

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

LABORATOIRE DE CONSTRUCTION ET ENVIRONNEMENT



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état
En Génie Civil

Thème :

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE TRAITEMENT ET DE LA
VALORISATION EN GENIE CIVIL D'UN DECHET
PETROLIER**

Proposé et dirigé par :

Mr. R. BOUTEMOUR

Mr .k. SILHADI

Présenté par :

Mr CHERIFI Toufik

Promotion 2003/2004

ENP : 10 avenue Hacène Badi, El Harrach, Alger

ملخص:

يتمحور بحثنا هذا حول إمكانية تثمين النافية الصناعية الجامدة الناجمة عن صهاريج التخزين لشركة نפטال الحراش و هذا من أجل الحفاظ على البيئة و محاربة الأضرار الناجمة عنها. بإستعمالنا للإسمنت الزفتي, فالخرسنة الزفتية المكونة من 30% من هذه النفاية قصد البحث عن أحسن صلابة, حيث أجريت تجارب كيميائية حول إنحلال المواد الضارة المتواجدة في هذه النفاية الداخلة في تركيب الخرسة و هذا للتأكد من ثباتها. هذه الدراسة إعطت نتائج مقبولة.

الكلمات المفتاحية:

نفاية صناعية, نفاية صلبة, التجمد/التثبيت, الخرسات, الخرسات الزفتية, التثمين.

Résumé :

Notre projet consiste à étudier la possibilité de valoriser un déchet industriel solide qui provient des cuves de stockage du carburant de l'unité NAFTAL d'El Harrach, et ceci dans un objectif de protéger l'environnement et lutter contre la pollution qui résulte de ce déchet. Avec un liant hydrocarboné, la formulation d'un grave bitume avec l'ajout de 30% de déchets a été adoptée pour la recherche d'une meilleure solidification (résistance mécanique). Des tests de lixiviation sont réalisés sur les éprouvettes confectionnées pour vérifier la stabilité des éléments polluants contenus dans le déchet. Cette étude a donné des performances acceptables.

Mots clés :

Déchets industriels, déchets solides, solidification, stabilisation, valorisation, grave bitume, enrobé.

Abstract :

Our project consist in studying the possibility of developing a solid industrial waste which comes from an oil cuves of the unity of NAFTAL El Harrach, and this in objective to protect the environment and to fight against the harmful effects which results from this wastes. With an bitumen binder, the formulation of grave bitumen with 30% incorporation wastes was applied in aim to search the best solidification (mechanical resistance). Test leaching is realized on the test-tubes of the worked out concretes to check the stability polluting element, contained in waste. This study has resulted an acceptable performance.

Key words :

Industrial waste, solid waste, solidification/stabilization, valorisation, grave bitumen, bituminous mix.

REMERCIEMENTS

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

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **K.SILHADI**, mon co-promoteur qui a eu la patience de suivre mon travail.

J'adresse ici mes vifs remerciements à Monsieur **A.LARIBI** qui m'a fait l'honneur de présider ce jury.

J'exprime également mes vifs remerciements à **M.BENSAIBI** et son extraordinaire équipe du laboratoire LCTP, messieurs **ATIK** (que Dieu ait pitié de son âme), **HAFNAOUI**, **MESSAOUD** ... pour l'aide qu'ils ont apportée à la réalisation de ce travail.

J'exprime ma profonde reconnaissance à Monsieur **S.BELKACEMI**, **R.KETTAB**, **M.MORSLI** ... enseignants de l'ENP pour leur aide et leur soutien.

Mes amis Lyassa, Malik, Sid Ahmed, Fayçal, Salim, Mounir, ... pour leur soutien indéfectible.

Dédicace

A mes chères parents
A Youcef, Med et Fatima zohra
A mes grands-pères
A toute la famille particulièrement khalti
Nadia, Khalil Rabah et amti Ouardia
A mes cousins et mes cousines Kaïssa, ...
A mes amis Fafçal, Salim, Malik, Sidahmed, Med,
Rachid, DIC, Nourdine, Didine, Tarek
Et la famille Bouzidi

Toufik

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 classification des filières de traitement des déchets	10
Tableau 2.1 : Liste des déchets à stabiliser	14
Tableau 2.2 – Critères d'admission des déchets ultimes	15
Tableau 3.1 Classement du béton bitumineux	20
Tableau 4.1 Refus cumules des fractions	26
Tableau 4.2 Complément a 100 % de refus cumules des fractions	26
Tableau 4. 3 Les résultats des poids spécifiques	31
Tableau 4.4 Appréciation de la résistance à la fragmentation	34
Tableau 4.5 résultats de Los-Angeles	34
Tableau 4.6 Appréciation de la dureté MICRO-DEVAL	35
Tableau 4.7 Les résultats des essais MICRO-DEVAL	35
Tableau 4. 8 L'essai de pénétrabilité	37
Tableau 4. 9 Essai de Point de ramollissement	37
Tableau 4. 10 Essai Point d'éclair « vase ouvert »	37
Tableau 4.11 L'analyse chimique de notre déchet	38
Tableau 4.12 des éléments constituant notre déchet	39
Tableau 4.13 Granulométrie du déchet	40
Tableau 4.14 les valeurs de module de richesse	43
Tableau 5.1 Résultats de formulation	49
Tableau 5.2 Composition granulométrique de Mélange	53
Tableau 5.3 résultats de l'essai DURIEZ avec différent pourcentage de déchets	54
Tableau 5.4 : Fluorescence des rayons X du déchet traité solide	58
Tableau 5.5 : composition chimique du lexiviat	59

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 cycle de vie du déchet	6
Figure 4. 1 courbe granulométrique de fraction 0/3	27
Figure 4. 2 courbe granulométrique de fraction 3/8	28
Figure 4. 3 courbe granulométrique de fraction 8/15	29
Figure 4.4 courbe granulométrique de fraction 15/25	30
Figure 4.5 spectre de diffraction des rayons X de la boue	39
Figure 4.6 Courbe granulométrique de déchet	41
Figure 4.7 armoire climatique	44
Figure 4.8 moule de l'essai duriez simple	45
Figure 4.9 moule de l'essai duriez dilate	45
Figure 4.10 moule de l'essai MARSHALL	46
Figure 4.11 Presse universelle	46
Figure 5.1 La courbe granulométrique du mélange	50
Figure 5.2 La résistance mécanique obtenue en fonction de la teneur en liant	51
Figure 5.3 La densité en fonction de la teneur en liant	53
Figure 5.4 La compacité et le pourcentage des vides en fonction de la teneur en liant	53
Figure 5.5 Pourcentage de gonflement et d'imbibition en fonction de la teneur en liant	53
Figure 5.6 Pourcentage d'affaissement en fonction de la teneur en liant	54
Figure 5.7 La résistance en fonction du pourcentage du déchet	56
Figure 5.8 Le rapport r'/R en fonction du pourcentage du déchet	57
Figure 5.9 La densité vraie et apparente en fonction du pourcentage de déchet	57
Figure 5.10 Pourcentage d'affaissement et de gonflement en fonction du pourcentage du déchet	58
Figure 5.11 pourcentage de vide occupé par le bitume en fonction du pourcentage du déchet	59
Figure 5.12 la compacité en fonction du pourcentage du déchet	59

SOMMAIRE

Remerciements	
Dédicaces	
Liste des tableaux	
Liste des figures	

INTRODUCTION	1
---------------------	----------

CHAPITRE I LA POLLUTION ET LA GESTION DES DECHETS

I.1. DEFINITION DE LA POLLUTION	3
I.1.1. Caractérisation de la pollution	3
I.1.2. Différents paramètres indicateurs de pollution d'une activité industrielle	4
I.2. GENERALITES SUR LES DECHETS	4
I.2.1 Approche réglementaire	4
I.2.2. Approche environnementale	5
I.2.3. Approche économique	5
I.2.4 Approche fonctionnelle	5
I.2.5 Impacts et nuisances engendrés par les déchets spéciaux	6
I.2.5.1 Modes d'apparition de la pollution	6
I.2.6. "Valeur" contenue dans les déchets	7
I.3 STRATEGIES DE GESTION ET FILIERES DE TRAITEMENT	8
1.3.1 Stratégies de gestion des déchets	8
I.3.2. Traitement interne et traitement externe	9
I.3.3 Filières de traitement	9
I.3.4 Procédés de traitement	10

CHAPITRE II GENERALITE SUR LE PROCEDE DE STABILISATION Et SOLIDIFICATION

II.1. GENERALITE SUR LE PROCEDE DE STABILISATION ET SOLIDIFICATION	11
II.1.1. Stabilisation par liants hydrauliques (chaux, ciment, alumine...)	11
II.1.2. Stabilisation par liant organique (bitume, plastique...)	11
II.1.3. Stabilisation par vitrification	12

II.2. PROCÉDE DE STABILISATION/SOLIDIFICATION PAR LIANTS HYDROCARBONES	12
II.2.1 Principes	12
II.2.2 Stabilisation/solidification des déchets	13
II.3. OBJECTIFS DE LA STABILISATION/SOLIDIFICATION DES DECHETS	14
II.4. CARACTERISATION DES DECHETS STABILISES/SOLIDIFIES	15

CHAPITRE III : GENERALITES SUR LES LIANTS, LES ENROBES ET LES CHAUSSEES

III.1. LES LIANTS	17
III.1.1 LES LIANTS HYDROCARBONES	17
III.1.1.1 LES GOUDRONS	17
III.1.1.1.1 Les goudrons bruts	17
III.1.1.1.2 Les goudrons étêtés (préparent)	17
III.1.1.1.3 Les goudrons rectifiés par mélange	17
III.1.1.1.4. Les goudrons polymérisés ou oxydés	17
III.1.1.1.5. Les goudrons reconstitués	17
III.1.1.2. LES BITUMES	18
III.1.1.2.1. Les bitumes purs	18
III.1.1.2.2. Les bitumes fluidifié cut-back	18
III.1.1.2.3. Les bitumes fluxés	18
III.1.1.2.4. Les bitumes composés	18
III.1.1.2.5. Les bitumes modifiés	19
III.1.1.2.6. Les émulsions de bitumes	19
III.2 LES ENROBES BITUMINEUX	19
III.2.1. Définition	19
III.2.2. La classification des enrobes bitumineux	19
III.2.2.1. Les enrobes denses	19
III.2.2.2. Les enrobes semis – denses	19
III.2.2.3. Les enrobes ouverts	19
III.2.2.3.1. Le béton bitumineux (BB)	19
III.2.2.3.2. Les graves bitumes (GB)	20
III.2.3. LES QUALITES EXIGEES DES ENROBES BITUMINEUX :	20
III.2.3.1. La stabilité	20
III.2.3.2. La flexibilité	21
III.2.3.3. L'absence de sensibilité a l'eau	21
III.2.3.4. La durabilité	21
III.3. LA CHAUSSÉE	22
III.3.1. La couche de surface	22
III.3.2. La couche intermédiaire	22
III.3.3. La couche de fondation	22
III.3.4. La sous-fondation	22

III.3.5. La plate-forme (sol d'appui)	22
III.3.6. La plate-forme (sol d'appui) améliorée	22
III.3.7 La couche d'impression au bitume	22
III.3.8. La couche de nivellement	22
III.3.9. Le recouvrement	23
III.3.10. L'enduit d'accrochage	23
III.3.11. Le macadam	23
 CHAPITRE IV : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET METHODES D'ESSAIS	
IV.1. CARACTERISATION DES AGREGATS	24
IV.1.1. L'échantillonnage des matériaux	24
IV.1.1.1 But de l'opération	24
IV.1.1.2. Préparation de l'échantillon	24
IV.1.1.3 Le quartage	25
IV.1.1.4. Les échantillonneurs	25
IV.1.1.5. Poids de l'échantillon	25
 IV.1.2. La granulométrie	 25
IV.1.2.1 La courbe granulométrique	25
IV.1.2.2. Résultats	26
 IV.1.3. Poids spécifiques de l'agrégat	 31
IV.1.3.1. Définition	31
IV.1.4. Fuseau granulométrique	31
IV.1.4.1 Définition du fuseau granulométrique	32
IV.1.4.1 .1 La propriété superficielle.	32
IV.1.4.1.2 Opération lavage et séchage	32
IV.1.5. Equivalent de sable	33
IV.1.5.1. Principe de l'essai	33
IV.1.5.2. Les résultats d'essai	33
IV.1.6. La résistance mécanique	34
IV.1.6.1. La résistance a la fragmentation (Los-Angeles)	34
IV.1.6.1.1 méthode d'essai	34
IV.1.6.1.2 Les résultats d'essai	34
IV.1.6.2. La résistance à l'attrition et à l'usure (Micro-Deval)	35
IV.1.6.2.1 méthode d'essai	35
 IV.1.7 CONCLUSION	 35
 IV.2. ETUDE DES BITUMES	 36
IV.2 .1 Principaux liants utilisés en Algérie	36
IV.2 .2. les essais sur les bitume	36
IV.2.2.1. L'essai de pénétration	36
IV.2 .2.2 L'essai de ramollissement	36
IV.2 .2.3. L'essai (bille anneau)	36
IV.2 .2.4. Le point d'éclair, point de flamme	37
IV.2 .2.5. La ductilité	37
IV.2.3 les essais effectués au laboratoire	37

IV.2.4. Conclusion	
IV.3. ETUDE DU DECHET	38
IV.3.1 Caractérisation du déchet	38
IV.3.2 Composition élémentaire de la boue	38
IV.3.3 Spectre de diffraction des rayons X de la boue	39
IV.3.. Dangers provenant des boues	40
IV.3.4. L'analyse granulométrique de déchet	40
IV.4. FORMULATION DE L'ENROBE	42
IV.4.1. Méthodologie de formulation d'un enrobe	42
IV.4.2. Méthode du L.C.P.C	42
IV.4.3. Méthode de calcul de la surface spécifique et teneur en liant	42
IV.4.3.1. Calcul de la surface spécifique du granulat	42
IV.4.3.2 Teneur en liant hydrocarboné	43
IV.4.4. Les essais sur les enrobes bitumineux	43
IV.4.4.1. Mode opératoire de l'essai d'adhésivité TWIT (NF 66 008)	43
IV.4.4.2. L'essai DURIEZ de compression simple (dilata)	44
IV.4.4.2.1. But de l'essai	44
IV.4.4.2.2. Principe de l'essai	44
IV.4.4.3. L'essai Marshall	45
IV.4.4.3.1. But de l'essai	45
IV.4.4.3.2. Principe de l'essai	45
IV.5 CONCLUSION	46
IV.6 ESSAI DE LIXIVIATION	47

CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

V.1. ETUDE DE FORMULATION SANS DECHET	48
V.1.1 La courbe granulométrique du mélange	48
V.1.2. Etude de formulation	49
V.1.2.1. La résistance mécanique obtenue en fonction de la teneur en liant	49
V.1.2.2 La densité en fonction de la teneur en liant	50
V.1.2.3. La compacité et le pourcentage des vides en fonction de la teneur en liant	51
V.1.2.4. Pourcentage de gonflement et d'imbibition en fonction de la teneur en liant	51
V.1.2.5. Pourcentage d'affaissement en fonction de la teneur en liant	52
V.1.3. Conclusion	52
V.2. ETUDE DE FORMULATION AVEC DECHET	53
V.2.1 Composition granulométrique du mélange	53
V.2.2 Les résultats d'étude de formulation avec déchet	53
V.2.2.1. La résistance en fonction du pourcentage du déchet	54
V.2.2.2. Le rapport r/R en fonction du pourcentage du déchet	55
V.2.2.3. La densité vraie et apparente en fonction du pourcentage de déchet	55
V.2.2.4. Pourcentage d'affaissement et de gonflement en fonction du pourcentage du déchet	56

V.2.2.5 Pourcentage de vide occupé par le bitume en fonction du pourcentage du déchet	57
V.2.2.6 La compacité en fonction du pourcentage du déchet	57
V.2.3 CONCLUSION	58
V. 3 ESSAI DE LIXIVIATION	58
CONCLUSION GENERALE	59
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

**ANNEXE A : LES RESULTATS DETAILLES DE L'ETUDE DE
FORMULATION SANS DECHET**

**ANNEXE B : LES RESULTATS DETAILLES DE L'ETUDE DE
FORMULATION AVEC DECHET**

INTRODUCTION GENERALE

Toute activité tendant à utiliser que la partie noble de la matière à des fins de production ou de consommation se traduit par le rejet de la partie moins noble. On parle alors de **déchet**.

Pendant de nombreuses années, on a cru qu'il suffisait de stocker cette matière à l'écart pour qu'elle disparaisse définitivement. Hélas, c'était sans compter avec l'environnement au sein duquel des phénomènes incessants de natures chimique, biologique, voire météorologique finissent par entraîner et transformer le déchet ou certains de ses composants. Les plus nocifs d'entre eux ont alors un effet négatif sur l'homme ou l'environnement lui-même. Le déchet se retrouve alors au rang des accusés : ***Il pollue***.

Récemment, l'homme a aussi pris conscience du caractère limité de ses ressources. L'énergie, mais aussi les matières premières ne sont pas inépuisables. Alors les soupçons se tournent à nouveau vers le déchet. Deuxième chef d'inculpation : ***il serait responsable d'une bonne partie du gaspillage***.

De ces deux délits sont nées bien des réactions passionnelles mais aussi des actions visant à réduire le caractère polluant de nos rejets ou à récupérer une partie de la matière ou de l'énergie qu'ils contiennent. Traitement de détoxification et valorisation sont donc (ou devraient être) maintenant les principales solutions envisagées pour nos déchets. De nombreux chercheurs ont travaillé sur le sujet, de nombreux procédés ont été inventés ou adaptés, de nombreuses entreprises ont été créées en vue du traitement des déchets, tant et si bien que le producteur de déchets a maintenant ... ***l'embaras du choix***.

Nous nous intéresserons ici exclusivement aux déchets industriels, et plus particulièrement à une catégorie d'entre eux : ***les déchets industriels spéciaux***. Bien qu'ils ne représentent pas le tonnage le plus important, ces déchets constituent la menace la plus lourde pour l'environnement en raison de leur caractère toxique ou dangereux. De nature et de composition très diverses, ils constituent aussi la catégorie de déchets pour laquelle l'éventail des solutions est le plus large, et donc aussi celle pour laquelle le choix d'une solution devrait être le plus difficile.

La protection de l'environnement est devenue un enjeu majeur pour l'avenir de notre planète, la récupération des déchets représente une des solutions la plus adaptée pour l'atténuation des impacts négatifs des activités industrielles sur l'environnement.

Le devenir des déchets solides est une des préoccupations auxquelles les pouvoirs publics Algériens commencent à accorder l'importance qu'elle mérite, la preuve en est l'adoption de la loi N°01-19 du 12/12/2001 relative à la gestion au contrôle et à l'élimination des déchets.

La valorisation des déchets et des sous produits est une solution supplémentaire qui favorise l'aspect économique.

Les stratégies de valorisation de déchets en produits eco-compatible contribuent directement à la bonne gestion des déchets ; leur mise en œuvre concrète passe par un certain nombre de filières techniques s'articulant autour des objectifs généraux dont le plus répandu est la valorisation en science des matériaux.

Une des préoccupations de l'entreprise SONATRACH (particulièrement ses filiales NAFTAL....), du point de vue de la protection de l'environnement est la gestion, le traitement ou l'élimination des déchets issus de ses différentes activités pétrolières (dont le stockage du carburant).

Sur proposition de NAFTAL, le laboratoire de construction et environnement (**LCE**) du département de Génie Civil à l'aide du concours du **LCTP** à lancés une étude concernant le traitement puis la valorisation dans le domaine du Génie Civil des déchets issus du nettoyage des bacs de stockage du carburant.

Ces boues, de part leur toxicité, et selon la nouvelle réglementation en vigueur, doivent être gérer convenablement et ne doivent surtout pas être rejetés dans la nature.

Aussi notre travail consiste d'abord à élaborer un traitement adéquat à ces boues, en utilisant le procédé solidification-stabilisation à l'aide d'un liant hydrocarboné puis rechercher une valorisation du matériau traité notamment dans le domaine du Génie Civil.

En effet au vu de la nature du déchet et du liant utilisé, le matériau élaboré pourrait trouver une utilisation en tant qu'élément de chaussées.

Le travail présenté dans ce projet de fin d'études est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre traite les aspects de la pollution engendrée par les déchets, et de la gestion de ces derniers.

Les généralités sur le procédé de traitement choisi sont abordées dans le deuxième chapitre, alors que le troisième traite des généralités sur les liants, les enrobés et les chaussées.

Le quatrième chapitre aborde les caractérisations des matériaux utilisés et les méthodes d'essais suivés.

Les résultats obtenus et les interprétations établit sont consignés dans le cinquième chapitre.

I.1. DEFINITION DE 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 ». [1]

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'effet direct ou indirect 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 » [1]

I.1.1. CARACTERISATION 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.

I.1.2. Différents paramètres indicateurs de pollution d'une activité industrielle :

L'industrie constitue la source de pollution la plus connue. 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 lesquels nous citons particulièrement les métaux lourds et les hydrocarbures.

I.2. GENERALITES SUR LES DECHETS :

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

Pour éviter les malentendus, les différents acteurs impliqués dans la gestion de l'environnement ont tenté de donner une définition au mot déchet. Il existe en réalité plusieurs définitions qui correspondent chacune à un objectif particulier. Chaque définition vise pour un groupe d'acteur à établir l'ensemble des objets qui devront faire l'objet d'un comportement particulier ou d'une attention particulière, mais c'est en dernier lieu la définition légale qui devra servir de référence.[2]

I.2.1. 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. [3]

L'Algérie a mise en place un certain nombre de lois et décrets relatifs à cette fin et qui obligent les générateurs et/ou détenteurs de déchets de les valoriser.

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

En plus de cette loi qui définit le déchet, l'Algérie possède d'autres lois et décrets relatifs à la protection de l'environnement telle 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.2.2. 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.2.3. Approche économique :

Sur le plan économique, un déchet est une matière ou un objet dont la valeur économique est nulle ou négative pour son détenteur à un moment et dans un lieu donné [4]. 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.2.4. 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 ("desirable outputs") et indésirables ("undesirable outputs") [5] 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.

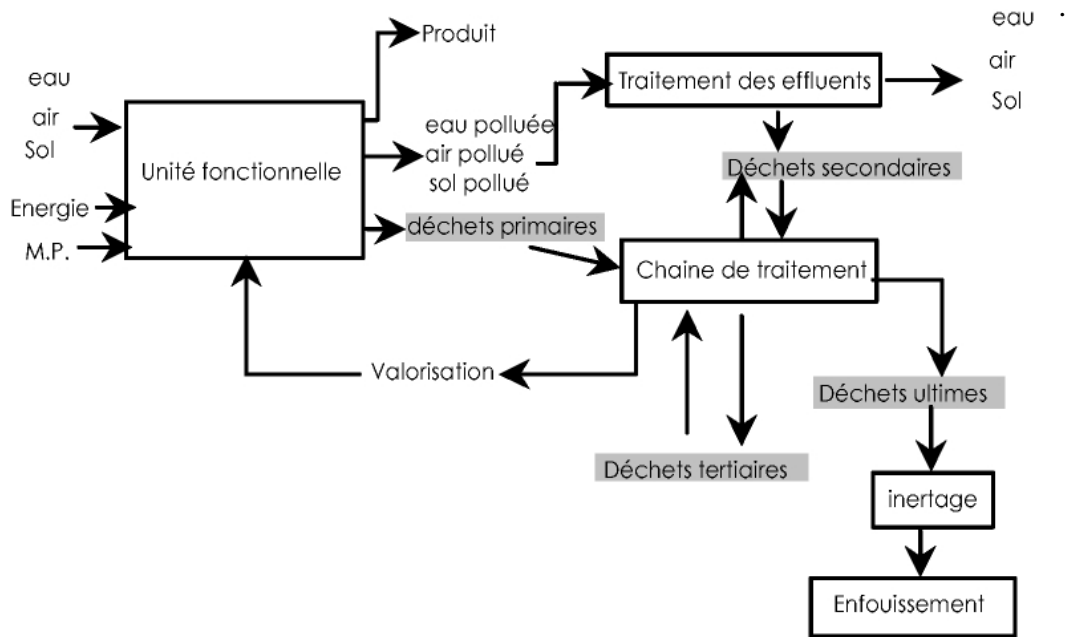


Figure 1.1 cycle de vie du déchet

I.2.5. Impacts et nuisances engendrés par les déchets spéciaux :

Les déchets, leur abandon ou leur traitement 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.2.5.1. 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, écologique, 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) [6] 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 biologiques qu'elles abritent.

I.2.6. "Valeur" contenue dans les déchets :

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 de 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.

I.3. STRATEGIES DE GESTION ET FILIERES DE TRAITEMENT :

Les principaux objectifs poursuivis à travers le traitement des déchets

- ❖ 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.

1.3.1. Stratégies de gestion des déchets :

Il existe cinq stratégies de gestion des déchets : selon Navarro [7]

➤ **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

- ❖ réduction des nuisances et des impacts,
- ❖ 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 co-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.

I.3.2. 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 [8]

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

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

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

I.3.3 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 [7] a ainsi proposé une classification des filières à plusieurs niveaux (Tableau I.1) qui fait essentiellement apparaître les objectifs du traitement et la nature du déchet visé.

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
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	

Tableau I.1 classification des filières de traitement des déchets

I. 3.4 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. L'Ademe a publié récemment un catalogue [8] des procédés de traitement des déchets industriels qui fait intervenir une liste de 68 procédés.

Après avoir énumérer les méthodes et les procédés de traitement des déchets, on a opté pour le traitement de notre déchet qui est de nature pétrolier par le procédé de stabilisation/solidification, aussi on présente dans le chapitre suivant présente les généralités sur ce procédé.

II.1. GENERALITES SUR LE PROCEDE DE STABILISATION SOLIDIFICATION :

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 consiste à réduire le potentiel polluant des déchets ultimes en immobilisant les éléments potentiellement dangereux dans une matrice solide. Le risque de dispersion de polluant dans l'environnement, principalement par solubilisation, est alors limité au maximum.

La solidification a pour objectif d'améliorer les propriétés physiques du déchet pour faciliter par exemple son stockage.

Techniques principales de Stabilisation :

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

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

II.1.1. Stabilisation par liants hydrauliques (chaux, ciment, alumine...) :

Cette technique dite "à froid" est basée sur une réaction chimique entre le polluant, le liant et l'eau. L'eau, qui est soit présente dans le déchet, soit ajoutée dans le processus 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.

Les avantages et les inconvénients de stabilisation par liants hydrauliques

ATOUS	LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> • Mise en oeuvre 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

II.1.2. Stabilisation par liant organique (bitume, plastique...) :

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 fluidiser le liant organique. Les avantages et les inconvénients de stabilisation par liant organique

ATOUS	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...)

II.1.3. Stabilisation par vitrification :

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 avantages et les inconvénients de stabilisation par vitrification

ATOUS	LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> • Importantes 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

II.2 PROCEDES DE STABILISATION/SOLIDIFICATION PAR LIANTS HYDROCARBONES :

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.

II.2.1 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 [9]:

➤ **La solidification :**

Le mélange déchet-réactifs doit faire prise dans le temps afin d'obtenir une masse solide.

Ce processus permet une transformation du déchet en un solide massif sans modification du potentiel intrinsèque de danger du déchet. Le but est de conférer au déchet une structure physique massive afin de limiter au maximum la possibilité de sa dispersion dans l'environnement. En effet plus la perméabilité du déchet solidifié est faible et sa surface exposée petite, plus la migration des espèces chimiques solubles est ralentie durant la lixiviation. Ce résultat est obtenu en utilisant des liants hydrocarbonés et/ou en activant le déchet si celui-ci est hydrocarboné réactif.

➤ **La stabilisation :**

Les espèces chimiques présentes dans le déchet doivent être immobilisées.

Ce processus consiste en une rétention physique et/ou chimique des espèces polluantes dans une matrice solide. En ajoutant les réactifs adéquats, certaines espèces, selon leur nature chimique, peuvent être transformées en composés peu solubles ou retenues par des mécanismes d'adsorption ou d'échange d'ions [10] et par d'autres réactions chimiques. La stabilisation fait donc appel à l'ensemble des traitements physico-chimiques.

Le produit de ces deux fonctions peut limiter la dispersion de polluants dans le milieu naturel. Un des procédés les plus utilisés actuellement consiste à incorporer les déchets ultimes dans (liants hydrocarboné) qui réalisent en même temps *Stabilisation et Solidification*

II.2.2 Stabilisation/Solidification des déchets :

Depuis de nombreuses années les procédés de stabilisation/solidification des déchets (à dominante minérale essentiellement) à l'aide des liants hydrocarboné, ont été largement pratiqués. En France les déchets à stabiliser/solidifier avant leur mise en décharge ont été définis en deux catégories par l'arrêté du 18 décembre 1992, art. 7 et 8 modifié le 18 février 1994, classées dans le Tableau 1.

Catégorie	Déchets à stabiliser
<p style="text-align: center;">A</p> <p style="text-align: center;">Déchets devant être stabilisés avant stockage depuis le 30 mars 1995</p>	<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)
<p style="text-align: center;">B</p> <p style="text-align: center;">Déchets devant être stabilisés avant stockage depuis le 30 mars 1998</p>	<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

Tableau 2.1 : Liste des déchets à stabiliser [11]

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 pétrolier (les boues)

II.3. OBJECTIFS DE LA STABILISATION/SOLIDIFICATION DES DECHETS :

La législation fixe comme suit les critères d'admission des déchets ultimes en centre de stockage :

« 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 ».

Caractéristique	Critère d'acceptation
PH	compris entre 4 et 13
Siccité	> 35%
Fraction soluble	< 10%
DCO	< 2 000 mg/kg
Phénols	< 100 mg/kg
Cr ⁶⁺	< 5 mg/kg
Cr	< 50 mg/kg
Pb	< 50 mg/kg
Zn	< 250 mg/kg
Cd	< 25 mg/kg
CN	< 5 mg/kg
Ni	< 50 mg/kg
As	< 10 mg/kg
Hg	< 5 mg/kg

Tableau 2.2 – Critères d'admission des déchets ultimes [12]

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.

II .4. 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.

Notre déchet étant de nature pétrolier il sera traité par solidification / stabilisation, en utilisant un liant hydrocarboné tout en recherchant à le valoriser en tant qu'enrobé bitumineux utilisé dans la chaussée

Le chapitre suivant présente quelques généralités sur les liants hydrocarbonés, les enrobés et les chaussées.

III.1. LES LIANTS

III.1.1. LES LIANTS HYDROCARBONES :

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

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

III.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 la construction routière, une classification de ces liants était établie au début et qui était la suivante:[13]

III.1.1.1.1. 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 par fois en première couche car ils ont une bonne qualité d'accrochage.

III.1.1.1.2. Les goudrons étêtés (préparent) :

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.

III.1.1.1.3. Les goudrons rectifiés par mélange :

Ils permettent d'améliorer des goudrons insuffisants, aux quels on a fait subir un commencement de préparation, soit par simple étêtage, soit par apport de brai.

III.1.1.1.4. Les goudrons polymérisés ou oxydés :

Ils sont obtenus à partir des goudrons bruts par chauffage de ces derniers, pour qu'ils deviennent plus visqueux.

III.1.1.1.5. Les goudrons reconstitués :

Ils représentent la quasi-totalité des goudrons routiers. Ils sont recomposés à partir de produits et de résidus de distillation.

Comme il existe des goudrons composés comportant plus de 50 % de goudron, et le reste de bitume pur.

III.1.1.2. LES BITUMES :

Ce sont des mélanges solides, semi-solides ou liquides très complexes d'hydrocarbures, 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 [13].

III.1.1.2.1. 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
- Aussi il existe le bitume 60/70

III.1.1.2.2. Les bitumes fluidifié cut-back :

Ils sont fabriqués à base de bitume pur qui est généralement le bitume 80/100, au quel on ajoute un solvant (kérosène, huiles légères) à leur composition 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 normalisé à une température normalisée, on distingue:
 - ❖ 0/1 et 10 /15 Utilisées en couche d'imprégnation;
 - ❖ 150/250, 400/600 et 800/1400 utilisées en enduits superficiels.

III.1.1.2.3. 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.

III.1.1.2.4. Les bitumes composés :

Ils comportent au moins 50 % de bitumes et se subdivisent en :

- Bitumes-goudron : mélange de bitumes pur et de goudron houille.
- Bitumes-brais : mélange de bitume pur et de brai houille.

III.1.1.2.5. Les bitumes modifiés :

Ce sont les bitumes précédents avec ajout de substances le plus fréquemment macromoléculaires. Ils sont appelés bitumes polymères.

III.1.1.2.6. 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 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 granulats et le pourcentage des différents constituants:

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

Tableau 3.1 Classement du béton bitumineux

- La structure grossière, pour les couches de base les routes à trafic lourd.
- La structure moyenne et fine, pour les couches de roulement.

III.2.2.3.2. Les graves bitumes (GB) :

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

Pour un grave bitume, la dimension maximale les gros éléments sont :

- $14 \text{ mm} \leq D \leq 20 \text{ mm}$ 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 QUALITES EXIGEES DES ENROBES 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 stabilité 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 meilleures 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.

III.3. LA CHAUSSÉE :[13]

III.3.1. La couche de surface :

Couche supérieure d'un pavage en bitume, quelquefois appelée couche d'usure ou couche de roulement.

III.3.2. La couche intermédiaire :

Couche entre la couche de fondation et la couche de surface, quelquefois appelée couche de liaison.

III.3.3. La couche de fondation :

Couche de matériaux immédiatement en dessous de la couche de surface ou de liaison. Elle peut être composée de pierre concassée, de laitier concassé, de gravier et de sable concassés ou non, ou de la combinaison de ces matériaux. Elle peut aussi être liée avec du bitume.

III.3.4. La sous-fondation :

Couche immédiatement placée sous la couche de fondation. Si le sol de fondation est d'une qualité adéquate, il peut servir de sous-fondation.

III.3.5. La plate-forme (sol d'appui) :

Sol préparé pour supporter la structure du pavage. C'est la fondation du pavage. On l'appelle aussi le sol de fondation.

III.3.6. La plate-forme (sol d'appui) améliorée :

Sol de fondation qui est amélioré en une plate-forme de travail par l'une des 2 méthodes suivantes:

1. Par incorporation de matériaux pulvérulents ou de stabilisateurs comme le bitume, la chaux ou le ciment portland.
2. Par l'utilisation d'une ou de plusieurs couches de matériaux bien choisis ou améliorés qu'on place sur le sol au-dessous de la structure du pavage.

III.3.7. La couche d'impression au bitume :

Application d'un produit bitumineux liquide de faible viscosité sur une surface absorbante. Elle est utilisée pour préparer une fondation non traitée à recevoir une couche de bitume. Le produit bitumineux pénètre dans la fondation, bouche ses vides, durcit et facilite l'adhérence avec la couche bitumineuse sus-jacente.

III.3.8. La couche de nivellement :

Couche (mélange d'agrégat et de bitume) ayant une épaisseur variable qu'on utilise pour éliminer les irrégularités dans le profil d'une surface existante avant d'appliquer un traitement ou d'autres couches.

III.3.9. Le recouvrement :

Une ou plusieurs couches bitumineuses sur un pavage existant. Le recouvrement comprend généralement une couche de nivellement pour corriger le profil de l'ancien pavage, puis une ou plusieurs couches uniformes jusqu'à l'épaisseur requise.

III.3.10. L'enduit d'accrochage :

Application très légère d'un bitume, normalement une émulsion diluée avec de l'eau. Elle est utilisée pour assurer une liaison entre la surface à paver et la couche sus-jacente.

III.3.11. Le macadam :

Type de pavage dans lequel on utilise un gros agrégat à granulométrie serrée qui est normalement obtenu par le concassage et le criblage de la pierre, du laitier ou du gravier. Un tel agrégat est appelé agrégat type macadam. Le bitume peut être incorporé dans l'agrégat type macadam soit par pénétration, soit par malaxage.

IV.1. CARACTERISATION DES AGREGATS :

La nature minéralogique des agrégats influe essentiellement sur leur mode de rupture lors de concassage, sur leur forme ainsi que sur leur adhésivité avec le bitume. Le matériau enrobé bitumineux utilise jusqu'à 95% environ d'agrégats dont les caractéristiques intrinsèques (forme, nature, dureté, granulométrie, etc.) ont une influence certaine sur le comportement des enrobés bitumineux.

C'est à travers les granulats que sont transmises la plupart des contraintes, aussi bien statiques que dynamiques, induites par le trafic routier. De leur qualité, leur homogénéité leur permanence (dans le temps) dépend en partie la durabilité de la route.

Les spécifications des granulats routiers en Algérie :

L'industrie des granulats destinés à la viabilité apparaît sous des aspects fort diversifiés, selon:

- La nature des gisements généralement assez hétérogènes qui peuvent être constitués soit des matériaux meubles - alluvionnaires pour la plupart, soit de roches massives. Ces derniers incluant des calcaires durs surtout utilisés pour la production des bétons.
- Le type, la complexité et la taille de l'installation, l'efficacité de celle-ci étant souvent d'autant meilleure que son importance est plus grande

IV.1.1. L'ECHANTILLONNAGE DES MATERIAUX : [14]

Les carrières de provenance et de prélèvement des agrégats utilisés dans cette étude sont :

- ❖ pour les fractions 15/25 ; 8 /15 et 3/8 : BOUGARA
- ❖ pour le sable 0/3 : KEDARA

IV.1.1.1. But de l'opération:

Les essais des matériaux s'effectuent sur des quantités de matériaux très restreints. Il faut donc pour que les résultats d'essais soient applicables que l'échantillon utilisé soit représentatif du matériau à étudier.

Le but de l'échantillonnage est donc de conduire au prélèvement d'une fraction représentative de tout le matériau envoyé au laboratoire.

Nous admettons par ailleurs que ce matériau envoyé au laboratoire représente bien le matériau à étudier.

L'échantillonnage s'effectue de deux manières :

- Par quartage (ou fractionnement manuel).
- Ou au moyen d'échantillonneur. (Fractionnement mécanique).

IV.1.1.2. Préparation de l'échantillon:

Au cours de l'échantillonnage du matériau sec, les éléments fins risquent d'être perdus. Ces éléments ayant une grande importance dans les propriétés des matériaux. On humidifiera légèrement le matériau de façon à éviter la formation de poussière.

IV.1.1.3. Le quartage:

- Opérer sur plaque métallique de grande dimension.
- Mélanger le matériau à la pelle
- Constituer un tas qui sera ensuite étalé
- Séparer le tas en quatre (4) parties et prélever les parties opposées.
- Refaire l'opération si la quantité obtenue est insuffisante

IV.1.1.4. Les échantillonneurs :

Ce sont des appareils qui séparent la quantité de matériau versée en deux parties égales. Le choix de la largeur entre les dents, dépend de la dimension des plus gros éléments du matériau à analyser.

Quand la quantité obtenue est trop importante, on recommence l'opération.

IV.1.1.5. Poids de l'échantillon:

Le poids de l'échantillon à analyser dépend des dimensions et des pourcentages des éléments. Les éléments les plus gros qu'il contient. Il est recommandé de se tenir dans les limites définies par la formule suivante : **$200 D < P < 600 D$** .

D'où P est le poids de l'échantillon exprimé en gramme et D la dimension maximum exprimés en mm des plus gros éléments. C'est à dire le tamis, à travers lequel passent les plus gros éléments.

IV.1.2. LA GRANULOMETRIE:[15]

La granulométrie permet de classer, et de définir d'après la grosseur des grains qui les composent, les différents matériaux employés dans la construction routière.

Pour effectuer ce classement on se sert de tamis et de passoires, par définition, un tamis comporte des mailles carrées constituées par des fils qui se croisent, et une passoire comporte des trous ronds, pratiqué dans une tôle.

A noter cependant que la tendance actuelle des ponts et chaussées est d'utiliser des tamis à mailles carrées pour toutes les dimensions même les plus grandes. Ce qui évite ambiguïté.

Un matériau se compose donc de grains de diverses grosseurs, qu'il faut classer. Pour cela on utilise la courbe granulométrique.

IV.1.2.1. La courbe granulométrique:

En abscisse on porte les dimensions des tamis et passoire, les dimensions décroissant de la gauche vers la droite. Mais pour que les petites dimensions ne soient pas trop resserrées et soient lisibles, on adopte une échelle logarithmique. On porte d'ailleurs sur le graphique une double échelle tamis et passoires en respectant l'équivalence (exemple tamis 4 mm équivalent à une passoire $4 \times 1.25 = 5$ mm)

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

IV.1.2.2. Résultats : La granulométrie établie pour les différentes fractions, est représentée dans le tableau suivant :

Poids Total (g)		Fraction 0/3	Fraction 3/8	Fraction 8/15	Fraction 15/25
		1083	1600	3000	5000
Tamis (mm)	20	0	0	20	2347
	16	0	0	155	4570
	12,5	0	0	1345	4982
	10	0	20	2380	4982
	8	0	120	2900	4982
	6,3	24,00	480	2960	4982
	5	43,00	700	2965	4982
	4	82,00	1044	2967	4982
	2	266,00	1421	2968	4982
	1	505,00	1493	2969	4982
	0,5	688,00	1523	2970	4982
	0,4	722,00	1528	2971	4982
	0,315	762,00	1531	2972	4982
	0,2	819,00	1538	2973	4982
	0,1	883,00	1548	2974	4982
0,08	902,00	1558	2975	4982	

Tableau 4.1 Refus cumules des fractions

Dans le tableau 4.2 suivant on donne le complément a 100% de refus cumules des fractions :

Les fractions		Fraction 0/3	Fraction 3/8	Fraction 8/15	Fraction 15/25
Tamis (mm)	20	100,00	100,00	99,33	53,06
	16	100,00	100,00	94,83	8,60
	12,5	100,00	100,00	55,17	0,36
	10	100,00	98,75	20,67	0,36
	8	100,00	92,50	3,33	0,36
	6,3	97,78	70,00	1,33	0,36
	5	96,03	56,25	1,17	0,36
	4	92,43	34,75	1,10	0,36
	2	75,44	11,19	1,07	0,36
	1	53,37	6,69	1,03	0,36
	0,5	36,47	4,81	1,00	0,36
	0,4	33,33	4,50	0,97	0,36
	0,315	29,64	4,31	0,93	0,36
	0,2	24,38	3,88	0,90	0,36
	0,1	18,47	3,25	0,87	0,36
0,08	16,71	2,63	0,83	0,36	

Tableau 4.2 Complément a 100 % de refus cumules des fractions

Courbe granulométrique pour la fraction 0/3

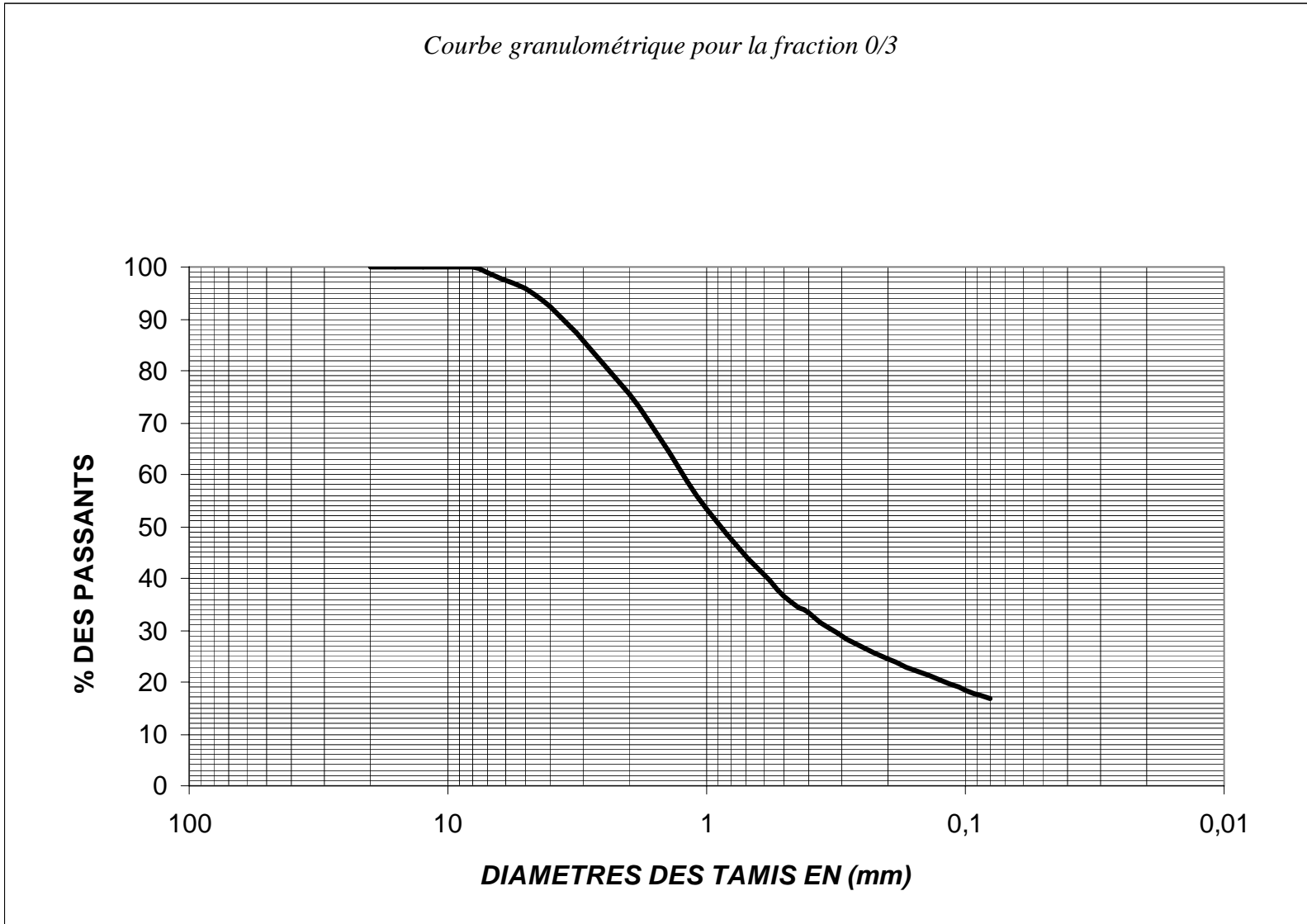


Figure 4. 1 courbe granulométrique de fraction 0/3

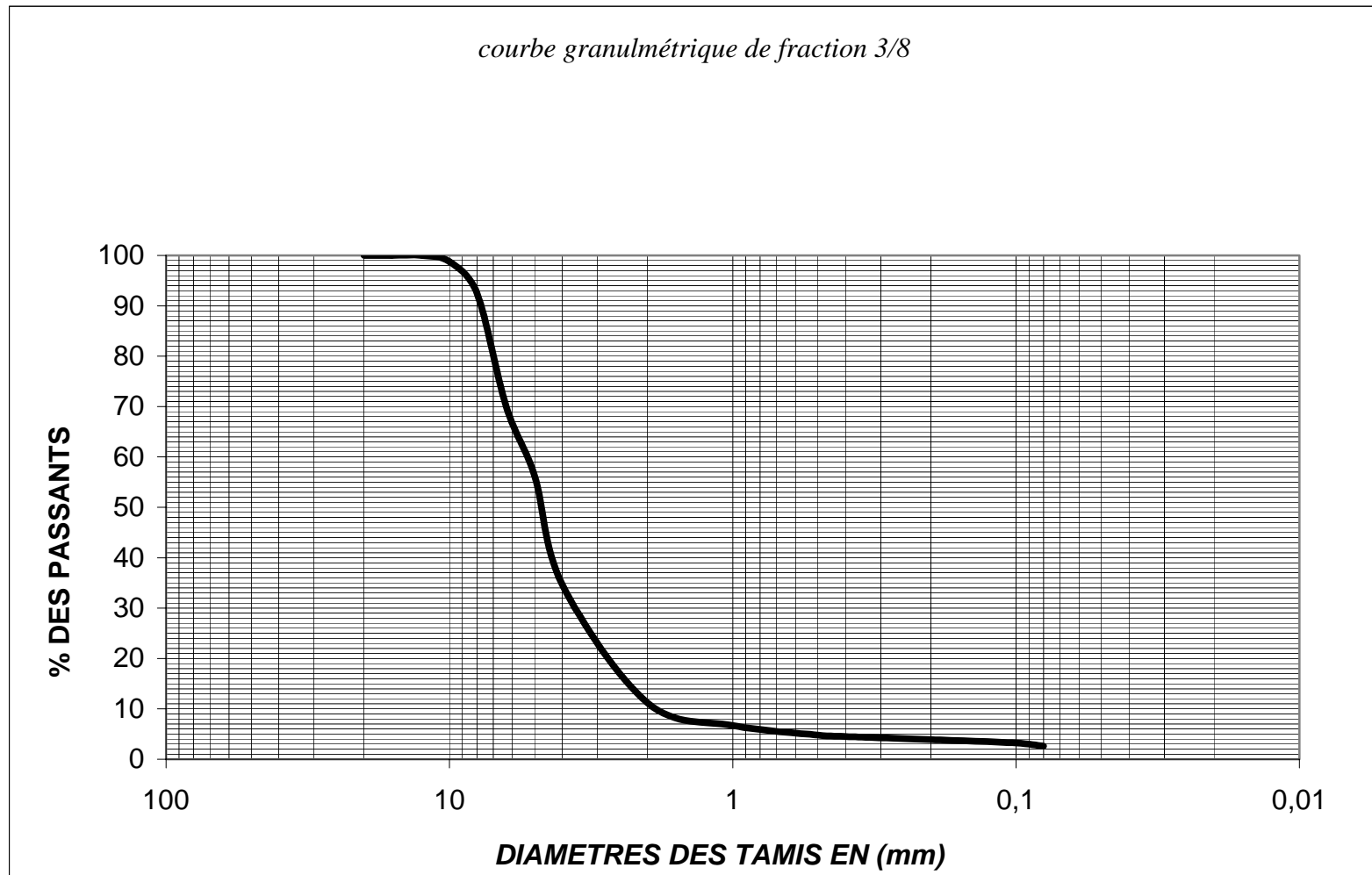


Figure 4. 2 courbe granulométrique de fraction 3/8

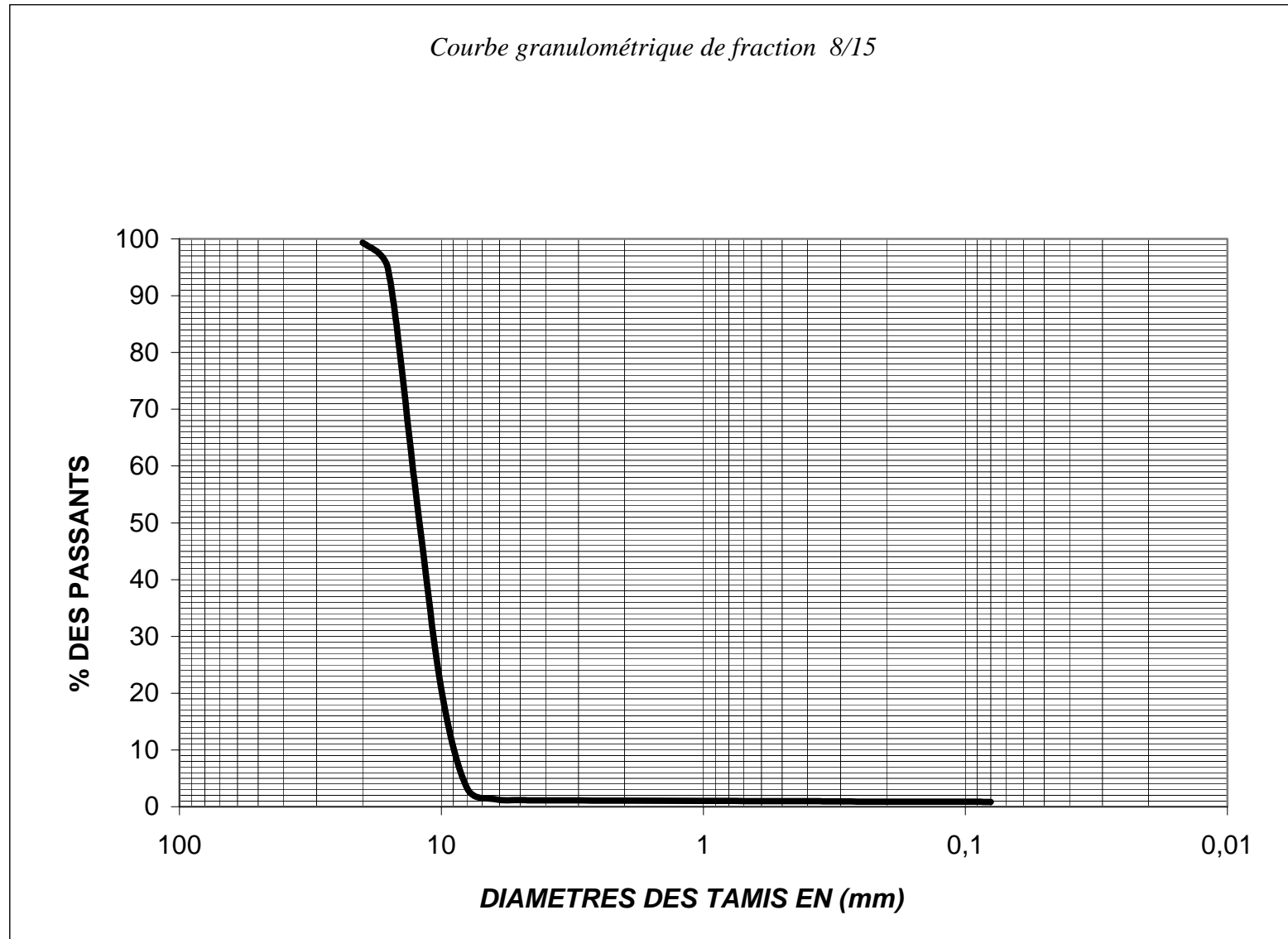


Figure 4. 3 courbe granulométrique de fraction 8/15

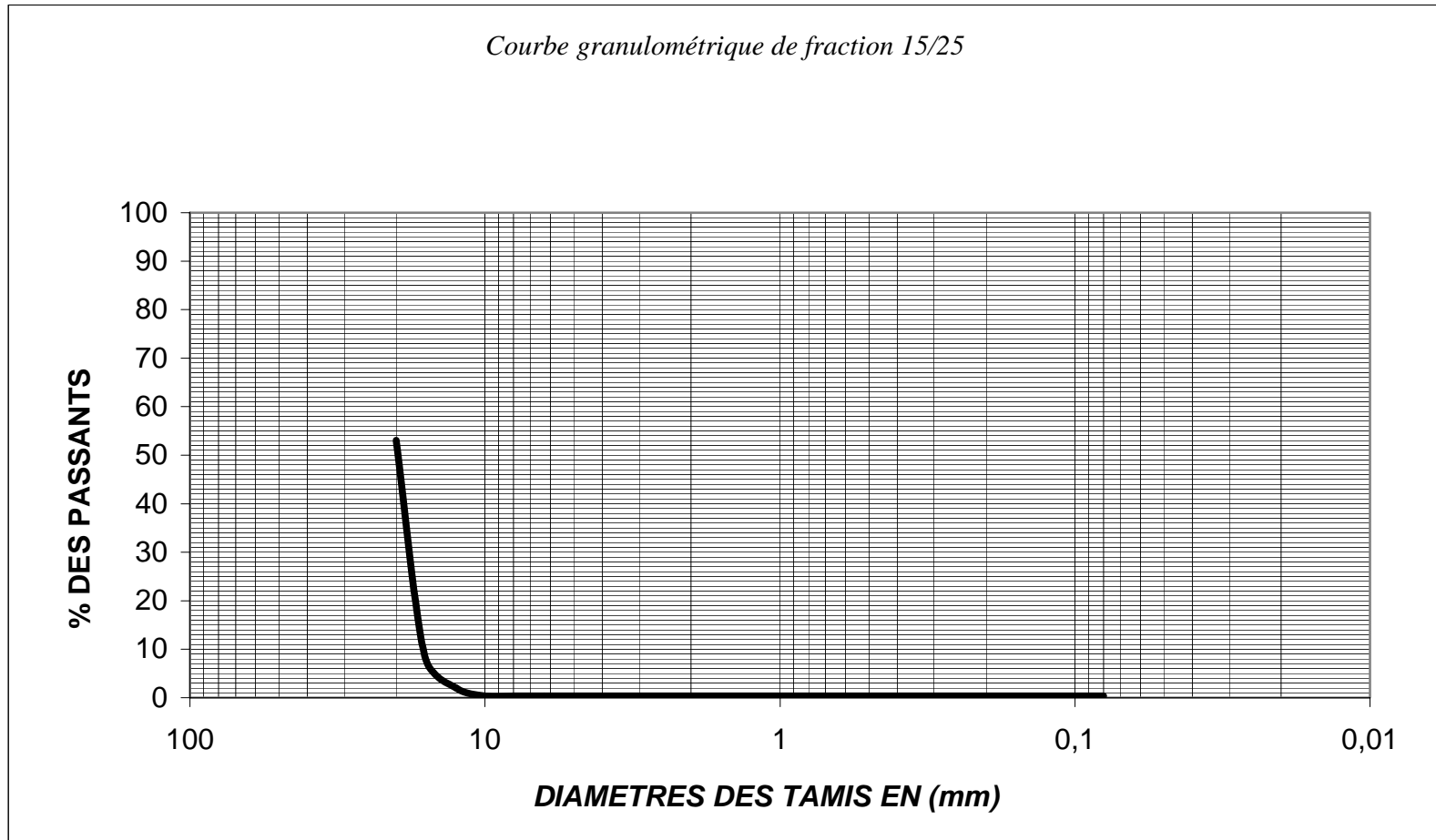


Figure 4.4 courbe granulométrique de fraction 15/25

IV.1.3. POIDS SPECIFIQUES DE L'AGREGAT:

IV.1.3.1. DEFINITION :

Le poids spécifique ou poids volumique qui dépend de l'unité choisie est le poids de l'unité de volume de matière à une température donnée, on le détermine au pycnomètre.

IV.1.3.1.1. Principe:

L'essai consiste à faire les pesées suivantes :

- Le pycnomètre à vide soit P_0
- Le pycnomètre à vide + liquide (eau) soit P_1
- Le pycnomètre à vide + échantillon soit P_2
- Le pycnomètre à vide + échantillon + humide soit P_3

Le poids spécifique de la classe d'agrégats est donné par la formule suivante :

$$D = \frac{P_2 - P_0}{P_1 + P_2 - P_3 - P_0}$$

IV.1.3.1.2. Les résultats d'essai :

Les résultats des essais obtenus des poids spécifiques réalisés sur les différentes fractions sont représentés sur le tableau 4.3 suivant :

Fraction	15/25	8 /15	3/8	0/3
Poids spécifique	2,68	2,63	2,54	2,65

Tableau 4. 3 Les résultats des poids spécifiques

IV.1.4. FUSEAU GRANULOMETRIQUE:

La notion de "Fuseau granulométrique" s'applique à tous matériaux constitutifs des différentes couches de la chaussée.

En effet pour exécuter soit une couche de fondation. Soit une couche de base soit une couche de surface, on ne peut prendre n'importe quels matériaux le résultat serait en général mauvais. Parmi les critères qui permettent de choisir des matériaux convenables. La granulométrie figure en bonne place. Mais les produits étant à une échelle industrielle. On ne pourrait définir un matériau par une granulométrie unique fixe et définie.

En fait on admet pour que la granulométrie du matériau soit satisfaisante que celle ci doit être comprise entre certaine limite qui est précisément définies par un fuseau granulométrique. Il y a la de la part de l'ingénieur une question d'appréciation et d'expérience. sans aller jusqu'à dire qu'il faut choisir le fuseau qui permet « d'accueillir » la courbe granulométrique que l'on a trouvée, il faut bien considérer que les fuseaux granulométrique constituent un guide et qu'il existe d'autres critères, dont il sera décrit plus loin pour fixer définitivement le choix d'une formule ou d'un matériau.

En fait, lorsque l'on a satisfait aux exigences de granularité d'un fuseau on met toutes les chances de son côté, car les fuseaux de diverses origines on été établis d'après l'expérience. Si

l'on sort d'un fuseau donné, les risques d'échecs deviennent beaucoup plus grands. Les matériaux constitutifs des chaussées ne sont pas définis que par leurs caractéristiques granulométriques.

IV.1.4.1. Définition du fuseau granulométrique :

IV.1.4.1.1. La propreté superficielle :

La propreté d'un granulat est l'absence d'éléments fins indésirables :

Ce sont soit des fines plastiques liées à la pollution du gisement, soit des fines dues au concassage des roches.

IV.1.4.1.2. Opération lavage et séchage :

Tamiser sous l'eau l'échantillon sur le tamis de 0.5 mm jusqu'à ce que l'eau qui s'écoule soit claire. Le refus est séché à l'étuve à 150°C jusqu'à masse constante. Tamiser de nouveau sur le tamis de 0.5 mm pendant 1 minute puis peser de nouveau le refus. Soit m' la masse de ce refus. La proportion maximale d'éléments passant au tamis de 1 mm est fixée par le CPS à 2% du poids de l'échantillon.

Le degré de pollution d'un échantillon de granulat d/D , donc sans éléments fins est défini d'une part, par la plasticité de ces éléments. Cette dernière peut être mesurée soit par l'essai d'équivalent de sable, soit par la détermination de l'indice de plasticité de leur mortier.

On peut dire que l'argile est « plastique » en ce sens qu'avec une certaine quantité d'eau, elle forme une pâte déformable mais cohérente. Au contraire un sable bien propre ne possède pas cette propriété. ATTERBERG, qui était ingénieur agronome suédois eu en 1911 l'idée de classer les sols selon certains critères de consistance. Il n'avait en vue que des problèmes agricoles, mais sa classification a été adoptée pour les routes.

Si nous prenons un sol plastique gorgé d'eau, on a alors une sorte de pâte très liquide, qui coule librement. Si l'on diminue progressivement par évaporation, la teneur en eau de la pâte s'épaissit et il arrive un moment où elle ne coule plus.

ATTERBERG a appelé la teneur en eau correspondante à ce stade: la limite de liquidité (L.L.).

A ce moment, le matériau forme une pâte plastique que l'on peut déformer, sans fissuration. Si l'on continue à diminuer la teneur en eau, il arrive un moment où ce caractère de plasticité n'existe plus, le matériau se fendille quand on le manipule. La teneur en eau correspondante s'appelle la limite de plasticité (L.P.)

Enfin si l'on continue à diminuer la teneur en eau il arrive un moment où le volume du matériau qui jusque là diminuait régulièrement devient constant.

La teneur en eau correspondante s'appelle : limite de retrait (LR).

En outre, et ceci est très important en technique routière ATTERBERG a appelé indice de plasticité I_p la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité : $I_p = L_L - L_P$

IV.1.5. EQUIVALENT DE SABLE :[16]

Lorsque l'on a affaire à des matériaux non plastiques c'est à dire pour lesquels l'indice de plasticité n'est pas mesurable, il se peut que le granulat soit, ou très propre ou soufflé de légères traces d'argile, en proportion trop faible pour que la détermination de l'indice de plasticité soit possible.

Il n'existe pas moins que l'emploi de tels matériaux dans les chaussées puisse être dangereux, car même les traces argileuses, non décelables par les méthodes d'ATTERBERG peuvent nuire à la qualité de la chaussée FN-HVEEM qui fut le grand technicien de la division des routes de l'état de Californie (il a pris sa retraite en 1963) a imaginé en 1950 un essai qu'il a appelé Equivalent de Sable « E-S » et qui très astucieusement, met en évidence, en quelque sorte, en les amplifiant, les traces argileuses qu'un matériau routier peut contenir.

IV.1.5.1. Principe de l'essai:

On utilise des éprouvettes en Plexiglas de 32 mm de diamètre et 430 mm de hauteur dans lesquelles on verse une part de l'échantillon : volume 88 cm³ et d'autre part de l'eau et une solution flocculant à base de glycérine. Cette solution a pour but de mettre en suspension les éléments argileux que peut comporter le matériau dont on a pas conservé que les matériaux plus petits que le tamis ASTM N° 4 (4,76 mm) on laisse mouiller pendant 10 mn. Puis on bouche l'éprouvette et on agite horizontalement en effectuant 90 cycles de secouage en 30 s (il existe des machines pour le faire).

Cette opération a pour but de bien mettre les éléments argileux et très fin en suspension.

Ayant remis l'éprouvette en position verticale, on lave bien le sable à l'aide d'un tube laveur pour chasser les éléments argileux qui auraient pu rester.

On laisse reposer 20 mn, Le sable propre est au fond, sur une hauteur h_1 . L'argile flocculé en suspension. Monte jusqu'à la hauteur h_2 et la séparation entre la zone où l'argile est en suspension et le liquide clair est très nettes.

Par définition l'équivalent de sable "ES" est le rapport en pourcentage des deux hauteurs

$$ES = h_1 / h_2 \times 100$$

Lorsque la limite séparatrice entre le sable et l'argile est très nette, la lecture a vue suffit. Dans le cas contraire on mesure l'épaisseur du dépôt d'argile au moyen d'une tige terminée par un piston, que l'on plonge dans le tube jusqu'à ce que le piston repose sur le sable. On en déduit h_1 .

IV.1.5.2. Les résultats d'essai

Le résultat d'essai pour l'équivalent de sable de notre sable est :

$$ES=87\%$$

Ce résultat met en évidence une bonne propreté de notre sable.

IV.1.6. LA RESISTANCE MECANIQUE :

Les granulats doivent suivant leur destination dans la chaussée être en mesure de résister soit à la fragmentation sous l'effet de la circulation soit à l'usure par attrition (frottement mutuel).

IV.1.6.1. La résistance a la fragmentation (Los-Angeles) :

IV.1.6.1.1. méthode d'essai :

Il permet d'estimer l'évolution de la granularité due à la fragmentation des éléments sous le choc de boulets : il se pratique sur 3 classes granulaires de matériaux concassés : 4/6,3 - 6,3/10 - 10/14. On introduit un poids de 500 g d'échantillon dans un tambour métallique tournant autour d'un axe horizontal, avec une charge de boulets de fonte ou d'acier de 420 g chacun, variable d'un granulat à un autre. On fait tourner le tambour pendant un certain nombre de tours à une vitesse déterminée par exemple : 500 tours à 33 tours/mn environ avec 5 kg de granulats 12,11.8 ou 6 boulets suivant la granularité.

- On pèse les éléments passant au tamis de. 1,6 mm.
- le coefficient Los-Angeles (L A) et le rapport en % du poids de ce tamisât au poids initial.

Le matériau est évidemment d'autant meilleur que le coefficient L.A est plus faible un bon gravillon doit avoir un L.A. inférieur à 35 %.

Il est à noter que l'eau n'a pratiquement aucune action sur cet essai. Aussi le L.A. humide, parfois préconisé ou utilisé, n'a aucune raison d'être.

Le tableau suivant représente l'appréciation de la qualité des granulats en fonction du coefficient de Los-Angeles

LOS-ANGELES	APPRECIATION
<15	Très bon à bon
15-20	Bon à moyen
20-30	Moyen à faible
>30	Médiocre

Tableau 4.4 Appréciation de la résistance à la fragmentation

IV.1.6.1.2. Les résultats d'essai :

Les résultats des essais Los-Angeles réalisés sur les différentes fractions d'agrégats utilisés dans notre étude sont représentés dans le tableau 4.5

Fraction	15/25	8 /15	3/8
Los-Angeles	17	15	18

Tableau 4.5 résultats de Los-Angeles

Les valeurs des résistances obtenues peuvent être jugé comme satisfaisantes

IV.1.6.2. La résistance à l'attrition et à l'usure (Micro-Deval) :

IV.1.6.2.1. méthode d'essai :

Un nouvel essai, le MICRO-DEVAL a pour objet de mesurer la résistance à l'usure par frottement des matériaux.

La prise d'essai constitué par 500 g d'une des 3 classes granulaires 4/6 – 6/ 10 ou 10/14, est placée dans une cylindre métallique avec une charge constituée de billes d'acier de 10 mm de diamètre.

La rotation du cylindre autour de son axe horizontal entraîne une usure par frottement granulats-billes et la formation d'une proportion de fines d'autant plus grande que le matériau est plus tendre.

La durée de l'essai est de 2 heures.

La vitesse de rotation du cylindre est de 100 tr/mn la charge de bille est de 5 kg pour la classe 10/14, 4 kg pour 6/10 et de 2 kg pour 4/6.

Le coefficient Micro-Deval (MD) est le pourcentage d'éléments passant au tamis de 2 mm par rapport au poids total de l'échantillon essayé.

L'usure des roches en présence d'eau est souvent beaucoup plus forte qu'à sec : ceci est dû à la présence de minéraux tendre (argile, mica, calcite etc. .) L'essai Micro-Deval en présence d'eau (MDE) met très bien en évidence ce phénomène. Le tableau suivant donne l'appréciation de la qualité des granulats en fonction du coefficient MICRO – DEVAL

MICRO-DEVAL	APPRECIATION
<13	Très bon à bon
13-20	Bon à moyen
20-25	Moyen à faible
>25	Médiocre

Tableau 4.6 Appréciation de la dureté MICRO-DEVAL

IV.1.6.2.2. Les résultats d'essai

Les résultats des essais MICRO-DEVAL réalisés pour les différentes fractions d'agrégats utilisés dans notre étude sont représentés dans le tableau 4.7

	Poids initial P (g)			Poids initial P' (g)	MD
	P 1	P 2	MOY		
SEC	470	470	470	500	6 %
HUMIDE	420	420	420	500	16 %

Tableau 4.7 Les résultats des essais MICRO-DEVAL

IV.1.7. CONCLUSION

L'ensemble des caractéristiques mesurées, attestent une bonne qualité des agrégats utilisés dans notre étude et peuvent donc former les constituants d'un enrobé.

V.2. ETUDE DES BITUMES :

IV.2.1. Principaux liants utilisés en Algérie :

Les classes de bitume 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, le 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: (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 couches d'accrochage, celles cationique 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.

IV.2.2. Les essais sur le bitume :

IV.2.2.1. L'essai de pénétration (NF T 66.004) :

Cet essai consiste à enfoncer dans l'échantillon du bitume étudié porté à 25C°. 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.

IV.2.2.2. L'essai de ramollissement:

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.

IV.2.2.3. 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.

IV.2.2.4. 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.

IV.2.2.5. La ductilité (NF T 66.006) :

C'est l'aptitude du bitume à subir sans rupture l'étirement en fil. L'essai consisté 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 étiré en fil de plus d'un mètre et les plus durs au moins jusqu'à 25 cm.

IV.2.3 LES RESULTATS DES ESSAIS EFFECTUES 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) :**

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

Tableau 4. 8 L'essai de pénétrabilité➤ **Essai de Point de ramollissement (NFT 66 008) :**

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

Tableau 4. 9 Essai de Point de ramollissement➤ **Essai Point d'éclair « vase ouvert » (NFT 66 118) :**

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

Tableau 4. 10 Essai Point d'éclair « vase ouvert »**IV.2.4. Conclusion**

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).

IV.3. ETUDE DU DECHET :

IV.3.1. 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 consiste en deux phases : 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, consistant en mélange d'oxyde de fer, essence, des composés organiques et non organiques de plomb.

IV.3.2. Composition élémentaire de la boue :

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

ELEMENTS	CONCENTRATION	CONCENTRATION
Cu	0.53	132.5
Mn	5.10	1275.0
Ni	0.65	162.5
Co	0.38	95.0
Cr	0.23	57.5
Pb	0.88	220.0
Zn	2.36	590.0
Fe	941.00	235.25×10^3
Cd	0.28	70.0

Tableau 4.11 L'analyse chimique de notre déchet

Les résultats du tableau confirment la nature minérale de la boue, à savoir sa richesse en fer, qui est l'élément prédominant. Elle contient aussi d'autres métaux lourds tels que le manganèse en quantité considérable, le plomb, le chrome, le cuivre, le cadmium et le zinc. Tous ces métaux sont nocifs et toxiques pour l'homme à des quantités et des degrés d'exposition différents. 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.

IV.3.3 Spectre de diffraction des rayons X de la boue : [17]

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

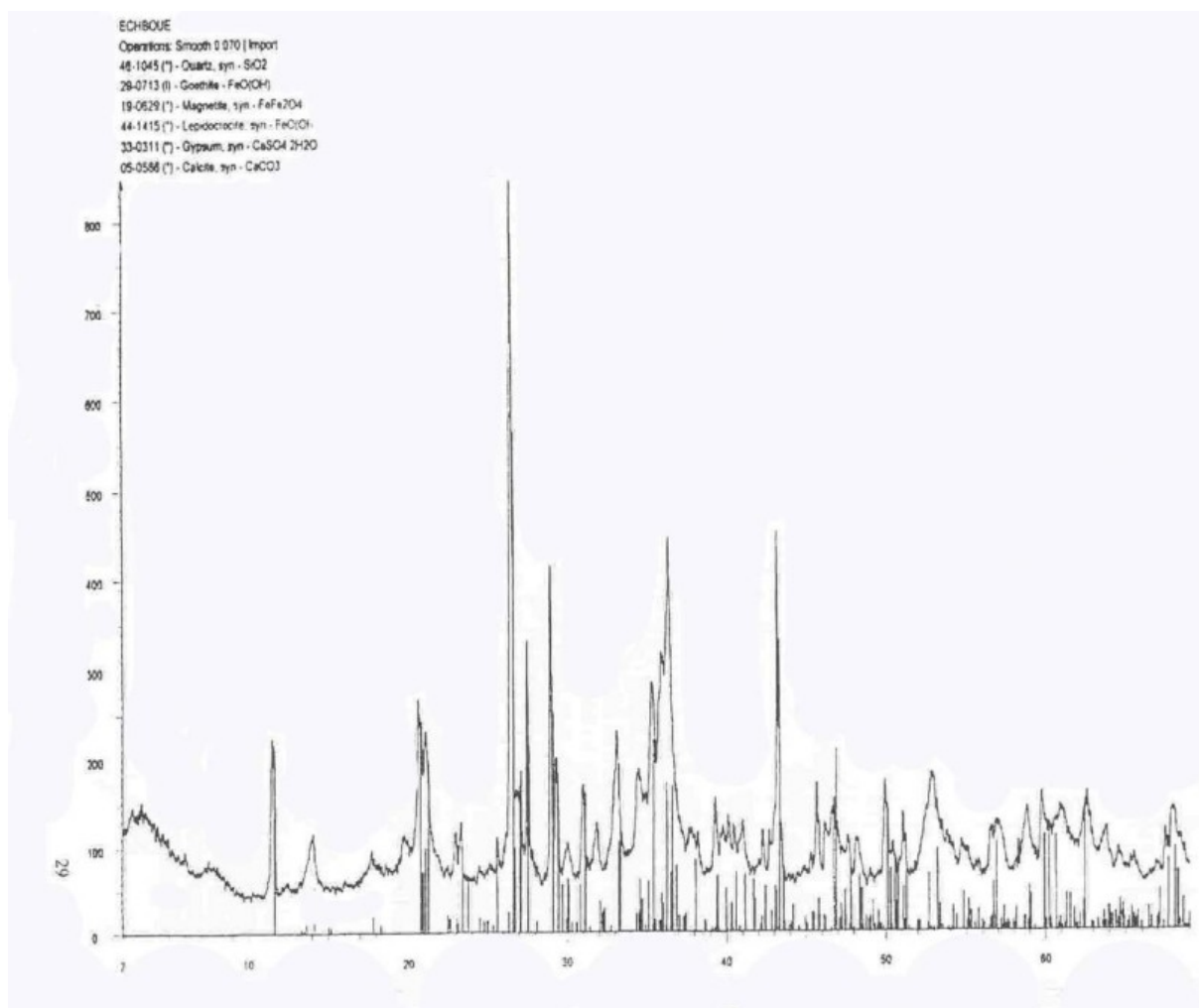


Figure 4.5 spectre de diffraction des rayons X de la boue

Eléments %												
Désignations	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	SO ₃
Echt-x	12,44	2,91	45,74	5,41	0,74	0,197	0,38	0,51	0,067	0,202	0,011	6,48
Désignations	ZrO ₂	SrO	Rb ₂ O	PbO	ZnO	CuO	NiO	BaO	Cl	PAF	TOTAL	
Echt-x	0,023	0,0023	0,0028	<0,001	0,0187	0,0069	0,0102	0,0098		24,40	100,53	

Tableau 4.12 des éléments constituant notre déchet

IV.3.3. Danger provenant des boues

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 manipulations 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 anarchique.

IV.3.4. Analyse granulométrique du déchet :

La granulométrie établie pour le déchet, est représentée sur le tableau 4.1 et la figure 4.5 ci-dessous :

		Refus cumules de déchet utilisé	Complément a 100 de refus cumules
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	

Tableau 4.13 Granulométrie du déchet

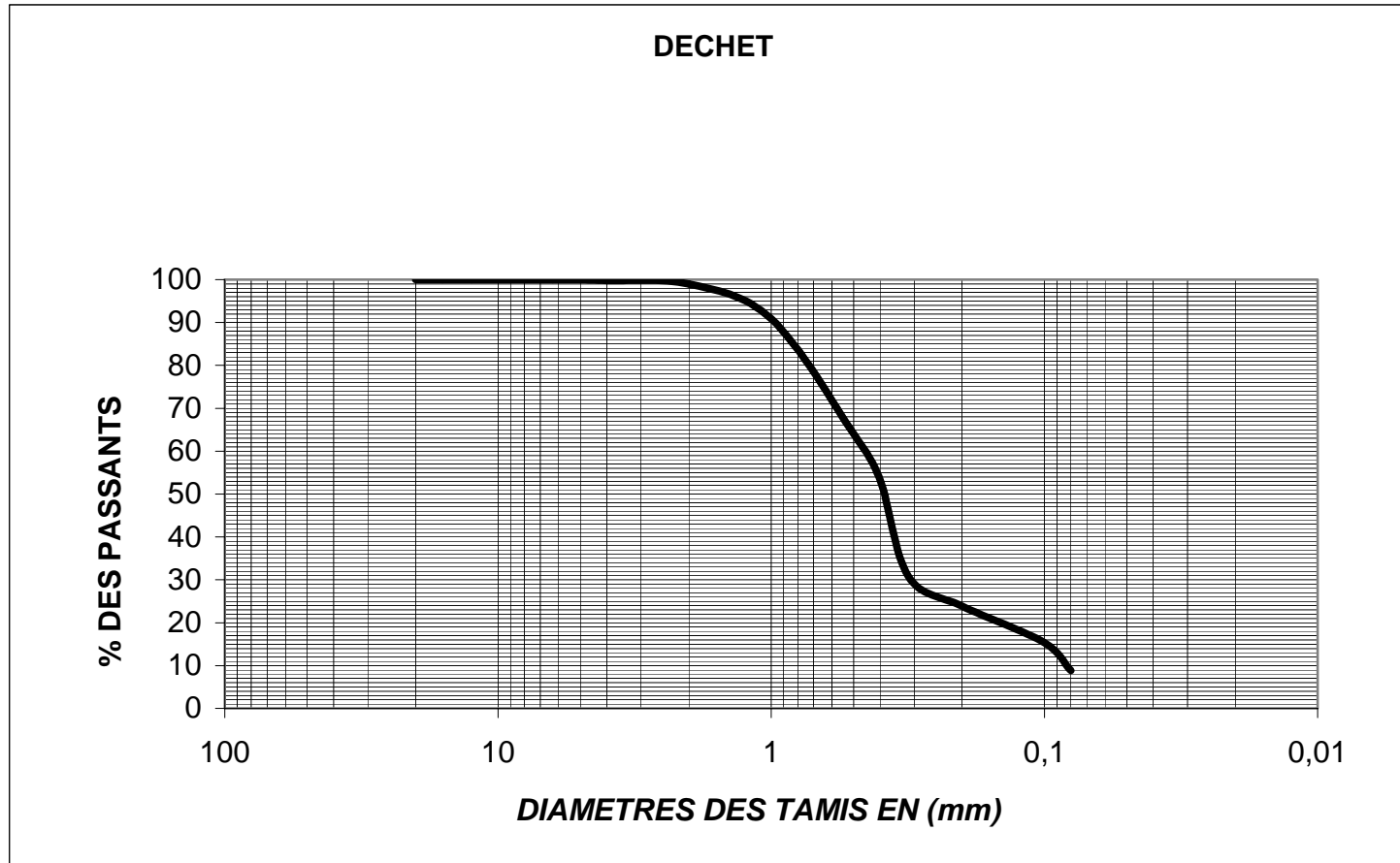


Figure 4.6 Courbe granulométrique de déchet

Au vue de la granulométrie établie ce déchet peut être classé dans la catégorie des sables. Aussi sera t il substitué dans les formulations étudiés au sable constituant l'enrobé

IV.4. FORMULATION DE L'ENROBE :

IV.4.1. Méthodologie de formulation d'un enrobe :

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.

IV.4.2. Méthode du L.C.P.C :[18]

La méthode utilisée consiste à partir d'un granulats entrant dans le fuseau recommandé, à choisir une teneur en liant fonction de la surface spécifique calculée du granulats ,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 voisines de la teneur théorique choisie à partir de la surface spécifique.

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

IV.4.3.1. Calcul de la surface spécifique du granulats:

La surface spécifique du squelette minéral est calculée conventionnellement par la formule:

$$\Sigma = 0,25G + 2,30 S_1 + 12 S_2 + 135 f$$

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 (filer)

Pour déterminer la teneur en liant d'un granulats, on se réfère à la formule suivante: Teneur en liant= P

K : Module de richesse.

Les valeurs de K généralement adoptées sont les suivantes:

Module de richesse	Béton bitumineux (BB)	Grave bitume (GB)
K ₁	3,45	2,15
K ₂	3,60	2,30
K ₃	3,75	2,45
K ₄	3,90	2,60

Tableau 4.14 les valeurs de module de richesse

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

IV.4 .3.2 Teneur en liant hydrocarboné

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

$$p = k \times \alpha \times \sqrt{\Sigma}$$

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 à une grande importance, un module trop faible donnant un enrobé friable, cassant, perméable. Un module trop fort donnant un excès de liant entraînant une chute importante du frottement interne, donc 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 fillers d'apport contenus dans l'unité du poids , qu'il s'agit finalement d'enrober.

IV.4.4. LES ESSAIS SUR LES ENROBES BITUMINEUX :

Les caractéristiques des enrobés bitumineux font appel à une panoplie d'essais pratiqués par de nombreux 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**» fournissant des indications sur les qualités de résistance mécanique d'un enrobé et sa stabilité pour un compactage donné.

IV.4.4.1. Mode opératoire de l'essai d'adhésivité TWIT (NF 66 008) :[13]

Cet essai consiste à:

- Peser 100 g de granulats tamiser entre 6.3 mm et 4 mm, passants 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
- 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.

IV.4.4. 2. L'ESSAI DURIEZ DE COMPRESSION SIMPLE(DILATE) :[14]

IV.4.4.2.1. But de l'essai:

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

IV.4.4.2.2. 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 à la presse de préférence 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 cinq minutes.

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



Figure 4.7 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 le mesure de la densité apparente.

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

On note l'effort maximum converti en résistance exprimée en kg/cm^2 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 4.8 moule de l'essai duriez simple



Figure 4.9 moule de l'essai duriez dilaté

IV.4.4. 3. L'ESSAI MARSHALL :

IV.4.4.3.1. 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 le trafic un béton bitumineux sera stable ou au contraire aura tendance à fluer.

IV.4.4.3.2. 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 4.10 moule de l'essai MARSHALL



Figure 4.11 Presse universelle

IV.5. CONCLUSION :

Le choix de la (GB) grave-bitume pour valoriser notre déchet est pris car cette couche est protégée par la couche BB (béton bitumineux) des eaux pluviales et de pneumatique pour que les éléments toxiques des déchets ne s'infiltrant pas dans les nappes phréatiques

BB exige des qualités de béton bitumineux très poussée, par contre GB est moins exigeante et sa couche est plus épaisse, donc on peut 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 DURIEZ simple pour les BB et DURIEZ dilaté pour GB, dans notre cas DURIEZ dilaté sera utilisé car on a choisi GB.

IV .6 ESSAI DE LIXIVIATION [19]

C'est une extraction liquide d'un déchet solide initialement massif ou généré par un procédé de solidification, dans les conditions définies par la norme X31-211, d'un échantillon de déchet par une solution aqueuse.

L'éprouvette préparée est pesée et mise en contact sous agitation avec la solution de lessivage. Le solide résiduel du déchet est séparé du lessivât, nous effectuerons sur ce dernier une analyse : chimique et écotoxicologique. Ces mêmes essais sont effectués sur le déchet traité solide, la comparaison des résultats nous permettra de se prononcer sur la stabilisation.

CONCLUSION GENERALE

L'analyse des résultats des différents essais réalisées dans cette étude à permis, de mettre en évidence l'efficacité du procédé stabilisation /solidification choisi pour traiter, à l'aide d'un liant hydrocarboné, les boues des bacs de stockage de carburant appartenant à l'entreprise Naftal, en effet le matériau issu de ce traitement répond bien aux objectifs visés par celui ci à savoir un matériau solide physiquement et stable chimiquement.

D'abord 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 (la couche de base GB).

Les résultats des essais de lixiviation sur les formulations d'enrobé ont confirmé la stabilité du matériau traité, puisque la majorité des éléments toxiques contenues 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 qu'élément de chaussée.

Cette solution pourrait être envisagée après établissement d'une étude technico-économique par l'entreprise NAFTAL pour mieux gérer ces déchets pétroliers, et répondre ainsi aux exigences réglementaires concernant la protection de l'environnement.

V.1. ETUDE DE FORMULATION SANS DECHET:

Dans cette partie, on varie la teneur en liant pour plusieurs gâchées (formules) pour obtenir l'optimum des meilleures performances mécaniques et une solution économique.

Et lorsqu'on obtient ce dernier, la teneur en liant correspondante à la gâchée sera utilisée pour les formulations avec déchet.

V.1.1. La courbe granulométrique du mélange :

On fait varier le pourcentage pondéral des fractions dans le mélange jusqu'à obtenir une courbe granulométrique qui s'insère dans le fuseau de référence

Les résultats obtenus sont les suivants :

- ❖ La fraction 15/25 : 18 %
- ❖ La fraction 8/15 : 20 %
- ❖ La fraction 3/8 : 22 %
- ❖ La fraction 0/3 : 40 %

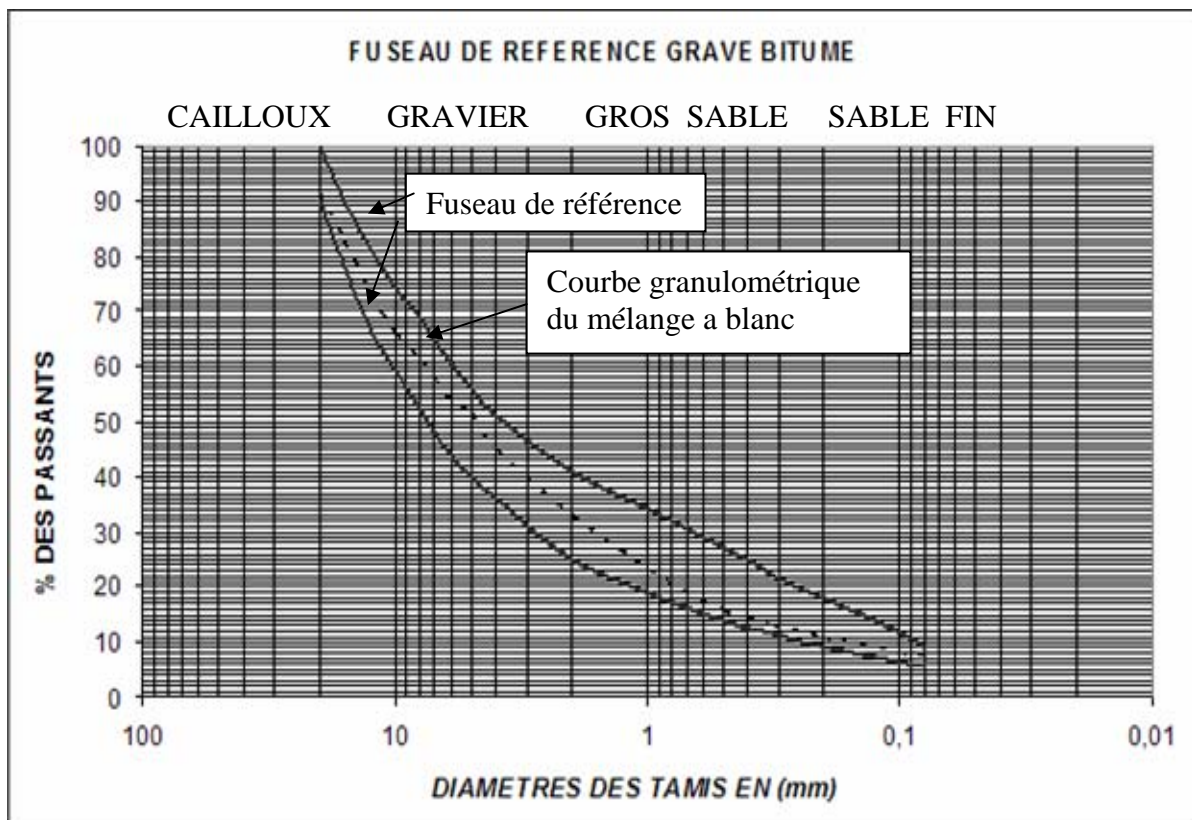


Figure 5.1 La courbe granulométrique du mélange

V.1.2. ETUDE DE FORMULATION :

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

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 bars de 1mm/Seconde	r'	50,88	55,31	60,84	64,16
	R	81,86	90,71	75,44	74,34
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

Tableau 5.1 Résultats de formulation

Nb : pour les résultats détaillés concernant chaque gâchée de formulation, se référer à l'annexe A

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

V.1.2.1. La résistance mécanique obtenue en fonction de la teneur en liant :

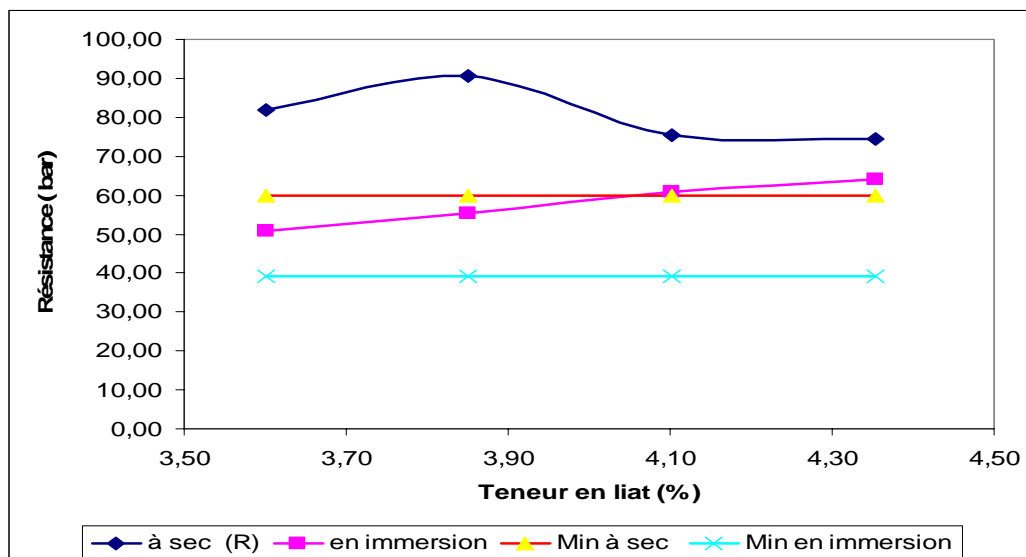


Figure 5.2 La résistance mécanique obtenue en fonction de la teneur en liant

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 90,71 bars .

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 vis à vis des spécifications de la route concernant les couches de base qui est de 60 bars.

Pour ce qui est de la résistance mécanique en immersion, on constate dès qu'on augmente la teneur en liant 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 39 bars.

V.1.2.2. La densité en fonction de la teneur en liant :

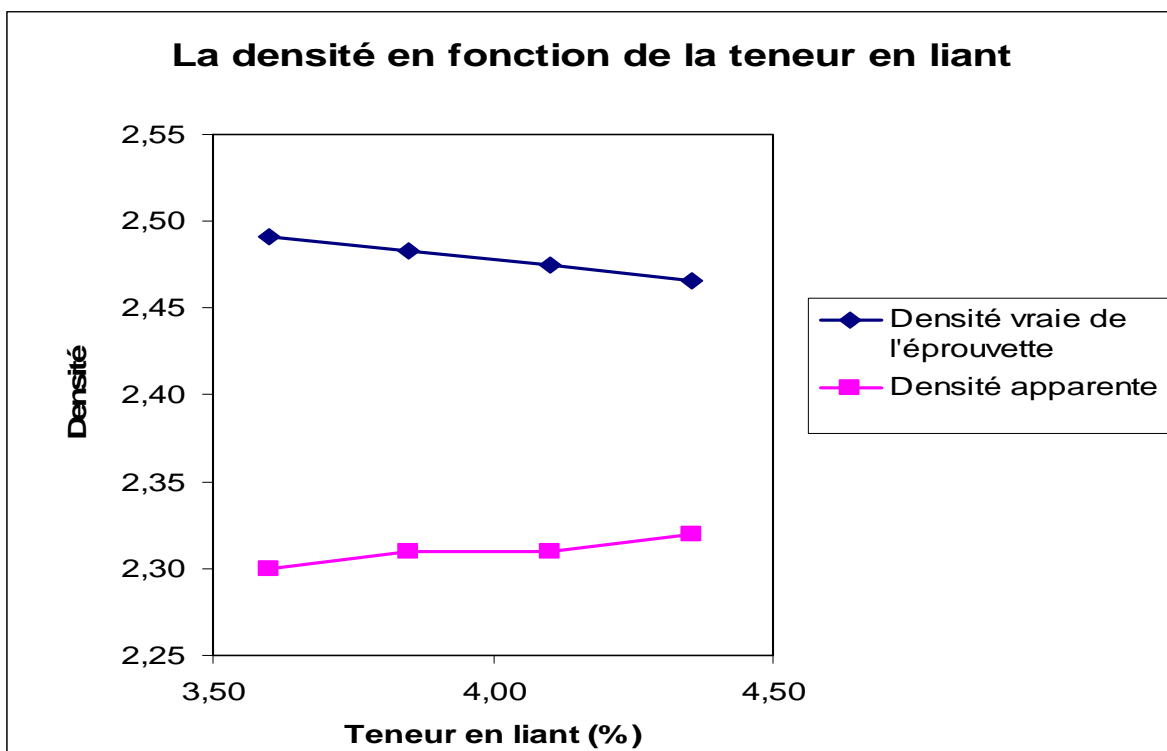


Figure 5.3 La densité en fonction de la teneur en liant

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

Cela s'explique du 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.

V.1.2.3. La compacité et le pourcentage des vides en fonction de la teneur en liant

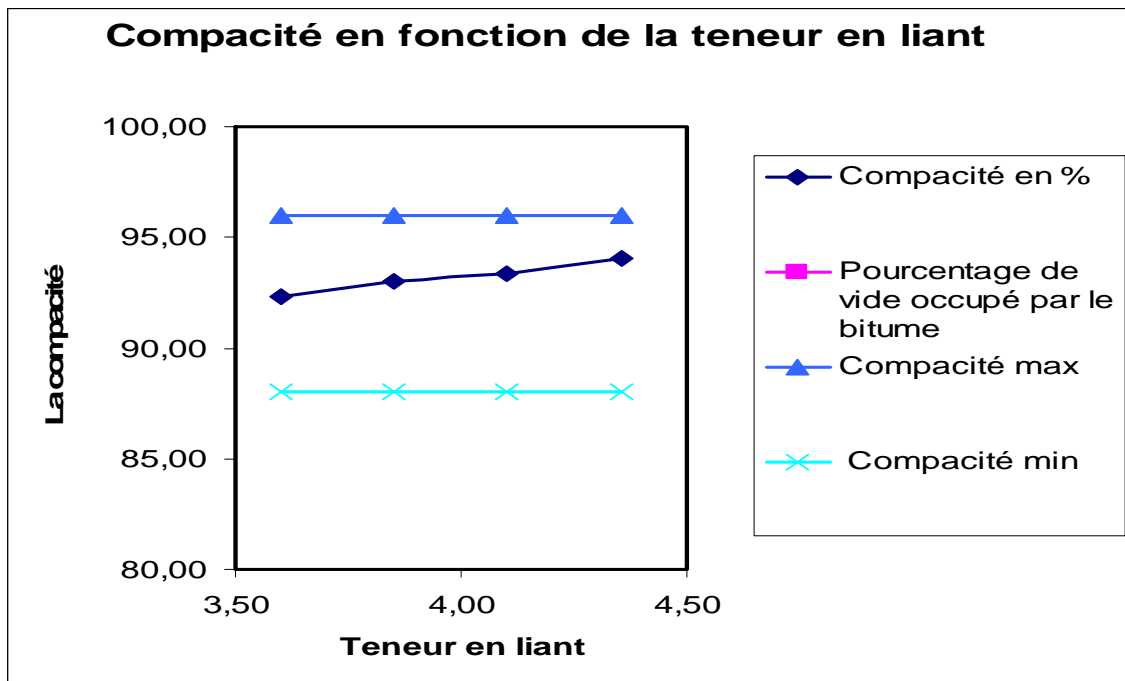


Figure 5.4 La compacité et le pourcentage des vides en fonction de la teneur en liant

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.

V.1.2.4. Pourcentage de gonflement et d'imbibition en fonction de la teneur en liant

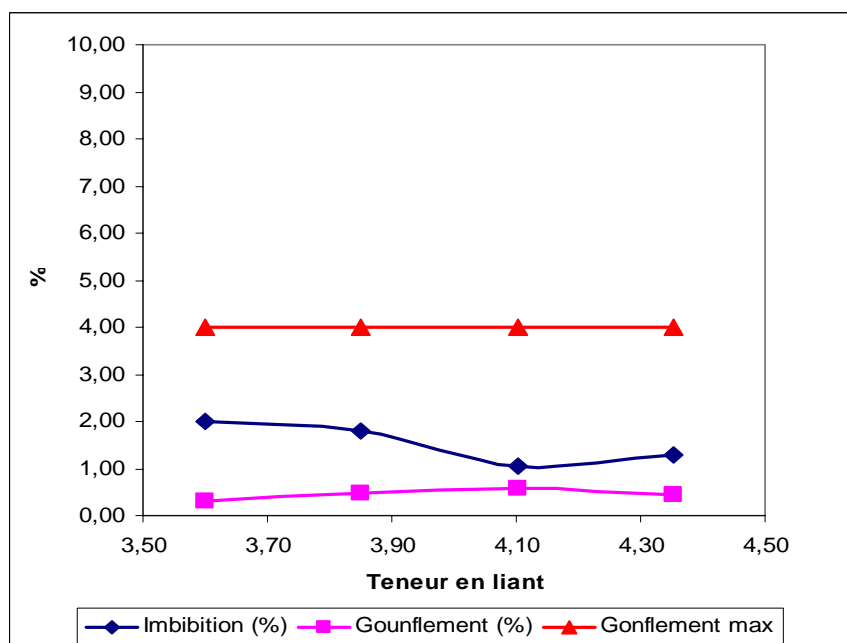


Figure 5.5 Pourcentage de gonflement et d'imbibition en fonction de la teneur en liant

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

V.1.2.5. Pourcentage d'affaissement en fonction de la teneur en liant

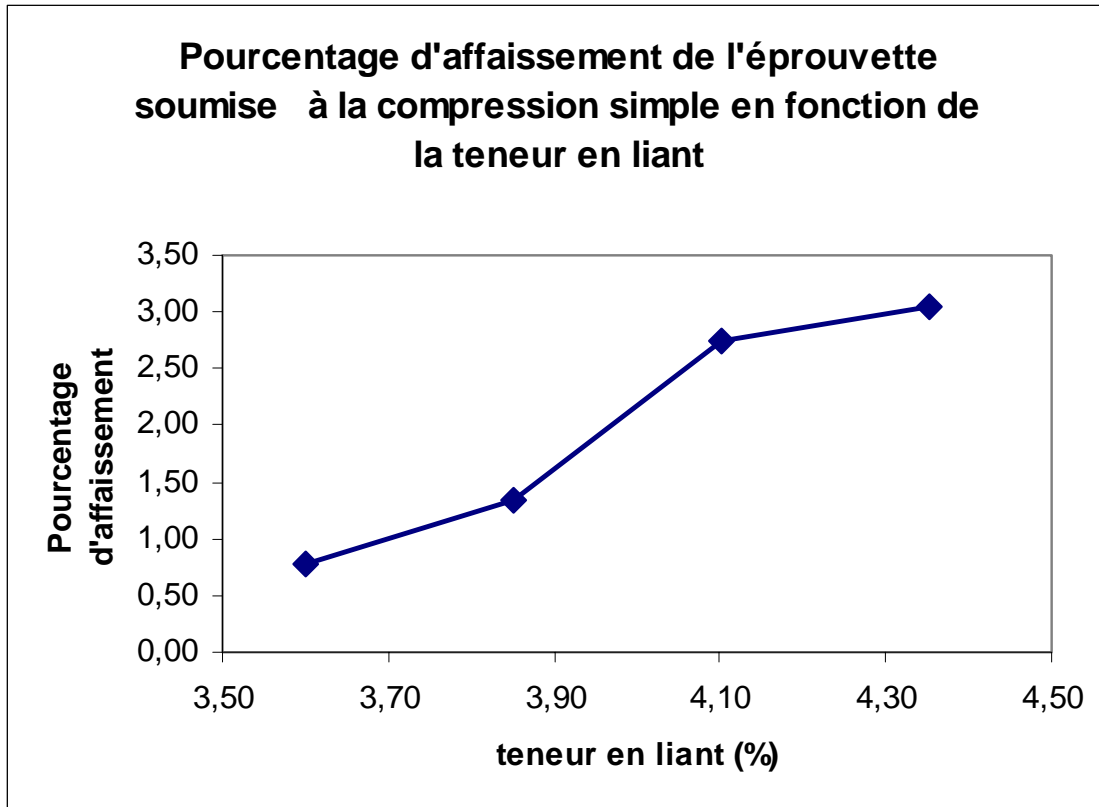


Figure 5.6 Pourcentage d'affaissement en fonction de la teneur en liant

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

V.1.3. 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.

V.2. ETUDE DE FORMULATION AVEC DECHET:

Dans cette deuxième partie, on ajoute le maximum de déchets tout en respectant les spécifications exigées par les normes routières.

V.2.1. Composition granulométrique de Mélange :

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

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

% 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

Tableau 5.2 Composition granulométrique de Mélange

V.2.2. Les résultats d'étude de formulation avec déchet:

Dans cette partie on va étudier et voir à quel point on peut ajouter le déchet avec la même teneur en liant pour des raisons économiques.

Pour cette que si on change la teneur en liant on aura des résultats et des pourcentages des déchets très importantes à celles trouvées dans notre étude.

Les résultats sont donnés dans le tableau 5.2, et les résultats de l'essai DURIEZ avec différent pourcentage 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	r	55,31	54,20	40,93	33,19	30,97
	R	90,71	75,22	58,63	51,99	45,35
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

Tableau 5.3 résultats de l'essai DURIEZ avec différent pourcentage de déchets.

V.2.2.1. La résistance en fonction du pourcentage du déchet :

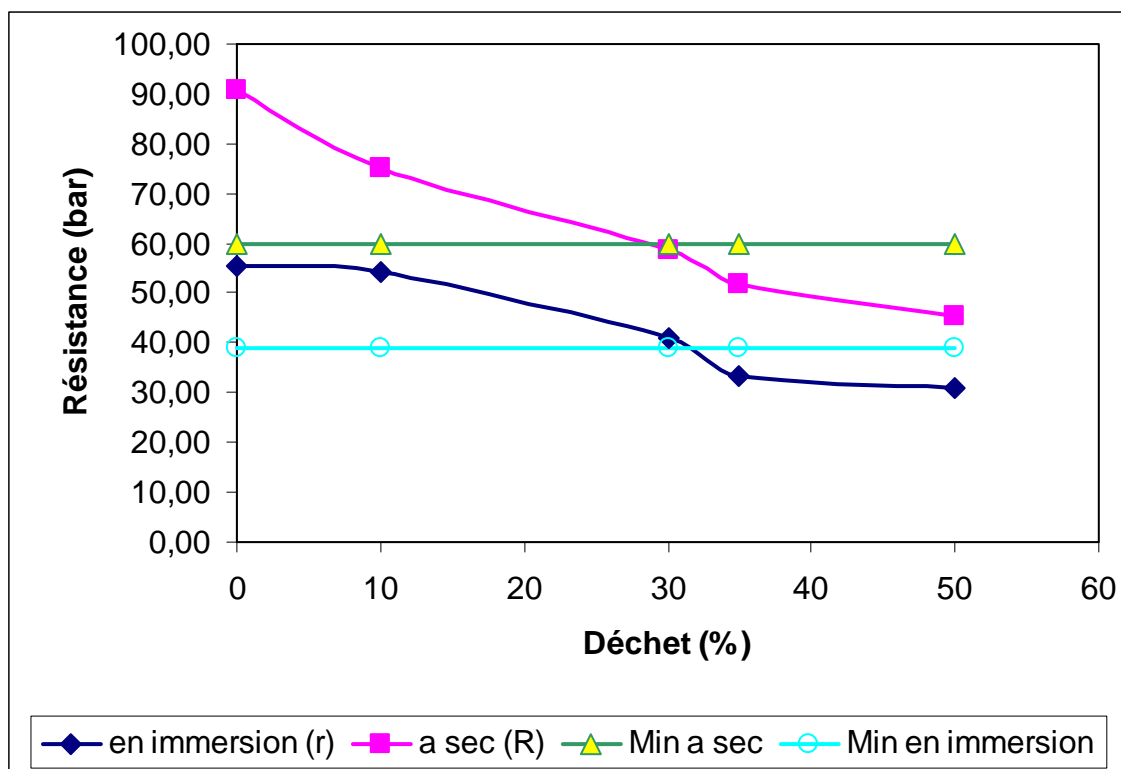


Figure 5.7 La résistance en fonction du pourcentage du déchet

On constate de cette figure que la résistance a 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. 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 quand atteint les 30% de déchet il faut calculer le rapport r'/R .dépassé se stade les résistances ne sont pas suffisantes.

V.2.2.2. Le rapport r'/R en fonction du pourcentage du déchet :

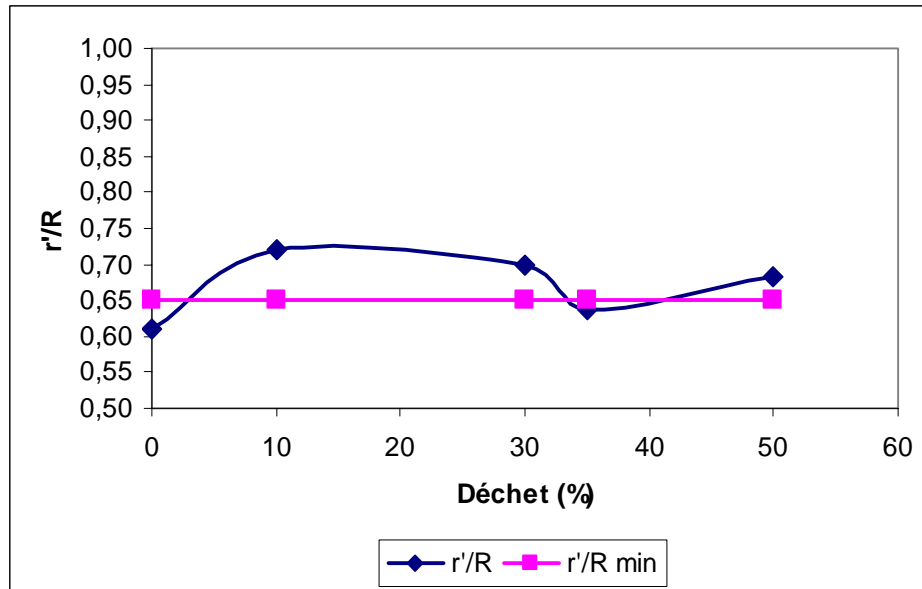


Figure 5.8 Le rapport r'/R en fonction du pourcentage du déchet

Le rapport r'/R n'a pas d'importance lorsque les résistances sont supérieures à la valeur minimale, mais lorsque les valeurs de résistance se rapproche aux valeurs min exigée (65 %) le r'/R aura un poids très important sur le jugement. Comme il est indiqué au paragraphe (5.2.2.1). Le rapport r'/R pour 30% de déchet est égale à 0.70, et qui est supérieur à 0.65.

V.2.2.3. La densité vrai et apparente en fonction du pourcentage de déchet :

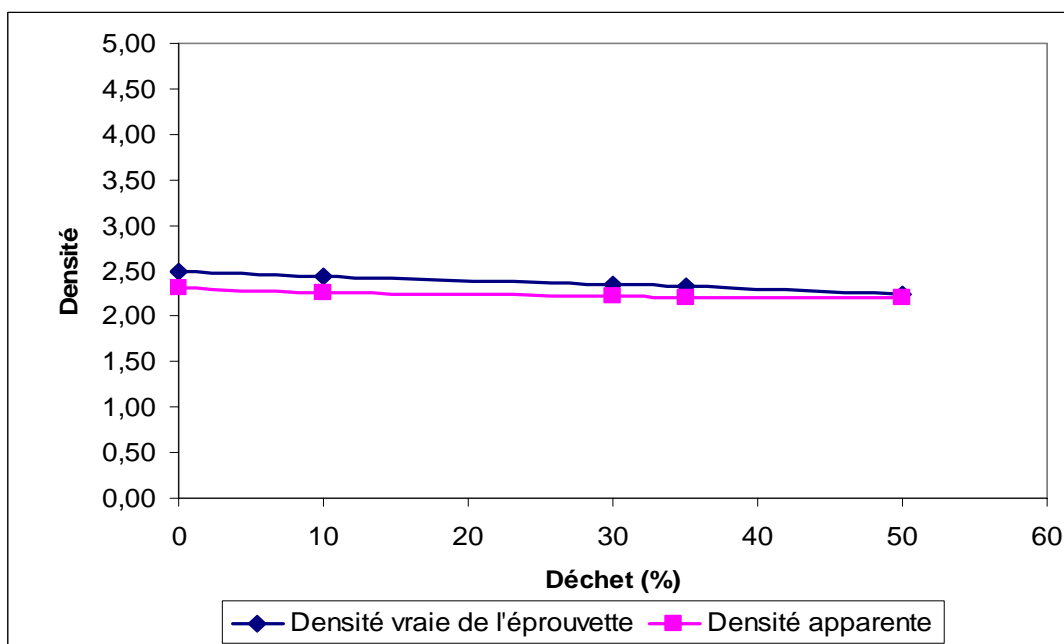


Figure 5.9 La densité vraie et apparente en fonction du pourcentage de déchet

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 inférieure au poids spécifique des granulats qui est au tour de (2.6).

Pour la densité apparente elle diminue mais sous forme d'une courbe mais moins rapide que la densité vraie.

V.2.2.4. Pourcentage d'affaissement et de gonflement en fonction du pourcentage du déchet

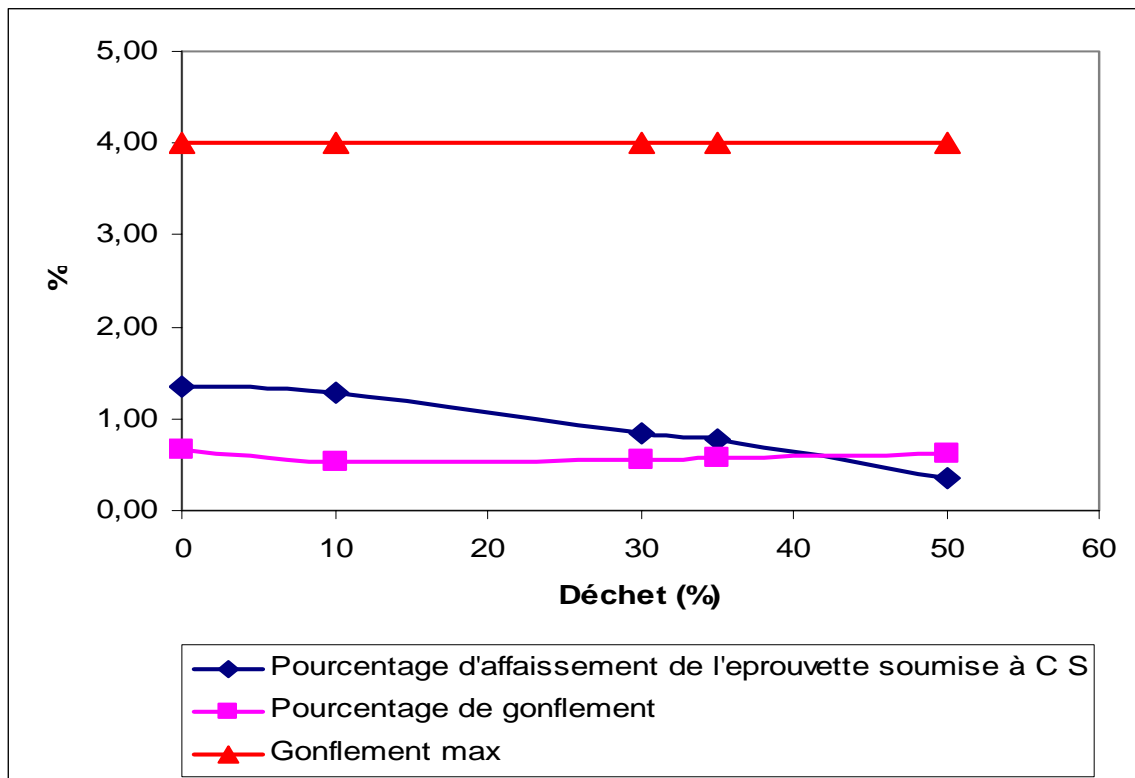


Figure 5.10 Pourcentage d'affaissement et de gonflement en fonction du pourcentage du déchet

D'après le graphe en remarque que le pourcentage d'affaissement de l'éprouvette soumise à la compression simple est inversement proportionnelle au pourcentage de déchet, car et en remarque aussi qu'il y a une légère augmentation du pourcentage de gonflement due a diminution en augmentons le pourcentage de déchet de résistance.

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

V.2.2.5 Pourcentage de vide occupé par le bitume en fonction du pourcentage du déchet :

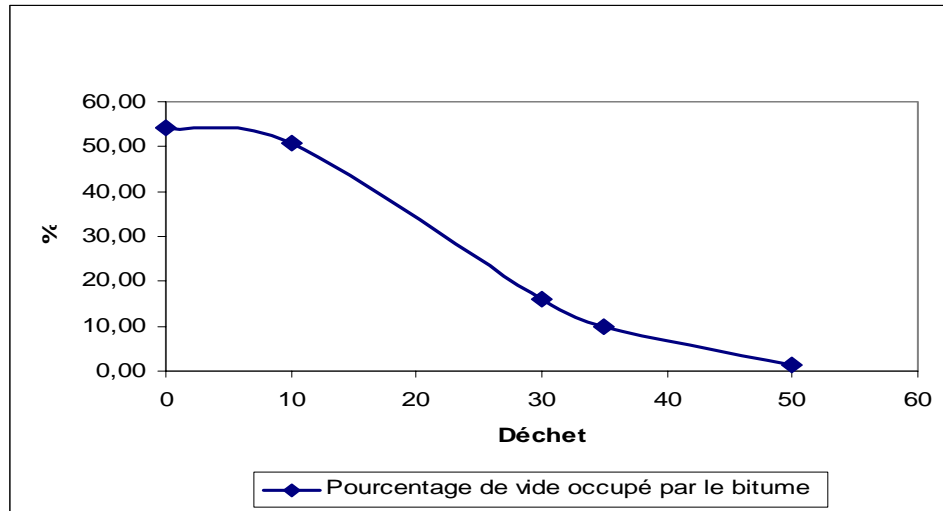


Figure 5.11 pourcentage de vide occupé par le bitume en fonction du pourcentage du déchet

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.

V.2.2.6 La compacité en fonction du pourcentage du déchet :

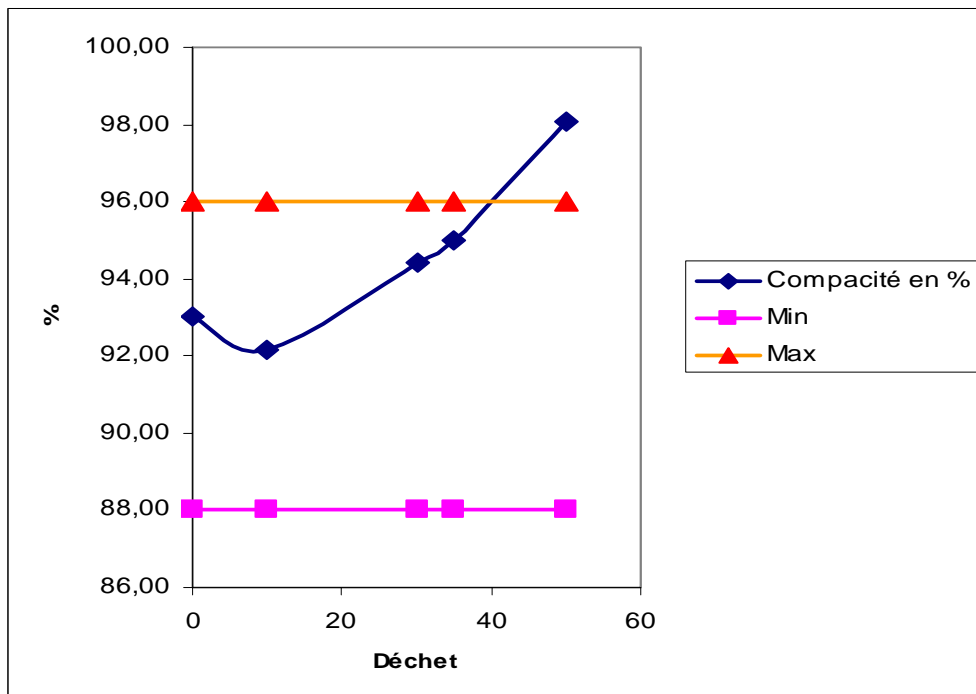


Figure 5.12 la compacité en fonction du pourcentage du déchet

Les éprouvettes se sature de plus en plus de l'augmentation de déchet qui occupe les vides comme il est expliqué au paragraphe V.2.2.5 il dépasse la valeur max exigée (96%) lorsque le déchet dépasse les 40%.

V.2.3 CONCLUSION :

Concernant donc le premier aspect du traitement à savoir la solidification de notre déchet la formulation à 30 % de déchet a donné des résultats satisfaisants pouvant orienter une valorisation du déchet. En effet les résistances aux normes et le rapport r/R satisfait aux valeurs recommandes de même que la compacité qui est de 94,5%.

V. 3 ESSAI DE LIXIVIATION

Les essais de lixiviation n'ont pu être effectués sur nos échantillons en raison de l'indisponibilité des équipements et du personnel du laboratoire du CRD Aussi avons nous utilisé les résultats obtenus par Mr HADDI [17] sur des échantillons similaires

- 1- Enrobés à 5% de déchet, teneur en bitume 5.96%
- 2- Enrobés à 10% de déchet, teneur en bitume 6.00%
- 3- Enrobés à 15% de déchet, teneur en bitume 6.09%

Eléments %												
N°	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	SO ₃
1	27.06	8.32	7.18	24.80	3.45	0.104	1.84	0.59	0.093	0.473	0.028	0.06
2	27.12	9.06	9.45	23.05	3.67	0.123	1.65	0.59	0.103	0.485	0.028	0.02
3	30.71	10.47	7,84	21.57	4.16	0.124	2.05	0.57	0.097	0.564	0.029	0.13
	ZrO ₂	SrO	Rb ₂ O	PbO	ZnO	CuO	NiO	BaO	Cl	PAF	TOTAL	
1	0.0067	0.0415	0.0058	<0.001	0.0045	0.0042	<0.001	0.25	0.018	25.40	99.69	
2	0.0068	0.0392	0.0046	<0.001	0.0065	0.0019	<0.001	0.18	0.024	24.20	99.77	
3	0.0070	0.0394	0.0062	<0.001	0.0097	0.0062	<0.001	0.17	0.017	21.10	99.69	

Tableau 5.4 : Fluorescence des rayons X du déchet traité solide

Eléments %												
N°	Na	K	Ca	Mg	Cu	Ni	Co	Cr	Mn	Fe	Zn	Pb
1	3.2	0.1	8.6	0.5	0	0	-	0.02	0.02	0.05	0.04	0
2	4.0	0.2	3.8	0.6	0	0	-	0.02	0.02	0.03	0.06	0
3	1.8	0.0	3.5	0.4	0	0	-	0.02	0.01	0.01	0.11	0
	Cd	DCO	PH	Hyd (Mg/l)	COT							
1	-	3	7.9	<0.01	3.75							
2	-	3	7.5	<0.01	3.95							
3	-	3	7.6	<0.01	3.45							

Tableau 5.5 : composition chimique du lexiviat

L'analyse du lexiviat 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 utilisant un liant hydrocarboné qui est le bitume 40/50.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **POULENC.R** « Manuel a l'usage des industriels », Ed. AFNOR, ouvrage collectif rédigé sous la direction de Serge Lamert, juin (1995).
- [2] **J.B. Leroy**, Les déchets et leur traitement, Collection Que sais-je ?, Paris : Presses universitaires de France, 1981 révisé 1994 .
- [3] **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).
- [4] **L.Y. Maystre et al.**, Déchets urbains, nature et caractérisation, Lausanne Presses polytechniques et universitaires romandes, 1994 .
- [5] **Daniel Tyteca**, «On the measurement of environmental performance in firms - Literature review and productive efficiency approach", Resources for the future, Washington, DC, 1994.
- [6] **D. Gaujous**, La pollution des milieux aquatiques, Paris : Technique & Documentation, 1993.
- [7] **A. Navarro et al.** "Gestion des Déchets", Lamy environnement, Les déchets, LAMY, 1995.
- [8] **ADEME**, Les procédés de traitement des déchets industriels solides et liquides, Angers Ademe, 1995.
- [9] **BOUCHELAGHEM A.** Stabilisation et solidification des déchets industriels spéciaux. *Technique, Science et Méthode*. n°4, 1994.
- [10] **AGENCE FRANÇAISE DE NORMALISATION.** Liants hydrauliques, définition, classification et spécification des ciments. *Normalisation Française*. Paris: AFNOR, 1994.
-

[11] **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.

[12] **Agence Française de Normalisation.** Déchet - Détermination du caractère solide massif. Normalisation Française. N°X 31-212. Paris: AFNOR, 1994.

[13] **JEAN-GEORGES, MALLOUK, Ing** Les Enrobes Bitumineux, Tome1:théorie Québec : Modulo Edition1982

[15] **Norme Française.** Granulats. Analyse granulométrique par tamisage, AFNOR, Paris, 1990.

[16] **Norme Française :** Granulats. Equivalent de sable, AFNOR, Paris, septembre 1998.

[17] **HADDI ,A :** Traitement de déchet par liant hydraulique et hydrocarboné. Projet de Fin d'Etudes. Département de Génie Civil. E.N.P. Juin 2002.

[18] **DURIEZ.M :** Traité de matériaux de construction. T1. Edition Dunod

[19] **Norme AFNOR X 31-211.** « Déchet essai de lessivage d'un déchet solide initialement massif ou généré par un procédé de solidification », Août (1994).

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	Dm=100/S2	2,31
8\15	20 %	2,63	19,31	7,343	Compacité en %	C=(Dm/dm)*100	2,49
3\8	22 %	2,54	21,24	8,364	Densité apparente agrégats	dA=((100-P)*dm)/100	92,71
0\3	40 %	2,65	38,63	14,58	Densité vraie agrégats	DA=(100-P)/S1	2,31
			Somme S1=	36,77	% Vide occupé par bitume+Eau	VA=((DA-dA)*100)/DA	2,63
Bitume en%	3,56 %	1,02	3,43	3,367	Vide résiduel	Vm=100-Compacité	12,04
			Somme S2=	40,14	% Vide occupé par bitume	VB=((VA-Vm)*100)/VA	7,29
			100-P =	96,57			39,50

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

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

		A SEC A 18 C°				EN IMMERSION A 18 C°					
		07Jours 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 (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	Dm=100/S2	2,47
8\15	20 %	2,63	19,22	7,308	Compacité en %	C=(Dm/dm)*100	93,35
3\8	22 %	2,54	21,14	8,324	Densité apparente agrégats	dA=((100-P)*dm)/100	2,22
0\3	40 %	2,65	38,44	14,51	Densité vraie agrégats	DA=(100-P)/S1	2,63
			Somme S1=	36,59	% Vide occupé par bitume+Eau	VA=((DA-dA)*100)/DA	15,47
Bitume en%	4,05 %	1,02	3,89	3,818	Vide résiduel	Vm=100-Compacité	6,65
			Somme S2=	40,41	% Vide occupé par bitume	VB=((VA-Vm)*100)/VA	57,02
			100-P =	96,11			

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

		A SEC A 18 C°				EN IMMERSION A 18 C°					
		07Jours 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	$Dm=100/S2$	2,32
8\15	20 %	2,63	19,18	7,291	Compacité en %	$C=(Dm/dm)*100$	2,47
3\8	22 %	2,54	21,09	8,304	Densité apparente agrégats	$dA=((100-P)*dm)/100$	94,07
0\3	40 %	2,65	38,35	14,47	Densité vraie agrégats	$DA=(100-P)/S1$	2,22
			Somme S1=	36,51	% Vide occupé par bitume+Eau	$VA=((DA-dA)*100)/DA$	2,63
Bitume en%	4,3 %	1,02	4,12	4,042	Vide résiduel	$Vm=100-Compacité$	15,30
			Somme S2=	40,55	% Vide occupé par bitume	$VB=((VA-Vm)*100)/VA$	5,93
			100-P =	95,88			61,28

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

		A SEC A 18 C°				EN IMMERSION A 18 C°					
		07Jours 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 B : Les résultats détaillés d'étude de formulation avec déchet

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	2,25
15\25	18	2,68	17,34		6,47	Densité vraie	Dm=100/S2	2,44
8\15	20	2,63	19,27		7,33	Compacité en %	C=(Dm/dm)*100	92,16
3\8	22	2,54	21,19		8,34	Desité apparente agrégats	dA=((100-P)*dm)/100	2,17
0\3	40	2,53	38,53		15,22	Densité vraie agrégats	DA=(100-P)/S1	2,58
				Somme 1=	37,36	% Vide occupé par bitume+Eau	VA=((DA-dA)*100)/DA	15,93
Bitume en%	3,80	1,02	3,66		3,59	Vide résiduel	Vm=100-Compacité	7,84
				Somme S2=	40,96	% Vide occupé par bitume	VB=((VA-Vm)*100)/VA	50,75
				100-P =96,34				

ESAAI		A SEC		EN IMMERSION							
		07Jours 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 B : 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	
EPROVETTE 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-P0	23,5	27,2	74	83,1	97,8	103,9
% D'imbibition = $100 \cdot (Ph-P0) / P0$	0,67	0,77	2,12	2,36	2,80	2,95
Moyenne	0,72		1,72		2,87	
Gonflement = Vh-V0	16,94	16,94	67,96	96,38	133,38	173,35
% Gonflement = $100 \cdot (Vh-V0) / V0$	0,11	0,11	0,44	0,62	0,86	1,12
Moyenne	0,11		0,53		0,99	

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

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

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

ESAAI		A SEC		APRES IMMERSION							
		07Jours 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/mm²)		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 B : 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	
EPROVETTE 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 = $3,14 \cdot D^2/4$ mm ²	S	11285,17	11291,44	11291,44	11291,44	11291,44	11297,72	11304,00	11304,00	11316,56	11322,85
Volume = $3,14 \cdot D^2 \cdot Hm/4$ 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-P0	31	27	58	53	85	84
% D'imbibition = $100 \cdot (Ph-P0)/P0$	0,89	0,77	1,66	1,52	2,44	2,41
Moyenne	0,83		0,76		2,42	
Gonflement = Vh-V0	8,47	19,90	68,05	85,03	153,19	187,39
% Gonflement = $100 \cdot (Vh-V0)/V0$	0,05	0,13	0,44	0,55	0,99	1,21
Moyenne	0,06		0,50		1,10	

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

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

Echantillon	Formule En%	P.Spécifique D	Composition centesimaleP	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	Desité 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									
		07Jours 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 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/mm²)		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 B : Les résultats détaillés d'étude de formulation avec déchet

ESAAI		A SEC		APRES IMMERSION DANS L'EAU A 18 °C							
		07Jours		0 Heure		02 Heure		02 Jours		07 Jours	
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 = $3,14 \cdot D^2 / 4$ mm ²	S	11291,44	11285,17	11285,17	11291,44	11291,44	11291,44	11304,00	11304,00	11316,56	11322,85
Volume = $3,14 \cdot D^2 \cdot Hm / 4$ 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-P0	60,20	67,00	74,00	79,00	107,00	110,00
% D'imbibition = $100 \cdot (Ph-P0) / P0$	1,71	1,90	2,10	2,24	3,04	3,12
Moyenne	1,81		1,12		3,08	
Gonflement = $Vh-V0$	8,67	0,00	88,18	73,97	184,81	176,69
% Gonflement = $100 \cdot (Vh-V0) / V0$	0,06	0,00	0,57	0,47	1,19	1,13
Moyenne	0,02		0,52		1,16	

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

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	Desité 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								
	07Jours		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	137,6	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 B : Les résultats détaillés d'étude de formulation avec déchet

ESAAI		A SEC		APRES IMMERSION DANS L'EAU A 18 °C							
		07Jours à l'air libre		0 Heure		02 Heures		02 Jours		07 Jours	
EPROVETTE 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 = $3,14 \cdot D^2 / 4$ mm ²	S	11285,17	11291,44	11285,17	11291,44	11291,44	11291,44	11304,00	11304,00	11316,56	11322,85
Volume = $3,14 \cdot D^2 \cdot Hm / 4$ 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-P0	17,2	19	44	50	82	89
% D'imbibition = $100 \cdot (Ph-P0) / P0$	0,49	0,54	1,26	1,43	2,36	2,55
Moyenne	0,52		0,72		2,45	
Gonflement = Vh-V0	17,08	8,47	99,31	102,09	170,38	187,67
% Gonflement = $100 \cdot (Vh-V0) / V0$	0,11	0,05	0,64	0,66	1,10	1,21
Moyenne	0,05		0,65		1,15	