

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE POLYTECHNIQUE



Département de Génie Civil
Laboratoire Construction et Environnement

THESE DE MAGISTER

Présentée par :

SADOUDI Lyacia

Ingénieur d'état en Génie Civil de l'Ecole Nationale Polytechnique

THEME

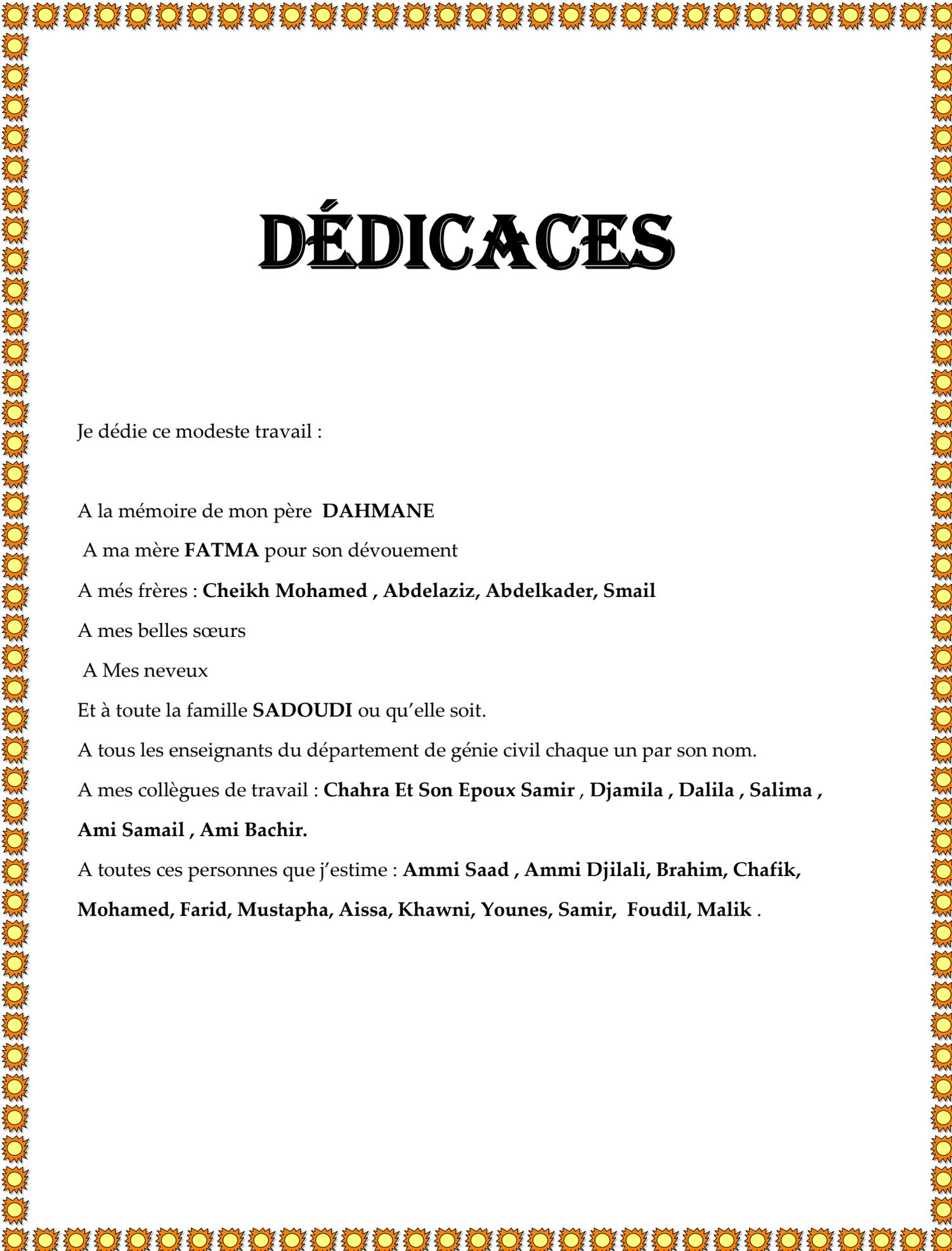
**TRAITEMENT D'UN DECHET PETROLIER ET
ETUDE DE LA VALORISATION DU PRODUIT
OBTENU DANS LE DOMAINE DE GENIE
CIVIL**

Devant le jury composé de :

Président	Mr. A. BALI	Professeur	(ENSP)
Directeur du mémoire :	Mr. R. BOUTEMEUR	Chargé de cours	(ENSP)
Examineurs :	Mme. R. KETTAB	Maître de conférences	(ENSP)
	Mr. K. SILHADI	Maître de conférences	(ENSP)
	Mr. A. LARIBI	Chargé de cours	(ENSP)

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2008/2009

École Nationale Supérieure Polytechnique 10, Avenue Hassan Badi. El-Harrach. Alger



DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail :

A la mémoire de mon père **DAHMANE**

A ma mère **FATMA** pour son dévouement

A mes frères : **Cheikh Mohamed , Abdelaziz, Abdelkader, Smail**

A mes belles sœurs

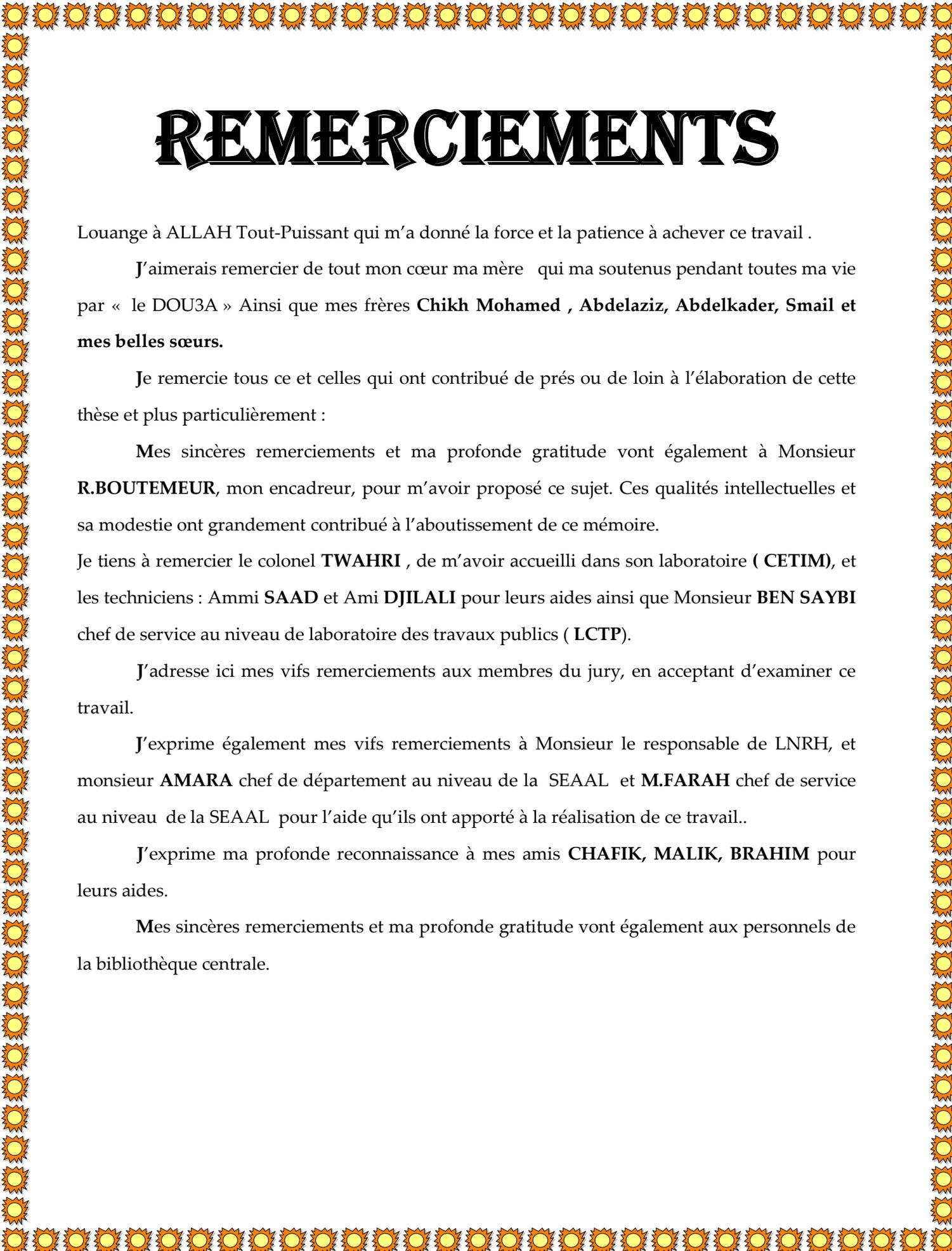
A Mes neveux

Et à toute la famille **SADOUDI** ou qu'elle soit.

A tous les enseignants du département de génie civil chaque un par son nom.

A mes collègues de travail : **Chahra Et Son Epoux Samir , Djamila , Dalila , Salima ,
Ami Samail , Ami Bachir.**

A toutes ces personnes que j'estime : **Ammi Saad , Ammi Djilali, Brahim, Chafik,
Mohamed, Farid, Mustapha, Aissa, Khawni, Younes, Samir, Foudil, Malik .**



REMERCIEMENTS

Louange à ALLAH Tout-Puissant qui m'a donné la force et la patience à achever ce travail .

J'aimerais remercier de tout mon cœur ma mère qui ma soutenus pendant toutes ma vie par « le DOU3A » Ainsi que mes frères **Chikh Mohamed , Abdelaziz, Abdelkader, Smail et mes belles sœurs.**

Je remercie tous ce et celles qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de cette thèse et plus particulièrement :

Mes sincères remerciements et ma profonde gratitude vont également à Monsieur **R.BOUTEMEUR**, mon encadreur, pour m'avoir proposé ce sujet. Ces qualités intellectuelles et sa modestie ont grandement contribué à l'aboutissement de ce mémoire.

Je tiens à remercier le colonel **TWAHRI** , de m'avoir accueilli dans son laboratoire (**CETIM**), et les techniciens : Ammi **SAAD** et Ami **DJILALI** pour leurs aides ainsi que Monsieur **BEN SAYBI** chef de service au niveau de laboratoire des travaux publics (**LCTP**).

J'adresse ici mes vifs remerciements aux membres du jury, en acceptant d'examiner ce travail.

J'exprime également mes vifs remerciements à Monsieur le responsable de LNRH, et monsieur **AMARA** chef de département au niveau de la **SEAAL** et **M.FARAH** chef de service au niveau de la **SEAAL** pour l'aide qu'ils ont apporté à la réalisation de ce travail..

J'exprime ma profonde reconnaissance à mes amis **CHAFIK, MALIK, BRAHIM** pour leurs aides.

Mes sincères remerciements et ma profonde gratitude vont également aux personnels de la bibliothèque centrale.

ملخص:

يعتبر التلوث ظاهرة طبيعية ، ناتجة عن سوء التسيير لعدة نفايات العضوية واللاعضوية ، ولهذا الغرض ومن أجل إيجاد حل لهذه الظاهرة ، قمنا بدراسة إمكانية تثمين النفاية الصناعية الجامدة ، الموجودة في صهاريج التخزين بشركة نפטال بالحراش ، بغية منا في محاولة التقليل من الأضرار الناجمة عن هذه النفاية والمحافظة على البيئة وذلك بطريقتين :

- باستعمالنا للاسمنت (CPJ45) ، قمنا بدراسة عدة تركيبات وذلك بتغيير نسبة هذه النفاية في الخرسانة إلى غاية حصولنا على النسبة التي أعطت لنا التجمد الأفضل (خصائص ميكانيكية) ، وقمنا بتجارب كيميائية على المادة المجمدة وهذا للتأكد من ثباتها.

- أما باستعمالنا للاسمنت الزفتي ، فقد قمنا بإدخال عدة نسب مئوية من هذه النفاية وحصلنا على نتائج مرضية من حيث التجمد ، وقمنا بتجارب كيميائية على المادة المتحصل عليها وهذا للتأكد من ثباتها .

النتائج المتحصل عليها سمحت لنا بتثمين المركبات المحصل عليها كعناصر ثانوية كحواص الطرقات .

الكلمات المفتاحية : نفاية صناعية ، التجميد ، التثبيت ، خرسانة ، زفت ، تثمين .

Résumé :

La pollution est un phénomène lié à la mauvaise gestion des déchets organiques et inorganiques. Notre recherche consiste en un traitement suivi d'une étude de valorisation, d'un déchet industriel solide provenant des bacs de stockage de carburant. L'objectif recherché est de protéger l'environnement et lutter contre la pollution qui résulte de ce déchet.

Le traitement choisi consiste à appliquer au déchet le procédé solidification/stabilisation en utilisant deux liants (hydraulique et hydrocarboné).

Des tests mécaniques sont réalisés sur des éprouvettes élaborées en vue de mesurer la solidité du produit obtenu après traitement.

Des tests de lixiviation sont ensuite réalisés sur des éprouvettes pour vérifier la stabilité des éléments polluants contenus dans le déchet.

Les résultats encourageants obtenus, sur les éprouvettes, ont permis d'envisager une valorisation du matériau élaboré en tant qu'élément de voirie ou de chaussée.

Mots clés : Déchet industriel – Solidification – Stabilisation – Béton – Enrobé – Valorisation.

Abstract:

Pollution is a phenomenon linked to the mismanagement of organic and inorganic waste. Our research is a follow-up study of a recovery, a solid industrial waste from storage tanks of fuel. The aim is to protect the environment and fight against pollution resulting from this waste.

The treatment is chosen to be applied to process waste solidification / stabilization using two binders (hydropower and hydrocarbon).

Mechanical tests are performed on samples developed to measure the strength of the product obtained after treatment.

Leaching tests are performed on specimens to check the stability of the pollutants in the waste.

The encouraging results obtained on the samples, have led to the recovery of the material developed as a road or pavement.

Keywords: industrial waste - Solidification - Stabilization - Concrete - Bituminous mix - Valorisation .

TABLE DES MATIERES

DÉDICACES	
REMERCIEMENTS	
RÉSUMES	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	

INTRODUCTION GENERALE	01
------------------------------------	----

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. PROBLEMATIQUE	04
I.2 LA POLLUTION	05
I.2.1. Caractérisation de la pollution	05
I.2.2. Différents paramètres indicateurs de pollution d'une activité industrielle	06
I.2.3. Modes d'apparition de la pollution	06
I.3. GENERALITES SUR LES DECHETS	07
I.3.1. Approche réglementaire	07
I.3.2. Approche environnementale	08
I.3.3. Approche économique	08
I.3.4. Approche fonctionnelle	08
I.4. IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT	10
I.5. STRATEGIES DE GESTION ET FILIERES DE TRAITEMENT	10
I.5.1. Stratégies de gestion des déchets	10
I.5.2. Traitement interne et traitement externe	11
I.5.3 Filières de traitement	12
I.5.4 Procédés de traitement	13
I.5.5 Critères d'admissibilité des déchets en centre de stockage.....	13
I.6.GENERALITES SUR LE PROCEDE DE STABILISATION/SOLIDIFICATION	14
I.6.1 Principes	14
I.6.2. Définition du procédé	15
I.6.3. Les Différentes techniques de stabilisation	15
I.6.3.1 La vitrification	15
I.6.3.2 La fixation physique	16
I.6.3.3 La stabilisation /solidification à base de liants hydrauliques (LH)	16
I.6.3.4 La stabilisation/solidification par liants hydrocarbonés	19
I.6.4 Déchets a stabiliser/solidifier.....	19
I.6.5 Objectifs de la stabilisation/solidification des déchets.....	20
I.6.6 Caractérisation des déchets stabilisés/solidifiés.....	20

CHAPITRE II : TRAITEMENT DU DECHET PAR UN LIANT HYDRAULIQUE

II.1. LES CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX	22
II.1.1. Etude du déchet	22
II.1.1.1 Caractérisation du déchet	22
II.1.1.2 Composition élémentaire du déchet	22
II.1.1.3 Spectre de diffraction des rayons X du déchet	23
II.1.1.4 Danger provenant du déchet	24
II.1.1.5. Analyse granulométrique du déchet	24
II.1.2 Les caractéristiques des granulats	26
II.1.2.1 Les caractéristiques géométriques	26
II.1.2.1.1 Granulométrie	26
II.1.2.1.2. Coefficient volumétrique	32
II.1.2.1.3. Module de finesse (NFP 18-304)	33
II.1.2.1.2. Les caractéristiques physiques	33
II.1.2.1.2.1 Porosité	33
II.1.2.1.2.2 La masse volumique absolue	35
II.1.2.1.2.3 La masse volumique apparente	35
II.1.2.1.2.4 Propreté des granulats	36
II.1.2.1.3 Les caractéristiques mécaniques	39
II.1.2.1.3.1. Essai de LOS ANGELES	39
II.1.2.1.3.2. Essai Micro Deval	39
II.1.2 Les caractéristiques du ciment	40
II.1.2.1 Définition	40
II.1.2.2 Les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques	40
II.1.2.2.1 Les caractéristiques chimiques	40
II.1.2.2.2 les caractéristiques physiques	41
II.1.2.2.3 Les caractéristiques mécaniques.....	41
II.1.3 Les caractéristiques d' eau de gâchage	42
II.1.3.1 Caractéristiques physiques	42
II.1.3.1 Caractéristiques chimiques	42
II.1.3.1 Le calcul de la quantité d'eau	42
II.1.4 Les adjuvants	43
II.1.4 .1 Les adjuvants insolubles (plastifiants)	44
II.1.4.2 Les adjuvants tensio-actifs	44
II.1.4.2.1 Les entraîneurs d'air	44
II.1.4.2.2 Les réducteurs d'eau (fluidifiants)	44
II.1.4.3 Les adjuvants solubles	45
II.1.4 .4 Les accélérateurs de prise	45
II.1.4.5 Les accélérateurs de durcissement	45
II.1.4.6 Les retardateurs de prise	45
II.1.4.7 Les superplastifiants (SP)	45
II.2 METHODE DE FORMULATION	48
II.2.1. Particularités de la méthode de Faury	48
II.2.2 Courbe optimale	48

II.2.3. Détermination des pourcentages des agrégats	50
II.2.4 Détermination de la courbe granulométrique du mélange projeté, et comparaison avec la courbe optimale	51
II.2.5 Détermination de la composition d'un mètre cube de béton	51
II.3 ETUDE MECANIQUE DU BETON	53
II.3.1 Fabrication des éprouvettes	53
II.3.2 Incorporation du déchet	53
II.4 ESSAIS SUR BETON FRAIS ET DURCI	54
II.4.1 Consistance du béton	54
II.4.2 Essais de compression	55
II.4.3 Essais de traction	55
II.5. RESULTAS DES ESSAIS MECANQUES	58
II.5.1. Résultats des essais de compression	58
II.5.2. Résultats des essais de traction par flexion	60
II.5.3 Résultats des essais de compression avec adjuvant	62
II.6. ESSAI DE LIXIVIATION (norme NFP X31-211)	62
II.7.VALORISATION DU MATERIAU ELABORE	64
II.8. Conclusion	65

CHAPITRE III : TRAITEMENT DU DECHET PAR UN LIANT HYDROCARBONE

III.1. CARACTÉRISTIQUES DES MATERIAUX	66
III.1.1 Caractérisation des agrégats	66
III.1.1.1 La granulométrie	66
III.1.1.2 Les essais physiques et mécaniques des agrégats	68
III.1.2 Caractérisation des liants	68
III.1.2.1 Principaux liants utilisés en Algérie	68
III.1.2.1.1 Les liants hydrocarbonés	68
III.1.2.1.1.1 Les goudrons	68
III.1.2.1.1.2 Les bitumes	69
III.2. LES ENROBES BITUMINEUX	70
III.2.1. Définition	70
III.2.2. La classification des enrobes bitumineux	70
III.2.2.1. Les enrobés denses	70
III.2.2.2. Les enrobés semi - denses	71
III.2.2.3. Les enrobés ouverts	71
III.2.2.3.1. Le béton bitumineux (BB)	71
III.2.2.3.2 Les graves bitumes (GB)	71
III.2.3. Les qualités exigées des enrobés bitumineux	72
III.2.3.1. La stabilité	72
III.2.3.2. La flexibilité	72
III.2.3.3. L'absence de sensibilité à l'eau	72
III.2.3.4. La durabilité	72
III.3 LES ESSAIS SUR LE BITUME	73
III.3.1 L'essai de pénétration (NF T 66.004)	73

III.3.2 L'essai de ramollissement (NF T 66.008)	73
III.3.3 L'essai (bille anneau) (NF T 66.008)	74
III.3.4 Le point d'éclair, point de flamme (NF T 66.004)	74
III.3.5 La ductilité (NF T 66.006)	74
III.3.6 Les résultats des essais effectués au laboratoire	74
III.4. FORMULATION DE L'ENROBE	75
III.4.1 Méthodologie de formulation d'un enrobé	75
III.4.2. Méthode du L.C.P.C	75
III.4.3 Méthode de calcul de la surface spécifique et teneur en liant	76
III.4.3.1 Calcul de la surface spécifique du granulat	76
III.4.3.2 Teneur en liant hydrocarboné	76
III.5 LES ESSAIS SUR LES ENROBES BITUMINEUX	77
III.5.1 Mode opératoire de l'essai d'adhésivité TWIT (NF 66 008)	77
III.5.2 L'essai Duriez de compression simple (dilate)	77
III.5.2.1 But de l'essai	77
III.5.2.2 Principe de l'essai	78
III.5.3 L'essai marshall	79
III.5.3.1. But de l'essai	79
III.5.3.2. Principe de l'essai	79
III.6. CHOIX DU TYPE D'ENROBÉ BITUMINEUX	80
III.7. ETUDE DE FORMULATION SANS DECHET	81
III.7. 1. La courbe granulométrique du mélange	81
III.7. 2. Résultats de l'étude de formulation sans déchet	82
III.7.2.1 La résistance mécanique obtenue en fonction de la teneur en liant	82
III.7.2.2. La densité en fonction de la teneur en liant	83
III.7.2.3. La compacité et le pourcentage des vides en fonction de la teneur en liant	84
III.7.2.4. Pourcentage de gonflement et d'imbibition en fonction de la teneur en liant	84
III.7.2.5. Pourcentage d'affaissement en fonction de la teneur en liant	85
III.8. ETUDE DE FORMULATION AVEC DECHET	86
III.8.1. Composition granulométrique de mélange	86
III.8.2. Les résultats d'étude de formulation avec déchet	86
III.8.2.1. La résistance à la compression en fonction du pourcentage de déchet	87
III.8.2.2 Le rapport r'/R en fonction du pourcentage du déchet	88
III.8.2.3 La densité vraie et apparente en fonction du pourcentage de déchet	88
III.8.2.4. Pourcentage d'affaissement et de gonflement en fonction du pourcentage du déchet	89
III.8.2.5. Pourcentage de vide occupé par le bitume en fonction du pourcentage du déchet	89
III.8.2.6 La compacité en fonction du pourcentage du déchet	90
III.9. Résultats de l'essai de lixiviation	90
III.10. Conclusion	91
CONCLUSION GENERALE	92
ANNEXE A	94
ANNEXE B	103
ANNEXE C	111
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	119

LISTE DES FIGURES

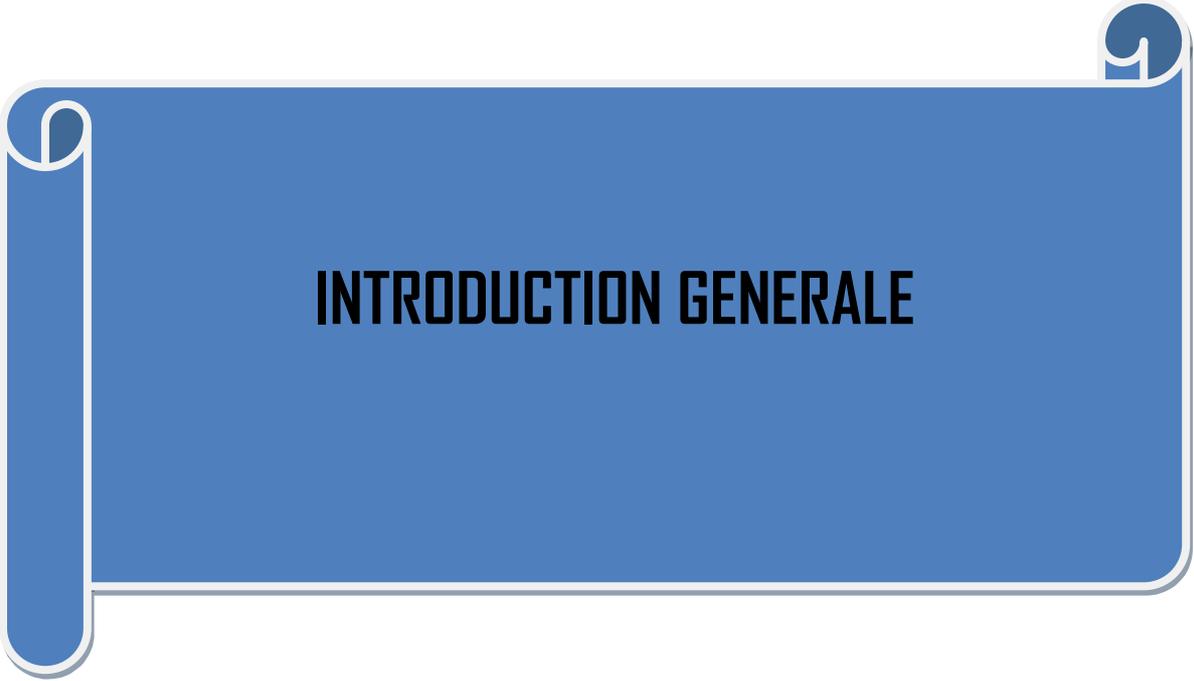
Figure 1.1. : Cycle de vie de déchet	9
Figure 2.1. : Spectre de diffraction des rayons X de la boue	23
Figure 2.2. : Courbe granulométrique du déchet	25
Figure 2.3. : Courbes granulométriques des fractions	30
Figure 2.4. : Granularité continue	31
Figure 2.5. : Granularité discontinue	31
Figure 2.6. : coefficient volumétrique	32
Figure 2.7. : Fuseaux de granularité admissible	34
Figure 2.8. : Essai équivalent de sable	37
Figure 2.9. : La courbe optimale selon faury	48
Figure 2.10. : Courbe granulométrique du mélange	48
Figure 2.11. : Incorporation du déchet	53
Figure 2.12. : Essai de traction directe	55
Figure 2.13. : Essai de traction par fendage	56
Figure 2.14. : Essai de traction par flexion centrée	57
Figure 2.15. : Essai de traction par flexion sous moment constant	57
Figure 2.16. : Résistance à la compression à 28 jours	58
Figure 2.17. : Résistance à la compression à 90 jours.....	59
Figure 2.18. : Résistance à la traction par flexion à 28 jours	60
Figure 2.19. : Résistance à la traction par flexion à 90 jours.....	61
Figure 2.20. : Résistance à la traction par flexion centrée de la bordure de trottoir à 28 et 90 Jours	65
Figure 3.1. : Courbe granulométrique des fractions	67
Figure 3.2. : Armoire climatique	78
Figure 3.3. : Moule de l'essai duriez simple	79
Figure 3.4. : Moule de l'essai duriez dilaté	79
Figure 3.5. : Moule de l'essai Marshall	80
Figure 3.6. : Presse universelle	80
Figure 3.7. : La courbe granulométrique du mélange	81
Figure 3.8. : La résistance mécanique obtenue en fonction de la teneur en liant	82

Figure 3.9. : La densité en fonction de la teneur en liant	83
Figure 3.10. : La compacité et le pourcentage des vides en fonction de la teneur en liant	84
Figure 3.11. : Pourcentage de gonflement et d'imbibition en fonction de la teneur en liant	84
Figure 3.12. : Pourcentage d'affaissement en fonction de la teneur en liant	87
Figure 3.13. : La résistance en fonction du pourcentage de déchet	87
Figure 3.14. : Le rapport r/R en fonction du pourcentage de déchet	88
Figure 3.15. : La densité vraie et apparente en fonction du pourcentage de déchet	88
Figure 3.16. : Pourcentage d'affaissement et de gonflement en fonction du pourcentage de déchet	88
Figure 3.17. : Pourcentage de vide occupé par le bitume en fonction du pourcentage de déchet	89
Figure 3.18. : La compacité en fonction du pourcentage de déchet	90

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Classification des filières de traitement des déchets	13
Tableau 1.2 : Critères d'admission des déchets dans les décharges ou en stockage souterrain	14
Tableau 1.3 : Liste des déchets à stabiliser	19
Tableau 2.1 : L'analyse chimique du déchet	22
Tableau 2.2 : Analyse granulométrique du déchet	24
Tableau 2.3 : Classification des granulats par grosseurs	27
Tableau 2.4 : Analyse granulométrique du sable de TIZI-OUZOU	27
Tableau 2.5 : Analyse granulométrique du gravier de kedara (8/15).....	28
Tableau 2.6 : Analyse granulométrique du gravier de kedara (15/25).....	29
Tableau 2.7 : Masses volumiques absolues des granulats	35
Tableau 2.8 : Masses volumiques apparentes des granulats	35
Tableau 2.9 : Les valeurs préconisées pour l'équivalent de sable	38
Tableau 2.10 : Résultats de l'essai équivalent de sable	38
Tableau 2.11 : Résultats de l'essai LOS ANGELES	39
Tableau 2.12 : Résultats de l'essai MICRO DEVAL	40
Tableau 2.13 : Caractéristiques chimiques du ciment	40
Tableau 2.14 : Caractéristiques physiques du ciment	41
Tableau 2.15 : Caractéristiques mécaniques du ciment	41
Tableau 2.16 : Valeurs de K	43
Tableau 2.17 : Pourcentages des différents granulats	50
Tableau 2.18 : Détermination de la courbe granulométrique du mélange	51
Tableau 2.19 : Composition d'un mètre cube de béton	53
Tableau 2.20 : Consistance du béton en fonction de l'affaissement	54
Tableau 2.21 : Résistance à la compression simple à 28 jours	58
Tableau 2.22 : Résistance à la compression simple à 90 jours	59
Tableau 2.23 : Résistance à la traction par flexion à 28 jours	60
Tableau 2.24 : Résistance à la traction par flexion à 90 jours	61
Tableau 2.25 : Résistance à la compression simple à 28 jours avec adjuvant	62
Tableau 2.26 : Composition chimique du lixiviat	63
Tableau 2.27 La résistance à la traction par flexion centrée de la bordure de trottoir à 28 et 90 jours.....	64
Tableau 3.1 : Analyse granulométrique des fractions	66
Tableau 3.2 : Résultats des essais sur granulats	68

Tableau 3.3 : Classement du béton bitumineux	71
Tableau 3.4 : L'essai de pénétrabilité	74
Tableau 3.5 : Essai de point de ramollissement	74
Tableau 3.6 : Essai de point d'éclair « vase ouvert »	75
Tableau 3.7 : Les valeurs de module de richesse	76
Tableau 3.8 : Résultats de formulation sans déchet	82
Tableau 3.9 : Composition granulométrique de mélange	86
Tableau 3.10 : Résultats de l'essai duriez avec différents pourcentages de déchets	87
Tableau 3.11 : Composition chimique du lixiviat	90



INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'homme a bien changé. La volonté d'améliorer l'environnement par le besoin d'un cadre de vie plus agréable ; le poids de plus en plus important de l'écologie, ont amené les pouvoirs politiques nationaux et régionaux à définir une politique de valorisation des déchets, à resserrer leurs liens dans ce domaine, à coordonner leurs actions pour promouvoir cette politique. De plus l'évolution des modes de production et de consommation a créé de nombreux problèmes de pollution qui menacent l'équilibre écologique de la planète. Devant ce fléau l'humanité a pris conscience de la nécessité de protéger son environnement, en préservant l'eau, l'air et le sol.

Vu la quantité de déchets produite est de plus en plus importante, la loi sur l'élimination et le traitement des déchets en France prévoit depuis 2002, de stocker les déchets ultimes de manière définitive ou jusqu'à la mise au point de nouveaux procédés permettant une valorisation rentable dans le futur. Suivant cette politique les industriels sont contraints de gérer et de traiter tous types de déchets, selon leurs degrés de nocivité, en application des lois en vigueur.

Il existe cinq grandes stratégies de gestion des déchets industriels. Les deux premières, l'arrêt de la production d'un déchet donné et l'optimisation du procédé dont il est issu, ces stratégies visent à une réduction de la quantité des déchets produits. Les deux suivantes ont pour objectif de traiter les déchets, il s'agit du recyclage ou de la réutilisation et du rejet écocompatibles. Elles s'adressent aux déchets dont la quantité a été réduite ou aux « irréductibles » par les deux premières voies. Non seulement ces quatre stratégies ne permettent pas de gérer tous les déchets mais elles conduisent inévitablement à générer des déchets secondaires. La dernière stratégie consiste à stocker ; elle s'adresse aux déchets primaires exclus et aux déchets secondaires issus des quatre précédentes.

La sévérité des nombreuses normes d'acceptation des déchets en centre de stockage ou en décharge a permis l'essor des procédés physico-chimiques d'inertage notamment par l'utilisation de la technique de stabilisation / solidification .

La facilité de mise en œuvre du procédé de stabilisation /solidification par liant hydraulique et son faible coût justifie qu'il soit actuellement le plus utilisé parmi les différents procédés de stabilisation existants (fixation physique, chimique solidification et vitrification).

L'Algérie comme plusieurs pays au monde fait face à de sérieux problèmes de dégradation de l'environnement et de pertes de ressources naturelles.

La protection de l'environnement en Algérie doit être prise comme partie intégrante du développement lui-même. Bâtir des politiques publiques constitue le socle de base pour la mise en œuvre des programmes d'utilisation rationnelle des ressources naturelles, de fourniture de services environnementaux de qualité et d'amélioration de la performance environnementale.

Le traitement et la valorisation des déchets contribuent positivement à la protection de l'environnement et à la diminution de la quantité des déchets évacués vers les décharges en augmentant leur durée d'exploitation ; cela permettra à l'Algérie de faire :

- Une économie substantielle des matières premières,
- De retrouver un meilleur équilibre de ses écosystèmes,
- Un environnement sain.

Pour atteindre ces objectifs il est nécessaire de faire participer toutes les spécialités particulièrement le génie civil qui est considéré comme l'un des plus importants secteurs consommateurs de ressources naturelles (granulats). En effet le marché des granulats en Algérie vit une tension assez aigue du fait, de la limitation et de l'épuisement dans certaines régions.

Pour atténuer le risque de pollution de l'environnement, on peut procéder à un traitement de solidification/stabilisation par un liant hydraulique qui doit permettre d'immobiliser, au sein d'une matrice solide (enrobage dans du bitume ou résine, confinement dans des bétons, vitrification), aussi les éléments polluants sont contenus dans le déchet traité. Deux effets sont visés : le confinement et la réduction à un faible niveau de leurs solubilités.

Plusieurs déchets ont été incorporés dans ce domaine, soit comme agrégats dans le béton, soit comme ajout dans la fabrication de ciment ou encore dans les techniques routières.

Vu la diversité des déchets industriels et leurs propriétés, nous avons opté pour la valorisation d'un déchet pétrolier qui est une boue de bac de stockage, provenant plus précisément de bac de stockage de mazout (gasoil) se trouvant au centre de stockage de NAFTAL EL-HARRACH.

Notre travail consiste d'abord à élaborer et appliquer un traitement adéquat à cette boue, en utilisant le procédé de solidification/stabilisation à l'aide de deux liants différents puis rechercher une valorisation du matériau traité notamment dans le domaine du Génie Civil.

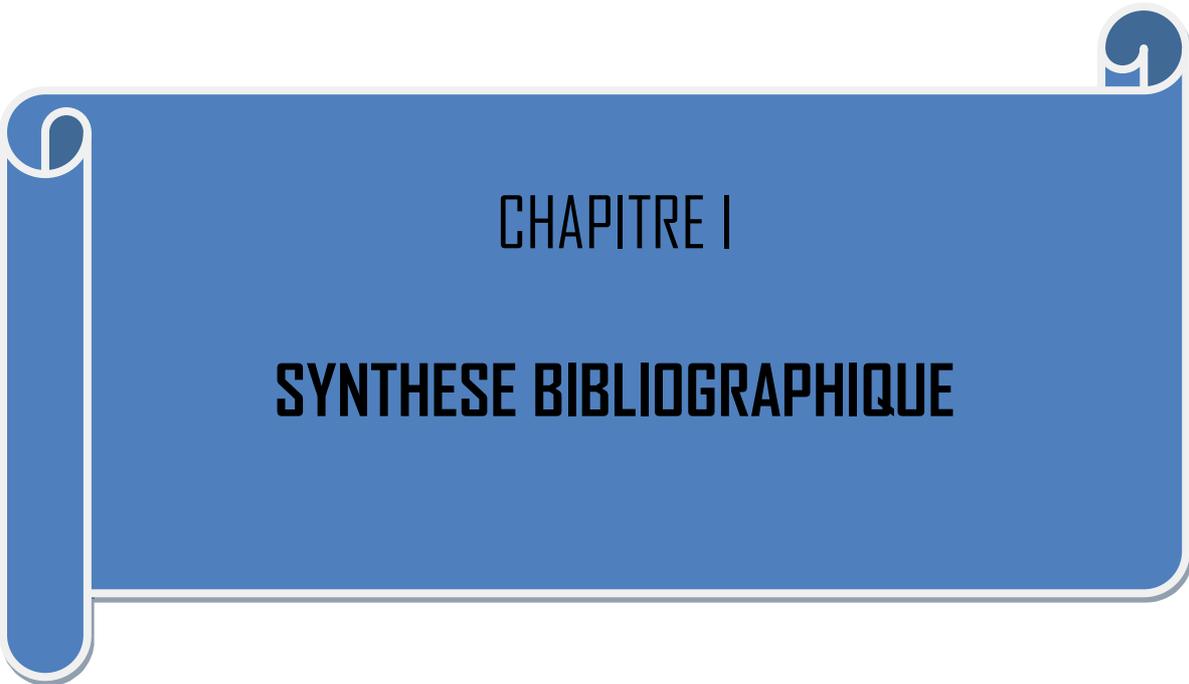
Le travail présenté dans ce projet de magister est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre a été consacré à une étude bibliographique où on a traité la problématique qui nous a poussée de procéder à la valorisation de notre déchets , les aspects de la pollution engendrée par les déchets, et les différentes stratégies de gestion de ces derniers, et les généralités sur le procédé de solidification /stabilisation ainsi que les études qui ont permet d'aboutir a ce procédé.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes intéressés à la caractérisation des matériaux rentrant dans la formulation du béton à savoir le déchet , les agrégats, le ciment et les adjuvants , suivi par le traitement de notre déchet par un liant hydraulique, et des essais de solidification et stabilisation , ensuite une valorisation du matériau élaboré en tant qu'élément de construction.

Ensuite un troisième chapitre a été consacré à la caractérisation des constituants rentrant dans la formulation du béton bitumineux tels que les granulats, les bitumes , suivi par du traitement de déchet par un liant bitumineux et des essais de solidification et stabilisation.

Enfin, une conclusion générale est présentée démontrant l'intérêt de cette étude et ouvrant des perspectives pour les recherches à venir.



CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. PROBLEMATIQUE :

Au cours des dernières années, il est apparu que les déchets constituent un gisement considérable de matières premières et d'énergie. Cependant, l'exploitation de ce gisement nécessite la mise en oeuvre des techniques souvent coûteuses dont la compétitivité économique vis-à-vis de l'utilisation de matières premières neuves peut être faible. Bien que la valorisation soit devenue officiellement une priorité depuis la loi du 13 juillet 1992, la faible réceptivité du milieu industriel aux techniques de valorisation montre à quel point il n'est pas encore évident que le déchet soit considéré comme un gisement qu'il faut exploiter. Ceci est dû en partie au fait que les objectifs de la valorisation ne sont pas toujours bien identifiés. Avant de nous intéresser aux stratégies de gestion des déchets que l'on peut mettre en oeuvre, nous allons examiner en quoi les déchets présentent un potentiel pour la valorisation. Différents points de vue, suivant lesquels le déchet peut représenter une valeur effective ou au contraire une contrainte, sont à considérer.

De part leur nature et leur composition les déchets solides urbains des villes des pays en développement peuvent constituer une matière première pour diverses activités économiques agricoles artisanales ou industrielles .L'exploitation de ce gisement peut avoir des impacts positifs sur toute la chaîne de gestion des déchets et au –delà (génération d'emplois et de ressources).

Malheureusement cet aspect de la gestion des déchets est resté longtemps ignoré par les gestionnaires urbains d'abord préoccupés par la collecte et l'évacuation des déchets. C'est au secteur informel que reviennent les activités de récupération de recyclage et de transformation des déchets. Mais les marges bénéficiaires sont faibles en raison de contraintes techniques (tri manuel des déchets centralisés à la décharge) et économiques (méconnaissance des produits finis, coûts de production).

Cette conception restreinte de la gestion des déchets évolue : les déchets sont de plus en plus considérés comme une ressource bien que l'impact économique de la valorisation soit encore mal connu et la gestion des déchets tend à s'élargir à la valorisation. Celle – ci devient alors une composante d'un schéma global et cohérent de gestion des déchets selon une approche qui, à l'idéal, prend en compte d'autres objectifs (économiques, sanitaires, sociaux et environnementaux).

L'intégration de la valorisation à la filière de gestion des déchets a des retombées de plusieurs ordres :

- Economiques et financières (création d'emplois et de ressources, production de matières premières secondaires pour l'artisanat l'agriculture et l'industrie, impact sur les coûts globaux de gestion de la filière déchets) ;
- Techniques et organisationnelles (incidences sur les choix techniques des équipements et l'organisation des différentes séquences de la filière) ;
- Sociaux (lutte contre la marginalisation sociale et la pauvreté urbaine).

1.2 LA POLLUTION :

« La pollution consiste en l'introduction dans les milieux, de trop grandes quantités d'agents chimiques, physiques ou biologiques entraînant une altération de l'environnement, de nature à mettre en danger la santé humaine, à endommager les ressources alimentaires, biologiques et les écosystèmes ou encore à détériorer les biens matériels » [24].

Cette définition correspond aux normes françaises « AFNOR ». D'autres définitions de la pollution ont été avancées, nous retiendrons celle rédigée en 1965 par le comité scientifique officiel de la Maison Blanche des Etats Unis pour la protection de l'environnement.

« La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en presque totalité ou en partie comme le sous-produit de l'action humaine, au travers d'effets directs ou indirects altérant les modalités de répartitions des flux d'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes » [24].

1.2.1. Caractérisation de la pollution :

La pollution est généralement caractérisée par :

- Son origine (sa source).
- La nature des polluants
- La nature des nuisances.

Comparativement aux déchets d'origine agricole ou d'origine ménagère, les déchets industriels posent un certain nombre de problèmes dus à :

1. La quantité liée à l'importance de la production.
2. Leur diversité : Certains d'entre eux sont polluants voire même dangereux. De ce fait leur élimination est impérative même si elle présente des difficultés.
3. Leur valeur économique n'est pas toujours nulle, beaucoup renferment des éléments dont la récupération servira de matières premières à d'autres activités.

Lorsqu'un effluent d'une quelconque industrie est rejeté dans le milieu naturel, il peut induire différentes nuisances, liées tout particulièrement aux substances qu'il véhicule et au milieu récepteur.

Généralement, cet effluent peut être la source d'une pollution:

- Organique ou minérale, lorsque l'effluent contient les matières dissoutes décantées ou colloïdales.
- Toxique, lorsque l'effluent véhicule des matières qui se composent de sel à forte concentration, d'ions métalliques, d'hydrocarbures ou lorsqu'elles sont à base de phosphore ou d'azote.
- Thermique, lorsque la température de l'effluent est telle qu'elle provoque une importante variation de la température du milieu.

1.2.2. Différents paramètres indicateurs de pollution d'une activité industrielle :

La principale source de la pollution est l'industrie dont les polluants industriels ont la redoutable particularité de contenir parfois des produits nouveaux ou mal connus dont la dangerosité pour le milieu (donc pour l'homme) n'est pas évidente de prime abord. En effet, les rejets industriels souvent polluants, renferment des substances toxiques parmi lesquelles nous citons particulièrement les métaux lourds et les hydrocarbures.

1.2.3. Modes d'apparition de la pollution :

Le transfert de pollution du déchet vers le milieu naturel peut avoir lieu dans les circonstances suivantes :

- Rejet direct dans l'environnement
- Stockage temporaire
- Transport
- Stockage définitif
- Traitement

Ce transfert peut être accidentel, dans le cas du transport par exemple, ou chronique. Dans le cas d'une pollution consciente, l'objectif est de la maîtriser afin d'en diminuer l'impact. Dans le cas d'une pollution inconsciente liée par exemple au rejet d'effluents pollués, une première étape de diagnostic est nécessaire. Elle doit mettre en évidence le caractère nocif de l'action à l'origine de la pollution.

Les milieux concernés par la pollution sont le sol, l'air et les milieux aquatiques. Les conséquences des pollutions sont variées. Elles peuvent être de type sanitaire, liées à la contamination des ressources en eau ou de l'alimentation d'une population, écologiques, lorsqu'elles se traduisent par une modification sensible d'un écosystème, esthétiques, agricoles, ou même industrielles si la pollution entraîne une limitation de l'usage de l'eau à des fins industrielles (industries agro-alimentaires, par exemple) [19]. Elles sont difficiles à évaluer quantitativement dans la mesure où elles sont dues en partie à des rejets non contrôlés. D'autre part, si les flux de certains polluants peuvent être estimés, il n'est pas toujours évident de lier cette estimation à un effet sur le milieu naturel ou l'environnement. On peut cependant faire la relation entre les quantités de polluants rejetés dans l'environnement et les concentrations dans les milieux aquatiques, celles-ci ayant des conséquences directes sur les qualités des eaux et l'activité biologique qu'elles abritent.

I.3. GENERALITES SUR LES DECHETS :

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 » .

La notion de déchet est toujours ambiguë car ce qui est déchet pour une personne peut être considéré comme matière première pour une autre. Il est démontré que la valorisation de la fraction utile des déchets et la réduction du caractère polluant ou dangereux pouvait assurer une bonne gestion des déchets.

Néanmoins, il existe toujours une fraction de déchet, éventuellement toxique, appelé déchet ultime. La loi du 15 juillet 1975 modifiée le 13 juillet 1992 a introduit la notion de « déchet ultime » est qui est selon cette loi « un résidu qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment , notamment par extraction de la part valorisable ou part réduction de son caractère polluant ou dangereux ». La gestion de ces déchets dangereux étant inévitable, deux champs de réflexion se sont alors présentés ouverts aux industriels :

1- le déclassement du déchet (autorisant une mise en décharge en classe « non dangereux » ,voir à la limite en « inertes » ;

2- la valorisation du déchet (en l'état ou après traitement de stabilisation) permettant de faire l'économie de toute mise en décharge , voire de dégager un prix de vente du résidu .

Dans les deux cas cela nécessite une véritable étude du comportement environnemental du déchet dans les conditions réelles du scénario de stockage ou de valorisation considéré .

A l'origine de toute mesure particulière visant les déchets, il y a l'hypothèse que la notion même de déchet peut être redéfinie. 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.[21]

I.3.1. Approche réglementaire :

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. [6].

L'Algérie a mis 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 relatifs à la protection de l'environnement tels que :

- 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.
- Décret n°02-372 du 11/11/2002 relatif aux déchets d'emballages.

I.3.2. Approche environnementale :

Du point de vue de l'environnement, un déchet constitue une menace à partir du moment où l'on envisage un contact avec l'environnement. Ce contact peut être direct ou le résultat d'un traitement. Historiquement, du fait de la prédominance de la filière enfouissement technique durant de nombreuses années, on considérait ce contact comme inéluctable. Plusieurs définitions mettent ainsi en avant la composition du déchet comme critère d'identification (comme l'indique la directive européenne du 18 mars 1991). Cette approche peut conduire à considérer des sous-produits de nature dangereuse ou contenant des polluants comme des déchets indépendamment de leur valeur ou de leur possible réutilisation.

I.3.3. Approche économique :

Sur le plan économique, un déchet est une matière ou un objet dont la valeur économique est nul ou négative pour son détenteur à un moment et dans un lieu donné [22]. Cette définition exclut une bonne part des déchets recyclables, qui possèdent une valeur économique, même faible. Certaines entreprises peuvent ainsi être tentées de faire passer certains déchets pour des sous-produits pour les soustraire à la loi.

I.3.4. Approche fonctionnelle :

Enfin, on peut choisir d'adopter pour le déchet une approche plus « fonctionnelle ». Dans ce cadre, le déchet est considéré comme un flux de matière issu d'une unité fonctionnelle, celle-ci représentant une activité ou un ensemble d'activité.

En entrée de l'unité fonctionnelle, on peut identifier plusieurs flux : matières premières, énergie et éléments de l'environnement : eau, air, sol. Les flux en sortie sont constitués par les produits et les résidus. Les produits correspondent, de la manière la plus générale aux résultats recherchés dans le cadre de l'unité fonctionnelle. Il peut s'agir de résultats matériels (objet, matière, énergie) ou immatériels (déplacement, information, alimentation, loisir...).

Les résidus sont eux composés des résultats non recherchés. Certains auteurs parlent de sorties désirables ("désirable outputs") et indésirables ("undésirable outputs") [11]. Parmi ces résultats non désirés, on retrouve les éléments du milieu naturel transformés par l'activité. On parle alors des effluents, des nuisances (bruit), de l'énergie (pertes énergétiques) et des déchets qui correspondent à l'ensemble des éléments matériels non assimilables directement avec les éléments du milieu naturel.

On constate immédiatement que la frontière entre déchet et effluent peut être tout à fait arbitraire. Elle dépend en effet des limites que l'on choisit au delà desquelles le flux ne peut plus être assimilé à un élément du milieu naturel. En général, les opérations associées au flux détermineront s'il s'agit d'un effluent ou d'un déchet. On parle d'effluent dans le cas d'un rejet en continu après un éventuel traitement, de déchet dans le cas d'un rejet discontinu. Cette distinction entre effluent et déchet peut se révéler importante sur le plan pratique dans la mesure où les contraintes réglementaires ne sont pas les mêmes pour les deux types de rejets. Cependant un effluent peut se transformer en déchet à l'issue d'une décision de traitement. Inversement, le traitement d'un déchet se traduit presque toujours par le rejet d'un effluent qui constitue en fait une partie du déchet initial.

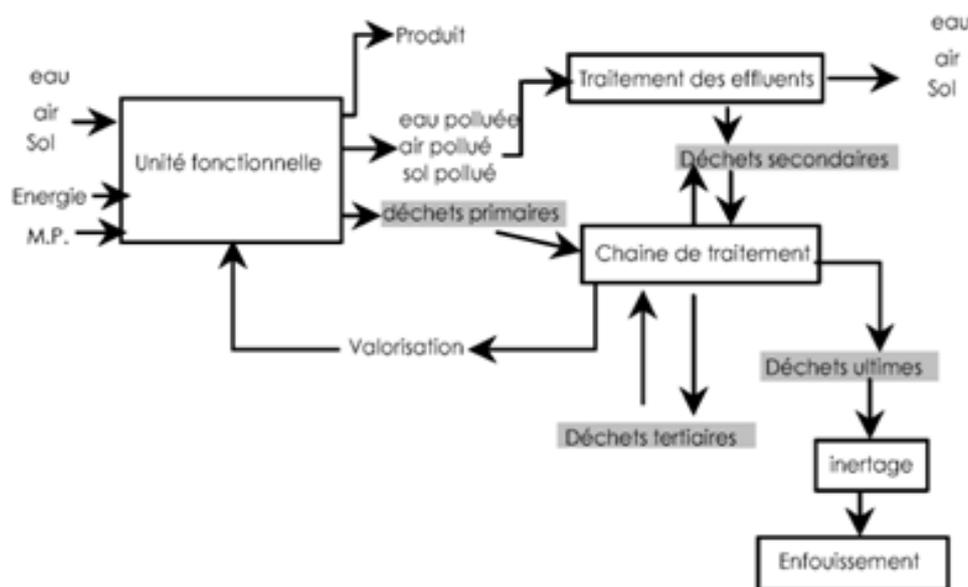


Figure 1.1 : Cycle de vie du déchet

I.4. IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT:

Le traitement d'un certain nombre de déchets nous permet de réduire d'une manière efficace l'impact nuisant de ces rebuts sur l'environnement.

Il est toute fois utile de connaître le rôle de ces déchets dans la pollution de l'environnement.

Les déchets : leur abandon ou le traitement des déchets peuvent entraîner deux types de phénomènes :

- Des nuisances dont le caractère est essentiellement subjectif et lié à la perception du public,
- Des impacts qui peuvent se caractériser par une mesure de pollution ou de coût par exemple.

Les nuisances associées aux déchets sont de natures différentes : nuisances olfactives, nuisances esthétiques, nuisances sonores résultant du traitement. Bien qu'elles puissent jouer dans certains cas un rôle important dans l'acceptation d'une unité de traitement par la population, elles sont placées au second rang quand il s'agit des déchets spéciaux, pour lesquels l'impact lié aux effets toxiques et écotoxiques du déchet ou des rejets résultant de son traitement est plus préoccupant. Les déchets spéciaux peuvent aussi présenter un caractère dangereux du fait de leurs propriétés physico-chimiques tels que l'explosivité ou l'inflammabilité.

I.5. STRATEGIES DE GESTION ET FILIERES DE TRAITEMENT :

Les principaux objectifs poursuivis à travers le traitement des déchets sont :

- ❖ Minimiser les nuisances et les impacts associés aux déchets,
- ❖ Exploiter la valeur contenue dans ces déchets,

Il s'agit de déterminer quelles sont les possibilités qui s'offrent aux producteurs de déchets pour atteindre ces objectifs.

1.5.1. Stratégies de gestion des déchets :

Il existe cinq stratégies de gestion des déchets selon Navarro [23] :

- Arrêt de la production c'est la stratégie la plus radicale, qui consiste à ne plus produire un produit constituant en fin de vie un déchet difficilement éliminable ou entraînant lors de sa production la génération de déchets difficilement éliminables. C'est la stratégie qui a été choisie pour les (CFC) et les (PCB) par exemple. La contrepartie des cette stratégie est la recherche de produits de substitution.
- Optimisation et innovation technologique en vue de réduire les quantités de déchets produits et leur toxicité. Cette stratégie est couramment assimilée au moyen employé pour la mettre en oeuvre : les technologies propres. C'est ici la recherche de procédés de substitution qui constitue le goulot d'étranglement.

- Mise en oeuvre d'une politique de recyclage, de valorisation et de réutilisation des déchets de la production et de la consommation (que nous désignerons plus simplement sous le nom de valorisation). La difficulté consiste à trouver des procédés de transformation des déchets et des débouchés pour les matières issues de la valorisation.
- Rejet "écocompatible" des déchets ; il s'agit de retenir et concentrer la pollution afin de pouvoir rejeter un effluent dépollué vers l'environnement (rejet éco-compatible) et stocker un déchet ultime.
- 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.

On peut répartir ces cinq stratégies en deux catégories : les stratégies préventives (arrêt de la production et innovation) et les stratégies curatives (valorisation, rejet éco-compatible, stockage), ces dernières étant désignées habituellement par le mot traitement.

Les cinq stratégies ne constituent pas intrinsèquement des solutions au problème des déchets. Ce n'est qu'en les confrontant aux deux objectifs à savoir la réduction des nuisances et des impacts et la diminution des pertes de valeur, que l'on peut établir véritablement leur pertinence. Ainsi, l'arrêt de la production peut se révéler négatif si le produit de substitution ou l'absence de la fonction remplie anciennement par le produit entraîne des effets négatifs imprévus sur l'environnement.

Tout en considérant qu'il est nécessaire de prendre en compte les performances effectives de la solution technique mise en oeuvre dans le cadre d'une stratégie et que la résolution d'un problème de déchets peut faire intervenir plusieurs stratégies, on peut néanmoins établir une hiérarchie fondée sur les potentialités de chacune d'entre elles. Ainsi, les deux stratégies préventives offrent-elles la possibilité de réduire les impacts et d'éviter la perte de valeur due au rejet du déchet. La stratégie de valorisation, à condition d'avoir défini ses objectifs de manière cohérente et de la mener dans le respect des contraintes environnementales, peut aussi permettre d'atteindre les deux buts. En revanche, le rejet éco-compatible et le stockage n'ont aucun effet positif sur la limitation des pertes. Enfin le stockage, même s'il est pratiqué selon les règles, ne constitue pas intrinsèquement une action en faveur de la réduction des impacts.

1.5.2. 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 oeuvre 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 [1].

Le traitement interne à l'avantage de limiter les transports de déchets. Cependant, la maîtrise d'une installation de traitement requiert parfois des compétences et surtout les coûts 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.

1.5.3 Filières de traitement :

Les stratégies de traitement (valorisation, rejet éco-compatible, stockage) sont mises en oeuvre de manière concrète à travers ce que l'on appelle des filières de traitement. A l'origine, la notion de filière désigne un enchaînement d'opérations. Dans le domaine du traitement des déchets, il s'agit de l'ensemble des opérations à mettre en oeuvre pour aboutir aux résultats souhaités : valorisation du déchet et/ou rejet éco-compatible d'effluents dépollués et/ou stockage d'un déchet ultime. Il existe plusieurs classifications des filières selon les critères suivants :

- ❖ Nature du déchet traité (ex : huiles solubles),
- ❖ Procédé principal mis en oeuvre (ex : évapo-incinération),
- ❖ Objectif du traitement (ex : valorisation thermique),

Alain Navarro [23] a ainsi proposé une classification des filières à plusieurs niveaux.

Tableau I.1 fait apparaître essentiellement les objectifs du traitement et la nature du déchet visé.

Tableau 1.1 : Classification des filières de traitement des déchets

A) Valorisation énergétique	D) Valorisation en agriculture et agro-alimentaire
1- Combustion avec récupération d'énergie	12- Amendement organique
2- Élaboration de combustibles dérivés par des procédés mécaniques	13- Amendement minéral
3- Élaboration de combustibles dérivés par des procédés thermiques	14- Alimentation pour animaux
4- Élaboration de combustibles dérivés par des procédés biologiques	
	E) Valorisation en science de l'environnement
B) Valorisation matière première	15- Traitement des effluents pollués liquides ou gazeux
5- Matières premières organiques naturelles ou artificielles	16- Solidification ou stabilisation des déchets toxiques
6- Matières premières minérales métalliques ou non métalliques	
	F) Élimination
C) Valorisation en science des matériaux	17- Incinération
7- Liants hydrauliques et matériaux de structure	18- Traitement biologique des déchets
8- Verres et céramiques	19- Traitements physico-chimiques
9- Plastiques et caoutchouc	20- Mise en décharge
10- Fibres cellulosiques de récupération	
11- Autres	

I. 5.4 Procédés de traitement

A la notion de filière qui peut se révéler assez vague dans certains cas, on préférera parfois, notamment lorsque l'on s'intéresse au traitement interne, la notion de procédé. Une filière de traitement peut faire intervenir plusieurs procédés. D'autre part, un même objectif en terme de filière peut être atteint à l'aide de procédés différents qui ne sont pas soumis aux mêmes contraintes. Ademe a publié récemment un catalogue [8] contenant les procédés de traitement des déchets industriels qui fait intervenir une liste de 68 procédés.

I.5.5 Critères d'admissibilité des déchets en centre de stockage .

Les critères d'admissibilité des déchets ultimes en centre de stockage sont fixés comme suit par l'arrêté du 18 décembre 1992 [3] : « Les déchets admissibles sont essentiellement solides, minéraux, avec un potentiel polluant constitué de métaux

lourds peu mobilisables. Ils sont très peu réactifs, très peu évolutifs, très peu solubles. De plus, ces déchets doivent être stabilisés à court terme. Un déchet est considéré comme stabilisé quand sa perméabilité à l'eau et sa fraction lixiviable ont été réduites et quand sa tenue mécanique a été améliorée de façon que ses caractéristiques satisfassent aux critères d'acceptation des déchets stabilisés fixés ».

Le tableau 1.2 présente à titre d'exemple certains critères d'admission dans les décharges pour déchets dangereux. Les teneurs acceptées dans le déchet et dans les lixiviats sont données afin de pouvoir évaluer correctement si le déchet concerné répond aux critères permettant de le stocker.

Tableau 1.2 : Critères d'admission des déchets dans les décharges ou en stockage souterrain [16]

Caractéristique	Matière sèche (mg/kg)	Concentration (mg/l) pour les essais de percolation , L/S 01 =10
As	25	3
Cd	5	1.7
Cr total	70	15
Cu	100	60
Hg	2	0.3
Mo	30	10
Ni	40	12
Pb	50	15
Zn	200	60
Chlorure	25000	15000
Fluorure	500	120
Sulfate	50000	17000
COT sur l'éluat	1000	320
Fraction soluble	100000	-

I.6.GENERALITES SUR LE PROCEDE DE STABILISATION SOLIDIFICATION :

I.6.1 Principes :

Les procédés de Stabilisation/Solidification sont des procédés intéressants, car, avant de stocker et/ou d'utiliser un déchet, ils permettent de diminuer grandement ses rejets toxiques. Leur principe est de mélanger les déchets avec plusieurs réactifs, solides et/ou liquides, qui ont pour but d'assurer les deux fonctions essentielles de ces procédés [20]:

I.6.2. Définition du procédé :

Les procédés de stabilisation – solidification des déchets ont été largement développés au stade industriel et permettent de trouver des solutions économiques et fiables.

L'historique du procédé de solidification / stabilisation date seulement de 1970, avec l'établissement de l'agence nationale de la protection de l'environnement (EPA) aux USA.

La **stabilisation** ou fixation chimique consiste à réduire le potentiel polluant des déchets ultimes. Il s'agit en effet de transformer les espèces chimiques polluantes en composés stables ayant un potentiel polluant faible ou en composés retenue par des mécanismes d'adsorption ou d'échanges d'ions ; Cette rétention chimique des polluants se produit grâce à la formation de liaisons chimiques entre les polluants et les composés.

La **solidification** est un processus qui permet de transformer les déchets ultimes en un solide de grande intégrité structurale c'est-à-dire avec une faible perméabilité et de bonnes caractéristiques mécaniques. La solidification ne modifie pas forcément le potentiel dangereux du déchet mais le risque de dispersion des espèces toxiques dans l'environnement est limité au maximum et le contact déchet/environnement est réduit.

Ce procédé de stabilisation/solidification vise à améliorer [13] les qualités physiques et chimiques des déchets en vue de faciliter leur stockage.

I.6.3. LES DIFFERENTES TECHNIQUES DE STABILISATION :

Les techniques de stabilisation se différencient principalement par la nature organique ou minérale des réactifs employés. Des additifs peuvent éventuellement être ajoutés afin de compléter l'action des liants .

La stabilisation regroupe plusieurs techniques telles que la vitrification , la fixation physique, la fixation chimique et la solidification qui peuvent ou non être associées. Les quatre techniques de stabilisation existantes visent [13] l'amélioration de la rétention physico-chimique des polluants, donc la réduction du transfert de polluants du déchet vers le milieu extérieur ainsi que l'amélioration des propriétés physiques du déchet pour faciliter sa manipulation et son stockage.

I.6.3.1 La vitrification : consiste à retenir physico-chimiquement des polluants dans une matrice vitreuse obtenue par traitement à haute température du déchet. Cette technique aussi appelée "procédé à chaud" est utilisée principalement pour les déchets nucléaires à haute activité et pour les déchets d'amiante. Elle consiste à porter les déchets et les additifs comme le calcin à environ 1400°C pour obtenir un

verre en fusion qui sera ensuite coulé en bloc de relative petite taille afin de limiter le temps de refroidissement. Plusieurs technologies, comme les torches à plasma ou les fours à arc, sont utilisés.

Les différentes techniques de vitrification [2] mises en œuvre sont : la fusion électrique, la fusion par induction, la fusion par torche à plasma et par oxycombustion. Son principal atout est la réduction importante du volume du déchet lorsque celui-ci est autovitrifiable . La première barrière à son utilisation est son coût (très élevé du fait d'une installation importante et complexe et d'une forte consommation d'énergie). Ce procédé de vitrification est très peu utilisé pour les déchets à l'exception des déchets nucléaires.

Les avantages et les inconvénients de stabilisation par vitrification

ATOUTS	LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> • Importante réduction de volume (environ 50 %) • Produit obtenu très stable 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût élevé (gros apport énergétique) • Production d'un gaz riche en polluant qu'il faut récupérer et traiter • Mal adapté pour les déchets à fort P.C.I

1.6.3.2 La fixation physique : consiste à encapsuler, c'est-à-dire à enrober les polluants du déchet. Cette technique dite "tiède" n'est pas basée sur une réaction chimique, elle consiste simplement à enrober le déchet dans une capsule bitumineuse ou plastique étanche. Ce procédé est effectué à une température d'environ 200°C pour fluidifier le liant organique.

Les avantages et les inconvénients de stabilisation par liant organique sont :

ATOUTS	LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> • Coût acceptable • Installation technique peu encombrante • Bonne étanchéité du produit obtenu 	<ul style="list-style-type: none"> • Incompatible avec les déchets aqueux • Pas de retour d'expérience sur la tenue du produit à long terme • Temps de refroidissement du déchet stabilisé assez long • Mal adapté pour stabiliser des polluants chimiques (acide, déchets chlorés...)

1.6.3.3 La stabilisation /solidification à base de liants hydrauliques (LH) :

La sévérité des nombreuses normes d'acceptation des déchets ultimes en centre de stockage ou en décharge a permis l'essor des procédés physico-chimique d'inertage notamment par l'utilisation de la technique de stabilisation/solidification.

La facilité de mise en œuvre de cette technique de S/S par liant hydraulique ainsi que son faible coût [26] en font une des plus utilisées actuellement pour le traitement de déchets minéraux.

Jusqu'à présent en France, le procédé de stabilisation/solidification à base de liant hydraulique est appliqué uniquement aux déchets inorganiques contenant principalement des métaux lourds mais ne contenant aucune trace de polluants organiques.

Cette technique dite "à froid" est basée sur une réaction chimique entre le polluant, le liant et l'eau. Seuls ou en mélangeant avec de la chaux ou d'autres additifs, les ciments et autres réactifs pouzzolaniques sont très utilisés pour la solidification – stabilisation des déchets solides et des boues.

La stabilisation – solidification des déchets peut être obtenue par l'ajout d'un ciment ou d'un mélange de réactifs ayant des propriétés pouzzolaniques. Le ciment joue alors le rôle de liant hydraulique. Le ciment le plus utilisé est le ciment portland artificiel (CPA), fabriqué à partir d'un clinker obtenu par cuisson à 1450°C d'un mélange de calcaire (80 %) et d'argile (20%).

Les avantages et les inconvénients de la stabilisation par liants hydrauliques sont :

ATOUTS	LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> • Mise en œuvre aisée • Coût acceptable (fonction de la nature du liant) • Bon retour d'expérience • Bien adapté pour les déchets comportant une forte concentration de métaux lourds 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation conséquente du volume et du poids de base • Peu efficace sur certains polluants (granulométrie fine, chlorure...) • Liant spécifique à chaque type de déchet

La technique de stabilisation est fonction du facteur polluant du déchet et de sa comptabilité avec le liant stabilisateur.

Chaque technique est suivie par des tests de lixiviation et des tests mécaniques afin d'évaluer la tenue à long terme du déchet inerte.

Mécanismes de la stabilisation par liants hydrauliques :

- Les réactions d'hydratation d'un mélange de déchets et de ciments et/ou de liants hydrauliques peuvent être fortement perturbées avec comme conséquences, un retard de la prise et une diminution de la qualité mécanique des solidifiats obtenus. On peut même parler d'empoisonnement des réactions d'hydratation quand des éléments présents dans les déchets inhibent la prise hydraulique. Les cas du chrome et du zinc ont été particulièrement étudiés : le premier est un accélérateur de prise mais peut donner lieu à une fausse prise en favorisant la précipitation de l'ettringite au détriment des autres hydrates, par contre le second est un retardateur de

prise . Additionnellement à ces deux réactions , il y aussi les sels qui font en général courir un risque d'instabilité mécanique des solidifiats , en particulier les chlorures et les sulfates dont la présence peut entraîner des gonflements générateurs de fissurations .

- La stabilisation d'un déchet obtenue par la solidification à l'aide d'un liant hydraulique doit conduire à l'immobilisation des polluants au sein de la matrice solide. Le contact du matériau avec l'eau et la dissolution des polluants constituent alors le principal risque de leur dispersion . La limitation de ce risque est obtenue d'une part par les qualités structurelles du matériau permettant un bon confinement des polluants et d'autre part par la diminution de la solubilité des polluants.
- Les solidifiats obtenus peuvent être considérés comme des mortiers ou des bétons suivants la taille des granulats qu'ils contiennent. Ces matériaux sont massifs et poreux.

Le caractère massif du matériau résultant de la solidification d'un déchet doit permettre de garantir une surface d'exposition minimale par rapport aux contacts avec l'eau, qui est soit présente dans le déchet, soit ajoutée dans le procédé de stabilisation. Le déchet inerte pâteux qui en résulte peut être coulé directement dans les alvéoles de stockage ou coulé en bloc. La solidification peut prendre plusieurs semaines.

La **solidification** vise à donner aux déchets une certaine structure physique.

Les procédés de stabilisation avec des liants organiques sont moins développés.

L'utilisation des liants organiques permet uniquement une encapsulation. Ce traitement est très peu utilisé notamment par rapport à sa résistance face aux agressions extérieures.

Les procédés de stabilisation utilisant des liants minéraux sont les plus étudiés, les plus connus et les plus avancés d'un point de vue technique. Les principaux réactifs utilisés sont des liants hydrauliques tels que les ciments, les bétons et la chaux. Très souvent, des adjuvants sont associés à ces liants hydrauliques.

La stabilisation par ciment permet de traiter des mélanges de déchets solides, pâteux et mêmes liquides. Elle conduit à des matrices alcalines relativement résistantes au niveau mécanique, stables dans le temps et peu perméables. L'ensemble de ces points forts met en retrait les points négatifs tels que l'augmentation du volume de produit solidifié variant entre 5 et 50% ,les éventuelles interactions sur l'hydratation du matériau de certains polluants, l'effet de l'alcalinité....

Ces différents procédés de stabilisation présentent tous certains avantages et inconvénients. Tout d'abord, il faut étudier la compatibilité du déchet avec le traitement envisagé et estimer les performances et le coût du traitement.

I.6.3.4 La stabilisation/solidification par liants hydrocarbonés :

La gestion des déchets est peu à peu passée d'une gestion en terme de moyens (incinération, stockage ou traitement physico-chimique) à une gestion moderne en terme d'objectifs (réduction des déchets à la source, réutilisation, recyclage, valorisation, stabilisation/solidification, vitrification). Concernant l'objectif de stabilisation/solidification des déchets, de nombreux procédés basés sur l'utilisation des liants hydrocarbonés ont été mis au point.

Cette technique dite « tiède », est basée sur une réaction chimique et consiste à enrober le déchet dans une capsule bitumineuse ou plastique étanche, d'environ de 200 ° c et ce pour fluidifier le liant organique. Ce procédé est incompatible avec les déchets aqueux avec un temps de refroidissement du déchet stabilisé assez long et il est mal adapté pour stabiliser des polluants chimiques (acides, déchets chlorés).

I.6.4 DECHETS A STABILISER/SOLIDIFIER :

Les déchets ultimes à stabiliser / solidifier sont classés par la législation en deux catégories. Les catégories A et B regroupent des déchets ultimes pour lesquels la stabilité constitue un critère d'acceptabilité en centre de stockage.

Tableau I.3 : Liste des déchets à stabiliser [5]

Catégorie	Déchets à stabiliser
A Déchets devant être stabilisés avant stockage depuis le 30 mars 1995	<ul style="list-style-type: none"> • Résidus de l'incinération (suies, cendres volantes, poussières fines, déchets de neutralisation ou de lavage des gaz) • Résidus de la métallurgie (poussières, scories et crasses) • Résidus de forages résultant de l'emploi de fluide à base d'hydrocarbures • Déchets minéraux de traitement chimique (oxydes et sels métalliques, catalyseurs usés)
B Déchets devant être stabilisés avant stockage depuis le 30 mars 1998	<ul style="list-style-type: none"> • Résidus de traitement d'effluents et d'eau industrielle, de déchets ou de sols pollués (boues, résines échangeuses d'ions) • Mâchefers de l'incinération de déchets industriels • Résidus de peinture polymérisés • Résidus de la métallurgie • Résidus de recyclage d'accumulateurs et de batteries • Résidus d'amiante • Réfractaires et matériaux usés et souillés

Ces déchets sont essentiellement solides, minéraux, avec un potentiel polluant constitué de polluants toxiques, notamment des métaux lourds. A cet égard,

plusieurs études ont été récemment réalisées et publiées. Ces études concernent la stabilisation/solidification des déchets pétroliers (les boues).

I.6.5 OBJECTIFS DE LA STABILISATION/SOLIDIFICATION DES DECHETS :

Les procédés de stabilisation/solidification doivent donc répondre aux objectifs suivants :

- Transformer le déchet en un solide plus facile à transporter et à stocker.
- Diminuer la surface d'exposition à l'environnement des contaminants.
- Limiter la solubilité des contaminants en cas de contact avec un fluide lixiviant.

Ils excluent le simple « lavage » destiné à entraîner suffisamment les contaminants pour rendre le déchet « stable », dans le cas de déchets présentant initialement un caractère solide. En effet, dans ce cas il n'est plus question de traitement de déchet mais de transfert de contaminants dans la phase lixiviant.

Un matériau liant est utilisé pour atteindre les objectifs de stabilisation/solidification. La matrice liante permet, outre la solidification, la réduction de la surface de contact entre le déchet et l'environnement. Elle agit ainsi comme élément de stabilisation du déchet dans la mesure où, en réduisant l'interface déchet-environnement, elle réduit la mobilité de ses contaminants. Cependant le terme de stabilisation est plus souvent retenu pour les matrices qui interagissent chimiquement avec le déchet en immobilisant les polluants.

I.6.6 CARACTERISATION DES DECHETS STABILISES/SOLIDIFIES :

Il existe deux niveaux de caractérisation. Le premier concerne la vérification de la conformité du déchet stabilisé/solidifié avec les critères d'admission en centre de stockage. Il s'agit d'un contrôle réglementaire. Le second concerne une étude approfondie des phénomènes de solidification et surtout de stabilisation au sein du déchet stabilisé/solidifié. Cette étude, destinée à appréhender le comportement du déchet stabilisé à long terme, doit permettre de définir les performances de la stabilisation et de fixer ses limites. Elle doit aussi fournir des éléments de réflexion relatifs aux devenir possibles des déchets stabilisés/solidifiés, dans la perspective non plus du stockage mais de la réutilisation, en tant que matériaux de construction par exemple.

La technique choisie pour notre étude est celle de la solidification / stabilisation à base d'un liant hydraulique ou bitumineux, ce procédé a fait l'objet d'un sujet de recherche par **BENOUMECHIARA .N** [7]. Cette étude qui a porté sur le traitement d'un déchet industriel qui est le « déblai de forage de puits pétroliers » par un liant hydraulique et un liant bitumineux a donné des résultats satisfaisants sur les deux volets du traitement à savoir :

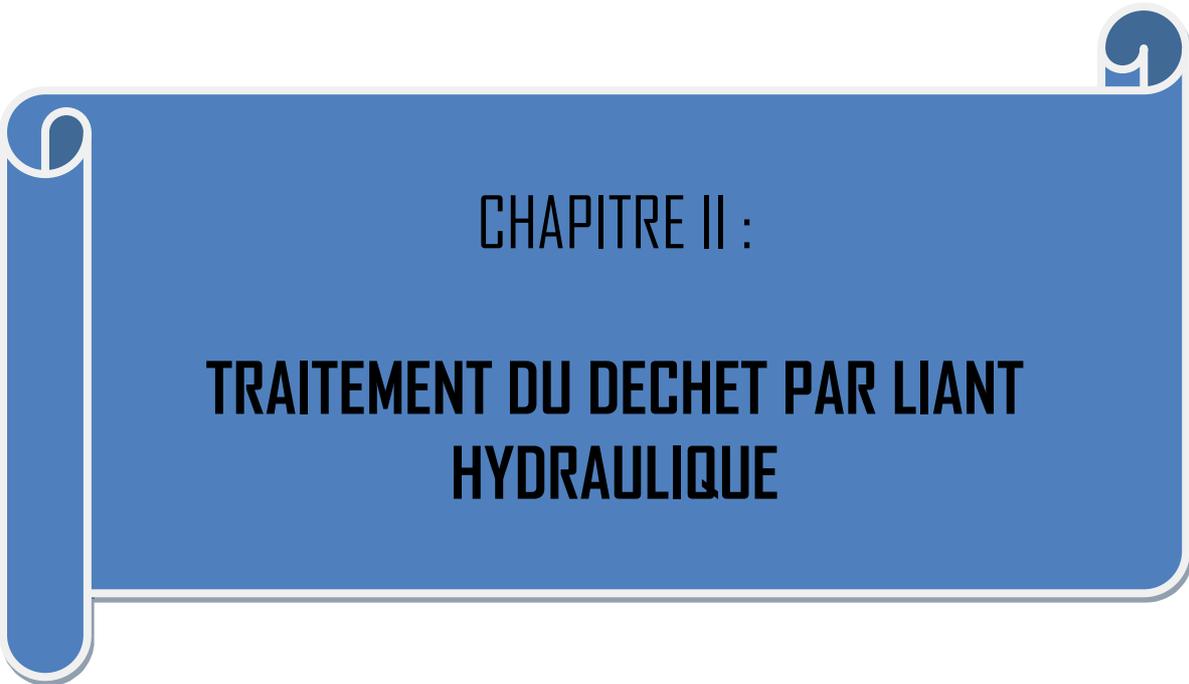
- **La solidification** : BENOUMECHIARA .N a montré que le traitement de ce déchet par un liant hydraulique donne une solidification satisfaisante avec 30 % d'incorporation de déchet , cette dernière est représentée par la résistance à la compression .L'étude a montrée que cette résistance croit avec l'âge des éprouvettes d'une part et augmente avec la diminution du pourcentage de déchet incorporé d'autre part ,et a permis d'avoir un taux de résistance à la compression de l'ordre de 65 % à 28 jours et de 64% à 90 jours par rapport au témoin . BENOUMECHIARA .N a étudié la possibilité d'améliorer la solidification en incorporant un pourcentage de 20 % d'un ajout qui est « le laitier d'EL-HADJAR », cette incorporation a présenté un gain pour la solidification de l'ordre de 3% à 90 jours.

Pour le traitement de ce déchet par un liant bitumineux, cette étude a montré que la solidification de l'enrobé élaboré est satisfaisante du moment qu'à 15 % de déchet incorporé et une teneur en liant de 5.16 %, l'enrobé élaboré a présenté des performances meilleures en terme de stabilité Marshall et fluage ; une bonne compacité dû à l'excès des fines dans le déchet et une chute de résistance « Duriez » à cause de présence des éléments argileux dans le déchet .

Cette étude a démontré que les deux procédés de traitement ont permis d'obtenir un matériau solide et résistant.

- **La stabilisation** : pour vérifier la stabilisation des matériaux élaborés vis-à-vis de l'environnement dans cette étude, BENMOUCHIRA .N a effectué des essais de lessivage réalisés par le centre de développement et recherche de SONATRACH (CRD) , sur un échantillon de béton dosé à 30 % de déchet , cet essai a montré que les éléments lourds dans les eaux de lixiviation sont inférieurs aux valeurs admises par les règles d'une part et l'absence de certains éléments d'autre part, ce qui a donné un matériau élaboré stable.
- **La valorisation** : vu les résultats encourageants obtenus dans cette étude à savoir la solidification et la stabilisation, BENMOUCHIRA .N a envisagé une valorisation du matériau élaboré en tant qu'élément de la construction (bordures de trottoirs, pavés).Des essais à la compression et à la traction à deux âges différents (28 et 90 jours) qui ont été effectués sur les bordures de trottoir et les pavés et ont donnés des taux de résistances acceptables par rapport au témoin qui sont de l'ordre de 71% à 28 jours et de 76 % à 90 jours.

Après avoir présenté les généralités sur la pollution, les déchets et le procédé de solidification/ stabilisation , on exposera, dans le chapitre suivant le traitement de notre déchet par un liant hydraulique en utilisant le procédé précité.

A blue scroll graphic with a white outline, featuring a vertical strip on the left side and a small circular detail at the top right corner. The text is centered within the scroll.

CHAPITRE II :

**TRAITEMENT DU DECHET PAR LIANT
HYDRAULIQUE**

Dans ce chapitre nous définirons et précisons les caractéristiques des matériaux utilisés ainsi que la méthode de formulation adoptée, les pourcentages de déchets à incorporer et la mise en place des éprouvettes, et finalement les essais effectués sur béton frais et durci. L'objectif de ce chapitre est en premier lieu l'estimation de la solidification qui consiste en l'étude de la résistance du béton modifié par l'ajout du déchet et en second lieu la stabilisation du matériau élaboré.

II.1. LES CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX :

II.1.1. ETUDE DU DECHET :

II.1.1.1 Caractérisation du déchet :

Les résidus restant dans les réservoirs de stockage d'essence (ou de mazout) après que toute l'essence (ou mazout) récupérable a été retirée se présentent sous des formes liquides et solides. Le liquide surnageant est constitué de deux parties : de l'eau contenant des sels de plomb dissous et de la matière organique. Le déchet étudié est constitué par la partie solide dénommée aussi **boue** formée par la rouille du réservoir en acier. Cette boue est constituée d'un mélange d'oxyde de fer, essence, des composés organiques et non organiques et de plomb. Puisque ces déchets contiennent des contaminants et pour éviter toute contamination par exposition directe ou indirecte, leur gestion et leur traitement sont préconisés.

II.1.1.2 Composition élémentaire du déchet :

L'analyse chimique de notre déchet qui est un résidu de bacs de stockage d'essence a donné la composition suivante :

Tableau 2.1: L'analyse chimique du déchet

Désignation	% ELÉMENTS										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Cr ₂ O ₃
	13,21	1,12	60,89	2,78	0,09	0,358	0,18	0,12	0,165	0,146	0,030
Désignation	% Eléments										
	SO ₃	ZrO ₂	SrO	Rb ₂ O	PbO	ZnO	CuO	NiO	BaO	Cl	PAF
	0,60	<0,001	0,0067	0,0035	0,0219	0,1813	0,0395	0,0093	<0,01	0,13	20,50
										Total	100,33

Les résultats du tableau confirment la nature minérale de la boue, à savoir sa richesse en fer, qui est l'élément prédominant (60.89%). Elle contient aussi d'autres métaux lourds tels que le manganèse en , le plomb, le chrome, le cuivre, le cadmium et le zinc. Tous ces métaux sont nocifs et toxiques pour l'environnement dans le cas où ce déchet serait jeté dans la nature sans aucun traitement. Pour cette raison les

règlements préconisent la gestion et le traitement de ce type de déchets, pour éviter toute contamination par exposition directe ou indirecte.

II.1.1.3 Spectre de diffraction des rayons X du déchet :

Cette analyse permet de confirmer les résultats de l'analyse chimique à savoir la présence importante du fer et des métaux lourds.

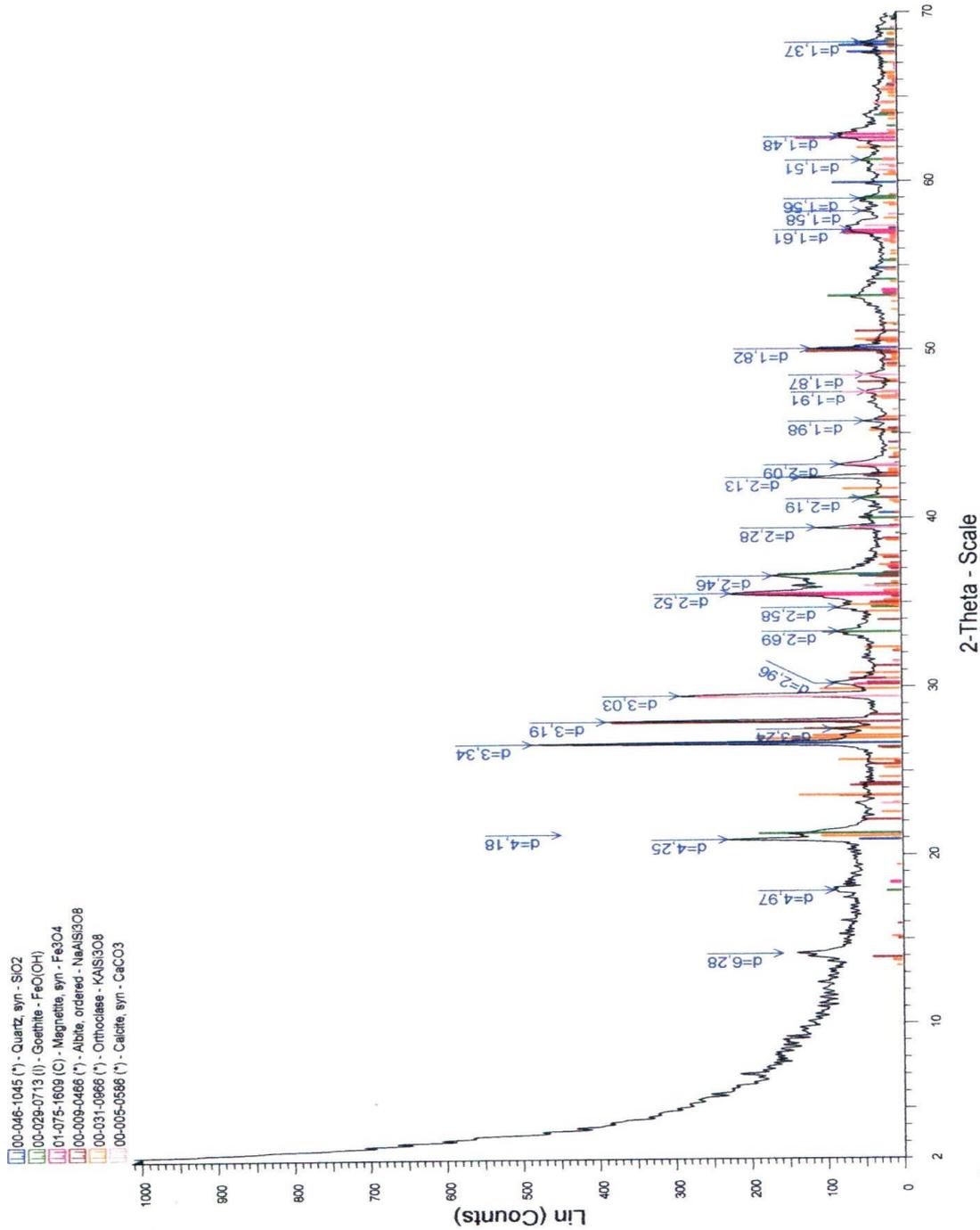


Figure 2.1 : Spectre de diffraction des rayons X de la boue

II.1.1.4 Danger provenant du déchet :

Les dangers d'intoxication présentés par les boues d'essence ou de mazout sont dus principalement aux vapeurs volatiles de plomb organiques dans l'air .Cependant une grande quantité de données obtenues sur un large éventail de boues représentatives, contrôlées en plein air, directement au vent et sous le vent, de la boue, ont montré que les niveaux du plomb dans l'air sont peu élevés.

Le danger peut aussi provenir des vapeurs dégagées par les vêtements contaminés par la boue. Une protection adéquate contre ces dangers sera obtenue par le port de vêtement de protection, de masques à cartouche et d'appareils respiratoires durant toutes les opérations de manipulation de boues en plein air.

Les nappes phréatiques peuvent aussi être contaminées, si la boue est en contact avec de la pluie par exemple, ceci peut causer l'intoxication de tout être vivant .

D'où la nécessité de traiter ce déchet, et d'éviter tout abandon et dépôts anarchiques.

II.1.1.5. Analyse granulométrique du déchet :

La granulométrie établie pour le déchet, est représentée sur le tableau 2.2 :

Tableau 2.2: Analyse granulométrique du déchet.

		Refus cumules de déchet utilisé	Complément à 100 de refus cumulés
Tamis (mm)	20	0,00	100,00
	16	0,00	100,00
	12,5	0,00	100,00
	10	0,00	100,00
	8	0,00	100,00
	6,3	0,00	100,00
	5	0,00	100,00
	4	2,00	99,80
	2	10,00	99,00
	1	91,00	90,92
	0,5	360,60	64,01
	0,4	467,50	53,34
	0,315	693,40	30,80
	0,2	762,90	23,86
	0,1	848,50	15,32
0,08	913,40	8,84	
Poids Total		1002	
Poids Spécifique		1,46	

L'analyse granulométrique du déchet montre que le déchet présent des particules dont la taille atteint quelques millimètres, ce qui nous a conduit à substituer le déchet dans la formulation du béton au sable.

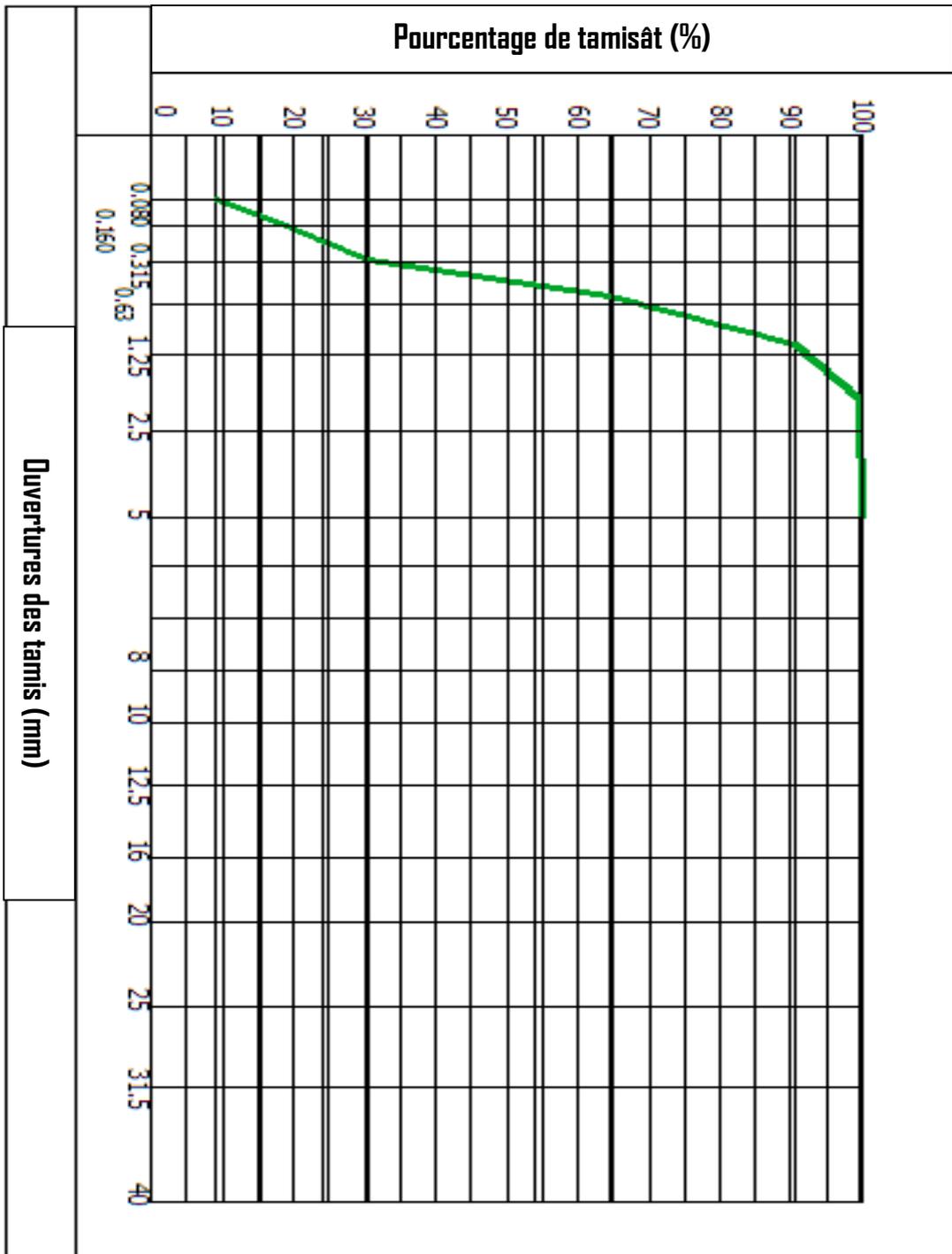


Figure 2.2: Courbe granulométrique du déchet

II.1.2 LES CARACTERISTIQUES DES GRANULATS [20] :

Les granulats constituent le squelette granulaire, en principe inerte, du béton et agglomérés par liant, qui doit être le plus compact et le plus durable possible.

Ils doivent être choisis de façon à ce qu'ils confèrent au béton un maximum de compacité.

Ils ne doivent pas contenir, d'éléments nuisibles qui pourraient porter préjudice à la résistance, et donc à la sécurité et la durée de la structure.

Leurs caractéristiques intrinsèques et de fabrication doivent être conformes aux spécifications.

II.1.2.1 Les caractéristiques géométriques :

II.1.2.1.1 Granulométrie :

- **Echantillonnage :**

L'échantillonnage a pour but de prélever une fraction d'un matériau tel que la partie prélevée, sera représentative de l'ensemble, c'est – à – dire, une quantité suffisante pour tous les essais à étudier. Cet essai se fait à l'aide d'échantillonneurs.

- **Définition de la granulométrie :**

La granulométrie permet de déterminer la répartition des dimensions des grains contenus dans un granulat, pour pouvoir les combiner dans les meilleures conditions.

Elle consiste à tamiser le granulat sur une série de tamis à maille carrée, de dimension d'ouverture décroissante, et à peser le refus sur chaque tamis. Ces ouvertures sont normalisées de 0.08 mm à 80 mm.

La courbe granulométrique exprime les pourcentages cumulés en poids de grains passant dans les tamis, l'allure de la courbe granulométrique permet de prévoir certaines propriétés que l'on peut attendre du matériau.

- **Classes Granulaires :**

Un granulat est caractérisé par sa classe d/D , d'après la NF 18 – 304 un agrégat est dit de type D/d , lorsque le rapport $D/d > 2$, tel que :

d : la plus petite dimension des grains

D : la plus grande dimension des grains.

Pour $d < 0.5$ mm, le granulat est désigné $0/ D$.

Tableau 2.3: Classification des granulats par grosseurs

Granulats	Nature	Tamis en (mm)
Sable	Fin	0.08 à 0.315
	Moyen	0.315 à 1.25
	Gros	1.25 à 5.00
Gravillons Ou Graviers	Petits	6.3 à 10
	Moyens	10 à 16
	Gros	16 à 25
Les pierres concassées Ou Cailloux	Petits	25 à 40
	Moyens	40 à 63
	Gros	63 à 100
Les moellons	> 100	

Tableau 2.4 : Analyse granulométrique du sable de TIZI-OUZOU :

Analyse granulométrique			
Classe granulaire 0/5		Méthode de tamisage : manuelle Fond de tamis : tissu métallique Dimension et forme de tamis de contrôle : 315mm rond Formes des ouvertures : carrée	
Mailles des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Tamisât cumulé (g)	Pourcentage passant (%)
8.00			
6.30			
5.00		1000	100
2.50	182	818	81.8
1.25	334	484	48.4
0.625	230	254	25.4
0.315	120	134	13.4
0.160	63	71	7.1
0.080	26	45	4.5
Masse initiale = 1000 g			

Tableau 2.5 : Analyse granulométrique du gravier de KEDARA :

Analyse granulométrique			
Classe granulaire 8/15		Méthode de tamisage : manuelle Fond de tamis : tissu métallique Dimension et forme de tamis de contrôle : 315mm rond Forme des ouvertures : carrées	
Mailles des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Tamisât cumulé (g)	Pourcentage passant (%)
25		3000	100
20	35	2965	99
16	500	2465	82
12.5	1500	965	32
10	620	345	12
8	260	85	3
6.3	55	30	1
5	30	0	
Masse initiale = 3000 g			

Tableau 2.6 : Analyse granulométrique du gravier de KADARA

Analyse granulométrique			
Classe granulaire 15/25		Méthode de tamisage : manuelle Fond de tamis : tissu métallique Dimension et forme de tamis de contrôle : 315mm rond Forme des ouvertures : carrées	
Mailles des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Tamisât cumulé (g)	Pourcentage passant (%)
25		5000	100
20	826	4174	83
16	2626	1548	31
12.5	1385	163	3
10	110	53	1
8	53	0	
Masse initiale = 5000 g			

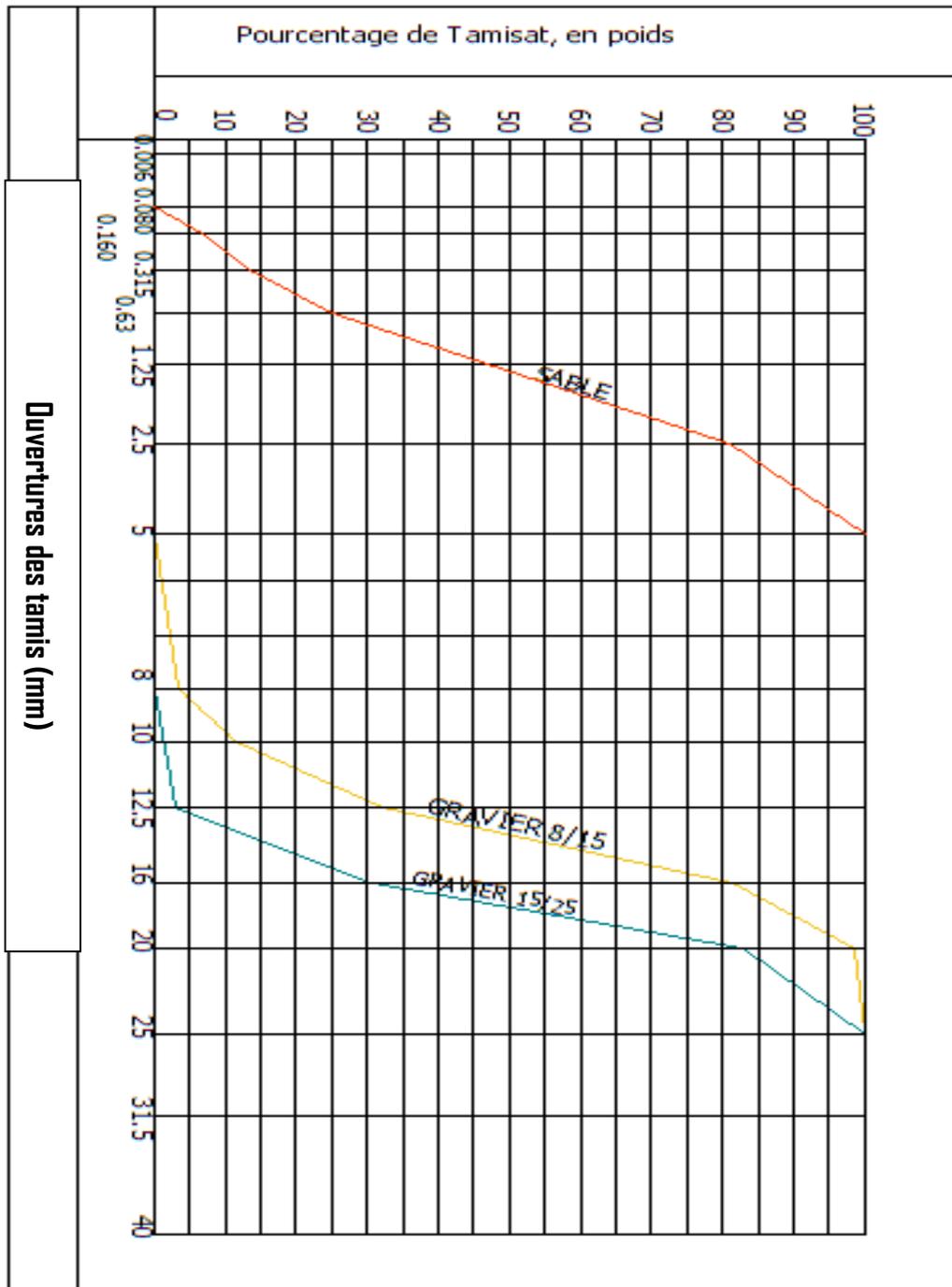


Figure 2.3: Courbes granulométriques des fractions

- **Granulométrie continue et discontinue :**

On dit que la courbe granulométrique d'un granulat est continue ou que sa granularité est continue, si, entre deux granulats élémentaires consécutifs présents dans le matériau, il manque au plus trois granulats élémentaires.

On dit qu'il y a discontinuité si l'absence porte sur plus de trois granulats élémentaires. Les figures (2.4, 2.5) illustrent les deux cas :

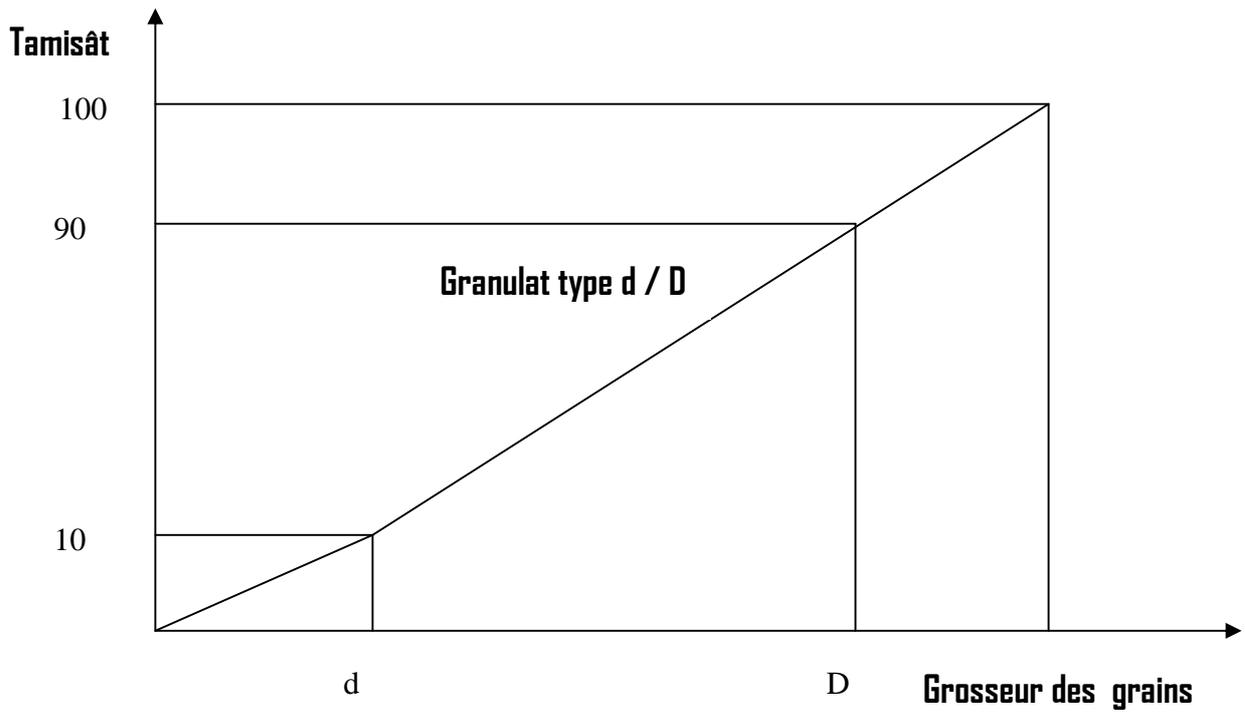


Figure 2.4 : Granularité continue

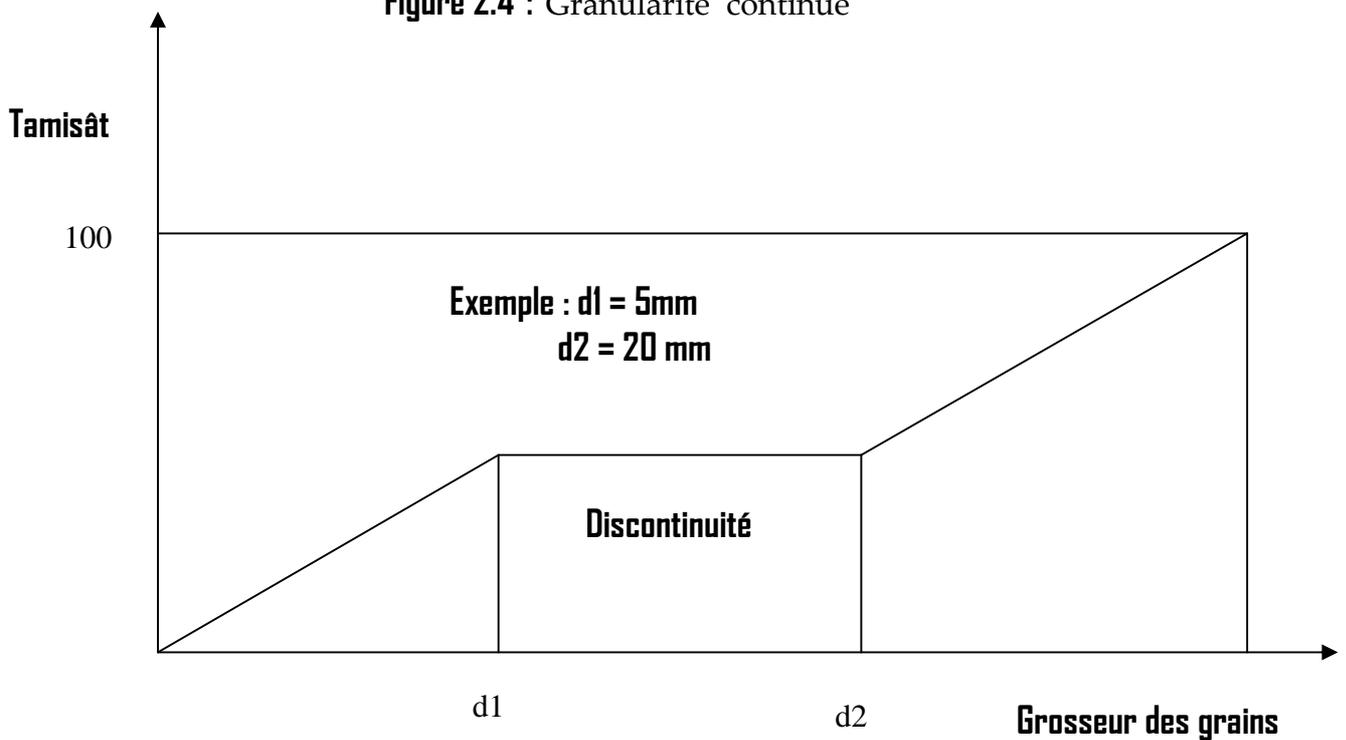


Figure 2.5 : Granularité discontinue

Dans la composition du béton on peut trouver une granulométrie discontinue. Par exemple un sable 0/5 et un gravillon 15 / 25 ; ou une granulométrie continue, par exemple un sable 0/5, un gravillon 5/ 15, et une grave 15 / 25.

II.1.2.1.2. Coefficient volumétrique :

Le coefficient volumétrique est une grandeur numérique, qui permet de caractériser un grain ou un granulat et dont la valeur donne une idée précise sur la forme de l'élément considéré et sa possibilité d'emploi.

Un coefficient faible correspond à un granulat présentant un certain nombre de plats et aiguilles.

Un coefficient élevé correspond à un granulat dit « cubique » ou « arrondi »

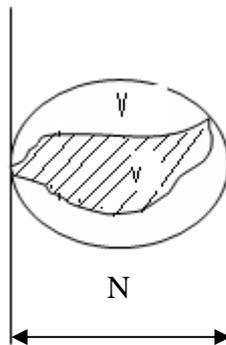


Figure 2.6 : Le coefficient volumétrique

Le coefficient volumétrique d'un grain est défini par :

$$v = \frac{v}{V} = \frac{v}{\pi \frac{N^3}{6}}$$

N : la plus grande distance, séparant deux plans tangents aux grains.

v : le volume du grain.

V : le volume de la sphère de diamètre N.

Le coefficient volumétrique moyen est défini par :

$$v = \frac{\sum v}{\sum V} = \frac{\sum v}{\sum \pi \frac{N^3}{6}}$$

Pour les granulats concassés la norme AFNOR préconise :

- $v \geq 0.15$ Pour les gravillons.
- $v \geq 0.11$ Pour les pierres cassées et cailloux.
- $v \geq 0.25$ Pour les gravillons de 12.5 à 25 mm

Pour le gravier utilisé dans notre étude on a :

$$v = 0.27$$

II.1.2.1.3. Module de finesse (NFP 18-304) :

C'est le centième de la somme des refus , exprimé en pourcentage sur les tamis de la série suivante : 0.16 , 0.315 , 0.63 , 1.25 , 2.5 , 5 , 10 , 20 , 40 , 80 mm

Des recherches sur l'influence de la finesse des sables sur les diverses qualités du béton ont conduit à délimiter certains fuseaux de granularité admissible tels que ceux représentés sur la figure 2.7 où l'on distingue :

- La partie centrale A ($2.2 < M_f < 2.8$) convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de dégradation limite.
- La partie supérieure B ($1.8 < M_f < 2.2$) est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en oeuvre au détriment probable de la résistance.
- La partie inférieure C ($2.8 < M_f < 3.2$) correspond a des sables utilisés pour la recherche de résistance élevée, mais on aura, en général, une moins bonne ouvrabilité et des risques de ségrégations.

Pour le sable utilisé dans notre étude, la valeur du module de finesse est : **4.2**
Cela explique que notre sable contient des gros éléments.

II.1.1.2.Les caractéristiques physique

II.1.1.2.1 Porosité

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

$$P \% = \frac{v(\text{vides})}{V(\text{matières})} \times 100$$

On distingue deux types de porosité :

- La porosité ouverte : certaines cavités communiquent directement ou non avec l'extérieur.
- La porosité fermée : elle est constituée par le reste des cavités.

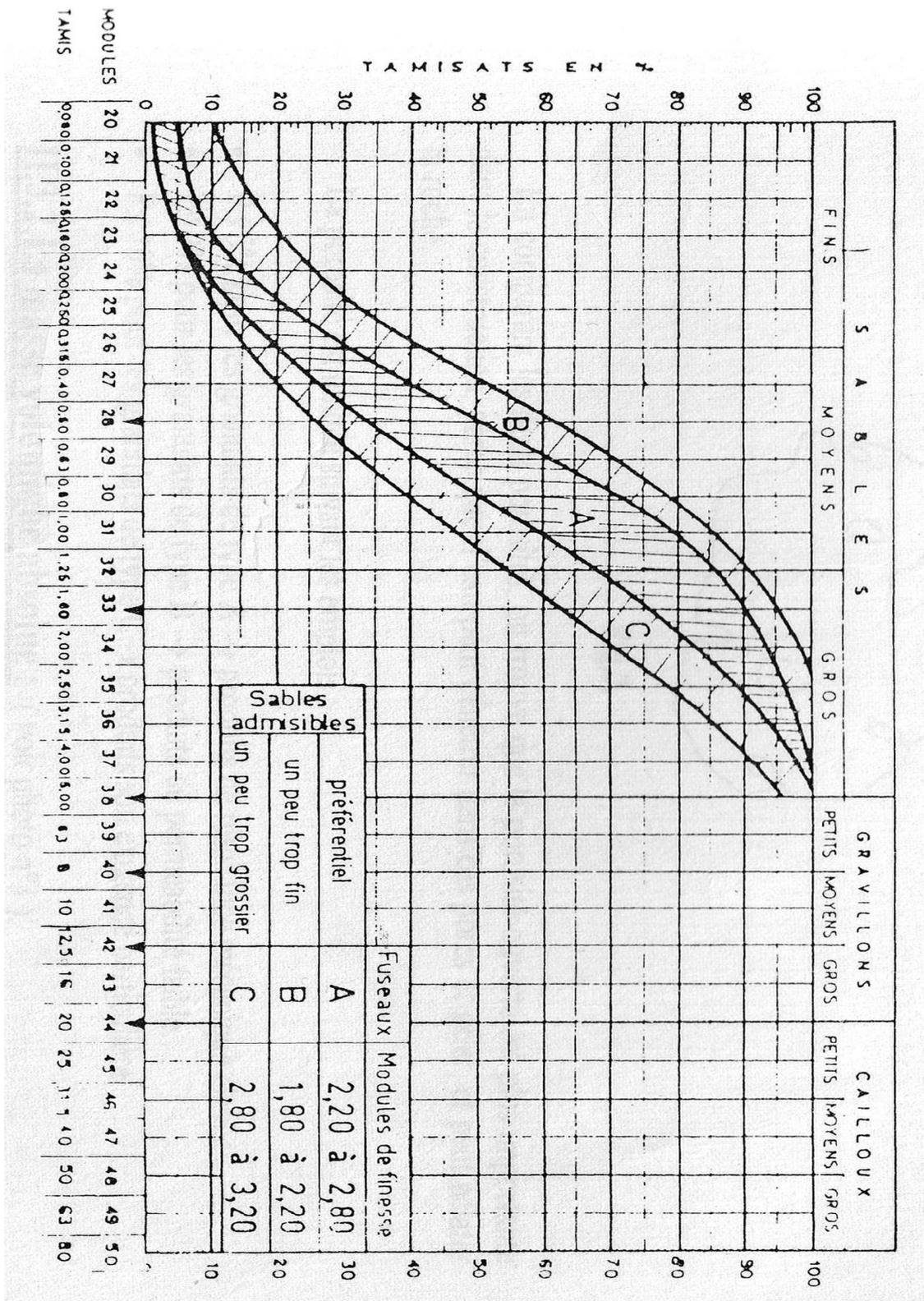


Figure 2.7 : Fuseau de granularité admissible

En comparant les deux porosités, on constate que la porosité ouverte est plus importante dans la construction, parce que l'eau peut pénétrer dans ces pores et geler, et peut faire éclater la roche.

La porosité est limitée suivant les emplois :

- $P \leq 5 \%$ pour les granulats de type A → produits de résistance mécanique élevée.
- $P \leq 3 \%$ pour les granulats de type B → produits de perméabilité faible.
- $P \leq 3 \%$ pour les granulats de type C → produits son exigence particulière.

II.1.1.2.2 La masse volumique absolue :

C'est la masse de l'unité de volume absolu du corps, c'est – à – dire de la matière qui constitue le corps, sans tenir compte du volume des vides.

Le tableau 2.7 indique les valeurs de la masse volumique des constituants que nous avons utilisés.

Tableau 2.7 : Masses volumiques absolue des granulats

Constituants	Masses volumiques absolues (Kg /dm ³)
Sable	2.7
Gravier	2.7

II.1.1.2.3 La masse volumique apparente:

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est – à – dire du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

Le tableau ci – dessous indique les valeurs de la masse volumique apparente des constituants que nous avons utilisés.

Tableau 2.8 : Masses volumiques apparentes des granulats

Constituants	Masses volumiques apparentes (Kg /dm ³)
Sable	1.57
Gravier	1.46

Les conséquences de la masse volumique pour la construction sont :

- Manutention dans les carrières et mise en oeuvre.
- Transport.
- Prix de revient

II.1.1.2.4 Propreté des granulats :

La norme 18541 prohibe les impuretés telles que le charbon, les scories, les déchets de bois, brindilles, feuilles mortes, débris végétauxetc. dont le pourcentage doit être inférieur à 2%.

De même les granulats ne doivent pas contenir d'hydrocarbures, d'huiles végétales ou de matières organiques.

Pour la propreté des granulats, il convient d'éviter surtout la présence de la gangue argileuse ou des poussières qui risque de compromettre l'adhérence du mortier sur les graviers.

Dans le cas de cailloux et de gravillons, la propreté est mise en valeur par le pourcentage de passant au tamis de 0.5 mm (tamisage effectué sous l'eau).

Dans la cas des granulats concassés, lorsque la valeur du passant à 0.5mm est supérieure à 2%, il est nécessaire d'effectuer un essai complémentaire, appelé essai au bleu de méthylène.

Pour les graviers que nous avons utilisés on a obtenu les résultats suivants :

On prend dans un récipient, une quantité de gravier, on le dessèche et on le pèse : soit : P1 = 1970 g, puis on le lave à grande eau, et on le dessèche à nouveau, et on le pèse : soit P 2 = 1934 g , la masse des impuretés est donc :

$$P = 1970 - 1934 = 36 \text{ g}$$

Soit un pourcentage de

$$P = \frac{36}{1970} = 1.82 \%$$

D'après les normes, la propreté est inférieure à 2 % alors, le gravier est propre.

Pour les sables, la propreté peut se contrôler comme pour les graviers, mais de préférence par l'essai dit « équivalent de sable » (ES).

On agite une certaine quantité dans une solution lavante (cette solution contient 111 g de chlorure de calcium anhydride, 480 g de glycérine et 12 g de formaldéhyde pour 40 l d'eau).

(Cette opération se fait suivant un processus défini par la norme NFP 18 – 598) ; puis on laisse reposer.

La hauteur du dépôt de sable visible étant h_2 et h_1 celle de la hauteur totale y compris le floculat (fines en suspension), l'équivalent de sable est :

$$E.S = 100 \times \frac{h_1}{h_2}$$

La hauteur du dépôt de sable h_2 peut se mesurer à l'aide d'un piston lesté que l'on dépose doucement sur le sable après avoir lu la hauteur h_2 du floculat. Mais dans le cas des sables à béton relativement assez propre, la limite floculat – sable se repère toujours facilement et l'on se contente d'une lecture à vue pour h_1 comme pour h_2 .

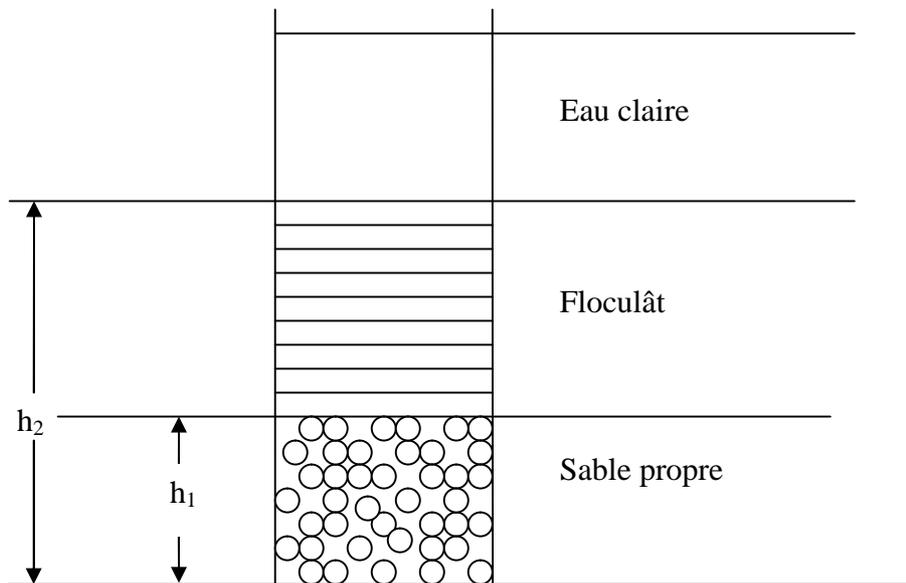


Figure 2.8 : Essai équivalent sable

Théoriquement les limites extrêmes des valeurs de ES seraient :

- Pour le sable pur (pas de floculat) $h_1 = h_2 \Rightarrow E.S = 100$
- Pour l'argile pure (pas de dépôt de sable) $h_1 = 0 \Rightarrow E.S = 0$

La valeur optimale de l'équivalent de sable (mesurée à vue sans l'aide d'un piston) est comprise, entre 70 et 80, dans le cas des sables silicocalcaires tout au moins et ne contenant que peu de fines argileuses nocives dont la faible importance doit alors être confirmée par l'essai « au bleu » (norme NF-P 18-592).

Le tableau 2.9 indique les valeurs préconisées pour l'équivalent de sable.

Tableau 2.9 : Les valeurs préconisées pour l'équivalent de sable (NFP 18-598)

Equivalent de sable à vue	Equivalent de sable à piston	Nature et qualité du sable
ES < 65	ES < 60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour les bétons de qualité.
65 ≤ ES < 75	65 ≤ ES < 70	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait
75 ≤ ES < 85	70 ≤ ES < 80	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité (valeur optimale ES piston = 75 ; ES à vue = 80).
ES ≥ 85	ES ≥ 85	Sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses, risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau .

Pour notre sable nous avons obtenu les résultats ci – dessous :

Tableau 2.10 : Résultats de l'essai équivalent de sable

	Hauteur totale h_1	Hauteur de sable h_2 (piston)	$E.S = 100 \times \frac{h_1}{h_2}$	Equivalent de sable
Essai 1	10,10	43 -34.2 = 8.8	87.0 %	87%
Essai 2	10,00	43 -34.4 = 8.6	86.0%	
Essai 3	9,90	43 -34.3 = 8.7	87.9%	

Notre sable est très propre, une absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

II.1.1.3 Les caractéristiques mécaniques

II.1.1.3.1. Essai de LOS ANGELES (NFP 18-573)

Cet essai permet d'estimer la résistance à la fragmentation par chocs des boulets sur le granulat. Il concerne les classes granulaires 4 /6.3 . 6.3 /10 ; 10 / 16 . On place un échantillon de 5 kg et 7 à 11 boulets de 0.417 Kg dans un tambour qui tourne selon le mode opératoire suivant :

L'échantillon est placé dans un cylindre à axe horizontal de 70 cm de diamètre et de 50 cm de longueur, avec des boules d'acier. Il effectue 500 révolutions à 30 tr / min.

Le nombre de boulets a mettre est en fonction de la classe granulaire. Après essai, les matériaux sont lavés au tamis de 1.6 mm. Les passants sont jetés et les refus sont pesés après séchage à l'étuve.

Le coefficient de LOS ANGELES est défini par :

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

Après l'essai on a obtenu les résultats suivants :

Tableau 2.11 : Résultats de l'essai LOS ANGELES

Nature de l'échantillon	Classe granulaire	Nombre de boulets	Masse totale de la charge	Masse initiale	P : poids sec après essai	Coefficient Los Angeles
Gravier	10 / 16	11	4860	5000	4150	17
	6.3 /10	11	4860	5000	4250	15
	4/6.3	11	4860	5000	4100	18

Selon la norme NFP 18573 si le seuil est fixé à 40 %, alors notre matériau satisfait donc la condition, et on peut l'utiliser pour faire un béton.

II.1.1.3.2. Essai Micro Deval (NFP 18-572) :

C'est un essai qui se pratique sur des gravillons 4 /6.3. 6.3 /10 ; 10 / 16. On place 0.5 Kg de gravillons avec une charge de 2 à 5 Kg dans une jarre cylindrique et on fait tourner pendant 15 minutes.

L'essai Micro Deval est réalisé dans un cylindre de 20 cm de diamètre, et 15.4 cm de longueur. Aux 500 g de gravillons de la prise d'essai, on ajoute une charge abrasive constituée de billes d'acier sphériques de 10 mm de diamètre .Le cylindre tourne à 100 tr / min, pendant 15 minutes.

Si p' est la fraction passante au tamis de 1.6 mm, alors le coefficient de Micro Deval est définit par :

$$MDE = 100 \times (500 - P') / 500$$

Pour l'essai de Micro Deval humide (MDEH) on ajoute 2.5 l d'eau dans le cylindre d'essai.

Les résultats des essais **MICRO DEVAL** réalisés pour les différentes fractions d'agrégats utilisées dans notre étude sont représentés dans le tableau 2.12 :

Tableau 2.12 : Résultats de l'essai MICRO DEVAL

	Poids initial p (g)			Poids initial p' (g)	MD
	P1	P2	MOY		
SEC	470	470	470	500	6 %
HUMIDE	420	420	420	500	16%

Selon la norme NF P18 572 le seuil est fixé à 35 %, alors notre matériau satisfait la condition .

II.1.2 LES CARACTERISTIQUES DU CIMENT :

II.1.2.1 Définition :

C'est un liant qui est constitué par des poudres fines formant avec l'eau une pâte capable par hydratation de faire prise, puis de durcir.

Dans notre étude on va utiliser le ciment CPJ 45 à base de clincker , il se présente sous forme d'une poudre grise . Le ciment est obtenu en général par cuisson à haute température (environ 1450 °C) d'un mélange de calcaire et argile (le calcaire intervient pour un poids trois fois supérieur à celui de l'argile) . Le CPJ 45 contient au moins 73 % de clincker , 7 % de gypse , 14 % d'ajout .

II.1.2.2 Les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques :

Les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques sont données dans les tableaux ci – dessous.

II.1.2.2.1 les caractéristiques chimiques :

L'analyse chimique du ciment a donné les résultats suivants :

Tableau 2.13 : Caractéristiques chimiques du ciment

Eléments	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	S O ₃	Na ₂ O	P.A.F	Ca.OL	R.I
Pourcentages	21.13	62.90	1.11	5.43	3.04	2.44	≡	2.44	0.27	0.97

II.1.2.2 les caractéristiques physiques :

Tableau 2.14 : Caractéristiques physiques du ciment

Masse volumique absolue Kg / dm³	3.10	
Masse volumique apparente Kg / dm³	1.00	
SSB (cm² / g)	3032	
Expansion (mm)	0.68	
Temps de prise (h)	Début	2.16
	Fin	4.02

SSB : surface spécifique

II.1.2.3 Les caractéristiques mécaniques :

Les caractéristiques mécaniques à la flexion et à la compression déterminées à des ages différents sont résumées comme suit :

Tableau 2.15 : Caractéristiques mécaniques du ciment

	Flexion (Mpa)	Compression (Mpa)
02 jours	3.50	12.45
07 jours	6.30	30.83
28 jours	7.80	47.27

Pour avoir un bon béton que l'on peut utiliser dans un ouvrage, on doit choisir le ciment, ce choix portera principalement sur :

- La résistance
- Le temps de prise
- La nature, la teinte.
- La composition chimiqueetc.

II.1.3 LES CARACTERISTIQUES D' EAU DE GACHAGE :

Les caractéristiques de l'eau de gâchage sont :

II.1.3.1 Caractéristiques physiques :

L'eau doit être propre, ne doit pas contenir de matières en suspension au – delà de :

- 2 g /l pour les bétons de type A et B
- 5 g/l pour les bétons de type C

Béton A : béton de haute qualité à fortes résistances.

Béton B : béton à grande imperméabilité

Béton C : béton courant peu ou pas armé.

II.1.3.2 Caractéristiques chimiques :

L'eau ne doit pas contenir de sels dissous au – delà de

- 15 g/l pour les bétons de type de A et B
- 30 g/l pour les bétons de type C.

II.1.3.3 Le calcul de la quantité d'eau :

Il existe pas de calcul rigoureux .Mais il est possible d'avoir un ordre de grandeur de la quantité d'eau, avec une précision suffisante pour les études courantes.

Le calcul diffère suivant que les constituants soient petits ou gros.

- **Petits constituants** : $D < 0.16$ mm (ciment, et éléments très fins du sable)

$$\text{EAU} = 0.23 P$$

P : la masse du corps mouillé.

- **Gros éléments** : $D \geq 0.16$ mm .La formule est due à Bolomey :

$$\text{EAU} = \frac{K . P}{1.17 \cdot \sqrt[3]{d_1 \cdot d_2}}$$

K : constante, donnée par le tableau 2.16.

P : masse des matériaux à mouiller.

d_1 : diamètre des plus petits granulats à mouiller

d_2 : diamètre des plus gros granulats à mouiller (d_1 et d_2 étant les dimensions des tamis correspondants).

Tableau 2.16 : Valeurs de K

Consistance du béton	Granulats roulés	Granulats concassés
Béton damé	0.08	0.095
Béton armé	0.09 à 0.095	0.10 à 0.11
Béton coulé	0.10 à 0.11	0.12 à 0.13

Dans le cas où on utilise la méthode de Faury : la quantité d'eau de gâchage dans un mètre cube de béton est donnée par la formule :

$$1.2 I \leq E \leq 1.3 I \quad \text{avec} \quad I = \frac{1000 k}{\sqrt[5]{D_{\max}}} + \frac{1000 k'}{\frac{R}{D} - 0.75} \quad (I)$$

I : volume des vides

k : fonction de la nature des granulats et des moyens de serrage du béton

k' : fonction de la nature du béton .

II.1.4 LES ADJUVANTS :

En général,[13] les adjuvants sont définis comme des « Produits qui ajoutés à moins de 5% du poids du ciment,au moment du malaxage des mortiers et bétons ou à leur surface lorsqu'ils sont encore frais, améliorent certaines de leurs propriétés. »

Avec cette définition, les produits ajoutés au moment du broyage du clinker ou les produits dont le dosage dépasserait 5% du poids du ciment (cas des poudres fines pouzzolaniques) ne sont pas considérés comme des adjuvants.

L'adjuvant a pour rôle de modifier une ou plusieurs propriétés du béton , mortier frais ou durci mais son utilisation augmente le coût du produit de façon non négligeable.

Actuellement, le rôle ou l'effet des adjuvants du ciment ou produit d'addition n'est pas d'améliorer le ciment comme c'était le cas au début de leur utilisation, sa stabilité dimensionnelle, l'uniformité de sa température, sa résistance au gel....mais il agit sur les trois composants des mortiers : le granulats, le ciment et l'eau et son action est influencée par la nature et le dosage de chacun de ces composants [27].

Il est usuel de grouper les adjuvants du ciment suivant la nature des modifications physico-chimiques apportées au ciment ou au béton auquel ils sont incorporés plutôt que suivant leurs propriétés technologiques [15].

Les quatre catégories qui se distinguent, sont les adjuvants insolubles dans l'eau de gâchage, les adjuvants tensio-actifs, les adjuvants solubles et les super plastifiants.

II.1.4.1 Les adjuvants insolubles (plastifiants) :

Les adjuvants insolubles, incorporés entre 0,3 et 0,5% en masse par rapport au ciment, représentent 37% du marché. Les deux principaux types d'adjuvants insolubles sont les plastifiants liquides et solides.

Ces adjuvants sont principalement des émulsions des bitumes ou de diverses matières organiques avec une longue chaîne carbonée (stéarate de butyle) ou des suspensions d'argile (bentonite, kieselghur...).

Les plastifiants introduits dans l'eau de gâchage permettent soit d'augmenter l'ouvrabilité (d'au moins 50%) sans diminuer les résistances pour une même teneur en eau , soit de réduire la teneur en eau pour une même ouvrabilité [17].

Ces plastifiants permettent d'améliorer et donc d'augmenter l'aptitude à la déformation des mortiers et bétons frais tout en réduisant l'eau de gâchage et d'augmenter la compacité du béton (amélioration des résistances et de l'imperméabilité). Leur utilisation facilite la mise en place du béton ou mortier et réduit la ségrégation.

II.1.4.2 Les adjuvants tensio-actifs :

Les adjuvants tensioactifs ne peuvent pas être considérés comme insolubles même s'ils ne sont pas vraiment solubles dans l'eau puisque le mélange aqueux n'est pas rigoureusement homogène [15]. Les agents tensioactifs sont des matières organiques, miscibles avec l'eau, et dont les molécules comportent une chaînes droite (exemple : acide gras). Cette chaîne présente une extrémité hydrophile et une extrémité hydrophobe. On distingue les entraîneurs d'air et les réducteurs d'eau.

II.1.4.2.1 Les entraîneurs d'air :

Les entraîneurs d'air sont introduits à raison de 0,05 à 0,2% massique par rapport au ciment et ont comme objectif l'incorporation d'air dans le but de favoriser une porosité uniforme et de faible diamètre qui améliore la résistance, la maniabilité et la consistance des mortiers et bétons soumis à des climats humides ou à de fortes gelées [28]. Les bulles d'air vont assurer, en période de gel, une meilleure répartition des efforts et jouer un rôle de vase d'expansion des forces.

La teneur en air occlus doit se situer entre 4 et 6 % , les tailles des bulles d'air ainsi que leur répartition entrent également en compte.

Les entraîneurs d'air les plus répandus sont des tensio-actifs à base de carboxylates « savons » ou de sulfonates « détergents », des hydrocarbures sulfonés, ou des résines de bois.

II.1.4.2.2 Les réducteurs d'eau (fluidifiants) :

L'utilisation des réducteurs d'eau permet de diminuer la quantité d'eau d'un mortier ou d'un béton à ouvrabilité constante ou d'augmenter l'ouvrabilité à teneur en eau constante.

Cependant, des effets secondaires tels que le retard de prise ou l'entraînement d'air

sont parfois observés. Les composés les plus utilisés pour cette fonction sont les tensio-actifs, les sels d'acide hydroxycarboxylique et quelques polymères hydroxylés.

II.1.4.3 Les adjuvants solubles :

Les adjuvants solubles, qui représentent 20% du marché, peuvent modifier la viscosité de l'eau de gâchage et l'ouvrabilité du mortier ou béton. La majorité de ces adjuvants influe sur l'hydratation des ciments.

II.1.4.4 Les accélérateurs de prise :

Les accélérateurs de prise sont introduits entre 1 et 3% en masse au ciment et leur principale fonction est de réduire les temps de prise et d'augmenter la rotation des coffrages. Ils agissent principalement sur les solubilités, les cinétiques de dissolution et d'hydratation de la constitution du ciment [15]. Ce type d'adjuvant est souvent utilisé par temps froid. Parmi le nombre de produits considérés comme accélérateurs, les plus courants sont le chlorure de calcium et le chlorure de sodium.

D'autres adjuvants non chlorés existent, à caractère basique, introduits entre 2 et 3 % en masse.

II.1.4.5 Les accélérateurs de durcissement ::

Ce type d'adjuvant qui représente 1% du marché est introduit à un dosage moyen entre 0,8 et 2% en masse par rapport au ciment. Son ajout permet d'accroître la vitesse de montée en résistance du béton.

II.1.4.6 Les retardateurs de prise :

Ils visent à retarder la dissolution des constituants du ciment [15] c'est à dire à augmenter la durée du temps de prise du mortier ou béton.

II.1.4.7 Les superplastifiants (SP) :

Les superplastifiants représentent les adjuvants les plus utilisés avec 31% du marché. Leur dosage moyen varie entre 0,8 et 3% massique par rapport au ciment. Ils permettent soit de réduire la quantité d'eau de gâchage (de 15 à 10%) sans affecter l'ouvrabilité soit d'augmenter l'ouvrabilité tout en conservant les performances du mortier au du béton.

L'augmentation des performances grâce à l'introduction de superplastifiant est importante dans plusieurs domaines : résistances mécaniques initiales et finales élevées, diminution de la porosité, amélioration de la durabilité [27]. Ce type d'adjuvants regroupe principalement des mélamines sulfonâtes (SMF) ou des naphthalènes sulfonâtes (SNF).

Selon la norme NA774, un super plastifiant est un adjuvant qui, introduit dans un béton, un mortier ou coulis, a pour fonction principale de provoquer un accroissement important de l'ouvrabilité du mélange.

L'action d'un super plastifiant passe nécessairement par son adsorption sur les particules de ciment.

b) -MEDAFLOW 30

Le MEDAFLOW 30 est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le MEDAFLOW 30 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de super plastifiants, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable. Grâce à ses propriétés fluidifiantes, le MEDAFLOW 30 permet :

- ❖ Sur béton frais :
 - l'obtention d'un E/C très faible ;
 - l'amélioration considérable de la fluidité ;
 - une très bonne maniabilité ;
 - un long maintien de l'ouvrabilité ;
 - d'éviter la ségrégation ;
 - de faciliter la mise en œuvre du béton .
- ❖ Sur béton durci :
 - d'augmenter les résistances mécaniques à court et à long terme ;
 - de diminuer la porosité ;
 - d'augmenter la durabilité ;
 - de diminuer le retrait et le risque de fissuration.

Dosage :

Plage de dosage recommandée : 0,5 à 2,0 % du poids de ciment

Les deux adjuvants (MEDAFLUID, MEDAFLOW) sont utilisés pour deux pourcentages différents : 1% et 1,2% de poids de ciment pour chaque adjuvant.

$$\text{Pour } 1\text{m}^3 \text{ de béton } \left\{ \begin{array}{l} 1\% \text{ Adjuvant } \Rightarrow 3,5 \text{ Kg} \\ 1,2\% \text{ Adjuvant } \Rightarrow 4,2 \text{ Kg} \end{array} \right.$$

Dans notre étude on a utilisé le MEDAFLUID.

II.2 METHODE DE FORMULATION [20] :

La méthode de formulation utilisée dans notre étude est celle de Faury ; elle consiste à déterminer la courbe optimale du mélange des éléments secs , et chercher à s'en rapprocher le plus possible.

II.2.1. Particularités de la méthode de Faury :

- Applicable à tous les granulats ; quelque soit la masse volumique.
- Faury à étudié l'effet des vides, vides qui varient avec $\sqrt[5]{d}$ (racine cinquième de la dimension des grains) ; nous verrons donc apparaître, en cours d'étude, des termes contenant le facteur $\sqrt[5]{d}$.
- Pour tenir compte de l'effet du coffrage et des armatures, Faury introduit la notion d'effet de paroi, elle-même fonction de celle du rayon moyen du moule.

Pour un élément donné (portion de poutre ; par exemple) ; Faury appelle

- « rayon moyen du moule » le rapport : $\frac{V}{S}$

Avec V : étant le volume du béton (aciers déduits) ;

S : la surface de ce qui est au contact du béton (coffrage + aciers)

- « effet de paroi » le rapport : $\frac{D}{R}$

Avec D : dimension maximale des granulats ; et R : rayon moyen du moule .

Lorsque c'est possible, on s'efforce de prendre une valeur de $1.25 D / R$ comprise entre 0.8 et 1 (D est une dimension de tamis) .

II.2.2 Courbe optimale :

Axes :

- Abscisses : dimensions des tamis, mais graduation proportionnelle à $\sqrt[5]{d}$
- Ordonnées : pourcentages de tamisât, en fonction des volumes absolus.

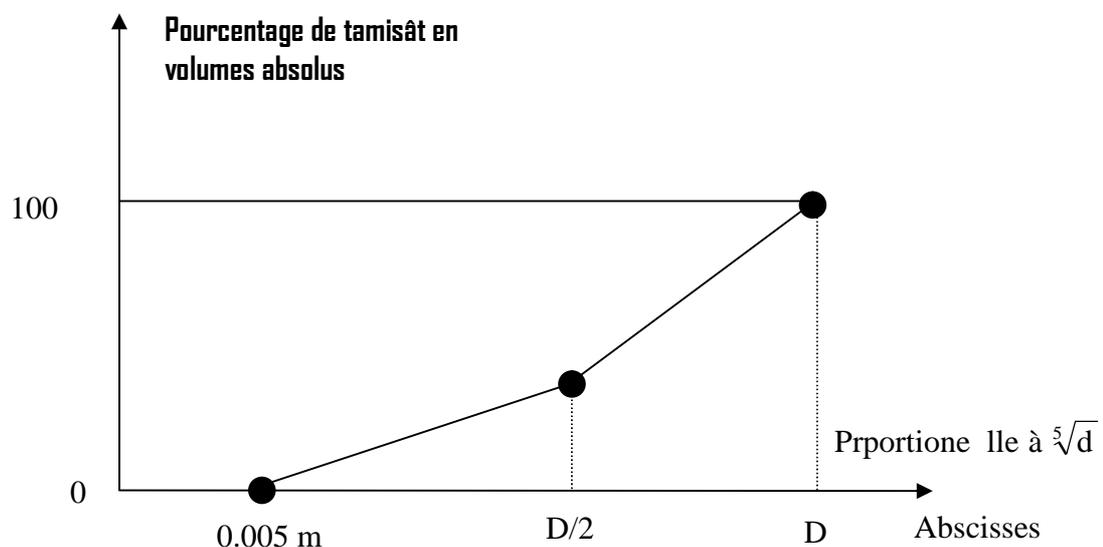


Figure 2.9 : La courbe optimale selon Faury

La courbe se compose de deux segments de droites, formant une ligne brisée.
Il faut donc définir : - L'origine ; - L'extrémité ; - Le point de brisure.

- **Origine** : point de l'axe des abscisses correspondant au tamis de 0.005 mm
- **Extrémité** : point d'abscisse D et d'ordonnées 100 ;
D : dimension du plus grand tamis laissant passer tous les matériaux
- **Point de brisure** :

Abscisse : $D/2$

Ordonnée : $Y_{D/2}$; donnée par la formule suivante :

$$Y_{D/2} = A + 17,8 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{1.25D} - 0.75}$$

Avec :

A : constante, traduisant la maniabilité du béton

B : constante, traduisant l'importance du serrage du béton

D : plus grande dimension de tamis.

R : rayon moyen du moule.

Application de la méthode de Faury pour les matériaux choisis :

On veut faire un béton non armé, ferme, de haute qualité avec un serrage soigné.

Détermination des différents coefficients :

Calcul de D :

$$D = d_{n-1} (1 + X/2Y)$$

$$X = 100 - 83 = 17 \%$$

D'après les courbes granulométriques de la figure N° :

$$d_{n-1} = 20 \text{ mm}$$

$$Y = 100 - 17 - 1 = 82 \%$$

$$D = 20 \left(1 + \frac{17}{2 \times 82} \right) = 22 \text{ mm}$$

Calcul de $Y_{D/2}$: $Y_{D/2} = A + 17,8 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{1.25D} - 0.75}$

- **Détermination de la valeur de A :**

Dans notre cas A est de l'ordre de 26 (béton assez plastique qui contient du sable roulé, voir annexe A)

- **Détermination de la valeur de $\frac{B}{\frac{R}{1.25D} - 0.75}$**

Nous sommes dans le cas où le béton est très serré (B faible) en masse indéfinie non ferrillée (R grand) , alors le rapport est voisin de zéro .

Alors : $Y_{D/2} = 26 + 33 = 59 \%$

Les points de la courbe théorique :

$$\begin{array}{ccc}
 \mathbf{A :} & \left\{ \begin{array}{l} X = 0.005 \text{ mm} \\ Y = 0 \end{array} \right. & \mathbf{B :} & \left\{ \begin{array}{l} X = 11 \text{ mm} \\ Y = 59 \% \end{array} \right. & \mathbf{C :} & \left\{ \begin{array}{l} X = 22 \text{ mm} \\ Y = 100 \% \end{array} \right.
 \end{array}$$

II.2.3. Détermination des pourcentages des agrégats :

On appliquant la méthode graphique de **Joisel** qui consiste à tracer deux droites verticales de manière à obtenir des surfaces égales de part et d'autre des extrémités des courbes granulométriques, les points d'intersection de ces droites avec la courbe optimale nous donnent, les pourcentages pour chaque fraction.

Les résultats sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.17 : pourcentages des différents granulats

Fraction	Pourcentages
0/5	36%
8/15	30%
15/25	20%
Ciment	14 %

II.2.4 Détermination de la courbe granulométrique du mélange projeté, et comparaison avec la courbe optimale :

Les pourcentages de tamisât seront déterminés par le calcul, sans qu'il soit nécessaire de faire une nouvelle analyse granulométrique.

Préparons pour la commodité des calculs, un tableau comportant une ligne par tamis et une colonne par élément du mélange. Indiquons dans la ligne correspondante les pourcentages ci – dessus et calculons le tamisât de chaque élément à travers chaque tamis.

On se réfère aux courbes granulométriques de la figure 2.3, on obtient le tableau 2.18 ci – dessous :

Tableau 2.18 : détermination de la courbe granulométrique du mélange

Mailles des tamis	Ciment	Sable (0/5)	Gravier (8/15)	Gravier (15/25)	Pourcentages
25	14%	36%	30%	20%	100 %
20	14%	36%	29.7%	16.6%	96.3%
16	14%	36%	24.6%	6.2%	80.3%
12.5	14%	36%	9.6%	0.6%	60.2 %
10	14%	36%	3.6%	0.2%	53.8 %
8.0	14%	36%	0.9%		50.9%
6.3	14%	36%	0.3%		50.3%
5.0	14%	36%			50%
2.5	14%	29.5%			43.5%
1.25	14%	17.3%			31.2%
0.625	14%	9.0%			23%
0.315	14%	4.7%			18.7%
0.16	14%	2.5%			16.5%
0.08	14%	1.8%			15.8%

La courbe reportée sur le graphique, figure 2.10, suit la courbe optimale de façon satisfaisante, et les pourcentages C, S et G proposés peuvent être adoptés.

II.2.5 Détermination de la composition d'un mètre cube de béton :

Le béton que nous allons fabriquer sera dosé à 350 kg

Dosage en ciment : 350 kg/m³

Pour la réalisation de ce béton on utilisera un ciment CPJ 45 de densité égale à 3.1 kg /L ⇒ V_c = 113 L

Eau de gâchage : on choisit un rapport E/C = 0.54, donc E = 190 L

Volume absolu des éléments secs : 1000 – E = 810 d m³

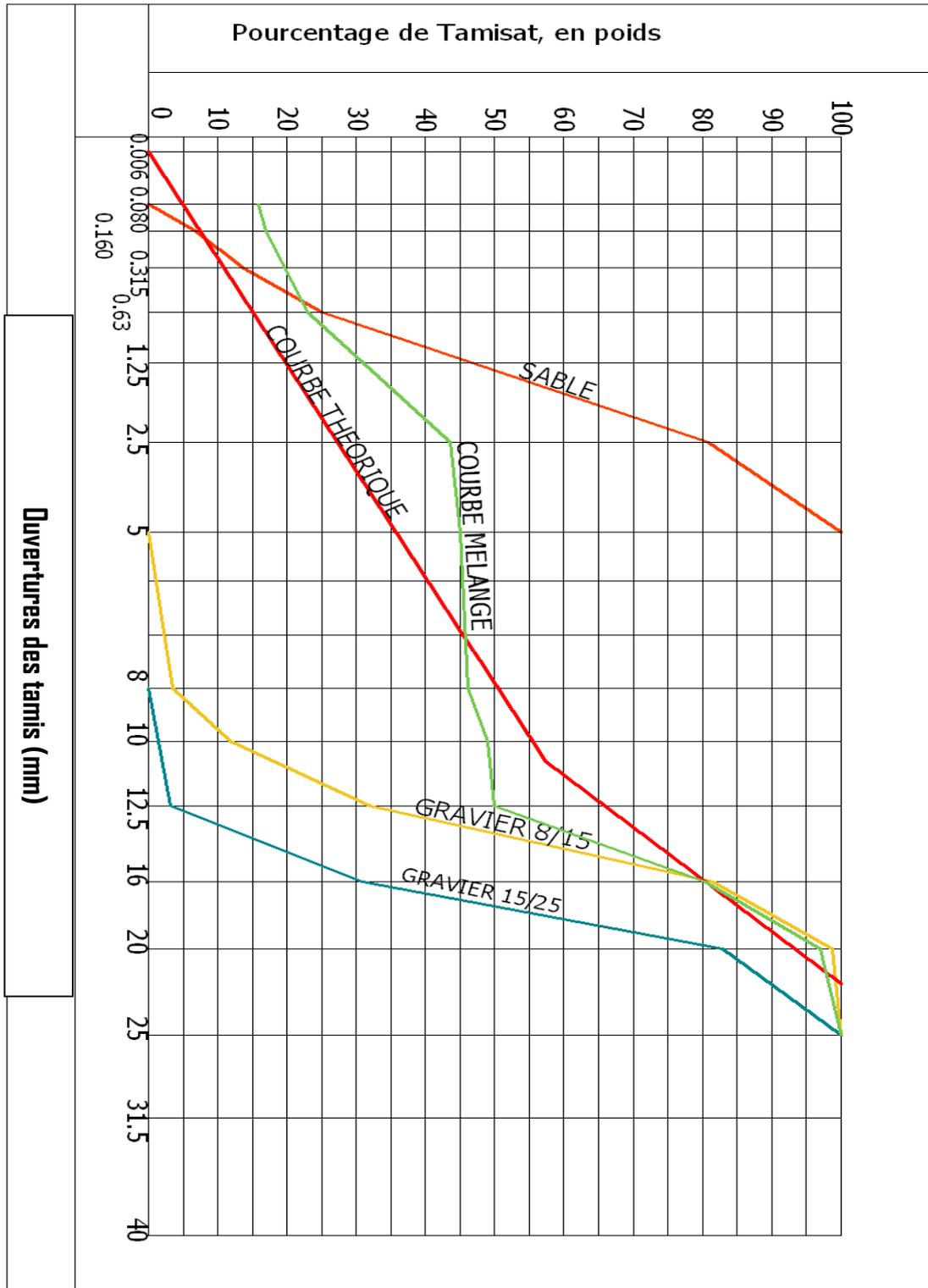


Figure 2.10 : Courbes granulométriques des mélanges

Tableau 2.19 : Composition d'un mètre cube de béton

Composants	%	$\frac{1000 - E}{100}$	Valeur absolue (2 × 3)	Masse volumique absolue	Composition en masses (4 × 5)	Masses volumiques apparentes	Composition en volume apparent (6 / 7)
01	02	03	04	05	06	07	08
Gravier (15/25)	20	8.1	162	2.7	437.4	1.46	300
Gravier (8/15)	30	8.1	243	2.7	656.1	1.51	435
Sable (0/5)	36	8.1	291.6	2.7	787.32	1.57	502
Ciment	14	8.1	113.4	3.1	350	1.0	350
Eau			190	1.0	190	1.0	190
	100		1000		2420		

II.3 ETUDE MECANIQUE DU BETON :

II.3.1 Fabrication des éprouvettes :

Nous préparons des éprouvettes prismatiques de dimensions (7×7×28cm), pour l'essai de traction par flexion et des éprouvettes cylindriques de dimensions (16 ×32cm) pour l'essai de compression simple ; les valeurs seront mesurées à 28 et à 90 jours.

II.3.2 Incorporation du déchet :

Nous préparons au départ des éprouvettes témoin à 0% de déchet, puis successivement on fabriquera des éprouvettes à 10, 20, 30 % de déchet.

La figure suivante nous montre l'ordre d'incorporation des différents matériaux.

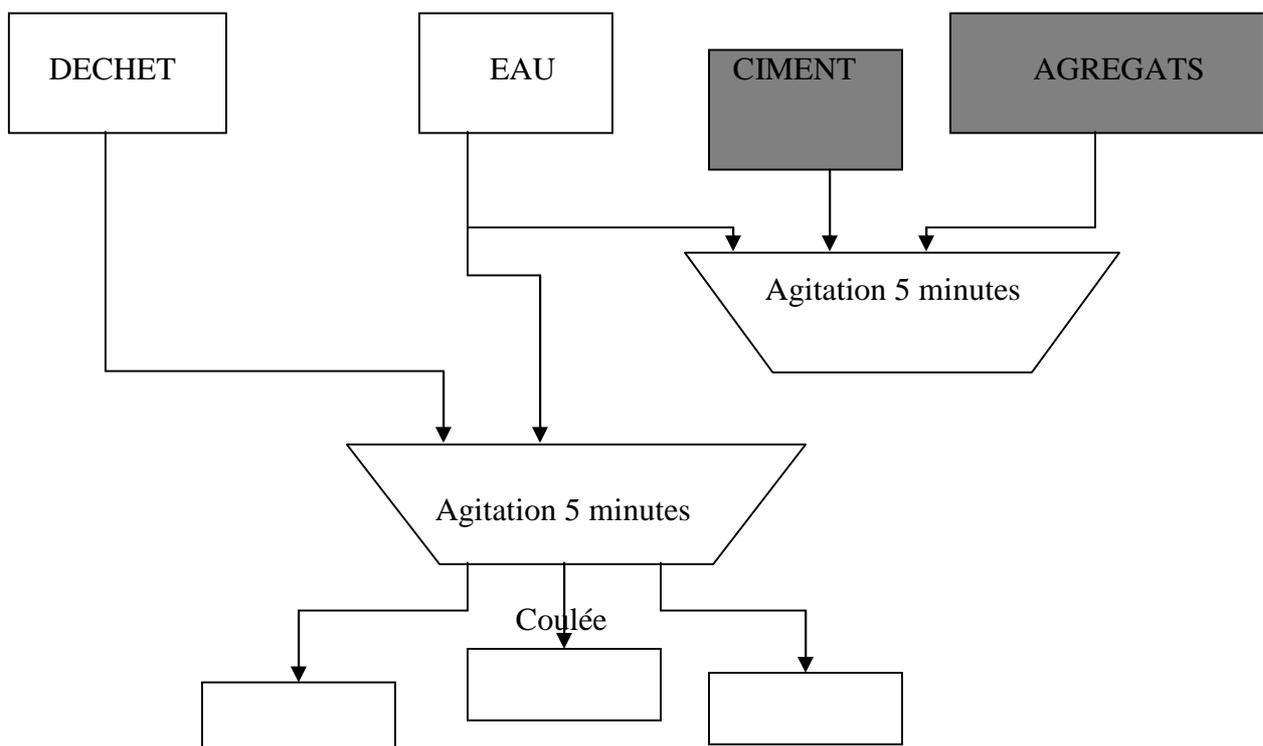


Figure 2.11 : Incorporation du déchet

II.4 ESSAIS SUR BETON FRAIS ET DURCI :

Ces essais nous permettent de corriger la teneur en eau, et de caractériser notre béton mécaniquement ; ceci est la première partie du procédé solidification / stabilisation, qui a pour objectif de déterminer la résistance du béton modifié, en fonction du pourcentage de déchet et du temps.

II.4.1 Consistance du béton :

La consistance du béton est une grandeur qui caractérise sa mise en oeuvre. Cette valeur est déterminée plus couramment par le cône d'ABRAMS.

Le cône est rempli en trois couches, tassées avec une tige en acier pointue de 16 mm de diamètre à raison de 25 coups par couche.

Le cône est soulevé ensuite verticalement, et posé près du béton pour mesurer la valeur de l'affaissement. Si cette valeur est proche de la valeur fixée lors de la formulation (dans notre cas 4 à 6 cm) on coule le béton dans les moules pour former les éprouvettes.

Il faut faire attention lors de l'incorporation de la quantité d'eau calculée, il faut l'introduire progressivement en vérifiant à chaque fois la consistance pour pouvoir corriger celle-ci dans la mesure où elle peut être supérieure ou inférieure à la valeur théorique trouvée.

Le tableau 2.20 montre l'appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône .

Tableau 2.20 : La consistance du béton en fonction de l'affaissement

Affaissement (cm)	Béton	Mise en oeuvre
0 à 2	Très ferme	Vibration puissante
3 à 5	Ferme	Bonne vibration
6 à 9	Plastique	Vibration courante
10 à 13	Mou	Piquage
10 à 14	Très mou à liquide	Léger piquage

II.4.2 Essais de compression :

Les essais de compression seront effectués sur des éprouvettes cylindriques

normalisées $\Phi 16 \times 32$ à l'aide d'une presse à deux plateaux :

La contrainte de la compression est donnée par : $\sigma = F / S$

F : la force appliquée sur l'éprouvette

S : la surface de l'éprouvette.

Avant de faire cet essai, plusieurs conditions doivent être remplies :

- Les faces de l'éprouvette qui sont au contact de la presse doivent être bien planes, et perpendiculaires à l'axe de l'éprouvette.
- La ligne de l'application de la force doit coïncider avec l'axe de l'éprouvette.
- La force doit être appliquée régulièrement, ni trop vite ni trop lentement.

II.4.3 Essais de traction :

- La résistance à la traction peut être réalisée par plusieurs essais :
- **En traction directe :** la mesure se fait par la mise en traction de cylindre identique aux précédents mais l'essai est assez délicat à réaliser, car il nécessite après sciage des extrémités le collage des têtes de traction parfaitement centrées, l'opération devant avoir lieu sans aucun effort de flexion parasite.

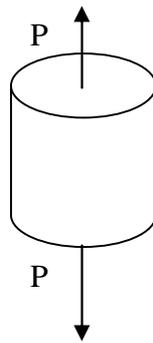


Figure 2.12 : essai de traction directe.

- **En traction par fendage (essai brésilien) :** l'essai consiste à écraser entre les plateaux d'une presse un cylindre de béton normalisé suivant deux génératrices opposées. L'interprétation de cet essai conduit à l'expression de la contrainte de traction :

$$\sigma = 2 \frac{P}{\pi \cdot D \cdot L}$$

P : effort total exercé par la presse .

D : diamètre du cylindre.
L : la longueur du cylindre.

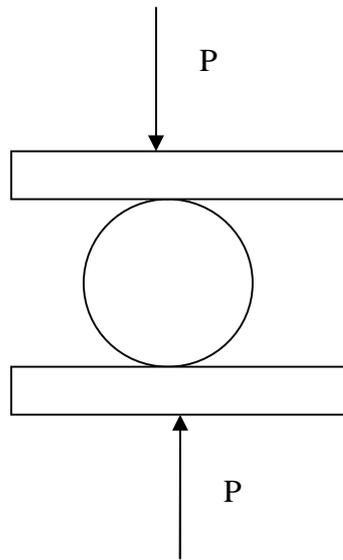


Figure 2.13 : Essai de traction par fendage.

- **En traction par flexion :** c'est l'essai le plus couramment utilisé. La R.D.M indique qui si, dans une section quelconque, s'exerce un moment M , les contraintes dans cette section sont données selon la formule classique de NAVIR :

$$\sigma = \frac{M}{I/V}$$

I : le moment d'inertie de la section.
V : la distance du point considéré à l'axe.
Le processus de cet essai est :

L'éprouvette est encastré verticalement entre deux mâchoires, et l'on exerce une force à l'extrémité des bras. Pour toutes sections la contrainte de traction pure déterminée à partir de cet essai devient donc :

$$M = F \times L \quad \text{et} \quad \frac{I}{V} = \frac{b^3}{6} \quad \text{d'où} \quad \sigma = 6 \frac{F.L}{b^3}$$

En tenant compte du coefficient réducteur 0.6 appliqué au béton.

$$\sigma = 3.6 \frac{F.L}{b^3}$$

Dans la pratique, F est créée par une masse mobile munie d'un index : sur toutes positions de l'index correspond une valeur de F, donc une valeur de σ ; il suffit donc de graduer en bars qui supporte la masse mobile, et de lire la contrainte lors de la rupture.

➤ **En traction par flexion centrée :**

$$M = \frac{F}{2} \times \frac{L}{2} = \frac{F \times L}{4}, \quad \frac{I}{V} = \frac{b^3}{6}$$

$$\text{D'où : } \sigma = \frac{3}{2} \times \frac{F \times L}{b^3}$$

Alors, il suffit de connaître F pour connaître σ :

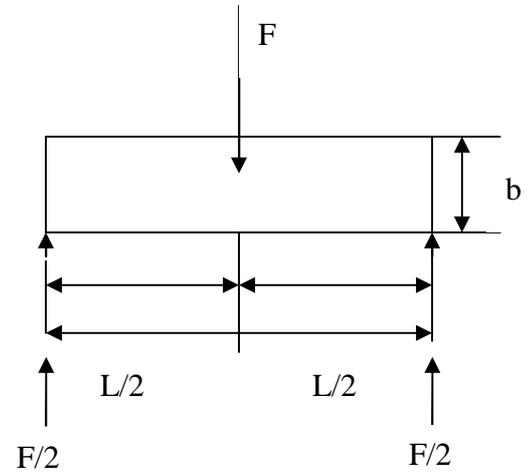


Figure 2.14 : Traction par flexion centrée

➤ **En traction par flexion sous moment constant :**

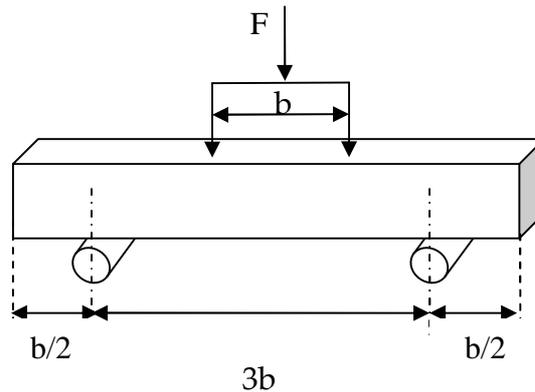


Figure 2.15 : Traction par flexion sous moment constant

Dans notre étude on a utilisé la traction par flexion sous moment constant.

Cet essai est réalisé sur le même principe que l'appareil de MICHAELIS, mais destiné aux éprouvettes prismatiques de béton.

Les éprouvettes sont posées symétriquement sur les appuis, suivant le schéma de la figure 2.15.

La valeur de la contrainte est alors de:

$$\sigma = 3 F / b^2$$

en tenant compte du coefficient réducteur 0.6 appliqué aux bétons .

$$\sigma = 1.8 F / b^2$$

II.5. RESULTAS DES ESSAIS MECANIKES :

Dans la première étape nous allons analyser la solidification du matériau élaboré, à l'aide des tests mécaniques, que sont les essais de compression et les essais de traction.

II.5.1. Résultats des essais de compression :

L'essai de compression est effectué sur des éprouvettes cylindriques (16*32), à deux âges différents (28 et 90 jours) avec des différents pourcentages d'ajout de déchets et cela pour mesurer la solidification du matériau élaboré, dont les résultats sont représentés dans le tableau 2.21 .

Tableau 2.21 : Résistance à la compression simple à 28 jours

N° d'éprouvette	Pourcentage déchet (%)	charge P (KN)	σ_j (MPa)	Moyenne de σ_j (MPa)
1	0	570	25.3	29.2
2		730	32.4	
3		670	29.8	
4	10	420	18.7	22.2
5		500	22.2	
6		580	25.8	
7	20	550	24.4	21.8
8		380	16.3	
9		540	24.0	
10	30	410	18.2	18.2
11		400	17.8	
12		420	18.7	

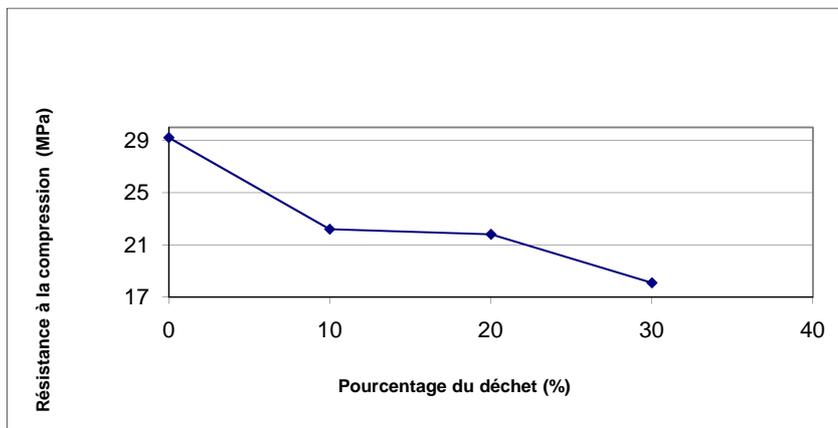


Figure 2.16 : Résistance à la compression à 28 jours.

Tableau 2.22: Résistance à la compression simple à 90 jours.

N° d'éprouvette	Pourcentage déchet (%)	charge P (KN)	σ_j (MPa)	Moyenne de σ_j (MPa)
1	0	660	29.3	33.0
2		770	34.2	
3		800	35.6	
4	10	600	26.7	27.6
5		700	31.1	
6		560	24.9	
7	20	550	24.4	23.9
8		540	24.0	
9		520	23.1	
10	30	520	23.1	21.2
11		420	18.7	
12		490	21.8	

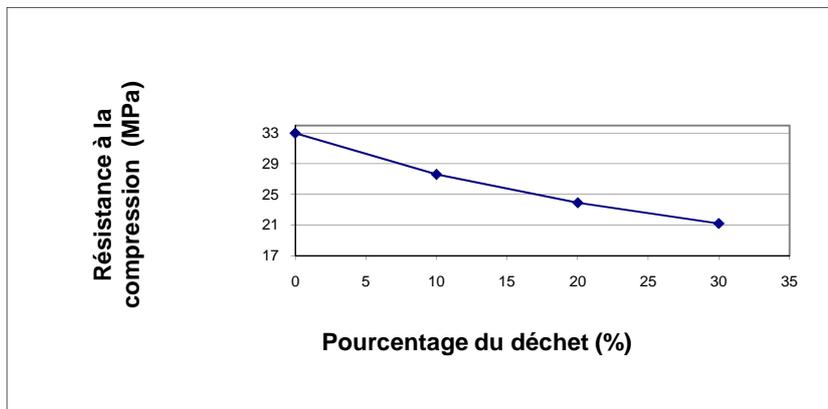


Figure 2.17 : Résistance à la compression à 90 jours.

D'après les graphes ci-dessus (figure 2.16 et figure 2.17) on remarque que la résistance des différents bétons réalisés augmente avec l'âge des éprouvettes et de manière analogue à celle du béton ordinaire. On remarque aussi que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage de déchet incorporé. On notera, aussi, que pour 20% de déchet incorporé, nous obtenons un taux de résistance par rapport au témoin de l'ordre de 74.4 % à 28 et de 72.4 à 90 jours.

II.5.2. Résultats de l'essai de traction par flexion :

L'essai de traction par flexion est effectué sur des éprouvettes prismatiques (7*7*28) cm , à deux âges différents (28 et 90 jours) avec différents pourcentages d'ajout de déchet et cela pour mesurer la solidification du matériau élaboré, dont les résultats sont représentés dans Le tableau 2.23 et la figure 2.18.

Tableau 2.23 : Résistance à la traction par flexion à 28 jours.

N° d'éprouvette	Pourcentage déchet (%)	charge P (kgf)	σ_j (MPa)	Moyenne de σ_j (MPa)
1	0	825	7.58	7.61
2		825	7.58	
3		835	7.67	
4	10	685	6.29	6.33
5		660	6.06	
6		725	6.65	
7	20	627	5.76	6.05
8		665	6.10	
9		685	6.29	
10	30	575	5.28	5.20
11		525	4.82	
12		600	5.51	

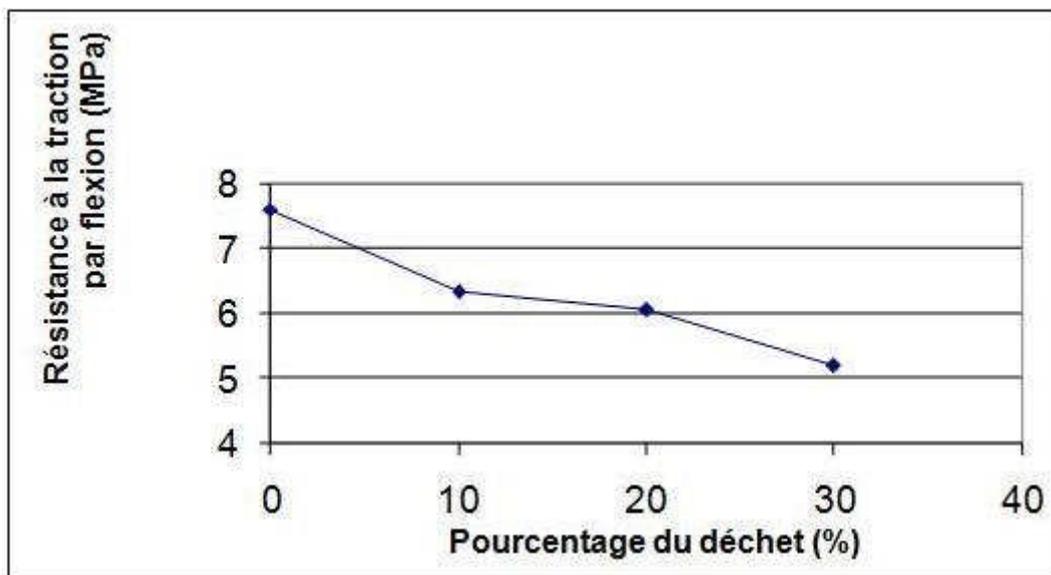


Figure 2.18 : Résistance à la traction par flexion à 28 jours.

Nous remarquons une diminution de 13 % de la contrainte de traction par rapport au témoin pour un ajout de 10 %, puis une faible diminution pour un ajout de 20 et 30 % de déchet.

Tableau 2.24 : Résistance à la traction par flexion à 90 jours.

N° d'éprouvette	Pourcentage déchet(%)	charge P (kgf)	σ_j (MPa)	Moyenne de σ_j (MPa)
1	0	910	8.36	8.48
2		940	8.63	
3		920	8.45	
4	10	800	7.34	7.80
5		850	7.80	
6		900	8.26	
7	20	700	6.42	7.04
8		700	6.42	
9		900	8.26	
10	30	620	5.69	6.03
11		600	5.51	
12		750	6.88	

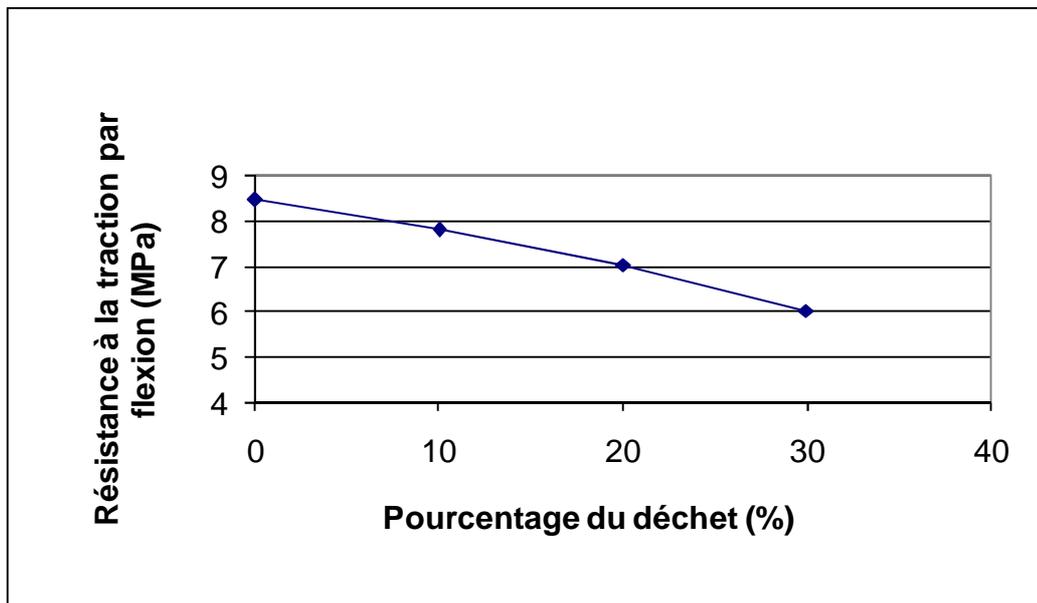


Figure 2.19 : Résistance à la traction par flexion à 90 jours.

La résistance à la traction à 90 jours décroît en fonction du pourcentage du déchet incorporé dans la composition du béton.

II.5.3 Résultats des essais de compression avec adjuvant :

Pour permettre d'améliorer la solidification du matériau élaboré, on a utilisé un adjuvant (MEDAFLUID) dans la formulation avec 20 % de déchet .Les éprouvettes sont soumises à l'essai de compression à 28 jours, dont les résultats sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.25: Résistance à la compression simple à 28 jours avec adjuvant

N°d'éprouvette	Pourcentage déchet	charge P (KN)	σ_j (MPa)	Moyenne de σ_j (MPa)
1	0 %	570	25,3	29,2
2		730	32,4	
3		670	29,8	
1	20%	550	24,4	21,8
2		380	16,3	
3		540	24,0	
1	20% (de déchet + avec adjuvant)	600	26,7	28,1
2		700	31,1	
3		600	26,7	

L'utilisation de l'adjuvant dans la formulation du béton hydraulique a donné des résultats encourageants. La résistance des éprouvettes avec adjuvant a augmenté de 29 % par rapport aux éprouvettes qui contiennent 20 % de déchet, et se rapproche de la résistance du témoin. Ces résultats nous permettent d'augmenter la quantité du déchet incorporé dans la formulation du béton hydraulique.

II.6. ESSAI DE LIXIVIATION (norme NFP X31-211) :

Le risque majeur de pollution réside dans l'entraînement, par les eaux, d'éléments polluants contenus dans les déchets. L'évaluation du comportement environnemental de ces déchets/matériaux doit passer par l'étude des interactions entre l'eau et ces déchets /matériaux.

La lixiviation est l'extraction par voie liquide d'élément ou de molécules inorganiques ou organiques contenus ou fixés sur une matrice solide, mettant en œuvre des mécanismes chimiques ou biologiques.

L'essai de lixiviation est actuellement l'outil le plus répandu pour apprécier l'impact des déchets sur l'environnement à travers l'eau et juger de leur écocompatibilité, dans les conditions de scénarios prévus. Il permet également outre la caractérisation physico-chimique des déchets sous forme granulaire ou massive et l'identification des principaux mécanismes contrôlant le relargage.

De nombreux essais de lixiviation existent. Ces tests présentent chacun un domaine d'application bien défini et un choix plus ou moins arbitraire des paramètres de lixiviation (durée de lixiviation, lixiviant utilisé, PH, rapport L/S, agitation, dimension de l'échantillon).

Les résultats de ces tests donnent lieu à différentes présentations et interprétations. Chaque test doit être appliqué en fonction du but recherché.

On peut distinguer deux types d'essai de lixiviation qui diffèrent par les phénomènes mis en évidence :

Les essais en batch principalement utilisés pour évaluer l'influence spécifique de certains paramètres : température, PH, potentiel d'oxydo-réduction .

Les essais en colonne employés dans l'intention de simuler les conditions du terrain : écoulement du fluide, transfert de masse et mécanismes de dissolution. Ce transport des polluants est majoritairement convectif et dispersif.

Au niveau des applications normalisées, trois niveaux de tests sont distingués [8] :

- Essais de caractérisation pour déterminer le comportement à la lixiviation (mécanismes) à court et long terme.
- Essais de conformité, vérification des paramètres du comportement par rapport à des valeurs de référence (ils sont utilisés dans la plupart des pays européens pour l'admissibilité en décharge), ou par rapport aux mécanismes identifiés précédemment
- Essais courts, contrôle rapide sur site pour vérifier sur le terrain les résultats obtenus lors des essais de conformité.

Les essais de caractérisation sont considérés comme indispensables pour la prédiction du comportement à long terme des déchets stabilisés stockés ou valorisés. Ils permettent d'identifier les paramètres essentiels contrôlant le relargage . Ce sont souvent ces paramètres qui diffèrent d'un essai à l'autre :le temps de lixiviation, le ratio liquide/solide, le lixiviat (composition , PH , température , etc.....) et les conditions de renouvellement du lixiviat [25] .

Plusieurs programmes de recherche ont été conduits à l'INSA de Lyon sur l'interprétation des tests de lixiviation, de façon à développer des outils pour évaluer le relargage à long terme des polluants contenus dans des déchets stabilisés / solidifiés .

Il a ainsi été proposé et mis au point une boîte à outils de tests de lixiviation pour l'évaluation du flux de polluants émis d'un déchet solide [18] .

Dans notre étude l'essai de lixiviation est effectué sur une éprouvette cubique (15*15*15) ayant un pourcentage de déchet de 20% , l'essai de lixiviation est effectué au sein du laboratoire de SEAAL KOUBA :

Tableau 2.26 : Composition chimique du lixiviant.

Élément (concentration mg/L)							
Temps	Fe	Mn	Cu	Pb	Cd	Cr	Ni
2 heures	0.342	< 0.05	0.0041	0.0095	< 0.004	0.0095	< 0.005
2jours	0.255	< 0.05	0.0269	0.006	< 0.004	0.0040	< 0.005
6jours	0.431	< 0.05	0.0206	< 0.005	0.01	0.037	< 0.005

L'analyse du lexiviat nous montre que le pourcentage de fer l'élément prédominant dans la composition du déchet brut est très faible par rapport aux spécifications (5mg/l). Les autres métaux lourds sont à l'état de trace. Nous pouvons donc affirmer que le matériau élaboré est stable.

II.7.VALORISATION DU MATERIAU ELABORE :

Les résultats encourageants obtenus ont permis d'envisager une valorisation du matériau élaboré en tant qu'élément secondaire de construction.

Nous nous sommes intéressés, en premier lieu, aux éléments utilisés dans la voirie urbaine comme les bordures de trottoir.

A partir de la formulation de bordure, nous avons réalisé sur des moules de bordures de trottoir des échantillons destinés à être testés à la traction par flexion.

La bordure présente les dimensions suivantes :

- Largeur = 15 cm
- Hauteur = 25 cm
- Longueur = 70 cm.

Les résultats de l'essai de traction par flexion centrée sont représentés dans la tableau 2.27 :

Tableau 2.27 : Résistance à la traction par flexion centrée de la bordure de trottoir à 28 et à 90 jours.

Types de bordures	28 jours			90 jours		
	Charge P (Kn)	Moment (Kn.m)	Contrainte σ_j (MPa)	Charge P (Kn)	Moment (Kn.m)	Contrainte σ_j (MPa)
Bordure témoin (0%)	80	14	8.96	93.64	16.40	10.50
Bordure 20% de déchet	53	9.27	5.93	67.43	11.81	7.56
Bordure 20% de déchet avec adjuvant	68	11.9	7.61	87	15.23	9.75

$$M = P \cdot L / 4$$

$$\sigma = M \cdot Y / I \quad \text{tel que : } Y = h / 2 \quad I = b h^3 / 12$$

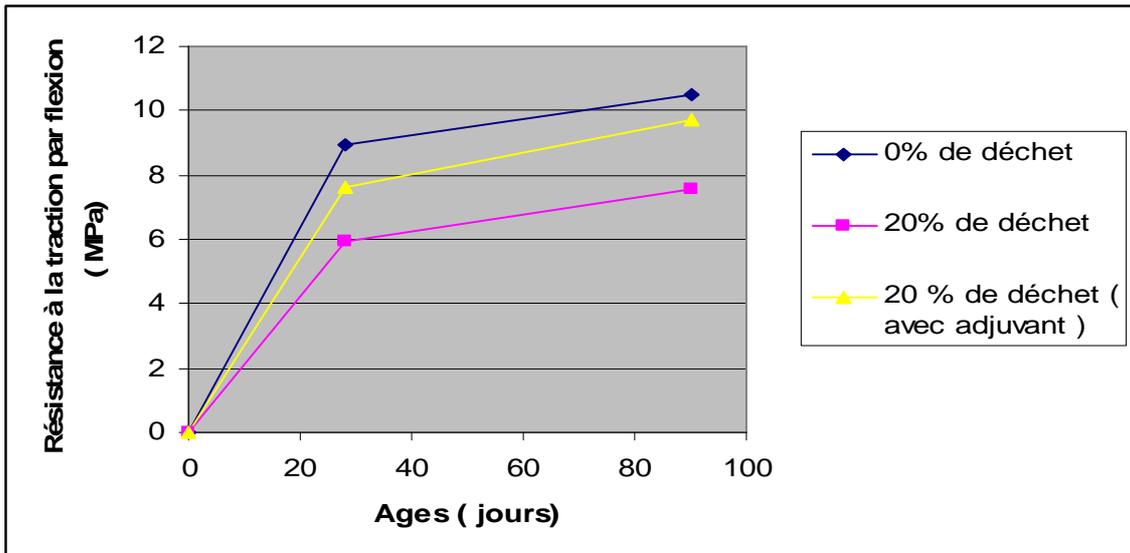


Figure 2.20 : La résistance à la traction par flexion centrée de la bordure de trottoir à 28 et 90 jours.

D'après la figure 2.20 on peut constater que :

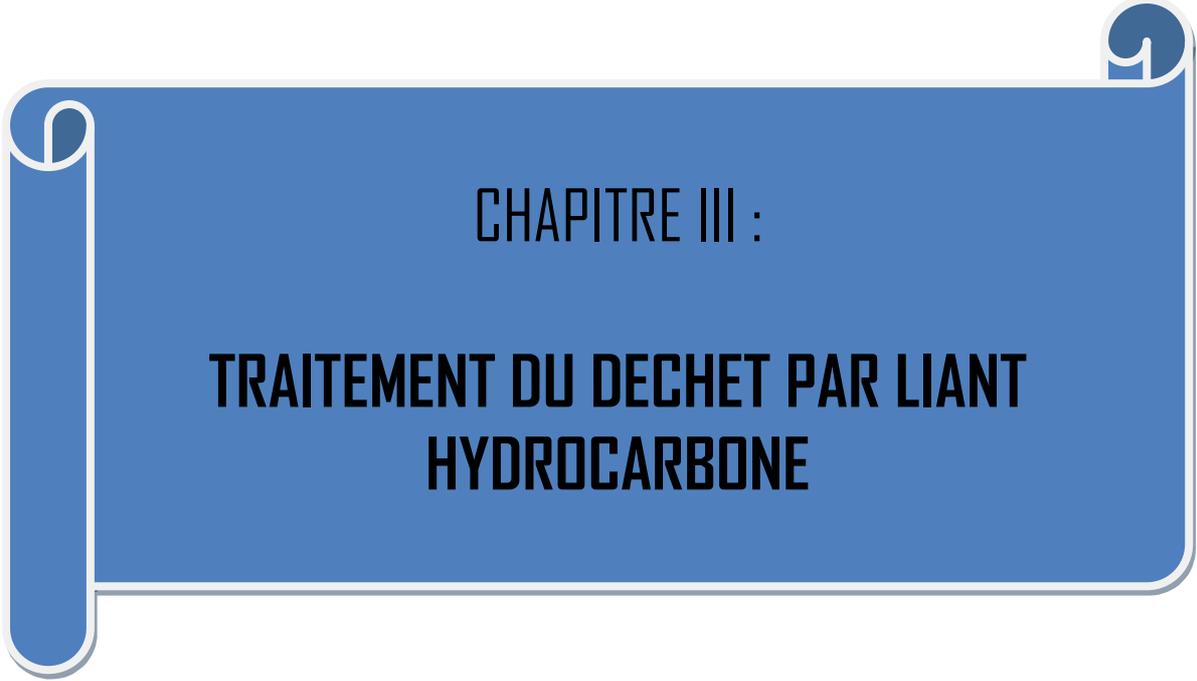
Le taux de résistance à la traction par flexion obtenu pour les bordures à 20 % de déchet et à 20 % de déchet avec adjuvant par rapport au témoin, est acceptable. Ce taux de résistance obtenu dans le premier cas est de l'ordre de 66 % à 28 jours et de 72 % à 90 jours par rapport au témoin (0% de déchet) , et de l'ordre de 84 % à 28 jours et 93 % à 90 jours pour le deuxième cas.

Puisque les bordures de trottoir sont classé selon les normes françaises en fonction de la résistance à la traction par flexion du béton constitutif , et de ce que on a interprété précédemment , on constate que ces derniers résultats sont plus qu'encourageants , pour concrétiser ce travail dans la réalité .

II.8. Conclusion :

Le traitement de notre déchet par liant hydraulique, montre clairement que le pourcentage optimal de déchet qui a fait l'objet d'une bonne résistance soit à la traction par flexion soit à la compression est de 20 %, et nous a permis d'obtenir un béton résistant solide et stable.

Nous procéderons dans le chapitre suivant au traitement de notre déchet par un liant hydrocarboné, ce qui représente l'objet du deuxième volet de notre étude.

A blue graphic element resembling a scroll, with a white outline and rounded corners. It has a vertical strip on the left side that looks like a scroll edge, and a small circular detail at the top right corner. The text is centered within the main blue area.

CHAPITRE III :

**TRAITEMENT DU DECHET PAR LIANT
HYDROCARBONE**

Après avoir traité notre déchet par un liant hydraulique nous procéderons au traitement par des liants bitumineux, nous effectuerons alors des essais afin d'obtenir les mêmes objectifs que ceux du traitement précédent à savoir la solidification et la stabilisation du matériau obtenu.

III.1. CARACTÉRISTIQUES DES MATERIAUX :

III.1.1 Caractérisation des agrégats :

III.1.1.1 La granulométrie :

L'analyse granulométrique des échantillons a donné les résultats représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.1 : analyse granulométrique des fractions.

Poids Total (g)		Fraction 0/3	Fraction 3/8	Fraction 8/15	Fraction 15/25	le complément à 100% de refus cumulés des fractions			
		1083	1600	3000	5000	0/3	3/8	8/15	15/25
Tamis (mm)	20	0	0	20	2347	100,00	100,00	99,33	53,06
	16	0	0	155	4570	100,00	100,00	94,83	8,60
	12,5	0	0	1345	4982	100,00	100,00	55,17	0,36
	10	0	20	2380	4982	100,00	98,75	20,67	0,36
	8	0	120	2900	4982	100,00	92,50	3,33	0,36
	6,3	24,00	480	2960	4982	97,78	70,00	1,33	0,36
	5	43,00	700	2965	4982	96,03	56,25	1,17	0,36
	4	82,00	1044	2967	4982	92,43	34,75	1,10	0,36
	2	266,00	1421	2968	4982	75,44	11,19	1,07	0,36
	1	505,00	1493	2969	4982	53,37	6,69	1,03	0,36
	0,5	688,00	1523	2970	4982	36,47	4,81	1,00	0,36
	0,4	722,00	1528	2971	4982	33,33	4,50	0,97	0,36
	0,315	762,00	1531	2972	4982	29,64	4,31	0,93	0,36
	0,2	819,00	1538	2973	4982	24,38	3,88	0,90	0,36
	0,1	883,00	1548	2974	4982	18,47	3,25	0,87	0,36
0,08	902,00	1558	2975	4982	16,71	2,63	0,83	0,36	

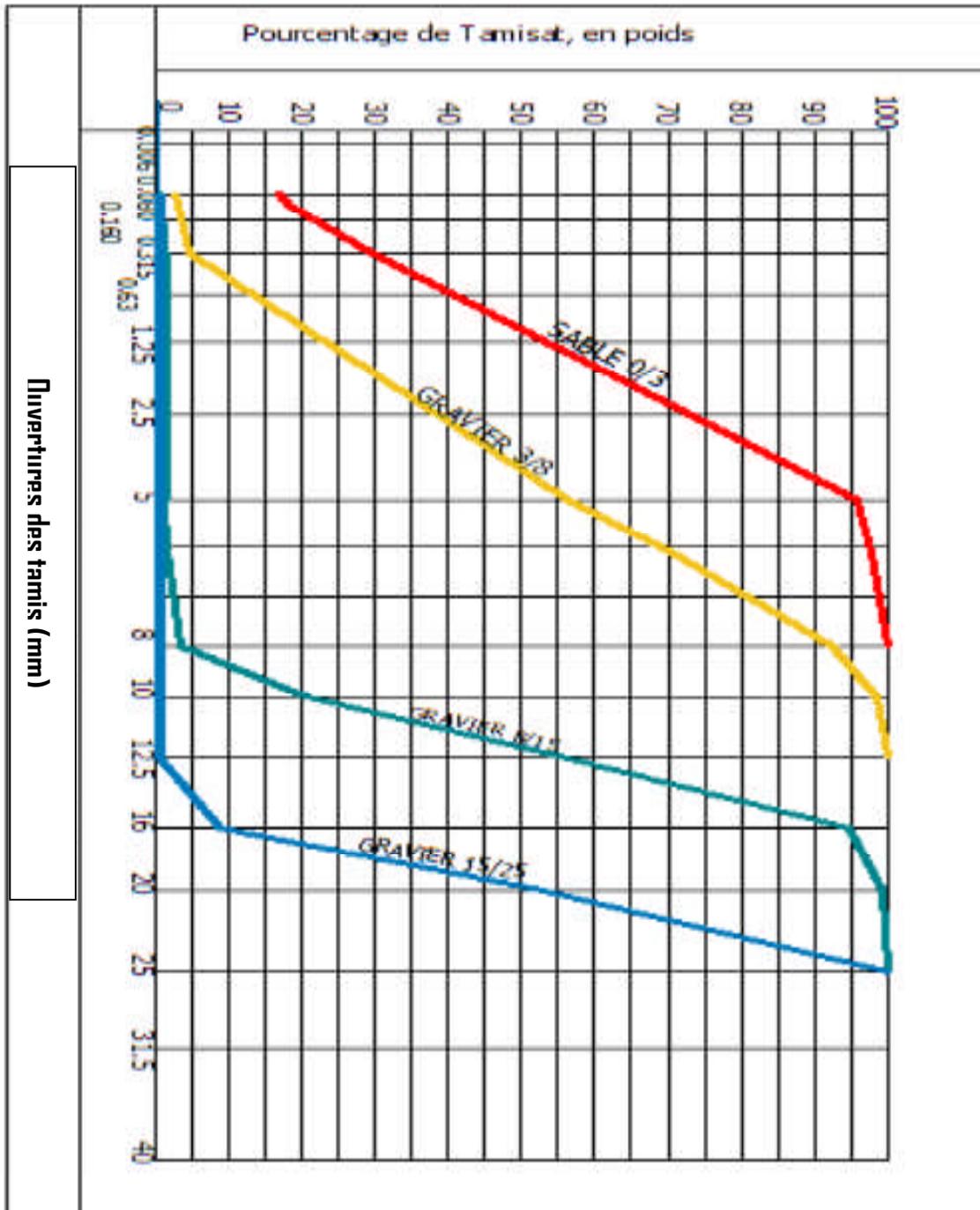


Figure 3.1 : Courbes granulométriques des fractions

III.1.1.2 Les essais physiques et mécaniques des agrégats :

Les différents résultats des essais effectués sur les agrégats utilisés figurent dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.2 : Résultats des essais sur granulats.

ESSAI	RESULTAS
Poids spécifique(Kg /dm ³)	Sable = 2.65
	Gravier (3/8)= 2.54, (8/15) = 2.63 , (15/25) = 2.68
Propreté (%)	Sable (ES= 87)
	Gravier (P= 1.80)
LOS ANGELES (le seuil est fixé à 40 %)	Classe granulaire (10 / 16) LA = 17
	Classe granulaire (6.3 /10) LA = 15
	Classe granulaire (4/6.3) LA = 18
MICRO DEVAL (le seuil est fixé à 35 %)	MDE SEC = 6%
	MDE HUMIDE = 16%

III.1.2 Caractérisation des liants :

III.1.2.1 Principaux liants utilisés en Algérie :

III.1.2.1.1 Les liants hydrocarbonés :

Le terme "liant" est défini par le dictionnaire Larousse (1991) comme étant la matière ajoutée à une autre pour agglomérer les parties composantes.

Les liants hydrocarbonés sont des solides, semi-solides ou liquides comprenant principalement les goudrons et les bitumes.

III.1.2.1.1.1 Les goudrons :

Ce sont des produits liquides et visqueux, dérivant de la houille ou d'autres matières telles que le bois, la tourbe, le lignite et les graisses.

Pour les réalisations routières, une classification de ces liants a été mise au point et qui est la suivante:[14]

- **Les goudrons bruts :** Ce sont des goudrons de première distillation de la houille, trop fluides et très susceptibles aux variations de température ; toutes ces qualités les rendent impropres aux usagers routiers sauf parfois en première couche car ils ont une bonne qualité d'accrochage.

- **Les goudrons étêtés** : En plus de la distillation, ils subissaient une décantation. Leur distillation servait à extraire les produits de tête, tel que le benzène et les huiles légères et ils étaient utilisés comme liants routiers.
- **Les goudrons rectifiés par mélange** : Ils permettent d'améliorer des goudrons insuffisants, auxquels on a fait subir un commencement de préparation, soit par simple étêtage, soit par apport de brai.
- **Les goudrons polymérisés ou oxydés** : Ils sont obtenus à partir des goudrons bruts par chauffage, pour qu'ils deviennent plus visqueux.
- **Les goudrons reconstitués** : Ils représentent la quasi-totalité des goudrons routiers. Ils sont recomposés à partir de produits et de résidus de distillation. Il existe des goudrons composés comportant plus de 50 % de goudron, et le reste de bitume pur.

III.1.2.1.1.2 Les bitumes :

Ce sont des mélanges très complexes d'hydrocarbures, solides, semi-solides ou liquides ; ils ont une origine et une composition chimique différentes de celles des goudrons. Les bitumes sont issus du traitement des pétroles bruts et sont classés comme suit [14].

➤ **Les bitumes purs :**

Obtenus par raffinage, de bruts pétroliers et ne comportant aucun ajout, ils sont classés suivant leur dureté et leur pénétration, on distingue :

- Les bitumes très durs de pénétration 20/30
- Les bitumes durs de pénétration 40/50.
- Les bitumes semi-durs de pénétration 80/100
- Les bitumes semi-mous de pénétration 180/220
- Les bitumes mous de pénétration 300/350
- Il existe également le bitume 60/70

➤ **Les bitumes fluidifiés cut-back :**

Ils sont fabriqués à base de bitume pur qui est généralement le bitume 80/100, auquel on ajoute un solvant (kérosène, huiles légères) à aux conditions atmosphériques ; les solvants s'évaporent et laissent le bitume pur remplir sa fonction.

En général on distingue trois catégories :

- Les cut-backs à prise rapide (RC) composés d'un ciment bitumineux et d'un diluant de haute volatilité tel que l'huile de naphte ou la gazoline.
- Les cut-backs à prise moyenne (MC) composés de ciment bitumineux

et d'un diluant de volatilité moyenne comme le kérosène.

- Les cut-backs à prise lente (SC). Ils sont composés d'un ciment bitumineux et des huiles de volatilité lente. De même ces cut-backs sont classés suivant leur pseudo-viscosité qui est le temps d'écoulement de 50 cm³ du cut-back à travers un orifice à une température normalisé, on distingue :

- ❖ 0/1 et 10 /15 utilisés en couche d'imprégnation ;
- ❖ 150/250, 400/600 et 800/1400 utilisés en enduits superficiels.

- **Les bitumes fluxés** : Ce sont des bitumes purs dont on a atténué la consistance par incorporation de produits issus de la distillation du pétrole et du goudron.
- **Les bitumes composés** : Ils comportent au moins 50 % de bitumes et se subdivisent en :
 - Bitumes-goudron : mélange de bitumes pur et de goudron de houille.
 - Bitumes-brais : mélange de bitume pur et de brai de houille.
- **Les bitumes modifiés** : Ce sont les bitumes précédents avec ajout de substances le plus fréquemment macromoléculaires. Ils sont appelés bitumes polymères.
- **Les émulsions de bitumes** : L'émulsion de bitumes est une dispersion de bitumes dans l'eau formée par emploi d'un agent tensio-actif ou émulsifiant et d'une énergie de cisaillement du liant. Les émulsions peuvent être du type cation ou du type anion, tout dépend de l'émulsifiant utilisé.

III.2. LES ENROBES BITUMINEUX :

III.2.1. Définition :

Les enrobés bitumineux résultent d'un mélange homogène de granulats, de sable, de fillers et d'un liant hydrocarboné (bitume pur)

Un enrobé bitumineux est composé de trois phases :

- Phase solide : constituée de la partie minérale.
- Phase liquide : constituée du liant hydrocarboné
- Phase gazeuse : représente le pourcentage de vide dans l'enrobé rempli d'air.

III.2.2. La classification des enrobés bitumineux :

On peut définir trois classes d'enrobés en fonction de leurs granularités qui sont:

III.2.2.1. Les enrobés denses :

La teneur en vide est faible et inférieure à 8% et la compacité comprise entre 92 % et 97%.

III.2.2.2. Les enrobés semis - denses :

La teneur en vide varie entre 8 % et 12 % et la compacité entre 88 % et 92%.

III.2.2.3. Les enrobés ouverts :

La teneur en vide est supérieure à 12 % et la compacité est inférieure à 88 %.

il existe deux types d'enrobé bitumineux (traités à chaud).

III.2.2.3.1. Le béton bitumineux (BB) :

Il est constitué d'un squelette minéral à granulométrie continue tel que les dimensions des fillers du sable et du gravier sont traités de telle sorte que les vides des uns sont comblés par les autres avec un niveau de compactage optimum formant une structure minérale dense avec une faible teneur en vide.

Le tableau ci-dessous représente le classement du béton bitumineux selon les plus grandes dimensions du gros granulat et le pourcentage des différents constituants:

Tableau 3.3 : Classement du béton bitumineux

Structure	Dimension max. (mm)	Gravillon (%)	Sable (%)	Filler (%)	Bitume (%)
Grossière	30-15	0-65	30-15	2-6	3-5
Moyenne	15-10	50-53	45-60	6-10	5-7
Fine	20-10	65-50	30-45	4-8	4-6

- Structure grossière, couches de base des routes à trafic lourd.
- Structure moyenne et fine, couches de roulement.

III.2.2.3.2 Les graves bitumes (GB) :

Les graves bitumes sont moins dosés en bitume que les bétons bitumineux et sont destinées essentiellement à la réalisation des assises de chaussées des couches de base et des couches de fondation.

Pour une grave bitume, la dimension maximale des gros éléments est :

- $14 \text{ mm} \leq D \leq 20 \text{ mm}$ pour une couche de base, une couche de renforcement et une couche de fondation de chaussées en béton .
- $14 \text{ mm} \leq D \leq 31,5 \text{ mm}$: pour une couche de fondation souple.

III.2.3. Les qualités exigées des enrobés bitumineux :

III.2.3.1. La stabilité :

C'est la résistance à la déformation permanente de la couche sous l'effet des charges statiques et dynamiques .Elle est liée :

- A la nature du liant
- Au dosage en liant et en fillers
- A la nature et à la forme des granulats.

L'enrobé est d'autant plus stable que l'angle de frottement interne des granulats ainsi que la dureté du liant sont élevés. L'insuffisance de la stabilité se traduit par un fluage avec formation d'ornières.

III.2.3.2. La flexibilité :

C'est l'aptitude de l'enrobé, à admettre sans fissuration les déformations d'ensembles qui peuvent être imposées par la déflexion des couches.

La ductilité du liant doit donc demeurer suffisante aux basses températures pour éviter la fissuration du tapis qui risque de donner une insuffisance de flexibilité

III.2.3.3. L'absence de sensibilité à l'eau :

La sensibilité à l'eau dépend de deux facteurs :

- L'adhésivité du liant aux granulats.
- L'absence d'éléments argileux.

Une bonne adhésivité du liant aux granulats permet à l'enrobé de résister au désenrobage des granulats sous l'action de l'eau.

D'autre part la présence d'éléments argileux susceptibles de gonfler en présence d'eau risque de diminuer cette stabilité.

III.2.3.4. La durabilité :

C'est la résistance à la fissuration par fatigue liée directement au mastic (qualité, quantité et teneur en bitume) et au pourcentage de vide du mélange compacté.

Remarque :

L'enrobé utilisé en couches de surface doit en plus de toutes ces qualités avoir certaines propriétés telles que:

- La résistance aux efforts tangentiels et au poinçonnement.
- Avoir une bonne rugosité.
- L'imperméabilité à l'eau.

Après avoir choisi une granulométrie convenable. Il s'agit de déterminer la teneur en liant optimal donnant les meilleurs caractéristiques : on dispose pour cela de l'essai L.C.P.C. La teneur en liant est calculée d'après la composition granulométrique des granulats secs formant le squelette de l'enrobé, on décompose celle-ci en plusieurs fractions, et grâce à une formule empirique, on détermine la surface spécifique.

Les classes de bitumes purs commercialisés par NAFTAL pour l'emploi en techniques routières sont généralement le 40/50 et le 80/100. Ils sont utilisés pour la fabrication des enrobés bitumineux denses, la grave bitume (GB) et le béton bitumineux (BB).

Les bitumes fluidifiés (cut-back) sont fabriqués aux unités NAFTAL à partir du bitume pur (généralement 80/100) auquel on ajoute un solvant (Kérosène). Les différentes classes fabriquées sont :

- Cut-back : 0/1 (65% bitume +35% Kérosène).
- Cut-back : 150/250 (86% bitume + 14% Kérosène).
- Cut-back : 400/600 (89% bitume + 11 % Kérosène).

La teneur maximale en kérosène ne doit pas dépasser 47% pour les 150/250 et 15% pour le 400/600.

Ces bitumes fluidifiés sont particulièrement utilisés pour l'imprégnation des sols. Les grades visqueux sont réservés aux répandages superficiels et à l'enrobage des matériaux.

Les émulsions de bitumes sont fabriquées à partir du bitume pur ou fluidifié dispersé dans l'eau avec un émulsifiant (savon alcalin d'acide gras pour les émulsions anioniques, sel d'ammonium pour les émulsions cationiques). Les émulsions anioniques sont utilisées à froid en couche d'accrochage, celles cationiques en enduits d'usure ou en enrobés.

En Algérie, les émulsions sont principalement utilisées en couche d'accrochage comme on utilise aussi le bitume 85/25 pour les étanchéités.

On caractérise les bitumes par des essais de consistance.

III.3 LES ESSAIS SUR LE BITUME :

III.3.1 L'essai de pénétration (NF T 66.004) :

Cet essai consiste à enfoncer dans l'échantillon du bitume étudié porté à 25°C, une aiguille chargée de 100 g. L'enfoncement mesuré en 1/10 mm de l'aiguille au bout de 5 secondes est appelé pénétration du bitume.

III.3.2 L'essai de ramollissement (NF T 66.008):

L'essai de ramollissement est la température à laquelle le bitume atteint une certaine consistance. Il caractérise la susceptibilité à la chaleur du liant étudié.

III.3.3 L'essai (bille anneau) (NF T 66.008) :

L'essai « bille anneau » consiste à couler un disque de bitume testé dans un anneau standard et à placer sur l'échantillon, une bille d'acier de 3,5 g. L'ensemble plongé dans un bain-marie est chauffé jusqu'à ce que le disque de bitume flux sous le poids de la bille et vienne toucher le fond du récipient. La température lue sur le thermomètre au moment où le liant entre en contact avec le fond du bocal est le point de ramollissement "bille et anneau".

Il est plus élevé pour les bitumes soufflés que pour les bitumes purs.

III.3.4 Le point d'éclair, point de flamme (NF T 66.004) :

On note lors d'un échauffement progressif du bitume, la température à laquelle les vapeurs émises par le liant s'enflamment au contact d'une flamme. C'est le point d'éclair ou le point d'inflammabilité CLEVELAND, qui est supérieur soit à 230°C soit à 250°C suivant la nature du produit étudié.

III.3.5 La ductilité (NF T 66.006) :

C'est l'aptitude du bitume à subir sans rupture l'étirement en fil. L'essai consiste à mesurer la longueur d'allongement avant rupture d'une éprouvette normalisée de bitume. Il s'effectue dans un bain à 25°C à la vitesse de 5 cm/ mn. Les bitumes les plus mous peuvent être étirés en fil de plus d'un mètre et les plus durs au moins jusqu'à 25 cm.

III.5.6 Les résultats des essais effectués au laboratoire :

Les résultats des essais effectués au laboratoire du LCTP concernant la caractérisation du bitume (40/50) utilisés dans notre étude sont représentés sur les tableaux suivants :

➤ **L'essai de pénétrabilité (NFT 66 004) :**

Tableau 3.4 : L'essai de pénétrabilité

Essai	Résultats obtenus			Spécifications
Pénétrabilité à 25°C en 1 /10 mm	48	47	49	40 à 50

➤ **Essai de Point de ramollissement (NFT 66 008) :**

Tableau 3. 5 : Essai de Point de ramollissement

Essai	Résultats obtenus			Spécifications
Bille Anneau en °C	50	51	49	47 à 60

➤ **Essai point d'éclair « vase ouvert » (NFT 66 118) :**

Tableau 3. 6 : Essai Point d'éclair « vase ouvert »

Essai	Résultats obtenus			Spécifications
Température point d'éclair	235	240	250	>230
Température point de flamme	265	270	267	260

Les résultats des essais de caractérisation des bitumes confirment bien la classe de bitume utilisée : bitume 35/50 (ou 40/50, selon la spécification usitée en Algérie).

III.4. FORMULATION DE L'ENROBE :

III.4.1 Méthodologie de formulation d'un enrobé :

Le Principe de la formulation d'un enrobé bitumineux est le suivant :

- Choix et appréciation de la qualité, de la nature des constituants qui sont
 - Les granulats
 - Le liant.

Ce choix est fait d'après les paramètres suivants

- Conditions climatiques.
 - Nature de la couche de chaussée.
- Choix du type d'enrobé bitumineux qui est en relation avec la nature de la couche de chaussée.
 - Dosage des granulats conformément aux spécifications granulométriques.
 - Choix de la teneur en liant.

REMARQUE :

Les spécifications granulométriques sont généralement des fuseaux granulométriques qui servent à fixer les proportions de granulats.

Ces fuseaux granulométriques conduisent à une compacité maximale tout en conservant une proportion suffisante de vide dans l'enrobé pour permettre l'incorporation du liant.

III.4.2. Méthode du L.C.P.C :[12]

La méthode utilisée consiste à partir d'un granulat entrant dans le fuseau recommandé, à choisir une teneur en liant fonction de la surface spécifique calculée du granulat ,et à soumettre le mélange compacté à l'essai de compression simple, puis vérifier si le pourcentage des vides est convenable.

Il est important de réaliser des mélanges avec plusieurs teneurs en liant voisins de la teneur théorique choisie à partir de la surface spécifique.

III.4.3 Méthode de calcul de la surface spécifique et teneur en liant :

III.4.3.1 Calcul de la surface spécifique du granulat:

La surface spécifique du squelette minéral est calculée conventionnellement par la formule: $\Sigma = 0,25G + 2,30 S1 + 12 S2 + 135f$

G : Proportion en poids d'éléments supérieurs à 6 mm

S1 : Proportion en poids d'éléments compris entre 0,315 et 6 mm

S2: Proportion en poids d'éléments compris entre 0,08 et 0.315 mm

Σ : Est donné directement en m² / kg

f : Proportion en poids d'éléments inférieurs à 0,08 mm (fillers)

Pour déterminer la teneur en liant d'un granulat, on se réfère à la formule suivante:

Teneur en liant=P

K : Module de richesse.

Les valeurs de K généralement adoptées sont les suivantes:

Tableau 3.7 : Valeurs de module de richesse

Module de richesse	Béton bitumineux (BB)	Grave bitume (GB)
K1	3,45	2,15
K2	3,60	2,30
K3	3,75	2,45
K4	3,90	2,60

Ces chiffres supposent que le granulat a une densité de 2,65 et le liant a une densité voisine de 1.

III.4.3.2 Teneur en liant hydrocarboné :

Les teneurs en liant à partir desquelles s'effectueront les différents essais en laboratoire sont déterminés à partir de la formule suivante :

$$p = k \times \alpha \times \sqrt[5]{\Sigma}$$

Dans laquelle :

- P : représente en (%) la teneur en liant.
- K : est le module de richesse
- α : le coefficient correcteur $\alpha=2,65/\text{masse volumique du granulat}$.

Son choix a une grande importance, un module trop faible donne un enrobé friable, cassant et perméable. Un module trop fort donne un excès de liant entraînant une chute importante du frottement interne, donc de la stabilité mécanique, ainsi qu'un ressuage.

Σ : est la surface spécifique du granulat, fonction de sa granularité: il s'agit de la surface totale de tous les grains des matériaux y compris le filler d'apport contenu dans l'unité du poids, qu'il s'agit d'enrober.

III.5. Les essais sur les enrobés bitumineux :

Les caractéristiques des enrobés bitumineux font appel à de nombreux essais pratiqués par des laboratoires dans le monde. Les essais les plus utilisés sont :

- L'essai TWIT (NF 66 008)
- L'essai Duriez.
- L'essai Marshall

Ces essais dénommés parfois « Essais de Routes » fournissent des indications sur les qualités de résistance mécanique d'un enrobé et sa stabilité pour un compactage donné.

III.5.1 mode opératoire de l'essai d'adhésivité TWIT (NF 66 008) : [14]

Cet essai consiste à :

- Peser 100 g de granulats tamisés entre 6.3 mm et 4 mm, passant au tamis de 6.3 et refus sur tamis de 4 mm, puis les mettre dans un cristalliseur.
- Chauffer et peser 5 g de Cut-back 150/ 250 (bitume fluidifié).
- Mettre le cristalliseur sur une plaque chauffante et ajouter le Cut-back 150/250 tout en remuant jusqu'à enrobage complet des granulats.

Le mélange bitume agrégats est conservé à une température ambiante pendant 1 heure ; On note le taux de désenrobage à sec. Puis on immerge l'ensemble agrégats + bitume avec de l'eau distillée. On note le taux de désenrobage: Après 1 heure et après 24 heures.

On apprécie par une note selon la cotation de la norme NF P 66.008 le degré de couverture résiduelle du granulat par le liant.

III.5.2 L'essai DURIEZ de compression simple (dilata) :

III.5.2.1 But de l'essai:

Le but de cet essai est :

- La détermination de la résistance à la compression d'une éprouvette d'enrobé de poids et de section déterminés pour un compactage bien défini.
- Définition de la tenue à l'eau de l'enrobé par le rapport des résistances à la compression r/R et la stabilité à sept jours.

III.5.2.2 Principe de l'essai :

Les éprouvettes sont réalisées dans des moules cylindriques de 80mm (120mm) de diamètre et 150 mm de hauteur.

Le liant et les granulats sont préalablement malaxés et portés à une température de 140°C, selon la consistance du bitume.

Les éprouvettes sont compactées de préférence à la presse avec une embase mobile pour avoir une pression appliquée sur les deux faces.

La pression de moulage est de 120 kg/cm² (360 kg/cm²) elle est appliquée en une minute et maintenue durant cinq minutes.

On réalise en règle générale 7 éprouvettes pour une même teneur en liant et une même température de conservation (18°C)



Figure 3.2: Armoire climatique

- Trois pour la mesure de résistance à l'air à 8 jours.
- Trois pour la mesure de résistance à l'eau après 8 jours.
- Une pour la mesure de la densité apparente.

Après la durée de conservation prévue, les éprouvettes sont écrasées à une vitesse de 1mm/sec sous une presse à avancement contrôlé.

On note l'effort maximum converti en résistance exprimée en kg/cm² ou en bars.

Soit R , la résistance à la compression après conservation à sec (à l'air).

Soit r la résistance à la compression après conservation et immersion dans l'eau.

Le rapport r/R , exprime la tenue à l'eau de l'enrobé.

On enregistre la courbe d'effort en fonction du temps. L'essai est arrêté lorsque la courbe atteint son maximum. Ce maximum correspond à la résistance à la compression.



Figure 3.3: moule de l'essai Duriez simple



Figure 3.4 : Moule de l'essai Duriez dilaté

III.5.3 L'ESSAI MARSHALL :

III.5.3.1. But de l'essai:

L'essai permet d'évaluer la performance des bétons bitumineux à des niveaux de compactage différents.

Il permet aussi, dans une certaine mesure de prévoir si sous un trafic, donné un béton bitumineux sera stable ou au contraire aura tendance à fluer.

III.5.3.2. Principe de l'essai :

L'essai Marshall est un essai mécanique destructif effectué en laboratoire selon un mode opératoire précis.

Le matériau bitumineux est compacté à chaud dans un moule normalisé, par le choc répété d'une masselotte.

L'éprouvette ainsi obtenue est refroidie, puis portée à 60°C dans un bain thermostaté pour être enfin écrasée en compression diamétrale entre deux mâchoires spéciales, à vitesse bien définie. On note la résistance maximum à l'écrasement juste avant la rupture ainsi que la déformation correspondante.



Figure 3.5: moule de l'essai MARSHALL



Figure 3.6 : Presse universelle

III.6. CHOIX DU TYPE D'ENROBE BITUMINEUX :

Dans notre étude, on a choisi la grave-bitume (GB) pour valoriser notre déchet ; cette couche protégée par la couche de béton bitumineux (BB) des eaux pluviales et des pneumatiques pour que les éléments toxiques des déchets ne s'infiltrent pas dans les nappes phréatiques.

Un BB exige des qualités d'enrobés très poussées, par contre le GB est moins exigeant et sa couche est plus épaisse, ce qui permet d'incorporer des quantités de déchets importantes.

L'essai MARSHALL peut être utilisé pour les mélanges contenant du bitume et des agrégats ne dépassant pas 25 mm de grosseur maximale. Les fractions utilisées dans notre étude ont des éléments qui dépassent largement les 25 mm de diamètre, donc on ne peut pas utiliser l'essai MARSHALL.

On utilise le DURIEZ simple pour les BB et le DURIEZ dilaté pour GB, dans notre cas l'essai DURIEZ dilaté sera utilisé vu le choix d'une GB.

III.7. ETUDE DE FORMULATION SANS DECHET:

Dans cette partie, on fait varier la teneur en liants pour plusieurs gâchées (formules) pour obtenir l'optimisation des meilleures performances mécaniques et une solution économique.

III.7. 2. Résultats d'étude de formulation sans déchet:

La synthèse des résultats de l'essai DURIEZ dilaté pour différentes gâchées est représentée dans le tableau suivant:

Tableau 3.8 : Résultats de formulation sans déchet

GACHET	A	B	C	D	
Teneur en liant en %	3,60	3,85	4,10	4,35	
Surface spécifique en m ² /Kg	11,50				
Module de richesse (k)	2,15	2,30	2,45	2,60	
Résistance à la compression simple à 18 °C en MPa de 1mm/Seconde	r'	5,08	5,53	6,08	6,41
	R	8,18	9,07	7,54	7,43
Rapport immersion compression(r'/R)	0,62	0,61	0,81	0,86	
Densité vraie de l'éprouvette	2,49	2,48	2,47	2,47	
Densité apparente	2,30	2,31	2,31	2,32	
Compacité en %	92,31	93,03	93,35	94,07	
Pourcentage d'affaissement de l'éprouvette	0,77	1,34	2,74	3,06	
Pourcentage de vide occupé par le bitume	36,17	54,37	57,02	61,28	
Pourcentage d'imbibition	2,00	1,80	1,04	1,30	
Pourcentage de gonflement	0,31	0,47	0,59	0,45	

Nb : pour les résultats détaillés concernant chaque gâchée de formulation, il y a lieu de se référer à l'annexe B.

Pour interpréter les résultats de ce tableau on trace plusieurs graphes pour mieux comprendre les phénomènes et la variation des résultats.

III.7.2.1 Résistance mécanique obtenue en fonction de la teneur en liant :

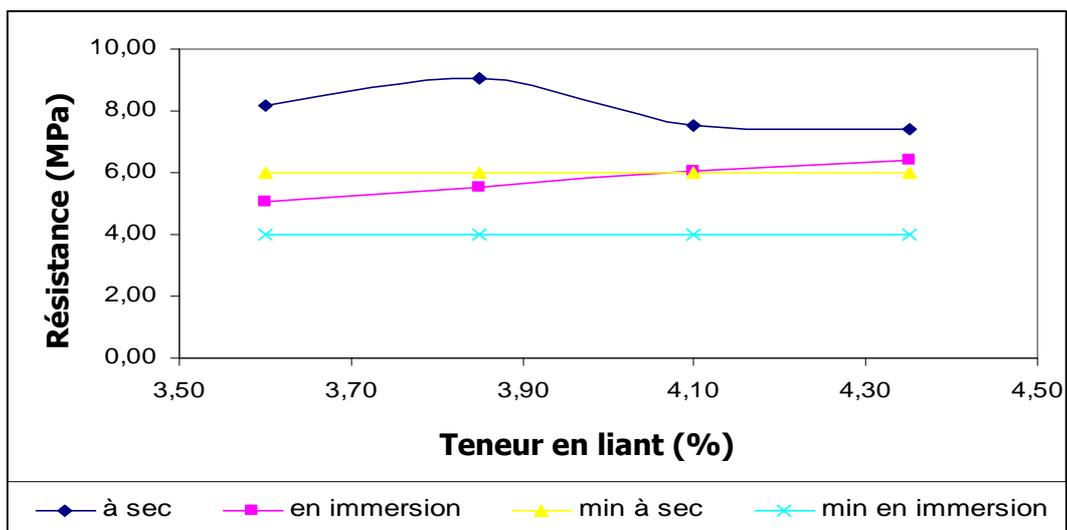


Figure 3.8: Résistance mécanique obtenue en fonction de la teneur en liant

Dans ce graphe on constate que la résistance optimale à sec à 18°C pendant 7 jours est atteinte à partir de 3,85% de bitume, ce qui correspond à la formule [B] avec une résistance mécanique à la compression de 9,07 MPa.

On remarque qu'à partir de la formule [C] qui est dosée un peu plus, soit 4,10% une chute de résistance, ce qui explique un excès de bitume.

Toutefois ces résistances restent conformes aux spécifications de la route concernant les couches de base qui est de 6 MPa.

Pour ce qui est de la résistance mécanique en immersion, on constate dès qu'on augmente la teneur en liants les résultats sont meilleurs, du fait que le bitume occupe une grande partie des vides dans l'enrobé compacté, ceci engendre une résistance mécanique relativement élevée vis à vis des normes qui exigent une résistance de l'ordre de 4 MPa.

III.7.2.2. La densité en fonction de la teneur en liant :

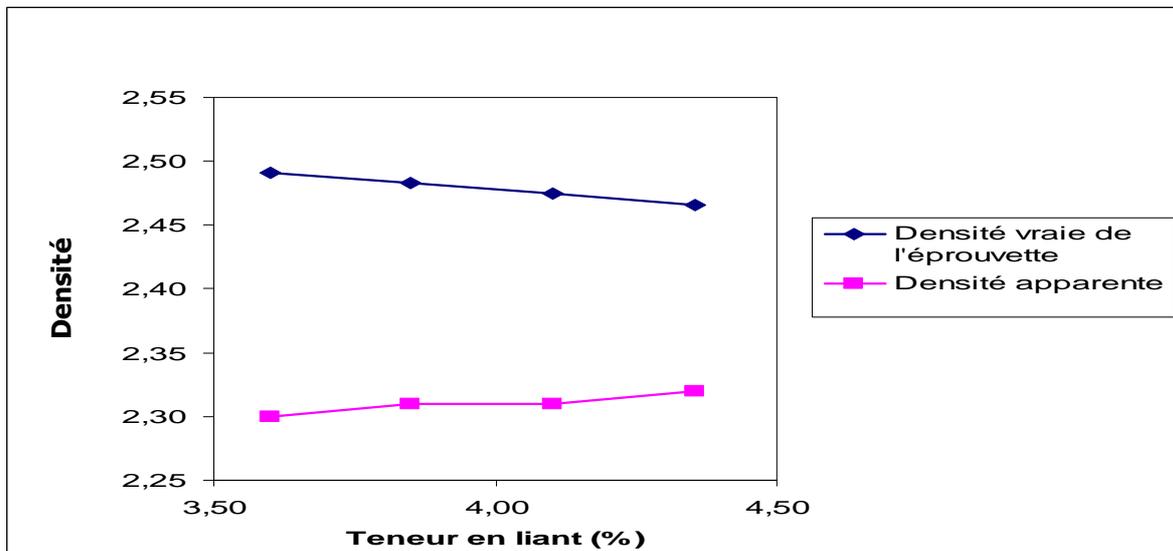


Figure 3.9 : La densité en fonction de la teneur en liant

La densité apparente augmente progressivement en augmentant la teneur en liants contrairement à la densité vraie qui diminue.

Cela s'explique par le fait que la densité du bitume (égale à 1,2) est inférieure à celle des agrégats qui est de l'ordre de 2,6.

A chaque fois qu'on augmente le dosage, la densité vraie diminue.

III.7.2.3. La compacité et le pourcentage des vides en fonction de la teneur en liant :

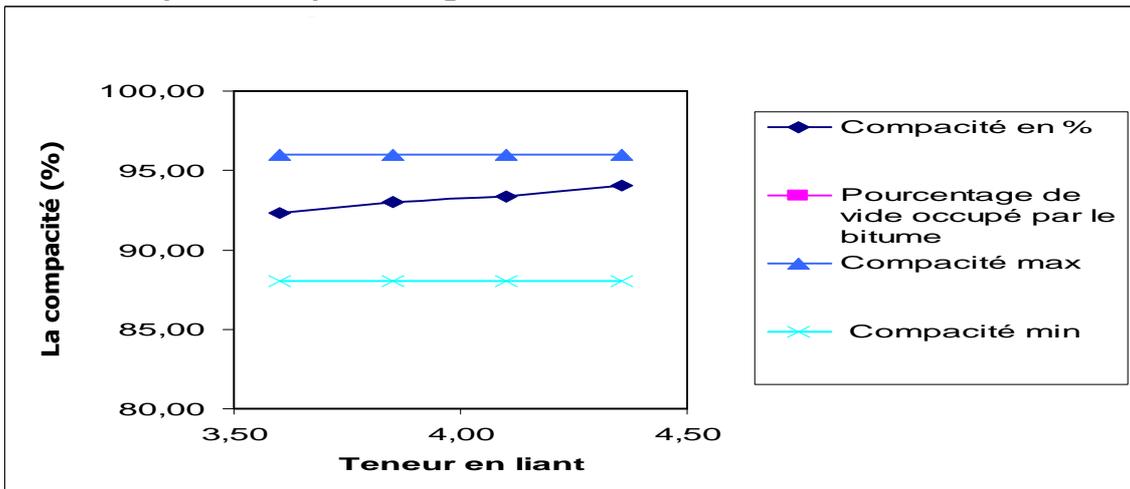


Figure 3.10 : Compacité et le pourcentage des vides en fonction de la teneur en liant.

Tant que la compacité augmente, le pourcentage des vides diminue, comme décrit précédemment. La compacité varie entre 88 et 96% selon les spécifications de la route concernant la couche de base.

III.7.2.4. Pourcentage de gonflement et d'imbibition en fonction de la teneur en liant :

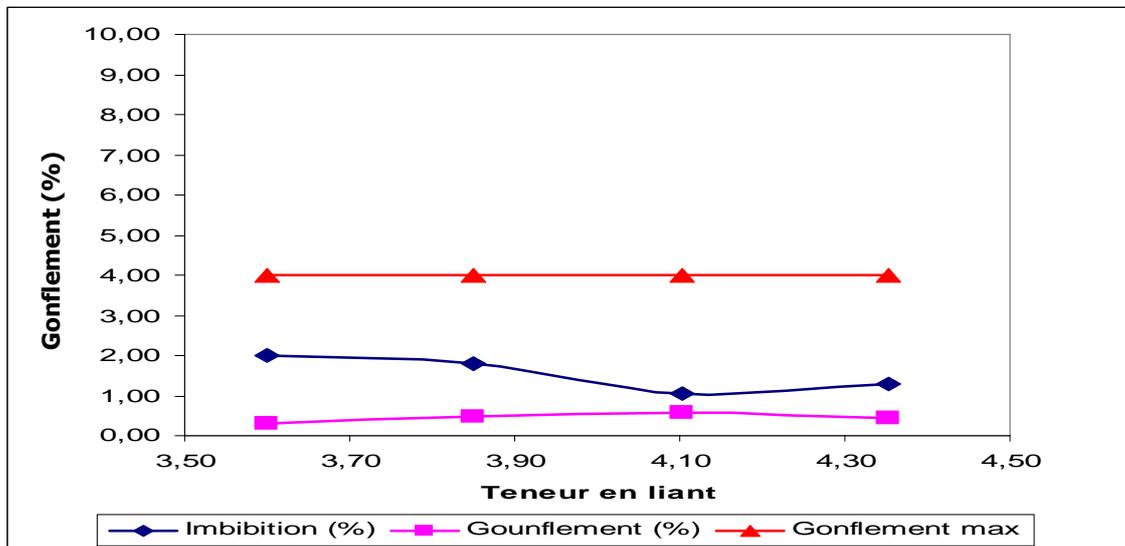


Figure 3.11: Pourcentage de gonflement et d'imbibition en fonction de la teneur en liant.

Le pourcentage de gonflement est calculé à partir d'une éprouvette témoin, on constate le même phénomène à travers l'ensemble des gâchées. Ce gonflement est négligeable comparé aux spécifications qui sont de 4%.

III.7.2.5. Pourcentage d'affaissement en fonction de la teneur en liant :

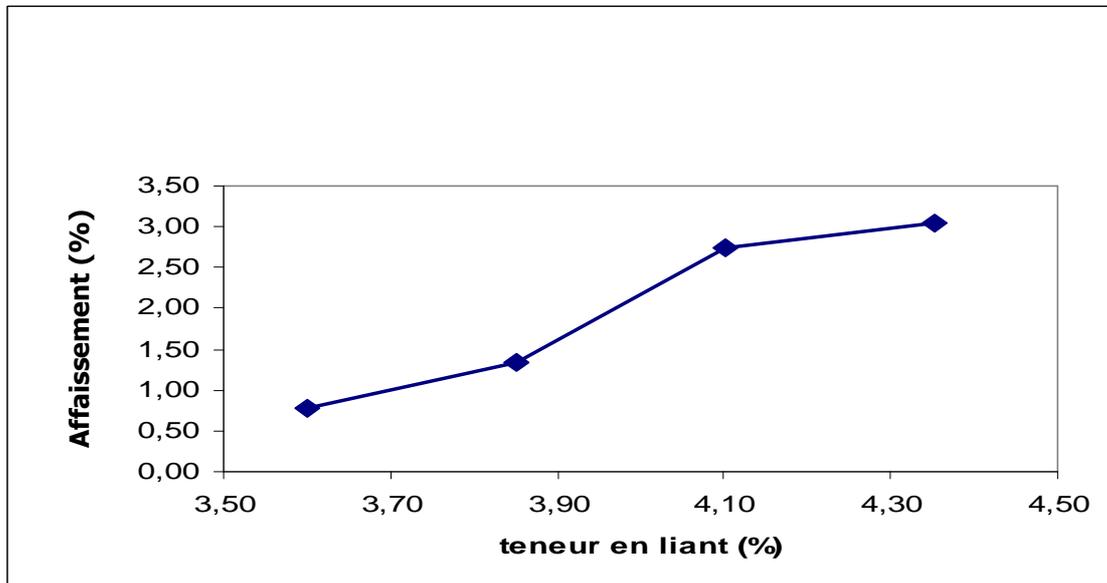


Figure 3.12 : Pourcentage d'affaissement en fonction de la teneur en liant

D'après le tableau 3.8 on remarque que si la résistance mécanique augmente, l'affaissement diminue.

Par contre l'affaissement augmente dans les deux dernières gâchées [C et D] où on a une chute de résistance

Conclusion :

Après plusieurs tests, la formule (B) retenue est caractérisée par une teneur en liant économique avec des meilleures performances mécaniques. C'est cette formule qui va faire l'objet de notre étude.

III.8. ETUDE DE FORMULATION AVEC DECHET:

Dans cette deuxième partie, et après avoir déterminé la formule adéquate utilisée pour notre étude, nous allons procéder au traitement du déchet avec le liant hydrocarboné en utilisant la formulation optimale sans déchet décrite précédemment.

III.8.1. Composition granulométrique de Mélange :

Complément à 100% de Refus Cumulés de mélange déchet avec agrégats pour différents pourcentages de déchets.

NB : Les pourcentages de déchet sont relatifs à la fraction 0 / 3

Tableau 3.9 : Composition granulométrique de Mélange

% de déchet Tamis (mm)	0% de déchet	10% de déchet	30% de déchet	35% de déchet	50% de déchet
20	91,42	91,42	91,42	91,42	91,42
16	82,51	82,51	82,51	82,51	82,51
12,5	73,10	73,10	73,10	73,10	73,10
10	65,92	65,92	65,92	65,92	65,92
8	61,08	61,08	61,08	61,08	61,08
6,3	54,85	54,93	55,10	55,14	55,27
5	51,08	51,23	51,54	51,61	51,85
4	44,90	45,18	45,74	45,88	46,32
2	32,91	33,79	35,59	36,05	37,44
1	23,09	24,49	27,36	28,09	30,31
0,5	15,91	16,94	19,04	19,58	21,21
0,4	14,58	15,33	16,85	17,24	18,43
0,315	13,06	13,10	13,19	13,21	13,28
0,2	10,85	10,83	10,79	10,78	10,75
0,1	8,34	8,22	7,98	7,92	7,73
0,08	7,49	7,20	6,60	6,45	5,98

III.8.2. Résultats d'étude de formulation avec déchets:

En incorporant différents pourcentages de déchets dans la formulation précédente nous reproduisons l'essai Duriez sur les éprouvettes élaborées, afin d'étudier leur résistance en fonction du pourcentage de déchet. L'objectif de cette partie d'étude étant de rechercher le pourcentage optimal de déchet à incorporer et qui respecte les spécifications exigées par les normes routières. Les résultats de l'essai DURIEZ avec différents pourcentages de déchets sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.10: Résultats de l'essai DURIEZ avec différents pourcentages de déchets.

Déchet (%)	0	10	30	35	50	
Surface spécifique en m ² /Kg	11,86	11,50	10,78	10,59	10,03	
Module de richesse	2,30	2,27	2,22	2,15	2,15	
Résistance à la compression (MPa)	r	5,53	5,42	4,09	3,31	3,09
	R	9,07	7,52	5,86	5,19	4,53
Rapport immersion compression r/R	0,61	0,72	0,70	0,64	0,68	
Densité vraie de l'éprouvette	2,48	2,44	2,35	2,33	2,25	
Densité apparente	2,31	2,25	2,22	2,21	2,21	
Compacité en %	93,03	92,16	94,44	95,01	98,08	
Pourcentage d'affaissement de l'éprouvette soumise à C S	1,34	1,29	0,85	0,77	0,35	
Pourcentage de vide occupé par le bitume	54,37	50,75	15,95	9,98	1,52	
Pourcentage d'imbibition	1,80	2,03	1,34	2,00	1,23	
Pourcentage de gonflement	0,67	0,54	0,55	0,56	0,62	

III.8.2.1. Résistance à la compression en fonction du pourcentage de déchet :

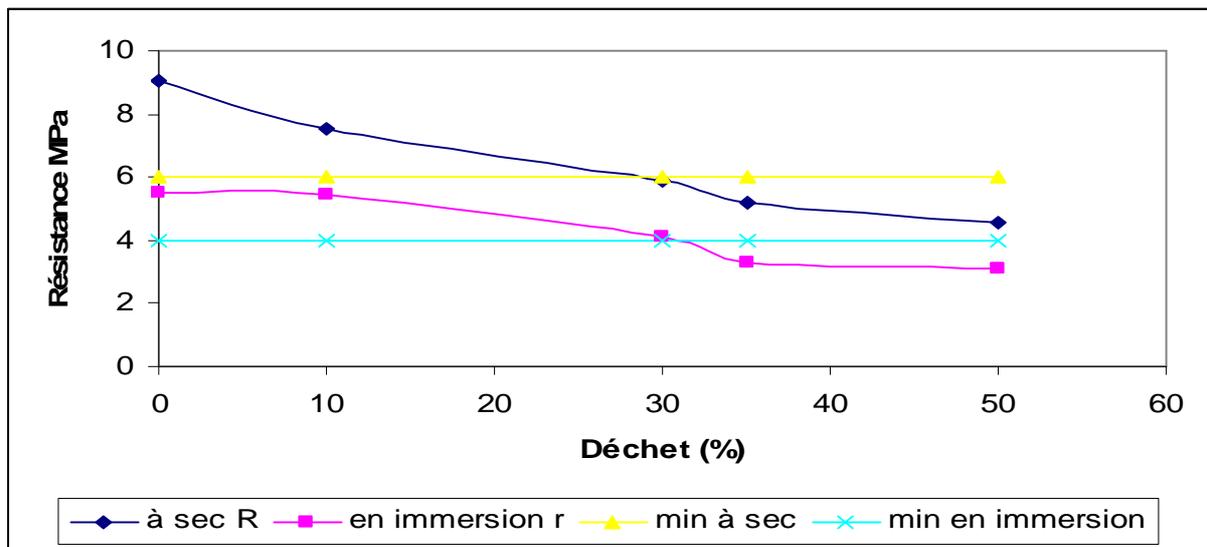


Figure 3.13 : Résistance en fonction du pourcentage de déchets

On constate selon cette figure que la résistance à sec et en immersion diminue au fur et à mesure que le pourcentage de déchet augmente, dès que le pourcentage de déchet dépasse les 30% la résistance mécanique devient inférieure à la résistance minimale (4 MPa) . Cette diminution est due au module de richesse, donc le mélange est pauvre en bitume à chaque fois qu'on augmente le pourcentage de déchet, car la granulométrie de ce dernier nous donne un sable fin, qui influe sur la surface spécifique du mélange et diminue en augmentant le pourcentage de déchet.

Avant 30 % de déchet les résistances obtenues sont acceptables mais dès qu'on

atteint les 30% de déchet il faut calculer le rapport r'/R pour connaître le comportement de l'enrobé vis-à-vis de l'eau. En dépassant 30 % de déchet les résistances ne sont pas suffisantes.

III.8.2.2 Le rapport r'/R en fonction du pourcentage du déchet :

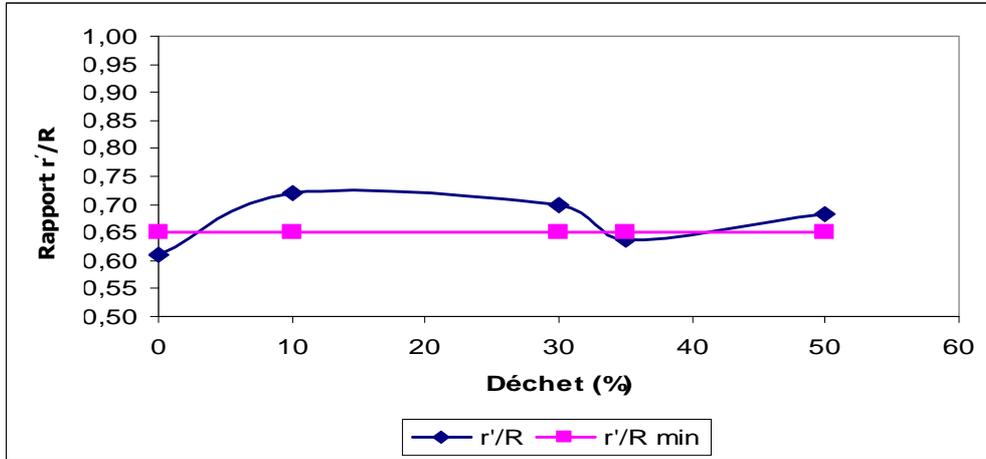


Figure 3.14 : Le rapport r'/R en fonction du pourcentage du déchet

Le rapport r'/R n'a pas d'importance lorsque les résistances sont supérieures à la valeur minimale, mais lorsque les valeurs de résistance rapprochent des valeurs min exigée (65 %) le r'/R aura un poids très important sur le jugement. Comme il est indiqué au paragraphe (III.5.2.1).

Le rapport r'/R pour 30% de déchet est égal à 0.70, ce qui est supérieur à 0.65.

III.8.2.3 La densité vraie et apparente en fonction du pourcentage de déchet :

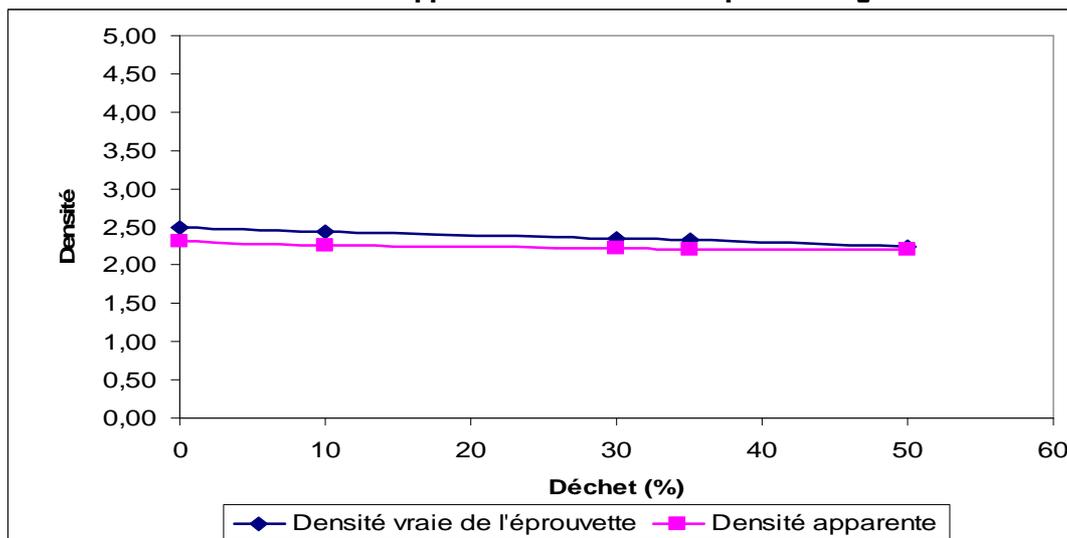


Figure 3.15 : Densité vraie et apparente en fonction du pourcentage de déchet
La densité vraie de l'éprouvette en fonction du pourcentage de déchet est une droite décroissante, due au poids spécifique de déchet (1.46) qui est inférieur au poids spécifique des granulats qui est autour de (2.6).

La densité apparente diminue moins rapidement que la densité vraie.

III.8.2.4. Pourcentage d'affaissement et de gonflement en fonction du pourcentage du déchet :

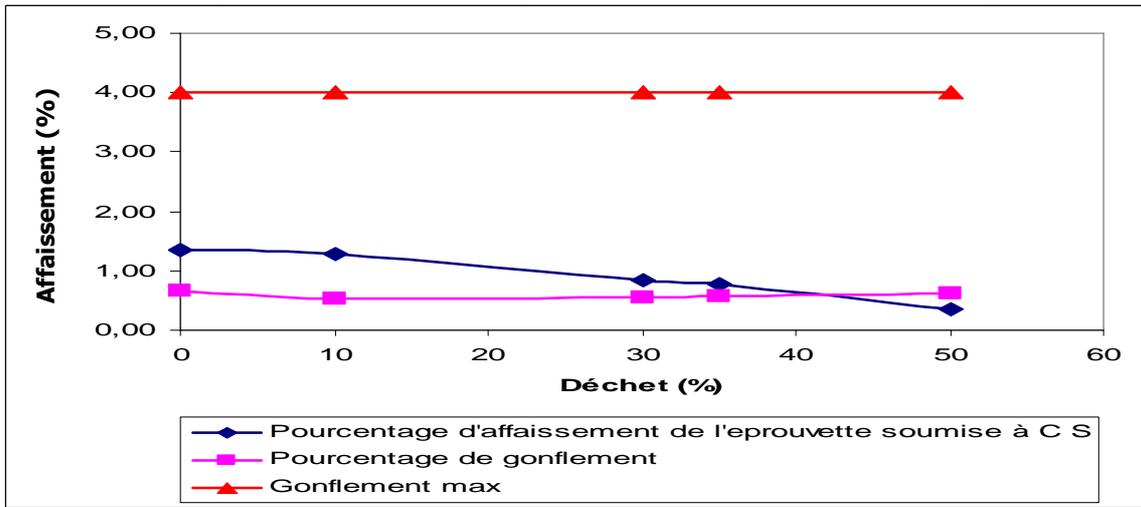


Figure 3.16 : Pourcentage d'affaissement et de gonflement en fonction du pourcentage du déchet

En remarque d'après le graphe que le pourcentage d'affaissement de l'éprouvette soumise à la compression simple est inversement proportionnel au pourcentage de déchet, et on remarque aussi qu'il y a une légère augmentation du pourcentage de gonflement due à l'augmentation du pourcentage de déchet.

Ce gonflement est négligeable comparé aux spécifications qui sont de 4%.

III.8.2.5. Pourcentage de vide occupé par le bitume en fonction du pourcentage du déchet :

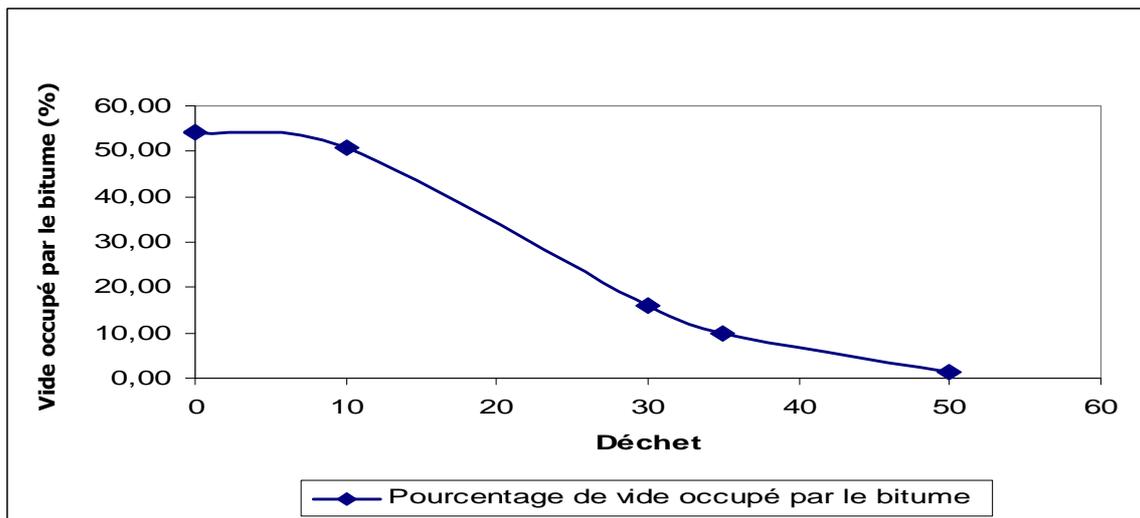


Figure 3.17 : Pourcentage de vide occupé par le bitume en fonction du pourcentage du déchet

Le vide occupé par le bitume est en diminution en fonction de l'augmentation du pourcentage du déchet car la granulométrie de déchet nous donne un sable fin donc les éléments fins occupent le vide au lieu de bitume.

III.8.2.6 La compacité en fonction du pourcentage du déchet :

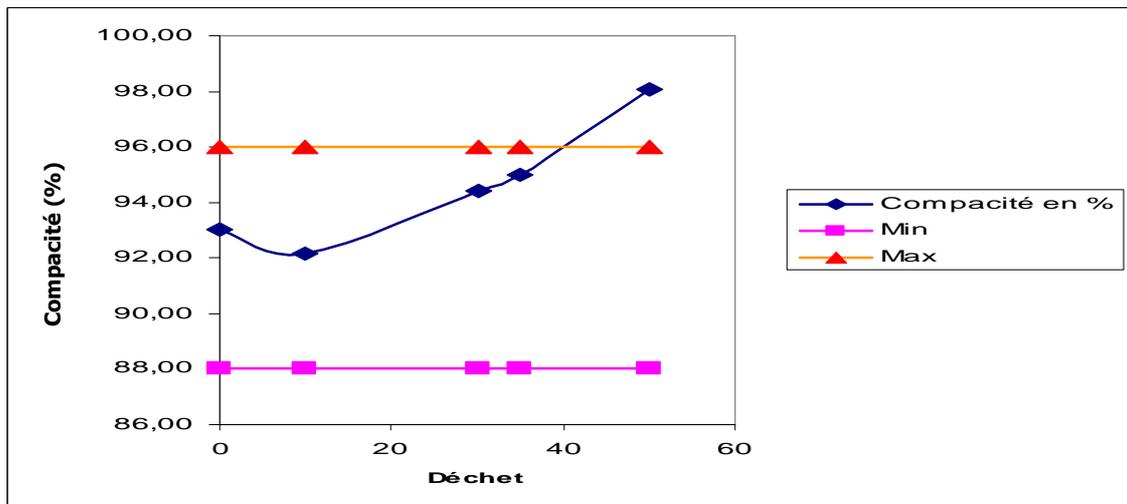


Figure 3.18 : la compacité en fonction du pourcentage du déchet

Les éprouvettes se saturent de plus en plus avec l'augmentation de déchet qui occupe les vides comme il est expliqué au paragraphe III.5.2.5. Il dépasse la valeur max exigée (96%) lorsque le déchet dépasse les 40%.

III.9. Résultats de l'essai de lixiviation :

Dans notre étude l'essai de lixiviation est effectué sur une éprouvette ayant un pourcentage de déchet de 30% avec une teneur en bitume de 3.85 % , l'essai de lixiviation est effectué au sein du laboratoire LNRH (Laboratoire National des Ressources Hydriques) :

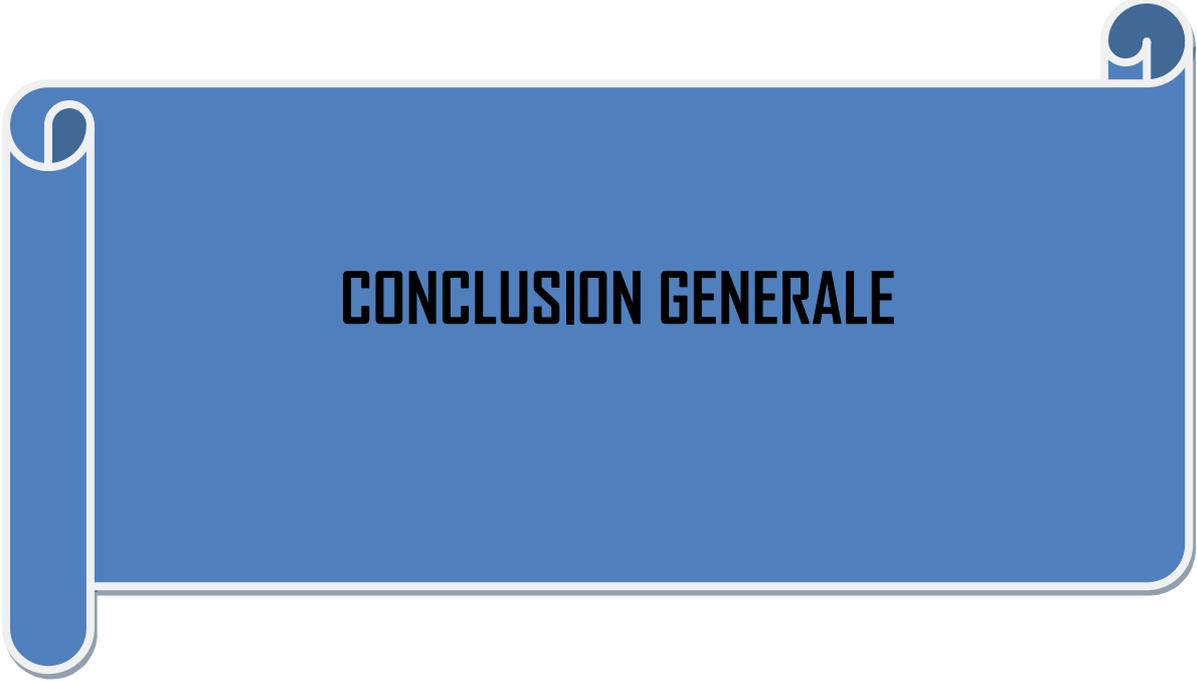
Tableau 3.11 : Composition chimique du lixiviant

Elément (Concentration Mg/L)						
Jours	Fe	Mn	Cu	Zn	Cd	Cr
2 heures	0.032	0.015	0.028	0.051	0.004	0.023
2 Jours	0.031	0.016	0.011	0.039	0.005	0.003
6 Jours	0.029	0.006	0.017	0.043	0.001	0

L'analyse du lixiviat nous montre que le pourcentage de fer est très faible, lui qui est l'élément prédominant dans la composition du déchet brut .Les autres métaux lourds sont à l'état de trace. Nous pouvons donc affirmer que le déchet est stabilisé par cette méthode en utilisant un liant hydrocarboné qui est le bitume 40/50 , donc il n'y pas un risque de relargage des éléments toxiques et dangereux qui sont retenus dans la matrice solide.

III.10. conclusion :

Après traitement de notre déchet par le liant hydrocarboné, il apparaît clairement que la formulation à 30 % de déchet a donné des résultats satisfaisants pouvant mener à une valorisation du déchet en tant qu'élément de la chaussée.



CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

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. La plupart des déchets industriels éliminés en centre de stockage doivent subir au préalable un traitement de stabilisation / solidification , requérant l'emploi de matériaux liants. L'efficacité du traitement est déterminée par l'adéquation entre les propriétés du liant et les caractéristiques du déchet considéré. Les données disponibles de la compatibilité entre une catégorie de liants et une catégorie de déchets considérés séparément chacune des caractéristiques de ces derniers. Elles sont inexploitable compte tenu de la complexité des déchets industriels.

Notre travail s'inscrit dans la perspective d'étendre l'application du procédé de stabilisation et solidification au traitement d'un déchet industriel issu de l'activité pétrolière dans lequel deux types de liants ont été utilisés (liant hydraulique et liant bitumineux).

Dans un premier temps, des tests de caractérisation physico-chimique ont été appliqués au déchet. Il a ainsi été mis en évidence grâce à l'analyse granulométrique du déchet que ce dernier peut être considéré comme un sable, cette caractéristique a des implications directes dans la formulation de leur traitement.

L'analyse chimique a montré que le déchet utilisé contient des éléments polluants d'où la nécessité de lui faire subir un traitement .Le premier traitement par solidification /stabilisation a été réalisé avec un liant hydraulique (CPJ 45) ; le déchet est alors incorporé en substitution au sable dans la formulation de béton élaboré , l'objectif étant d'optimiser cette incorporation (ou ajout) .

Les essais mécaniques réalisés sur des éprouvettes de béton à deux âges différents (28 et 90 jours) ont montré que les résistances à la compression et à la traction mesurées diminuaient par rapport au témoin avec l'augmentation du pourcentage d'ajout du déchet.

L'ensemble du travail permet de distinguer deux paramètres prépondérants dans le traitement par un liant hydraulique de notre déchet . Ils correspondent à deux étapes dans la détermination de la formulation du procédé à adopter . La première consiste à sélectionner le liant le plus efficace pour la stabilisation et qui est le (CPJ 45). Ensuite la comparaison de la solubilisation du déchet brut dans des lixiviats .Le traitement de notre déchet par le liant hydraulique à permis d'obtenir un matériau solide et assez résistant, Pour cela, nous avons envisagé une valorisation du produit obtenu, en tant qu'élément de la construction. Il pourrait ainsi être employé dans la fabrication d'éléments secondaires tels que les bordures de trottoir.

Le taux de résistance à la traction par flexion et à la compression est de l'ordre de 80% par rapport au témoin, ces résultats sont jugés satisfaisants.

L'utilisation d'adjuvant a permis d'améliorer le taux de résistance de l'ordre de 29% par rapport au matériau qui contient 20 % de déchet.

Le taux de résistance à la traction par flexion pour la bordure de trottoir par exemple est de l'ordre de 67% par rapport au témoin. Ces résultats sont jugés satisfaisants.

En ce qui concerne l'utilisation de liants bitumineux, deux paramètres essentiels de traitement ont été distingués permettant de proposer une méthodologie de formulation du procédé de traitement analogue à la méthodologie exposée dans le cas de l'utilisation de liants hydrauliques. La première étape consiste à sélectionner un liant visqueux pour solidifier le déchet, Ensuite comparer de la solubilisation du déchet brut dans des lixiviats .Du point de vue de la solidification les résistances obtenues sont satisfaisantes jusqu'à une incorporation de 30% de déchet dans les formulations d'enrobé (couche de base GB). Ainsi les résultats des essais de lixiviation sur les formulations d'enrobé ont confirmé la stabilité du matériau traité, puisque la majorité des éléments toxiques contenus dans le déchet ont été retenus dans la matrice.

Les deux critères du procédé stabilisation/solidification, en utilisant un liant hydrocarboné étant vérifiés. Les résultats particuliers de résistance obtenus permettent d'envisager l'emploi du matériau traité en tant que matériau pour chaussée .

En terme d'économie, et dans la mesure où on n'a pas à payer le savoir-faire des entreprises étrangères en devises, l'étude qui consiste à utiliser des matériaux sans valeurs économiques (déchets) et des méthodes de traitement qui font appel soit à l'utilisation des liants hydrauliques ou hydrocarbonés disponibles, et en exploitant des connaissances Algériennes, permet d'apporter des solutions nécessaires aux problèmes de l'environnement. L'étude dans ce sens est économique. Toutefois, et vu le manque des données nécessaires pour procéder à une étude technico-économique nous envisageons sa réalisation en perspectives.

Pour les études ultérieures, nous recommandons :

- D'étudier le comportement du béton et des enrobés élaborés à long terme.
- De procéder à une étude technico-économique du projet dans le but de valider ce traitement .



ANNEXE A

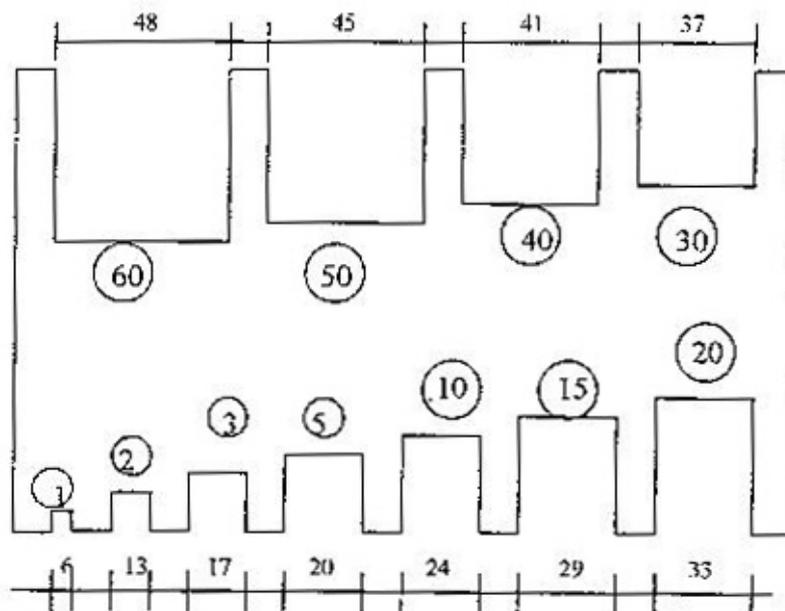
I. COEFFICIENT VOLUMETRIQUE.

I.1. Détermination pratique du coefficient volumétrique moyen d'un granulat :

$$\text{Soit } V_{\text{moy}} = \frac{\sum v}{\sum \pi \times \frac{N^3}{6}}$$

Pour avoir $\sum v$, il faut de mettre les grains dans une éprouvette graduée contenant un volume V_1 d'eau ; si le volume croît jusqu'à V_2 , on a $\sum v = V_2 - V_1$.

Pour avoir $\sum \pi \times \frac{N^3}{6}$, on ne calcul pas le volume de la sphère pour chaque grain : On ne mesure même pas N avec précision . on se sert plus simplement d'un calibre



Pour utiliser ce calibre, on recherche la plus grande encoche qui retienne le grain : le nombre porté en face de cette encoche est le volume (en centimètres cubes) de la sphère correspondant à ce grain.

D'ou le processus suivant

1. Préparer un échantillon du granulat étudié :
Sécher.

Tamiser avec un tamis de 5mm, et ne garder que le refus.
En prendre environ 250 g (au minimum).

2. Mettre, dans une éprouvette graduée de 1000 cm³, une quantité d'eau V₁ d'environ 500 cm³. Noter V₁.

3. Présenter successivement chaque grain dans les encoches du calibre, et noter les volumes des sphères trouvés comme il est dit ci-dessus. Noter le nombre des sphères correspondant à chacun des volumes portés sur le calibre.

4. Au fur et à mesure du passage au calibre, placer les grains dans l'éprouvette contenant l'eau : le niveau montera, et, quand la totalité de l'échantillon aura été utilisée, on lira le nouveau volume V₂.

5. Il ne restera qu'à faire les calculs :

1° de $\sum v = V_2 - V_1$;

2° de $\sum \pi \times \frac{N^3}{6}$, Pour cela :

- Multiplier les nombres de sphères trouvés en 3 ci-dessus par les volumes correspondants.

- Faire le total des produits obtenus.

3° du coefficient volumétrique moyen.

I.2. Valeurs numériques usuelles :

Pour une sphère, $V = 1,00$.

Pour un cube, d'arête a :

$$N = a\sqrt{3}, \quad v = a^3, \quad V = \pi \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot a^3$$

D'ou :

$$V = \frac{2}{\pi\sqrt{3}} = 0,37$$

Le coefficient volumétrique moyen d'un granulat est :

d'autant plus élevé que ce granulat comporte une grande proportion de grains de forme massive.

d'autant plus faible que ce granulat comporte une grande proportion de plaquettes et d'aiguilles.

II. MASSES VOLUMIQUES :

II.1. Masses volumiques absolues :

II.1.2. Principe et méthode de mesure :

Le principe de la mesure consiste en mesurant le volume d'un liquide que déplace l'introduction de ce corps.

Pour des raisons de commodité, de sécurité et d'économie, le liquide employé est, aussi souvent que possible, l'eau. Certains corps portant, tels que les ciments, conduisent à utiliser un autre liquide.

D'ou deux cas :

Granulats et corps ne régissant pas avec l'eau ;

Liants et corps régissant avec l'eau.

II.1.3. Granulats et corps ne régissant pas avec l'eau :

La méthode utilisée c'est l'éprouvette pycnomètre .

II.1.3.1. Méthode du pycnomètre :

II.1.3.1.1. Matériel nécessaire :

Récipient en verre fermé par un bouchon à vis comportant un trou circulaire de quelques millimètres de diamètre.

Balance de précision : force 4 à 5 kg, sensibilité 1 à 2 cg.

Chiffons propres.

II.1.3.1.2. Mode opératoire :

Pour les remplir, il suffit de : mettre de l'eau jusqu'à 2cm environ du bord supérieur ; visser (à fond)le bouchon ; et remplir, à l'aide d'une pissette, par le trou supérieur.

Il n'y a donc pas de perte de liquide, et la précision est bonne.

Peser le récipient pleine d'eau, soit P_1 .

Peser un échantillon du corps étudié : P_2 .

Vider la moitié de l'eau (environ) avant l'introduire le corps.

Introduire le corps dans le pycnomètre, remplir à nouveau d'eau, et peser : P_3 .

Le calcul de la masse volumique absolue se fait comme suit :

Le poids de l'eau chassée par le corps est $P = P_1 + P_2 - P_3$; et la densité de l'eau étant sensiblement égale à 1 à la température ambiante , la masse volumique cherchée est donnée par le quotient :

$$m_{\text{obs}} = \frac{P_2}{P_1 + P_2 + P_3}$$

II.1.4. Liants et corps réagissant avec l'eau :

La méthode utilisée c'est le Voluménoètre (ou densimètre) de le Chatelier.

II.1.4.1. Voluménoètre de le Chatelier :

C'est un récipient de quelque 250 cm³, comportant un col étroit (diamètre de l'ordre du centimètre) muni d'un renflement de 20 cm³ environ.

Au-dessous du renflement est un trait zéro, avec une courte graduation de part et d'autre (en 1/10 de cm).

Au-dessus du renflement, une autre graduation donne le volume (en 1/10 cm³) à partir du zéro.

II.1.4.2. Matériel utilisé :

L'appareil utilisé est le densimètre de le Chatelier, les pesées s'effectueront avec une balance au diagramme, le liquide pourra être du benzène .

II.1.4.3. Mode opératoire :

Mettre du benzène jusqu'en V1 , voisin de zéro. Noter V1, en valeur algébrique (négatif au-dessous du repère). Peser le tout, soit M1.

Avant cette opération un glaçon à col contenant du benzène sera agité dans un bain thermostatique à température constant (choisir entre 15 et 20 °C). Le densimètre rempli sera lui même plongé dans le bain, et agité, pour que tout l'ensemble soit bien à la température du bain.

Introduire la poudre de ciment pesée très lentement (15 mn environ), agiter doucement, en faisant tourner le densimètre, pour éliminer l'air entériné par la poudre. Lorsqu'il ne dégage plus d'air, remettre à nouveau le densimètre dans le bain thermostatique, continuer à agiter doucement jusqu'à stabilisation du niveau. Lire sur la graduation le volume du ciment. Noter V2, et le peser, noter M2.

Pendant toutes ces opérations, les variations de température doivent rester inférieure à 0,2 °C.

Le calcul de la masse volumique absolue est comme suit:

$$m_{\text{abs}} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1}$$

II.2. Masses volumiques apparentes.

II.2.1. Principe :

Remplir une mesure de 1 dm³ , et déterminer la masse du contenu.

II.2.2. Cas du ciment :

La méthode utilisée c'est l'entonnoir.

II.2.2.1. L'entonnoir :

On utilise pour les mesures un entonnoir porté par un trépied, muni d'une passoire et d'un opercule mobile.

I.2.2.1.1. Mode opératoire :

Placer l'entonnoir au-dessus du centre de la mesure . Fermer l'opercule.

Verser une petite quantité (200g environ) de ciment sur la passoire , et la faire descendre dans l'entonnoir à l'aide de la spatule.

Ouvrir l'opercule : le ciment tombe dans la mesure. Refermer l'opercule.

Recommencer avec de nouvelles quantités de ciment, jusqu'à ce que se produise le débordement tout autour.

Araser à la règle, et peser le contenu.

II.2.3. Cas du sable :

La méthode utilisée c'est l'entonnoir .

II.2.3.1. l'entonnoir :

In le même méthode utilisée dans le cas du ciment.

II.2.3.2. Mode opératoire :

Les démarches sont le même, sauf que la quantité utilisée est change.

II.2.4. Cas du gravier :

II.2.4.1. Processus :

Prendre le gravier dans les deux mains forment entonnoir.

Placer ces deux mains à 10cm environ au-dessus d'une mesure d'un litre, et laisser tomber ce gravier, ni trop vite, ni trop lentement.

Verser ainsi le corps, toujours au centre de la mesure, jusqu'à ce qu'il déborde tout autour en forment un cône.

Araser à la règle.

Peser le contenu.

Le calcul de la masse volumique apparente est comme suit :

$$m_{\text{app}} = \frac{P}{V}$$

III. Porosité

III.1. Processus :

Préparer l'échantillon :

Quantité prélevée ni trop grande, ni trop petite (environ 1 kg).

Pas de grains trop petits (au moins 10 g).

Sécher l'échantillon sec.

Porter lentement à 103°C.

L'y maintenir (thermostat) jusqu'à masse constante.

Peser l'échantillon sec : soit M_0 .

Remplir les pores d'eau :

Placer l'échantillon dans de l'eau froide, et porter à ébullition.

Maintenir l'ébullition pendant deux (2) heures, pour chasser l'air des pores.

Laisser refroidir dans l'eau, pour que l'eau rentre dans les pores.

Peser à nouveau :

Auparavant, retirer de l'eau, et essuyer chaque grain (chiffon).

Nouvelle masse : M_1 .

En déduire la porosité.

($M_1 - M_2$) représente la masse de l'eau contenue dans les pores ; le même nombre mesure le volume de ces vides.

$$P = \frac{M_1 - M_2}{V_{\text{matière}}} \times 100$$

Donc :

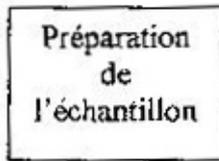
Volume du matériau :

$$V_{\text{matière}} = \frac{M_0}{m_{\text{abs}}}$$

Donc :

$$P = \frac{M_1 - M_2}{M_0} \times m_{\text{abs}} \times 100$$

Notons que, $m_{\text{abs}} = 2,7 \text{ g/cm}^3$.



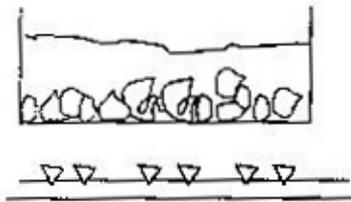
1



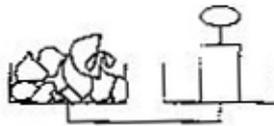
2 : Séchage



3 : Pesée pores vides



4: Remplissage des pores



5: Pesée pores pleins d'eau

IV. ESSAI DE CONSISTANCE.

IV.1. But:

Le but de l'essai de consistance est précisément de déterminer la quantité optimale d'eau de gâchage. Les ciments sont des corps trop complexes pour que cette quantité d'eau puisse être déterminée a priori par les régies de la chimie.

L'essai de consistance est un essai important, dont le résultat intervient dans de nombreuses études.

La pâte pure gâchée avec la quantité d'eau ainsi déterminée est dite "pâte normale".

IV.2. Matériel utilisé.

C'est l'appareil de Vicat. Il peut être muni:

Soit de la sonde de consistance (cylindre, Φ 10 mm);

Soit de l'aiguille de Vicat (section 1 mm^2).

Sonde de consistance et aiguille plus porte-aiguille ont la même masse. l'ensemble de la partie mobile a une masse de 300g, masse qu'il est possible d'augmenter si nécessaire.

ne graduation (réglable en hauteur) permet de mesurer la distance qui sépare le dessous de la sonde (ou de l'aiguille) de la plaque de base.

Le matériau à essayer est placé dans un « moule tronconique » : diamètres 70 et 80 mm, hauteur 40 mm, posé sur sa grande base.

IV.3. Fabrication de la pâte.

Se fait à l'aide d'un malaxeur normalisé. Le batteur, facilement démontable de son axe, est animé d'un mouvement planétaire à 2 vitesses : rotation sur soi-même à 140 ou 280 t/mn, et autour de l'axe moteur à 61,5/ 123 t/ mn.

IV.3.1. Processus :

Mettre le ciment dans le récipient du malaxeur ; ajouter l'eau.

Mettre aussitôt en marche :

une minute à vitesse lente,

puis deux (2) minute à vitesse rapide.

Arrêter le mouvement ; démonter le batteur. Nettoyer les parois du récipient (avec le batteur) et le batteur. Remonter récipient et batteur.

Remonter en marche : deux (2) minute à vitesse rapide.

A : introduite	B : malaxer			
Ciment	Vitesse lente	Vitesse rapide	Arrêter Démontrer Nettoyer Remonter	Vitesse rapide
Eau	1. minute	2. minute		2 minute

IV.3.2. Processus :

Peser :

500g de ciment ;

la quantité d'eau que l'on pense vraisemblable.

fabriquer la pâte, suivant le processus vu ci-dessus (IV.3.1)

remplir le moule tronconique de cette pâte, et araser. L'appareil de Vicat aura été préparé ainsi :

Sonde de consistance en place ;

Zéro de la graduation en place ;

Masse mobile : 300g (pas de masse additionnelle).

Placer le moule et son support sur le socle de l'appareil.

Immobiliser la sonde au contact de la pâte.

Et lâcher cette sonde sans vitesse initiale : elle s'enfoncera plus ou moins profondément dans la pâte, noter l'indication de l'index lors de l'arrêt.

La pâte sera à consistance normale si l'épaisseur ainsi mesurée est de 6 mm \pm 1 mm (index entre 5 et 7 mm).

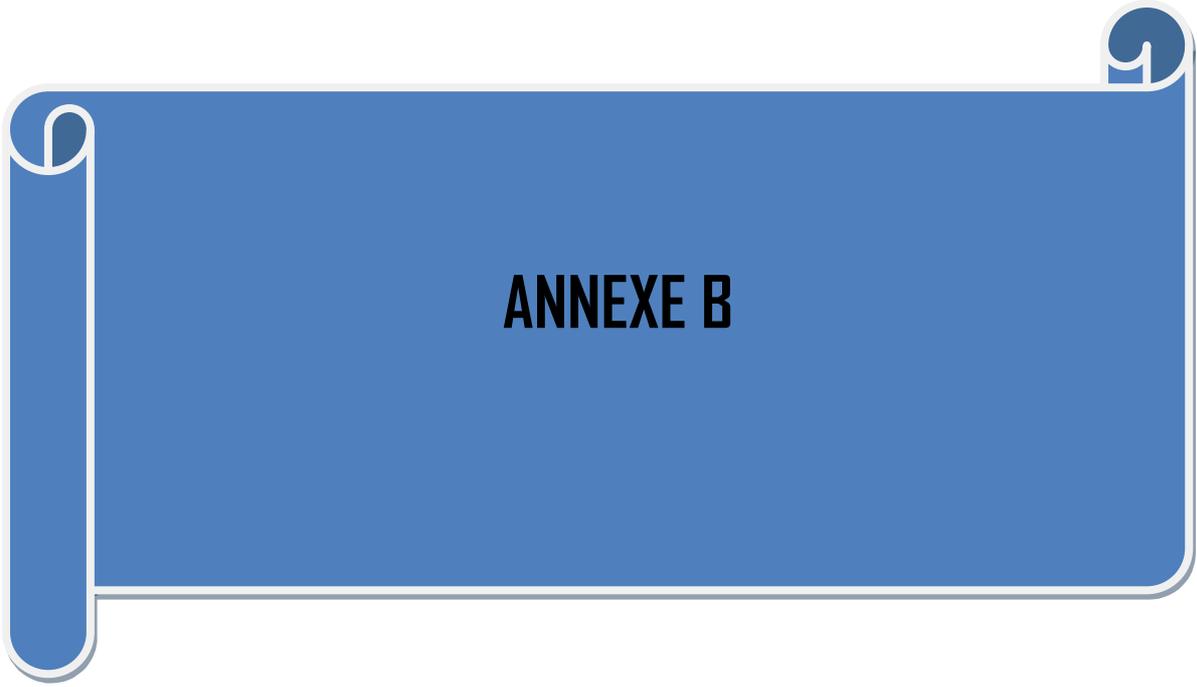
Si l'épaisseur est supérieur à 7mm : il n'y a pas assez d'eau.

Si l'épaisseur est inférieure à 5mm : il y a trop d'eau.

Dans les deux cas, jeter la pâte, nettoyer et sécher le matériel, et recommencer avec une nouvelle quantité d'eau.

V. les valeurs du coefficient A :

Consistance du béton	Sable roulé		Sable concassé
	Gravier roulé	Gravier concassé	
Assez plastique	24 à 26	26 à 28	30 à 32
Plastique	26 à 28	28 à 30	32 à 34



ANNEXE B

FORMULATION D'ENROBES – ESSAI DURIEZ DILATE

GACHET A :

Détermination masse volumique apparente :

Poids carotte (g)	Poids carotte paraffine (g)	Poids paraffine (g)	Volume de la paraffine (densité 0,9)	Pesée dans l'eau	Volume carotte paraffinée (cm ³)	Densité apparente	Volume carotte (cm ³)
3541,8	3584,2	42,4	47,11	2006,9	1577,3	2,31	1530,2

Essai statique sur mélanges hydrocarbonés

Echantillon	Formule en %	P.Spécifique (D)	Composition centésimale (P)	Rapport (P/D)	Densité apparente (dm)	par balance hydrostatique	
15\25	18 %	2,68	17,38	6,486	Densité vraie	$D_m = 100/S_2$	2,31
8\15	20 %	2,63	19,31	7,343	Compacité en %	$C = (D_m/d_m) * 100$	2,49
3\8	22 %	2,54	21,24	8,364	Densité apparente agrégats	$d_A = ((100-P) * d_m) / 100$	92,71
0\3	40 %	2,65	38,63	14,58	Densité vraie agrégats	$DA = (100-P) / S_1$	2,31
			Somme S1=	36,77	% Vide occupé par bitume+Eau	$VA = ((DA - d_A) * 100) / DA$	2,63
Bitume en%	3,56 %	1,02	3,43	3,367	Vide résiduel	$V_m = 100 - \text{Compacité}$	12,04
			Somme S2=	40,14	% Vide occupé par bitume	$VB = ((VA - V_m) * 100) / VA$	7,29
			100-P =	96,57			39,50

Annexe B : Les résultats détaillés d'étude de formulation sans déchet

		A SEC A 18 C°				EN IMMERSION A 18 C°					
		07 Jours à l'air libre		0 Heure		02 Heure		02 Jours		07 Jours	
Eprovette N°		1	2	4	5	4	5	4	5	4	5
Hauteur de l'éprouvette en (mm)	H	137,5	139,2	138,2	139,0	138,2	139,0	138,3	139,4	138,8	140,0
	H'	137,5	139,2	138,2	139,0	138,2	139,0	138,2	139,0	138,7	139,3
	H''	137,4	139,4	138,0	138,9	138,0	138,9	138,1	139,1	138,4	139,5
	H'''	137,4	139,4	138,0	139,0	138,0	139,0	138,2	139,1	138,6	139,3
Diamètre en (mm)	D	119,9	119,9	119,9	120,0	120,0	119,9	120,0	120,0	120,1	120,1
	D'	120,0	119,9	119,9	119,9	119,9	120,0	120,0	120,0	120,0	120,1
	D''	119,9	119,9	119,9	119,9	119,9	119,9	120,0	120,0	120,1	120,1
Poids	P	3519	3562	3521	3522	3581	3589	3595	3601	3628	3632
Résistance à la compression (Kg/mm ²)		9500	9000							6500	6000
Corrigée (bars)		84,07	79,6							57,5	53,1
Hauteur après Ecrasement (mm)	HP	136,8	136,6								
	HP'	136,9	136,5								
	HP''	136,9	136,9								

GACHET B

Détermination masse volumique apparente

Poids carotte (g)	Poids carotte paraffine (g)	Poids paraffine (g)	Volume de la paraffine (densité 0,9)	Pesée dans l'eau	Volume carotte paraffinée (cm ³)	Volume carotte (cm ³)	Densité apparente
3488,7	3574,2	85,5	95	1925,2	1649	1559	2,30

Essai statique sur mélanges hydrocarbonés :

Echantillon	Formule en %	P.Spécifique (D)	Composition centésimale (P)	Rapport (P/D)	Densité apparente (dm)	Par balance hydrostatique	
15\25	18 %	2,68	17,34	6,47	Densité vraie	$Dm=100/S2$	2,3
8\15	20 %	2,63	19,27	7,326	Compacité en %	$C=(Dm/dm)*100$	2,48
3\8	22 %	2,54	21,19	8,344	Densité apparente agrégats	$dA=((100-P)*dm)/100$	92,63
0\3	40 %	2,65	38,53	14,54	Densité vraie agrégats	$DA=(100-P)/S1$	2,22
			Somme S1=	36,68	% Vide occupé par bitume+Eau	$VA=((DA-dA)*100)/DA$	2,63
Bitume en%	3,8 %	1,02	3,66	3,593	Vide résiduel	$Vm=100-Compacité$	15,63
			Somme S2=	40,27	% Vide occupé par bitume	$VB=((VA-Vm)*100)/VA$	7,37
			100-P =	96,34			52,86

		A SEC A 18 C°				EN IMMERSION A 18 C°					
		07 Jours à l'air libre		0 Heure		02 Heure		02 Jours		07 Jours	
Eprovette N°		1	2	4	5	4	5	4	5	4	5
Hauteur de l'éprouvette en (mm)	H	138,0	138,3	137,7	139,1	137,7	139,5	137,8	138,0	138,0	139,0
	H'	138,7	138,4	138,0	139,0	138,2	139,2	137,1	138,3	137,9	139,1
	H''	138,5	138,3	137,4	138,3	138,0	139,0	137,7	138,1	138,6	139,2
	H'''	138,0	138,0	138,0	138,7	138,3	138,7	136,7	138,5	138,2	139,5
Diamètre en (mm)	D	119,9	120,0	119,9	119,9	120,0	119,9	120,0	120,0	120,1	120,1
	D'	120,0	119,9	119,9	119,9	119,9	119,9	120,0	120,0	120,1	120,1
	D''	119,9	119,9	119,9	119,9	119,9	119,9	120,0	120,0	120,1	120,1
Poids	P	3512	3502	3524	3532	3545	3572	3559	3591	3590	3624
Résistance à la compression (Kg/mm ²)		10250	6500							6500	6250
Corrigée (bars)		90,71	57,5							57,5	55,3
Hauteur après Ecrasement en (mm)	HP	135,5	137,3								
	HP'	135,0	137,5								
	HP''	136,0	137,2								

REMARQUE: La valeur de résistance de l'éprouvette N° 2 est rejeté car l'éprouvette est mal confectionné

GACHET C:

Détermination masse volumique apparente :

Poids carotte (g)	Poids carotte paraffine (g)	Poids paraffine (g)	Volume de la paraffine (densité 0,9)	Pesée dans l'eau	Volume carotte paraffinée (cm ³)	Volume carotte (cm ³)	Densité apparente
3503,8	3536,8	33,00	36,66	1986,9	1549,9	1513,24	2,31

Essai statique sur mélanges hydrocarbonés

Echantillon	Formule en %	P.Spécifique (D)	Composition centésimale (P)	Rapport (P/D)	Densité apparente (dm)	par balance hydrostatique	
15\25	18 %	2,68	17,30	6,455	Densité vraie	$D_m = 100/S_2$	2,31
8\15	20 %	2,63	19,22	7,308	Compacité en %	$C = (D_m/d_m) * 100$	2,47
3\8	22 %	2,54	21,14	8,324	Densité apparente agrégats	$d_A = ((100-P) * d_m) / 100$	93,35
0\3	40 %	2,65	38,44	14,51	Densité vraie agrégats	$DA = (100-P) / S_1$	2,22
			Somme S1=	36,59	% Vide occupé par bitume+Eau	$VA = ((DA-d_A) * 100) / DA$	2,63
Bitume en%	4,05 %	1,02	3,89	3,818	Vide résiduel	$V_m = 100 - \text{Compacité}$	15,47
			Somme S2=	40,41	% Vide occupé par bitume	$VB = ((VA - V_m) * 100) / VA$	6,65
			100-P =	96,11			57,02

Annexe B : Les résultats détaillés d'étude de formulation sans déchet

		A SEC A 18 C°				EN IMMERSION A 18 C°					
		07 Jours à l'air libre		0 Heure		02 Heure		02 Jours		07 Jours	
Eprovette N°		1	2	4	5	4	5	4	5	4	5
Hauteur de l'éprouvette en (mm)	H	137,0	137,5	136,4	135,0	136,4	135,3	136,5	135,3	136,7	135,6
	H'	136,5	137,3	135,9	135,2	136,5	135,3	137,0	135,6	137,2	136,3
	H''	136,4	138,3	135,6	135,4	136,4	135,5	136,7	135,3	136,7	136,4
	H'''	136,2	137,0	135,9	135,0	136,9	135,6	136,4	135,4	136,8	135,7
Diamètre en (mm)	D	119,8	119,9	119,9	119,9	119,9	119,9	120,0	120,0	120,1	120,1
	D'	119,9	119,9	119,9	119,9	119,9	119,9	119,9	120,0	120,1	120,0
	D''	119,9	119,9	119,9	119,9	119,9	119,9	120,0	120,0	120,1	120,1
Poids	P	3500	3502	3499	3490	3513	3505	3534	3524	3576	3568
Résistance à la compression (Kg/mm ²)		8800	8250							7000	6750
Corrigée (bars)		77,88	73							61,9	59,73
Hauteur après Ecrasement (mm)	HP	134,6	132,7								
	HP'	134,0	132,3								
	HP''	133,7	132,3								

GHACHET D:

Détermination masse volumique apparente :

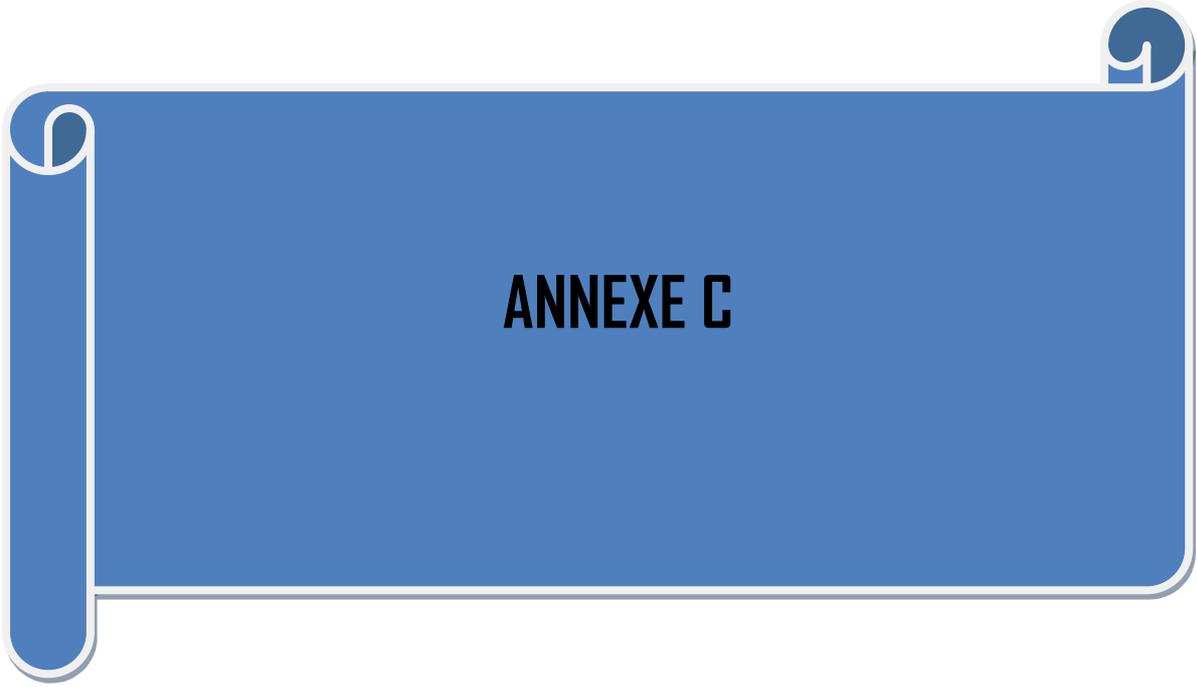
Poids carotte (g)	Poids carotte paraffine (g)	Poids paraffine (g)	Volume de la paraffine (densité 0,9)	Pesée dans l'eau	Volume carotte paraffinée (cm ³)	Volume carotte (cm ³)	Densité apparente
3488,7	3574,2	85,5	95	1925,2	1649	1559	2,30

Essai statique sur mélanges hydrocarbonés :

Echantillon	Formule En %	P.Spécifique (D)	Composition centésimale (P)	Rapport (P/D)	Densité apparente (dm)	par balance hydrostatique	
15\25	18 %	2,68	17,26	6,439	Densité vraie	$D_m = 100/S_2$	2,32
8\15	20 %	2,63	19,18	7,291	Compacité en %	$C = (D_m/d_m) * 100$	94,07
3\8	22 %	2,54	21,09	8,304	Densité apparente agrégats	$dA = ((100-P) * d_m) / 100$	2,22
0\3	40 %	2,65	38,35	14,47	Densité vraie agrégats	$DA = (100-P) / S_1$	2,63
			Somme S1=	36,51	% Vide occupé par bitume+Eau	$VA = ((DA - dA) * 100) / DA$	15,30
Bitume en%	4,3 %	1,02	4,12	4,042	Vide résiduel	$V_m = 100 - \text{Compacité}$	5,93
			Somme S2=	40,55	% Vide occupé par bitume	$VB = ((VA - V_m) * 100) / VA$	61,28
			100-P =	95,88			

Annexe B : Les résultats détaillés d'étude de formulation sans déchet

		A SEC A 18 C°				EN IMMERSION A 18 C°					
		07 Jours à l'air libre		0 Heure		02 Heure		02 Jours		07 Jours	
Eprovette N°		1	2	4	5	4	5	4	5	4	5
Hauteur de l'éprouvette en (mm)	H	138,9	134,9	137,2	136,3	137,1	136,8	137,2	137,0	137,2	137,0
	H'	138,6	134,2	137,3	136,0	136,8	137,1	137,4	136,8	137,7	137,2
	H''	138,8	134,9	136,7	136,1	137,0	136,3	137,6	136,7	137,8	137,2
	H'''	138,1	134,4	137,0	136,0	137,3	136,5	136,9	136,8	137,6	137,1
Diamètre en (mm)	D	119,9	119,9	119,9	119,9	119,9	119,9	120,0	120,0	120,1	120,1
	D'	119,8	119,9	119,9	119,9	119,9	120,0	119,9	120,0	120,1	120,1
	D''	119,9	119,9	119,9	119,9	119,9	119,9	120,0	120,0	120,0	120,1
Poids	P	3545	3492	3522	3492	3561	3526	3577	3545	3597	3565
Résistance à la compression (Kg/mm ²)		8200	8600							7000	7500
Corrigée (bars)		72,57	76,1							61,9	66,37
Hauteur après Ecrasement (mm)	HP	132,2	131,5								
	HP'	133,1	132,0								
	HP''	132,6	133,0								



ANNEXE C

Les résultats détaillés de l'essai duriez avec 10% déchet:

Echantillon	Formule En%	P.SpécifiqueD	Composition centisimale P	RapportP/D	Densité apparente dm	par balance hydrostatique		
15\25	18	2,68	17,34	6,47	Densité vraie	$D_m=100/S_2$	2,25	
8\15	20	2,63	19,27	7,33	Compacité en %	$C=(D_m/d_m)*100$	2,44	
3\8	22	2,54	21,19	8,34	Desité apparente agrégats	$dA=((100-P)*dm)/100$	92,16	
0\3	40	2,53	38,53	15,22	Densité vraie agrégats	$DA=(100-P)/S_1$	2,17	
				Somme l=	37,36	% Vide occupé par bitume+Eau	$VA=((DA-dA)*100)/DA$	2,58
Bitume en%	3,80	1,02	3,66	3,59	Vide résiduel	$V_m=100-Compacité$		15,93
				Somme S2=	40,96	% Vide occupé par bitume	$VB=((VA-V_m)*100)/VA$	7,84
				100-P =96,34				50,75

ESAAI		A SEC		EN IMMERSION							
		07 Jours à l'air libre		0 Heure		02 Heure		02 Jours		07 Jours	
EPROVETTE N°		1	2	4	5	4	5	4	5	4	5
Hauteur de l'éprouvette en (mm)	H	138,2	137	138	137,6	138,2	137,8	138,3	138,4	138,8	139,0
	H'	137,7	137,5	137,6	137	138	137,7	138,5	138,3	138,7	138,6
	H''	138,2	137,4	137,3	137,6	137,8	137	138,1	137,6	138,4	138,0
	H'''	138,4	136,8	137,8	137,3	137,3	137,6	137,9	138	138,6	138,5
Diamètre en (mm)	D	119,9	120	120	120	120	119,9	120	120	120	120,1
	D'	120	119,9	119,9	119,9	119,9	120	119,9	120	120	120,1
	D''	119,9	119,9	119,9	119,9	119,9	119,9	120	120	120,1	120,1
Poids	P	3472,2	3501,6	3498	3519,8	3521,5	3547	3572	3602,9	3595,8	3624
Résistance à la compression à 18 °C (KG/mm²)		8500	8500	$\frac{r'}{R} = 0,72$						6000	6250
Corrigée		75,22	75,22							53,10	55,3
Hauteur après écrasement en (mm)	HP	135,5	136,4								
	HP'	135,7	136,3								
	HP''	135,4	135,9								

Annexe C : Les résultats détaillés d'étude de formulation avec déchet

ESAAI		A SEC		APRES IMMERSION DANS L'EAU A 18 °C							
		07 Jours à l'air libre		0 Heure		02 Heures		02 Jours		07 Jours	
EPROUVETTE N°		1	2	4	5	4	5	4	5	4	5
Hauteur moyenne en (mm)	Hm	138,13	137,18	137,68	137,38	137,83	137,53	138,20	138,08	138,63	138,53
Diamètre moyen en (mm)	D	119,93	119,93	119,93	119,93	119,93	119,93	119,97	120,00	120,03	120,10
Surface = $3,14 \cdot D^2 / 4$ mm ²	S	11291,44	11291,44	11291,44	11291,44	11291,44	11291,44	11297,72	11304,00	11310,28	11322,85
Volume = $3,14 \cdot D^2 \cdot Hm / 4$ mm ³	V	15596,31	15489,04	15545,49	15511,62	15562,43	15528,56	15613,45	15608,00	15678,88	15684,97
Densité apparente par les mesures	P/V	2,24	2,27	2,25	2,27	2,25	2,27	2,24	2,26	2,23	2,24

N° d'éprouvette		1	2
Hm après écrasement	HP	135,53	136,20
% d'affaissement $(HP - Hm) \cdot 100 / Hm$	%	1,88	0,71
Moyenne		1,29	

N° d'éprouvette	4	5	4	5	4	5
Imbibition = Ph-PO	23,5	27,2	74	83,1	97,8	103,9
% D'imbibition = $100 \cdot (Ph - PO) / PO$	0,67	0,77	2,12	2,36	2,80	2,95
Moyenne	0,72		1,72		2,87	
Gonflement = Vh-VO	16,94	16,94	67,96	96,38	133,38	173,35
% Gonflement = $100 \cdot (Vh - VO) / VO$	0,11	0,11	0,44	0,62	0,86	1,12
Moyenne	0,11		0,53		0,99	

Les résultats détaillés de l'essai duriez avec 30% de déchet :

Echantillon	Formule En %	P.Spécifique D	Composition centesimale P		Rapport P/D	Densité apparente dm	par balance hydrostatique	2,22
15\25	18	2,68	17,34		6,47	Densité vraie	$Dm=100/S2$	2,35
8\15	20	2,63	19,27		7,33	Compacité en %	$C=(Dm/dm)*100$	94,44
3\8	22	2,54	21,19		8,34	Desité apparente agrégats	$dA=((100-P)*dm)/100$	2,31
0\3	40	2,29	38,53		16,80	Densité vraie agrégats	$DA=(100-P)/S1$	2,47
				Somme S1=	38,94	% Vide occupé par bitume+Eau	$VA=((DA-dA)*100)/DA$	6,61
Bitume en%	3,81	1,02	3,67		3,60	Vide résiduel	$Vm=100-Compacité$	5,56
				Somme S2=	42,54	% Vide occupé par bitume	$VB=((VA-Vm)*100)/VA$	15,95
				100-P =	96,33			

ESAAI		A SEC		APRES IMMERSION							
		07 Jours à l'air libre		0 Heure		02 Heure		02 Jours		07 Jours	
EPROVETTE N°		1	2	4	5	4	5	4	5	4	5
Hauteur de l'éprouvette en (mm)	H	136,8	136,4	137	137,2	136,5	137	136,8	137,4	137,5	138,2
	H'	136,9	136,2	136,8	137	137,2	137,3	137,6	137,8	138,2	138,5
	H''	137	135,8	136,4	137,2	136,8	137,3	137,1	137,9	137,6	138,5
	H'''	136,4	136,4	137	136,6	137	136,8	137,5	137,3	138,1	137,9
Diamètre en (mm)	D	119,9	119,9	119,9	120	120	119,9	120	120	120	120,1
	D'	119,9	119,9	120	119,9	119,9	120	120	120	120,1	120,1
	D''	119,9	120	119,9	119,9	119,9	120	120	120	120,1	120,1
Poids	P	3496,7	3464,1	3487	3485	3518	3512	3545	3538	3572	3569
Résistance à la compression à 18 °C (KG/mm ²)		6500	6750	$\frac{r'}{R} = 0,70$						4750	4500
Corrigée		57,52	59,73							42,04	39,82
Hauteur après écrasement en (mm)		HP	134,3	135							
		HP'	134	135,6							
		HP''	134,5	135,1							

Annexe C : Les résultats détaillés d'étude de formulation avec déchet

ESAAI		A SEC		APRES IMMERSION DANS L'EAU A 18 °C							
		07 Jours à l'air libre		0 Heure		02 Heure		02 Jours		07 Jours	
EPROUVETTE N°		1	2	4	5	4	5	4	5	4	5
Hauteur moyenne en (mm)	Hm	136,78	136,20	136,80	137,00	136,88	137,10	137,25	137,60	137,85	138,28
Diamètre moyen en (mm)	D	119,90	119,93	119,93	119,93	119,93	119,97	120,00	120,00	120,07	120,10
Surface = $3,14 \cdot D^2 / 4 \text{ mm}^2$	S	11285,17	11291,44	11291,44	11291,44	11291,44	11297,72	11304,00	11304,00	11316,56	11322,85
Volume = $3,14 \cdot D^2 \cdot Hm / 4 \text{ mm}^3$	V	15435,29	15378,95	15446,69	15469,28	15455,16	15489,18	15514,74	15554,30	15599,88	15656,67
Densité apparente par les mesures	P/V	2,27	2,25	2,26	2,25	2,28	2,27	2,28	2,27	2,29	2,28

N° d'éprouvette		1	2
Hm après écrasement	HP	134,27	135,23
% d'affaissement $(HP-Hm) \cdot 100 / Hm$	%	1,83	0,71
Moyenne		0,85	

N° d'éprouvette	4	5	4	5	4	5
Imbibition = Ph-PO	31	27	58	53	85	84
% D'imbibition = $100 \cdot (Ph-PO) / PO$	0,89	0,77	1,66	1,52	2,44	2,41
Moyenne	0,83		0,76		2,42	
Gonflement = Vh-VO	8,47	19,90	68,05	85,03	153,19	187,39
% Gonflement = $100 \cdot (Vh-VO) / VO$	0,05	0,13	0,44	0,55	0,99	1,21
Moyenne	0,06		0,50		1,10	

Les résultats de l'essai DURIEZ pour le mélange de 35% de déchet :

Echantillon	Formule En%	P.Spécifique D	Composition centisimaleP	Rapport P/D	Densité apparente dm	par balance hydrostatique	2,21	
15\25	18	2,68	17,34	6,47	Densité vraie	$Dm=100/S2$	2,33	
8\15	20	2,63	19,26	7,33	Compacité en %	$C=(Dm/dm)*100$	95,01	
3\8	22	2,54	21,19	8,34	Densité apparente agrégats	$dA=((100-P)*dm)/100$	2,31	
0\3	40	2,23	38,53	17,25	Densité vraie agrégats	$DA=(100-P)/S1$	2,45	
				Somme S1=	39,39	% Vide occupé par bitume+Eau	$VA=((DA-dA)*100)/DA$	5,54
Bitume en%	3,82	1,02	3,68	3,60	Vide résiduel	$Vm=100-Compacité$	4,99	
				Somme S2=	42,99	% Vide occupé par bitume	$VB=((VA-Vm)*100)/VA$	9,98
				100-P =	96,32			

ESAAI		A SEC				APRES IMMERSION					
		07 Jours à l'air libre		02 Heures		02 Heures		07 Jours			
EPROUVETTE N°		1	2	4	5	4	5	4	5	4	5
Hauteur de l'éprouvette en (mm)	H	137,5	139,2	138,2	139	138,2	139	138,6	139,4	139,3	140,4
	H'	137,5	139,2	138,2	139	138,2	139	138,7	139,5	139,4	140,2
	H''	137,4	139,4	138	138,9	138	138,9	138,5	139,5	139,2	140,1
	H'''	137,4	139,4	138	139	138	139	138,8	139,5	139,5	139,9
Diamètre en (mm)	D	119,9	119,9	119,9	120	120	119,9	120	120	120,1	120,1
	D'	120	119,9	119,9	119,9	119,9	120	120	120	120	120,1
	D''	119,9	119,9	119,9	119,9	119,9	119,9	120	120	120,1	120,1
Poids	P	3518,8	3562	3521	3522	3581,2	3589	3595	3601	3628	3632
Résistance à la compression à 18 °C (KG/mm ²)		6000	5750	$\frac{r'}{R} = 0,62$				3500	4000		
Résistance Corrigée		53,10	50,88					30,97	35,40		
Hauteur après écrasement en (mm)	HP	136,8	136,6								
	HP'	136,9	136,5								
	HP''	136,9	136,9								

Annexe C : Les résultats détaillés d'étude de formulation avec déchet

ESAAI		A SEC		APRES IMMERSION DANS L'EAU A 18 °C							
		07Jours		0 Heure	5	02 Heure	5	02 Jours	5	07 Jours	5
EPROVETTE N°		1	2	4	5	4	5	4	5	4	5
Hauteur moyenne en (mm)	Hm	137,45	139,30	138,10	138,98	138,10	138,98	138,65	139,48	139,35	140,15
Diamètre moyen en (mm)	D	119,93	119,90	119,90	119,93	119,93	119,93	120,00	120,00	120,07	120,10
Surface = $3,14 \cdot D^2 / 4 \text{ mm}^2$	S	11291,44	11285,17	11285,17	11291,44	11291,44	11291,44	11304,00	11304,00	11316,56	11322,85
Volume = $3,14 \cdot D^2 \cdot Hm / 4 \text{ mm}^3$	V	15520,09	15720,24	15584,82	15692,28	15593,48	15692,28	15673,00	15766,25	15769,63	15868,97
Densité apparente par les mesures	P/V	2,27	2,27	2,26	2,24	2,30	2,29	2,29	2,28	2,30	2,29

N° d'éprouvette		1	2
Hm après écrasement	HP	136,87	136,67
% d'affaissement $(HP-Hm) \cdot 100 / Hm$	%	0,42	1,89
Moyenne		0,77	

	4	5	4	5	4	5
Imbibition = Ph-PO	60,20	67,00	74,00	79,00	107,00	110,00
% D'imbibition = $100 \cdot (Ph-PO) / PO$	1,71	1,90	2,10	2,24	3,04	3,12
Moyenne	1,81		1,12		3,08	
Gonflement = Vh-VO	8,67	0,00	88,18	73,97	184,81	176,69
% Gonflement = $100 \cdot (Vh-VO) / VO$	0,06	0,00	0,57	0,47	1,19	1,13
Moyenne	0,02		0,52		1,16	

Les résultats de l'essai DURIEZ pour le mélange de 50% de déchet :

Echantillon	Formule En %	P.Spécifique D	Composition centesimale P	Rapport P/D	Densité apparente dm	par balance hydrostatique	2,205	
15\25	18	2,68	17,34	6,47	Densité vraie	$Dm=100/S2$	2,25	
8\15	20	2,63	19,27	7,33	Compacité en %	$C=(Dm/dm)*100$	98,08	
3\8	22	2,54	21,19	8,34	Densité apparente agrégats	$dA=((100-P)*dm)/100$	2,31	
0\3	40	2,055	38,54	18,75	Densité vraie agrégats	$DA=(100-P)/S1$	2,36	
				Somme S1=	40,89	% Vide occupé par bitume+Eau	$VA=((DA-dA)*100)/DA$	1,95
Bitume en%	3,80	1,02	3,66	3,59	Vide résiduel	$Vm=100-Compacité$	1,92	
				Somme S2=	44,48	% Vide occupé par bitume	$VB=((VA-Vm)*100)/VA$	1,52
				100-P=96,34				

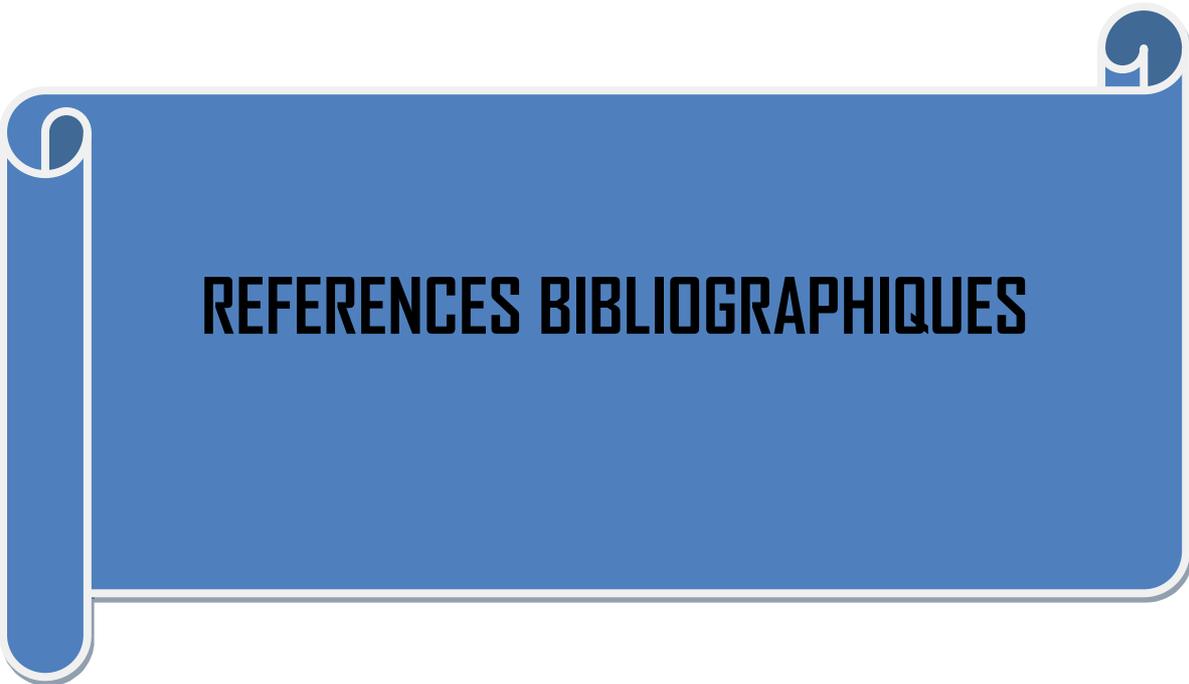
ESAAI	A SEC		APRES IMMERSION								
	07 Jours		0 Heure		02 Heure		02 Jours		07 Jours		
EPROUVETTE N°	1	2	4	5	4	5	4	5	4	5	
Hauteur de l'éprouvette en (mm)	H	137,6	137	137,2	137,8	137,1	137,9	137,5	138,6	138	139
	H'	137,6	137	137,4	138	137,2	137,8	137,7	138,5	138,2	139,2
	H''	137,3	136,8	137	138	137,5	138,2	138,1	138,7	138,4	139,1
	H'''	137,4	136,7	137,1	137,7	137,2	137,9	138	138,7	138,6	139,3
Diamètre en (mm)	D	119,9	119,9	119,9	120	120	119,9	120	120	120,1	120,1
	D'	119,9	120	119,9	119,9	119,9	120	120	120	120	120,1
	D''	119,9	119,9	119,9	119,9	119,9	119,9	120	120	120,1	120,1
Poids	P	3488,6	3477	3479	3490	3496,2	3509	3523	3540	3561	3579
Résistance à la compression	5000	5250	$\frac{r'}{R} = 0,68$						3500	3500	
Corrigée	44,25	46,46							30,97	30,97	
Hauteur après écrasement en (mm)	HP	136,2	136,7								
	HP'	136,5	136,5								
	HP''	136,3	136,5								

Annexe C : Les résultats détaillés d'étude de formulation avec déchet

ESAAI		A SEC		APRES IMMERSION DANS L'EAU A 18 °C							
		07 Jours à l'air libre		0 Heure		02 Heures		02 Jours		07 Jours	
EPROUVETTE N°		1	2	4	5	4	5	4	5	4	5
Hauteur moyenne en (mm)	Hm	137,48	136,88	137,18	137,88	137,25	137,95	137,83	138,63	138,30	139,15
Diamètre moyen en (mm)	D	119,90	119,93	119,90	119,93	119,93	119,93	120,00	120,00	120,07	120,10
Surface = $3,14 \cdot D^2 / 4 \text{ mm}^2$	S	11285,17	11291,44	11285,17	11291,44	11291,44	11291,44	11304,00	11304,00	11316,56	11322,85
Volume = $3,14 \cdot D^2 \cdot Hm / 4 \text{ mm}^3$	V	15514,28	15455,16	15480,43	15568,08	15497,51	15576,55	15579,74	15670,17	15650,81	15755,74
Densité apparente par les mesures	P/V	2,25	2,25	2,25	2,24	2,26	2,25	2,26	2,26	2,28	2,27

N° d'éprouvette		1	2
Hm après écrasement	HP	136,33	136,57
% d'affaissement $(HP-Hm) \cdot 100 / Hm$	%	0,83	0,23
Moyenne		0,35	

N° d'éprouvette	4	5	4	5	4	5
Imbibition = Ph-PO	17,2	19	44	50	82	89
% D'imbibition = $100 \cdot (Ph-PO) / PO$	0,49	0,54	1,26	1,43	2,36	2,55
Moyenne	0,52		0,72		2,45	
Gonflement = Vh-VO	17,08	8,47	99,31	102,09	170,38	187,67
% Gonflement = $100 \cdot (Vh-VO) / VO$	0,11	0,05	0,64	0,66	1,10	1,21
Moyenne	0,05		0,65		1,15	



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **ADEME**, Les procédés de traitement des déchets industriels solides et liquides, Angers Ademe, 1995.
- [2] **ADEME**, Les techniques de stabilisation des déchets industriels spéciaux , paris : Ademe , 1996 ,105 p .
- [3] Arrêté du 18 décembre 1992 . relatif au stockage de certains déchets industriels spéciaux ultimes et stabilisés pour les installations existantes . Code permanent environnement et nuisance , feuillets 94 , 1994, PP.1894-19898.
- [4] **AGENCE FRANÇAISE DE NORMALISATION**. Liants hydrauliques, définition, classification et spécification des ciments. Normalisation Française. Paris: AFNOR, 1994.
- [5] **BARNS, R.** Etude de la diffusion des polluants dans les déchets solidifiés par liants hydrauliques. Thèse: Doctorat : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1994.
- [6] **BELHAMRI .R et BEN MESSOUDE.K.** « Contribution a l'étude de la pollution du site de forage Hassi-Messaoud ».Mémoire de fin d'étude, L'institut de Chimie Industrielle, USTHB.(1998)
- [7] **N.BENDUMECHIARA.** Élaboration et caractérisation d'un matériau a partir d'un déchet industriel (magister 2002 M 001202).
- [8] **Brons - laot, G .** Evaluation environnementale de la valorisation de macheders d'incinération d'ordures ménagers en remplissage de carrière . Thèse : institut national des sciences appliquées de Lyon ,2002.202 p.
- [9] **BOUCHELAGHEM A.** Stabilisation et solidification des déchets industriels spéciaux. Technique, Science et Méthode. n°4, 1994.
- [10] **R.BOUTEMEUR AND AL.** "traitement and valorisation of oilfield wastes (cuttings) in civil engineering construction" .Procedings of international conference susrainable concrete construction - DUNDEE (U.K) Septembre 2002 - P.P 721-729

- [11] **Daniel Tyteca**, «On the measurement of environmental performance in firms - Literature review and productive efficiency approach", Resources for the future, Washington, DC, 1994
- [12] **DURIEZ.M** : Traité de matériaux de construction. Tl. Edition Dunod
- [13] **Faschan , A, Tittlebaum , M.E, Cartledge , F.K , and Portier , R** . The use of organoclays to reduce organic waste volatilization during solidification hazardous waste and hazardous materials , 1992 , Vol .9 , n 4 , PP 345-354.
- [14] **JEAN-GEORGES, MALLOUK, Ing** Les Enrobes Bitumineux, Tome1:théorie Québec : Modulo Edition1982
- [15] **Joisel , A.** Les adjuvants du ciment , soisy , France Joisel ,1973, 253 P
- [16] **Journal officiel des communautés Européennes** . Décision du conseil du 19 décembre 2002 établissant des critères et des procédures d'admission des déchets dans les décharges , conformément à l'article 16 et à l'annexe II de la directive 1999/31/CE . Paris :AFNOR , 2003 , PP.11/27-11/49
- [17] **Hekal , E.E. and Kishar , E.A** . effect of sodium , salt of naphthalene . Formeldehyde polycondesate on ettringite formation . Cement and concrete Research , 1999, Vol . 29 , pp . 1535 - 1540
- [18] **Imyim A, Moszkowicz, P., Tiruta – Barna , L et al.** Mise au point d'une boîte à outils de tests de lixiviation pour l'évaluation du flux de polluants émis d'un déchet solide. Déchets – Sciences et Techniques , 2000 , vol.18,pp.15-23 .
- [19] **D. Gaujous**, La pollution des milieux aquatiques, Paris : Technique & Documentation, 1993.
- [20] **R.LANCHON** . cours de laboratoire , granulats , bétons , sols , Disforges 1983.
- [21] **J.B. Leroy**, Les déchets et leur traitement, Collection Que sais-je ?, Paris : Presses universitaires de France, 1981 révisé 1994
- [22] **L.Y. Maystre et al.**, Déchets urbains, nature et caractérisation, Lausanne Presses polytechniques et universitaires romandes, 1994
- [23] **A. Navarro et al.** "Gestion des Déchets", Lamy environnement, Les déchets, LAMY, 1995.

[24] **POULENC.R** « Manuel a l'usage des industriels », Ed, AFNOR, ouvrage collectif rédigé sous la direction de Serge Lamert, juin (1995).

[25] **Recueil AFNOR (agence française de normalisation)** . Paris : AFNOR , 1994 , 250 p .

[26] **Sheriff, A, T.S , Sollars , C.J. , Montgomery, D.M , and Perry , R.** The use of activated charcoal and Tetra - Alkylammonium - Substituted clays in cement - based stabilization / solidification of phenols and chlorinated phenols . In : coté , P.L., Giliam , T.M. environmental aspects of stabilization and solidification of Hazardous and radioactive wastes . Philadelphia : ASTM , 1989 , PP .273 - 286.

[27] **Vénaut , M** . La pratique des ciments ,mortiers et bétons . Tome 1 : caractérisation de s coulis et mortiers 2 eme édition ; Paris : Edition du moniteur , 1989 , 284 P.

[28] **Vénaut , M** . La pratique du bétonnage . Pathologie et application , 2 eme édition ; Paris : Edition du moniteur , Vol . 2 1989 , 220 p .