté, l’ajout de la baryte en poudre comble les vides laissés par les autres granulats et par la suite laisserait moins de place pour l’eau inter-granulaire d’où une diminution potentielle de la porosité et de la capillarité. Mais d’un autre côté, cette même poudre nécessite plus d’eau pour être mouillée au moment du gâchage, une partie de cette eau s’évapore laissant plus de vide et de capillarité. Ces deux effets agissant dans des sens contraires expliquent le fait que les performances étudiées des bétons s’améliorent pour un faible taux de baryte (mélange B1) puis diminuent avec des taux plus élevés.

IV.4 Irradiation d'un béton avec des rayons gamma issus d'une source radioactive type ^{60}Co : effet de l'ajout de la baryte sur l'efficacité du blindage [60]

IV.4.1 Introduction

Un blindage est un écran entreposé entre une source radioactive et son environnement immédiat pour le protéger. Pour atténuer les rayons gamma, le béton peut être considéré comme une bonne alternative aux autres matériaux de forte densité couramment utilisés tel que le plomb. Pour améliorer l'efficacité de blindage du béton, plusieurs chercheurs ont étudié la possibilité d'utiliser la baryte comme additif pour améliorer les performances d'atténuation de rayonnement gamma [61]. D'autres études ont montré qu'une telle addition peut affecter négativement les propriétés physiques et mécaniques du béton [62]. Pour la plus part des études antérieures visant à introduire la baryte dans le béton, la substitution concerne à la fois le sable et le gravier qui sont les composants majoritaires du Béton ordinaire. Cependant une telle substitution affecte négativement la résistance Mécanique du béton [63] étant donné que la baryte est plus friable que les granulats calcaires Ordinaires. D'autre part, et vue l'utilisation plus au moins massive de la baryte dans la Construction des blindages de béton, il est de plus en plus rare de trouver des gros calibres Pouvant se substituer au gravier [64]. Dans cette étude il a été envisagé d'introduire la baryte En poudre de calibre (0/607m) en la substituant partiellement ou totalement au sable, Conservant ainsi le squelette de gravier. L'influence de l'ajout de baryte sur les performances Mécaniques du béton a été déjà étudiée par les auteurs de la présente étude et présentée dans Une communication écrite antérieure [65]. L'objectif de l'investigation actuelle, consiste à étudier numériquement et expérimentalement L'effet de l'introduction de la baryte dans la composition du béton sur le pouvoir D'atténuation, la source radioactive utilisée étant le ^{60}Co qui est couramment utilisée dans L'industrie pour la stérilisation et les essais non destructifs, et en médecine pour la Radiothérapie. En partant d'un béton ordinaire, les investigations concernent plusieurs Mélanges en remplacent partiellement ou totalement le sable par la baryte en poudre, tout en Garantissant une résistance mécanique minimale de 25 MPa et un affaissement au cône D'Abrams entre 10 et 12 cm.

IV.4.2 Composition des bétons étudiés

Tableau IV.11 : Composition des formulations retenues [60].

Code	composition en kg/m ³					% massique de baryte	densité
	Ciment	sable	baryte	Gravier	eau		
M0	410	644,84	0	1114,78	212	0	2,31
M1	410	663,28	35	1079,40	213	1,45	2,33
M2	410	445,64	297	1150,18	235	11,7	2,41
M3	410	231,03	539	1203,27	263	20,3	2,46
M4	410	0	700	1309,44	286	25,8	2,48

IV.4.3 Détermination de l'efficacité des blindages

Lorsque des rayonnements traversent un matériau, la dose correspondante décroît d'une façon exponentielle avec l'épaisseur traversée (Equation 1).

$$D = D_0 e^{-\mu x} \quad (\text{Equation 1})$$

Le Code MCNP est un outil numérique utilisé pour modéliser le transport et l'interaction du rayonnement avec les matériaux.

IV.4.4 Résultats et discussion

Tableau IV.12 : Débit de Dose (µSv/h) pour les différents bétons étudiés irradiés par une source de 60Co [60].

Mélange	0 cm		3 cm		6 cm		9,5 cm		15,5 cm	
	Exp	MCNP	Exp	MCNP	Exp	MCNP	Exp	MCNP P	Exp	MCNP
MO	16,4	14,9	11,35	10,73	6,87	7,34	4,05	4,72	1,48	1,77
M1	16,4	14,9	11,33	10,67	6,85	7,29	3,97	4,68	1,44	1,74
M2	16,4	14,9	11,07	10,59	6,71	7,17	3,91	4,53	1,35	1,65
M3	16,4	14,9	10,18	10,52	6,18	7,07	3,71	4,44	1,31	1,58
M4	16,4	14,9	9,85	10,45	5,92	7,04	3,62	4,43	1,28	1,6

Le Tableau IV.12 expose les différentes valeurs de débit de dose mesurées expérimentalement et estimées numériquement. Le coefficient d'atténuation linéaire a été déterminé graphiquement en se basant sur l'équation 1. Les valeurs de débit de dose mesurées expérimentalement et estimées numériquement avec le code MCNP sont en assez concordance. L'écart varie de - 9% à +25%. Ces différences sont dues à la précision des appareils de mesures et aux simplifications apportées à la configuration réelle lors de

la simulation.

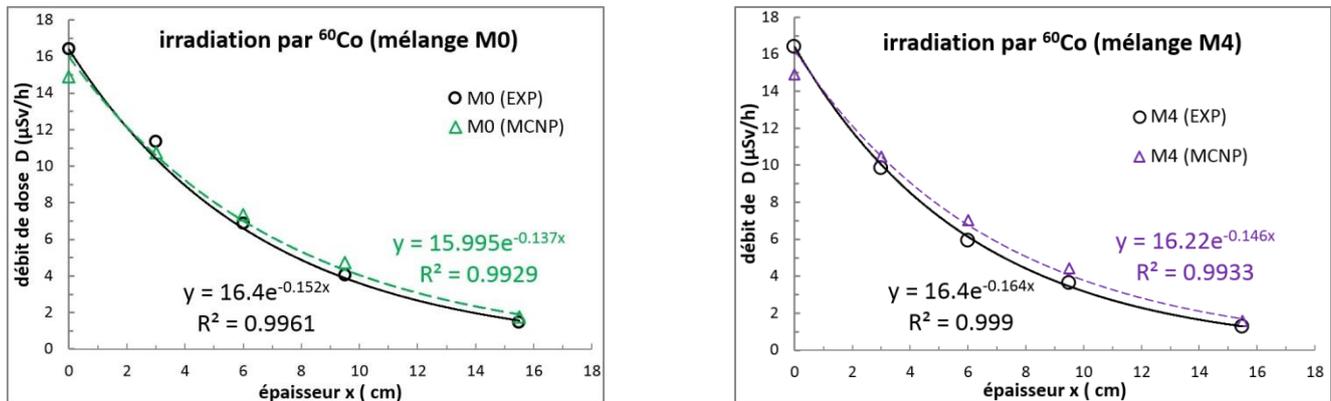


Figure IV 8. Variation du débit de dose en fonction de l'épaisseur [60].

Les courbes de tendances présentées dans la Figure IV 8 sont caractérisées par un coefficient de corrélation $R^2 > 0.98$ ce qui permet d'évaluer avec une précision acceptable le coefficient d'atténuation linéaire.

Tableau IV.13 : Coefficient d'atténuation linéaire [60].

Mélange	μ (cm ⁻¹) Exp	μ (cm ⁻¹) MCNP	$\Delta\mu / \mu_0$ (%) Exp	$\Delta\mu / \mu_0$ (%) MCNP
M0	0,152±0,001	0,137	0,0%	0,0%
M1	0,153±0,001	0,138	0,7%	0,7%
M2	0,157±0,001	0,142	3,3%	3,6%
M3	0,162±0,002	0,145	6,6%	5,8%

Ce tableau IV.13 montre que μ augmente linéairement avec le taux de substitution du sable par la baryte, et par suite avec le pourcentage massique de la baryte. Cette linéarité est issue à la foi des simulations numériques et des essais expérimentaux. La différence entre les valeurs expérimentales et numériques de μ est inférieure à 10 %

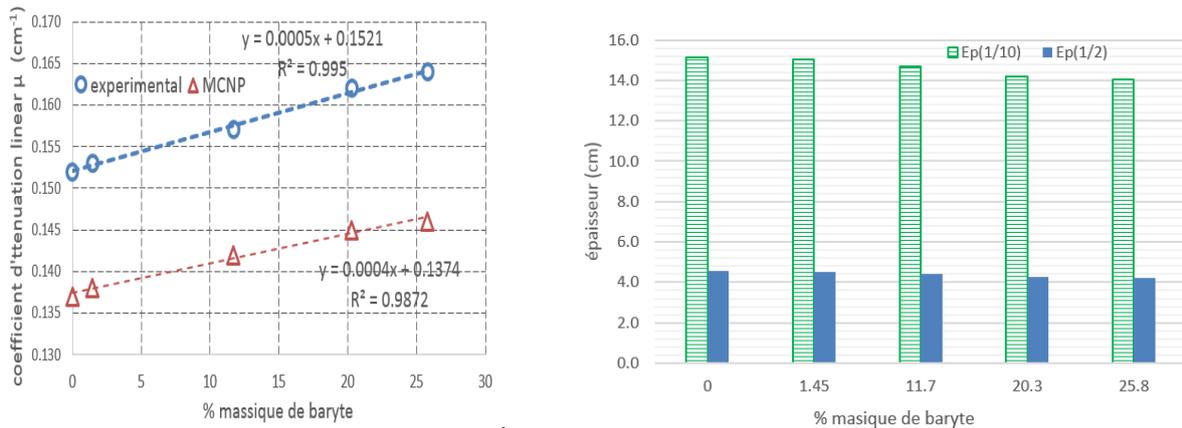


Figure IV. 9:-a-Coefficient d'atténuation linéique ;-b- épaisseurs (1/2) et (1/10) en fonction du taux massique de baryte [60].

A partir des courbes de la **figure IV. 9-a** ils ont déduit la loi empirique de l'équation 3 qui exprime le coefficient d'atténuation $\mu_{(b)}$ d'un béton contenant un ratio massique de baryte (b%) en fonction du coefficient d'atténuation linéaire $\mu_{(0)}$ d'un béton de référence ordinaire sans baryte.

$$\mu_{b\%} = \mu_0 + 0.0005^{\pm 0.0001} \times b(\%) \quad (\text{Equation 3})$$

D'après la **figure IV. 9 -b**, les épaisseurs (1/2) et (1/10) diminuent avec le pourcentage massique de baryte. Pour le mélange M4, l'épaisseur (1/10) est réduite de 1,2 cm, soit une diminution de 8%. Cette réduction a un impact considérable sur les volumes de béton, surtout que dans plusieurs solutions de radioprotection, les blindages en béton ordinaire peuvent avoir des épaisseurs dépassant les 200 cm.

IV.4.5 Discussion

Les auteures de cette étude sur les travaux numériques et expérimentaux ont tirées les conclusions suivantes :

- Le code de calcul MCNP peut être considéré comme un outil adéquat pour évaluer le coefficient d'atténuation linéaire du béton de baryte, l'écart avec les résultats expérimentaux ne dépasse pas 10%, l'utilisation de ce code est donc fortement recommandée pour réduire les doses reçues par le personnel technique, en diminuant le nombre des essais et des mesures lors de la conception des blindages.

-Le coefficient d'atténuation linéaire est proportionnel au pourcentage massique de baryte, il est maximal pour un pourcentage de baryte égale à 25% correspondant à une substitution totale du sable.

-Le remplacement de la totalité du sable d'un béton ordinaire par la baryte en poudre permet de réduire les épaisseurs des écrans de protection de 8 %.

IV.5. Conclusion :

C e présent chapitre à présenter quelques travaux sur l'utilisation de la barytine dans le domaine de la construction, on a exposé les différent résultats obtenue de ces études, leurs discussion ainsi que les conclusions.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Ce travail nous a permis de mettre en valeur l'utilisation des granulats de gisement de baryte de Bou-caïd dans les bétons, qui vont nous donner d'après la bibliographie (à cause de l'absence de la partie expérimentale e raison des circonstances de la covid-19) des bétons lourds (denses) qui sont utilisés comme :

- Contrepoids pour certains ponts basculants et pour des grues.
- Ballast à bord des navires.
- Ecran de radioprotection contre les rayonnements nocifs (rayon X, rayon gamma, rayon de neutrons et faisceaux d'électrons), dans les centrales nucléaires, les salles de radiologie et les entreprises réalisant des irradiations d'aliments.
- Ecran de protection contre les explosions dans les salles antidéflagrantes.

Dans le domaine de Génie civil, La barytine est utilisée dans la confection de bétons lourds et de briques barytées, ayant une masse volumique de 3200 kg/m^3 , permettant la réalisation d'ouvrages de protection contre les radiations (rayons X, rayon gamma et autres rayons radioactifs), ou de culées et de contrepoids. Les plâtres barytés sont aussi utilisés dans la réalisation de parois de protection aux RX.

Notre mémoire comporte quatre volets : **Le premier** présent le matériau béton et ses composants, les différents granulats existants et leurs origines, ainsi que leurs caractéristiques physico mécaniques et chimiques, **le deuxième** présent les granulas lourds et leurs utilisations pour la fabrication du béton lourd, ainsi que ces bétons et leurs utilisation et leur mise en œuvre. **Le troisième** volet, se focalise sur la barytine exploitée par le groupe ENOF précisément l'unité de Bou-caïd est étudiée, dans cette dernière partie nous avons constaté que la barytine est un minéral très important dans le domaine industriel et surtout dans l'industrie pétrolière ainsi que dans l'industrie chimique à cause de ces différentes propriétés (densité, blancheur, absorbance des rayons...etc.).

Le quatrième volet de ce projet présente les résultats et discussions obtenus à partir de différentes recherches effectuée constituant une série d'essais au laboratoire du produit fini avant la commercialisation afin de vérifier leurs caractéristiques et leur conformité aux normes API, et des résultats de certains indices de durabilité de bétons spéciaux de radioprotection contenant de la baryte en poudre à différents taux.

Des résultats d'étude numérique et expérimentale visent à améliorer le pouvoir d'atténuation du béton ordinaire utilisé comme un écran de protection contre les rayonnements gamma

A la fin, notre étude nous a permis de conclure que :

- 1-** il existe très peu d'études sur l'exploitation du minerai de Baryte dans le domaine du Bâtiment et de Génie civil.
- 2-** La barytine est employée dans les bétons denses qui occupent 60% du volume d'un béton standard. Les applications concernent une grande variété d'ouvrages : construction de ports ou de terminaux pétroliers, contrepoids de ponts, stabilisateurs de conduites sous-marines, ballast de bateau.
- 3-** Les briques denses barytées) ainsi que les plaques de plâtre barytées, sont également utilisées pour les mêmes applications de radioprotection, et pour d'autres usages : insonorisant dans la construction, contrepoids pour engins de BTP (culées de grues par exemple, ...).
- 4-** D'autre part, les rejets miniers peuvent faire l'objet de nouveaux gisements pour les générations futures et des réserves considérables ce qui nécessite une mise en valeur de ces rejets miniers par revalorisation et recyclage. Ils peuvent être utilisés pour le remblayage des vides souterrains, comme matériaux de construction (ajout pour béton qui est le cas de notre recherche), ajout dans les produits cimentiers, peinture...etc.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques :

- [1] :W.A. AYADI, A. GUENOUNE : "Valorisation des sables locaux dans la formulation de béton ordinaire", Mémoire de fin d'études, Université de Boumerdes, 2015-2016.
- [2] : CIMBETON : "Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre", Paris, 2006.
- [3] :N.HACHEMI, A. BOUSSA : " Influence des différentes granulométries du sable sur le Comportement mécanique du béton.", Mémoire de master, université de Boumerdes, 2016-2017.
- [4] :C. Avenir, B.R. dir, D. Sommain, "Cement data book", de Walter H. Duda, Ciment naturel ; Grenoble, Gléant, 2007, 176 P.
- [5] :R. Walther .R et M. Miehlabrad, "Dimensionnement des structures en béton", traité de Génie Civil de l'école polytechnique fédérale de Lausanne, 1990.
- [6] : Ir. P. Boeraeve, "Cours de béton armé", 17 Janvier 2010.
- [7] : NF P 18-508 : Additions pour béton hydraulique– Additions calcaires – Spécification et critères de qualité : indice de classement P 18-508.
- [8] :NF P 18-502 : Additions pour béton hydraulique_ Fumée de silice : indice de classement P 18-502.
- [9] :W. AISSAOUI, "Etude expérimentale des propriétés mécaniques des bétons élaborés à base de granulats en caoutchouc", Mémoire de master, université de 8 Mai 1945 Guelma, 2018.
- [10] : Ciment et bétons, Collection technique CIMbéton G11, Amprincipe Paris, Edition 2005.
- [11] :T.L.H. NGUYEN : "Outils pour la modélisation de la mise en œuvre des bétons", Thèse de Doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées, 139 p, 2007.
- [12] :A. CHAREF, "La problématique des granulats au Maroc", Push-Button Publishing, 2007.
- [13] :M.A. SIDI, H. BOUKLI, "Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen", Thèse de Doctorat, Université de ABOU BEKR BELKAID-TLEMEN, 200 p, 2009.
- [14] : « Caractéristiques et types de granulats », INFO CIMENTS, Article publiée par PATRICK GUIRAUD en Février 2018.
- [15] :J. BARON, J.P. OLIVIER, "la durabilité des bétons", presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1995.

Références Bibliographiques

- [16] :R. MAILLOT," Mémento technique des granulats", les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 166 p, 2001.
- [17] : les granulats, Por correio : Etudier, 523 W. 6th Street Suite 1234, Los Angeles, CA 90014.
- [18] : L. BERREDJEM, « le recyclage des bétons de démolition, solution pour le développement durable. Formulation et comportement physiques et mécaniques des bétons à base de ces recyclés », Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar- Annaba (2009).
- [19] : Norme française EN 933-3, " Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 3 : Détermination de la forme des granulats – coefficient d'aplatissement", AFNOR, 1996.
- [20] : S. ALIOUA, Y. HAMZA, « l'étude du comportement physico-mécanique du béton ordinaire, béton adjuvante (SP) et du béton avec des fillers calcaires avec différents dosage en ciment », Mémoire de fin d'étude, Université Abderrahmane Mira Bejaia(2016/2017).
- [21] : Norme Française P 18 554, " Granulats- Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux", 1990.
- [22] : Norme Française EN 1097-3, " Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats- Partie 3 : Détermination de la Masse volumique apparente", AFNOR, 1996.
- [23] : S. HACHAICHI, "Substitution de Sable roulé par les déchets de carrières et de hauts fourneaux dans le béton", Mémoire de Magister, 92 p, 2008.
- [24] : A. M. NEVILLE, " Propriétés des béton", traduits par le CRIB, Edition Eyrolles, 806 p, 2000.
- [25] : Cours de MDC : « LES GRANULATS », Université De Sétif, (2015/2016).
- [26] : « Les constituants des bétons et des mortiers ; chapitre 2 : les granulats pour béton » cours de béton publiée par Oussama Siad, (15May 2017).
- [27] : S. BRUNOS : « Etude des mouvements d'eau dans les matériaux poreux appliquée à la résistance au gel et au comportement des crépis sur la maçonnerie. » Thèse No 848 (1990). Département des matériaux. Ecole Polytechnique Fédérale de LAUSANNE pour l'obtention du grade de docteur en science techniques.
- [28] : Norme Française EN 1097-3, " Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats- Partie 3 : Détermination de la Masse volumique apparente", AFNOR, 1996..

Références Bibliographiques

[29]: F. AHMED "Conception d'un béton destine aux ouvrages hydrotechniques" Mémoire de Master en Aménagement des Ouvrages Hydrotechniques, école nationale supérieure d'hydraulique- ARBAOUI Abdellah- (Avril 2015).

[30] : DREUX. G : « Nouveau guide du béton », Edition Eyrolles, 2^{ème} édition, 1979.

[31] : Pr. GHOMARI Fouad, Cours de (Matériaux de Construction), université aboubker belkaid ; faculté de technologie, département de génie civil, (Septembre 2014).

[32] :K. KERROUM, A.MELLAH, " Plan d'exploitation du gisement de baryte de djebel Ichemoul", Mémoire Master en Mines université Abderrahmane Mira de Bejaia (2017).

[33] : H. ZOUAOUI, A. ROUMMANI, " Etude d'influences des impuretés sur la qualité de la baryte, cas de la mine d'Ain Mimoun-Khenchela", Mémoire Master en Mines larbi tebessi-Tébessa (2016).

[34] :ALBOUY, L., ROUSSEAU, Ch., 1993, *Mémento roches et minéraux industriels*, La barytine, BRGM.

[35] :T.BATOUCHE, I.ABBASSI, " Calcul qualitatif quantitatif d'un nouveau schéma de traitement du minerai barytique de Ain Mimoun khenchela ",Mémoire Master en mines, Université larbitebessi-Tébessa (2015/2016).

[36] :A. GUECEB, " Méthode de traitement de la baryte de l'unité de Bou-caid (Tissemsilt)", Rapport de soutenance en Génie de la Formulation, université Akli Mohand Oulhadj-Bouira (2017/2018).

[37] : Mémento roche et minéraux industriel rapport BRGM R37775 DMM-RMI-93 de la barytine-(page 06).

[38] :G. Samira, "La production de baryte en constante augmentation Somibar", (groupe ENOF), Article publié dans le Maghreb le 29-07-2010.

[39]: USGS; United States Geological Survey (janvier 2015).

[40] : H. Lakhdhar, S. Mouhamed et L. Slimene, "Rapport de stage SOMIBAR Bou-caid" 4^{émé} année mines école nationale polytechnique d'Alger, 2012.

[41]: A. Hadjiev, P. Hadjiev and R. Georgiev, A.D. Kremikovtzi AD, "INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PROCESSING OF FINES (PROF-2000), NML JAMSHEDPUR, INDIA, 2000". FLOTATION OF BARITE FROM COMPLEX IRONORE.

Références Bibliographiques

- [42] : Hermann, Kurt, « les bétons lourds », Bulletin du ciment, 64,1996,12,pp 3-7 (article).
- [43] : MARTEAU Pascal, coup d'œil sur le marché mondial de la barytine. Importance de l'usage dans l'activité de forages d'hydrocarbures. Eco note-ECOMINE, 2009.
- [44] : extrait du GRAND GUIDE DE LA MACONNERIE « les bétons lourds », par bruno caillard, le mardi 11 avril 2017.
- [45] : Fiche d'information minérale (Granulats denses) par Consortium de recherche en exploration minérale (CONSOREM), Saguenay—Lac-Saint-Jean (mars 2016).
- [46] : MERN, 2013. Les mines, Barytine : propriétés, usages et types de gisement Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles Québec
- [47] : Micrex Development Corp,2011. St.Charles de Bourget Deposit, Near Saguenay, Québec,NI 43-101 Report, Magnetic Survey Map [En ligne]
- [48] : MERN, 2013a. Gros plan sur la Côte-Nord, Indices ou gisements de minéraux industriels sur la Côte-Nord. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles Québec [En ligne].
- [49]: Foucault, A., Raoult, J.-F., 2010. Dictionnaire de géologie, Collections : UniverSciences, Sciences de la terre, 7e édition, Paris : Dunod, 388 pages.
- [50]: Saidani, L. Ajam, et M. Benouezdou, “ Effets de la baryte en poudre sur la durabilité d'un béton hydraulique ”, Journées nationale du Béton : JNB'17 Hammamet- Tunisie, 5-7 mai 2017
- [51]: Akkurt, I., Basyigit, C., Kilincarslan, S., Mavi, B. et Akkurt, A., Radiation shielding of concretes containing different aggregates, Cement and Concrete Composites, 28 (2006), p. 153–157.
- [52]: Gonzalez-Ortega, M. A., Cavalaro, S. H. P. et Aguado, A., Influence of barite aggregate friability on mixing process and mechanical properties of concrete, Construction and Building Materials, 74 (2015), p. 169–175.
- [53]: Bouhlel, S., Les ressources en plomb, zinc, fer, argent, cuivre, or , barytine, fluorine et célestite de la Tunisie : un bilan de 117 ans de recherches, d'explorations et d'exploitations, in XVII èmes Journées Nationales de la SSNT Hammamet 3-6 Novembre, 2007
- [54]: Gallala, W., Hayouni, W. Gaied, M.E., Fusco, M., Alsaied, J., Bailey, K. , Bourham, M., Mechanical and radiation shielding properties of mortars with additive fine aggregate mine waste, Annals of Nuclear Energy, In Press, Available online 23 November 2016, ISSN 0306-4549

Références Bibliographiques

- [55]: Saidani, L. Ajam, and M. Benouezdou: "Barite powder as sand substitution in concrete: Effect on some mechanical properties" *Construction and Building Materials* 95 (2015) 287–295
- [56]: NT 21.113, Béton détermination de la résistance à la compression des éprouvettes, 1990, norme tunisienne, INORPI, 1990
- [57]: Akrou-Mefteh, K., étude de l'effet des sables calcaires sur la durabilité des bétons, Thèse doctorat, Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis, 2011. (Cité à la page 122.
- [58]: Rabehi, M., Mezghiche, B. et Guettala S., Correlation between initial absorption of the cover concrete, the compressive strength and carbonation depth, *Construction and Building Materials* 45 (2013) 123–129
- [59]: ASTM C1202-12, Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, norme américaine, ASTM, 2012
- [60]: Saidani K., Ajam L., Bergeoui K., Reguigui N et M. Benouezdou ,2015, Irradiation d'un béton avec des rayons gamma issus d'une source radioactive type ^{60}Co : effet de l'ajout de la baryte sur l'efficacité du blindage, Journées Nationales De Béton : JNB'15; Hammamet – tunisie
- [61]: Akkurt I., Akyildirim H., Mavi B., Kilincarslan S. and Basyigit C., 2010. Gamma-ray shielding properties of concrete including barite at different energies, *Progress in Nuclear Energy*, 52, pp. 620-623.
- [62]: Kharita MH., Takeyeddin M., Alnassar M.and Yousef S., 2008. Development of special radiation shielding concretes using natural local materials and evaluation of their shielding characteristics, *Progress in Nuclear Energy*, 50, pp. 33-36.
- [63]: Yüksel E. andBerivan Y., 2010. Investigation of some physical and mechanical properties of concrete produced with barite aggregate. *Scientific Research and Essays*, 5, pp. 3826-3833.
- [64]: Kilincarslan S., akkurt I. andbasyigit C.,2006. The effect of barite rate on some physical and mechanical properties of concrete. *Materials science and engineering*, A424 (1-2), pp. 83-86.
- [65]: Saidani K., Ajam L., Bergeoui K., and Reguigui N., 2013. Formulation d'un béton spécial de Radioprotection : effets sur les propriétés physico-mécaniques et sur l'atténuation neutrons- gamma. Journées Nationales De Béton : JNB'13; Hammamet – Tunisie, LGC-ENIT, pp. 68-73.

Les Normes :

[EN -197-1] : (2000) Ciment- partie 1 : composition, spécification et critères de conformité des ciments courants.

[NF EN 196-1] : (avril 2006) Méthodes d'essai des ciments- partie 1 : détermination des résistances mécaniques, Paris.

[SN EN 1008] : Eau additive pour béton- Spécifications pour l'échantillonnage, les essais et l'évaluation de l'adéquation de l'eau, y compris l'eau qui se produit pendant la production du béton, comme eau additive pour le béton.

[XP P 18-540] : AFNOR, (octobre 1997) Granulats- définition, conformité, spécification (indice de classement P18-540).

[NF EN 933-3] : Détermination de la forme des granulats. Coefficient d'aplatissement.

[NF P 18 554] : Norme française, (Décembre 1990) ; Granulats – Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux – GRANULATE.

[NF P 18 555] : Norme française, (1990) ; Granulats – Mesures des Masses Volumiques, Coefficient d'Absorption et Teneur en Eau des Sables, Editions AFNOR, Paris.

[EN 1097-3] : Détermination de la masse volumique en vrac et porosité inter granulaire.

[NF P 18-572] : Norme française, (Décembre 1990) ; Granulats – Essai d'usure MICRO-DEVAL – GRANULATE.

[NF P 18-573] : Norme française, (1990) ; Granulats, essais Los Angeles AFNOR, Paris.

[NF P18-591] : Norme française XP p18-591, "Granulats-détermination de la propreté superficielles", AFNOR, (1996).

ISO 9001 version 2000 : Version Française, cette norme internationale spécifie les exigences relatives au système de management de la qualité pour les organismes souhaitant améliorer en permanence la satisfaction de leurs clients et fournir des produits et services conformes.