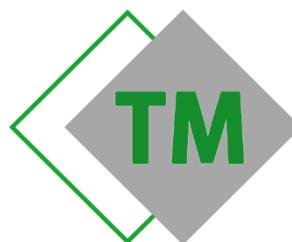




المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



École Nationale Polytechnique

Entreprise TIMGAD MARBRE

Département de Génie Civil

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Civil

Valorisation des déchets de marbre et de granite de l'entreprise Timgad Marbre dans les bétons

Présenté par :

ABDELLAOUI Abdelhak
ABIZA Yaakoub

Encadré par :

Mme. K. DERAMCHI, Pr.
Mme. S. BENTAALLA, M.C.B
Mr. A. SAIB, D.G . T.M

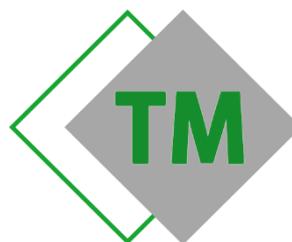
Présenté et soutenu publiquement le 10 Septembre 2020

Composition du Jury

Président :	Mr. A. BALI	Pr. ENP
Encadreurs :	Mme. K. DERAMCHI	Pr. ENP
	Mme. S. BENTAALLA	M.C.B. ENP
Encadreur entreprise :	Mr. A. SAIB	D.G . T.M
Examineurs :	Mme. R. KETTAB	Pr. ENP
	Mr. A. LARIBI	M.C.B. ENP



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



École Nationale Polytechnique

Entreprise TIMGAD MARBRE

Département de Génie Civil

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Civil

Valorisation des déchets de marbre et de granite de l'entreprise Timgad Marbre dans les bétons

Présenté par :

ABDELLAOUI Abdelhak
ABIZA Yaakoub

Encadré par :

Mme. K. DERAMCHI, Pr.
Mme. S. BENTAALLA, M.C.B
Mr. A. SAIB, D.G . T.M

Présenté et soutenu publiquement le 10 Septembre 2020

Composition du Jury

Président :	Mr. A. BALI	Pr. ENP
Encadreurs :	Mme. K. DERAMCHI	Pr. ENP
	Mme. S. BENTAALLA	M.C.B. ENP
Encadreur entreprise :	Mr. A. SAIB	D.G . T.M
Examineurs :	Mme. R. KETTAB	Pr. ENP
	Mr. A. LARIBI	M.C.B. ENP

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تحديد إمكانية تقيم النفايات الصناعية لمؤسسة تيمقاد للرخام المتمثلة في مسحوق الرخام ومسحوق الجرانيت في الخرسانة، هذا من اجل الحفاظ على البيئة ومحاربة الاضرار الناجمة عنها باستعمالنا لهذين المسحوقين كل على حدى في تركيبة الخرسانة، وتحديد كجزء من الاسمنت، قمنا بإجراء عدة تجارب حول الصلابة، حيث تمكنا من الحصول على نتائج جد مقبولة مما دفعنا الى عرض إمكانية الاستثمار في هذين المسحوقين.

الكلمات المفتاحية: النفاية الصناعية، التثمين، مسحوق الرخام، مسحوق الجرافيت، الخرسانة،

Abstract

The objective of this study is to find a way to give the industrial wastes such as marble powder and granite powder that generated by the company TIMGAD Marbre a value for more protection for the environment against the pollution, which results from these wastes.

The granite and marble powder were used separately as a cementitious additive; these powders were added to the concrete formulation, and followed to a series of tests for its mechanical strength concluded with acceptable results, which gave us a way to introduce a technico-economique study.

Key words: industrial wastes, valorization, marble powder, granite powder, concrete.

Résumé

Le but de ce travail est d'étudier la possibilité de valoriser des déchets industriels, en l'occurrence, la poudre de marbre et la poudre de granite, générés par la société TIMGAD Marbre, et ceci dans l'objectif de protéger l'environnement et lutter contre la pollution qui résulte de ces déchets.

On a utilisé séparément la poudre de marbre et de granite comme substituant partiel du ciment. On a introduit ces poudres dans une formulation de béton et suite à une série d'essais sur la résistance mécanique, nous avons trouvé des résultats acceptables, ce qui nous a incité à faire une étude technico-économique.

Mots clés : déchets industriels, valorisation, poudre de marbre, poudre de granite, béton.

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions **Allah** tout puissant pour nous avoir donné le privilège d'étudier et de suivre le chemin de la science et pour sa bénédiction.

Ensuite, nous remercions nos parents qui nous ont beaucoup soutenus pendant toute la vie et qui, que Dieu leur prête longue vie, continueront à nous aider dans tous les projets de l'avenir. Ainsi que tous les membres de nos familles qui ont participé de près ou de loin à nous encourager et à nous aider dans notre projet.

Nos sincères remerciements vont à nos promotrices Madame **BENTAALLA** et Madame **DERAMCHI**.

Elles nous ont fait un grand honneur en acceptant de nous confier ce travail. Nous les remercions de leur patience, de leur rigueur, de leur disponibilité, de leurs encouragements et de leurs précieux conseils qui nous ont permis la réalisation de ce travail dans les meilleures conditions.

Nos vifs remerciements vont à Monsieur **BALI** de l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de présider notre jury.

Nous remercions, également, Messieurs **LARIBI** et Madame **KETTAB** pour l'intérêt qu'ils ont accordé à ce travail en acceptant de l'examiner.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à Monsieur **SAIB** et Monsieur **HADDOUCHE**, les responsables de la société TIMGAD Marbre pour leur disponibilité.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude à l'ingénieur de laboratoire du département Génie Civil, Madame **SAKHRI**, ainsi qu'à toutes et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale	12
Chapitre I :Généralités	15
I.1. INTRODUCTION.....	16
I.2. GENERALITES SUR LES BETONS ET SES CONSTITUANTS	16
I.2.1. Ciments.....	16
I.2.2. L'eau	21
I.2.3. Les granulats	22
I.2.4. Les adjuvants	24
I.2.5. Les additions minérales	25
I.2.6. Le béton.....	28
I.3. LE GRANITE.....	33
I.4. LE MARBRE.....	35
I.5. GESTION DES DECHETS SOLIDES	36
I.5.1. Généralités sur les déchets	36
I.5.2. Définition d'un déchet.....	36
I.5.3. Cadre légal et réglementaire des déchets	37
I.5.4. Aspects qualitatifs et quantitatifs	37
I.5.5. Les principales catégories des déchets	38
I.5.6. Stratégie de de gestion et filières de traitement.....	39
I.5.7. Stratégies de gestion des déchets	40
I.5.8. Traitement interne et traitement externe	41
I.5.9. Filières de traitement des déchets	41
I.5.10. Filières d'élimination des déchets.....	42
I.6. PRESENTATION DE L'ENTREPRISE TIMAGAD MARBRE	44
I.6.1. Localisation.....	44
I.6.2. Données administratives	45
I.6.3. Historique.....	45
I.6.4. L'organigramme de la société TIMGAD Marbre.....	45
I.6.5. Diagramme de fabrication.....	46
I.6.6. Procèdes de traitement de marbre et de granite.....	46
I.6.7. Procédé de traitement des eaux usées issues du procédé de traitement de marbre et de granite	46
I.6.8. Déchets solides et liquide	46

I.7.	VALORISATION DE L'AJOUT POUVRE DE MARBRE ET GRANITE DANS LES BETONS.....	48
I.8.	CONCLUSION	48
Chapitre II : Caractérisation des matériaux et méthode d'essais		49
II.1.	INTRDUCTION.....	50
II.2.	CARACTERISTIQUES DES DECHETS UTILISES	50
II.2.1.	Analyse chimique.....	50
II.2.2.	Détermination de la finesse par méthode de Blain	51
II.2.3.	Analyse granulométrique	51
II.3.	LES MATERIAUX UTILISE	52
II.3.1.	Granulats	52
II.3.2.	Ciment.....	52
II.3.3.	Eau de Gâchage	52
II.4.	CARACTERISATION ET CHOIX DES GRANULATS	53
II.4.1.	Echantillonnage et prélèvement	53
II.4.2.	Analyse granulométrique	53
II.4.3.	Essai d'équivalent de sable	54
II.4.4.	Module de finesse	55
II.4.5.	Masse volumique apparente.....	56
II.4.6.	Masse volumique absolue	56
II.4.7.	Absorption d'eau	56
II.4.8.	La Porosité	57
II.4.9.	La teneur en eau	57
II.4.10.	Essai Los Angeles	57
II.5.	METHODES D'ANALYSES ET DES ESSAIS	58
II.5.1.	Formulation du béton (Méthode de Dreux Gorisse).....	58
II.5.2.	Les données de base et les conditions générales.....	58
II.5.3.	Dosage en ciment et en eau.....	59
II.5.4.	Détermination des pourcentages des agrégats.....	60
II.5.5.	Composition pondérale des constituants.....	61
II.5.6.	Incorporation du déchet.....	63
II.5.7.	Modalité des essais	63
II.6.	CONCLUSION	65
Chapitre III : Résultats et interprétations		66
III.1.	INTRODUCTION.....	67
III.2.	ESSAIS SUR BETON FRAIS	67
III.2.1.	Affaissement au cône d'Abrams	67

III.2.2. La masse volumique	68
III.3. ESSAIS SUR BETON DURCI	69
III.3.1. La masse volumique du béton durci	69
III.3.2. La résistance à la compression	71
III.3.3. La résistance à la traction par fendage (ou essai brésilien)	73
III.4. ETUDE COMPARATIF	75
III.5. CONCLUSION	76
Chapitre IV : Etude Technico- Economique	77
IV.1. INTRODUCTION	78
IV.2. IMPLANTATION D'UNE CENTRALE A BETON	78
IV.2.1. Description de projet	78
IV.2.2. Incorporation de notre déchet dans la centrale à béton	79
IV.2.3. Etude de marché	80
IV.2.4. Etude de faisabilité financière	82
IV.2.5. Estimation des risques	86
IV.3. COMMERCIALISER LES DECHETS COMME POUDRE	86
IV.3.1. Introduction	86
IV.3.2. La poudre du marbre	87
IV.3.3. La poudre de granite	87
IV.3.4. Etude de faisabilité	87
IV.3.5. L'étude de marché	88
IV.3.6. Estimation du coût	88
IV.3.7. Energie et emballage	89
IV.3.8. Salaire des travailleurs	89
IV.3.9. Estimation des ventes	89
IV.3.10. Estimation des revenus nets	89
IV.3.11. Estimation des risques	90
IV.4. PLAN D'AMORTISSEMENT	90
IV.4.1. Définition d'un amortissement	90
IV.4.2. Objectif d'un plan d'amortissement	90
IV.4.3. Le taux d'amortissement	90
IV.4.4. Dotation aux amortissements	90
IV.4.5. La Valeur Nette d'Amortissement VNA	90
IV.4.6. Plan d'amortissement pour la centrale à béton.....	90
IV.4.7. Plan d'amortissement concernant la commercialisation des déchets	92
IV.5. CONCLUSION	93

Chapitre V : Etude de l'impact environnemental	94
V.1. INTRODUCTION	95
V.2. DESCRIPTION DU SITE	95
V.2.1. Coordonnées géographiques	95
V.2.2. Données climatologiques	96
V.2.3. Géologie et hydrogéologie	97
V.3. REGLEMENTATION	98
V.3.1. Cadre général	98
V.3.2. Cadre de gestion des déchets	98
V.3.3. Cadre de gestion du transport des déchets	98
V.3.4. Cadre de gestion des déchets atmosphériques	98
V.4. ETUDE SUR LES POUSSIÈRES EMISES PAR LA SOCIÉTÉ TIMGAD Marbre	99
V.4.1. Origine et taille	99
V.4.2. Estimation des émissions :	99
V.4.3. Etude de la dispersion atmosphérique des déchets de la société TIMGAD Marbre	100
V.4.4 Les risques des poussières.....	100
V.4.5. Mesures liées à l'émission des poussières	102
V.5. LA DECHARGE	102
V.5.1. Introduction	102
V.5.2. Politique d'élimination des déchets	102
V.5.3. Classification et mode de déchargement des déchets de la société TIMGAD Marbre	102
V.6. CONCLUSION	104
Cocnlusion générale	107
Références Bibliographie	107

Liste des figures

Figure I.1 : Fabrication du ciment	19
Figure I.2 : Désignations des ciments courants	20
Figure I.2 : Désignations des ciments courants	20
Figure I.3 : Surface spécifique des additions en comparaison avec le ciment	26
Figure I.4 : Micrographie de cendres volantes au microscope électronique à balayage. Grossissement 1000.....	27
Figure I.5 : Poudre de fumée de silice.....	27
Figure I.6 : Proportions pondérales des composants du béton (% en masse)	28
Figure I.7 : Proportions volumique des composants du béton (% volume)	29
Figure I.8 : Représentation schématique de l'évolution dans le temps des phases hydratées et de la structure.	30
Figure I.9 : Phases de passage du béton frais au béton durci	32
Figure I.10 : Photo montrant le granite dans la nature	35
Figure I.11 : Relation producteurs - consommateurs	40
Figure I.12 : Stratégie de gestion des déchets	41
Figure I.13 : Différents traitements possibles pour éliminer les déchets	44
Figure I.14 : L'organigramme de la société TIMGAD Marbre	45
Figure I.15 : Diagramme de fabrication	46
Figure I.16 : Bous sèches du marbre	47
Figure I.17 : Bous sèches du granite	47
Figure I.18 : pâte de granite	47
Figure I.19 : pâte de marbre	47
Figure II.1 : Représentation de la composition chimique des déchets	50
Figure II.2 : Représentation de la granulométrie des déchets	51
Figure II.3 : la courbe granulométrique	54
Figure II.4 : L'abaque du dosage en ciment	59
Figure II.5 : les courbes granulométriques et courbe de référence	60
Figure II.6 : schéma représentent l'ordre d'incorporation des différents matériaux.....	62
Figure II.7 : Photo du cône d'Abrams.....	63
Figure II.8 : Essais d'écrasement en compression simple.....	63
Figure II.9 : Essai de traction par fendage	64
Figure III.1 : Evolution de l'affaissement en fonction du pourcentage de déchet de marbre ..	66
Figure III.2 : Evolution de l'affaissement en fonction du pourcentage de déchet de granite ..	67
Figure III.3 : Evolution de la masse volumique du béton frais en fonction du pourcentage de déchet	68
Figure III.4 : Evolution de la masse volumique du béton durci en fonction du pourcentage de déchet	69
Figure III.5 : Evolution de la masse volumique du béton durci en fonction du pourcentage de déchet de granite.....	70
Figure III.6 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de déchet de marbre	71
Figure III.7 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de déchet de granite.....	72

Figure III.8 : Evolution de la résistance à la traction en fonction du pourcentage de déchet de marbre.....	73
Figure III.9 : Evolution de la résistance à la traction en fonction du pourcentage de déchet de granite.....	74
Figure IV.1 : Propositions pour investir concernant les deux déchets.....	77
Figure IV.2 : Représentation des déferents composants de la centrale à béton.....	78
Figure IV.3 : Incorporation de déchet dans la centrale.....	79
Figure IV.4 : Centrale à béton HN1.5 de 80m ³ /h.....	81
Figure IV.5 : Camion malaxeur AM 9 C.....	82
Figure IV.6 : Etuve de séchage de capacité 424 litres.....	82
Figure IV.7 : Broyeur série XZM221.....	83
Figure IV.8 : Les taches essentielles pour la commercialisation des poudres.....	86
Figure IV.9 : La perte du cout pendant la durée de vie de la centrale à béton.....	90
Figure IV.10 : La perte du cout pendant la durée de vie de matériels de commercialisation ..	91
Figure V.1 : Présentation de la zone d'étude.....	94
Figure V.2 : Rose des vents région d'Alger.....	95
Figure V.3 : Profil de concentration en polluant.....	99
Figure V.4 : Carte de concentration atmosphérique moyenne annuelle.....	100
Figure V.5 : Mode d'élimination des déchets en Algérie.....	101
Figure V.6 : Représentation de rayon de sécurité.....	102

Liste des tableaux

Tableau I.1 : La Compositions chimiques usuelles des matières premières et du cru	18
Tableau I.2 : Classes de résistance du béton	31
Tableau I.3 : La composition chimique moyenne du granite	34
Tableau I.4: Différents types de déchets	39
Tableau I.5 : Filières de traitement des déchets	42
Tableau I.6 : Nature et quantité des déchets de l'entreprise TIMGAD MARBRE	47
Tableau II.1 : Analyse chimique	50
Tableau II.2 : La finesse par méthode de Blain et la masse volumique	51
Tableau II.3 : Analyse granulométrique des déchets	51
Tableau II.4: Analyse granulométriques des granulats	54
Tableau II.5 : Les résultats de l'essai équivalent de sable	55
Tableau II.6 : Les pourcentages du poids du refus cumulé	55
Tableau II.7 : Résultats de l'essai de la masse volumique apparente	56
Tableau II.8 : Résultats de l'essai de la masse volumique absolue	56
Tableau II.9: Résultats de l'essai d'absorption d'eau	57
Tableau II.10: Résultats de l'essai de la porosité	57
Tableau II.11: Résultats de l'essai de la teneur en eau	57
Tableau II.12: Résultats de l'essai de Los Angeles	58
Tableau II.13: Les données de base et les caractéristiques de nos matériaux	59
Tableau II.14: les valeurs de coefficient granulaire selon la qualité des granulats	60
Tableau II.15: les pourcentages des agrégats	61
Tableau II.16: les volumes des constituants	62
Tableau II.17: Dosages pondérales des constituants	62
Tableau III.1 : Mesure de l'affaissement pour chaque pourcentage de déchet de marbre	67
Tableau III.2 : Mesure de l'affaissement pour chaque pourcentage de déchet de granite	68
Tableau III.3 : La masse volumique du béton frais en poudre de marbre	69
Tableau III.4 : masse volumique du béton durci à différents pourcentages de déchet de marbre	70
Tableau III.5 : masse volumique du béton durci à différents pourcentages de déchet de granite	70
Tableau III.6 : La résistance à la compression du béton à 28 jours à différents pourcentages de déchet de marbre	71
Tableau III.7 : La résistance à la compression du béton à 28 jours à différents pourcentages de déchet de granite	72
Tableau III.8 : La résistance à la traction par fendage à 28 jours à différents pourcentages de déchet de marbre	73
Tableau III.9 : La résistance à la traction par flexion à 28 jours à différents pourcentages de déchet de granite	74
Tableau III.10 : comparaison entre la poudre de marbre et la poudre de granite en termes d'ajout dans le béton	75
Tableau IV.1 : Analyse des concurrentes dans le marché de fabrication de béton prêt à l'emploi	81
Tableau IV.2 : Caractéristiques des déférentes centrales à béton série HN	82
Tableau IV.3 : Caractéristiques des camions malaxeur	83
Tableau IV.4 : Caractéristiques des broyeurs de série XZM	84

Tableau IV.5 : Estimation du cout de matériels	84
Tableau IV.6 : Estimation de cout pour les matières premières.....	85
Tableau IV.7 : Salaires des travailleurs.....	85
Tableau IV.8 : Estimation des revenus.....	86
Tableau IV.9 : Analyse des concurrents.....	88
Tableau IV.10 : Estimation du coût des machines	88
Tableau IV.11 : Estimation de consommation concernant l'énergie et l'emballage	89
Tableau IV.12 : Salaire des travailleurs	89
Tableau IV.13 : Estimation des ventes.....	89
Tableau IV.14 : Durée de vie des immobilisations	91
Tableau IV.15 : Plan d'amortissement linéaire.....	91
Tableau IV.16 : Plan d'amortissement linéaire pour la commercialisation	92
Tableau V.1 : La variation de la précipitation et les températures maximales et minimales moyenne de l'année 2016.....	96
Tableau V.2 : Vitesse du vent selon la direction.....	97
Tableau V.3 : Pénétration des poussières.....	99

Introduction générale

Introduction générale

Devant les besoins croissants des ressources en matériaux et afin de répondre aux exigences de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et d'étudier toutes les possibilités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous-produits industriels, notamment dans le domaine de Génie Civil.

Les contraintes d'ordre économique et écologique de ces dernières années ont rendu nécessaire la valorisation et le recyclage des déchets. Le besoin universel de conserver les ressources, de protéger l'environnement et de bien utiliser l'énergie doit nécessairement se faire ressentir dans le domaine de la technologie du béton. Par conséquent, on accordera beaucoup d'importance à l'usage de déchets et de sous-produits pour la fabrication du ciment, mortier et du béton.

Les déchets constituent un réel problème, inévitable à toute vie biologique et à toute activité industrielle. Le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement.

La valorisation a deux conséquences écologiques bénéfiques :

- La réduction du volume de déchets.
- La préservation des ressources naturelles.

Face à la gravité des problèmes environnementaux due à la surexploitation des ressources, le gouvernement Algérien a décidé de consacrer une enveloppe financière importante, pour atteindre les objectifs inscrits dans le Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD).

L'industrie pose de nombreux problèmes à la mise en décharge des déchets des matériaux (impact sur l'environnement, la place occupée par les sites de stockage,.....).

Actuellement, l'incorporation des additions minérales est une technique importante qui améliore les propriétés du béton et du mortier telles que la fluidité, la résistance, la durabilité, etc..., Ces additions minérales affectent de manière significative la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais, qui est directement relié avec le développement de la résistance, la durabilité des matériaux durcis. Néanmoins, pour profiter pleinement de ces avantages et ainsi choisir la meilleure solution permettant d'optimiser la formulation, il est nécessaire de connaître les caractéristiques de ces nouveaux composants (additions minérales) et leurs actions sur les propriétés des bétons.

Par conséquent, Il est nécessaire de trouver un moyen pour la valorisation et la réutilisation de ces déchets pour la protection de l'environnement.

Le but principal de cette étude est de démontrer techniquement la possibilité d'utiliser les déchets de poudre de marbre et de granite dans les bétons, sous forme d'une addition. Il convient, donc, d'étudier les caractéristiques physiques et mécaniques, des échantillons réalisés. A cet effet, nous avons mené une série d'essais sur la résistance mécanique. Notre

travail a pour objectif de valoriser les déchets de marbre et de granite comme poudre, générés par l'entreprise, TIMGAD Marbre.

Le contenu de ce mémoire comporte, en plus d'une introduction générale et d'une conclusion générale, cinq chapitres :

Chapitre I : Généralités.

Chapitre II : Caractérisation des matériaux et méthodes d'essais.

Chapitre III : Résultats et interprétations

Chapitre IV : étude technico-économique et recommandations.

Chapitre V : Etude de l'impact environnemental

Chapitre I : Généralités

I.1. INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est de passer en revue les connaissances actuelles les plus pertinentes sur l'action des additions minérales dans les matériaux cimentaires afin d'éclaircir, en particulier, la façon dont elles contribuent à l'activité liante du ciment et comment cette dernière est prise en compte dans les méthodes de formulation des mortiers et des bétons avec additions minérales.

Ce chapitre s'appuie sur les études les plus récentes dans le domaine, ainsi que sur la normalisation française et européenne dont la lecture critique a permis de dégager les principaux arguments sur lesquels nous appuyons notre approche sur les mortiers et les bétons et ses constituants et aussi additions minérales.

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

Dans ce chapitre, nous décrivons le contexte de la gestion des déchets et les principales techniques de traitement ou d'élimination ; ainsi que la valorisation et la réutilisation des déchets dans le domaine de génie civil.

I.2. GENERALITES SUR LES BETONS ET SES CONSTITUANTS :

I.2.1. Ciments :

I.2.1.1. Définition :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous forme d'une poudre très fine qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant dans le temps. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux notamment des silicates et des aluminates de calcium. La proportion de chaux et de silice réactive doit être au moins 50% de la masse du ciment. Il existe deux types de ciments :

Ciments naturels : réalisés à partir de roches où argiles et calcaires sont déjà naturellement mélangés.

Ciments artificiels : obtenus par la cuisson à haute température d'un mélange de calcaire (80%) et d'argile (20%).

I.2.1.2. Historique :

Dans l'Antiquité déjà, les Romains utilisaient un mortier hydraulique composé d'une chaux siliceuse additionnée de pouzzolane ou de brique pilée. En y ajoutant des granulats appropriés, ils obtenaient l'Opus "Caementitium" ou « ciment romain » considéré comme le précurseur de notre béton et qui est à l'origine du mot « ciment ».

En 1824, l'Anglais J. Aspdin élabora et breveta un produit proche du ciment obtenu par cuisson d'un mélange finement broyé de calcaire et d'argile. Ce liant permettait de confectionner un béton comparable à la pierre de Portland, une pierre calcaire très résistante extraite des carrières de la péninsule de Portland qui est couramment utilisée dans la construction en Angleterre. C'est pour cette raison qu'on l'appelle « ciment Portland » [18]

I.2.1.3. Les constituants principaux du ciment :

a) Clinker Portland :

Le clinker Portland est obtenu par cuisson, au moins jusqu'à fusion partielle d'un mélange de matières premières contenant principalement du CaO, SiO₂, Al₂O₃ et des petites quantités d'autres matières (Fe₂O₃ ...)

Le clinker est fabriqué dans des fours de cimenterie. La matière première est constituée principalement de calcaire ou craie (fournissant le CaO) et d'argile (SiO₂ et Al₂O₃).

Les matières de base sont préparées par voie humide ou sèche. Dans le 1er cas, il s'agit d'une pâte reconstituée des éléments en dispersion dans l'eau. Dans le 2ème cas, il s'agit d'une poudre fine sèche.

Les matériaux sont introduits en continu à l'extrémité du four tandis que le combustible est insufflé à l'autre extrémité du four (sortie du four). Les matériaux se déplacent à contrecourant des gaz de combustion. La température s'élève au fur et à mesure qu'ils s'approchent de la sortie du four où la température atteint 1400 à 1500° C.

Les matières de base subissent diverses transformations au fur et à mesure que leur température s'élève, à savoir :

- Elimination de l'eau
- Décomposition des produits : $\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ L'argile se décompose en SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃
- Réaction des produits pour former les espèces suivantes :

Le silicate tricalcique 3CaO Si O₂ ou par abréviation C3S

Le silicate bi calcique 2CaO Si O₂ ou par abréviation C2S

L'aluminate tricalcique 3CaOAl₂O₃ ou C3A

L'alumine-ferrite tétra calcique 4CaOAl₂O₃ ou par abréviation C4AF

Ces produits sont des matériaux cristallisés ou amorphes. Près de la sortie du four, ils s'agglomèrent en boulettes de 1 à 2cm de diamètre, qui sont refroidies brutalement dès leur sortie du four. Les boulettes du clinker sont stockées avant broyage. En notation cimentière, les symboles C, S, A, F, M, désignent respectivement CaO, SiO₂, Al₂O₃, FeO₃, MgO

b) Laitier granulé de haut fourneau :

Le laitier granulé de haut fourneau est obtenu par refroidissement rapide de la scorie fondue de composition convenable provenant de la fusion du minerai de fer dans le haut fourneau. Le laitier de haut fourneau est un matériau hydraulique latent, c'est-à-dire qui présente des propriétés hydrauliques lorsqu'il subit une activation convenable.

Vu la rapidité du refroidissement, le matériau est à l'état vitreux, au moins pour 2/3 de sa masse. Il se présente sous forme d'un « sable » (grains de 1 à 5 mm) qui sera aussi broyé à la finesse désirée. La composition dépend du minerai utilisé, du fondant (à base de chaux) et des autres additions ajoutées dans le haut fourneau.

Une tonne de fonte donne approximativement une tonne de laitier. Vu la densité du laitier (2,6) celui-ci surnage sur la fonte en fusion (densité ~ 7) au fond du haut-fourneau.

Composition élémentaire globale :

- CaO 35 à 45 %
- SiO₂ 30 à 40 %
- Al₂O₃ 10 à 20 %
- MgO 5 à 25 %

c) Cendres volantes :

Les cendres volantes sont obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes du courant de gaz de chaudières alimentées au charbon pulvérisé. Les cendres volantes siliceuses forment une poudre fine constituée principalement de

particules sphériques vitrifiées ayant des propriétés pouzzolaniques. Les pouzzolanes ont la propriété de réagir avec la chaux pour donner des liants hydrauliques.

d) Fillers :

Les fillers sont des matières inorganiques minérales, naturelles ou artificielles spécialement sélectionnées, qui après une préparation appropriée en fonction de leur granulométrie, améliorent les propriétés physiques des ciments. Ils peuvent être inertes ou présenter des propriétés faiblement hydrauliques, latentes ou pouzzolaniques. Dans un ciment, la teneur en fillers est limitée à 5%.

e) Fillers calcaires :

Des fillers calcaires peuvent être introduits jusqu'à plus de 5% de la composition d'un ciment sans pour autant que la teneur en calcaire soit $\geq 75\%$ en masse et qu'il y ait une teneur en argile et en matières organiques compatibles avec les exigences des normes.

f) Sulfate de calcium :

Le sulfate de calcium doit être ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication en vue de régler la prise. Le sulfate de calcium peut être du gypse (sulfate de calcium di-hydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, de l'hémihydrate (plâtre) ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$) de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre CaSO_4) ou tout mélange de ceux-ci

g) Additifs :

Les additifs sont des constituants qui ne figurent pas dans les points cités précédemment et qui sont ajoutés pour améliorer la fabrication ou les propriétés du ciment tels que, par exemple, des agents de mouture.

I.2.1.4. Fabrication du ciment :

a) Les matières premières :

Le Constituant principal du ciment est le clinker obtenu à partir de la cuisson du cru (calcaire ($\approx 80\%$) et d'argile ($\approx 20\%$) à 1450°C).

La Composition chimique usuelle des matières premières et du cru est représentée dans le Tableau I.1

Tableau I.1 : La Compositions chimiques usuelles des matières premières et du cru

	Argile	Calcaire	Cru type
SiO_2	60.5	2.2	14.3
Al_2O_3	17.8	1.1	3.0
Fe_2O_3	6.8	1.1	3.0
CaO	1.6	52.7	44.4
MgO	3.1	0.7	0.6
S	/	<0.1	/
SO_3	0.2	<0.1	0.1
<i>Perte au feu</i>	6.7	42.4	35.9
K_2O	2.6	0.3	0.5
Na_2O	0.7	0.1	0.1
<i>Total</i>	100	100.6	101.9
CaCO_3	/	94.1	79.3

b) Les procédés :

➤ **Extraction et concassage :**

- Matières premières extraites de carrières généralement à ciel ouvert,
- Concassées en éléments de dimension maxi 50 mm

➤ **Préparation du cru :**

- Matières premières intimement mélangées dans des proportions définies,
- Des corrections peuvent être faites en incorporant de faible quantité d'aluminium, de fer, ... selon les besoins.

➤ **Mélange du cru :** Il existe 4 techniques qui dépendent essentiellement du matériau :

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

➤ **Broyage du clinker :**

Refroidissement brusque de la matière ⇒ formation de granules ⇒ broyage fin (on ajoute souvent le sulfate de calcium avant le broyage pour avoir un matériau fini homogène).

➤ **Ajout d'autres constituants pour fabriquer différents types de ciment.**

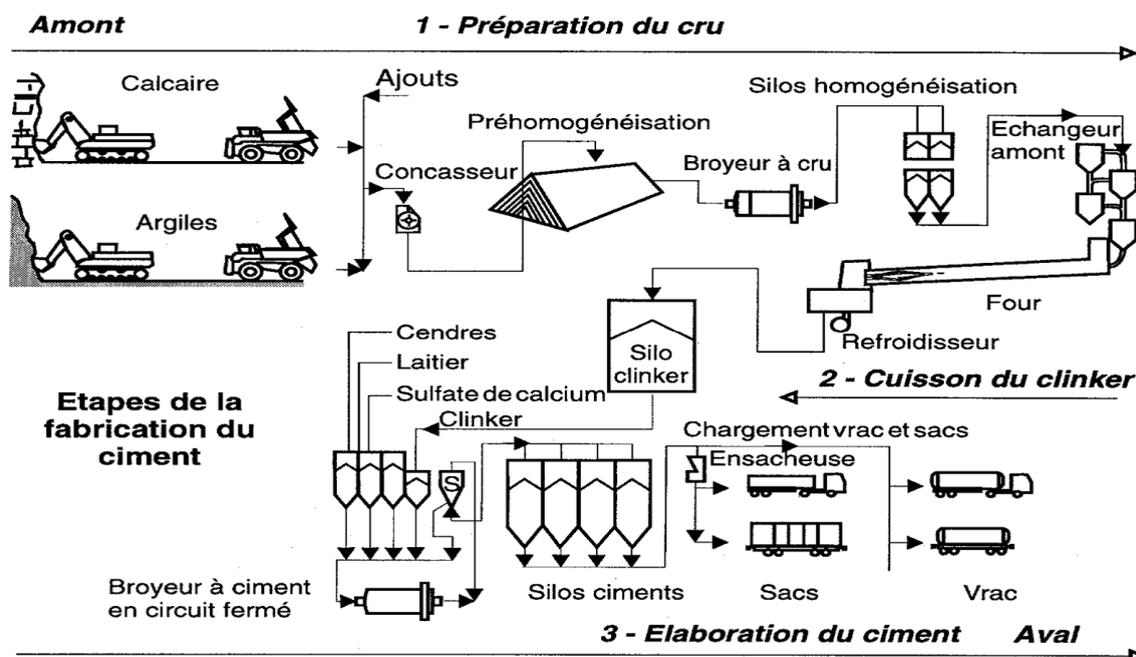


Figure I.1.: Fabrication du ciment

I.2.1.5. Les compositions des ciments

Il existe 27 types de ciments courants séparés en 5 catégories :

- CEM I: Ciment Portland: 1
- CEM II: Ciment Portland composé: 19
- CEM III : Ciment de haut fourneau : 3
- CEM IV : Ciment pouzzolanique : 2
- CEM V : Ciment composé : 2

I.2.1.6. Désignations des ciments courants :

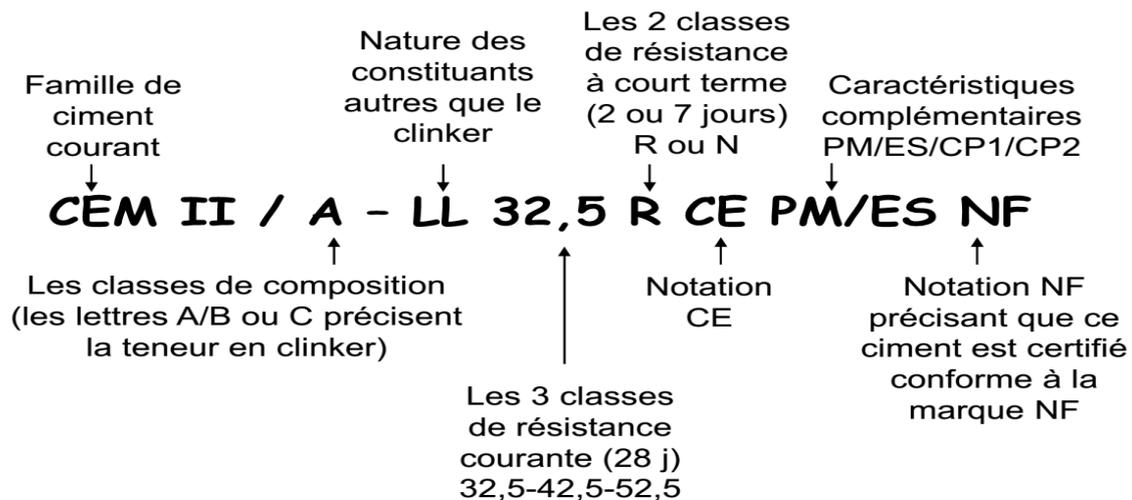


Figure I.2: Désignations des ciments courants

I.2.1.7. Grandeurs caractéristiques des ciments :

Le ciment se caractérise par un certain nombre de critères mesurés de façon conventionnelle soit sur la poudre, soit sur pâte, soit sur « mortier normal » (mélange normalisé de ciment, sable et eau. [1])

a) La surface spécifique Blaine : (finesse Blaine)

Elle permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment [2]. Elle s'exprime en cm^2/g . La surface spécifique Blaine est généralement comprise entre 2800 et 4000 cm^2/g .

b) La masse volumique apparente :

Elle représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre éléments inclus). Elle est de l'ordre de 1000 kg/m^3 (1 kg par litre) en moyenne pour un ciment.

c) La masse volumique absolue :

Elle représente la masse par unité de volume (vides entre les éléments exclus). Elle varie de 2900 à 3150 kg/m^3 suivant le type de ciment.

d) Le début de prise :

Il est déterminé par l'instant où l'aiguille de Vicat (aiguille de 1mm^2 de section pesant 300g) ne s'enfonce plus jusqu'au fond d'une pastille de pâte pure de ciment. Les modalités de l'essai font l'objet de la norme [3].

Les ciments de classe 35 et 45 ont à 20 °C un temps de début de prise > 1h30mn. Les ciments de classe 55 ont à 20°C un temps de début de prise > 1h.

e) Les résistances caractéristiques garanties :

En dehors des valeurs nominales des classes de résistance, la norme prévoit le respect de valeurs minimales garanties à 2,7, et 28 jours. Ces résistances sont mesurées sur « mortier normal ».

f) Le retrait :

Le retrait mesuré à 28 jours sur mortier normal doit être < 800 μm pour la classe 45 et 1000 μm pour les autres classes.

I.2.1.8. Les caractéristiques chimiques :

Elles sont un facteur important de la résistance des bétons à des ambiances agressives :

- La teneur en anhydride sulfurique (SO₃) < 4%
- La teneur en magnésie (Mgo) < 5%
- La teneur en ions chlore < 0,05%.

I.2.1.9. Ciment et environnement :

I.2.1.10. Emissions de CO₂ lors de la production du ciment :

La production de ciment exige beaucoup d'énergie et libère de grandes quantités de dioxyde de carbone (CO₂). La réduction des émissions ayant une incidence sur le climat est un des plus grands défis des producteurs de ciment. La plus petite partie des émissions de CO₂, environ un tiers, provient des combustibles fossiles ou indirectement de la consommation d'électricité, tandis que deux tiers des émissions de CO₂ sont libérés lors de la cuisson par les calcaires, marnes et argiles. Afin d'augmenter l'efficacité énergétique dans toutes les étapes de travail et de réduire les émissions de CO₂, des mesures sont prises dans le domaine du développement durable. Parmi ces mesures, on peut citer les mesures principales suivantes :

- Réduction de la teneur en clinker du ciment
- Utilisation de combustibles alternatifs
- Optimisation des installations, p. ex. utilisation de toute chaleur émise

La réduction de la teneur en clinker du ciment est la mesure la plus efficace pour réduire les émissions de CO₂. Celles-ci diminuent pour chaque tonne de ciment par l'abaissement des quantités nécessaires non seulement de combustibles, mais aussi de matières premières.

Les constituants principaux admis dans la norme comme le calcaire, le schiste calciné, le laitier, la cendre volante s'imposent comme substances de substitution au clinker. Il est possible de produire avec ces ajouts neutres ou plus favorables par rapport au CO₂ des ciments de haute qualité de type CEM II/A, CEM II/B et CEM III. [18]

Les émissions de CO₂ sont d'autant plus basses que la proportion d'addition est élevée dans le ciment.

I.2.2. L'eau :

I.2.2.1. Le rôle de l'eau dans les bétons et les mortiers est :

- Hydrater le ciment, d'où prise, solidification, durcissement et augmentation de la résistance.
- Mouiller les granulats.
- Permettre le malaxage des différents composants et leur mise en œuvre en conférant une maniabilité au béton.
- Donner au béton une consistance suffisamment fluide pour qu'il puisse être utilisé.

Pour hydrater 100 kg de ciment, 25 litres d'eau sont nécessaires (E/C=0.25) or E/C mis en œuvre pour des bétons classiques classiquement >> 0.5 (0.6-0.7)

Donc la quantité d'eau ajoutée est toujours très supérieure à la quantité nécessaire à l'hydratation du ciment.

Il faut distinguer :

- L'eau ajoutée,
- L'eau totale = eau ajoutée + eau des granulats
- L'eau efficace = eau totale – eau absorbée par les granulats

I.2.2.2. Exigences requises pour les eaux de gâchage [4] :

a) Classification des types d'eau :

- Eau potable : aucun essai
 - Eau récupérée de la fabrication des bétons.
 - Eaux d'origine souterraine.
 - Eaux naturelles de surface ou de rejet industrielles.
 - Eau de mer : peut être utilisée pour la production de béton non armé mais pas pour le BA ou le BP (teneur en chlorures).
 - Eaux usées : non
- } essais
- La norme préconise 3 types d'exigence :

b) Exigences sensorielles :

- Traces visibles d'huile, de mousse, (les organiques en général réduisent la résistance des bétons) ...
- Matières en suspension importantes.
- Couleur.
- Odeur.

c) Exigences chimiques :

Teneurs limitées pour certains éléments indésirables :

- Les chlorures (incompatibles avec la confection de BA car amorce la corrosion des armatures).
- Les sulfates (risque de formation d'ettringite secondaire gonflante).
- Les alcalins (risques d'alcali-réaction).

d) Exigences mécaniques :

- Temps de début de prise : ne doit pas être < de 1h et ne doit pas s'écarter de plus de 25% par rapport au même essai avec de l'eau distillée.
- Temps de fin de prise : ne doit pas être > de 12h et ne doit pas s'écarter de + de 25% par rapport au même essai avec de l'eau distillée.
- Résistance en compression à 7j (béton ou mortier) : doit atteindre au moins 90% des résistances obtenues avec de l'eau distillée.

I.2.2.3. La quantité d'eau de gâchage : est fonction du :

- Dosage en ciment : si (C augmente, E augmente)
- La finesse de mouture (quantité de d'éléments fins)
- Il faut tenir compte de l'humidité éventuelle des granulats, et surtout du foisonnement des sables qui fausse les dosages volumiques

I.2.3. Les granulats :

I.2.3.1. Introduction :

Les granulats utilisés dans les travaux de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et des caractéristiques propres à chaque usage. Les granulats constituent le squelette du béton dont ils constituent les deux tiers du volume. Ils sont constitués de différents grains minéraux, naturels ou artificiels, dont les caractéristiques influentes sur la qualité des bétons.

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.

I.2.3.2. Définition d'un granulats et son rôle dans le béton :

On appelle « granulats » les matériaux inertes qui entrent dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125 mm dont l'origine peut être naturelle ou artificielle. Ces matériaux sont quelquefois encore appelés « agrégats », cependant cette

appellation est abandonnée depuis fort temps. En effet, un agrégat est un assemblage hétérogène de substances ou éléments qui adhèrent solidement entre eux (le mortier ou le béton par exemple). [5]

I.2.3.3. Différents types de granulats :

a) Granulats naturels :

Les granulats sont dits naturels lorsqu'ils sont extraits de leurs sites géologiques d'origine en ayant subi que des traitements mécaniques. Ils sont provenus de différentes roches qui varient selon la région d'origine.

b) Granulats artificiels :

Les granulats artificiels sont obtenus de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais. Il existe différentes sortes de granulats artificiels. Les sous-produits industriels, parmi lesquels les plus employés sont le laitier cristallisé concassé et le laitier granulé de haut-fourneau, sont obtenus par refroidissement à l'eau. D'autres sous-produits qui sont utilisés pour un usage précis. [6]

c) Granulats légers et lourds :

➤ Granulats légers :

Les granulats légers sont utilisés pour la confection de bétons légers. Leurs masses volumiques sont inférieures à 2 t/m³. 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.

➤ Granulats lourds :

Les granulats lourds ont des masses volumiques supérieures à 3 t/m³. 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.

I.2.3.4. Caractéristiques des granulats :

➤ Classe granulaire :

Un granulat est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D, d et D étant respectivement la plus petite et la plus grande dimension des grains. La norme française XP P18-540 précise les appellations des différentes classes granulaires avec leurs caractéristiques dimensionnelles :

- Fillers 0/D pour $D < 2$ mm avec au moins 70% de passant à 0.063 mm
- Sable 0/D pour $1 < D \leq 6.3$ mm
- Gravier 0/D pour $D > 6.3$ mm
- Gravillon d/D pour $d \geq 1$ mm et $D \leq 125$ mm
- Ballast d/D pour $d \geq 20$ mm et $D \leq 50$

➤ Granulométrie :

La granulométrie permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. Cet essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis. La dimension nominale de tamis

est donnée par l'ouverture de la maille, c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture carrée. Ces dimensions sont telles qu'elles se suivent.

Les pourcentages des refus cumulés ou ceux des tamis cumulés, sont représentés sous la forme d'une courbe granulométrique en portant les ouvertures des tamis en abscisse, sur une échelle logarithmique, et les pourcentages en ordonnée, sur une échelle arithmétique[5].

➤ **Module de finesse :**

Le module de finesse surtout utilisé pour les sables permet de caractériser leur granularité par une seule valeur. Il est égal au 1/100 de la somme des refus, exprimés en pourcentages sur les tamis suivants : 0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 et 5 mm

Un module de finesse élevé indique un sable grossier, un module faible caractérise un sable fin. La valeur du module de finesse dépend surtout de la teneur en grains fins du sable. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse compris entre 3.2 et 1.8.

I.2.3.5. Le choix des granulats selon le type de béton :

Le choix des granulats doit se faire en fonction de plusieurs critères technico-économiques qui vont de la destination du béton et de l'ouvrage à la simple question des disponibilités locales.

La variété des fonctions remplies par le béton conduit à adopter des granulats qui, selon le cas, présenteront des caractéristiques d'aspect, de densité, de résistances mécaniques différentes

I.2.4. Les adjuvants :

I.2.4.1. Définition :

Adjuvant c'est un produit dont l'incorporation à faible dose dans le béton lors du malaxage modifie certaines propriétés du béton, à l'état frais ou à l'état durci « faible dose » = dosages inférieurs à 5% (par rapport à la masse de ciment).

On peut classer les adjuvants en 3 grandes catégories [7] :

- **Modificateurs de maniabilité** (plastifiant/réducteur d'eau, super plastifiant/haut réducteur d'eau),
- **Modificateurs de prise ou de durcissement** (accélérateur de prise ou de durcissement, retardateur de prise),
- **Modificateurs de certaines propriétés du béton** (entraîneur d'air, hydrofuge de masse, rétenteur d'eau).

I.2.4.2. Les plastifiants/réducteurs d'eau :

Même activité pour les plastifiants et les super plastifiants mais plus intense (d'où le terme « super »).

- **Réducteur d'eau** : à même ouvrabilité, il conduit à une augmentation des résistances mécaniques par une réduction de la teneur en eau.
- **Plastifiant** : introduit dans un béton, un mortier ou un coulis, il a pour fonction principale de provoquer un fort accroissement de l'ouvrabilité du mélange.

I.2.4.3. Les accélérateurs de prise :

- **Accélérateurs de prise** : accélèrent la prise du ciment (réduction des temps de début et de fin de prise). En particulier, ils permettent de maintenir un temps de prise raisonnable par temps froid.

- **Accélérateurs de durcissement** : accélèrent le développement de la résistance du béton à court terme (utilisé par exemple pour le béton préfabriqué ou le béton précontraint (mise en tension dans le cas de BP par post tension)) les accélérateurs de prise et de durcissement augmentent les résistances aux jeunes âges mais on observe le plus souvent une légère diminution des résistances à 28j.

I.2.4.4. Les retardateurs de prise :

Ils retardent la prise du ciment (augmentation des temps de début et de fin de prise). Ils servent à augmenter la DPU du béton (Durée Pratique d'Utilisation = temps de transport et de mise en œuvre du béton frais).

I.2.4.5. Les entraîneurs d'air :

Ils permettent la formation, au cours du malaxage, d'un réseau uniforme de petites bulles d'air qui subsiste dans le béton durci. Ce réseau de bulle permet au béton de résister aux cycles de gel/dégel.

I.2.4.6. Les hydrofuges de masse :

Adjuvants qui permettent de limiter la pénétration de l'eau dans les pores et les capillaires du béton.

I.2.4.7. Les rétenteurs d'eau :

Réduisent le départ de l'eau par ressuage. De plus, ils augmentent l'homogénéité et la stabilité du mélange

I.2.5. Les additions minérales :

I.2.5.1. Introduction :

Les additions sont généralement des additions minérales sous forme de poudre fine ou de fibres qui peuvent améliorer certaines propriétés du béton (figure I.3). A quelques exceptions près, elles peuvent être employées tant dans le ciment que dans le béton. Parmi les additions, on compte :

- Farine de roche (farine de calcaire et de quartz)
- Cendre volante
- Fumée de silice
- Schiste calciné
- Laitiers granulés de haut fourneau
- Pouzzolane
- Pigments
- Fibres

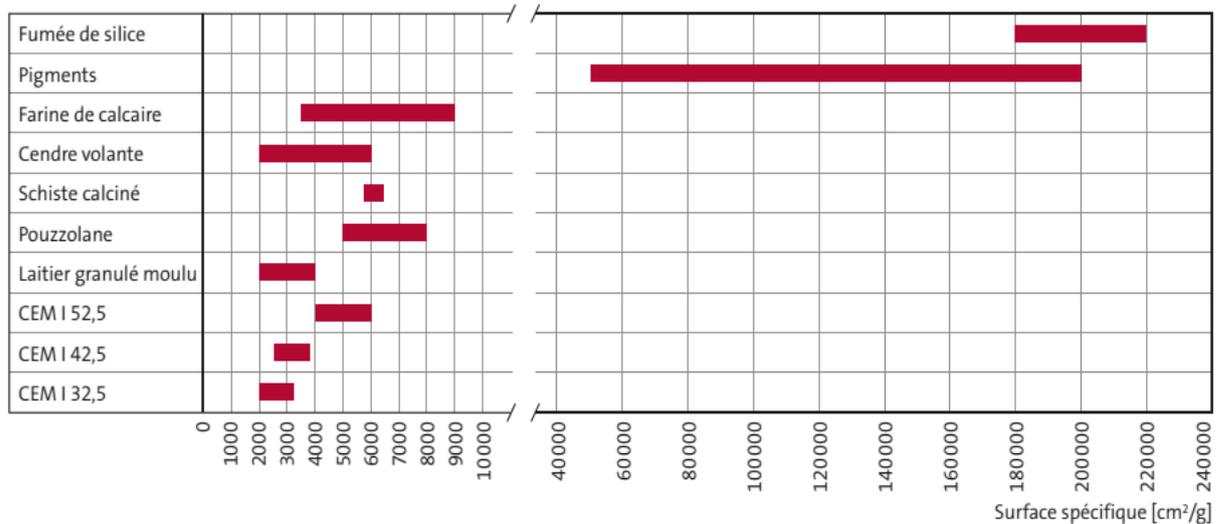


Figure I.3 : Surface spécifique des additions en comparaison avec le ciment

I.2.5.2. Modes d'introduction et type d'addition :

L'incorporation des additions minérales dans le béton peut se faire à 3 niveaux :

- En cimenterie : mélangées au clinker pour obtenir des ciments composés,
- En cimenterie : introduction dans le cru du ciment pour corriger la composition du cru (ex. : utilisation des cendres volantes comme source d'alumine),
- Dans la bétonnière en remplacement d'une partie du ciment.

La norme NF EN 206-1 sur les bétons définit 2 types d'additions minérales [8] :

- Ajouts minéraux inertes
- Ajouts minéraux actifs (naturels ou artificiels)

I.2.5.3. Cendres volantes :

Les cendres volantes, les ajouts cimentaires les plus fréquemment utilisés dans le béton, sont des résidus finement divisés (Poudre ressemblant au ciment) résultant de la combustion du charbon pulvérisé et évacué de la chambre de combustion d'un four par les gaz qui s'en échappent. La plupart des cendres volantes sur le marché sont un sous-produit des centrales thermiques. Durant la combustion, presque toute la matière volatile et le carbone du charbon sont brûlés.

Les impuretés du charbon (telle l'argile, le feldspath, le quartz et le schiste) entrent en fusion et sont évacuées de la chambre à combustion par les gaz d'échappement. Durant cette étape, le matériau fusionné refroidit et se solidifie en petites particules sphériques vitreuses nommées cendres volantes. Ces dernières sont ensuite extraites des gaz d'échappement à l'aide de dépoussiéreurs électrostatiques ou de sacs filtrants.

La cendre volante est constituée surtout de silicate de verre contenant de la silice, de l'alumine, du fer et du calcium. Les composants mineurs sont le magnésium, le soufre, le sodium, le potassium et le carbone. Des composants cristallins sont présents en petites quantités.



Figure I.4 : Micrographie de cendres volantes au microscope électronique à balayage.
Grossissement 1000

I.2.5.4.Laitier :

Le laitier de haut-fourneau granulé, aussi appelé ciment de laitier, est fabriqué à partir du laitier de fonte, c'est un liant hydraulique non métallique qui est composé essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium qui se sont développées dans des conditions de fusion de l'acier dans un haut-fourneau.

Le laitier en fusion, à une température d'environ 1500°C, est refroidi rapidement en le trempant dans l'eau pour former un matériau granuleux ressemblant à un sable vitreux. Le matériau granulé, broyé à une taille de moins de 45 microns, possède une finesse Blaine d'environ 400 à 600 m²/kg. La densité d'un laitier de haut fourneau granulé broyé est comprise entre 2,85 à 2,95. La masse volumique des laitiers varie de 1050 à 1 375 kg/m³. [18]

I.2.5.5.Fumée de silice :

La fumée de silice, aussi appelée micro silice ou fumée de silice condensée, est un coproduit qui est utilisé comme pouzzolane. Ce coproduit est le résultat de la réduction du carbone et du quartz de très grande pureté dans un four à arc électrique durant la fabrication du silicium ou d'alliages de ferro silicium. La fumée de silice s'élève sous forme de vapeur oxydée émise par les fournaies chauffées à 2 000 °C. Lorsqu'elle se refroidit, elle condense pour ensuite être captée dans d'énormes poches de tissu. La fumée de silice est ensuite traitée pour enlever les impuretés et pour contrôler la taille des particules.



Figure I.5 : Poudre de fumée de silice

I.2.5.6.Farines de roche :

Les poudres de roche comme les farines de calcaire ou de quartz complètent et améliorent le squelette granulaire du béton au niveau des farines en raison de leur finesse et de la forme de leurs grains, ainsi que de leur granularité. On les ajoute par exemple aux sables pauvres en farines afin d'enrichir cette classe granulaire en éléments fins, ce qui se traduit par une meilleure

ouvrabilité et une texture plus compacte du mélange. Par leur effet de remplissage, elles réduisent la porosité du béton.

L'aptitude à l'emploi des farines de calcaire ou de quartz prévue doit être vérifiée. [18]

I.2.5.7.Pigments :

Les pigments minéraux sont utilisés pour colorer les bétons et mortiers. En pratique, seuls le pigment à base d'oxydes, dont les spinelles, satisfont aux exigences requises en matière de stabilité et de granulométrie. Les pigments n'entraînent pas de réaction chimique au sein du béton. Leur demande en eau relativement élevée nécessite en général une augmentation du rapport E/C, à moins que cet effet et ne soit compensé par l'emploi simultané d'adjuvant fluidifiant.

Le dosage en pigments c'est de quelques pourcents de la masse du ciment qu'est dicté par l'intensité de la teinte recherchée. Avec le temps, une certaine atténuation de la teinte des bétons colorés est inévitable, même si l'on utilise les meilleurs pigments. Les bétons teintés peuvent être confectionnés avec du ciment gris ou blanc. [18]

I.2.5.8.Pouzzolane :

Les pouzzolanes naturelles comme p. ex. le Trass originaire d'Allemagne ont des propriétés très différentes et variables suivant leur origine. Ce sont des farines de roches volcaniques ou sédimentaires avec des compositions chimiques et minéralogiques particulières.

Les pouzzolanes naturelles calcinées sont des roches volcaniques (p. ex. phonolithes), des argiles ou des roches sédimentaires. Les pouzzolanes ont, en règle générale, des teneurs élevées en alcalins. Lors d'un emploi avec des granulats potentiellement alcali-réactifs, il faut prêter une attention particulière au risque de réaction alcalis-granulats. [18]

I.2.6. Le béton :

I.2.6.1.Introduction :

Le béton est un matériau obtenu en mélangeant les constituants, à savoir du ciment, de l'eau, des granulats grossiers et fins, avec ou sans ajout d'additions ou d'adjuvants. Les possibilités de variation des paramètres au sein de ce mélange de 5 constituants sont pratiquement illimitées, ce qui permet d'influencer de façon ciblée aussi bien les propriétés du béton frais que celles du béton durci.

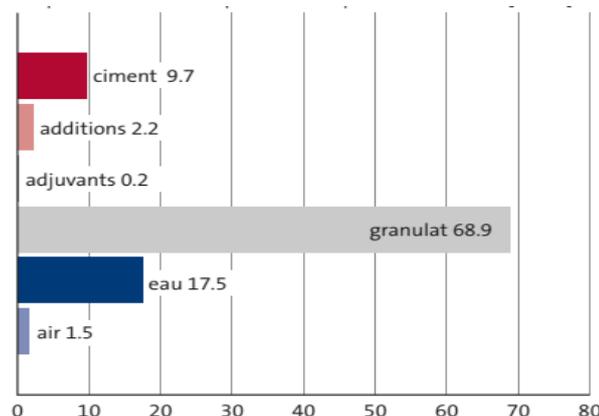


Figure I.6 : Proportions pondérales des composants du béton (% en masse)

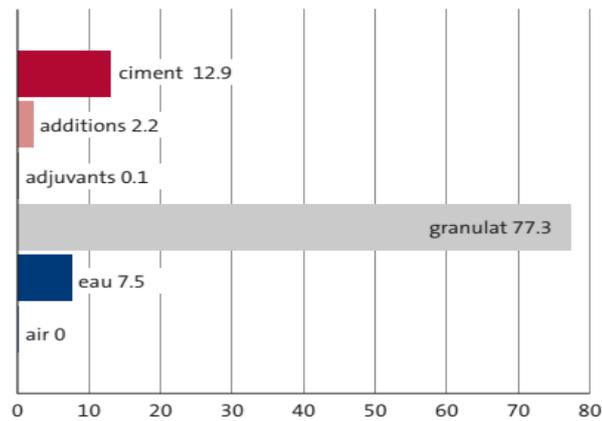


Figure I.7 : Proportions volumique des composants du béton (% volume)

Le béton acquiert ses propriétés essentiellement au travers de la réaction chimique du ciment avec l'eau, ce qu'on appelle l'hydratation du ciment. La vitesse de réaction du ciment est déterminante pour la prise et le durcissement du béton. [18]

I.2.6.2. Hydratation du ciment :

Lors de l'hydratation du ciment, les minéraux de clinker du ciment C3S, C2S, C3A et C4AF réagissent avec l'eau et se transforment en phases hydratées. Elles provoquent le raidissement et le durcissement de la pâte de ciment.

L'évolution des phases hydratées et de la structure s'opère au cours de trois phases d'hydratation (Figure I.8). Lors de la première phase d'hydratation (I), le C3A réagit très vite et fortement avec le sulfate de calcium dissous (à savoir du gypse ajouté en tant que régulateur de prise).

Les hydrates sulfatés d'aluminate de calcium, surtout le tri sulfate appelé aussi ettringite, forment des cristaux en colonnes courtes et hexagonales à la surface des particules de clinker. La création de cette fine carapace de cristaux bloque temporairement l'hydratation. Les premiers produits de réaction sont encore trop petits pour combler l'espace entre les particules de clinker qui peuvent toujours se mouvoir librement. De ce fait la pâte de ciment ne se raidit que très peu. Le raidissement et ensuite la prise de la pâte de ciment ne commencent qu'après 1 à 3 heures, lorsque de très fines aiguilles de cristaux de silicates de calcium hydratés (CSH) précipitent à la surface des particules de clinker. Les cristaux croissants s'emmêlent de plus en plus et la pâte de ciment commence à se rigidifier. Pendant la seconde phase d'hydratation (II), la structure de base se met en place. Elle est constituée de faisceaux fibreux de CSH, des plaquettes d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et des cristaux allongés d'ettringite. Les plus grands cristaux pontent l'espace entre les grains de clinker et s'enchevêtrent.

La troisième phase d'hydratation (III) est la solidification progressive de la structure, par le durcissement graduel de la pâte de ciment. Le mécanisme fondamental est la cristallisation de courtes aiguilles et fibres qui de fait combler les interstices. La vitesse d'hydratation est réduite. Tandis que le C3A représente le minéral de clinker décisif pour la mise en œuvre et la prise, le C3S à réaction rapide et le C2S à réaction lente sont déterminants pour la création d'une structure stable et la montée en résistance.

Le C3S et le C2S libèrent de grandes quantités d'hydroxyde de calcium qui ne contribuent pas à la résistance, mais protègent l'armature contre la corrosion en raison de sa puissante action alcaline. Un ciment Portland hydraté (CEM I) contient après son hydratation complète environ 60 % en masse de CSH et 30 % en masse d'hydroxyde de calcium [18].

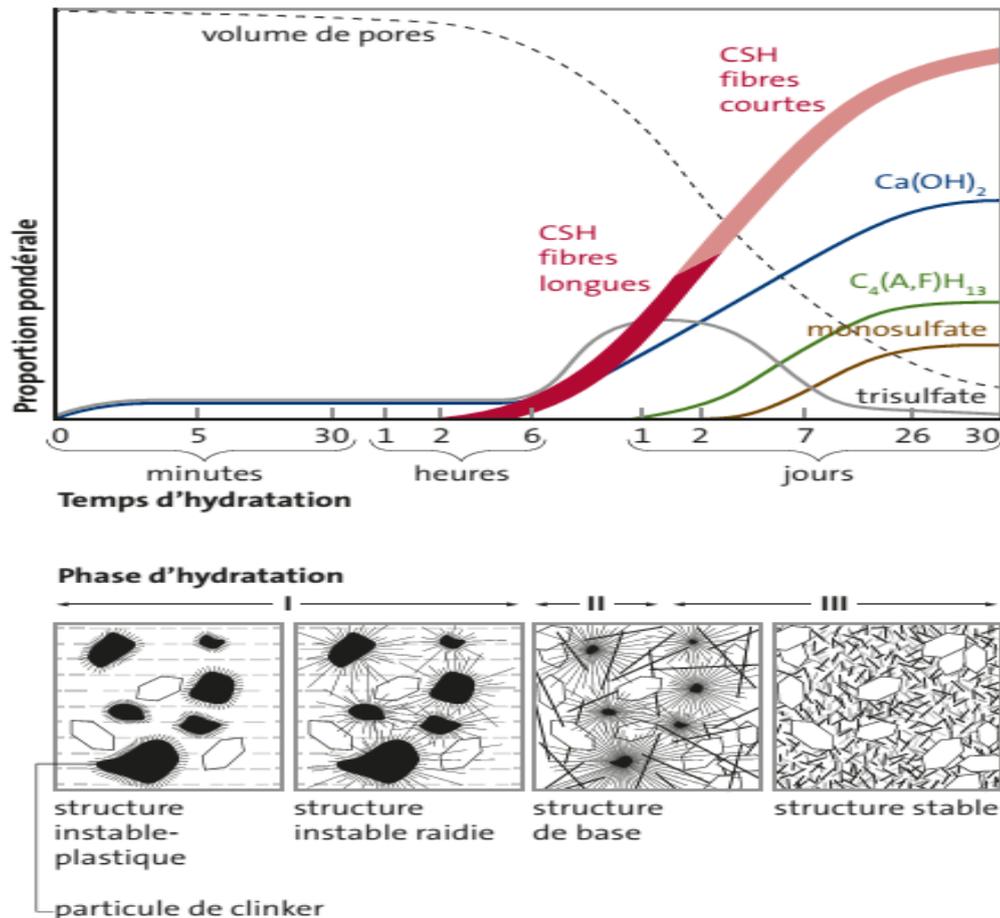


Figure I.8 : Représentation schématique de l'évolution dans le temps des phases hydratées et de la structure.

I.2.6.3. Classification du béton :

Le béton fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par sa caractéristique de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, son aptitude au vieillissement, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects. Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories.

En général le béton peut être classé en 4 groupes, selon la masse volumique :

- Béton très lourd : $> 2500 \text{ kg/m}^3$.
- Béton lourd (béton courant) : $1800 - 2500 \text{ kg/m}^3$.
- Béton léger : $500 - 1800 \text{ kg/m}^3$.
- Béton très léger : $< 500 \text{ kg/m}^3$.

Le béton courant peut aussi être classé en fonction de la nature des liants :

- Béton de ciment (le ciment),
- Béton silicate (la chaux),
- Béton de gypse (le gypse) et
- Béton asphalte.

Le béton peut varier en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface et peut ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect.

- a) **Les bétons courants** sont les plus utilisés, aussi bien dans le bâtiment qu'en travaux publics. Ils présentent une masse volumique de 2003 kg/m^3 environ. Ils peuvent être armés ou non, et lorsqu'ils sont très sollicités en flexion, précontraints.
- b) **Les bétons lourds**, dont les masses volumiques peuvent atteindre 6000 kg/m^3 servent, entre autres, pour la protection contre les rayons radioactifs.
- c) **Les bétons de granulats légers**, dont la résistance peut être élevée, sont employés dans le bâtiment, pour les plates-formes offshore ou les ponts.
- d) **Les bétons cellulaires (bétons très légers)** dont les masses volumiques sont inférieures de 500 kg/m^3 , sont utilisés dans le bâtiment, pour répondre aux problèmes d'isolation.
- e) **Les bétons de fibres**, plus récents, correspondent à des usages très variés : dallages, éléments décoratifs, mobilier urbain.

La norme EN V206 classe les bétons en fonction de leur résistance caractéristique à la compression conformément au Tableau I.2.

Dans ce tableau f_{ckcyl} est la résistance caractéristique mesurée sur cylindres (c'est cette résistance qui correspond à la résistance caractéristique à laquelle il est fait référence dans l'Eurocode 2).

Tableau I.2 : Classes de résistance du béton ordinaire.

Classe	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
$f_{ckcyl} \text{ (Mpa)}$	12	16	20	25	30	35	40	45	50

I.2.6.4. Sélection des éléments pour béton :

Le béton est composé de granulats, de ciment, d'eau et éventuellement d'adjuvants. Parmi les quatre constituants, les granulats jouent un rôle important, d'une part car ils forment le squelette et présentent, dans les cas usuels, environ 80 % du poids total du béton et d'autre part car au point de vue économique, ils permettent de diminuer la quantité de liant qui est le plus cher. En plus, du point de vue technique, ils augmentent la stabilité dimensionnelle (retrait, fluage) et ils sont plus résistants que la pâte de ciment.

Les granulats utilisés dans les travaux de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et des caractéristiques propres à chaque usage.

I.2.6.5. Du béton frais au béton durci :

I.2.6.5.1.1. Introduction :

Le béton est appelé béton frais tant qu'il est possible de le mettre en œuvre. Passé le stade de la prise, il évolue vers le béton durci. Le passage du béton frais au béton durci est caractérisé par deux phases successives, l'une passant progressivement à l'autre : la phase du béton dit « rigidifié » et la phase du béton dit « de jeune âge » (Figure I.9). Le béton frais, mis en place, compacté et en train de se raidir, est nommé béton « rigidifié ». La résistance du béton rigidifié résulte essentiellement des forces d'adhérence entre l'eau et les particules solides ainsi que du frottement interne et de l'enchevêtrement du granulat. Au fur et à mesure de la progression de l'hydratation du ciment et du durcissement, le béton « rigidifié » passe au béton « jeune ».

Le béton jeune n'est plus ouvrable en raison de son état solidifié. Pour permettre au béton frais d'atteindre les propriétés exigées en phase durcie, divers facteurs d'influence sont à prendre en compte, en particulier lors du malaxage, du transport, du transbordement et de la mise en place du béton ainsi que lors de son compactage et de sa cure.

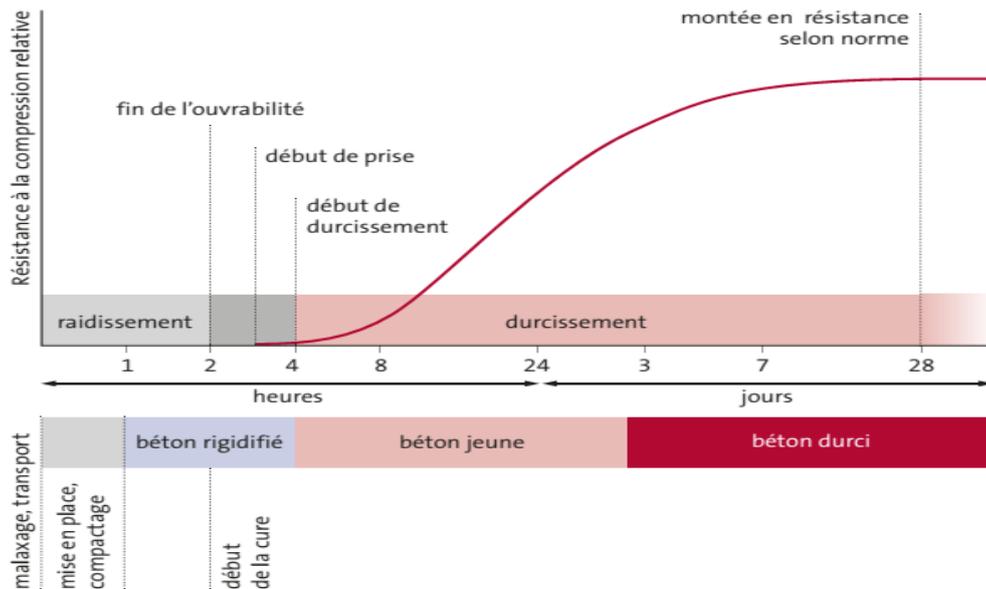


Figure I.9 : Phases de passage du béton frais au béton durci

I.2.6.5.2. Ouvrabilité et autres propriétés du béton frais :

➤ Consistance :

La consistance du béton frais détermine l'ouvrabilité du béton. Elle décrit non seulement la cohésion interne du béton frais, mais aussi d'importantes propriétés telles que le comportement à l'écoulement, la tendance à la ségrégation et l'aptitude au lissage. La consistance du béton frais a une influence primordiale sur la facilité de transbordement, de mise en place et de compactage sur le chantier.

Les méthodes suivantes sont employées de préférence pour la mesure de la consistance :

- l'étalement à la table à chocs
- l'indice de serrage selon Walz
- l'affaissement au cône d'Abrams (Slump)

➤ Masse volumique du béton frais :

La masse volumique du béton frais peut être contrôlée à partir de la masse volumique théorique résultant du calcul de la formulation du béton. La comparaison de la masse volumique du béton frais théorique et celle mesurée permet d'obtenir des renseignements sur le degré de compactage et la composition du béton. La méthode de mesure de la masse volumique du béton frais est définie dans la norme NF P18-560. S'il est prévu de déterminer en plus la masse volumique du béton frais sa teneur en air, les deux valeurs seront déterminées sur le même échantillon.

➤ Teneur en air :

Le béton frais contient toujours des pores, un béton avec un diamètre maximal du granulat de 32 mm et une consistance plastique possède normalement 1 à 2 % volume de pores (sans air entraîné).

➤ **Teneur en eau :**

Si la teneur en ciment et la masse volumique du béton frais sont connues, il est possible de déterminer le rapport E/C à l'aide de la teneur en eau d'un échantillon de béton frais.

I.2.6.5.3. Propriétés mécaniques du béton durci :

➤ **Résistance à la compression :**

La résistance décrit la charge nécessaire à la rupture du matériau rapportée à la surface d'application de cette charge. La résistance à la compression correspond, donc, à la contrainte de compression que le béton peut supporter. La résistance à la compression constitue la principale, voire souvent la seule caractéristique exigée d'un béton durci. Selon sa composition le béton peut présenter une résistance à la compression modérée, proche de celle d'une brique en terre cuite ou d'un bois tendre. Elle peut également atteindre une valeur élevée, équivalente à celle obtenue sur un acier de construction courant.

➤ **Résistance à la traction :**

Sous sollicitation en traction, le béton présente une très faible résistance et un comportement fragile. Généralement, la résistance à la traction est négligée par les concepteurs dans leurs calculs statiques. La résistance à la traction dépend en partie des mêmes facteurs d'influence que la résistance à la compression, c.-à-d. des propriétés de la pâte de ciment durcie et son adhérence au granulat. La résistance à la traction augmente lorsque le rapport E/C diminue, mais nettement moins que la résistance à la compression.

Le mode et le niveau de rupture d'une éprouvette de béton sollicitée en traction sont essentiellement dictés par les facteurs microstructuraux, tels que :

- Des défauts de compactage
- Une mauvaise adhérence de la pâte de ciment au granulat
- Des microfissures dans la pâte de ciment et/ou dans le granulat
- Des pores d'air

Habituellement, on obtient une rupture en traction avec une surface de rupture qui suit la zone de contact entre la pâte de ciment et le granulat. Les granulats sont déchaussés. Si l'on améliore la qualité de la zone de contact, on obtient une résistance à la traction nettement plus élevée. Si elle s'approche de celle des granulats, la rupture se produit plutôt au sein du granulat que le long de la zone de contact.

➤ **Module d'élasticité :**

Le comportement à la déformation est une caractéristique importante du matériau. Ce comportement est représenté par la courbe contrainte/déformation (allongement). Le module d'élasticité d'un matériau correspond au rapport contrainte/déformation unitaire. Plus le module d'élasticité est élevé, plus la contrainte nécessaire pour déformer le matériau est élevée. Si le matériau a un comportement élastique linéaire, son module d'élasticité est une constante et le matériau retrouve exactement sa longueur initiale après retrait de la contrainte. Il suit donc la loi de Hooke.

I.3. LE GRANITE :

Le granite est une roche plutonique magmatique à texture grenue, riche en quartz, qui comporte plus de feldspath alcalin que de plagioclase. Il est caractérisé par sa constitution en minéraux : quartz, feldspaths potassiques (orthoses) et plagioclases, micas (biotite ou muscovite).

Le granite et ses roches associées forment l'essentiel de la croûte continentale de la planète. C'est un matériau résistant très utilisé en construction, dallage, décoration, sculpture, sous l'appellation granit.

Le granite est le résultat du refroidissement lent, en profondeur, de grandes masses de magma intrusif qui formeront le plus souvent des plutons, ces derniers affleurant finalement par le jeu de l'érosion qui décape les roches sus-jacentes. Ces magmas acides (c'est-à-dire relativement riches en silice) sont essentiellement le résultat de la fusion partielle de la croûte terrestre continentale. Certains granites (plagiogranites) rencontrés en petits plutons dans la croûte océanique sont, quant à eux, le résultat de la différenciation ultime de magmas basiques. Ses minéraux constitutifs sont principalement du quartz, des micas (biotite ou muscovite), des feldspaths potassiques (orthoses) et des plagioclases. Ils peuvent contenir également de la hornblende, de la magnétite, du grenat, du zircon et de l'apatite. On dénombre aujourd'hui plus de 500 couleurs de granite différentes.

La composition chimique moyenne du granite est représentée dans le Tableau I.3 :

Tableau I.3 : La composition chimique moyenne du granite

SiO ₂	74,5 %
Al ₂ O ₃	14 %
(Na ₂ O, K ₂ O)	9,5 %
d'oxydes (Fe, Mn, Mg, Ca).	2 %

Le granite est une roche acide (riche en silice) et dense (densité moyenne : 2,7).

Les plus gros monolithes granitiques du monde se trouvent dans le parc de Yosemite, en Californie. En réalité, le terme granite est souvent pris dans le sens plus large des granitoïdes, roches plutoniques avec plus de 20 % de quartz, indépendamment de la nature du ou des feldspaths qu'on y trouve.

La pierre naturelle, extraite directement de la Nature, c'est l'un des matériaux pour construction les plus anciens utilisés par l'homme tant pour sa grosse résistance que pour ses qualités ornementales.

D'entre les roches de type ornemental, le granit se distingue par sa dureté ainsi que sa résistance aux altérations, devenant ainsi un matériel fortement apprécié dans le domaine de la construction depuis l'antiquité, dont témoignent des nombreux monuments appartenant à différentes époques historiques et présentant de conditions optimales au niveau de la conservation. A titre d'exemple, quelques monuments situés à Estrémadure qui constatent par ailleurs la richesse en gisements en granit à grande qualité dont nous disposons depuis des temps immémoriaux.

Ces caractéristiques du granit sont déterminées par son appartenance au groupe de roches magmatiques, issues de la cristallisation de différents matériaux provenant du magma terrestre dont le refroidissement en profondeur et très lentement donne lieu à sa caractéristique texture à grains. Parmi les différents matériaux qui composent le granit, le quartz, le feldspath et le mica sont les principaux en proportion variable, composant des granits de types quartzifère, feldspathique ou micacé selon la prédominance de chacun, outre que ceux, d'autres matériaux que l'on peut trouver dans le granit sont l'apatite, des tourmalines ou des grenats.

Cette variété en ce qui concerne sa composition c'est la responsable que le granit, bien qu'il détienne dans l'ensemble des valeurs physico mécaniques de référence: masse volumique apparente entre 2,6 et 3 T/m³, masse volumique réelle entre 2,6 et 3,2 T/m³, coefficient d'absorption de l'eau compris entre 0,1 et 0,7% de son poids, résistance à la compression entre 80 et 270 MPa, résistance à la traction environ 3 MPa, résistance à la coupure de 8 MPa et résistance à l'usure entre 4 et 7cm³, présente-t-il d'importantes variations suite aux caractéristiques suivant le type et la provenance de la pierre. Parmi les principaux usages du granit en tant que roche ornementale, on peut souligner : parements et revêtements, sols et toitures pour extérieur (environ 50% de la demande), ornementation et art funéraire (environ 30%), mobilier urbaine (environ 10%) et des éléments complémentaires en construction et ouvrage d'intérieur (10% restant) [45].



Figure I.10 : Photo montrant le granite dans la nature

I.4. LE MARBRE :

Le terme « marbre » serait d'abord une appellation traditionnelle dérivée du grec marmaros, qui signifie "pierre resplendissante", (ensuite du latin marmor) et indiquait n'importe quelle pierre «lustrable », c'est-à-dire dont la surface pouvait être lustrée au moyen de polissage. Dans ce sens, l'appellation n'a pas de définition géologique précise et ne se réfère qu'à la capacité d'une roche à être polie et refléter la lumière. Pour les scientifiques, un marbre est une roche métamorphique dérivant d'un calcaire ou d'une dolomie sédimentaire ayant été transformée généralement par métamorphisme régional ou plus rarement par métamorphisme de contact. Dans ce processus de transformation de la roche originelle, les structures sédimentaires sont effacées et la roche carbonatée recristallise en un amas de cristaux de calcite et/ou de dolomie engrenés de dimensions millimétriques à centimétriques. Les intercalations argileuses, les minéraux détritiques ou les oxydes minéraux présents dans le carbonate originel donnent alors au marbre diverses colorations et vinages polychromes du plus grand effet esthétique.

En géologie le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire et constituée principalement de cristaux de calcite. En architecture, sculpture et marbrerie ce terme peut désigner n'importe quelle pierre difficile à tailler et capable de prendre un beau poli, dont les plus courantes sont les « vrais » marbres (au sens géologique).

Les marbres de la géologie présentent une grande diversité de coloris, bien que la couleur de base de la calcite soit le blanc. On y trouve fréquemment des veines appelées marbrures. Les veines et les coloris sont généralement dus à des inclusions d'oxydes métalliques. Certains types de marbre portent des noms particuliers, par exemple le cipolin ou la griotte. Certains marbres, comme le vert antique, composés de calcaire et de serpentine, sont des ophicalces.

En marbrerie et en histoire de l'art « marbre » désigne plus largement une pierre calcaire compacte (non poreuse et imperméable), ferme et solide, difficile à tailler (ne se taille pas avec une scie à dents), et surtout qui peut recevoir un beau poli. Dans ce cas il ne s'agit pas uniquement de roches métamorphiques, mais aussi de nombreuses roches calcaires sédimentaires non métamorphisées.

D'autre part, une acception plus ancienne du mot inclut n'importe quelle pierre « lustrable », c'est-à-dire suffisamment compacte et dure pour que la surface puisse être polie et lustrée. Certaines roches polies qui ne sont pas définies géologiquement comme du marbre ni du calcaire, telles les granites et les porphyres, qui sont des roches magmatiques silicatées, ont été appelées également « marbre » et sont encore fréquemment appelées ainsi dans le langage courant. Les marbres au sens large sont l'objet d'une industrie florissante depuis la plus haute Antiquité [45].

I.5. GESTION DES DECHETS SOLIDES :

I.5.1. Généralités sur les déchets :

A l'origine de toute mesure particulière visant les déchets, il y a l'hypothèse que la notion même de déchet peut être définie. Or la plupart des auteurs s'accordent à dire qu'il n'existe pour le moment aucune définition satisfaisante du déchet. En effet, suivant les acteurs impliqués et le contexte auquel on se réfère, la notion de déchet peut viser des objets de nature et de fonctions différentes.

Pour éviter les malentendus, les différents acteurs impliqués dans la gestion de l'environnement ont tenté de donner une définition au mot déchet. Il existe en réalité plusieurs définitions qui correspondent chacune à un objectif particulier. Chaque définition vise pour un groupe d'acteur à établir l'ensemble des objets qui devront faire l'objet d'un comportement particulier ou d'une attention particulière, mais c'est en dernier lieu la définition légale qui devra servir de référence [19].

I.5.2. Définition d'un déchet :

Le déchet est défini comme «Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon.».

D'après la loi du 15 juillet 1975 plus récemment la loi française du 13 juillet 1992 a introduit la notion de «déchet ultime » : « Est ultime un déchet résultant ou non du traitement des déchets et qui n'est plus susceptible d'être traité dans des conditions techniques et économiques du moment notamment par l'extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux » [20].

Plus récemment, la loi du 13 juillet 1995 précise : « A compter du 1^{er} juillet 2002, les installations d'élimination des déchets par stockage ne seront autorisées à accueillir que des déchets ultimes.». On peut alors conclure que des déchets ultimes seuls pourraient être acceptés en centre de stockage.

D'après ces deux définitions, la voie à suivre pour assurer une bonne gestion des déchets :

- Valorisation de la fraction « utile » des déchets.
- Réduction des caractères polluants ou dangereux.
- Stockage des résidus ultimes.

I.5.3. Cadre légal et réglementaire des déchets :

L'évolution qu'a connue l'Algérie, notamment en matière d'industrialisation, de modes de vie et de consommation, s'est bien entendu répercutée sur la production des déchets solides, que ce soit qualitativement ou quantitativement.

Afin de préserver l'environnement [46], L'Algérie a mise en place un certain nombre de lois et décrets relatifs à cette fin et qui obligent les générateurs et/ou détenteurs de déchets de les valoriser.

Si le déchet est habituellement défini comme un résidu abandonné par son propriétaire car inutilisable, sale ou encombrant, il a au regard de l'environnement, une définition juridique: est un déchet, au sens de la loi n°01-19 du 27 Ramadhan 1422 correspondant au 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, et plus généralement toute substance, ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou d'éliminer.

En plus de cette loi qui définit le déchet, l'Algérie possède d'autres lois et décrets relatif à la protection de l'environnement telle que [46] :

- Loi N° 83-03 du 05/02/1983, relative à la protection de l'environnement dont certains articles ont pour objet la protection des milieux récepteurs (Article 47) et la nécessité d'éliminer les déchets (Article 90).
- Décret N° 84-378 du 15/12/1984, fixant les conditions de nettoyage, d'enlèvement et de traitement des déchets solides urbains.
- Le décret exécutif N° 94-43 du 30/01/1994, fixant les règles de la conservation des gisements d'hydrocarbures et de la protection des aquifères associés (Article 185,178).
- Loi N° 01-19 du 12/12/2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
- Décret N°02-372 du 11/11/2002 relatif aux déchets d'emballages.

I.5.4. Aspects qualitatifs et quantitatifs :

Les déchets sont très divers. Aussi, on a coutume de designer en classes tirées selon leurs provenances, parmi lesquelles on distingue :

I.5.4.1. Les déchets ménagers et assimilés :

Ils proviennent de ménages et de tout ce qui est généré comme tel par les collectivités locales. Les services de collecte absorbent également une partie des déchets produits par diverses activités professionnelles, commerciales et artisanales.

La notion de résidu urbain recouvre tous ces déchets, plus ceux de la collectivité elle-même (les espaces verts, les boues de stations d'épuration....) [21].

I.5.4.2. Les déchets de l'agriculture et des industries agroalimentaires :

L'évolution de ses secteurs d'activité entraîne une importante quantité de déchets, essentiellement organiques qui ne sont plus toujours réutilisés sur l'exploitation.

I.5.4.3. Les déchets industriels :

Ils sont constitués par les résidus des procédés de production et de transformation (les déchets chimiques, les emballages souillés, impuretés, copeaux, solvants, rebuts,...).

I.5.4.4.Déchets fermentescibles :

Déchets composés de matière organiques biodégradables, elles regroupent essentiellement les déchets susceptibles de pourrir (épluchures de légumes, déchets de viande, tonte de gazon,...) les papiers et les cartons, le bois, les textiles sanitaires non synthétiques, et les matières plastiques en sont exclues.

I.5.5. Les principales catégories des déchets :

Au regard de la réglementation Algérienne existante, trois grandes catégories de déchets peuvent être retenues :

I.5.5.1.Les déchets inertes :

Un déchet est réputé inerte dès lors que l'on considère que son potentiel polluant par rapport à l'environnement est à peu près nul. On regroupe dans cette catégorie certains déchets minéraux des activités (mines, carrières) les déblais et les gravats, la fraction minérale des déchets de démolition, certains résidus de l'activité sidérurgique [20].

I.5.5.2.Déchets banals :

Un déchet est réputé banal dès lors qu'il peut être traité par les mêmes procédés que ceux utilisés pour les ordures ménagères. Cette catégorie est celle des ordures ménagères et des résidus urbains. On y range également des déchets d'origine industrielle ou commerciale qualifiée « d'assimilables aux ordures ménagères » car elles contiennent les mêmes composants bien qu'en des proportions différentes (emballage et chute en bois, plastique, papier, métaux...) [20].

I.5.5.3.Les déchets spéciaux :

Sont considérés comme déchets spéciaux tous les déchets qui doivent être traités par d'autres procédés que ceux utilisés pour les ordures ménagères. Ils sont majoritairement d'origine industrielle mais également produit par les ménages (déchets toxiques en quantité dispersée DTQD) ou l'activité agricole (les déchets phytosanitaires). Ils contiennent des substances nocives en quantité variable, certains d'entre eux, du fait de leur potentiel toxique sont soumis à des contrôles et des réglementations spécifiques, ce sont les déchets toxiques et dangereux [20].

La majeure partie des déchets solides industriels algériens est produite par les industries de transformation, notamment l'industrie chimique, l'industrie des minéraux et l'industrie mécanique et électrique. Le tableau I.4 résume la nature de ces déchets ainsi que les quantités produites par an :

Tableau I.4 : Différents types de déchets [22]

Nature des déchets industriels dangereux générés par l'industrie nationale	Quantité (tonnes/an)
Déchets d'origine minérale	55.000
Boues minérales	18.000
Résidus de pétrochimie et cokéfaction	25.000
Solvants organiques et résidus de peinture acide	4.000
Acides	3.000
Boues métalliques et électriques	2.000
Résidus issus de la fabrication et du traitement du plastique	2.500

L'examen de la répartition des déchets industriels sur le territoire national permet de se rendre compte que plus de 82% de ces déchets sont générés par quatre Wilaya, à savoir Annaba, Média, Tlemcen et Oran dont 38.024.000 tonnes de ces déchets sont actuellement stockés dans les entreprises, 37.680.400 tonnes sont des déchets pondéraux et 344.000 tonnes des déchets dangereux ou toxiques [22].

Une estimation des déchets polluants basée sur un échantillon d'environ 100 unités de production du secteur public, permet d'obtenir un ordre de grandeur significatif de la pollution générée par l'activité industrielle en Algérie. Les résultats de la simulation montrent qu'à l'échelle nationale, les entreprises industrielles génèrent par an [22] :

- Plus de 55.00 tonnes de DBO₅ (demande biologique en oxygène au bout de 5 jours).
- Plus de 134.00 tonnes de matière en suspension.
- Plus de 8.000 tonnes de matière azotées.

I.5.6. Stratégie de de gestion et filières de traitement :

Les stratégies de traitement des déchets s'appuient sur deux grands principes.

- Il faut prendre en compte simultanément les notions de matière, d'énergie, d'environnement et d'économie. Au plan plus particulier de l'environnement, il y a lieu de bien considérer l'ensemble de l'impact des déchets sur l'environnement et l'impact possible de la mise en œuvre de chaque stratégie.
- Dès lors que ces stratégies ont pour objectif le retour des déchets dans le milieu naturel, il y a lieu de s'inspirer des lois qui régissent le fonctionnement de ce milieu. Ces lois existent à travers les cycles biogéochimiques qui régissent la circulation des éléments chimiques dans les différents milieux physiques (air, eau, sol) et les espèces vivantes (végétaux et animaux). Au niveau de ces dernières il faut retenir qu'elles assurent la circulation de la matière à travers la trilogie représentée dans la figure I.11 [21].

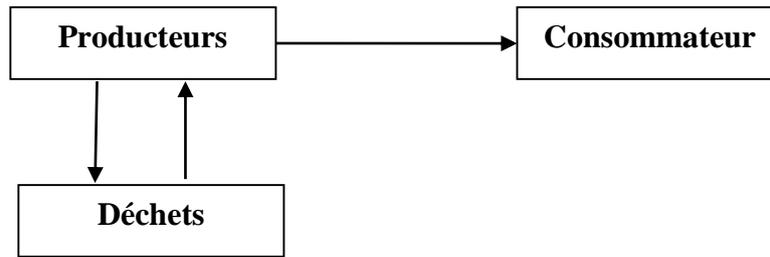


Figure I.11 : Relation producteurs - consommateurs

I.5.7. Stratégies de gestion des déchets :

Il existe cinq stratégies de gestion des déchets [22] :

I.5.7.1. Arrêt de la production du déchet :

Les problèmes, souvent liés à l'impact sur l'environnement ou à la santé humaine, peuvent conduire à la nécessité de cesser l'activité à l'origine de la production de tel ou tel déchet.

I.5.7.2. Optimisation et innovation technologique :

Réduire les quantités de déchets produits et leur toxicité. Cet objectif peut être atteint progressivement au niveau de la minimisation des déchets et de l'optimisation de l'utilisation des matières premières et de l'énergie par le recours à la dépollution dans un premier stade et à la non-pollution dans un second stade. La non-pollution peut être le résultat de l'optimisation du procédé, de sa modification, voire d'un changement de procédé.

I.5.7.3. Mise en œuvre d'une politique de recyclage, de valorisation et de réutilisation des déchets de la production et de la consommation :

C'est dans ce domaine que se situe l'essentiel des possibilités de gestion et de traitement des déchets.

I.5.7.4. Rejet "éco-compatible" des déchets :

Cette stratégie est fondamentale. Dès lors qu'aucune des trois premières stratégies n'est plus envisageable, il y a lieu d'assurer un retour « acceptable » des déchets produits dans un milieu naturel. L'acceptabilité ou éco-compatibilité, peut être définie par le fait que des déchets sont intégrés aux cycles biogéochimiques sans entraîner de dysfonctionnement prévisibles ou identifiables. Cet objectif peut être atteint soit par des voies de valorisation (réutilisation du déchet comme amendement en agriculture par exemple), soit après transformation chimique ou conditionnement.

I.5.7.5. Stockage :

Le stockage ne constitue pas une stratégie à proprement parler. Il s'agit de la dernière étape de tout traitement débouchant sur un déchet ultime auquel il faut bien trouver un exutoire.

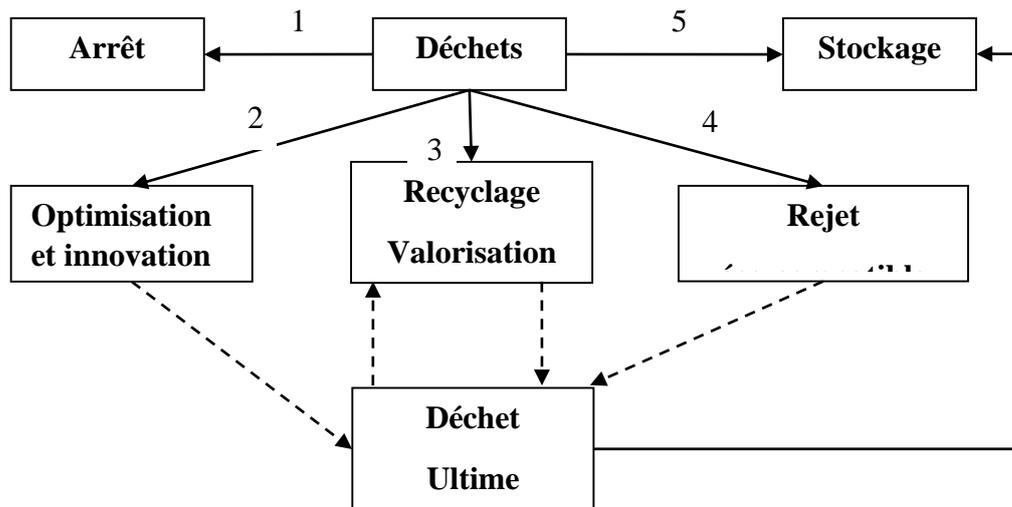


Figure I.12 : Stratégie de gestion des déchets

I.5.8. Traitement interne et traitement externe :

Les stratégies préventives (arrêt de la production et optimisation) ne peuvent être mises en place qu'au sein de l'entreprise productrice du déchet visé. Pour les stratégies de traitement, deux possibilités existent : une mise en œuvre directement par le producteur de déchet, on parle alors de traitement interne, ou le recours à une entreprise spécialisée dans le traitement des déchets, auquel cas on parle de traitement externe. Les deux modes de traitement concernent des quantités de déchets équivalentes [22]

Le traitement interne à l'avantage de limiter les transports de déchets. Cependant, la maîtrise d'une installation de traitement requiert parfois des compétences que les petites entreprises ne possèdent pas nécessairement. Ceci se traduit par un mauvais fonctionnement des installations et un problème de pollution chronique qui pourrait être évité par un recours au traitement externe.

Enfin, dans le cas des grandes entreprises (pétrochimie, sidérurgie...), les installations de traitement interne peuvent être assimilées à des installations de traitement externe étant donné les quantités importantes de déchets qu'elles reçoivent et la provenance de ces déchets issus parfois d'usines éloignées.

Les questions que se pose un producteur de déchets ne sont pas les mêmes suivant qu'il envisage une solution externe ou interne. Dans le premier cas, il cherchera principalement à savoir où faire traiter le déchet produit alors que, dans l'autre cas, il devra identifier comment le traiter.

I.5.9. Filières de traitement des déchets :

Seules les stratégies de valorisation, de rejet éco-compatible et de stockage concernent directement la gestion des déchets. Leur mise en œuvre concrète passe par un certain nombre de filières techniques, elles s'articulent autour des objectifs généraux suivants :

- Valorisation énergétique
- Valorisation en matière première organique et minérale
- Valorisation en sciences des matériaux
- Valorisation en agriculture et agro-alimentaire
- Valorisation en technique de l'environnement

➤ Technique dite d'élimination.

Chacun de ces objectifs peut être atteint en faisant appel à un nombre limité de filières techniques (Tableau 0.6).

I.5.10. Filières d'élimination des déchets :

Longtemps réduite à la seule solution de l'abandon incontrôlé, l'activité « d'élimination » donne maintenant lieu au développement d'outils techniques qui utilisent les plus récents acquis scientifiques. L'objectif est d'aboutir à un « déchet ultime » le moins actif et dangereux possible, qui seront mis en décharge dans des sites rigoureusement contrôlés et spécialement agencés [21].

Les différentes filières possibles d'élimination sont représentées sur le tableau I.5.

Tableau I.5 : Filières de traitement des déchets

OBJECTIFS	FILIERE	EXEMPLE
Valorisation énergétique	1	Combustion Incinération des ordures ménagères, de pneu, de solvant
	2	Elaboration de combustibles dérivés : Procédés mécaniques (broyage, tri, Séchage...) Combustibles extraits des ordures ménagères Plaquettes de sciure Charbons pauvres enrichis
	3	Elaboration de combustibles dérivés : Procèdes biologiques (biogaz, alcool) Biogaz des décharges Alcools issus de déchets sucrés...
	4	Elaboration de combustibles dérivés : Procèdes thermiques (pyrolyse, gazéification...) Charbons issus de la biomasse Pyrolyse des matières plastiques et des pneus...
Valorisation de matières plastiques	5	Matières premières minérales (naturelles et de synthèse) Alcools, sucres, protéines Solvants, huiles de synthèse
	6	Matières premières minérales (métalliques et non métalliques) Récupération de fer, aluminium Récupération de soufre, acides chlorhydriques et sulfuriques...
Valorisation en sciences des matériaux	7	Liants hydrauliques et matériaux de structures Valorisation des cendres volantes de centrales thermiques, des laitiers de hauts fourneaux Utilisation de déchets plastiques en terrassement
	8	Verre et céramiques Recyclage du verre
	9	Matières plastiques et caoutchoucs Recyclage des plastiques Recyclages des pneus...
	10	Fibres cellulosiques de récupération Récupération du papier et recyclage Déchets de textiles utilisés en papeterie
	11	Autres matériaux Utilisation en arts plastiques

			Multiples usages des pneumatiques...
Valorisation en agriculture et agro-alimentaire	12	Elaboration d'amendements organiques	Compost urbain Boues de stations d'épuration
	13	Elaboration d'amendements minéraux	Scories potassiques et chaux résiduaires Déchets ammoniacaux
	14	Alimentation animale	Déchets de restauration Déchets de laitiers, abattoirs...
Valorisation en technique de l'environnement	15	Epuration des effluents liquides et gazeux	Sulfate ferreux résiduaire en floculation des eaux Boues biologiques en désodorisation des gaz Filtration sur déchets minéraux broyés
	16	Conditionnement de déchets toxiques par d'autres déchets	Utilisation de déchets liants hydrauliques, de déchets plastiques et de verre en solidification - stabilisation
Filières d'élimination	17	Incinération et autres procédés thermiques	Destruction de déchets toxiques, déchets hospitaliers, effluents pollués
	18	Traitements biologiques	Stabilisation aérobie de boues
	19	Traitements physico-chimiques et chimiques	Neutralisation, oxydation, complexation, inertage, détoxification partielle...
	20	Mise en décharge	Décharges traditionnelles Mines de sol...

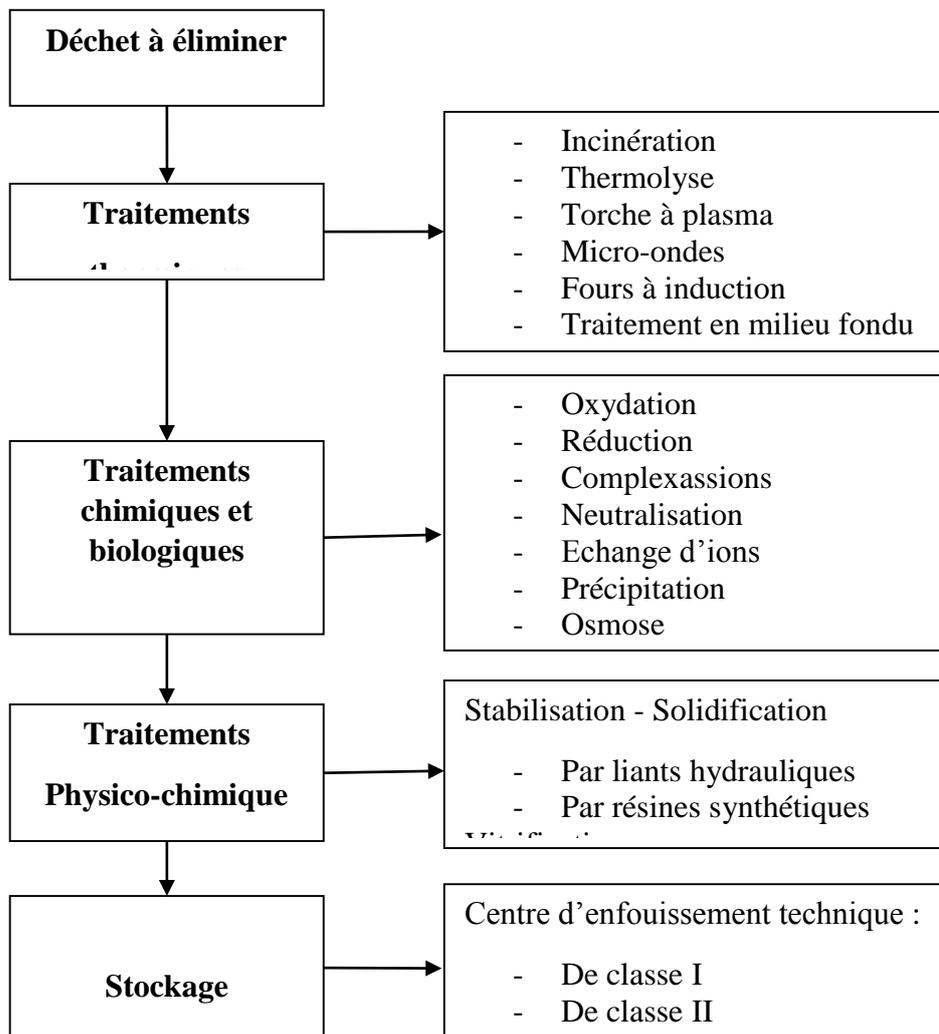


Figure I.13 : Différents traitements possibles pour éliminer les déchets

Cette partie met en évidence la diversité des déchets, notamment industriels ainsi que leurs effets néfastes sur l'environnement en générale et la santé humaine en particulier. Elle marque aussi la nécessité de gérer ces déchets, comme elle présente les différents modes et techniques de leur traitement.

Pour notre déchet qui est un déchet pétrolier solide issu de l'activité industrielle, on a opté pour le traitement suivant le procédé de stabilisation/solidification, aussi on présente dans le chapitre suivant les généralités sur ce procédé.

I.6. PRESENTATION DE L'ENTREPRISE TIMAGAD MARBRE :

I.6.1. Localisation :

Le site TIMGAD Marbre est situé dans la commune de Baraki wilaya d'Alger, non loin de plusieurs communes telles que : Oued Smar, El Harrach, Sidi Moussa, etc....

Le site TIMGAD Marbre est limité :

- Au Nord par route communal
- A l'Ouest par chemin de wilaya

- Au Sud par habitation+ terrain
- A l'Est par habitation

Coordonnées géographiques :

- Latitude 36°39'59.2"N
- Longitude 03°05'10.8"E

I.6.2. Données administratives :

- **Forme juridique :** SARL
- **Tel :** 021 53 32 73/066141 34 81/0561 61 53 51
- **Fax :** 021 53 37 67/021 76 90 72
- **E-mail :** rtingad@hotmail.fr
- **Site web :** www.timgadmarbre.com
- **Adresse du siège :** CW114 Baraki Alger
- **Activité :** importation et transformation du marbre et de granite
- **Superficie totale :** 15 000 m²

I.6.3. Historique :

La société TIMGAD Marbre crée en l'an 2000, représente l'une des plus importantes sociétés en Algérie spécialisé dans l'importation et l'exportation, fabrication et commercialisation des pierres naturelles principalement granite et marbre provenant des plus belles carrières du monde [23].

I.6.4. L'organigramme de la société TIMGAD Marbre :

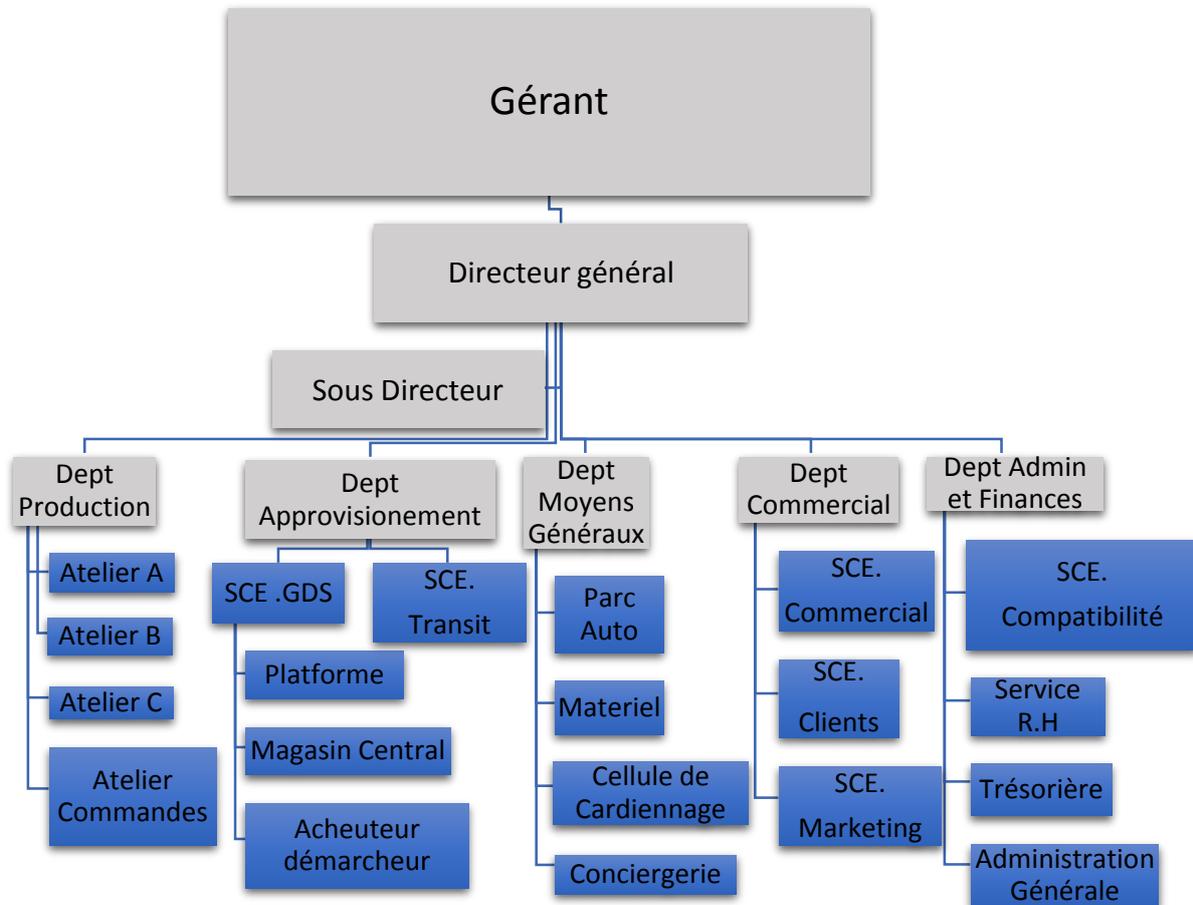


Figure I.14 : L'organigramme de la société TIMGAD Marbre

I.6.5. Diagramme de fabrication [23] :

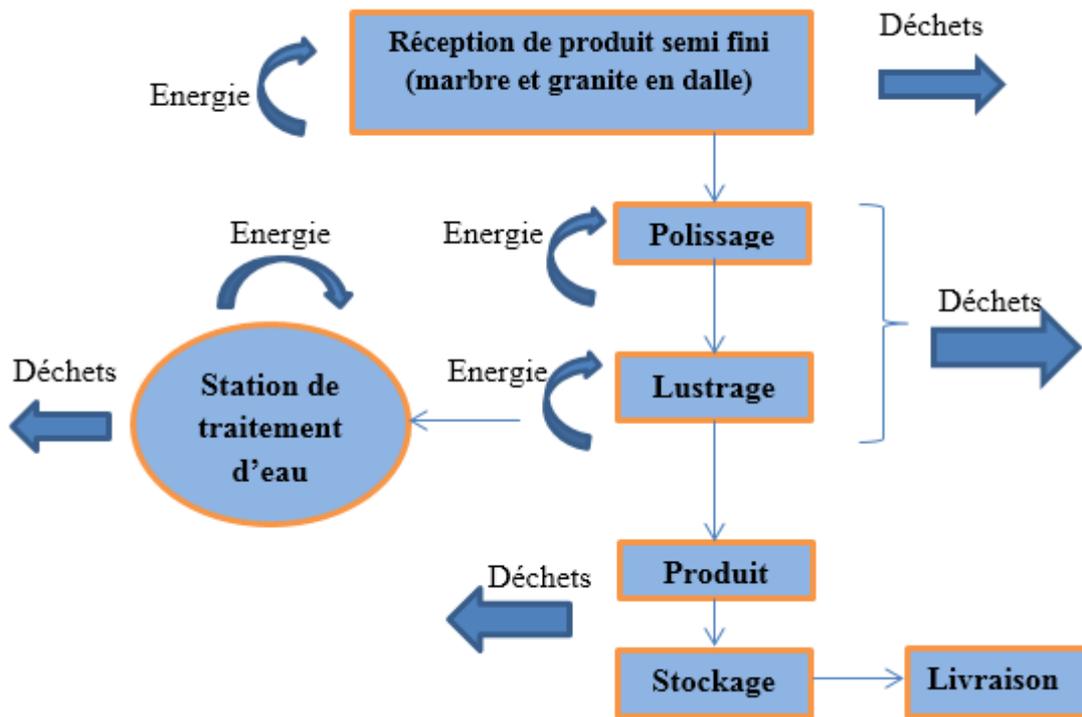


Figure I.15 : Diagramme de fabrication

I.6.6. Procèdes de traitement de marbre et de granite :

La fabrication de marbre et de granite suit un procédé facile. L'activité de la société TIMGAD Marbre consiste à transformer le marbre et le granite semi fini (brut) en dalles à l'état fini, en introduisant ces dernières dans l'une des machines de polissage afin de subir l'opération de polissage et de lustrage.

Polissage : permet l'élimination des vibrations et donc permet un polissage parfait.

Lustrage : comme son nom l'indique, sert à redonner du lustre au marbre ou au granite.

I.6.7. Procédé de traitement des eaux usées issues du procédé de traitement de marbre et de granite :

L'eau a de nombreuses applications dans la fabrication du marbre et du granite .de la coupe au polissage. L'eau est nécessaire pour réduire la poussière produite lors des différentes procédures.

Par la suite l'eau doit être traitée afin d'être réutilisée dans un cycle fermé de production ou d'être évacuée en toute sécurité dans l'environnement.

Le filtre-presse déshydrate les boues en extrayant toute l'eau (jusqu'à 90% de récupération) formant des boules de pate de boue pulpe sèche, transportable et prête pour une réutilisation.

I.6.8. Déchets solides et liquide :

Ce point caractérise l'origine, la nature et les flux de déchets de la société TIMGAD Marbre. Le terme déchet désigne ici tous résidus solides ou liquide, hors effluents industriels liquides qui peuvent être générés par le site.

I.6.8.1. Source de déchets :

Les déchets générés par l'activité de traitement du marbre et de granite :

Tableau I.6 : Nature et quantité des déchets de l'entreprise TIMGAD MARBRE

Nature de déchet	Quantité par an	Type de traitement ou condition de gestion	Lieu de stockage
Boues sèche	70 tonnes	Enlevé régulièrement du site vers la décharge.	Zone de déchet
Chutes de marbre et granite	3000 m ²	Revendu	Zone de déchet



Figure I.16 : Boues sèches du marbre



Figure I.17 : Boues sèches du granite



Figure I.18 : pâte de granite



Figure I.19 : pâte de marbre

Cette bous sèches de marbre et de granite est comme une pate facile à broyer à la main.

I.6.8.2. Description des conditions de gestion des déchets :

La gestion des déchets contribue, par ordre de priorité, à la réalisation des objectifs suivants :

- La prévention de la production et de la nocivité des déchets.
- La réduction de la production et de la nocivité des déchets.
- L'élimination des déchets de manière économiquement appropriée.

Les déchets ménagers générés par la société TIMGAD MARBRE sont stockés dans des récipients spécialement prévus à cet effet. Ces derniers sont adaptés, selon les meilleures connaissances techniques, au type de déchet qu'ils contiennent.

Pour ce qui est des déchets générés par l'activité :

- Boues sèches : elles sont stockées dans une aire de stockage spécifique à cet effet. Elles sont ensuite orientées vers la décharge publique.
- Les chutes de marbre et granite sont revendues à des professionnels qui les utilisent soit comme de la casse pour revêtement au sol, ou sous formes de poudre après broyage pour les revêtements des murs ou encore dans la confection d'objets lampe, artisanat.

I.7. VALORISATION DE L'AJOUT POUVRE DE MARBRE ET GRANITE DANS LES BETONS :

L'utilisation du déchet poudre de marbre et granite est très nécessaire, d'une part pour éviter la pollution de la nature et d'autre part pour protéger les ressources naturelles. Actuellement, la poudre de marbre est l'une des additions minérales les plus utilisées dans la production du béton dans le monde entier notamment en Turquie. Ce pays est très riche en marbre. Il possède 700 carrières, 250 types de marbre et des réserves qui représentent 40% des réserves mondiales [24] [25]. Peu des travaux traitant l'effet de l'incorporation de la poudre de marbre (PM) sur les bétons et les mortiers ont été publiés. Topçu et al. [26] Ont étudié l'effet des PM sur les propriétés des BAP.

Ces auteurs ont trouvé qu'une teneur en PM de 200 (kg /m³) est appropriée pour améliorer les propriétés des BAP à l'état frais et durci. Guneyisi et al. [27] ont montré que l'introduction de PM dans les mortiers autoplaçants par substitution partielle au ciment conduit vers l'augmentation du temps d'écoulement TV et du temps de début et de fin de prise, tandis qu'elle diminue la résistance à la compression et la vitesse de propagation d'ondes. Ergun [28] a rapporté que le remplacement de 5% du ciment par de PM améliore la résistance à la compression des bétons conventionnels en raison de sa grande finesse (5960 g/cm²). Aruntas et al. [29] ont étudié la possibilité de produire des ciments composés contenant des déchets de marbre. Ces auteurs ont rapporté qu'il est possible de réduire le coût de production du ciment en utilisant 10% des déchets de marbre.

I.8. CONCLUSION :

L'utilisation des additions minérales est très bénéfique tant au niveau environnemental, technologique qu'économique.

Les émissions de CO₂ lors de la fabrication du ciment sont d'autant plus basses que la proportion d'addition est élevée dans le ciment.

L'entreprise TIMAGAD MARBRE génère deux types de déchets : les boues sèches et les chutes de marbre et granite qui sont revendues. Par conséquent, on s'intéressera dans notre travail à démontrer la possibilité de valoriser les boues sèches (poudre) de marbre et de granite afin de les utiliser comme additions minérales dans les bétons et les mortiers.

Chapitre II : Caractérisation des matériaux et méthode d'essais

II.1. INTRODUCTION :

Il est indispensable pour appréhender un matériau de le caractériser, c'est-à-dire d'en analyser les propriétés, il existe de nombreuses techniques de caractérisation des matériaux qui reposent sur différents principes.

Ce chapitre traite la caractérisation des déchets de marbre et de granite et la caractérisation des différents matériaux utilisés pour la confection des bétons. On y présente aussi les essais et la méthode choisie pour la formulation du béton.

II.2. CARACTERISTIQUES DES DECHETS UTILISE :

II.2.1. Analyse chimique :

L'analyse chimique des deux poudres de marbre et de granite se fait par la technique ICP-AES, ICP-MS qui est une technique analytique à plasma à couplage inductif permettant de mesurer la teneur d'un élément présent dans un échantillon.

La composition chimique des deux poudres est représentée dans le tableau suivant :

Tableau II.1 : Analyse chimique

Echantillon	Teneur en (%)										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	PF
Granite	58.61	12.04	2.89	10.28	0.99	0.04	3.74	2.82	0.07	0.24	8.27
Marbre	1.10	0.32	0.14	52.23	1.66	0.34	0.05	0.90	0.04	0.01	43.31

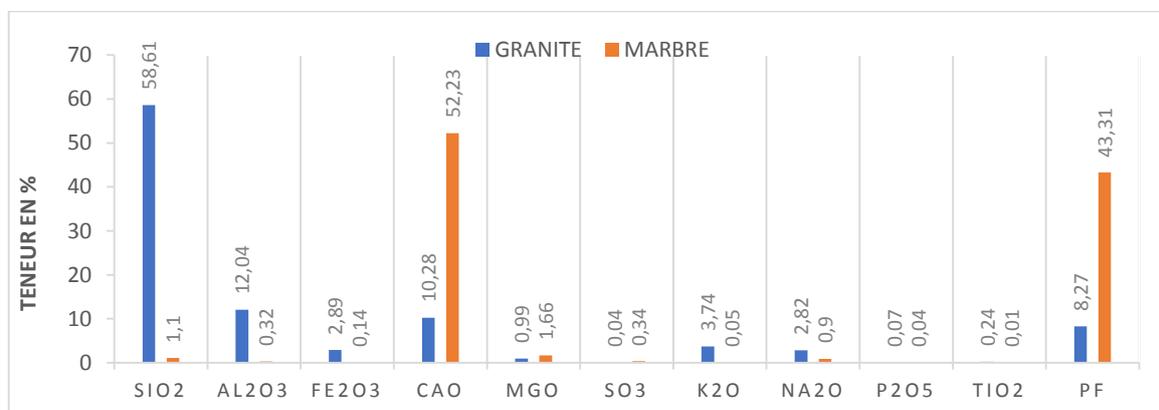


Figure II.1 : Représentation de la composition chimique des déchets

II.2.1.1. Interprétation en fonction des composants dominants et leur influence sur le béton :

On remarque que le dioxyde de silicium SiO₂ est le composé dominant dans la composition du granite, donc la silice réagit avec la chaux durant l'hydratation du ciment et favorise la formation des silicates de calcium hydratés (gel C-S-H) : $\text{SiO}_2 + \text{Ca(OH)}_2 \longrightarrow \text{CSH}$

Le composé dominant dans la composition du marbre est l'oxyde de calcium CaO ou la chaux vive. La réaction de la chaux vive avec l'eau donne ce qu'on appelle la chaux aérienne. Elle constitue en particulier d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂).

la réaction de ce dernier avec le SiO_2 du sable selon l'équation chimique précédente favorise aussi la formation du CSH. Sa haute réactivité augmente l'homogénéité du mélange et réduit la porosité et la perméabilité du béton.

En outre ; on remarque aussi que le composé Al_2O_3 a une teneur de 12.04% dans la composition du granite. Al_2O_3 avec l'eau forme une pâte qui n'adhère pas fortement, mais qui résiste à la température, à l'oxydoréduction et aux acides. Il existe des bétons contenant 50 % de Al_2O_3 dit bétons réfractaires. Ces derniers sont applicables dans tout environnement exigeant une résistance aux températures élevées.

II.2.2. Détermination de la finesse par méthode de Blain :

Le test de Blain, dit perméabilité à l'air, est une méthode de mesure de la finesse d'une poudre, donne une mesure exprimée en termes de surface spécifique (cm^2/g). Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau II.2 : La finesse par méthode de Blain et la masse volumique

Echantillon	Masse volumique (g/cm^3)	Finesse suivant la méthode de Blain (cm^2/g)
Granite	2.64	5366
Marbre	2.71	4915

II.2.3. Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique des deux poudres de granite et de marbre se fait par la pipette de ROBINSON. Cette méthode est basée sur la différence de vitesse de sédimentation entre les particules légères et les plus grosses.

Tableau II.3 : Analyse granulométrique des déchets

Echantillon	Teneur en particules en %		
	Sableuses	Poussiéreuses	Argileuses
Granite	14.8	64.24	20.96
Marbre	0.74	63.98	35.28

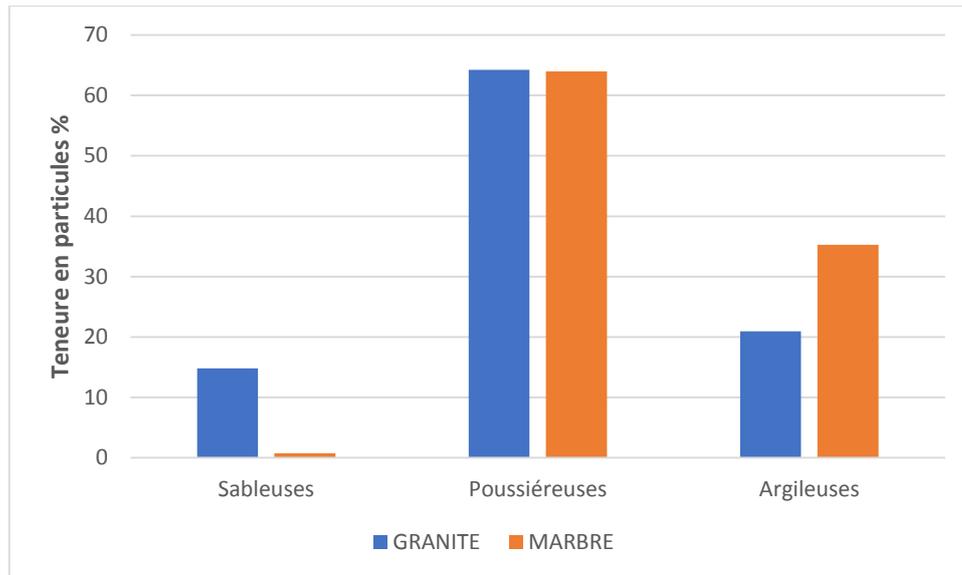


Figure I.2 : Représentation de la granulométrie des déchets

II.3. LES MATERIAUX UTILISE :

II.3.1. Granulats :

On a utilisé trois fractions granulaires dans notre étude :

- Sable 0/5 et sable de dune.
- Gravier 8/16.
- Gravier 15/25.

II.3.2. Ciment :

Le ciment utilisé, est un ciment portland composé [30] CPJ CEM II/A 32.5, de la cimenterie de MEFTAH. Il est livré dans des sacs de 50 kg. Le ciment Portland composé CPJ CEM II/A 32.5 résulte de la mouture : d'au moins 80% de CLINKER PORTLAND, du complément à 100% d'un ou plusieurs constituants secondaires : (Laitier, filer calcaire...) ; de sulfate de calcium sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.

La valeur moyenne de la résistance à 28 jours et de l'ordre de 45 MPa, la majorité des résultats obtenus se situe entre 32.5 et 52.5 MPa.

Ces deux dernières valeurs sont les limites inférieure et supérieure de la classe de résistance du CPJ CEM II/A 32.5. En tout état de cause, les valeurs minimales garanties sont :

175 Bars (17.5 MPa) à 7 jours.

325 Bars (32.5 MPa) à 28 jours.

II.3.3. Eau de Gâchage :

L'eau de gâchage utilisée pour la confection est une eau potable du robinet sans traitement supplémentaire.

Si c'est une eau autre que potable, on doit prendre le soin de vérifier par des analyses qu'elle ne contient pas des éléments en quantités telle qu'elle pourrait porter préjudice à la prise, au durcissement et à la durabilité du béton ou provoquer la corrosion des armatures.

Les limites requises par les spécifications sont :

- Matières en suspension \leq 2gr/litre.
- Sels dissous \leq 15gr/litre.

A titre d'indication, l'eau de gâchage pour la confection doit répondre aux prescriptions de la norme « **NF P 18 303** » [9]

II.4. CARACTERISATION ET CHOIX DES GRANULATS :

Les caractéristiques physiques et mécaniques du béton hydraulique frais et durcis sont directement liés aux granulats (sable et gravier), il est donc nécessaire de caractériser et d'optimiser au maximum les matériaux utilisés.

Le choix et la caractérisation moyennant une série d'essais au laboratoire, nous permettront de déterminer les caractéristiques mécaniques, physiques et géométriques.

II.4.1. Echantillonnage et prélèvement :

Les essais que nous avons réalisés au laboratoire, ont porté sur des échantillons obtenus par des prélèvements sur les tas puisqu'il s'agit de granulats qui sont mis en stock. Lorsqu'un matériau granulaire est mis en stock, les gros éléments ont tendance à rouler en bas du tas tandis que le haut est plus riche en éléments de faibles diamètres.

On prélève donc les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulats, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble. Ces diverses fractions seront mélangées avec soin.

II.4.2. Analyse granulométrique [10] :

L'analyse granulométrique permet de classer et de définir d'après la grosseur des grains qui les composent, les différents matériaux employés dans la construction. Pour effectuer ce classement, on se sert d'une série de tamis et de passoires.

Par définition, un tamis comporte des mailles carrées constituées par des fils qui se croisent et une passoire comportant des trous ronds pratiqués dans une tôle.

Les résultats de l'analyse granulométriques sont représentés dans la courbe granulométrique. En abscisse et sur une échelle logarithmique on porte les dimensions des tamis et passoires (tamis de 4 mm est équivalent à une passoire de $4 \times 1.25 = 5$ mm).

En ordonnées, on porte une échelle graduée de 0 à 100 % où figurent les fractions cumulées, passant à une maille déterminée. On obtient ainsi une série de points que l'on relie par les segments de droites, l'ensemble ainsi obtenu s'appelle : courbe granulométrique et représente ce que la terminologie officielle appelle la granularité du granulat [10].

Les résultats de l'analyse granulométrique des différents granulats sont représentés sur le Tableau II.4 et la Figure II.3

Tableau II.4 : Analyse granulométriques des granulats

GRANULATS		SABLE		GRAVIER 8/16		GRAVIER 15/25	
		Poids = 300 g		Poids = 2 Kg		Poids = 5 Kg	
		Refus (g)	Tamisât (%)	Refus (g)	Tamisât (%)	Refus (g)	Tamisât (%)
Diamètre des tamis (mm)	25	/	/	/	/	47.1	99.05
	20	/	/	13	99,30	957.6	79.86
	16	/	/	264.3	86,09	1775.2	44.41
	14	/	/	/	/	1150	21.34
	12,5	/	/	1281.3	22,02	622	8.9
	10	/	/	227.9	10,63	324.3	2.4
	8	/	/	182.6	1,50	120	0.0
	6,3	/	/	29.9	0,00	/	/
	5	0	100	0	0,00	/	/
	3,15	18.5	92.16	/	/	/	/
	2,5	56.5	73.33	/	/	/	/
	1,25	126	31.33	/	/	/	/
	0,63	58	12	/	/	/	/
	0,315	19	5.6	/	/	/	/
	0,125	10	2.3	/	/	/	/
0,08	7	0.0	/	/	/	/	

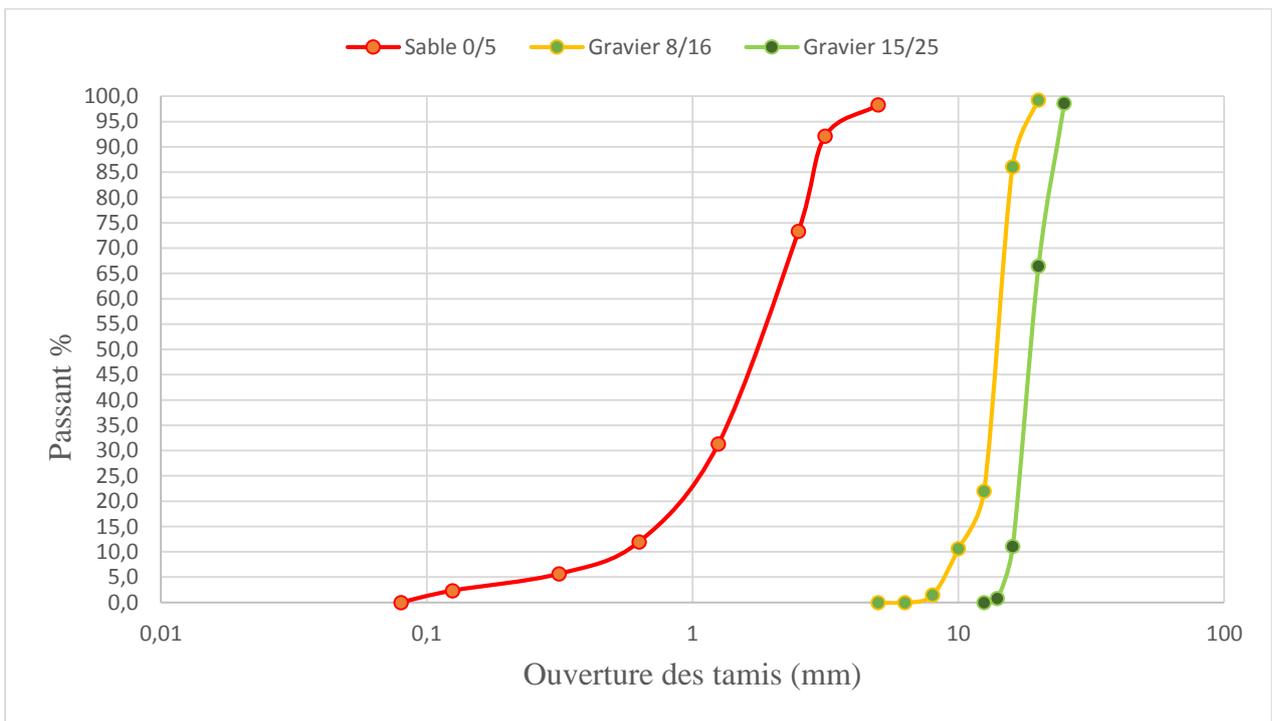


Figure II.3 : la courbe granulométrique

II.4.3. Essai d'équivalent de sable [11] :

L'essai d'équivalent de sable permet de mesurer la propreté de sable entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les particules fines d'un poids défini de sable par une solution floculante, qui a pour but de mettre en suspension les éléments argileux. On laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, après agitation (90 cycles de secouage en 30 s), on mesure une hauteur (H1) qui correspond au sédiment et (H2) au sédiment + floculat.

L'équivalent de sable est donné par : **ES = (H1 / H2)**. [11]

Les résultats obtenus sont représentés dans le Tableau II.5 :

Tableau II.5 : Les résultats de l'essai équivalent de sable

	H1 (cm) à vue	H2 (cm)	H1 (cm) par piston	ES à vue(%)	ES à piston(%)
Essai 1	7.9	9.2	7.8	85.87	84.78
Essai 2	8	9.3	7.7	86.02	82.80
La moyenne	/	/	/	85.95	83.79

Notre sable présente un ES à vue de **85.95 %** et **83.79 %** au piston. Ce sable est jugé propre et convient aux bétons de qualité.

II.4.4. Module de finesse:

C'est un coefficient servant à caractériser la grosseur d'un sable pour béton. Un sable grossier est représenté par un coefficient élevé ($2.8 < Mf < 3.2$), un sable fin par un coefficient plus faible ($1.8 < Mf < 2.2$) et un sable moyen par ($2.2 < Mf < 2.3$) qui est préférentielle pour la confection des bétons. [12]

Le module de finesse d'un sable est égal au centième de la somme des refus cumulés, exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante : 0,16 – 0,315 – 1,25 – 2,50 – 5 mm comme il est montré dans le Tableau II.6 :

Tableau II.6 : Les pourcentages du poids du refus cumulé

Tamis (mm)	Poids du refus (g)	Poids du refus cumulé (g)	Pourcentage du Poids du refus cumulé(%)
5	0	0	0
2,5	56.5	56.5	18.8
1.25	126	182.5	60.8
0.63	58	240.5	79.9
0.315	19	259.5	86.4
0.16	10	269.5	89.8

$Mf = 3.3$ donc $2.8 < Mf < 3.3$ c'est-à-dire que le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables

II.4.4.1. Validation du sable :

Deux sables sont disponibles, il est possible d'utiliser la règle d'Abrams

Module de finesse optimal $Mf_{opt} = 2.5$

- Sable 0/5 : $Mf_1 = 3.3$
- Sable de dune : $Mf_2 = 1.3$

La quantité nécessaire à partir du sable de dune pour obtenir un mélange avec un $Mf_{opt} = 2.5$:

$$S_2 = \frac{Mf_1 - Mf_{opt}}{Mf_1 - Mf_2} = \frac{3.3 - 2.5}{3.3 - 1.3} = 0.32$$

Et on sait que :

$$S_1 + S_2 = 1$$

Tel que :

- S_1 : la quantité du sable 0/5 en (%).
- S_2 : la quantité du sable de dune en (%).

Donc 32% de sable de dune et 68% de sable 0/5.

II.4.5. Masse volumique apparente :

Les masses volumiques apparentes des granulats [13] sont représentées dans le Tableau II.7 :

Tableau II.7 : Résultats de l'essai de la masse volumique apparente

Echantillons	Masse volumique apparente (g/cm ³)			La moyenne (g/cm ³)
	1	2	3	
Sable 0/5	1.26	1.24	1.16	1.22
Gravier 8/15	1.39	1.45	1.48	1.44
Gravier 15/25	1.43	1.44	1.45	1.44

II.4.6. Masse volumique absolue :

Les masses volumiques absolues des granulats [13] sont représentées dans le Tableau II.8 :

Tableau II.8 : Résultats de l'essai de la masse volumique absolue

Echantillons	Masse volumique absolue (g/cm ³)			La moyenne (g/cm ³)
	1	2	3	
Sable 0/5	2.41	2.32	2.38	2.37
Gravier 8/15.	2.73	2.70	2.73	2.72
Gravier 15/25.	2.75	2.79	2.74	2.76

II.4.7. Absorption d'eau :

Cet essai est effectué conformément à la norme française P 18-555 [29]. Pour cela, un échantillon de sable est plongé dans l'eau pendant 24 heures à 20°C et à la pression atmosphérique normale. A l'issue des 24 heures, on effectue sa pesée. Puis on calcule l'augmentation de masse par rapport à sa masse sèche. Enfin, on obtient le coefficient d'absorption d'eau en effectuant le rapport de l'augmentation de masse à la masse sèche initiale.

Pour nos granulats nous avons (voir le Tableau II.9) :

Tableau II.9 : Résultats de l'essai d'absorption d'eau

	Masse Sèche (g)	Masse Humide (g)	Coefficient d'absorption (%)
Sable 0/5	300	305.2	1.7≤5
Gravier 8/16.	300	302.2	0.73≤5
Gravier 15/25	300	303.1	1.03≤5

On a trouvé que les coefficients d'absorption de notre granulats sont inférieurs à 5% ce qui répond bien aux exigences de la norme.

II.4.8. La Porosité :

La porosité est déterminée par le rapport du volume des vides renfermés dans les grains accessibles à l'eau, au volume réel de l'échantillon. Les résultats de notre essai sont représentés dans le Tableau II.10 :

Tableau II.10 : Résultats de l'essai de la porosité

Les fractions (mm)	Sable 0/5	Gravier 8/16.	Gravier 15/25
La porosité (%)	2.1	3.6	4.2

II.4.9. La teneur en eau :

La teneur en eau est déterminée par le rapport de l'écartement entre la masse de l'échantillon humide en l'état et sa masse sèche. Les résultats de notre essai sont représentés dans le Tableau II.11:

Tableau II.11 : Résultats de l'essai de la teneur en eau

Les fractions (mm)	Sable 0/5	Gravier 8/16.	Gravier 15/25
La teneur en eau (%)	4.22	4.63	4.75

II.4.10. Essai Los Angeles :

L'essai consiste à estimer la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. Il est réalisé sur les classes granulaires 4/6.3, 6.3/10 et 10/14.

On place 5 kg de granulats et des boules en acier (7 à 11 de 420 g) dans un tombeur muni d'une plaque intérieure suivant la génératrice.

Après un nombre normalisé de tours (500 tours à 33 tours/mn), on récupère le passant P au tamis 1,6 mm [14]

Le coefficient Los Angeles est : $LA = 100 P / 5000$

Le coefficient Los Angeles est d'autant plus élevé que le granulat est moins bon, la valeur spécifier par les normes est 40 %.

Les résultats obtenus sont représentés dans le Tableau II.12 :

Tableau II.12 : Résultats de l'essai de Los Angeles

Les fractions (mm)	Gravier 8/15	Gravier 15/25
Los Angeles LA(%)	24.6	26.2

Donc le coefficient de Los Angeles moyenne est 25.4% c'est-à-dire que la résistance à la fragmentation des fractions des agrégats étudiés est de l'ordre moyen à faible.

II.5. METHODES D'ANALYSES ET D'ESSAIS :

II.5.1. Formulation du béton (Méthode de Dreux Gorisse) :

La méthode de la formulation d'un béton consiste à déterminer le mélange optimal des différents granulats, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin d'obtenir le béton avec les caractéristiques adaptées à l'ouvrage.

La méthode pratique permettant de déterminer la composition des bétons est la méthode de Dreux-Gorisse.

La méthode de Dreux-Gorisse, constitue une synthèse des diverses théories existantes sur la composition des bétons, appuyée sur un examen statistique de nombreux chantiers sérieusement contrôlés. Son but est de définir d'une manière simple et rapide une première formulation de béton en fonction de deux paramètres principaux du béton à savoir : La résistance en compression et ouvrabilité.

La formulation définitive étant obtenue par quelques gâchées d'essais permettant d'ajuster au mieux la formule théorique du béton en fonction des qualités désirées et des matériaux réellement employés. [31]

II.5.2. Les données de base et les conditions générales :

On cherche à déterminer la composition d'un béton plastique (Ouvrabilité au cône d'Abrams variant entre 5 et 9cm) présentant une résistance souhaitée de l'ordre de $F_{c28}=25\text{MPa}$.

II.5.2.1. Données de départ :

- CPJ CEM II/A 32.5.
- Densité du ciment CPJ CEM II/A 32.5 = 3,1.
- Niveau de vibration de béton : Normal.
- Qualité des granulats : Bonne.
- Agressivité du milieu : Faible.
- Y'aura pas une addition d'adjuvant.

Les données de base et les caractéristiques de nos matériaux sont représentées dans le Tableau II.13 suivant :

Tableau II.13 : Les données de base et les caractéristiques de nos matériaux

DONNEES DE BASE		Granulats					
		Sable		Graviers			
F_{c28} (Mpa)	25	Masse volumique γ (kg/m ³)	1.22	Gravier 8/15		Gravier 15/25	
Densité du ciment CPJ CEM II/A 32.5	3.1	Module de finesse	2.5	Masse volumique γ (kg/m ³)	1.44	Masse volumique γ (kg/m ³)	1.44
Affaissement (cm)	9	Forme	Concassé	Forme	Concassé	Forme	Concassé

II.5.3. Dosage en ciment et en eau :

II.5.3.1. La résistance souhaitée :

On l'obtient à partir de la résistance de calcul F_{c28} nécessaire à la construction d'un ouvrage donné. La résistance moyenne visée à 28 jours doit être corrigée de 15% de plus à la résistance de calcul f_{cj} , soit :

$$f_c = 1.15 \times f_{c28} = 1.15 \times 25 = 28.75 \text{ Mpa}$$

II.5.3.2. Détermination du rapport C/E :

D'après la formule de Bolomey :

$$f_c = G \times \sigma_c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

- f_c : Résistance moyenne en compression visée à 28 jours.
- C : Dosage en ciment en kg/m³ de béton.
- E : Dosage en eau totale sur matériaux secs en litres par mètre cube de béton.
- σ_c : Classe vraie du ciment à 28 jours en Mpa.
- G : Coefficient granulaire.

II.5.3.3. Détermination de coefficient granulaire G :

La qualité de nos granulats est bonne avec un diamètre de plus grand granulat

$$D = 25 \text{ mm}$$

D'après le tableau II.14 on tire la valeur de G

Tableau II.14 : les valeurs de coefficient granulaire selon la qualité des granulats

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins $D \leq 12.5$ mm	Moyens $20 \leq D \leq 31.5$ mm	Gros $D \geq 31.5$ mm
Excellent	0.55	0.60	0.65
Bonne, Courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

$$G = 0.50$$

On tire de l'expression précédente la valeur E/C et on trouve la quantité de l'eau nécessaire.

$$E/C = 0.56$$

II.5.3.4. Détermination du dosage en ciment C (kg/m^3) :

La valeur de C est déterminée grâce à l'abaque de la suivant (Figure II.4) en fonction des valeurs de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams.

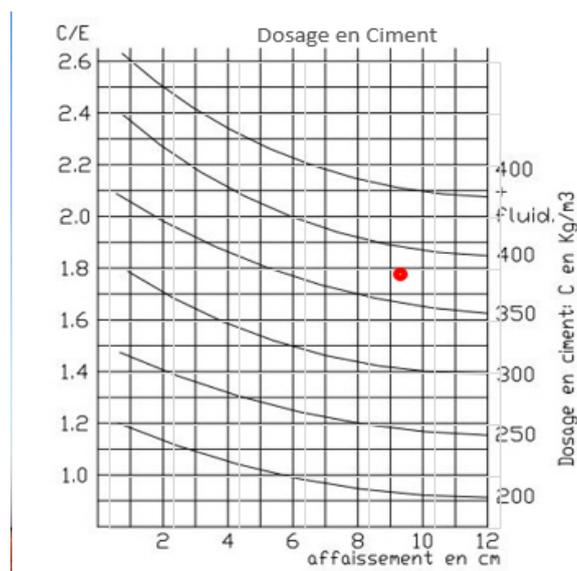


Figure II.4 : L'abaque du dosage en ciment

On détermine le dosage en ciment $C = 380 \text{ kg}/\text{m}^3$

Et donc on peut avoir le dosage en eau $E = 213.75 \text{ L}/\text{m}^3$

II.5.4. Détermination des pourcentages des agrégats :

Les courbes granulométriques du sable, des graviers et de la courbe de référence sont illustrés à travers la figure II.5 suivante :

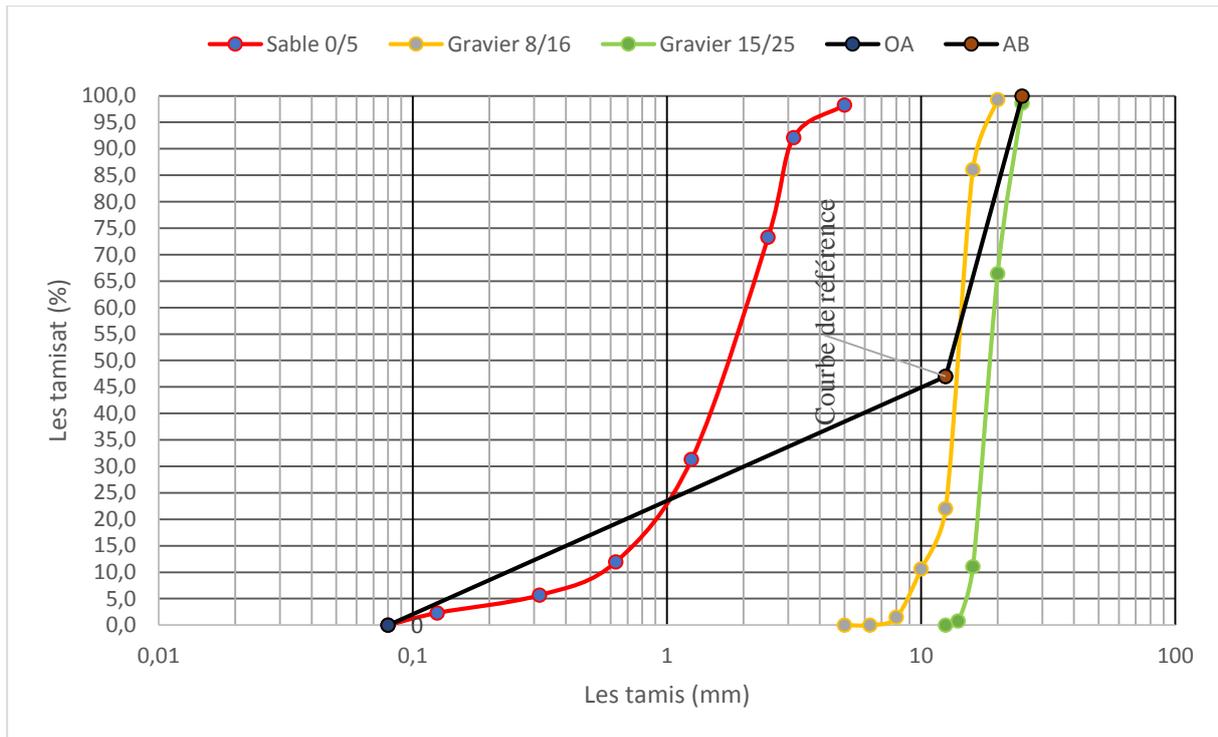


Figure II.5 : les courbes granulométriques et courbe de référence

Les pourcentages des constituants du béton (sauf l'eau) sont déterminés en pourcentage par la détermination graphique. (Voir le Tableau II.15)

Tableau II.15 : les pourcentages des agrégats

Les agrégats	Sable0/5	Gravier 8/16	Graviers 15/25
Les pourcentages	40%	35.6%	24.5%

II.5.5. Composition pondérale des constituants :

II.5.5.1. Coefficient de compacité (γ) :

Les grains solides ne remplissent pas la totalité du volume de béton à cause de la présence d'eau interstitielle et de poches d'air. Pour évaluer la masse des granulats, il faut donc déterminer la compacité du béton γ (rapport du volume absolu des matières solides au volume total de béton frais).

γ dépend du diamètre des granulats, des conditions de vibration et de la plasticité.

On prend $\gamma = 0.830$ et on effectue une correction

$$\gamma = 0.830 - 0.03 - \frac{380-350}{5000} = 0.795$$

Nous avons : $(V_C + V_S + V_g + V_G) / 1000 = \gamma$

V_C, V_S, V_g et V_G Sont les volumes absolus respectifs du ciment, du sable, du gravier 8/16 et du gravier 15/25.

$$(V_C + V_S + V_g + V_G) = \gamma \times 1000 = 795 \text{ L/m}^3$$

Et

$$V_C = C/3.1 = 380/3.1 = 122.58 \text{ L/m}^3$$

Donc

$$(V_S + V_g + V_G) = 795 - 122.58 = 672.42 \text{ L/m}^3$$

On peut déterminer le volume absolu des constituants par les équations suivantes :

$$V_S = 672.42 \times \text{sable}(\%)$$

$$V_g = 672.42 \times \text{gravier 8/16}(\%)$$

$$V_G = 672.42 \times \text{gravier 15/25}(\%)$$

Les valeurs par un mètre cube sont représentées dans le Tableau II.16 :

Tableau II.16 : les volumes des constituants

FRACTION GRANULAIRE	Sable	Gravier 8/16	Gravier 15/25
Pourcentage (%)	40	35.6	24.5
Volumes (L)	269	239	165

Le dosage pondéral en (kg/m^3) sont représentées dans le Tableau II.17 :

Tableau II.17 : Dosages pondérales des constituants

FRACTION GRANULAIRE	Sable	Gravier 8/16	Gravier 15/25	Ciment	Eau
Masse volumique apparente (t/m^3)	1.22	1.44	1.44	/	/
Dosage des constituants (kg)	637.45	651.12	454.69	380	213.75

II.5.5.2. Calcul de la densité théorique :

Dans la composition de référence la densité théorique est la somme des masses de chacun des constituants correspondants aux volumes pour un mètre cube de béton, y compris l'eau.

$$P_C = V_C \times \rho_C = 122.58 \times 3.1 = 379.998 \text{ Kg}$$

$$P_S = V_S \times \rho_S = 269 \times 2.67 = 718.23 \text{ Kg}$$

$$P_g = V_g \times \rho_g = 239 \times 2.65 = 633.35 \text{ Kg}$$

$$P_G = V_G \times \rho_G = 165 \times 2.62 = 432.3 \text{ Kg}$$

$$P_{eau} = V_{eau} \times \rho_{eau} = 213.75 \times 1 = 213.75 \text{ Kg}$$

$$P_{total} = 2377.63 \text{ Kg}$$

Densité théorique du béton $\rho_{th} = 2370 \text{ kg/m}^3$

II.5.6. Incorporation du déchet :

Tout d'abord on a séché la pâte de marbre ainsi que celle de granite dans une étuve 24h à 105°C. On a, ensuite, broyé le marbre et le granite jusqu'à atteindre la finesse du ciment.

Nous préparons au départ des éprouvettes témoins à 0% de déchet, puis on fabrique successivement des éprouvettes à 5, 10, 15, 20 % de déchet de marbre et de granite. L'ordre d'incorporation des différents matériaux est représenté sur la figure II.6 :

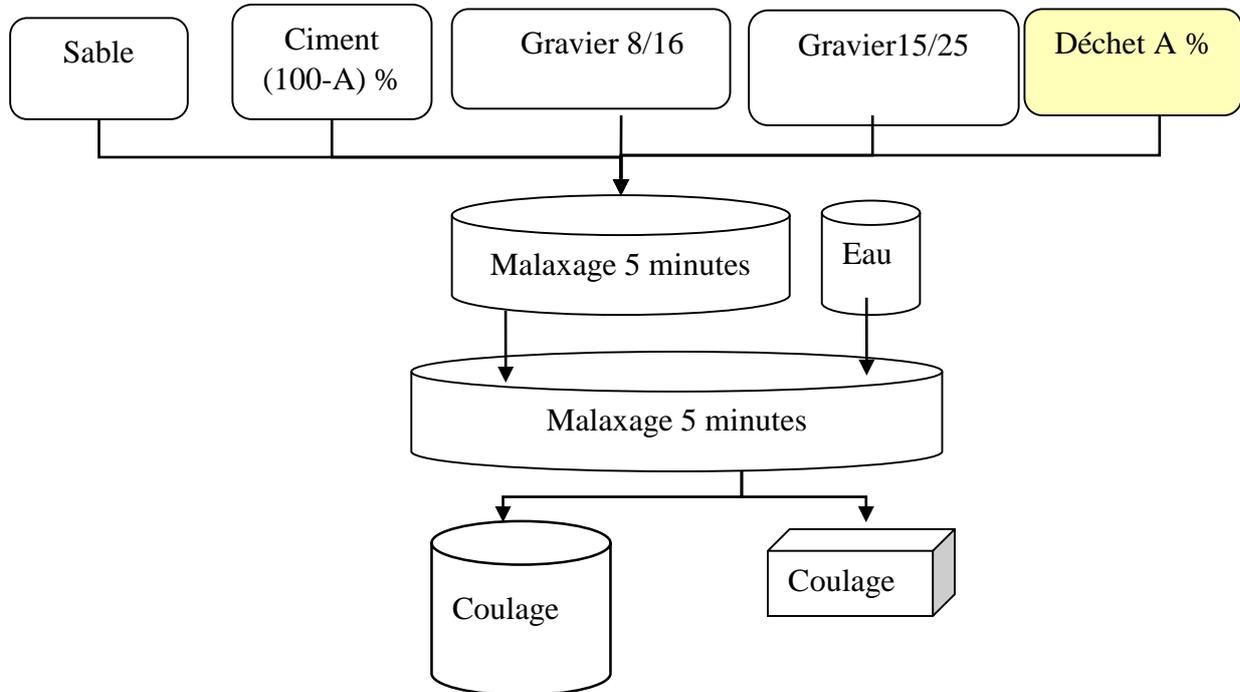


Figure II.6 : schéma représentant l'ordre d'incorporation des différents matériaux

II.5.7. Modalité des essais :

II.5.7.1. Essai sur béton frais :

II.5.7.1.1. Mesure de la masse volumique du béton frais :

La mesure consiste à :

- Remplir un récipient de volume V et de poids M_0 connus par un échantillon du béton frais, qui a subi une vibration.
- Araser et lisser les surfaces et prendre le poids de ce récipient du béton, soit M_1 .

La masse volumique du béton frais est : $\rho = \frac{M_1 - M_0}{V}$ (kg/m^3)

II.5.7.1.2. La consistance du béton :

La consistance est une grandeur qui sert à caractériser l'aptitude à la mise en œuvre d'un béton. Sa mesure, s'effectue avec différents dispositifs dont le plus répandu est le cône d'Abrams [15] (voir la Figure II.7) qui consiste à :

- Remplir le cône en trois couches, tassées avec une tige en acier pointue de 16 mm de diamètre à raison de 25 coups par couche.
- Soulever le cône avec précaution et mesurer l'affaissement.

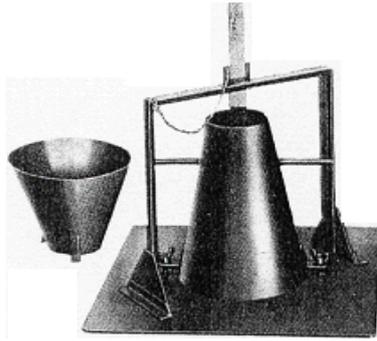


Figure II.7 : Photo du cône d'Abrams

II.5.7.2. Essai sur béton durci :

II.5.7.2.1. Détermination de la masse volumique du béton durci :

Avant de procéder aux essais mécaniques, on mesure la masse des éprouvettes à 7, 14 et 28 jours et ceci pour connaître l'évolution de la masse volumique du béton durci.

II.5.7.2.2. Essai de compression :

L'objet de cet essai est de déterminer la résistance nominale en compression simple d'un béton. Il s'agit de soumettre une éprouvette normalisée qui est représentée par un cylindrique à base circulaire de 200cm² de section droite, dont la hauteur est égale au double du diamètre (32cm) [16]. Les modalités de confection et de conservation des éprouvettes sont définies de façon très précise par les normes NF P 18-406. Selon les normes, la résistance à la compression doit représenter la moyenne arithmétique des résistances à la compression d'au moins trois essais réalisés sur des échantillons d'une même composition.



Figure II.8 : Essais d'écrasement en compression simple.

La résistance à la compression des éprouvettes testées est donnée par la formule :

$$F_c = 10F/S$$

Dans laquelle :

F_c : Résistance à la compression en Méga Pascal (MPa),

F : Charge maximale supportée par l'éprouvette en kilo newtons (kN),

S : Surface de la face d'essai en centimètres carrés (200cm² dans notre cas).

II.5.7.2.3. Essai de traction par fendage (ou essai brésilien) :

Il consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à un effort de fendage, par application de forces de compression radiales suivant deux génératrices diamétralement opposées.

L'essai de traction par fendage a été effectué sur des éprouvettes cylindriques (16x32) cm² en utilisant un dispositif convenable [17]. La résistance à la traction du béton se déduit de la force appliquée « F » par la formule empirique suivante :

$$\sigma_T = 0.55 \frac{F}{D*L} \quad (\text{MPa})$$

Où (F) représente la charge de compression transversale provoquant la rupture par fendage, (D) et (L) étant respectivement le diamètre (16cm) et la longueur (32cm) de l'éprouvette testée.

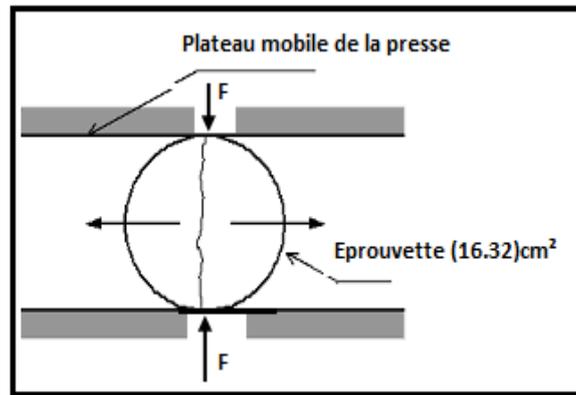


Figure II.9 : Essai de traction par fendage

II.6. CONCLUSION :

Le travail présenté dans ce chapitre traite séparément les caractéristiques des matériaux de base utilisés dans l'étude expérimentale.

Nous avons pu remarquer après l'essai « équivalent de sable » que le sable est propre. Nous avons trouvé que les coefficients d'absorption de notre granulat sont inférieurs à 5% ce qui répond aux exigences de la norme.

La formulation du béton est une tâche essentielle dans notre étude expérimentale. Elle permet de déterminer le mélange optimal des différents granulats, ainsi que le dosage en ciment et en eau.

Dans la caractérisation des déchets de marbre et de granite, nous n'avons, malheureusement, pas pu faire l'essai de diffraction en rayon X et les lames minces.

La connaissance de ces caractéristiques nous aide d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux.

Chapitre III : Résultats et interprétations

III.1. INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents résultats expérimentaux des essais effectués sur le béton frais et sur le béton à l'état durci.

Dans le programme expérimental, nous avons effectué une série d'essais sur les deux poudres (marbre et granite) à savoir :

Essais sur béton frais :

- Affaissement au cône d'Abrams
- Masse volumique

Essais sur béton durci :

- Masse volumique du béton durci
- Résistance à la compression
- Résistance à la traction par fendage (ou essai brésilien)

III.2. ESSAIS SUR BETON FRAIS :

III.2.1. Affaissement au cône d'Abrams :

Pour chaque composition, nous avons mesuré l'affaissement au cône d'Abrams.

III.2.1.1. La poudre de marbre :

Les valeurs sont représentées sur le tableau III.1 :

Tableau III.1 : Mesure de l'affaissement pour chaque pourcentage de déchet de marbre

Pourcentage de déchet en (%)	Quantité de déchet en (kg)	Quantité de ciment en (kg)	La valeur E/C	Affaissement mesuré en (cm)
0	0	380	0.56	9
5	19	361	0.56	8.5
10	38	342	0.56	8
15	57	323	0.56	7.5
20	76	304	0.56	6

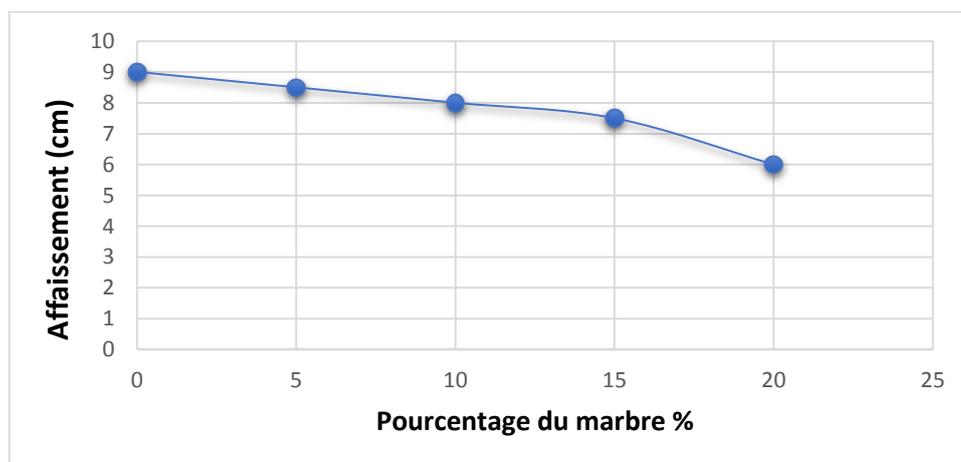


Figure III.1 : Evolution de l'affaissement en fonction du pourcentage de déchet de marbre

On remarque qu'il y a une diminution de l'affaissement avec l'augmentation du pourcentage de déchet de marbre incorporé. Ceci est dû à la grande finesse de la poudre de

marbre par rapport à la finesse du ciment qu'il substitue dans notre étude et aussi à la partie argileuse de la poudre de marbre qui absorbe beaucoup d'eau.

III.2.1.2. La poudre de granite :

Les valeurs sont représentées sur le tableau III.2 :

Tableau III.2 : Mesure de l'affaissement pour chaque pourcentage de déchet de granite

Pourcentage de déchet (%)	Quantité de déchet en (kg)	Quantité de ciment en (kg)	La valeur E/C	Affaissement mesuré en (cm)
0	0	380	0.56	9
5	19	361	0.56	10
10	38	342	0.56	12
15	57	323	0.56	14
20	76	304	0.56	13

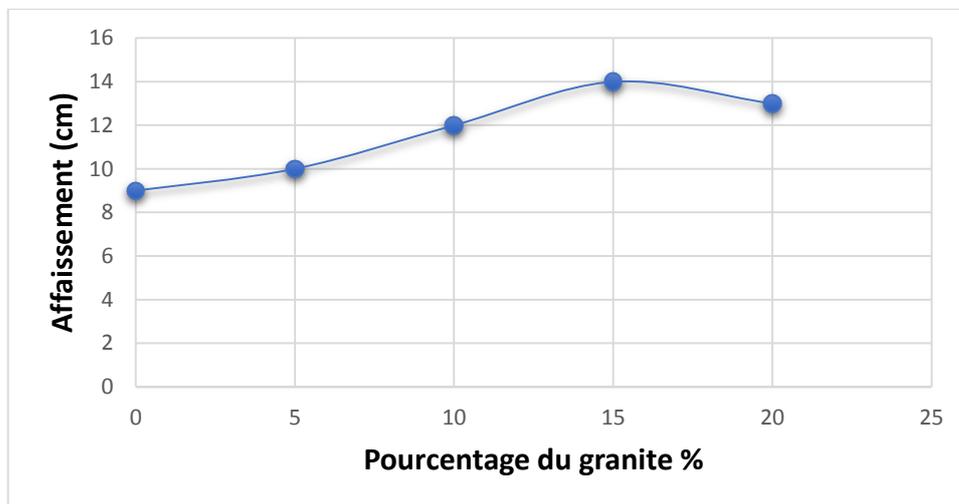


Figure III.2 : Evolution de l'affaissement en fonction du pourcentage de déchet de granite

On remarque qu'il y a une augmentation de l'affaissement avec l'augmentation du pourcentage du déchet de granite incorporé. Ceci est dû d'une part, à la présence des éléments fins dans la poudre de granite qui remplissent les pores et libèrent l'eau emprisonnée, et d'autre part, la poudre de granite contient moins d'argile donc moins d'absorption d'eau.

III.2.2. La masse volumique :

Les masses volumiques du béton frais à différents pourcentages de déchet de marbre et de granite sont représentées dans le tableau III.3 :

Tableau III.3 : La masse volumique du béton frais en poudre de marbre

Pourcentage de déchet (%)	0%	5%	10%	15%	20%
Masse volumique du béton avec marbre (Kg/m ³)	2490	2470	2440	2430	2420
Masse volumique du béton avec granite (Kg/m ³)	2490	2520	2560	2480	2580

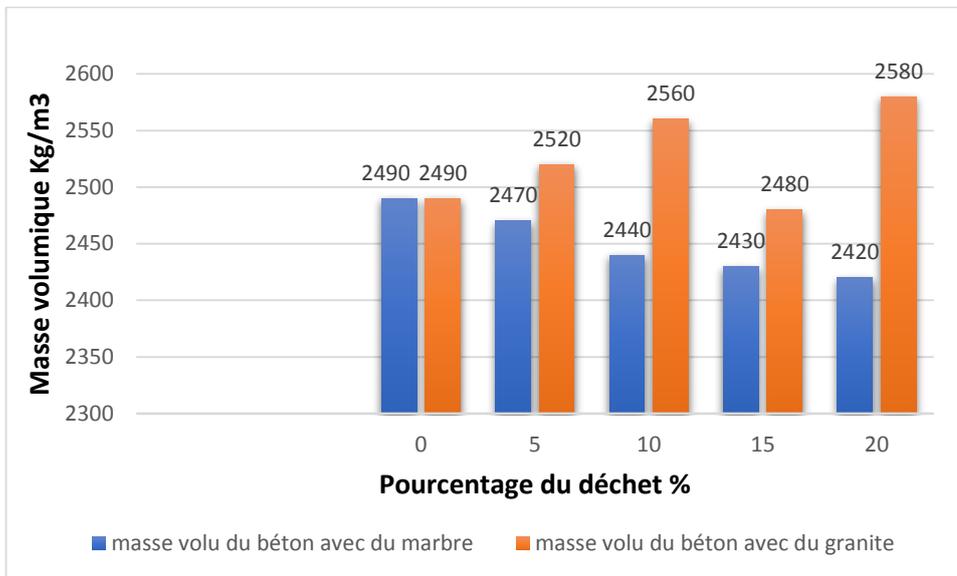


Figure III.3 : Evolution de la masse volumique du béton frais en fonction du pourcentage de déchet

La masse volumique du béton frais avec déchet de marbre diminue avec l'augmentation du pourcentage de ses déchets, contrairement à la masse volumique du béton avec déchet de granite.

On explique l'augmentation de la masse volumique du béton avec granite par le rôle de remplissage des fines qui s'insèrent dans les vides et les pores capillaires, ce qui diminuant la porosité du squelette du béton. Par contre la diminution de la masse volumique du béton avec marbre est due aux éléments grossiers dans la poudre de marbre par rapport au ciment.

III.3. ESSAIS SUR BETON DURCI :

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats des essais effectués sur béton durci pour chaque pourcentage de déchet marbre et granite :

III.3.1. La masse volumique du béton durci :

III.3.1.1. Poudre de marbre :

Les masses volumiques du béton durci à différents pourcentages de déchet de marbre sont représentées dans le tableau III.4 :

Tableau III.4: masse volumique du béton durci à différents pourcentages de déchet de marbre

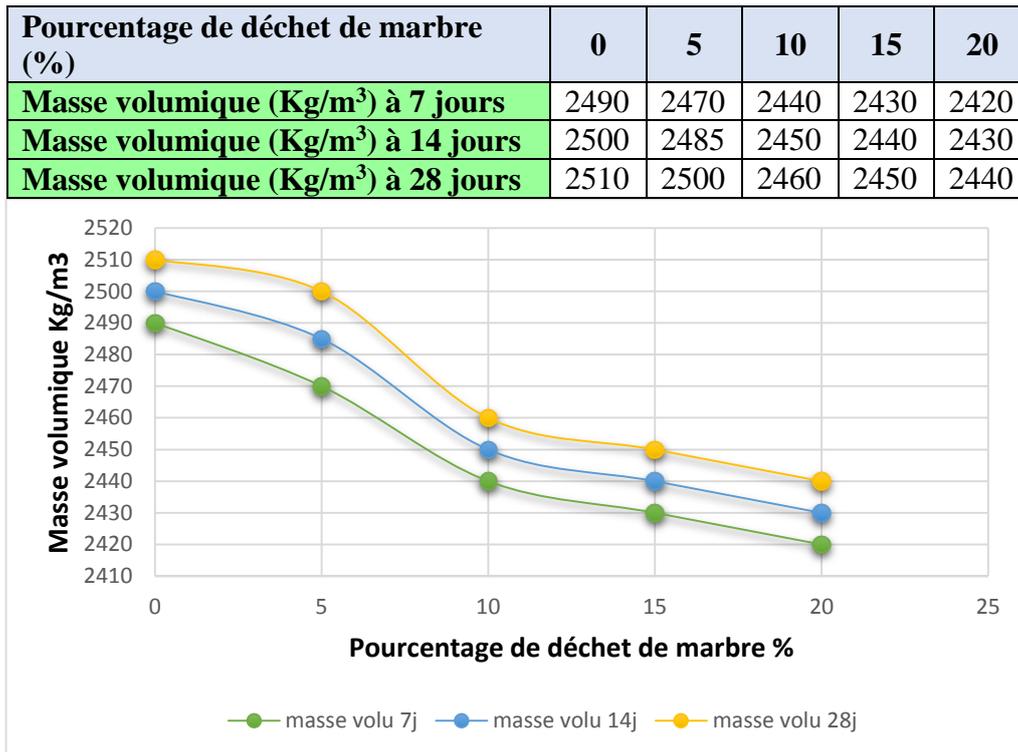


Figure III.4 : Evolution de la masse volumique du béton durci en fonction du pourcentage de déchet

La masse volumique du béton durci avec déchets de marbre est d'autant plus faible que le pourcentage de déchet incorporé est grand quel que soit l'âge de notre béton.

L'analyse de la figure ci-dessus nous montre que la masse volumique du béton diminue avec l'augmentation du pourcentage de déchet introduit. Ceci s'explique par le fait que la masse volumique de la poudre de marbre est plus faible que la masse volumique du ciment.

III.3.1.2. Poudre de granite :

Les masses volumiques du béton durci à différents pourcentages de déchet de granite sont représentées dans le tableau III.5 :

Tableau III.5 : masse volumique du béton durci à différents pourcentages de déchet de granite

Pourcentage de déchet de granite (%)	0	5	10	15	20
Masse volumique (Kg/m ³) à 7 jours	2490	2520	2560	2480	2580
Masse volumique (Kg/m ³) à 14 jours	2550	2590	2650	2620	2600
Masse volumique (Kg/m ³) à 28 jours	2600	2620	2660	2640	2610

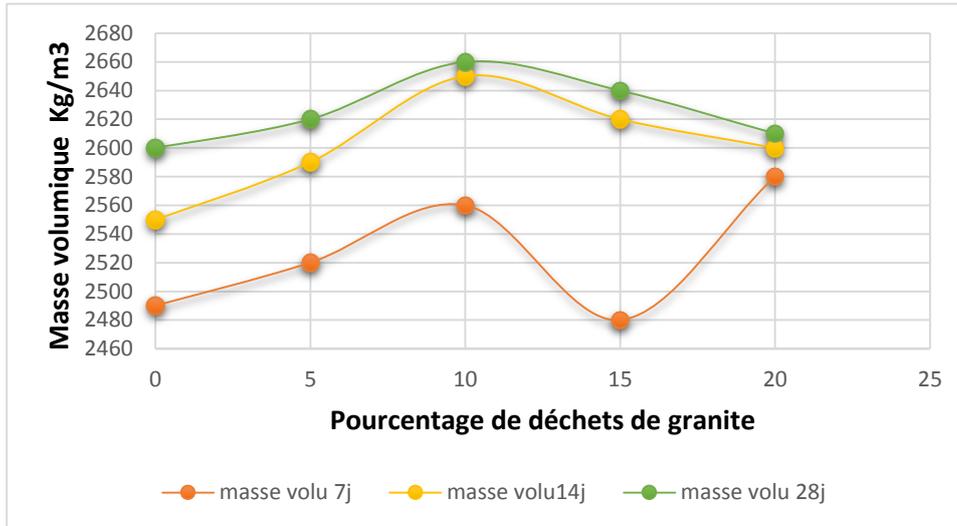


Figure III.5 : Evolution de la masse volumique du béton durci en fonction du pourcentage de déchet de granite

On remarque que la masse volumique du béton durci avec déchet de granite au pourcentage 10% atteint le maximum, cela signifie que notre béton a une compacité importante à 10% de granite grâce au remplissage des pores par les fines du granite. Au-delà de ce pourcentage, la masse volumique diminue.

III.3.2. La résistance à la compression :

Cet essai est effectué sur des éprouvettes cylindrique (16 * 32) cm à 28 jours pour toutes les compositions.

III.3.2.1. Poudre de marbre :

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau III.6 :

Tableau III.6 : La résistance à la compression du béton à 28 jours à différents pourcentages de déchet de marbre

Pourcentage de déchet de marbre (%)	Résistance à la compression (MPa)	Augmentation ou diminution de la résistance à la compression
0	25.46	/
5	27.95	+9.78 %
10	36.83	+44.66 %
15	43.17	+69.56 %
20	31.25	+22.47 %

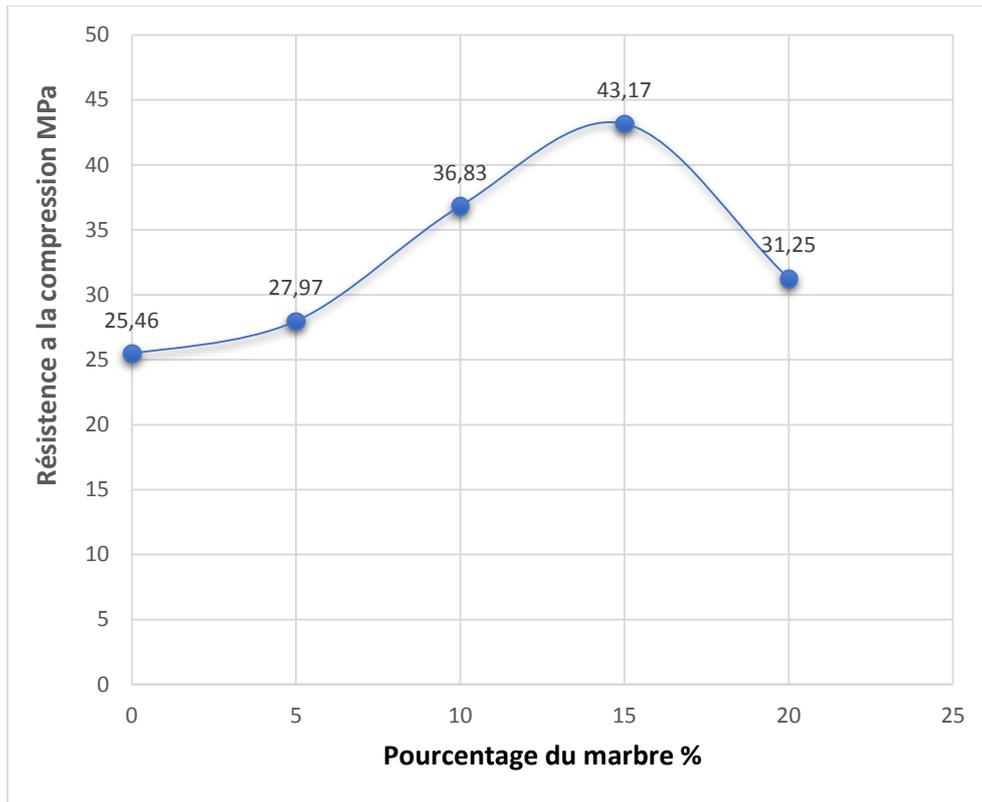


Figure III.6 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de déchet de marbre

D'après les résultats nous remarquons que l'ajout de la poudre de marbre améliore la résistance à la compression des bétons étudiés par rapport à un béton témoin (0%). On remarque aussi que la résistance atteint 43.17MPa à 15% de la poudre de marbre.

Le facteur le plus responsable de cette amélioration de la résistance mécanique serait bien sûr la finesse de la poudre de marbre utilisée qui remplit un maximum de vides entre les grains et chimiquement parlant, le composé dominant dans le marbre CaO. La réaction de CaO avec l'eau donne $\text{Ca}(\text{OH})_2$ qui va réagir avec SiO_2 forme le silicate de calcium secondaire hydraté qui est chimiquement stable est structurellement dense.

III.3.2.2. Poudre de granite :

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau III.7 :

Tableau III.7 : La résistance à la compression du béton à 28 jours à différents pourcentages de déchet de granite

Pourcentage de déchet de granite (%)	Résistance à la compression (MPa)	Augmentation ou diminution de la résistance à la compression
0	25.46	/
5	22.84	-10.31 %
10	27.65	+8.60 %
15	28.05	+10.17 %
20	32.09	+26.04 %

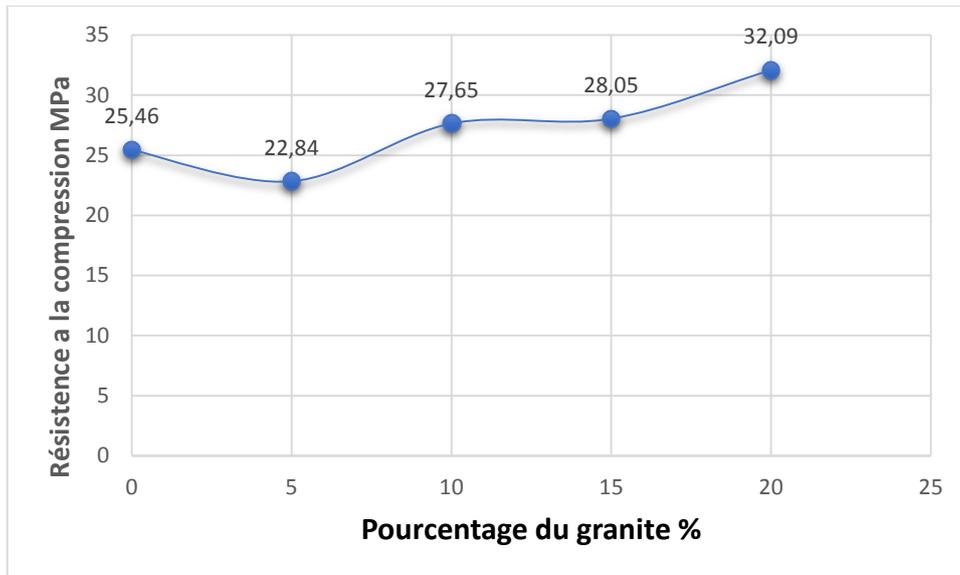


Figure III.7 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de déchet de granite

D'après les résultats, nous remarquons une amélioration de la résistance à la compression. Cette amélioration due essentiellement à la finesse de la poudre de granite qui minimise la porosité ce qui améliore la résistance.

La poudre de granite contient une quantité importante de SiO₂ qui va réagir avec Ca(OH)₂ qui donne le silicate de calcium secondaire hydraté stable et dense.

III.3.3. La résistance à la traction par fendage (ou essai brésilien) :

La résistance à la traction par fendage est mesurée sur des éprouvettes cylindriques (16*32) cm à 28 jours. La résistance théorique à la traction a été calculée par :

$$ft_j = 0,6 + 0,06 fc_j$$

III.3.3.1. Poudre de marbre :

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau III.8

Tableau III.8 : La résistance à la traction par fendage à 28 jours à différents pourcentages de déchet de marbre

Pourcentage de déchet de marbre (%)	Résistance à la traction (MPa)	Augmentation ou diminution de la résistance à la compression	Résistance théorique MPa
0	2.55	/	2.13
5	2.88	+12.94 %	2.28
10	2.89	+13.30 %	2.80
15	2.91	+14.12 %	3.20
20	2.73	+7.06 %	2.48

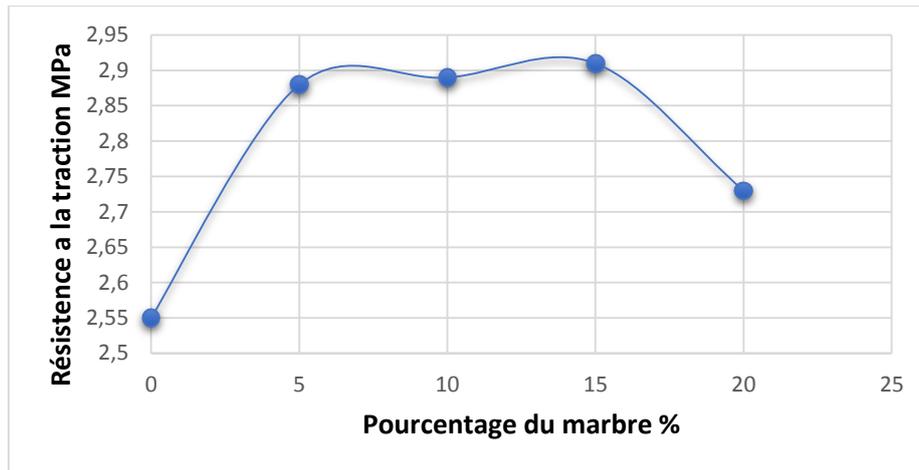


Figure III.8 : Evolution de la résistance à la traction en fonction du pourcentage de déchet de marbre

D'après les résultats nous remarquons une augmentation de la résistance à la traction à 5%, 10% et 15% pour les mêmes raisons citées précédemment et une chute de résistance à un pourcentage supérieur à 15%.

A l'issue des résultats obtenus, nous pouvons affirmer que le pourcentage de 15% de déchet de marbre introduit est un pourcentage intéressant vu que la résistance à la traction est à 14.12% de celle de béton témoin.

On remarque que la résistance pratique qu'on a obtenue est supérieure à la résistance théorique calculée.

III.3.3.2. Poudre de granite :

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau III. 9 :

Tableau III.9 : La résistance à la traction par flexion à 28 jours à différents pourcentages de déchet de granite.

Pourcentage de déchet de granite (%)	Résistance à la traction (MPa)	Augmentation ou diminution de la résistance à la compression	Résistance théorique (MPa)
0	2.55	/	2.13
5	2.64	+3.53 %	1.97
10	2.68	+5.10 %	2.26
15	2.12	-16.86 %	2.28
20	2.26	-11.37 %	2.53

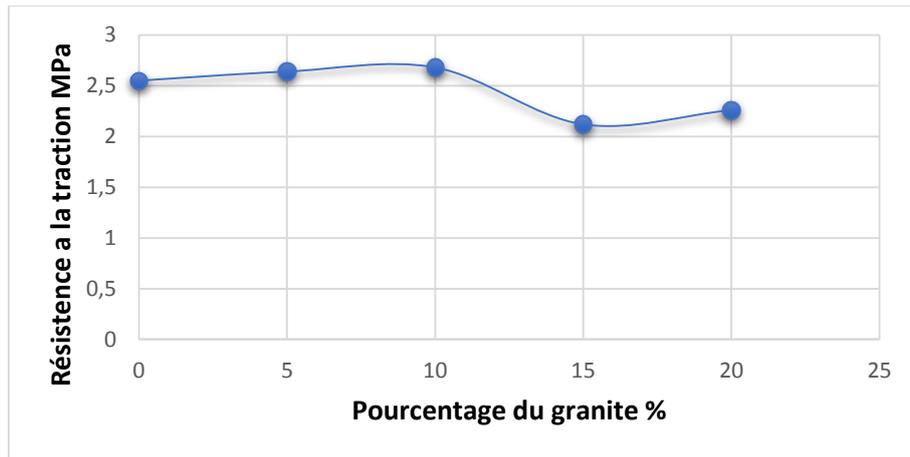


Figure III.9 : Evolution de la résistance à la traction en fonction du pourcentage de déchet de granite

D'après les résultats nous remarquons une augmentation de la résistance à la traction à 5%, et 10% et une chute de résistance à un pourcentage supérieur à 10%.

On remarque que la résistance pratique qu'on a obtenue est supérieure à la résistance théorique calculé.

III.4. ETUDE COMPARATIF :

L'influence de la poudre de marbre et de granite sur le béton est différente. Cette différence est illustrée dans le tableau III.10 :

Tableau III.10 : comparaison entre la poudre de marbre et la poudre de granite en termes d'ajout dans le béton

	Béton avec ajout du marbre	Béton avec ajout du granite
Consistance	Plastique P	Très plastique TP
Résistance à la compression maximale	43.17 MPa	32.09 MPa
Résistance à la traction maximale	2.91 MPa (à 15%)	2.68 MPa (à 20%)
La masse volumique maximale à l'état frais	2490 Kg/m ³ (à 0%)	2580 Kg/m ³ (à 20%)
La masse volumique maximale à l'état durci	2510 Kg/m ³ (à 0%)	2660 Kg/m ³ (10%)

III.5. CONCLUSION :

Les résultats obtenus dans cette recherche peuvent mener aux conclusions suivantes :

- La quantité de marbre et de granite a une influence significative sur le comportement du béton à l'état frais et l'état durci.
- La contribution de la poudre de marbre a un rôle structurant par rapport aux liaisons de la matrice cimentaire du point de vue mécanique. Cette contribution structurante se traduit en termes de durabilité par une réduction de la porosité.
- Les bétons avec l'ajout de la poudre de marbre ont une ouvrabilité plastique et très plastique pour les bétons avec ajout de la poudre de granite.
- Le remplacement du ciment par la poudre de granite conduit à une densification de la matrice granulaire.
- La résistance à la compression augmente jusqu'à 26.04% de remplacement du ciment par 20% de la poudre de granite, et la résistance à la traction augmente jusqu'à 5.10% de remplacement du ciment par 10% de la poudre de granite mais l'augmentation de pourcentage de déchet ajouté conduit à une diminution de résistance à la traction.

Donc nous avons montré la possibilité de la valorisation des déchets de marbre et de granite dans les bétons.

Chapitre IV : Etude Technico- Economique

IV.1. INTRODUCTION :

L'étude technico-économique est la première démarche dans la réalisation d'un nouveau projet.

Ce chapitre sert à donner et à proposer des solutions pratiques pour utiliser les déchets de marbre et de granite générés par l'entreprise TIMGAD MARBRE. Nous avons vu dans le chapitre 1 que la quantité des déchets est d'environ 70 tonnes par ans, donc, cette quantité ainsi que les très bons résultats obtenus à l'issue des essais effectués au laboratoire exigent une très bonne stratégie de gestion de ces déchets.

Une étude technico-économique une fois réalisée vous donnera un aperçu du contexte économique dans lequel évoluera ce nouveau projet, ainsi un état de lieu concurrentiel.

Ce schéma représente les différentes propositions pour investir dans les déchets de marbre et de granite générés par l'entreprise TIMGAD MARBRE.



Figure IV.1 : Propositions pour investir concernant les deux déchets

IV.2. IMPLANTATION D'UNE CENTRALE A BETON :

IV.2.1. Description de projet :

Une centrale à béton est une usine ayant vocation de fabriquer de grandes quantités de béton en un temps réduit. La centrale à béton stocke les différents éléments constitutifs du béton (eau, ciment, granulats et adjuvants) au sein de cuves adaptées et fabrique ensuite un béton sur-mesure à la demande de chaque client. Le béton ainsi fabriqué est produit en grandes quantités et est de qualité.

Une centrale à béton se compose principalement :

- D'un silo à ciment équipé d'un filtre pour assurer la meilleure qualité possible,
- D'un silo à agrégats (sable, graviers...) ou d'un rayon raclant acheminant ces derniers,
- D'une cuve de dosage de ces agrégats,
- D'un système de pesage pour l'ensemble des matériaux,
- D'un équipement d'arrivée d'eau avec réservoir et pompe,
- D'une bétonnière ou d'un malaxeur.

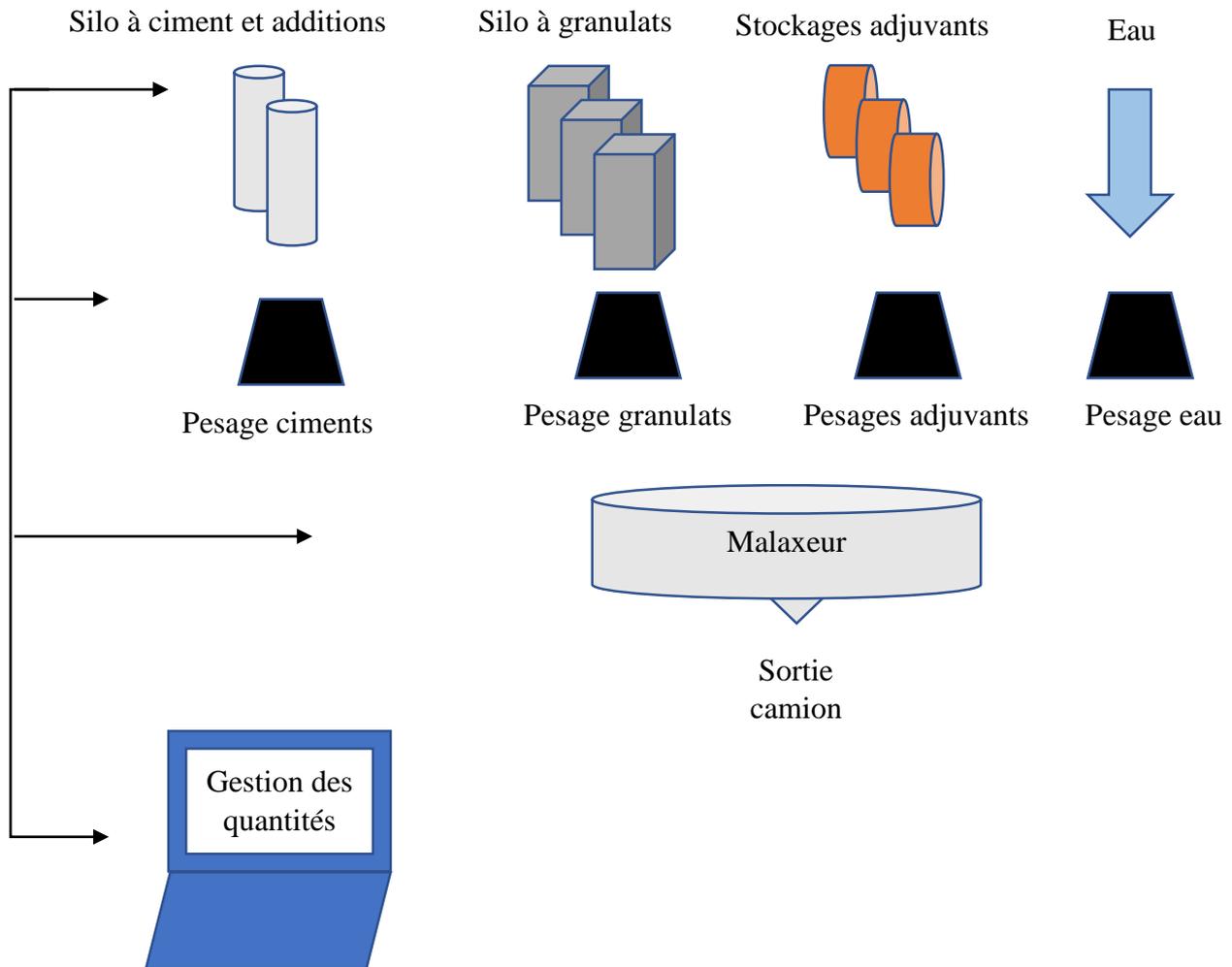


Figure IV.2 : Représentation des différents composants de la centrale à béton

IV.2.2. Incorporation de notre déchet dans la centrale à béton :

Les déchets de marbre et granite sont sous forme d'une pâte humide, donc avant l'injection de ces derniers à la centrale à béton il faut les sécher et les broyer. Pour éviter la distribution non homogène de notre déchet dans la recette de formulation de béton, il faut injecter les quantités désirées directement au malaxage dans la centrale à béton comme illustré dans la figure suivante :

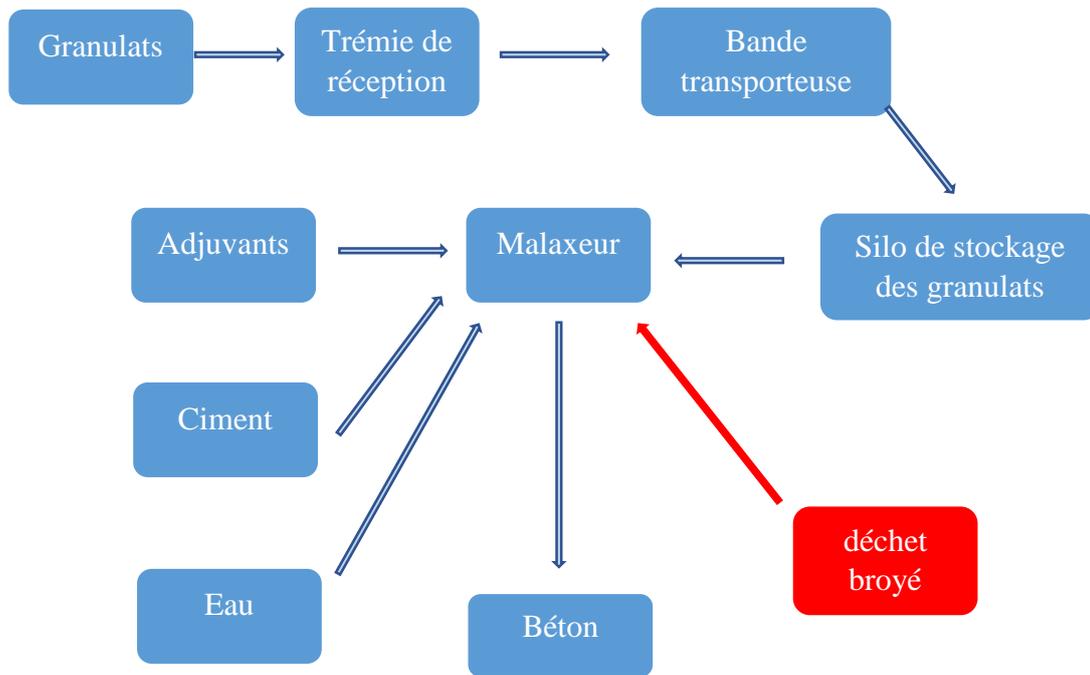


Figure IV.3 : Incorporation de déchet dans la centrale

IV.2.3. Etude de marché :

Est le socle sur lequel vous allez déployer votre stratégie de commercialisation. Une étude de marché bâclée, incomplète ou mal faite peut avoir des conséquences désastreuses sur votre produit et par ricochet sur votre entreprise.

L'étude de marché va vous permettre de définir à qui vous vous adressez, dans quel environnement et pour combler quel besoin. Vous devrez donc recueillir des informations actualisées, pertinentes et complètes sur votre future clientèle (analyse sociologique, études comportementales...) et sur vos concurrents.

Vous vous assurerez, grâce à l'étude de marché, qu'une clientèle potentiellement en demande pour votre produit existe, et qu'elle est suffisamment importante pour vous assurer un succès. Vous vous assurerez aussi que vous avez une valeur ajoutée par rapport à vos concurrents.

En d'autres termes, vous vérifiez qu'il existe une place pour vous sur le marché.

L'Algérie est un marché stratégique pour le Groupe des entreprises de fabrication de béton. Le secteur de la construction est en croissance depuis 2000, avec d'importants besoins en matériaux de construction et de solutions constructives.

Il y'a et y'aura de chantiers qui ont besoin de béton pour y réaliser des constructions dans la région d'Alger et la province de BARRAKI.

Les entreprises concurrentes dans le marché de fabrication de béton prêt à l'emploi sont :

Tableau IV.1 : Analyse des concurrentes dans le marché de fabrication de béton prêt à l'emploi

Entreprises	Débit de la centrale	Nombre de camion malaxeur
Lafarge	>140	>30
SARL BETORAF	135	12
BETON BENGAOUD	120	20
Kc BETON	80	9
WHITE CONCRETE	60-120	8
ONE BETON	100	20

IV.2.3.1. Lafarge

Lafarge est une entreprise française de matériaux de construction active de 1883, la société produit et vend dans le monde entier principalement du ciment, des granulats et du béton prêt à l'emploi. Lafarge a développé des ciments spéciaux et des bétons innovants de renommée internationale.

Cette entreprise est localisée au Centre Commercial de Bab-Ezzouar Alger, Algérie.

IV.2.3.2. SARL BETORAF

La Sarl BETORAF est une société spécialisée dans la production et la vente de béton. Leur centrale a un débit de 135 m³/h, et une flotte de 12 camions malaxeurs, capacité de 9m³. Adresse : Kalitouss.

IV.2.3.3. BETON BENGAOUD

BETON BENGAOUD est une société spécialisée dans la production, la vente et la livraison du béton prêt à l'emploi. Elle a été créée en 2015 pour répondre aux besoins des chantiers et faire profiter ses différents partenaires de son savoir-faire.

Sa centrale à béton implantée à Gué De Constantine, offre sur le marché Algérien, la production et la vente du béton prêt à l'emploi aux normes requises. Sa flotte est de 20 camions malaxeurs et 5 pompes à béton.

IV.2.3.4. Kc BETON

C'est une entreprise créée en 2012, spécialisée dans la production et vente de béton frais de différent dosage. Sa centrale à béton est de 80 m³/h avec 9 camions malaxeurs.

Adresse : Zone Industrielle lot n°10 16059 Oued Smar

IV.2.3.5. WHITE CONCRETE

Centrale à béton implantée à Rahmania, Baraki et Blida avec un débit de 60 jusqu'à 120m³/h et une flotte de 8 camions malaxeurs de 9m³, vent tous types de béton prêt à l'emploi tous dosage de 150-400kg/m³ pour tous les ouvrages.

IV.2.3.6. ONE BETON

Entreprise implantée à Baba Ali, spécialisée dans la production de béton prêt à l'emploi destiné en construction des grands œuvres, bâtiments, travaux publics.

Son unité de production dispose :

- D'une centrale à béton de capacité 100 m³/h.
- D'une flotte de vingt camions malaxeurs.

IV.2.4. Etude de faisabilité financière :

IV.2.4.1. Choix de matériels :

IV.2.4.1.1. Choix de la Centrale à Béton :

La centrale à béton la plus pratique pour notre cas est celle qui contient 4 silos :

- Silo pour le ciment
- Silo pour le sable
- Silo pour le marbre broyé
- Silo pour le granite broyé

On a choisi pour cette étude les centrales à béton horizontales série HN de l'entreprise SCHWING Stetter [32] qui ont les caractéristiques suivantes :

Tableau IV.2 : Caractéristiques des différentes centrales à béton série HN

DONNEES TECHNIQUES		HN1.5	HN2.25	HN2.5
DEBIT DE BETON	m ³ /h	80	104	110
BALANCE DE GRANULAT	kg	3750	5625	6250
BALANCE A CIMENT	kg	750	1125	1500
BALANCE A EAU	kg	400	600	800



Figure IV.4 : Centrale à béton HN1.5 de 80m³/h

En outre, on a choisi pour notre étude la centrale HN1.5 qui a un débit de 80 m³/h.

IV.2.4.1.2. Camion malaxeur :

Nous proposons dans notre étude Basic line comme camion malaxeur.

Les bétonnières portées Basic Line sont disponibles avec un volume nominal de 6 à 15 m³.

Tableau IV.3 : Caractéristiques des camions malaxeur

Données techniques		AM7 C	AM9 C	AM10 C
Capacité nominale	m ³	7	9	10
Volume de la cuve	Litre	12560	15660	17310



Figure IV.5 : Camion malaxeur AM 9 C

IV.2.4.1.3. Etuve de séchage [33] :

Pour sécher nos déchets, on propose deux étuves de capacité 424 litres modèle convection forcée inox / acier.

La température peut se régler de +5°C à +300°C et dans notre cas nous n'avons besoin que de 105°C



Figure IV.6 : Etuve de séchage de capacité 424 litres

IV.2.4.1.4. Broyeur [34] :

Moulin Ultrafin de Série XZM est largement utilisé pour la production de micron poudre. La taille de sortie peut atteindre 2500 mailles (5 µm). Il est adapté pour broyer le matériau avec

une dureté moyenne et basse et une humidité inférieure à 6%. La matière doit être non explosive et non-inflammable, par exemple : la calcite, la craie, le calcaire, la dolomie, le kaolin...etc. La taille du produit fini peut être ajustée entre 325-2500 mailles.

Tableau IV.4 : Caractéristiques des broyeurs de série XZM

Modèle	XZM221	XZM224	XZM236	XZM244
Diamètre de travail (mm)	Φ800	Φ900	Φ1000	Φ1250
Maximum taille de grain alimentaire (mm)	≤20	≤20	≤20	≤20
Capacité (t/h)	500-4500	800-6500	1000-8500	2500-14000



Figure IV.7 : Broyeur série XZM221

On choisit le moulin ultrafin de série XZM221 car il est de capacité suffisante pour notre quantité quotidienne et aussi pour son prix.

IV.2.4.2. Estimation du coût de projet :

Nous avons choisi de travailler avec l'euro comme devise de référence pour les transactions commerciales.

IV.2.4.2.1. Coût de matériels :

Le cout des matériels et le coût total sont représentés en euro dans le tableau suivant :

Tableau IV.5 : Estimation du coût de matériels

Matériels	Capacité	Coût en euro	Coût final
Centrale à béton	80m ³ /h	220 000	220 000
Étuve	424 litres	4 170 × 2	8 340
Broyeur	500 t/h	4 200	4 200
Camion malaxeur	9m ³	75 000 × 8	600 000
		Total	832 540

IV.2.4.2.2. Coût des matières premières :

On va travailler avec les quantités calculées dans le chapitre II et la quantité de ciment sera diminuée de 15% récupérée par l'ajout des déchets.

Le tableau IV.6 représente le coût nécessaire en euro pour les matières premières

Tableau IV.6 : Estimation de coût pour les matières premières

Matières premières	Quantité nécessaire par jour en (Kg)	Prix d'unité	Coût dépensé par jour	Coût dépensé par an
Ciment	$45600 - 380 \times 0.15 = 45543$	0.06	2 733	929 220
Sable	76494	0.005	382.5	130 000
Gravier 8/16	78135	0.007	547	185 980
Gravier 15/25	54563	0.01	545.6	185 504
Eau (litre)	25650	0.001	25.65	8 721
Adjuvants	/	/	150	51 000
Electricité	/	/	/	4 500
Carburant	/	0.004	30	360
			Total	1 495 285

IV.2.4.2.3. Les travailleurs :

- Ingénieurs de génie civil : pour la formulation de béton de différents dosages et le contrôle de leur état.
- Ingénieurs de QHSE : pour assurer un travail sécurisé et de qualité.
- Centralistes : pour la manipulation de la centrale
- Chauffeurs de camions malaxeurs
- Travailleurs : 3 travailleurs pour la mise en place des granulats et le remplissage des camions.
- Deux agents de sécurités : pour surveiller le champ du travail.

- **Salaire des travailleurs :**

Tableau IV.7 : Salaires des travailleurs

Les travailleurs	Salaire par mois	Salaire par an
Centralistes	300	3 600
Ingénieurs de génie civil	400	4 800
Ingénieurs de QHSE	400	4 400
Chauffeurs des camions	250	3 000
Travailleurs	250×3	9 000
Agents de sécurités	250×2	6 000
Total		30 800

IV.2.4.3. Estimation des ventes :

On représente dans le tableau suivant le prix d'un mètre cube et les revenus par jour et an :

Tableau IV.8 : Estimation des revenus

Le produit	Prix d'unité (1m ³)	Revenus pour un jour (120 m ³ /jour)	Revenus par an
Béton frais	50	7 500	2 550 000

IV.2.4.3.1. Estimation des revenus nets :

- La somme nette des revenus jusqu'à la récupération du capital = revenus par an – (coût des matériels + coût des matières premières + salaire des travailleurs)

Donc le bénéfice net d'une année est = 2 550 000 – (832 540 + 1 495 285 + 30 800) = **191375 euros**

L'entreprise récupérera son capital après **11 mois**.

- La somme nette des revenus après la récupération du capital = revenus par an – (coût des matières premières + salaire des travailleurs)

Donc le bénéfice net d'une année est = 2 550 000 – (1 495 285 + 30 800) = **1 023 915 euros**

IV.2.5. Estimation des risques :**Une mise en œuvre lente et peu pratique :**

- La mise en route de la bétonnière prend du temps chaque matin.
- Les matières premières encombrant le chantier.
- Le béton est fabriqué au sol, parfois loin de l'endroit où il est utilisé.

De nombreux coûts masqués :

- Chaque chantier subit des pertes de matière premières (mauvaises conditions de stockage, gaspillage...)
- La main d'œuvre employée pour gérer l'approvisionnement, faire le béton, le transporter jusqu'au lieu de pose... coûte cher.

Une qualité aléatoire :

- Il est impossible de doser de manière précise les différentes matières premières et d'assurer une qualité de fabrication constante.

Marché saturé :

- Une demande faible à cause des concurrents

IV.3. COMMERCIALISER LES DECHETS COMME POUDDRE :**IV.3.1. Introduction :**

Ce projet consiste à fabriquer et commercialiser les poudres de marbre et de granite dans le marché. Dans ce projet on va étudier séparément le projet de commercialisation des deux poudres de marbre et granite, donc on va savoir si ce projet est faisable au niveau technique et économique en estimant les risques.

IV.3.2.La poudre du marbre :

La poudre de marbre ou farine de marbre est une charge minérale issue du broyage des blocs de marbre [47]. La poudre de marbre est obtenue du calcaire ou carbonate de calcium très dur. Sa couleur est d'un blanc pur avec des brillances.

Elle est utilisée comme charge dans les peintures et les enduits traditionnels, enduits à la chaux et enduits décoratifs, suivant sa granulométrie, dans les enduits fins et les stucs.

La poudre de marbre *est* très recherchée à cause de ses utilisations en peinture pour donner de la matière aux badigeons et aux enduits, en papeterie pour donner de la densité et de la brillance, en additif de PH neutre pour les plastiques, les cosmétiques, la pharmaceutique et la nourriture animal (ajout de calcium). Et on a montré aussi dans notre étude la possibilité de remplacer une portion du ciment par la poudre de marbre.

IV.3.3.La poudre de granite :

La poudre de granite est une charge minérale très noble grâce à son utilisation en décoration et dans les produits de coloration et revêtements. Et on a montré aussi dans notre étude la possibilité de remplacer une portion du ciment par la poudre de granite.

IV.3.4.Etude de faisabilité :

Ce projet constitue six tâches essentielles :

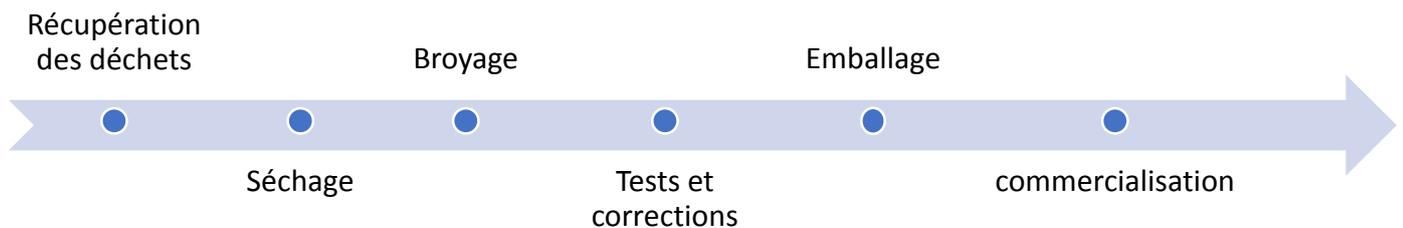


Figure IV.8 : Les taches essentielles pour la commercialisation des poudres

IV.3.4.1. Récupération des déchets :

Comme nous avons déjà vu dans le cycle de fabrication des dalles de marbre et de granite, les déchets de ses derniers sont sous forme d'une pate humide, donc on va les transporter à l'unité de séchage et broyage.

Si l'unité de séchage et broyage est implantée à l'intérieur du siège de la société TIMGAD MARBRE on n'utilise qu'un Clark, dans le cas contraire on utilise carrément des camions pour transporter les déchets.

IV.3.4.2. Séchage :

Après la récupération des déchets on va les mettre dans une étuve de grande capacité (on garde la même proposition du projet de l'implantation de la centrale à béton) à 105°C avec une durée de 24heures pour sécher les deux pattes (marbre et granite).

IV.3.4.3. Broyage :

A l'aide d'un broyeur (on garde aussi la même proposition du projet de l'implantation de la centrale à béton), on forme une poudre de marbre et de granite qui prête à l'utilisation aux diverses options.

IV.3.4.4. Tests et corrections :

Lors du broyage, la poudre est soumise à une série de tests et de corrections au niveau de sa finesse et sa propreté.

IV.3.4.5. Emballage :

Un emballage est un objet destiné à contenir et à protéger des marchandises, à permettre leur manutention et leur acheminement du producteur au consommateur ou à l'utilisateur, et à assurer leur présentation. Dans ce cas, on peut utiliser deux types d'emballage (carton ou plastique).

IV.3.4.6. Commercialisation :

La commercialisation est l'action et l'effet de commercialiser (placer sur le marché un produit ou le pourvoir des conditions et des voies de distribution pour sa vente). Pour commercialiser un produit il faut suivre deux étapes :

IV.3.5.L'étude de marché :

IV.3.5.1. Le mix marketing (4 P) :

En plus des caractéristiques de votre produit, votre stratégie de commercialisation devra définir son prix, son mode de distribution et la manière dont vous allez le faire connaître. Ces règles de base sont néanmoins indispensables pour réussir le lancement de votre produit. (Produit, Prix, Place (mode de distribution), Promotion).

Le marché de la poudre de marbre est vierge au niveau national, on peut citer un seul concurrent :

Tableau IV.9 : Analyse des concurrents

Entreprise	Région	Description
Tinogranito	Tizi Ouzzou	C'est une entreprise spécialisée dans la transformation et la commercialisation de la poudre de marbre.

Pour le marché de la poudre de granite on peut dire qu'il est très vierge, on n'arrive pas à trouver une entreprise qui s'intéresse à la poudre de granite. On remarque qu'il y'a des produits finis importés de l'étranger à base de la poudre de granite.

IV.3.6. Estimation du coût :

On a gardé les mêmes matériels de séchage et broyeur, le coût total est représenté dans le tableau suivant :

Tableau IV.10 : Estimation du coût des machines

Matériels	Capacité	Coût en euro
2 Etuves	848 L	8 340
Broyeur	500 t/h	4 200
Camion	10t	13 000
Machine d'emballage	/	2 500
	Total	28 040 euros

IV.3.7. Energie et emballage :

Le tableau suivant représente la consommation d'électricité et le matériau d'emballage utilisé :

Tableau IV.11 : Estimation de consommation concernant l'énergie et l'emballage

Type d'énergie	Consommation	Coût par an en euro
Electricité	25 Kva	3 200
Type d'emballage	Consommation	Coût par an en euro
Carton	0.3t	4 500
Total		7 700 euros

IV.3.8. Salaire des travailleurs :

Le tableau suivant représente l'estimation des salaires des travailleurs :

Tableau IV.12 : Salaire des travailleurs

Les travailleurs	Salaire par mois	Salaire par ans
Un chauffeur de camion	250	3 000
Un travailleur	250	3 000
Un agent de sécurité	250	3 000
Total		9 000 euros

IV.3.9. Estimation des ventes :

Les ventes des poudres emballées sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau IV.13 : Estimation des ventes

Le produit	Prix d'unité (1kg)	Revenus pour un jour (400Kg/jour)	Revenus par ans
La poudre de marbre	0.08	32	10 880
La poudre de granite	0.7	280	95 200
Total			106 080 euros

IV.3.10. Estimation des revenus nets :

- La somme nette des revenus jusqu'à la récupération du capital = revenus par an – (coût des machines + coût d'énergie + salaire des travailleurs)

La somme nette des revenus = 106 080 – (28 040 + 7 700 + 9 000) = **61340 euros**

L'entreprise récupérera son capital après **5 mois**.

- La somme nette des revenus jusqu'à la récupération du capital = revenus par an – (coût des machines + coût d'énergie + salaire des travailleurs)

La somme nette des revenus = 106 080 – (7 700 + 9 000) = **89380 euros**

IV.3.11. Estimation des risques :

Le seul risque qui peut se présenter est celui lié à difficulté de la commercialisation de la poudre de granite sur le marché national donc on va aller vers l'exportation. Néanmoins, cette opération est freinée par des procédures administratives assez lourdes.

IV.4. PLAN D'AMORTISSEMENT :**IV.4.1. Définition d'un amortissement :**

L'amortissement est la constatation comptable et annuelle de la perte de valeur des actifs d'une entreprise subie du fait de l'usure, du temps ou de l'obsolescence. L'amortissement comptable permet d'étaler le coût d'une immobilisation sur sa durée d'utilisation. Les actifs d'une société sont inscrits au bilan pour leur valeur nette comptable, soit leur valeur d'achat lors de leur entrée au bilan. Néanmoins, cette valeur ne correspond plus à la réalité les années suivantes, puisque les actifs perdent de leur valeur au fil du temps. L'amortissement permet ainsi de constater, tous les ans, dans la comptabilité, la perte de valeur de la valeur comptable. L'amortissement enregistré chaque année vient en déduction du bénéfice imposable [35].

IV.4.2. Objectif d'un plan d'amortissement :

Un plan d'amortissement est un tableau financier visant à présenter la dépréciation qui affectera une immobilisation du fait de l'usure et du temps.

L'amortissement permet à l'entreprise de constituer un capital pour le remplacement des immobilisations amorties.

IV.4.3. Le taux d'amortissement :

$$\text{Le taux d'amortissement} = \frac{1}{\text{la durée de vie du projet (par année)}} \times 100$$

IV.4.4. Dotation aux amortissements :

La dotation aux amortissements est un terme comptable qui désigne la prise en compte sur le plan comptable de la détérioration au fil du temps de la plupart des immobilisations. La dotation aux amortissements traduit notamment la dépréciation des biens de production [36].

$$\text{La Dotation} = \text{coût du projet} \times \text{le taux d'amortissement}$$

IV.4.5. La Valeur Nette d'Amortissement VNA :

$$\text{VNA} = \text{coût de projet} - \text{cumul d'amortissement}$$

IV.4.6. Plan d'amortissement pour la centrale à béton

Le coût de projet de la centrale à béton est de **235 862 5** euros. On suppose que la centrale est mise en place en janvier 2021. La durée de vie d'une machine industrielle, estimée par le ministère de l'économie et des finances, est illustrée dans le tableau IV.14 suivant :

Tableau IV.14 : Durée de vie des immobilisations

Les immobilisations	La durée de vie
Immobilisations en non valeurs	3 à 5 ans
Construction	10 à 25 ans
Matériel industriel	10 ans
Mobilier de bureau	10 ans
Matériel informatique	6 ans et 3 mois
Matériel de transport	4 à 5ans
Matériel de bureau	5 ans

Donc la durée de vie de ce projet en tant qu'un matériel industriel est de 10 ans

Les valeurs d'entrée :

- Le coût de projet : 832 540 euros
- Date de mise en service : janvier 2021
- Durée de vie du projet : 10 ans
- Mode d'amortissement : linéaire
- Taux d'amortissement = $\frac{1}{10} \times 100 = 10\%$

Tableau IV.15 : Plan d'amortissement linéaire

Année	Coût de projet	Dotation	Cumul d'amortissement	VNA
2021	832 540	83254	83254	749286
2022	832 540	83254	166508	666032
2023	832 540	83254	249762	582778
2024	832 540	83254	333016	499524
2025	832 540	83254	416270	416270
2026	832 540	83254	499524	333016
2027	832 540	83254	582778	249762
2028	832 540	83254	666032	166508
2029	832 540	83254	749286	83254
2030	832 540	83254	832540	0

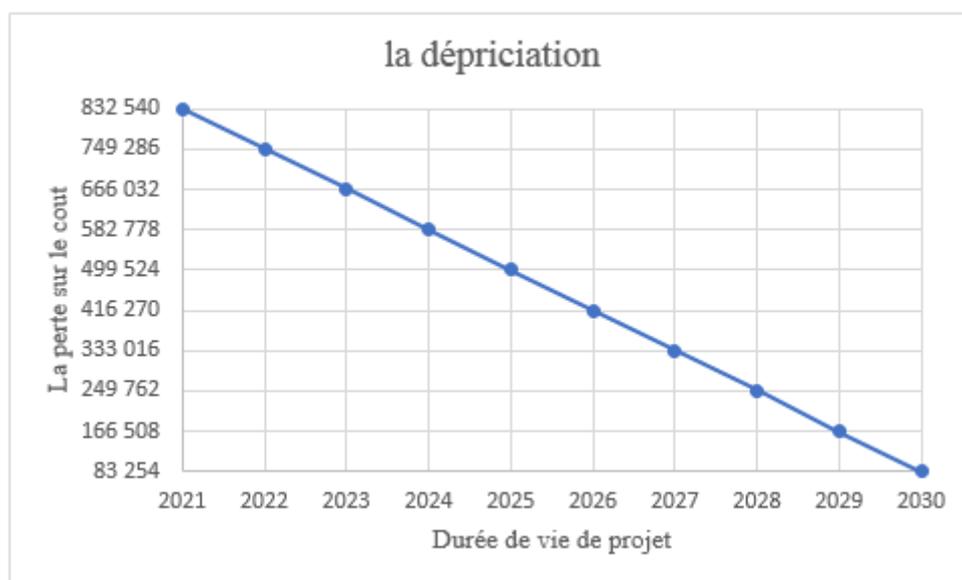


Figure IV.9 : La perte du cout pendant la durée de vie de la centrale à béton

On peut tirer que si l'entreprise veut vendre les machines après utilisation, elle perdra chaque année 83254 de son capital. A titre d'exemple :

Si l'entreprise veut vendre les matériels en 2025 le prix de vente sera 499 524 euros donc elle va perdre 333 016 euros pendant cette période.

IV.4.7. Plan d'amortissement concernant la commercialisation des déchets :

Le coût de projet pour la commercialisation des déchets est de **28 040** euros. On suppose que la mise en place soit aussi en janvier 2021, la durée de vie d'une machine industrielle est estimée à 10 ans.

Les valeurs d'entrée :

- Le coût de projet : 28 040 euros
- Date de mise en service : janvier 2021
- Durée de vie de projet : 10 ans
- Mode d'amortissement : linéaire
- Taux d'amortissement = $\frac{1}{10} \times 100 = 10\%$

Tableau IV.16 : Plan d'amortissement linéaire pour la commercialisation

Année	Coût de projet	Dotation	Cumul d'amortissement	VNA
2021	28 040	2804	2804	25236
2022	28 040	2804	5608	22432
2023	28 040	2804	8412	19628
2024	28 040	2804	11216	16824
2025	28 040	2804	14020	14020
2026	28 040	2804	16824	11216
2027	28 040	2804	19628	8412
2028	28 040	2804	22432	5608
2029	28 040	2804	25236	2804
2030	28 040	2804	28040	0



Figure IV.10 : La perte du cout pendant la durée de vie de matériels de commercialisation

Aussi, si l'entreprise veut vendre les machines après utilisation, elle perdra chaque année 2804 euros de son capital. A titre d'exemple :

Si l'entreprise veut vendre les matériels en 2028 le prix de vente sera 8412 euros, donc elle va perdre 19 628 euros pendant cette période.

IV.5. CONCLUSION :

Cette modeste étude a proposé des projets réels qu'on peut réaliser pour valoriser les déchets de marbre et de granite de la société TIMGAD Marbre.

Ces deux propositions sont basées sur les résultats issus du chapitre 3. Si l'un de des projets est réalisé, l'entreprise réussira au :

- Niveau économique : création de nouvelle richesse, création de postes d'emplois, motivation de la production nationale.
- Niveau environnemental : récupération des déchets.

Cette étude technico-économique présente une tâche essentielle dans notre travail, elle combine le monde technologique et académique (l'université) au monde industriel et économique.

Chapitre V : Etude de l'impact environnemental

V.1. INTRODUCTION :

Etant en formation d'ingénieur polyvalent à l'Ecole National Polytechnique, on ne peut pas faire une étude sans prendre en considération l'environnement. Ainsi, pour présenter l'importance de valoriser des déchets, il est nécessaire d'étudier leur influence sur l'environnement, donc pour cela cette étude environnementale traite l'influence des poussières de marbre et de granite sur le champ du Berraki et aussi sur la zone de décharge.

L'étude de l'impact environnemental est un outil dont se servent les décideurs pour identifier les impacts potentiels des projets sur l'environnement, évaluer d'autres approches possibles et pour concevoir et incorporer des mesures de prévention, d'atténuation, de gestion et de suivie appropriées. Il est impossible d'étudier l'impact environnemental d'un projet sans prendre en compte son impact social, de sorte que ce dernier aspect est considéré comme une dimension clé du processus de l'étude d'impact [37].

V.2. DESCRIPTION DU SITE :

V.2.1. Coordonnées géographiques [38] :

- Latitude 36°39'59.2"N
- Longitude 03°05'10.8"E

La superficie totale : 15 000 m²

- Surface bâti : 3 000 m²
- Surface non bâti : 12 000 m²



Figure V.1 : Présentation de la zone d'étude

V.2.2. Données climatologiques :

V.2.2.1. La température :

La zone d'étude possède un climat continental humide sans saison sèche. Deux saisons dominant : une saison chaude qui s'étale de Juin à Octobre et se rafraichit en Novembre et une autre qui débute en Décembre et s'achève en Mars.

Au mois d'Aout, la température moyenne est de 25.6 °C et au mois de janvier elle est de 10.6 °C

Sur le tableau suivant, nous pouvons apprécier la variation de la précipitation et les températures maximales et minimales moyenne de l'année 2016.

Tableau V.1 : La variation de la précipitation et les températures maximales et minimales moyenne de l'année 2016 [39]

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Mm	86	73	67	51	39	16	2	4	35	74	97	112
°C	27.6	28.3	28.9	29.3	27.9	26.5	25.5	25.9	26.5	27.4	27.3	27.3
°C (min)	21.2	21.4	23.0	23.1	22.7	21.6	20.9	20.9	21.1	22.0	21.8	21.6
°C (max)	34.1	25.2	34.8	25.5	33.2	31.4	30.1	30.7	30.9	32.0	32.9	32.9

V.2.2.2. Vents [40] :

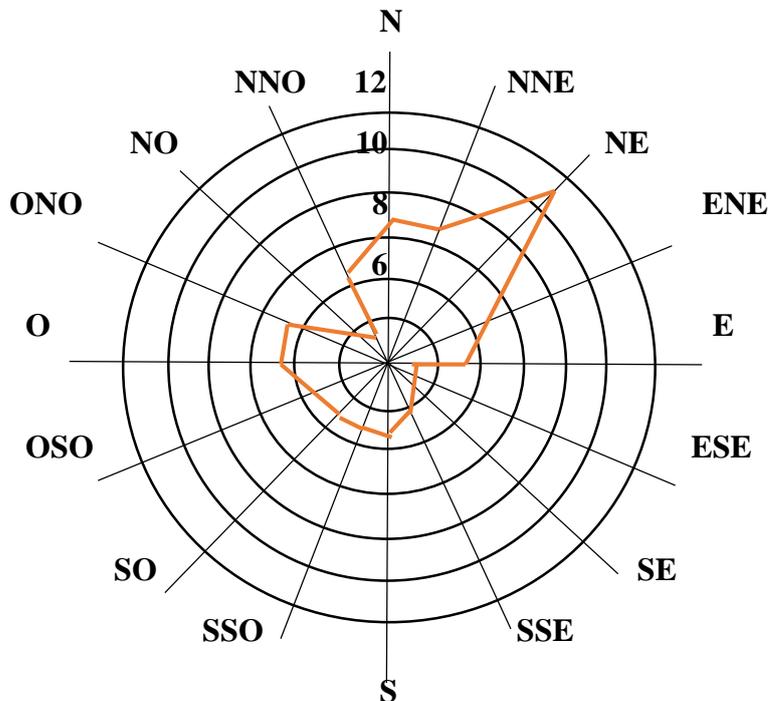


Figure V.2 : Rose des vents région d'Alger

Tableau V.2 : Vitesse du vent selon la direction

Direction	Vitesse du vent en %
N	6.2
NNE	6.2
NE	11.1
ENE	2.6
E	1.7
ESE	0.7
SE	0.5
SSE	1.7
S	3.5
SSO	3.3
SO	3.4
OSO	3.3
O	4.7
ONO	3.5
NO	1.3
NNO	4.3

L'analyse des régimes des vents, effectuée par la station météo Alger Port, a montré que les vents les plus fréquents par leur direction sont de secteur (Ouest, Sud-Ouest) et (Nord, Nord-Est)

V.2.3. Géologie et hydrogéologie [41] :

V.2.3.1. Géologie :

La structure géologique de la zone d'étude est définie par des alluvions récentes d'âge néophistocène représenté comme suit :

- Alluvions marécageuses : partie de la zone occupée jusqu'au 20ème siècle par des marécages et encore inondées lors des périodes pluvieuses (Alluvions anciennes).
- Alluvions limoneuses : dans la partie basse de la zone avec des alluvions des vallées jusqu'à 5 mètres au-dessus du lit des rivières.

V.2.3.2. Hydrologie :

La région est caractérisée par une nappe phréatique d'une perméabilité élevée, provoquant des problèmes d'instabilité en raison des risques de gonflement des terrains.

Le cours d'eau le plus proche de la zone d'étude est oued El-Harrach environ 1 Km Nord-Ouest du site TIMGAD Marbre.

V.2.3.3. Population :

Selon les données recueillies lors du Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) pour la commune de Baraki, le nombre d'habitants est de **268 846 habitants** dans l'année 2019.

V.3. REGLEMENTATION :

Les principaux textes réglementaires régissant l'environnement en Algérie applicables à l'activité de la société TIMGAD Marbre sont les suivants :

V.3.1. Cadre général :

- Loi n° 03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre de développement durable.
- Décret exécutif n°07-144 du 19 mai 2007 fixant la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement.
- Décret exécutif n°06-198 du 31 mai 2006 déterminant la réglementation applicable aux établissements classés pour la protection de l'environnement.
- Décret exécutif n°05-240 du 28 juin 2005 fixant les modalités des délégués pour l'environnement.

V.3.2. Cadre de gestion des déchets :

- Loi n°01-19 du 12 décembre 2001, relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
- Décret exécutif n°05-314 du 10 septembre 2005 fixant les modalités d'agrément des groupements de générateurs et/ou détenteurs de déchets spéciaux.
- Décret exécutif n°02-372 du 11 novembre 2002 relatif aux déchets d'emballages.
- Décret exécutif n°05-315 du 10 septembre 2005 fixant les modalités de déclaration des déchets spéciaux dangereux.
- Décret exécutif n°05-315 du 10 septembre 2005 fixant la nomenclature des déchets, y compris les déchets spéciaux dangereux.

V.3.3. Cadre de gestion du transport des déchets :

- Décret exécutif n°04-409 du 14 décembre 2004 fixant les modalités de transport des déchets spéciaux dangereux.

V.3.4. Cadre de gestion des rejets atmosphériques :

- Décret exécutif n°05-315 du 10 septembre 2005 définissant les valeurs limites, les seuils d'alerte et les objectifs de qualité de l'air en cas de pollution atmosphérique.
- Décret exécutif n°06-138 du 15 avril 2006 réglementant l'émission dans l'atmosphère de gaz, fumées, vapeurs, particules liquides ou solides, ainsi que les conditions dans lesquelles s'exerce leur contrôle.
- Décret exécutif n°07-207 du 30 juin 2007 réglementant l'usage des substances qui appauvrissent la couche d'ozone, de leurs mélanges et des produits qui en contiennent.
- Décret présidentiel n°07-94 du 19 mars 2007 portant ratification de l'amendement au protocole de Montréal relatif aux substances qui appauvrissent la couche d'ozone, adopté à Beijing le 03 septembre 1999.

V.4. ETUDE SUR LES POUSSIÈRES EMISES PAR LA SOCIÉTÉ TIMGAD Marbre :**V.4.1. Origine et taille :**

Les poussières émises sont généralement d'origine du marbre et du granite et même du sol. Les poussières sont de très fines particules solides qui restent en suspension dans l'air dont le niveau de pénétration dans l'organisme par voie pulmonaire, dépend de leur taille.

Tableau V.3 : Pénétration des poussières

Taille des poussières	Effets
De 10 à 100 microns	Aussi appelées <<poussières totales>>, ces poussières sont retenues au niveau des fosses nasales.
De 5 à 10 microns	Poussières qui pénètrent dans la trachée, les bronches puis les bronchioles. Elles peuvent être crachées ou avalées dans l'œsophage ; mais si l'empoussiérage est trop élevé, Elles iront jusqu'aux alvéoles.
0.5 microns	Poussières très fines qui se déposent sur les alvéoles pulmonaires. En dessous de 0.5 micron les poussières se comportent comme un gaz dans l'organisme et suivent donc la ventilation pulmonaire.

V.4.2. Estimation des émissions :**V.4.2.1. Utilisation de la modélisation et limites :**

À défaut de données réelles de terrain, il est toujours possible d'avoir recours à la modélisation pour estimer ces émissions. On rappellera, en effet, que la modélisation est largement utilisée :

- Décrire et comprendre les processus régissant la migration des substances dans un milieu.
- Prévoir l'évolution dans le temps et dans l'espace, en prédisant la distribution des concentrations en polluants à différentes périodes (en utilisant pour cela des bases de données historiques).
- Recommander et orienter le choix en matière de localisation des points d'échantillonnages, mais aussi de fréquence de prélèvements, en particulier en cas de nécessité de mise en place d'un système de suivi de la qualité des milieux.
- Aider à l'interprétation et à l'extrapolation des résultats obtenus sur le terrain.
- Calculer les concentrations attendues en un point d'exposition, et ce sur la base des scénarios d'exposition élaborés par le site étudié.

V.4.3. Etude de la dispersion atmosphérique des déchets de la société TIMGAD Marbre :

V.4.3.1. La modélisation [42] :

Le logiciel ARIA Impact peut être utilisé pour modéliser des déchets de type « cheminée », des déchets linéiques ou des déchets surfaciques. Les dimensions de ces sources d'émission, comme les débits de rejet, peuvent être modifiés.

V.4.3.2. Méthode de calcul [42] :

La méthode utilisée est basée sur une méthode gaussienne et se traduit du point de vue mathématique par la formule suivante.

$$C = \frac{M_i}{(2\pi)^{3/2} \sigma_{hi}^2 \sigma_{vi}} \exp \left[-\frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{2\sigma_{hi}^2} - \frac{(z - z_i)^2}{2\sigma_{vi}^2} \right]$$

x_i, y_i, z_i : coordonnées du point à l'instant i

M_i : masse du polluant

σ_{hi} : écart type horizontal,

σ_{vi} : écart type vertical,

La figure ci-dessous montre une représentation du profil de concentration en polluant correspondant à cette méthode en fonction de la durée et de la distance de la source d'émissions ainsi que du point de mesure.

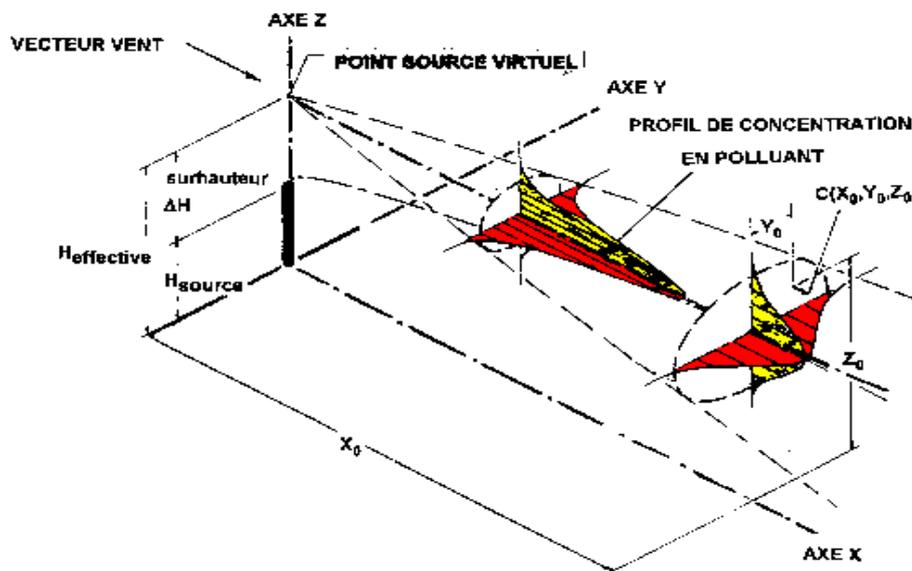


Figure V.3 : Profil de concentration en polluant

Pour la modélisation de la dispersion chronique, le choix des conditions météorologiques est nécessaire pour la mise en œuvre de la modélisation. Il est retenu soit l'utilisation :

- De la rose des vents qui donne uniquement une concentration moyenne ;
- De données statistiques, qui permettent de prendre en compte plus finement les conditions de fonctionnement de l'installation sur une période donnée.

La carte de dispersion correspondante pour la concentration atmosphérique des poussières est proposée ci-après

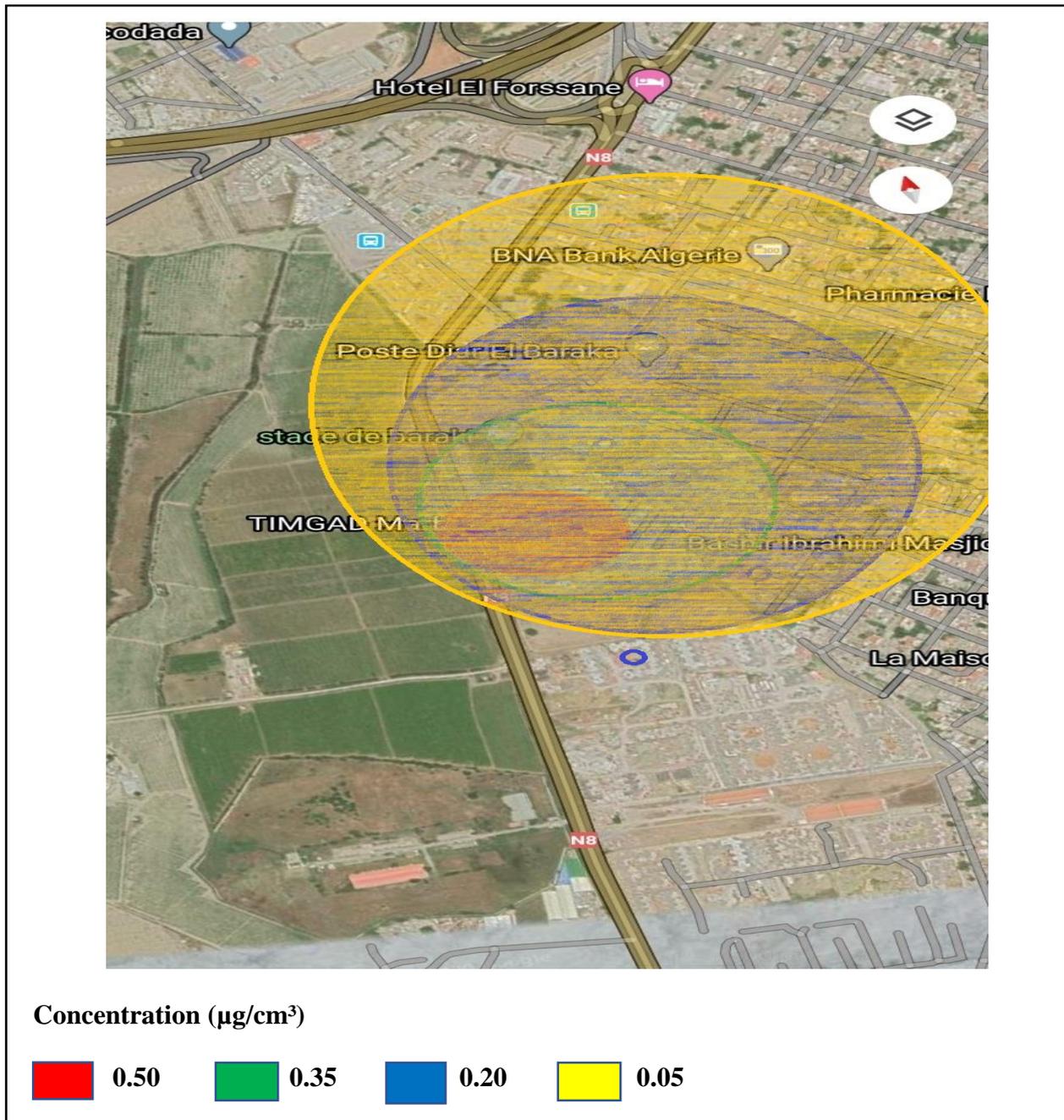


Figure V.4 : Carte de concentration atmosphérique moyenne annuelle

On remarque que le sens de la dispersion atmosphérique est vers le Nord-Est, donc vers la ville de Berraki.

V.4.4. Risques pour la santé :

De manière générale, les poussières sont considérées comme gênantes ou dangereuses pour la santé, elles ont pour effet :

- Une gêne respiratoire (poussières dites inertes, c'est-à-dire sans toxicité particulière).
- Des effets allergènes (asthme causé par la farine).
- Des effets toxiques sur l'organisme.

- Des lésions, au niveau du nez (rhinites, perforation de la cloison nasale, cancer de l'ethmoïde)
- Des effets fibrogènes (prolifération de tissus conjonctifs au niveau des poumons).

V.4.5. Mesures liées à l'émission des poussières :

Les mesures techniques qui permettent la suppression ou la réduction de l'exposition aux poussières :

- Diminuer les émissions des poussières.
- Favoriser leur évacuation par une aspiration et une ventilation adéquate.
- Installation des dispositifs d'aspiration des poussières à la source.

V.5. LA DECHARGE :

V.5.1. Introduction :

Comme nous l'avons déjà cité dans le premier chapitre, la société TIMGAD Marbre jette les boues sèches de marbre et de granite d'une quantité qui avoisinerait 0.8t/jour, dans la décharge publique, ce qui pose un véritable problème sur le plan environnemental.

V.5.2. Politique d'élimination des déchets :

En général, l'élimination reste la solution appliquée à 97% des déchets produit en Algérie. Les déchets destinés à l'élimination sont mis en décharge sauvages à 57% et en décharge contrôlée et dès CET (Centre d'Enfouissement Technique) à 10%. Par contre, les quantités destinées à être valorisées sont trop faibles, dont seulement 2% par valorisation [43].

L'objectif pour 2025 est d'augmenter le taux de recyclage global et par matière et aussi d'éradiquer les décharges sauvages. Depuis 2001, le gouvernement a opté pour l'enfouissement comme mode le plus adéquat à l'élimination des déchets.

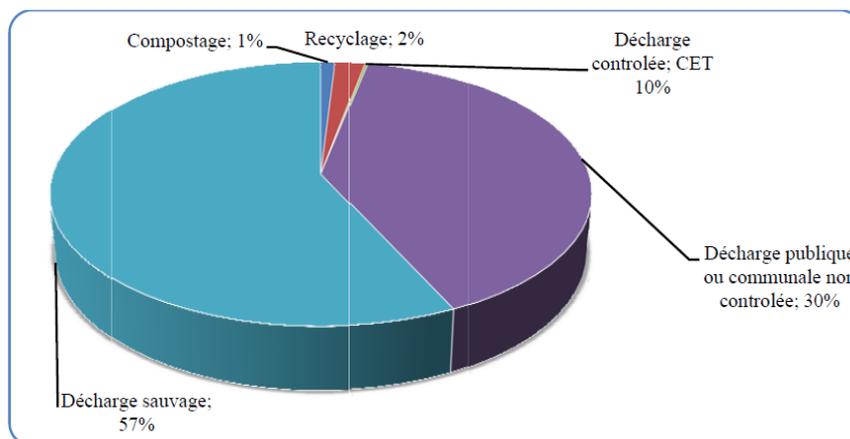


Figure V.5 : Mode d'élimination des déchets en Algérie

V.5.3. Classification et mode de déchargement des déchets de la société TIMGAD Marbre :

On peut classer les déchets de marbre et de granite générés par TIMGAD Marbre selon leur source comme déchets solides industriel avec une dangerosité à long terme. Pour ce type de déchets, il est impératif de choisir le mode d'enfouissement technique.

L'enfouissement des déchets est une opération de stockage des déchets en sous-sol. Nous distinguons deux types de CET : classe I et classe II.

Les déchets admis-en CET de classe I sont des déchets essentiellement solides, minéraux avec un potentiel polluant constitué de métaux lourds peu mobilisables. Ils sont très peu réactifs, très peu évolutifs, et très peu solubles.

En revanche ceux admis en CET de classe II sont d'une part, les déchets ménagers et assimilés dont le comportement est forcément évolutif et conduit à la formation de lixiviats et de biogaz par dégradation biologique [44].

Donc pour cela le déchargement à l'air libre va provoquer des problèmes écologiques. Afin de le démontrer on a fait une simulation par le logiciel ARIA Impact d'un point de décharge quelconque pas loin de la commune de Berraki.

Quantités : 800 kg.

Taille de particule : 50 μm .

Méthode de calcul : gaussienne.

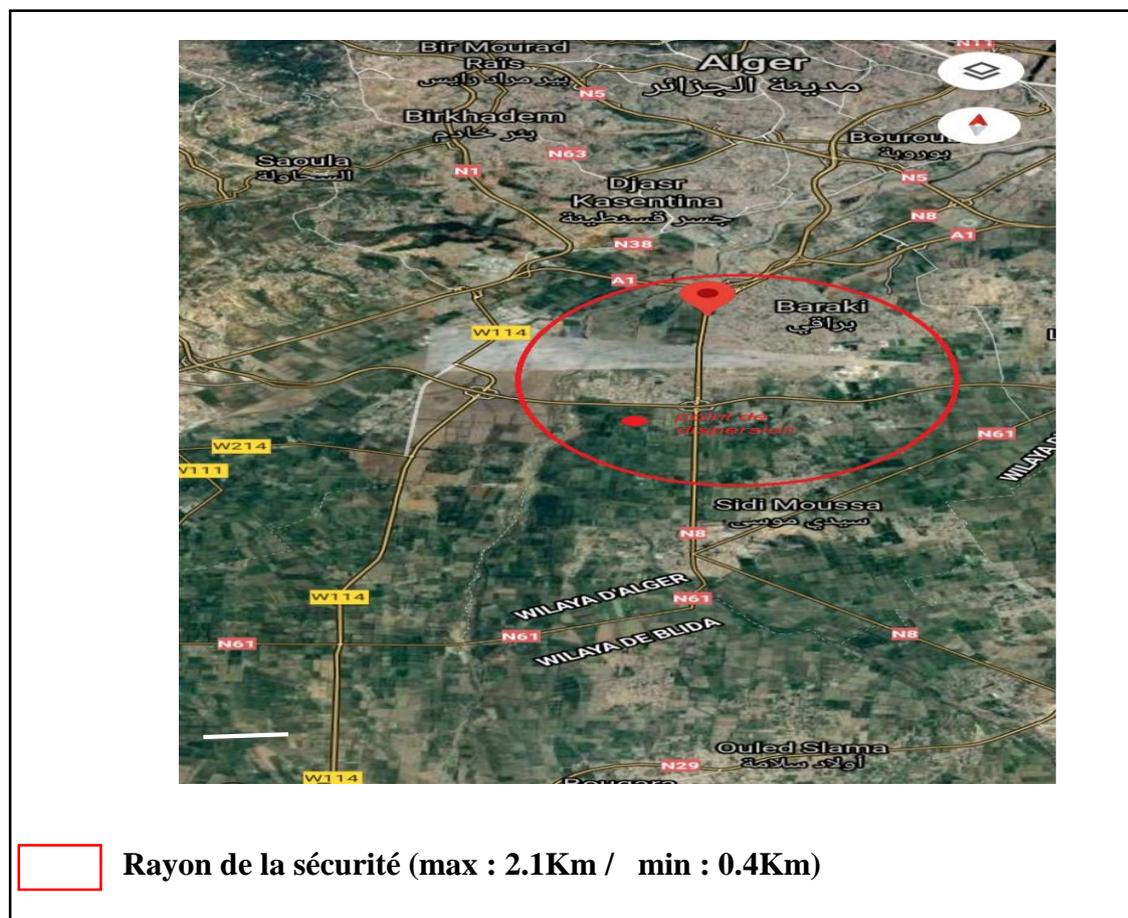


Figure V.6 : Représentation de rayon de sécurité.

On remarque que le rayon de sécurité pour la dispersion des poussières du marbre et de granite est important ce qui explique la dangerosité du déchargement à l'air libre.

V.6. CONCLUSION :

- Cette étude d'impact environnemental représente l'importance de la valorisation des déchets de la société TIMGADE Marbre.
- Les principaux textes réglementaires régissant l'environnement en Algérie sont applicables à l'activité de la société TIMGAD Marbre.
- De manière générale les poussières sont considérées dangereuses.
- La valorisation, de façon générale, est une politique obligatoire pour la gestion des déchets et aussi pour réduire le déchargement des déchets dans l'environnement.
- La valorisation des déchets de la société TIMGAD Marbre reste une nécessité.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'environnement est un patrimoine précieux que chacun de nous doit protéger et préserver pour les générations futures. Cet objectif ne peut être atteint sans la participation de tous les secteurs. D'où notre étude qui va contribuer à la valorisation des déchets de marbre et de granite de la société de TIMGAD Marbre, qui deviennent de plus en plus gênant, en raison de leur caractère polluant et de leur quantité.

Cette étude consiste à introduire les déchets dans l'élaboration d'un béton et de tester les performances de celui-ci, afin d'obtenir des résistances mécaniques acceptables.

L'examen des différents résultats obtenus lors de la réalisation de ce travail a permis de tirer les conclusions suivantes :

- La poudre de marbre et de granite ont une influence significative sur le comportement du béton à l'état frais et l'état durci.
- Les bétons ont une ouvrabilité plastique avec l'ajout de la poudre de marbre et très plastique avec l'ajout de la poudre de granite.
- La contribution de la poudre de marbre a un rôle structurant par rapport aux liaisons de la matrice cimentaire du point de vue mécanique. Cette contribution structurante se traduit en termes de durabilité par une réduction de la porosité.
- La résistance à la compression augmente jusqu'à 26.04% de remplacement du ciment par 20% de la poudre de granite, et la résistance à la traction augmente jusqu'à 5.10% de remplacement du ciment par 10% de la poudre de granite. Or, l'augmentation du pourcentage de déchet ajouté conduit à une diminution de la résistance à la traction.

Vu que ces résultats sont acceptables et comme notre étude consiste à donner une valeur à un déchet (valoriser), l'étude technico-économique effectuée présente un point de départ réel dans le monde de l'industrie et de l'investissement qui permet de récupérer cette richesse, créer des postes d'emplois et motiver la production nationale.

Cette modeste étude a proposé des projets réels qu'on peut réaliser pour valoriser les déchets de marbre et de granite de la société TIMGAD Marbre.

Et enfin, pour bien présenter l'importance de la valorisation de façon générale et des déchets de la société TIMGAD Marbre de façon particulière, on a estimé la dispersion des poussières de ses déchets dans le champ de la société et dans un point donné de décharge et leur dangerosité sur la santé et globalement sur l'environnement.

Il était intéressant de mener des essais sur le béton en utilisant un mélange de granit et de marbre car leur composition est similaire à celle du ciment, mais malheureusement nous n'avons pas pu le faire faute de temps dû à la pandémie du COVID-19.

Références Bibliographie**Normes :**

- [1] N. Française, NF P 15 403.
- [2] N. Française, NF P 15 442.
- [3] N. Française, NF P 15 431.
- [4] N. Française, NF EN 1008.
- [5] Technique de l'ingénieur, C2210.
- [6] N. Européen, EN V206.
- [7] N. Française, NF EN 934-2 Adjuvants pour béton , mortier et coulis.
- [8] N. Française, NF EN 206-1 sur les bétons.
- [9] N. Française, l'eau de gachage.
- [10] N. Française, « Granulats – analyse granulométrique par tamisage », AFNOR, Paris, Septembre 1990..
- [11] N. Française, « Granulats – Equivalent de sable », AFNOR, Paris, Septembre 1998.
- [12] N. Française, NF P 18-304.
- [13] N. Française, « Mesure des masses volumiques, coefficients d'absorption », AFNOR, Paris, décembre 1990.
- [14] N. Française, « Granulats – Essai Los Angeles », AFNOR, Paris, septembre 1990.
- [15] N. Française, « Béton – essais d'affaissement », AFNOR, Paris, 1981.
- [16] N. Française, « Béton – essais de compression », AFNOR, Paris, 1981.
- [17] N. Française, « Béton – essais de flexion », AFNOR, Paris, 1981.

Ouvrages :

- [18] Holcim SA, Guide pratique du béton Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables, 6ème édition, 2015.
- [19] J.B.Leroy, Les déchets et leur traitement» Collection Que sais-je ?, Paris : Presses universitaires de France, 1981 révisé 1994..
- [20] MICHEL.M, « Valorisations des déchets et des sous-produits industriels », Paris: Ed, Massion, 1981.
- [21] Technique de l'ingénieur, traité généralités et construction C9, A8660, C4260.
- [22] A.NAVARRO, « Gestion des déchets », Lamy environnement,, LAMY, 1995.
- [23] M. –CONSULT, Audit environnemental sur la société TIMGAD Marbre, Aout 2016.

- [24] VITALIANI. RV. SAETTA A V, "Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures" Part I: Theoretical formulation". Cement and Concrete Research, 34, pp. 571-579, 2004.
- [25] CHAN S Y N, "Durability of High Strength Concrete Incorporation Carrier Fluidifying Agent" Magazine of Concrete Research, 52, No. 4. August, pp. 235 242..
- [26] TOPÇU I B, TOPÇU I B, BILIR T, UYGUNOGLU T, "Effect of waste marble dust content as filler on properties of selfcompacting concrete", Construction Building Materials, 23(5): 1947–53., 2009.
- [27] GUNEYISI E, "Effects of marble powder and slag on the properties of self-compacting mortars", Materials and Structures, 42: 813–26,, 2009.
- [28] A ERGUN, "Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete", Construction and Building Materials, 25: 806–12,, 2011.
- [29] ARUNTAS H Y, "Utilization of waste marble dust as an additive in cement production", Materials and Design, 31: 4039-42,, 2010.
- [30] Fiche technique du ciment CPJ CEM II/A 32.5.
- [31] J. F. G. DREUX, « Nouveau guide du Béton et de ses constituants », Paris : Eyrolles Huitième édition, 1998.
- [32] SCHWING Stetter - catalogue.
- [33] LABOMODERNE - etuve de séchage.
- [34] ZENITH construction - catalogue.
- [35] Dictionnaire Comptable et Fiscal..
- [36] D. fiscal.
- [37] F. S. COUNCIL, Etude d'impact. Directives pour les projets, 2012.
- [38] G. earth, 2020.
- [39] S. ONM, 2016.
- [40] M. météo, Météo dans 243 pays de monde, 2016.
- [41] MDE-CONSULT, Audit environnemental, Aout 2016.
- [42] A. ENVIRONNEMENT, Etude de la dispersion atmosphérique des rejets de la société SILL DAIRY INTERNATIONAL, Juin 2017.
- [43] MATE, 2004.
- [44] B. Djemaci, La gestion des déchets municipaux en Algérie : Analyse, 2013.

Projets de fin d'études :

[45] BELMIMLOUD et BENKENOUN mémoire master « Recyclage des déchets inertes de marbre et de granite de la marbrerie YAHIAOUI-DBK dans la fabrication des dallages de sol », 2017.

[46] MESSOUDE.K, « Contribution à l'étude de la pollution du site de forage Hassi-Messaoud ». Mémoire de fin d'étude, L'institut de Chimie Industrielle, USTHB (1998).

Site web :

[47] <https://www.les-3-matons.com/details+poudre+de+marbre+000+0+0+5mm-503.html>.