

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



P0008/05A

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie civil
Laboratoire de Construction et Environnement

Projet de fin d'Etude

THEME

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Traitement et recyclage des déchets industriels dans le domaine de génie civil

Dirigé par :

M^R R.BOUTEMEUR
M^R A.LARIBI

Présenté par :

HAMOUL . M
AMIOUR .M

Promotion 2004/2005

يتمحور بحثنا هذا حول إمكانية تسمين النفايات الصناعية الناتجة عن مخزانات الوقود والأحصى مخزانات المازوت المتواجدة بمحطة مخزن الوقود لتنطال بالحراش باستعمالنا للاسمنت (CPJ 45) درسنا تركيبات - حيث تم تغيير التركيبات الداخلية و هذا بهدف البحث عن التجمد الامثل (خاصية ميكانيكية)
اما باستعمالنا للاسمنت الزفج فادخلنا عليه عدة نسب مئوية من النفاية و تمكنا من الحصول على نتائج مقبولة (مرضية) تجارب كيميائية قد اجرينا على النفاية الجعمدة للتأكد من تثبيتها
الكلمات المفتاحية : نفاية صلبة- التجمد - التثبيت - خرسانة زفتية - تسمين

Abstract :

Our project aims at studying the possibility of developing a solid industrial waste which is a motor fuel stocking-jar mud, and more precisely resulting from an oil fuel-jar which can be found in the oil fuel stocking centre Naftal EL-HARRACH. It is done in a attempt to protect the environment against its harmful effects.

With the hydraulic binder CPJ 45, several formulations were studied, while varying the parameters that are part of the composition of the working material in the research for a better solidification (mechanical resistance).

With the bitumen binder, the formulation of a concrete bitumen with different percentages of incorporated waste, was resulted in acceptable performances.

Test leaching is realised on the on the test tubes to check the stability of the polluting elements, contained in waste .

Key words : Industrial waste, solidification / stabilisation , valorisation, fuel stocking-jar mud ,concrete ,bituminous mix .

Résumé :

Notre projet consiste, à étudier la possibilité de valoriser un déchet industriel solide qui est une boue de bac de stockage ,provenant plus précisément de bac de stockage de mazout se trouvant au centre de stockage de Naftal EL-HARRACH .

Avec le liant CPJ 45 plusieurs formulations ont été étudiées, en faisant varier les paramètres entrant dans la composition du matériau élaboré, dans la recherche d'une meilleure solidification (résistance mécanique).

Avec le liant hydrocarboné, la formulation d'un béton bitumineux avec différents pourcentages de déchet incorporé, a donné des performances acceptable .

Des test de lixiviation sont réalisés, sur les éprouvettes élaborées, pour vérifier la stabilité des éléments polluants, contenus dans le déchet .

Mots clés : déchet industriel, solidification / stabilisation ,valorisation ,boue de bac de stockage ,béton ,enrobés .

REMERCIEMENTS

Nous exprimons notre vive gratitude à nos promoteurs Monsieur R.BOUTMEUR et Monsieur A.LARIBI pour ces disponibilités et ces aides précieuses durant cette année et les années précédentes.

pour son aide et pour le soutien financier dont a bénéficié ce travail.

Notre profonde reconnaissance va à Monsieur A.BOUDJALLALI directeur de recherche pour son accueil dans le laboratoire de CTTTP et sa confiance qu'il nous a accordée.

Ce travail a été effectué au laboratoire de contrôle technique des travaux publics CTTTP sous la direction de monsieur KH.DEKALI, qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude pour l'assistance et les encouragements et pour son aide précieuse et amicale qu'il n'a cessé de nous prodiguer.

On tient à remercier toutes les personnes qui nous ont aidé à finaliser ce modeste travail et surtout monsieur F.BEHRI et toute l'équipe du laboratoire de contrôle technique des travaux publics CTTTP.

Nous remercions aussi monsieur KERBACHI professeur au département d'environnement pour son aide.

Notre reconnaissance va également au membre de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner ce travail.

Finalement, on remercie nos familles respectives ainsi que tous les amis pour leur soutien moral durant toute cette période.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Toute ma famille,

Tous mes amis.

HAMOUL.Med

Je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère mère,

Mon cher père,

Mes sœurs,

Mes frères,

Toute ma famille,

Tous mes amis

Amiour .Med

SOMMAIRE



Remerciements
Dédicaces
Liste des tableaux
Liste des figures

Introduction générale	1
Chapitre I : les déchets et pollution de l'environnement	
I.1. Définition du déchet	3
I.2. Généralité sur les déchets de l'industrie	3
I.3. Impact des déchets sur l'environnement	4
I-4. Gisement des déchets	4
I.4.1. Objectif des procédés	4
I.4.2. Gestion des déchets solides en Algérie	5
I.4.2.1. Introduction	5
I.4.2.2. Réglementation	5
I.4.2.3. Situation en matière de gestion des déchets solides	6
I.4.3. Stratégies de traitement des déchets	8
I.4.3.1. Arrêt de la production des déchets ou du produit générateur de déchet	8
I.4.3.2. Optimisation et innovation technologique	8
I.4.3.3. La mise en oeuvre d'une politique de recyclage, de valorisation et de réutilisation des déchets et de production et de la consommation	9
I.4.3.4. Rejet «éco-compatible» des déchets	9
I.4.3.5. Stockage	9
Chapitre II : procède de stabilisation /solidification	
II.1. Définition et réglementation	11
II.2. Les déchets ultimes a stabiliser	12
II.3. Critères d'admission des déchets dans un centre de	13

II.4. Stabilisation a base de liants hydrauliques	14
II.5. Stabilisation par vitrification	15
II.6. Procédé d'enrobage a l'aide des liants organiques	16
II.6.1. Enrobage à l'aide de bitume	16
II.6.1.1. Principe	16
II.6.1.2. Propriétés du bitume	16
II.6.1.3. Utilisation	16
II.6.2. Enrobage à l'aide des matériaux thermoplastiques	
Chapitre III : Généralité sur les liants bitumineux	
III.1. Introduction	18
III.2. Généralité sur les matériaux bitumineux	18
III.2.1. Origine, fabrication, composition et structure des bitumes	18
III.2.1.1. Origine et fabrication des bitumes	18
III.2.1.1.a. Origine et applications du bitume	18
III.2.1.1.b. Fabrication du bitume	18
III.2.1.2. Composition chimique et structure des bitumes	20
III.2.2. Généralité sur les enrobés	21
III.2.2.1. Définition	21
III.2.2.2. Teneur en liant	21
III.2.2.3. Influence des actions appliquées à la chaussée	21
III.2.2.3.a. Effet du trafic	21
III.2.2.3.b. Effet de la température	22
III.3. Méthode de détermination des propriétés mécaniques des matériaux bitumineux	24
III.3.1. Classification selon le type d'interprétation considéré	24
III.3.2. Classification selon l'état de contrainte et de déformation	26
III.4. propriétés rhéologiques des liants bitumineux	27
III.4.1. Classe de comportement des bitumes purs en fonction de ϵ et T	27
III.4.2. Les caractéristiques classiques	28
III.4.2.1. Pénétrabilité (NF T 66-004)	28
III.4.2.2. Point de ramollissement bille anneau (nf t 66-008)	28
III.4.2.3. Température de fragilité FRAASS (NF T 66-006)	29
III.4.2.4. Essai RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test" (NF T 66-032)	29
III.4.2.5. L'essai PAV "Pressure Aging Vessel" (AASHTO PP1):	30
III.5. La chaussée	31
III.5.1. La couche de surface	31

III.5.2. La couche intermédiaire	31
III.5.3. La couche de fondation	31
III.5.4. La sous-fondation	31
III.5.5. La plate-forme (sol d'appui)	31
III.5.6. La plate-forme (sol d'appui) améliorée	31
III.5.7. La couche d'impression au bitume	32
III.5.8. La couche de nivellement	32
III.5.9. Le recouvrement	32
III.5.10. L'enduit d'accrochage	32
III.5.11. Le macadam	32
Chapitre IV : Constituants des enrobés bitumineux	33
V.I. Introduction	33
IV.2- Les granulats	33
IV.2.1- Les qualités exigées	33
IV.2.2. Principaux essais sur les granulats	34
IV.3. L'échantillonnage des matériaux	41
IV.3.1. Fuseau granulométrique	41
IV.3.2. Poids volumiques	42
IV.4. Résultats des essais	43
IV.5. Etude des bitumes	52
IV.5.1. Types des liants utilisés	52
IV.5.2. Essais sur le bitume	52
IV.5.3. les résultats des essais effectués en laboratoire	55
IV.2.4. Conclusion	55
IV.6. Identification du déchet	56
IV.6.1. Propriétés du déchet	
IV.6.2. Spectre de diffraction des rayons X de la boue	57
IV.6.3. L'analyse granulométrique du déchet	60
IV.7. Etude de l'enrobe	62
IV.7.1. Principe	62
IV.7.2. Méthode du L.C.P.C	62
IV.7.3. La détermination de la surface spécifique et la teneur en liant	62
IV.7.4. les essais sur les enrobes bitumineux	63

Chapitre V : Lixiviation



V.1. Essai de lixiviation	68
- NORME AFNOR X31-210	68
- NORME X31-211	68
V.1.1. Tests de lixiviation et d'extraction : Critère de choix	68
V.1.2. Méthode d'analyse	72

Chapitre VI : Résultats et interprétations

VI.1. Introduction	74
VI.2. Formulation sans déchet:	74
VI.2.1. Granulométrie du mélange	74
VI.1.2. Etude de formulation	76
VI.1.3. Conclusion	80
VI.3. Formulation avec déchet	81
VI.2.1. Granulométrie de Mélange	81
VI.3.2. Les résultats d'étude de formulation avec déchet	82
VI.4. Résultat de lixiviation	87
VI.5. Influence de déchet sur le bitume	88

Conclusion générale

Références bibliographiques

Annexe 1 : Les résultats détaillés de l'étude de formulation sans déchet

Annexe 2 : les résultats détaillés de l'étude de formulation avec déchet

Annexes photos

LISTE DES TABLEAUX



Tableau 1.1	Nature des déchets	7
Tableau 2.1	Liste des déchets industriels ultimes à stabiliser	12
Tableau 2.2	Valeur limites des Critères d'admission des déchets ultimes dans un centre de stockage de déchets ultimes stabilisés.	13
Tableau 4.1	Classement des granulats selon la norme P 18 - 101	37
Tableau 4.2	Interprétation de l'essai de polissage accéléré des granulats	38
Tableau 4.3	Catégories de gravillons	39
Tableau 4.4	Catégories de sables	41
Tableau 4.5	Refus cumulés et compléments à 100 de fraction 0/3	43
Tableau 4.6	Complément a 100 % de refus cumules des fractions 3/8,8/15 et 15/25	44
Tableau 4.7	Densité des agrégats	49
Tableau 4.8	Les résultats des poids spécifiques	49
Tableau 4.9	Les résultats des essais de propreté superficielle	50
Tableau 4.10	Equivalent de sable.	50
Tableau 4.11	Résultats de Los Angeles	51
Tableau 4.12	Les résultats des essais MICRO-DEVAL	51
Tableau 4.13	L'essai de pénétrabilité	55
Tableau 4.14	Essai de point de ramollissement	55
Tableau 4.15	Essai point d'éclair « vase ouvert »	55
Tableau 4.16	Humidité de matériau	56
Tableau 4.17	L'analyse chimique de déchet d'essence	58
Tableau 4.18	Des éléments constituant du déchet	58
Tableau 4.19	Granulométrie du déchet	61
Tableau 4.20	Les valeurs de module de richesse	64
Tableau 5.1	Caractéristique des deux éprouvette de lixiviation	72
Tableau 6.1	Résultats de formulation	76
Tableau 6.2	Composition granulométrique de Mélange	81
Tableau 6.3	Résultats de l'essai DURIEZ avec différent pourcentage de déchets	82
Tableau 6.4	Résultats d'analyse	87
Tableau 6.5	Essai de pénétrabilité et point de ramollissement avec mastic	88

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Pourcentage des différents types de déchets	7
Figure 1.2	Relation producteurs consommateurs	8
Figure 1.3	Stratégies de traitement des déchets	9
Figure 1.4	Cycle des déchets et sous produits dans processus de fabrication ou de traitement d'après Blanchad et al, 1977	10
Figure 3.1	Principe de fabrication des bitumes	19
Figure 3.2	a) macrostructure des asphaltènes b) schématisation de la structure colloïdale du bitume.	20
Figure 3.3	Schématisation des sollicitations induites par le trafic	22
Figure 3.4	Schématisation des sollicitations induites par la température	24
Figure 3.5	Exemple d'essai: a) essai de traction-compression (homogène), b) essai de flexion de poutre (non-homogène)	26
Figure 3.6	Classe de comportement des bitumes en fonction de ϵ et T	27
Figure 3.7	L'essai de pénétrabilité pour le bitume	28
Figure 3.8	Essai RTFOT	29
Figure 3.9	L'essai PAV	30
Figure 4.1	les tamis granulométrique	35
Figure 4.2	Essai d'équivalent de sable	40
Figure 4.3	Courbe granulométrique de fraction 0/3	45
Figure 4.4	Courbe granulométrique de fraction 3/8	46
Figure 4.5	Courbe granulométrique de fraction 8/15	47
Figure 4.6	Courbe granulométrique de fraction 15/258 Courbe	48
Figure 4.7	principe d'Essai de pénétration pour le bitume	53
Figure 4.8	Appareil d'Essai de pénétrabilité	53
Figure 4.9	Essai de ramollissement	54
Figure 4.10	déchet de mazout	56
Figure 4.11	Spectre de diffraction des rayons X de notre déchet	57

Figure 4.12	Spectre de diffraction des rayons X de déchet d'essence.	59
Figure 4.13	Courbe granulométrique de déchet	62
Figure 4.14	l'éprouvette de DURIEZ	66
Figure 4.15	Moule de l'essai duriez simple	67
Figure 4.16	Moule de l'essai duriez dilate	67
Figure 4.17	Malaxeur	69
Figure 4.18	Presse universelle	69
Figure 5.1	Détermination du PH	70
Figure 5.2	Deux éprouvettes de lixiviation	72
Figure 6.2	La résistance mécanique obtenue en fonction de la teneur en liant	77
Figure 6.3	La densité en fonction de la teneur en liant	78
Figure 6.4	La compacité et le pourcentage des vides en fonction de la teneur en liant	79
Figure 6.5	Pourcentage de gonflement et d'imbibition en fonction de la teneur en liant	80
Figure 6.6	La résistance en fonction du pourcentage du déchet	83
Figure 6.7	Le rapport r'/R en fonction du pourcentage du déchet	84
Figure 6.8	La densité vraie et apparente en fonction du pourcentage de déchet.	85
Figure 6.9	Pourcentage de gonflement en fonction du pourcentage du déchet	86
Figure 6.10	la compacité en fonction du pourcentage du déchet	86
Figure 6.11	Essai de pénétrabilité avec L/S et L/d	89

Introduction générale :

L'industrialisation et l'urbanisation se sont développées pendant le 19^{em} siècle et la première moitié du 20^{em} siècle en ignorant pratiquement les conséquences environnementales des nouvelles pratiques de consommation et de production mises en œuvre. Les modes de vie sont devenus de moins en moins économes en matières premières et en énergie consommées et de plus en plus générateurs de déchets, dans la seconde moitié du 20^{em} siècle. Les flux des produits matériels se sont intensifiés et globalisés à l'échelle de la planète. Les matières et matériaux se sont artificialisés avec des caractéristiques qui rendent plus difficile leur réinsertion dans les cycles biogéochimiques naturels. Depuis la fin des années 1950, une prise de conscience s'est développée : les évolutions démographiques, la raréfaction prévisible des ressources naturelles, les crises énergétiques, les catastrophes écologiques ont fixé des bornes à une croissance industrielle incontrôlée. Aujourd'hui, les préoccupations écologiques sont présentes dans tous les secteurs de l'activité économique et le management des entreprises intègre de plus en plus la composante environnementale. Les méthodes de gestion et de traitement des déchets sont au cœur de cette problématique et conditionnent la pérennité des modes de production ou de consommation [1].

La quantité de déchets produite est de plus en plus élevée dans le monde. En Algérie la loi n°01-19 du Ramadan 1422 correspondant au 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination et le traitement des déchets et en France, la loi sur l'élimination et le traitement des déchets du 13 juillet 1992, de réserver les centres d'enfouissement techniques aux déchets ultimes, à savoir les déchets qui ne sont plus valorisables et les déchets industriels spéciaux dont on ne peut plus réduire le caractère polluant ou dangereux.

On se trouve donc devant la nécessité de se tourner vers de nouvelles filières de traitement. Pour les déchets industriels spéciaux minéraux, la filière la plus utilisée à ce jour est la stabilisation/solidification (S/S) à l'aide de liants hydrocarbonés. Ces déchets S/S peuvent représenter une source de pollution dans le milieu de stockage ou de valorisation. La pollution est provoquée par l'émission de polluants contenus dans les déchets S/S lors du contact avec de l'eau. Les conditions de stockage ou de valorisation de ces déchets S/S sont à l'heure actuelle définies sur des bases réglementaires et techniques ne reposant pas ou peu sur la notion d'impact sur les milieux d'exposition, en raison d'un manque de bases scientifiques dans ce domaine. Et, du point de vue de la protection de l'environnement l'entreprise **SONATRACH** est préoccupée de l'élimination ou bien du traitement des déchets provenant de bacs de stockage (du mazout ou d'essence). Sur la proposition de **NAFTAL**, le Laboratoire de Construction et Environnement

(L.C.E) du département de Génie Civil à l'aide du concours du (C.T.T.P) à lancé une étude concernant le traitement et le recyclage dans le domaine de génie civil des déchets provenant du nettoyage des bacs de stockage du carburant, étant donné que les boues de ce déchet sont toxiques, et que les nouveaux règlements interdisent de rejeter ce déchet dans la nature car il pollue l'environnement.

Il y a des études déjà faites sur le traitement et le recyclage des déchets de forage et les déchets de bacs de stockage d'essence.

Notre travail consiste, à étudier la possibilité de traiter ce déchet (déchet de mazout) avec un liant hydrocarboné et de le valoriser en vue de l'utiliser dans les travaux routiers.

Dans notre projet de fin d'étude on a suivi les étapes suivants : Le premier chapitre traite les déchets, la pollution de l'environnement, et le gisement des déchets .On parle dans le deuxième chapitre sur le procédé de traitement des déchets, alors que le troisième chapitre traite des généralités sur les liants bitumineux et les enrobés. Le quatrième chapitre aborde les caractéristiques des matériaux utilisés et les essais suivis, l'essai de lixiviation est mentionné dans le cinquième chapitre. Les résultats obtenus et les interprétations établit sont récapitulés dans le sixième chapitre.

Chapitre I :

Les déchets et la pollution de l'environnement

I-1. Définition du déchet :

On a coutume de définir le déchet comme « Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon » d'après la loi du 15 juillet 1975.

Plus récemment, la loi française du 13 juillet 1992 a introduit la notion de « déchet ultime»:

« Est ultime un déchet qui résulte ou non du traitement des déchets et qui n'est plus susceptible d'être traité dans des conditions techniques et économiques du moment notamment par l'extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux » [2,3].

1-2. Généralité sur les déchets de l'industrie :

Les déchets produits par l'industrie relèvent de quatre catégories : les déchets inertes, les déchets industriels banals, les déchets industriels spéciaux et les déchets industriels autres :

- **Les déchets inertes** (physiquement et chimiquement) se présentent sous forme solide. Leur composition est exclusivement minérale et n'inclut pas de substances toxiques ou dangereuses.
- **Les déchets industriels banals** sont assimilables aux déchets ménagers, bien que générant de façon générale moins de nuisances, en particulier olfactives ; ils comprennent les emballages, les matériaux non souillés par des substances toxiques ou dangereuses à base de bois, papier, carton, ferrailles, textiles et matières plastiques, soit sous forme homogène ou en mélange.
- **Les déchets industriels spéciaux** présentent un danger intrinsèque compte tenu des substances qu'ils contiennent. La liste de ces déchets a été transcrite de la législation communautaire en droit national par le décret n° 2002 - 540 du 18 avril 2002 relatif à la classification des déchets.
- **Les déchets industriels autres** sont les déchets industriels non inertes, non banals et non spéciaux. Les boues de traitement d'effluents des industries agroalimentaires, les cendres issues de la combustion du charbon sont des exemples de ces déchets [4].

I-3. Impact des déchets sur l'environnement :

Le dépôt incontrôlé des déchets sur les décharges provoque des émissions entraînant une détérioration :

- de la qualité des eaux de surface et souterraine ;
- de l'air, ce qui met en danger non seulement la santé des travailleurs sur site, mais aussi celle de toutes les personnes vivant à proximité des décharges.

Les décharges incontrôlées présentent aussi d'autres inconvénients :

- baisse de rendement dans les champs agricoles environnants ;
- mauvaise visibilité provoquée par la propagation de fumées ;
- gêne due à l'odeur ;
- destruction du paysage.

Il convient de souligner que ces nuisances ne sont pas dues à la présence des décharges, mais plutôt :

- au fait que les décharges ne sont pas d'un type d'exploitation contrôlée ;
- à l'utilisation d'équipement souvent défectueux ;
- à l'absence d'infrastructures de valorisation et de récupération [1].

1-4. Gisement des déchets :

1-4-1. Objectif des procédés :

Les principes généraux fixant le cadre juridique de l'élimination des déchets ont été édictés par la directive du conseil de la communauté européenne n : 75/442 du 15 juillet 1975 qui énonce l'obligation pour les états membres de prendre les mesures nécessaires pour interdire l'abandon, le rejet et l'élimination incontrôlée des déchets.

La préservation de l'environnement a un coût et la bonne gestion des déchets doit être assumée financièrement .En particulier, le principe pollueur-payeur est reconnu par l'article 15 de cette directive :le coût d'élimination des déchets doit être supporté par les producteurs et par les détenteurs de produits générateurs de déchets, ainsi que les détenteurs des déchets qui les remettent à un ramasseur ou un éliminateur. Ce principe est repris en droit français, puisque la loi n : 75/442 du 15 juillet 1975 (article6) prévoit que les producteurs des déchets peuvent être appelés à participer à leur élimination, soit financièrement, soit en prêtant leur concours à ce type d'opération contre rémunération .Cette même loi édicte l'obligation d'élimination des déchets pour tout détenteur ou producteur et de manière à éviter :

- la production d'effet nocif sur le sol, la flore et la faune;
- la dégradation de sites ou de paysages;
- la pollution de l'air ou des eaux ;
- et, d'une façon générale, l'atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement, en appliquant ainsi le principe de précaution [1].

1-4-2. Gestion des déchets solides en Algérie :

1-4-2-1. Introduction :

La civilisation moderne produit des masses colossales de déchets solides de diverses origines (domestique, industriels, hospitalières, agricole) et si, bien souvent, les déchets ne sont nuisibles qu'en raison de leur caractère encombrant ou inesthétique, ils peuvent également être toxiques et causer de graves pollutions.

Deux types de pollutions peuvent être générés par les déchets solides :

- les pollutions biologiques, dont la manifestation se caractérise par la prolifération d'agents pathogènes favorisée par la présence de résidus organiques en décomposition ou de déchets spécifiques tels que les déchets hospitaliers;
- les pollutions chimiques, engendrés par la présence de déchets toxiques, notamment certains déchets industriels, qui présentent un danger d'autant plus grand que leurs effets peuvent ne se manifester qu'après un long temps d'exposition.

Ces pollutions peuvent altérer la qualité des eaux superficielles et souterraines, par lessivage des dépôts de déchets par les eaux de pluie, puis infiltration des lixiviats et avoir comme conséquence des maladies telles que fièvre typhoïde, la dysenterie ainsi que des affections dues aux substances toxiques pouvant se trouver dans des décharges (comme le mercure par exemple)[5].

1-4-2-2. Réglementation :

L'élimination des déchets comporte notamment les opérations de collecte, transport, stockage, tri et traitement nécessaires à la récupération de l'énergie ou des éléments et matériaux réutilisables, ainsi qu'au dépôt ou au rejet dans le milieu naturel de tous autres produits dans des conditions propres à éviter les nuisances.

Ces dispositions générales ont été complétées par le Décret 84-378 du 15 décembre 1984 fixant les conditions de nettoyage, d'enlèvement et de traitement des déchets solides urbains, qui indique que "l'assemblée populaire communale organise, sur son territoire, soit directement,

soit en association par l'intermédiaire d'organismes intercommunaux et/ou appropriés, un service de collecte et d'élimination des déchets solides urbains, à l'exclusion de certains déchets "(comme par exemple les déchets industriels).

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

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

En plus de cette loi qui définit le déchet, l'Algérie possède d'autres lois et décrets relatifs à la protection de l'environnement tels que :

-Loi n°83-03 du 05/02/1983, relative à la protection de l'environnement dont certains articles ont pour objet la protection des milieux récepteurs (Article 47), et la nécessité d'éliminer les déchets (Article 90).

-Décret n°84-378 du 15/12/1984, fixant les conditions de nettoyage, d'enlèvement et de traitement des déchets solides urbains.

-Décret n°02-372 du 11/11/2002 relatif aux déchets d'emballages.[7,1]

1-4-2-3. Situation en matière de gestion des déchets solides :

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

Une étude menée par le bureau d'étude BC-Berline, datant de 1994, a indiqué que la production des déchets industriels dangereux en Algérie est d'environ 185 000 t/an.

Cette quantité globale se décompose comme suit, par nature de déchets [5] :

Tableau I-1 : nature des déchets

Déchets d'origine minérale	55.000	t/an
Bous minérales	18.000	t/an
Résidus de pétrochimie et de cokéfaction	58.000	t/an
boues polluées au zinc	25.000	t/an
Solvants organiques, résidus de peinture	4.000	t/an
Boues métalliques et électrolytiques	2.000	t/an
Résidus de fabrication	2.500	t/an

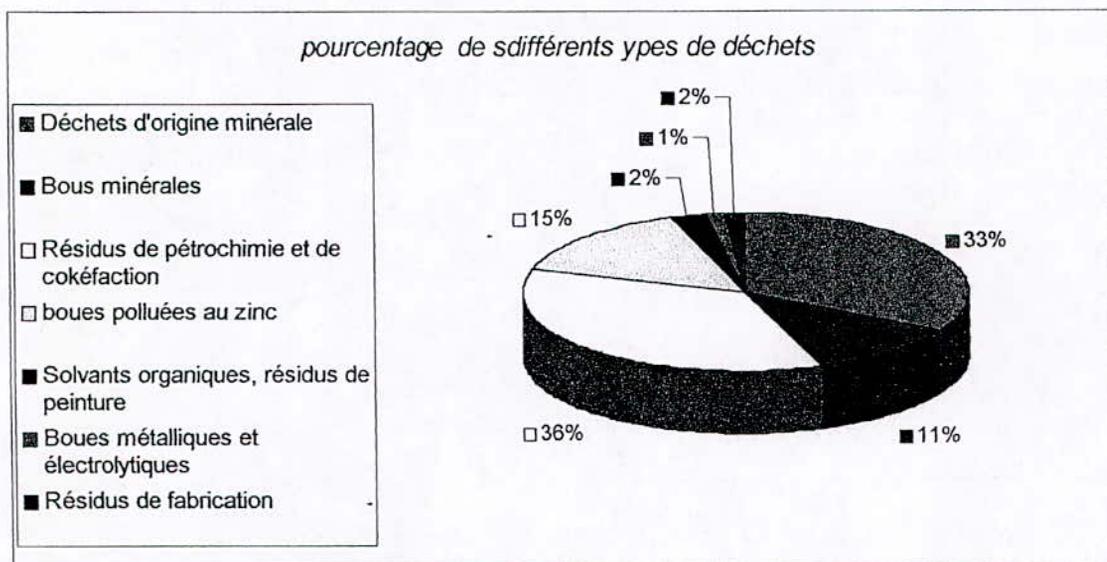


Figure I-1 : Pourcentage des différents types de déchets

Actuellement, un grand nombre d'unités industrielles, ne disposant pas de moyen de traitement de déchets, se trouvent confrontées au problème d'élimination des déchets, qu'elles génèrent et notamment les déchets toxiques. Ceux-ci sont souvent stockés au niveau des entreprises elles-mêmes, ce qui ne peut constituer une solution définitive. Ils se retrouvent par fois en décharges.

I.4.3. Stratégies de traitement des déchets :

Les stratégies d'une bonne gestion des déchets s'appuient sur deux grands principes :

- Il faut prendre en compte simultanément les notions de matière, d'énergie, d'environnement et d'économie.
- Dès lors que ces stratégies ont pour objectif le retour des déchets dans le milieu naturel, il y a lieu de s'inspirer des lois qui régissent le fonctionnement de ce milieu, Ces lois existent à travers les cycles bio-géo-chimiques qui régissent la circulation des éléments chimiques dans les différents milieux physiques et les espèces vivantes. Pour cela il faut retenir la circulation de la matière à travers la trilogie [6].

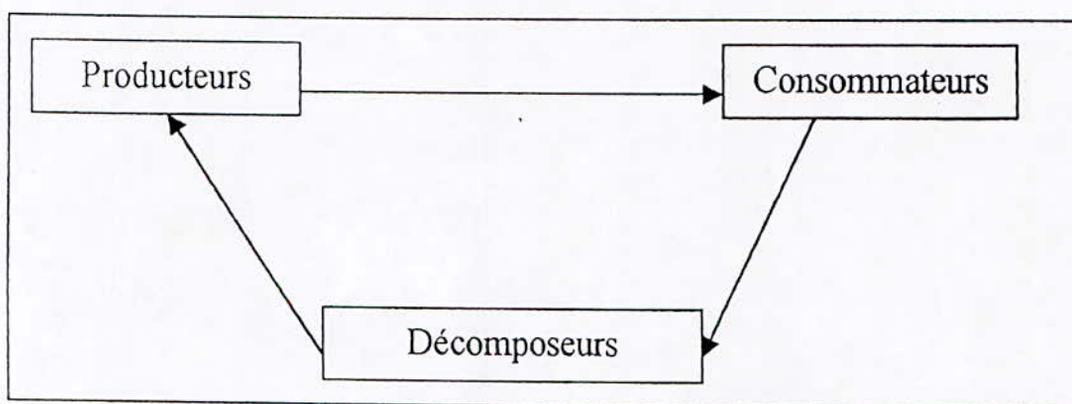


Figure 1.2 : Relation producteurs- consommateurs

La gestion des déchets passe par cinq stratégies possibles :

I.4.3.1. Arrêt de la production des déchets ou du produit générateur de déchet :

Les problèmes, souvent liés à l'impact sur l'environnement ou à la santé humaine, peuvent conduire à la nécessité de cesser l'activité à l'origine de la production de tels déchets [6].

I.4.3.2. Optimisation et innovation technologique :

Réduire la quantité de déchets ou en produire de moins polluants relève du domaine des technologies et des produits propres, cet objectif peut être atteint en minimisant les rejets ou en optimisant l'utilisation des matières premières et de l'énergie.

1.4.3.3. La mise en oeuvre d'une politique de recyclage, de valorisation et de réutilisation des déchets et de production et de la consommation

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

1.4.3.4. Rejet «éco-compatible » des déchets

Il y a lieu d'assurer un retour «acceptable » des déchets produits dans le milieu naturel, l'éco-compatibilité peut être définie par le fait que ces déchets sont intégrés au cycle bio-géochimique sans entraîner des dysfonctionnements prévisibles ou identifiables. Cet objectif peut être atteint soit par des voies de valorisation (la réutilisation des déchets comme amendement en agriculture, par exemple), soit après transformation chimique ou conditionnement [6].

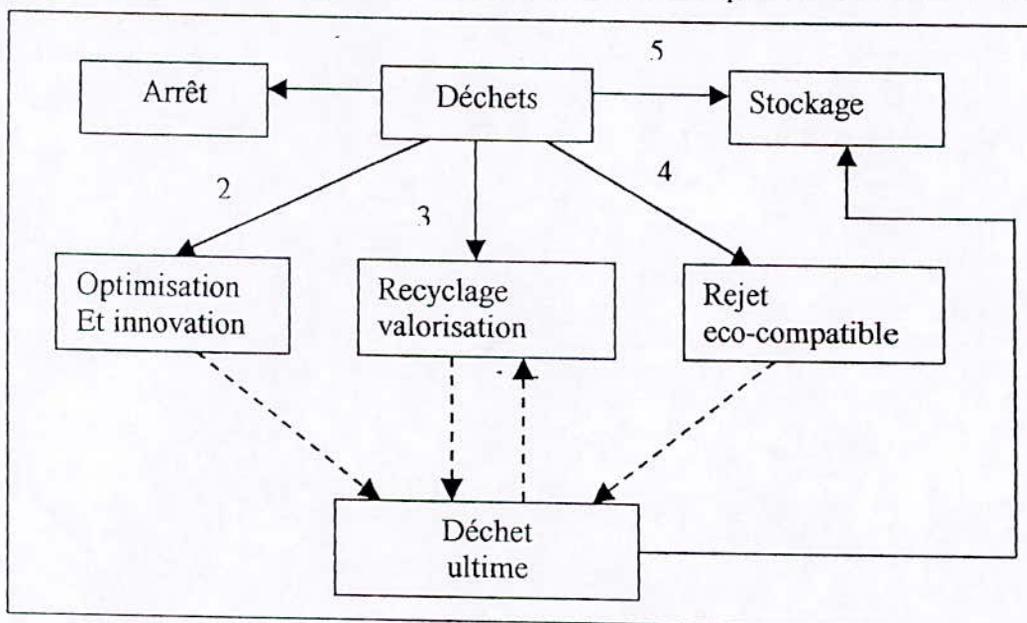


Figure 1.3 : Stratégies de traitement des déchets

1.4.3.5. Stockage

Il arrive, et c'est le cas des déchets ultimes, que la solution de stockage sûr, dans ou sous le sol, demeure le recours inévitable.

Avant de procéder aux différentes filières de traitement des déchets, nous allons schématiser le cycle des déchets et sous-produits issus d'un processus industriel.

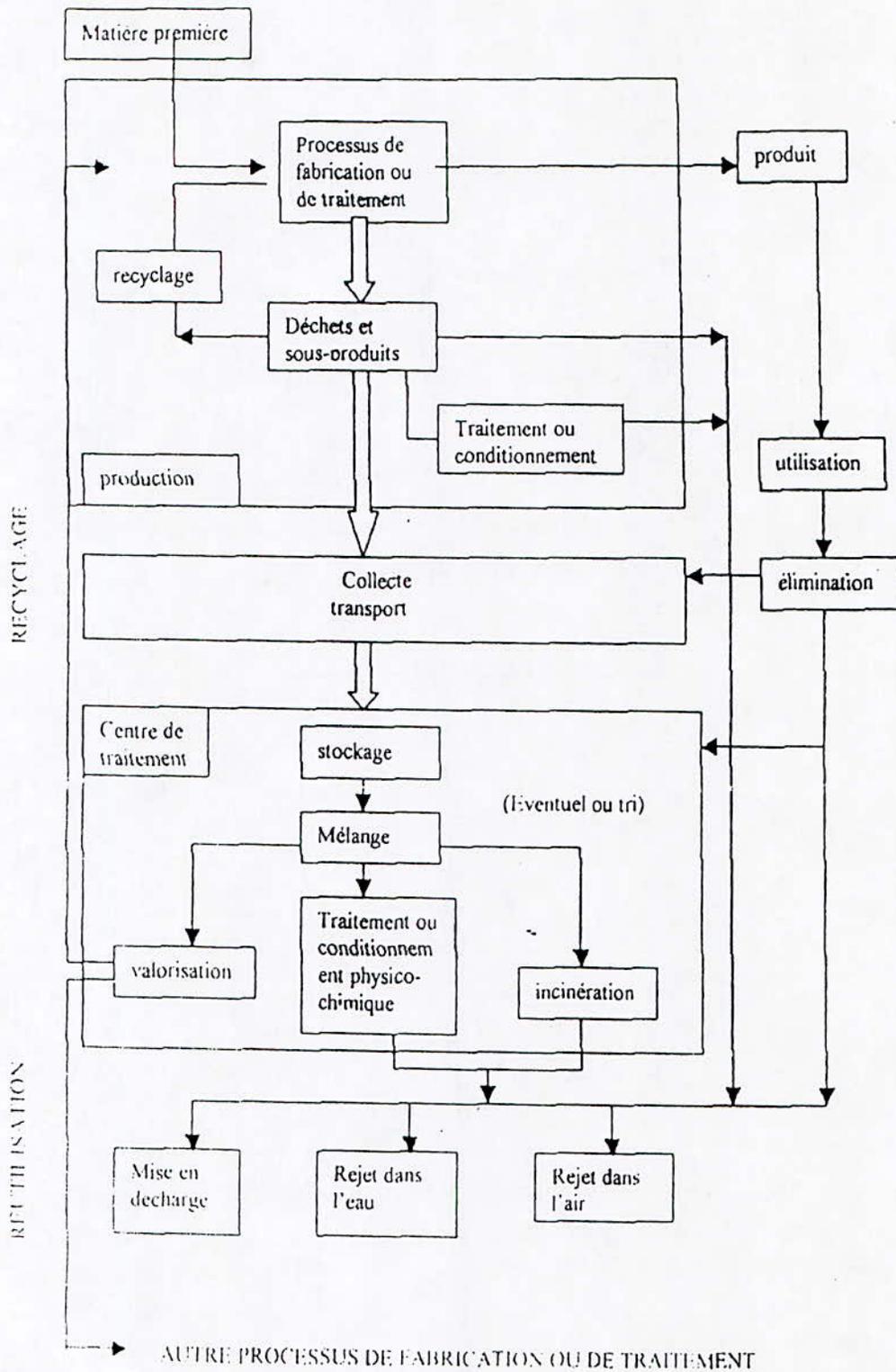


Figure 1.4 : Cycle des déchets et sous-produits dans un processus de fabrication ou de traitement d'après Rlanhad et al, 1977.

Chapitre II:

Procédé de stabilisation/solidification

II-1. Définition et réglementation :

Un déchet est considéré comme *stabilisé* quand sa perméabilité à l'eau et sa fraction *lixivable* ont été réduites et quand sa tenue mécanique a été améliorée de telle manière que ses caractéristiques satisfassent au critère d'admissibilité des déchets stabilisés dans les centres de stockage, suivant la réglementation en vigueur.

Les objectifs des procédés de stabilisation et le gisement des déchets susceptibles d'être stabilisés sont donc définis par un cadre juridique et les pouvoirs publics jouent un rôle primordial dans l'orientation et le développement industriel des filières de traitement. Le critère de stabilité reconnu à un déchet doit être vérifiable selon une procédure objective.

Le déchet stabilisé doit être inerte c'est à dire dans un état de stabilité physico-chimique tel qu'il ne puisse pas subir de transformations susceptibles de générer des nuisances environnementales.

Les tests prévus pour l'admission des déchets inertes en centre de stockage visent ainsi d'une part, à vérifier l'intégrité et la pérennité de la structure physique des déchets solidifiés (essais de résistance mécanique sur les éprouvettes solides et selon les normes relatives à ce type d'essai) et d'autre part, à l'évaluation de leur potentiel polluant par des tests de lixiviation. Les quantités de potentiel polluant solubilisés lors des contacts avec l'eau dans les conditions requises par la norme expérimentale XPX31-210 sont comparées aux seuils fixés par réglementation pour le contrôle de l'admission en centre de stockage des déchets industriels spéciaux.

Un procédé de stabilisation-solidification doit permettre d'immobiliser, au sein des matrices solides, les polluants contenus dans le déchet traité. Deux effets sont visés : le confinement et la réduction à un très faible niveau de leurs solubilités.

Le confinement des polluants dans une matrice solide consiste à les isoler du milieu extérieur à la matrice afin de réduire les contacts avec l'eau ou tout solvant susceptible de les dissoudre et de les disperser. Les meilleurs procédés sont, à cet égard, ceux qui permettent d'obtenir des matériaux non poreux et hydrophobes, tel que les bitumes. Une autre exigence est la pérennité de la structure solide qui est conditionnée par la durabilité et les qualités mécaniques du matériau obtenu. Les mortiers et bétons réalisés avec des liants hydrauliques peuvent satisfaire ces exigences.

L'autre effet attendu (plus chimique) consiste à immobiliser les polluants par insolubilisation. Au sein d'une matrice poreuse, tel qu'un béton ou mortier réalisé à l'aide d'un ciment, les polluants présents sous une forme très peu soluble ne seront alors mobilisés que très

difficilement et très lentement, lors d'un contact du matériau avec de l'eau. Des précipités très peu solubles tels que des hydroxydes ou des phases cimentières néoformées peuvent ainsi fixer des polluants métalliques [1].

II-2. Les déchets ultimes à stabiliser :

L'arrêté du 18 décembre 1992, qui fixe les conditions de stockage de certains déchets industriels spéciaux ultimes et stabilisés, a précisé les définitions essentielles suivantes :

Les déchets ultimes sont des déchets, résultants ou non de processus de traitement de déchets, qui ne sont plus susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux [1].

Tableau 2.1 : Liste des déchets industriels ultimes à stabiliser [7].

Déchets à stabiliser	Catégorie
<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>A</p> <p>Déchets devant être stabilisés avant stockage depuis le 30 mars 1995</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 	<p>B</p> <p>Déchets devant être stabilisés avant stockage depuis le 30 mars 1998</p>

II-3. Critères d'admission des déchets dans un centre de stockage de déchets ultimes stabilisés :

Les objectifs fixés par le cahier des charges d'un procédé de stabilisation-solidification dépend essentiellement des modes de gestion prévus pour les solidifiats. Une filière parfaitement définie est celle de l'élimination vers un centre de stockage de déchets ultimes stabilisés (décharge de classe 1) après inertage. Dans ce cas le test mis en œuvre pour caractériser le potentiel polluant des déchets est effectué par trois lixiviations successives sur un échantillon broyé du matériau, selon la norme XP X31-210. L'arrêté du 18 décembre 1992 définit les valeurs limites qui représentent les critères d'admission des déchets. Le tableau suivant donne les seuils d'admission.

4 < pH < 13	Cr ⁶⁺ < 5 mg/kg	CN < 5 mg/kg
Siccité > 35%	Cr < 50 mg/kg	Ni < 50 mg/kg
Fraction soluble < 10/100	Pb < 50 mg/kg	As < 10 mg/kg
DCO < 2 000 mg/kg	Zn < 250 mg/kg	Hg < 5 mg/kg
Phénols < 100 mg/kg	Cd < 25 mg/kg	/

Les résultats des tests sont exprimés en fonction des modalités de calcul proposées dans l'annexe de la norme XP X31 - 210 et expriment le total des quantités extraites par les lixiviations rapportées à la masse des matériaux.

Un projet de modification de l'arrêté du 18 décembre 1992 prévoit d'ajouter des tests de caractérisation physique pour vérifier la résistance mécanique des déchets et de les classer en tant que solides massifs, solides granulaires ou bien dans aucun de ces deux catégories. Il est alors prévu des tests de lixiviation spécifiques (norme XP X31-211, XP X31-410 ou XP X31-210) adaptés à chacune des catégories définies [1].

II-4. Stabilisation à base de liants hydrauliques :

Les liants hydrauliques, dont les propriétés permettent de fabriquer des bétons, constituent des matrices de choix pour les procédés de stabilisation/solidification. Le traitement consiste alors à réaliser un matériau analogue à un béton dans lequel les déchets se substituent aux granulats.

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 :

-La solidification : Le mélange déchet-réactifs doit faire prise dans le temps afin d'obtenir une masse solide [8].

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 hydrauliques et/ou en activant le déchet si celui-ci est hydrauliquement réactif [1].

-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 et par d'autres réactions chimiques. La stabilisation fait donc appel à l'ensemble des traitements physico-chimiques [8].

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 une matrice cimentière (liants hydrauliques) qui réalise en même temps la stabilisation et la solidification seules ou en mélange avec de la chaux ou d'autres additifs, les ciments et autres réactifs pouzzolaniques sont très utilisés en solidification/stabilisation des déchets solides et des boues. Le terme ciment recouvre dans le langage commun, des matériaux finement broyés qui prennent prise en présence d'eau pour former, après durcissement, une matière solide poreuse : la prise hydraulique qui est due aux réactions d'hydratation des composés du ciment.

Dès l'antiquité, les Romains ont utilisés des mélanges de chaux et pouzzolanes naturelles (cendres volcaniques) ou artificielles (briques d'argile cuite et pilées) pour obtenir un ciment avec lequel ils bâtirent de grands ouvrages dont la durabilité a été fort remarquable.

La stabilisation- solidification des déchets peut être obtenue par l'ajout d'un ciment ou d'un mélange de réactifs ayant des propriétés pouzzolaniques. Le ciment joue alors le rôle de liants hydraulique. Certains déchets possèdent par eux –mêmes des propriétés pouzzolaniques et sont donc susceptibles d'entrer dans la composition des ciments commerciaux (comme les laitiers de hauts fourneaux ou les cendres volantes de centrale thermique, par exemple). Ces déchets peuvent aussi intervenir dans la formulation de mélanges réactifs pour le procédé de stabilisation –solidification [1].

II-5. Stabilisation par vitrification :

Un verre est un solide non cristallin, présentant le phénomène de transition vitreuse : il est obtenu par refroidissement d'un liquide et, à la différence d'un cristal, une répartition ordonnée et régulière d'un motif élémentaire ne se retrouve pas à l'échelle atomique. L'état thermodynamique d'un verre est métastable et la transition liquide-solide est continue, avec une variation de la viscosité en fonction de la température. Elle est aussi réversible et de nombreux composés peuvent être inclus aux oxydes de base, sans modifier les qualités du matériau obtenu.

Aujourd'hui, l'industrie verrière est une industrie de haute technologie mais les principes sont restés les mêmes : amener la charge à sa température de fusion et laisser refroidir pour obtenir un matériau solide ayant les caractéristiques souhaitées. Les procédés continus se sont développés et ont été automatisés. Les caractéristiques de conduction du verre chaud permettent de chauffer la matière par un courant électrique appliqué dans la coulée elle-même. La vitrification de déchets consiste donc à obtenir une matrice vitreuse où les polluants sont parfaitement confinés dans un matériau non poreux. Le verre est obtenu par fusion à haute température du déchet lui-même et d'éventuels ajouts complémentaires. La matrice vitreuse en fusion doit être refroidie par un moyen adéquat permettant de figer l'état vitreux[1].

II-6. Procédé d'enrobage à l'aide de liants organiques[1] :

II -6-1. Enrobage à l'aide de bitume :

II -6-1-1.Principe :

Le principe de solidification consiste à disperser de manière homogène le déchet granulaire dans la matrice de bitume. La viscosité du bitume, très élevée à la température ambiante, permet d'obtenir un matériau relativement solide et imperméable où les polluants contenus dans les déchets sont confinés.

II-6-1-2.Propriétés du bitume :

Le bitume est un mélange complexe d'hydrocarbures aliphatiques naphéniques et aromatiques à masses molaires élevées, obtenu pendant la distillation des pétroles bruts.

Un bitume commercial est caractérisé par des essais empiriques normalisés :

-la pénétrabilité d'une aiguille type au bout de 5 s, à température donnée (norme NF EN 1426);

- le point de ramollissement (méthode "bille et anneau", norme NF EN 1427);
- la densité voisine de 1 à 25°C pour tous les bitumes;
- la perte par chauffage (163°C) pendant 5 h (norme NF T66-011);
- le point d'éclair des vapeurs et le point de feu du bitume (NF T66-009).

Du point de vue mécanique, le bitume se comporte à la température ambiante, comme un matériau viscoélastique. La viscosité des bitumes diminue généralement avec l'augmentation de la température et il devient pratiquement liquide pour des températures proches de 200°C.

II-6-1-3. Utilisation :

Le bitume peut être utilisé pour le confinement des déchets grâce à son faible coût, sa facilité de mise en œuvre et aux qualités suivantes :

- bon pouvoir agglomérant car il adhère à la majorité des matériaux ;
- bonne stabilité physico-chimique vis-à-vis de la plupart des agents chimiques usuels;
- très faible perméabilité et hydrophobie, qui permettent un bon confinement par rapport à l'eau ,

Mais l'enrobage dans le bitume présente des inconvénients :

- comme toute matière organique, le bitume peut être sensible à l'oxydation, à certaines agressions microbiologiques et sa présence dans un centre de stockage présenterait un risque grave en cas d'incendie ;
 - l'élimination de l'eau contenue dans le déchet nécessaire avant ou pendant leur incorporation dans le bitume chaud, avant refroidissement et durcissement ;
 - les températures requises pour la fluidisation du bitume peuvent rendre nécessaire un traitement des gaz et fumés ;
 - la quantité de bitume nécessaire pour un bon enrobage des déchets peut être importante et entraîner une augmentation du volume de matériau à éliminer ;
 - le devenir à long terme des enrobés de bitume est difficile à prévoir : le matériau composite constitué d'une gaine organique contenant des inclusions minérales solubles peut connaître des évolutions destructurantes, sous l'action de l'eau ou dans le cas de processus thermiques ou oxydants.

II-6-2. Enrobage à l'aide de matériaux thermoplastiques :

Les matériaux thermoplastiques sont des composés macromoléculaires qui ont la propriété de devenir pâteux et relativement fluide lorsque l'on élève la température. Comme pour les bitumes, ils retrouvent un état solide si la température s'abaisse. Ils peuvent alors avoir des qualités d'enrobage et permettre le confinement de déchets granulaires. Le polyéthylène, le polypropylène et le polychlorure de vinyle sont des matériaux thermoplastiques courants mais dont le coût reste prohibitif pour l'enrobage des déchets. De plus, les différents plastiques ne sont pas toujours compatibles quant il s'agit de les mélanger pour les refondre [1].

Chapitre III :

Généralités sur les liants bitumineux

III-1. Introduction :

Tout d'abord, nous présentons brièvement quelques généralités sur l'origine, la fabrication, la composition, ainsi que la structure des bitumes. Quelques propriétés des enrobés sont alors introduites. Il s'agit en particulier d'étudier l'influence de différents paramètres tels que la nature et la teneur en liant ou en filler, ainsi que l'influence du trafic et de la température sur les propriétés des enrobés bitumineux. Ensuite, les propriétés rhéologiques des bitumes, des mastics et des enrobés sont abordées, ainsi que leurs principaux essais de caractérisation. Enfin nous citons les différentes couches de la chaussée.

III-2. Généralités sur les matériaux bitumineux [10] :

III-2-1. Origine, fabrication, composition et structure des bitumes :

III-2-1-1. Origine et fabrication des bitumes :

III-2-1-1-a. Origine et applications du bitume :

Les bitumes sont surtout composés de carbone et d'hydrogène, d'où leur nom d'hydrocarbure. Le bitume est utilisé dans l'industrie pour ses propriétés d'étanchéité et d'isolation (thermique et acoustique). Néanmoins, les applications routières sont les plus nombreuses puisque, en effet, 90% de la production de bitume est utilisée sous formes d'enrobés et d'enduits superficiels. Par ailleurs, on estime que la totalité des réserves mondiales de pétrole brut devrait dépasser les 600Gt, ce qui laisse présager un long et bel avenir à cette industrie. En outre, il convient de distinguer les termes de bitume et de liant hydrocarboné trop souvent confondus. En effet, le liant hydrocarboné peut être bitumineux, goudronneux, à base de bitume fluidifié...

III-2-1-1-b. Fabrication du bitume :

Concernant les principaux modes de fabrication des bitumes, citons la distillation en raffinerie des pétroles bruts lourds contenant suffisamment de fractions lourdes pour produire du bitume. La première étape de ce processus consiste en une distillation atmosphérique qui permet de séparer les fractions légères du pétrole (essences, kérosène, gaz) des fractions lourdes, ces dernières étant ensuite distillées sous vide pour produire fuels, huiles et bitume. Outre la distillation, citons encore les procédés de soufflage et de désasphaltage. Le premier procédé consiste à oxyder les résidus sous vide par soufflage d'air chaud à 250 °C. Le deuxième procédé est, quant à lui, utilisé pour des résidus sous vide ayant une teneur en fractions lubrifiantes trop importante et consiste à traverser le résidu sous vide par un courant

ascendant de solvant : la différence de solubilité des fractions bitumineuses vis-à-vis du solvant employé permet alors d'obtenir le bitume souhaité. Dans ce dernier cas, le bitume présente une faible pénétrabilité.

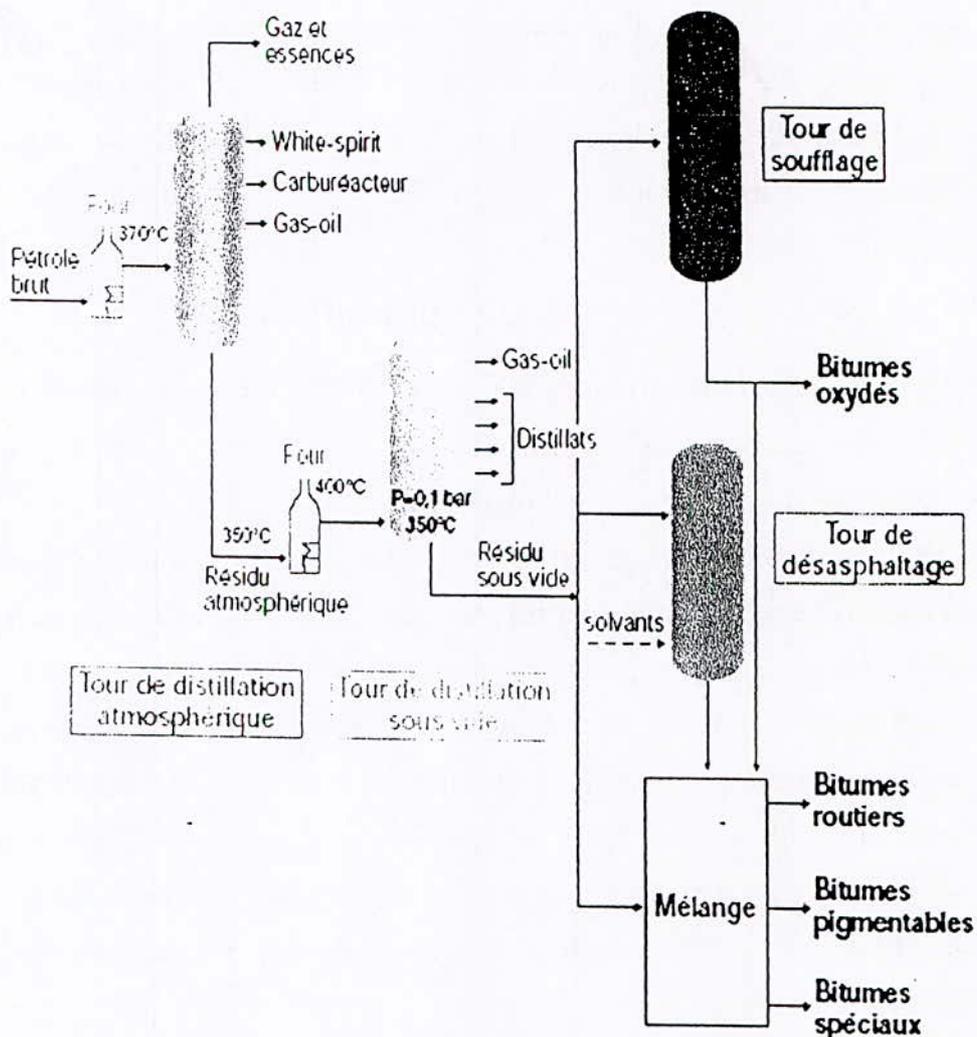


Figure 3-1 : Principe de fabrication des bitumes.

III -2-1-2. Composition chimique et structure des bitumes :

On distingue deux grandes familles de composés du bitume : les **asphaltènes** et les **maltènes**. Les asphaltènes sont composés essentiellement d'hydrogène et de carbone et se présentent sous la forme d'un "solide" friable brun à noir. Généralement, les bitumes comportent 10 à 20% en poids d'asphaltènes. Quant aux maltènes, ils sont constitués principalement d'huiles saturées, d'huiles aromatiques et de résines.

L'ensemble forme un système colloïdal constitué par une suspension de micelles d'asphaltènes peptisés par les résines dans un milieu huileux (Fig3-2). En effet, les résines s'absorbent sur les asphaltènes et permettent leur dispersion dans le mélange huileux (hydrocarbures aromatiques et saturés). On dit qu'il y a peptisation. Les aromatiques assurent le rôle de solvant, tandis que les saturés assurent le rôle de floculant. La dispersion des agglomérats d'asphaltènes est plus ou moins forte selon la composition de la phase maltène (huiles + résines) : la structure du bitume est, en effet, différente selon que les asphaltènes forment ou non un réseau floculé, baignant dans un milieu dispersant faiblement structuré par les résines. Dans ce cas, on parle de structure "gel" (élastoplastique). Dans le cas d'une structure où les asphaltènes forment une suspension diluée et bien stabilisée dans un milieu dispersant fortement structuré par les résines, les asphaltènes ne peuvent interagir. On parle alors de structure "sol" (visqueuse). Une classe intermédiaire, appelée "sol-gel", correspond aux bitumes intermédiaires.

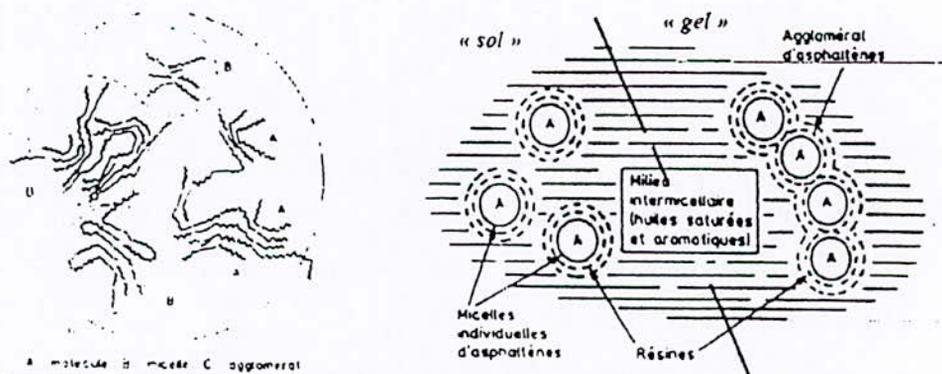


Figure 3.2 : a) macrostructure des asphaltènes b) schématisation de la structure colloïdale du bitume.

III-2-2. Généralités sur les enrobés :

III-2-2-1. Définitions :

On appelle enrobé hydrocarboné tout mélange de granulats et de liant hydrocarboné. Le terme est donc plus général que celui de béton bitumineux puisqu'il inclut les mélanges dont le liant n'est pas forcément un bitume (goudron, liant à base de bitume fluidifié...).

Un enrobé bitumineux est défini comme un mélange de liant bitumineux (5 à 7 % en masse), d'agrégats et de fines (passant à 80 μm) –les fines étant également appelées "filler". L'obtention des enrobés par mélange des granulats et du bitume fait appel à des propriétés bien spécifiques aux liants hydrocarbonés en général et donc au bitume en particulier :

- un pouvoir d'adhésion aux granulats,
- une consistance variable avec la température.

III-2-2-2. Teneur en liant :

Le liant bitumineux transmet naturellement son comportement viscoélastique à l'enrobé. Il faut donc définir une teneur en liant optimale afin d'assurer la cohésion du mélange et le bon enrobage de tous les grains du mélange par un film mince de bitume, et ce, tout en évitant des problèmes de fluage et d'orniérage trop prononcés à haute température (dans le cas d'une trop forte teneur en bitume).

III-2-2-3. Influence des actions appliquées à la chaussée :

III-2-2-3-a. Effet du trafic :

Chaque couche de chaussée subit des écrasements et des flexions sous l'effet du trafic (Figure 3 -3) Le calcul des efforts et des déformations qui s'effectue traditionnellement en considérant des multicouches élastiques linéaires isotropes, nécessite, en premier lieu, la connaissance du module de Young et éventuellement du coefficient de Poisson. C'est précisément à partir de ces deux coefficients, que les logiciels *Alizé* ou encore *Ecoroute* – basés sur le modèle de Burmister (1943)- permettent la résolution du problème considéré comme élastique.

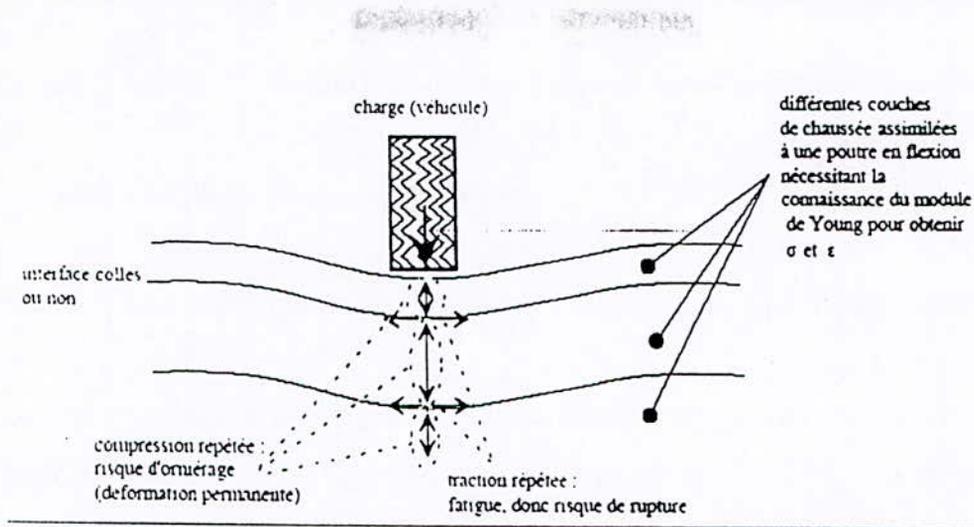


Figure 3-3 : schématisation des sollicitations induites par le trafic [11].

Les tractions répétées à la base des couches, sous l'effet du passage des véhicules, créent des micro-dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau. Il s'agit du phénomène de **fatigue** qui s'observe pour de nombreux matériaux. Une fissure peut également apparaître et se propager dans la chaussée. Les compressions répétées sous le passage de la charge peuvent créer des déformations permanentes qui induisent parfois un **orniérage** à la surface de la chaussée. Cet orniérage peut être dû au tassement des couches de béton bitumineux mais peut aussi être dû éventuellement aux déformations de couches inférieures non traitées.

Nous pouvons également souligner qu'en raison des propriétés particulières apportées par le liant bitumineux, les enrobés possèdent un comportement (donc un module) fortement dépendant de la température et de la vitesse de chargement.

III-2-2-3-b. Effet de la température :

À basse température le bitume possède un comportement fragile. La chaussée est, par voie de conséquence, susceptible de se fissurer sous l'effet conjugué des conditions climatiques et des contraintes de trafic. Cependant, la fissuration thermique peut être facilement évitée à basse température si l'on utilise un bitume de grade élevé, c'est-à-dire un bitume moins "dur", et donc moins "cassant" à basse température.

Néanmoins, un bitume de grade trop élevé se révèle néfaste vis-à-vis des problèmes d'orniérage (déformations permanentes de la chaussée) à température élevée. Le bitume idéal doit donc être à la fois le moins susceptible possible aux phénomènes de **fissuration thermique** (à basse température) et d'**orniérage** (à température élevée). Plus simplement, on

doit donc exiger des enrobés deux qualités principales en rapport direct avec la dépendance du liant utilisé vis-à-vis de la température :

- La stabilité, et la résistance à la déformation permanente qui est aggravée à haute température,
- La flexibilité, soit l'aptitude à supporter sans fissures thermiques les basses températures.

Ces conditions ont notamment amené les différents groupes pétroliers à développer de nouveaux bitumes pour couvrir ce large intervalle de température (-30°C à 60°C) : les bitumes modifiés aux polymères. Pour résumer, d'après Di Benedetto (1998), outre le vieillissement du matériau, la température a deux effets mécaniques principaux :

• changement du module du matériau, (un béton bitumineux que l'on chauffe devient plus "mou"). Plus généralement, ces matériaux sont dits "thermo-sensibles", c'est-à-dire que leur comportement viscoplastique change selon la température considérée,

- Création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations ou contractions thermiques lors des changements de température (**Figure 3-4**).

Le premier effet est, en général, caractérisé par la dépendance du module de rigidité vis-à-vis de la température et de la vitesse de chargement.

Le deuxième effet est particulièrement néfaste :

- Lors d'un refroidissement, par exemple, la chaussée a tendance à se contracter. Or, les mouvements de contraction sont empêchés dans le sens longitudinal de la chaussée. Cela revient donc à exercer une traction sur cette chaussée dans le sens longitudinal, d'où l'amorçage éventuel de fissures transversales. Ces dernières sont ensuite susceptibles de se propager à travers la structure lors de cycles thermiques (journaliers ou autres).

- lorsqu'une couche de base traitée aux liants hydrauliques existe dans la chaussée (structures semi-rigides). En effet, cette couche traitée aux liants hydrauliques est sujette au retrait thermique et de prise. Le retrait, empêché par le frottement à l'interface, peut provoquer une fissure dans la couche en béton bitumineux. Cette fissure évolue avec les cycles thermiques et peut progressivement traverser la couche.

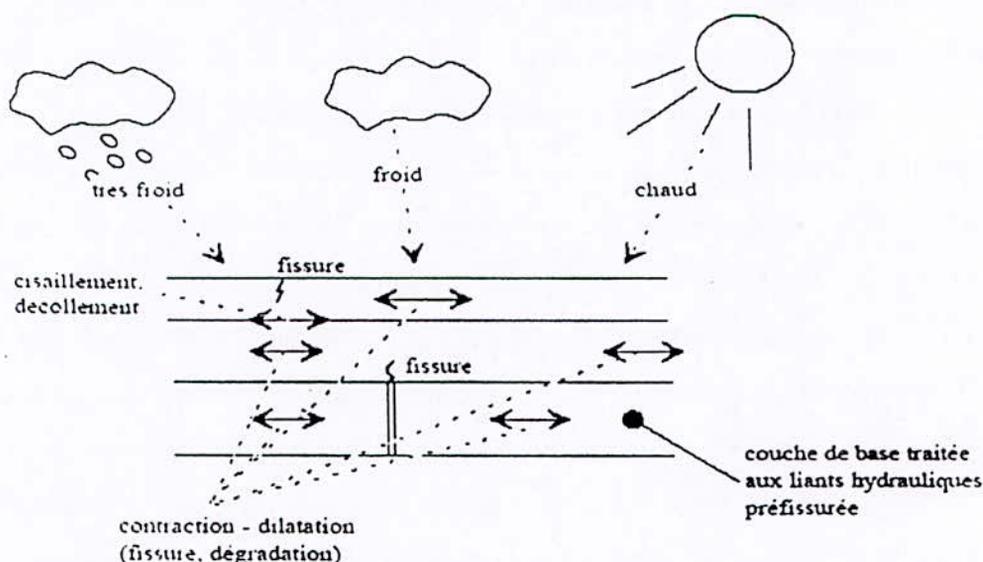


Figure 3-4 : Schématisation des sollicitations induites par la température.

III-3. Méthode de détermination des propriétés mécaniques des matériaux bitumineux [10] :

Les propriétés mécaniques des matériaux bitumineux peuvent être déduites de l'analyse des résultats d'essais en laboratoire. Ces essais, normalisés lorsqu'ils servent au dimensionnement, sont effectués dans des conditions bien définies de température et sollicitation. Ils sont réalisés sur des éprouvettes confectionnées en laboratoire ou éventuellement prélevées sur place.

Les essais de caractérisation des propriétés mécaniques des matériaux bitumineux sont nombreux et divers, il est néanmoins possible de les classer en différentes catégories. Une première classification en trois catégories qui est plus liée à l'interprétation de l'essai qu'à sa nature, est proposée par Bonnot en 1973 et en 1984. Une seconde classification proposée par Di Benedetto (1990), introduit deux catégories d'essai : les essais homogènes et les essais non homogènes.

III-3-1. Classification selon le type d'interprétation considéré :

La première catégorie est celle des "essais empiriques" dans lesquels le mode de sollicitation est très différent de celui existant dans la chaussée. Ces essais ne permettent pas de déterminer

une propriété intrinsèque du matériau. La relation entre la propriété d'usage et le résultat de l'essai ne peut pas être déterminée de façon théorique. Seule l'expérience du praticien et des comparaisons pour de nombreux cas permettent de tirer des conclusions. La propriété d'usage est fonction de paramètres liés au matériau (sa composition) et de paramètres liés à l'usage (les charges, la température, la vitesse de circulation). Pour la propriété d'usage "résistance à l'orniérage", l'exemple type d'essai de cette catégorie est l'essai **Marshall**.

De plus, les "essais empiriques" ne peuvent être considérés comme valables que si on a l'assurance que le classement obtenu pour les matériaux est le même que celui qui se produit dans la chaussée sous l'effet des sollicitations réelles, au moins pour une gamme donnée de sollicitation. Cependant, ces essais se sont révélés insuffisants pour traduire correctement la réalité des conditions de travail d'une chaussée et prédire le comportement *in-situ* des matériaux innovants utilisant notamment des Bitumes Modifiés par des Polymères (BMP). La deuxième catégorie correspond aux "essais de simulation". Cette catégorie d'essai correspond à une première voie pouvant être suivie afin d'améliorer la représentativité des essais. Il s'agit d'utiliser des sollicitations les plus proches possibles, bien qu'à échelle réduite, de celles existant dans la chaussée. Malheureusement, ces essais restent empiriques car les sollicitations appliquées dans ces essais sous charge roulante sont suffisamment complexes, notamment quant aux conditions aux limites, pour qu'il ne soit pas possible d'en déduire de façon théorique la réponse aux sollicitations réelles.

La troisième catégorie d'essai est celle des "essais de détermination". Elle correspond à une voie toute différente suivie pour assurer la représentativité des essais. Elle consiste à les choisir de telle sorte que l'on puisse passer, par une méthode théorique, de leurs résultats à la propriété d'usage désirée. Cela nécessite une modélisation de la structure de la chaussée et la connaissance des lois de comportement de l'enrobé ; cette modélisation et ces lois peuvent d'ailleurs être seulement approchées. Ces essais utilisent des sollicitations simples, parfaitement définies, et permettent de déterminer les propriétés intrinsèques des matériaux, c'est-à-dire indépendantes des conditions d'essai. Cette voie semble la plus prometteuse.

III-3-2 Classification selon l'état de contrainte et de déformation :

Les différents essais existants sur les matériaux bitumineux, ou plus généralement sur les géométraux, peuvent être classés en deux grandes catégories : les "essais homogènes" et les "essais non homogènes".

Les essais homogènes permettent d'avoir accès directement aux contraintes déformations, donc à la loi de comportement. Pour les essais non homogènes il faut postuler une loi de comportement à priori (viscoélastique linéaire par exemple) et prendre en compte la structure de l'éprouvette (données géométriques) pour obtenir après des calculs qui sont souvent compliqués, les paramètres de la loi de comportement (le module complexe par exemple). La figure 3-5.a présente un exemple d'un essai homogène.

Les essais non homogènes peuvent être utilisés dans le cas où le comportement du matériau est simple (élasticité linéaire isotrope ou viscoélasticité linéaire isotrope). Quand on postule en avance le comportement du matériau, on peut avoir une grande erreur dans la loi de comportement obtenue. La figure 3-5.b présente un exemple d'un essai non homogène. On peut conclure que les essais homogènes semblent plus pertinents pour décrire le comportement du matériau. En effet, leur analyse conduit plus facilement à définir les paramètres de comportement.

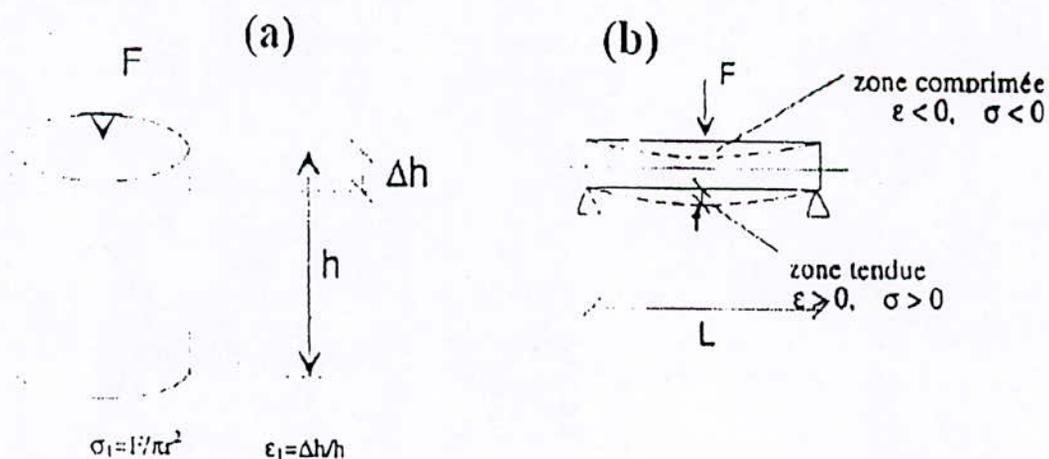


Figure 3-5 : Exemple d'essai : a) essai de traction-compression (homogène), b) essai de flexion de poutre (non-homogène).

III-4. Propriétés rhéologiques des liants bitumineux :

Si la rhéologie du liant ne constitue pas un but en soi, celle-ci peut toutefois se concevoir comme une approche nécessaire mais non suffisante des propriétés de l'enrobé. Dans le cas présent, il s'agit donc d'apprécier au mieux l'influence des propriétés du liant bitumineux sur celles de l'enrobé, sachant que de tous les facteurs de formulation, le bitume est sans doute celui qui a l'influence la plus nette sur les propriétés rhéologiques des enrobés.

III-4-1. Classe de comportement des bitumes purs en fonction de ϵ et T:

La figure 3-6 permet d'identifier simplement les principaux types de comportement des bitumes en fonction de l'amplitude de la déformation (ϵ) et de la température T, pour une vitesse de déformation fixée.

On y distingue :

- les domaines fragile et ductile, où la résistance à la traction σ_p peut être mesurée,
- la rupture fragile, qui peut être caractérisée par la ténacité K_c ou l'énergie de rupture G_c (Mécanique Linéaire de la Rupture),
- le comportement élastique linéaire, caractérisé par les modules E et G,
- le domaine viscoélastique linéaire, caractérisé par les modules complexes E^* et G^* ,
- le comportement purement visqueux (Newtonien), caractérisé par la viscosité η ,
- pour des déformations de l'ordre de quelques pour cent, le domaine où le comportement est fortement non linéaire.

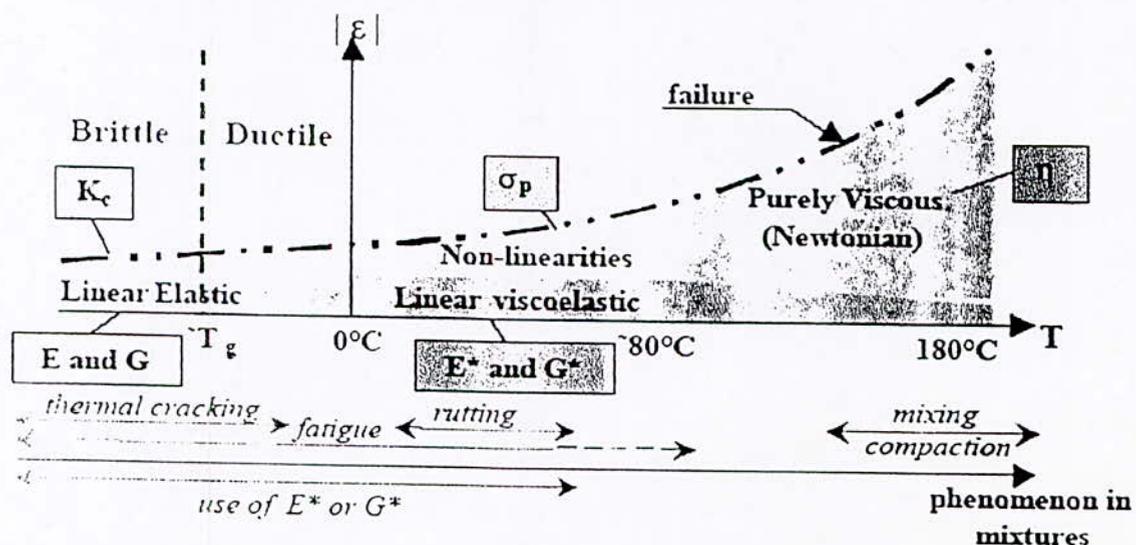


Figure 3-6 : Classe de comportement des bitumes en fonction de ϵ et T,

III-4-2. Les caractéristiques classiques :

III-4-2-1. Pénétrabilité (NF T 66-004)

La pénétrabilité du bitume représente la mesure de la pénétration (exprimée en dixièmes de millimètres) dans un échantillon de bitume, au bout d'un temps de 5 secondes, d'une aiguille dont le poids avec son support est de 100g. C'est donc une mesure de la consistance du bitume. La pénétrabilité la plus couramment utilisée est celle mesurée à 25°C. Dans ces conditions, plus un bitume est dur, plus la valeur de sa pénétrabilité est faible. A titre d'exemple, on distingue les classes :

10/20 et 35/50 → bitumes durs.

50/70 et 70/100 → bitumes semi-durs.

180/220 → bitumes mous.

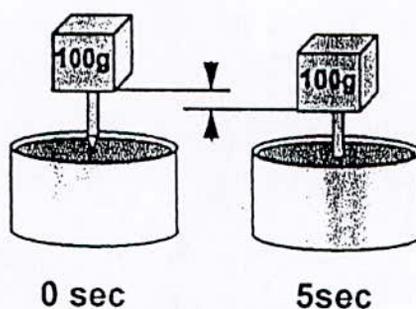


Figure 3-7 : l'essai de pénétrabilité pour le bitume.

III-4-2-2. Point de ramollissement bille anneau (nf t 66-008) :

C'est la température à laquelle s'enfonce une bille à travers un anneau de bitume dans des conditions définies de fabrication et d'essai. Par voie de conséquence, il s'agit de la température à laquelle le bitume étudié atteint un certain degré de ramollissement.

Les résultats des deux essais empiriques précédents (Pénétrabilité à 25°C et Température Bille Anneau) permettent d'identifier le liant examiné et de le classer par rapport aux spécifications actuellement admises.

III-4-2-3. Température de fragilité FRAASS (NF T 66-006):

La température de fragilité Fraass correspond à la température à laquelle un film mince de bitume rompt sous l'effet d'une flexion, dans des conditions opératoires de fabrication et d'essai bien définies.

Cet essai empirique donne une indication sur les propriétés à froid d'un bitume. Ramond et Such (1990) précisent que, par expérience, on sait que la zone critique où se présentent les phénomènes de fissuration correspond à des liants bitumineux dont :

- la pénétration est inférieure à 20 pour 1/10 mm,
- la température de ramollissement est supérieure à 70°C,
- la température de fragilité Fraass est supérieure à 0°C.

III-4-2-4. Essai RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test" (NF T 66-032):

A l'enrobage, les granulats chauffés aux environs de 160°C sont mis en contact avec le bitume chaud qui se répartit en film mince autour du granulat, favorisant ainsi un vieillissement du liant. L'oxydation chimique est violente car l'apport énergétique est intense (température et oxygène de l'air). L'essai RTFOT est employé pour permettre de caractériser ce type de vieillissement des bitumes car il reproduit assez bien l'oxydation et les pertes de matières volatiles qui apparaissent dans la centrale d'enrobage et lors de la mise en oeuvre. Pour l'essai RTFOT, dans des conditions d'essai précises, le bitume, placé en film mince, est régulièrement exposé à un flux d'air chaud dont le débit est contrôlé. On mesure ensuite les propriétés habituelles sur le liant vieilli : pénétrabilité et température de ramollissement bille et anneau. Ces valeurs sont alors comparées aux valeurs initiales. Elles sont plus proches de celles du liant extrait de l'enrobé, que de celles obtenues sur le bitume d'origine.

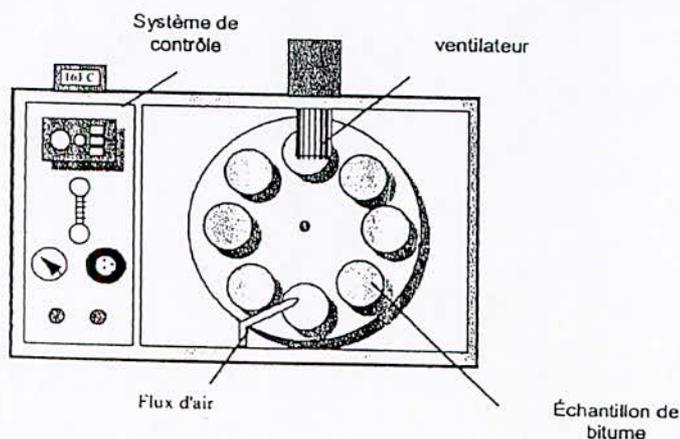


Figure 3-8 : Essai RTFOT.

III-4-2-5. L'essai PAV "Pressure Aging Vessel" (AASHTO PP1) :

Cet essai est employé pour permettre de caractériser le vieillissement des bitumes *in-situ* (après 3 à 5 années de service).

Le résidu de l'essai RTFOT est chauffé et versé dans des plateaux métalliques (coupelles contenant environ 50g de liant) qui constituent les éprouvettes de l'essai PAV. Ces plateaux sont rangés dans un rack qui sera placé dans un récipient dans une enceinte thermique. A la température de l'essai (100°C), une pression d'air de 300psi (=20bars=2MPa) est appliquée dans le récipient. Après une durée de vingt heures (qui constitue un avantage important de l'essai), la pression est diminuée lentement (8 à 10 minutes). Les plateaux d'éprouvettes sont placés ensuite dans un four à 163°C pendant 30 minutes.

On mesure alors les propriétés habituelles du liant : pénétrabilité et température de ramollissement bille et anneau.

Une schématisation de cet essai est représentée sur la figure suivante.

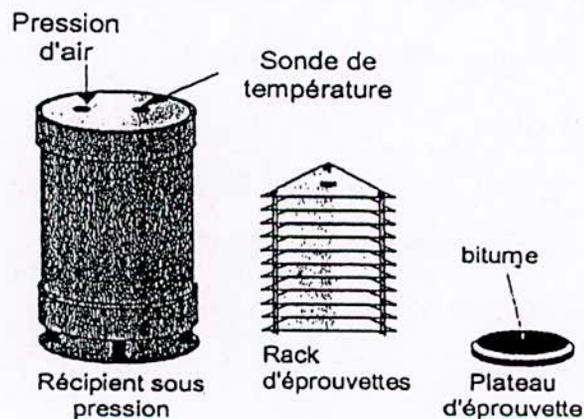


Figure 3-9 : L'essai PAV.

III-5. La chaussée [7] :

Les différentes couches de la chaussée sont :

III-5-1. La couche de surface :

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

III-5-2. La couche intermédiaire :

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

III-5-3. 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, du 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-5-4 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-5-5. 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-5-6. 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-5-7. 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-5-8. 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-5-9. 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-5-10. 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-5-11. 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.

Chapitre IV :

Constituants des enrobés bitumineux

IV.1. Introduction : [29]

Dans ce chapitre nous allons exposer les différents constituants des enrobés bitumineux, ainsi que les essais relatifs à chaque matériau.

IV.2. Les granulats :

On appelle granulat, tout matériau inerte provenant de l'érosion des roches ou de leur broyage. Le terme granulat est étendu à des granulats artificiels ou non utilisés dans la construction laitier granulé, machfer, déchets de briques ...

Un granulat est dit lourd lorsque sa densité apparente est supérieure à 1, et léger dans le cas contraire

Suivant la dimension des grains ont distingue :

- **les fines** : éléments de dimensions inférieures ou égales à 0.08mm.
- **Sables** : granulats de plus petite dimension $d < 1\text{mm}$, et de plus grande dimension $0.08\text{mm} < D \leq 6.3\text{ mm}$.
- **Gravillon** : granulats : $d \geq 1\text{ mm}$, $D \leq 31.5\text{mm}$
- **Cailloux** : granulats : $d \geq 20\text{mm}$, $D \leq 80\text{mm}$.
- **Graves** : granulats $0/D$ (D avec $6.3\text{mm} < D \leq 80\text{mm}$).

Les granulats sont destinés après adjonction d'un liant à la confection des bétons

IV.2.1. Les qualités exigées

Les qualités requises des matériaux destinés à constituer une couche de fondation et une couche de base sont les suivantes :

- présenter une granulométrie convenable de telle sorte que le matériau ne ségrége pas dans les diverses manipulations, constituer une couche facile à régler et présenter par frottement interne une bonne résistance aux efforts avec un module d'élasticité élevé.
- Etre constitué par un agrégat d'autant plus dur et résistant que les efforts dans la couche considérée sont élevés et que leur répétition est importante. Il ne faut pas dans une couche de base par exemple que l'agrégat se fragmente indéfiniment et produise des fines qui risquent de transformer petit à petit un gravier en sable beaucoup moins stable.
- Ne pas. Comporter de fines argileuses, ou en comporter si elles ne sont pas dangereuses. Les fines argileuses, sûr humidifiées un jour ou l'autre ; feront chuter le frottement interne jusqu'à l'annuler presque totalement.

- De façon générale, la stabilité mécanique doit être aussi indépendante que possible des conditions climatiques et notamment de la teneur en eau.

Lorsqu'on trouve en gisement ou en carrière un matériau répondant à toutes ces exigences, il n'est nul besoin de rechercher mieux, si malheureusement tel n'est pas le cas, on peut être tenté de « stabiliser » le matériau dont on dispose.

On distingue alors :

a- la stabilisation mécanique qui consiste à modifier la granulométrie, soit par apport d'un autre matériau inerte, soit par criblage, élimination de tranches excédentaires et reconstitution.

b- La stabilisation chimique : qui consiste selon le cas à :

b.1- conférer de la cohésion à un matériau dont le frottement interne est insuffisant (grave maigre traité au ciment ou au bitume)

b.2- hydrophober des matériaux sensibles à l'eau (traitement au bitume ou à des agents chimiques plus complexes)

b.3- neutraliser par échange ionique des fines argileuses nocives (chaux, ciment)

b.4- augmenter la stabilité des fines par des agents dispersants

IV.2.2. Principaux essais sur les granulats :

Les principaux essais sur les granulats sont :

IV.2.2.1. La granulométrie :

La granulométrie caractérise la répartition du granulat en tranches dimensionnelles. Elle est réalisée par tamisage pour les plus gros et par sédimentométrie pour les éléments inférieurs à $80\mu\text{m}$.

Les gravillons sont définis par leur plus petite et leur plus grande dimension. On parle d'un d/D avec une tolérance sur D de 15% si $D > 1,58d$ et de 20% si $D < 1,58d$.

Les graves et les sables sont des matériaux à granularité continue $0/D$. D étant supérieur à 6,3mm pour les graves.

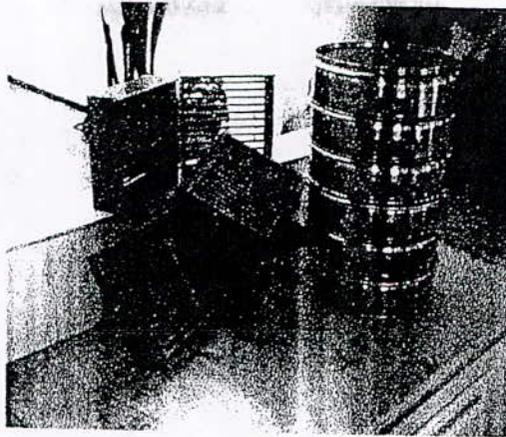


Figure 4-1 : les tamis granulométriques.

❖ Le rôle de la granulométrie

Trois facteurs interviennent : le pourcentage de fines, le calibre des gros éléments et la forme de la courbe granulométrique.

- Le pourcentage de fines (élément $< 80 \mu m$) : si ce pourcentage est nul ou insuffisant, le matériau est peu compact, difficile à serrer s'il n'est pas concassé. S'il est excessif, il y a formation de boue au compactage. On admet en général que le pourcentage des fines doit rester compris entre 5 et 15%, cette fourchette constituant un maximum.
- Le calibre des gros éléments : il conditionne à la fois la ségrégation et l'épaisseur de couche répandue.
- La forme de la courbe granulométrique conditionne l'aptitude au compactage, l'absence de ségrégation et la compacité du matériau compacté. On peut dire que plus les contacts entre grains seront nombreux, plus la couche sera stable et plus le matériau sera compact et moins on risquera de voir se produire des déplacements des grains et par suite des tassements.

L'étalement granulométrique, qui traduit les deux premières caractéristiques, est donné par le coefficient de HAZEN ou coefficient d'uniformité, selon que ce coefficient est plus ou moins voisin de 1 on parle d'une granulométrie serrée ou étalée.

$$C_0 = D_{60}/D_{10}$$

La courbure est donnée par le coefficient de courbure

$$C' = (D_{30})^2 / D_{10} \times D_{60}$$

Où D_{10} , D_{30} , D_{60} sont les côtes des mailles de tamis aux travers desquelles passent 10%, 30%, 60% du granulat.

IV.2.2.2. L' Angularité :

Elle joue un rôle important pour les gravillons de la couche de roulement en améliorant l'adhérence et pour ceux des assises de chaussées, dont elle améliore la stabilité. pour un granulat de roche massive, elle est égale à 100%

pour un granulat d'origine alluvionnaire, elle est définie par deux données :

- a) l'indice de concassage **Ic**, proportion en poids d'éléments supérieurs à la dimension **D** du granulat élaboré.
- b) le rapport de concassage **Rc**, rapport entre **d** du matériau soumis au concassage et **D** du granulat obtenu.

IV.2.2.3- La Forme :

Elle joue un rôle important, à la fois pour les granulats de la couche de roulement, des gravillons plats ayant tendance à se coucher au moment du compactage, et pour les matériaux d'assise, des granulats plats réduisant la compacité et la stabilité.

Elle est mesurée par un double tamisage sur des tamis à mailles carrées qui trient suivant la grosseur et sur des cribles à barres parallèles qui trient suivant l'épaisseur.

La masse de granulats plats, exprimée en pourcentage de la masse de l'échantillon, est appelée indice d'aplatissement.

IV.2.2.4. Essai Micro-Deval humide ;

La résistance à l'usure est déterminée par l'essai Micro-Deval humide.

L'essai est réalisé dans un cylindre de 20cm de diamètre et de 15,4cm de longueur dans lequel on introduit les granulats à essayer, on ajoute une charge abrasive constituée de billes d'acier sphérique de 10mm de diamètre et 2,5l d'eau. Le cylindre tourne à 100tr/min pendant 2h. Si **m** est la fraction passante au tamis de 1,6mm et si **M** est la masse initiale, le coefficient Micro-Deval humide est égal à :

$$\text{MDE}=100 \times m/M$$

IV.2.2.5. Essai Los Angeles

La résistance à la fragmentation ou la résistance au choc est appréciée par l'essai Los Angeles. Il consiste à placer dans un cylindre à axe horizontal de 70cm de diamètre et 50cm longueur. Les granulats à essayer et des boules d'acier. Le cylindre effectue 500 révolutions à 30tr/min. Le poids et la granularité de la prise d'essai sont déterminés en fonction de la classe granulaire.

Si m est la fraction passante au tamis de 1,6mm le coefficient Los Angeles est égal à :

$$LA = 100 \times m / 5000$$

Classement de synthèse :

A partir des essais de **Los Angeles** et **Micro-Deval** sur les granulats destinés aux travaux routiers, les gravillons sont classés suivant les cinq catégories de résistance mécanique du tableau (1-1) L'appartenance à une catégorie. nécessite (le satisfaire simultanément :

- à la somme des valeurs de **LA** et de **MDE**.
- et aux valeurs de **LA** et **MDE** du tableau.

Tableau 4-1: Classement des granulats selon la norme P 18 - 101

catégorie	LA +MDE	LA	MDE
A	≤25	≤20	≤15
B	≤35	≤25	≤20
C	≤45	≤30	≤25
D	≤55	≤35	≤30
E	≤80	≤45	≤45
F	>80	>45	>45

Lorsque la catégorie **F** est retenue, les limites supérieures doivent obligatoirement être fixées.

IV.2.2.6. Résistance au polissage :

L'essai permet de mesurer la résistance au polissage sous l'effet du trafic. On place pour cela le gravillon inséré dans des plaquettes de mortier, à la périphérie d'un tambour sur laquelle roule librement une roue équipée d'un pneumatique. Un agent abrasif est interposé au cours de l'essai (sable siliceux pendant trois heures puis poudre d'émeri pendant les trois heures suivantes). On mesure ensuite le coefficient de frottement avec un appareil de type pendule équipé d'un patin en caoutchouc qui permet de mesurer l'énergie absorbée par le frottement. L'aptitude au polissage est mesurée par le coefficient de frottement résiduel

Tableau 4-2 : Interprétation de l'essai de polissage accéléré des granulats

Coefficient de polissage	Appréciation	Interprétation
Inférieur à 0.35	Mauvais	en principe un tel granulat ne doit pas être employé en couche de surface.
Entre 0.35 et 0.45	Passable	un tel granulat ne doit être utilisé que lorsque les conditions de tracé et de trafic sont favorables.
Entre 0.45 et 0.55	Bon	l'utilisation d'un tel granulat est recommandée lorsque les conditions de tracé et de trafic sont défavorables (virages, carrefours, vitesses élevées, trafic intense).
Supérieur à 0.55	Très bon	

IV.2.2.7. Catégories de gravillons

Tableau 4-3 : Catégories de gravillons

catégorie	Granularité		A* ou Em		propreté	
	Fuseau de spécification (position)	Fuseau de régulation (étendue)				
I	Refus à 1.25D=0%	Refus à D 1 à 15% (1 à 20% si >D 1.58d)	Etendue maximale 10% à d	≤ 10	≥ (D+d)/3	0.50
Ibis		Tamisât à d tamisât à 0.63d < 3% (< 5% si D ≤ 5mm)	10% à D 25% à (D+d)/2	≤ 15	≥ (D+d)/3.5	≤ 1
II				≤ 20		≤ 2
III		Refus à 1.58D=0%	si D ≥ 2.5d tamisât à (D+d)/2 = 33 à 66%		≤ 30	

*pour des granularités inférieures à 10mm, A est majoré de 5 points

IV.2.2.8. L'essai de friabilité :

Cet essai est aux sables ce qu'est l'essai Micro-Deval pour les gravillons ; Son but est de déterminer la résistance à l'attrition du sable en présence d'eau.

L'évolution granulométrique sera caractérisée par la quantité d'éléments inférieurs à 0.05mm produits au cours de l'essai.

Si M est la masse de matériau soumis à l'essai et m' la masse des éléments inférieurs à 0.05mm produits au cours de l'essai, par définition le coefficient de friabilité du sable sera :

$$FS = 100 * (m' / M)$$

IV.2.2.9. Propreté :

- **Equivalent de sable :** [9] « NF P 18-598 »

La propreté est mesurée par l'essai d'équivalent de sable et par l'essai au bleu de méthylène.

L'essai d'équivalent de sable est réalisé dans une éprouvette transparente de 32cm de diamètre avec deux traits graves à 10cm et 38cm du fond. Une solution lavante est versée jusqu'au trait repère de 10cm dans l'éprouvette, On introduit 120g de sable, après 10min, on agite le tube horizontalement (90 secousse).

Enfin, par un tube laveur qu'on enfonce dans le matériau au fond de l'éprouvette, on ajoute la solution lavante jusqu'au trait 38cm, on laisse décanter 20 min.

On peut distinguer trois zones. On détermine la hauteur de la partie sableuse h_1 (partie inférieure) et la hauteur de la colonne trouble (sable+argile) h_2 .

On appelle équivalent de sable :

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

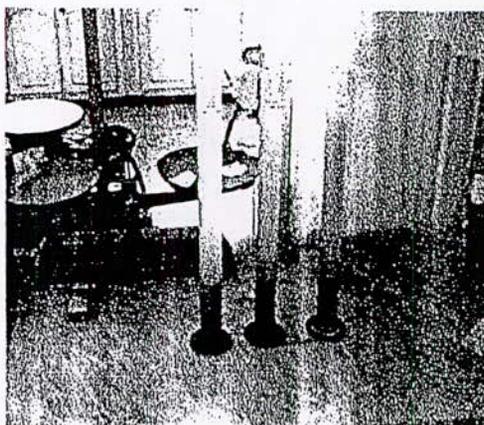


Figure 4-2 : Essai d'équivalent de sable.

IV.2.2.10. Catégories de sables :

Les différentes catégories de sable sont représentées dans le tableau (1-4)

Tableau 4-4 : catégories de sables

Catégorie	Granularité		ES 10%	VB si ES10% Non obtenu
	Position du Fuseau	Etendue maximale du fuseau		
a	refus à 1.58D=0	10% à D et à 0.5mm 15% à 2mm et 4mm	≥ 60	≤ 1
b	Refus à D=1 à 15%	4% à 0.08mm si fines < 12 % 6% à 0.08mm si fines > 12 %	≥ 50	≤ 1.5
c			≥ 40	≤ 2

IV.3. L'échantillonnage des matériaux :

Les agrégats doivent être représentatifs au matériau à utiliser, donc le but de l'échantillonnage est de prélever des échantillons qui représentent les matériaux avec les dimensions réels.

IV.3.1. Fuseau granulométrique :

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

En effet pour exécuter soit une couche de fondation, soit une couche de base ou encore 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 comme 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 certaines limites qui soient précisément définies par un fuseau granulométrique. Il y a là, 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 trouvé, il faut bien considérer que les fuseaux granulométriques constituent un guide et qu'il existe d'autres critères, qui seront décrits 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 ont été établis d'après l'expérience. Si l'on sort d'un fuseau donné, les risques d'échec deviennent beaucoup plus grands. Enfin les matériaux constitutifs des chaussées ne sont pas définis que par leurs caractéristiques granulométriques.

IV.3.1.1. Définition du fuseau granulométrique :

IV.3.1.1.1. 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 le refus : soit m' la masse de ce refus. La proportion maximale d'éléments passant au tamis de 1 mm est fixée à 2% du poids de l'échantillon.

IV.3.1.1.2. La propreté superficielle:

L'absence des éléments fins indésirables (les fines plastiques liées à la pollution du gisement).

IV.3.2. Poids volumiques :

IV.3.2.1. Définition :

Le 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.

On définit les paramètres suivants:

M_1 : masse de pycnomètre

M_2 : Masse du pycnomètre + Eau distillée

M_3 : Masse du pycnomètre + Echantillon

M_4 : Masse du pycnomètre + Echantillon + Eau distillée

$$\rho = \frac{M_3 - M_1}{M_2 - M_1 - M_4 + M_3}$$

IV.4. Résultats des essais :

Les essais de notre étude sont fait en laboratoire de contrôle technique des travaux publics CTPP de (KOUBA) dont les résultats sont donnés ci-dessous.

➤ Les courbes granulométrique :

Tableau 4.5 : Refus cumulés et compléments à 100 de fraction 0/3.

TAMIS (MM)	FRACTION 0/3 (1000 g)	
	REFUS CUMULES (%)	TAMISATS (%)
5	0	100
4	0,1	100
3,15	5,2	95
2,50	14,92	85
2,00	24,6	75
1,60	32,7	67
1,25	40,8	59
1,00	48,9	51
0,800	54,35	46
0,630	59,8	40
0,500	65,2	35
0,400	68,32	32
0,315	71,4	29
0,250	75,2	25
0,200	79	21
0,160	80	20
0,125	81	19
0,100	82	18
0,080	82,5	17

Le complément à 100% de refus cumulés des fractions 3/8, 8/15, 15/25 est représenté dans le tableau suivant :

Tableau 4.6 : Complément a 100 % de refus cumules des fractions 3/8,8/15 et 15/25.

	les fractions	fraction 3/8	fraction 8/15	fraction 15/25
Tamis (mm)	80	100	100	100
	50	100	100	100
	40	100	100	100
	31,5	100	100	100
	25	100	100	100
	20	100	100	80
	16	100	20,67	14
	12,5	100	95	4
	10	100	53	2
	8	98	25	1
	6,3	66	9	1
	5	25	2	1
	4	5	1	0
	3,15	1	0	0
	2,50	1	0	0
	2,00	0	0	0
	1,60	0	0	0
	1,25	0	0	0
	1,00	0	0	0
0,800	0	0	0	

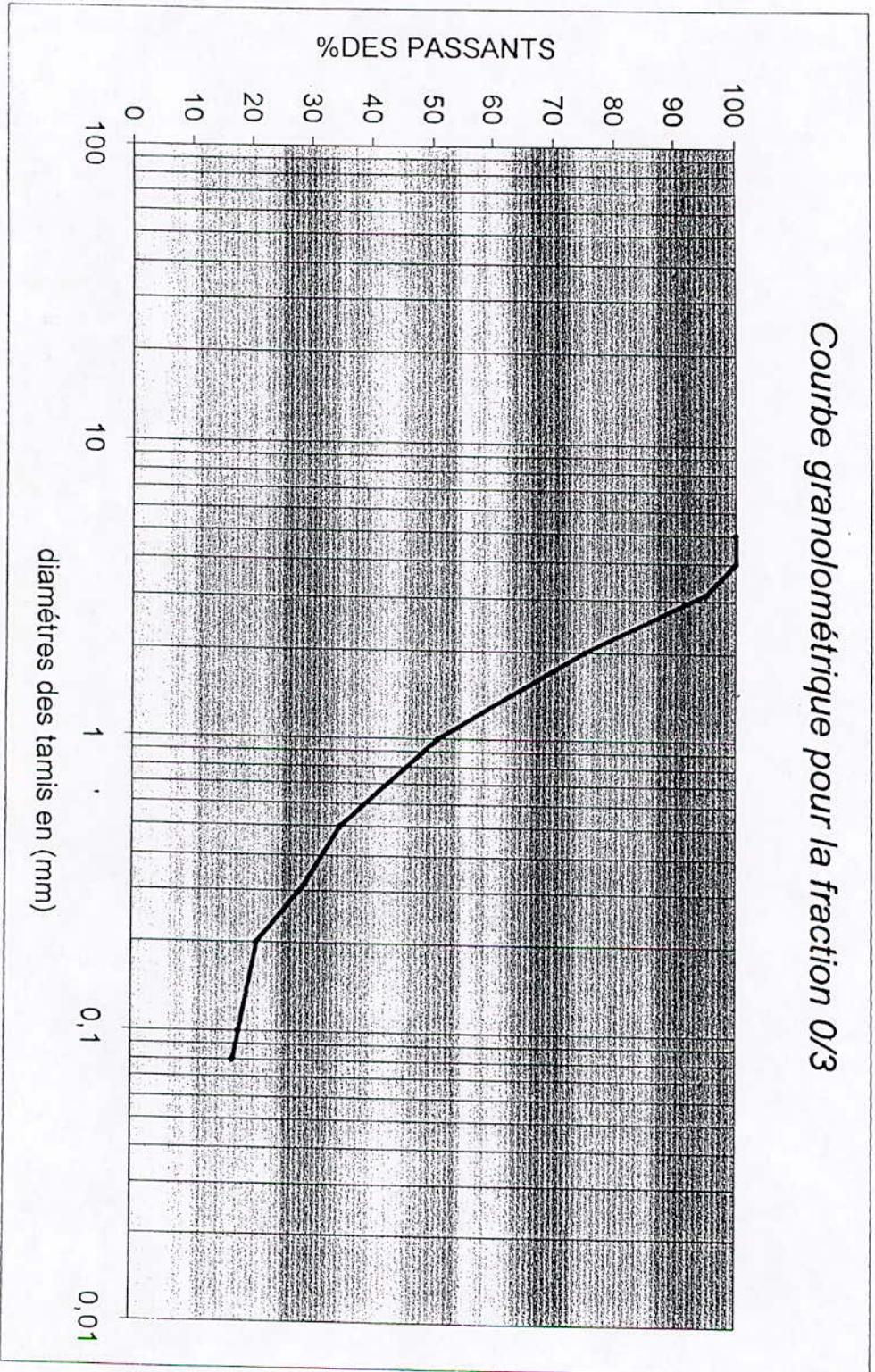


Figure 4.3 : courbe granulométrique de la fraction 0/3

Courbe granulométrique pour la fraction 3/8

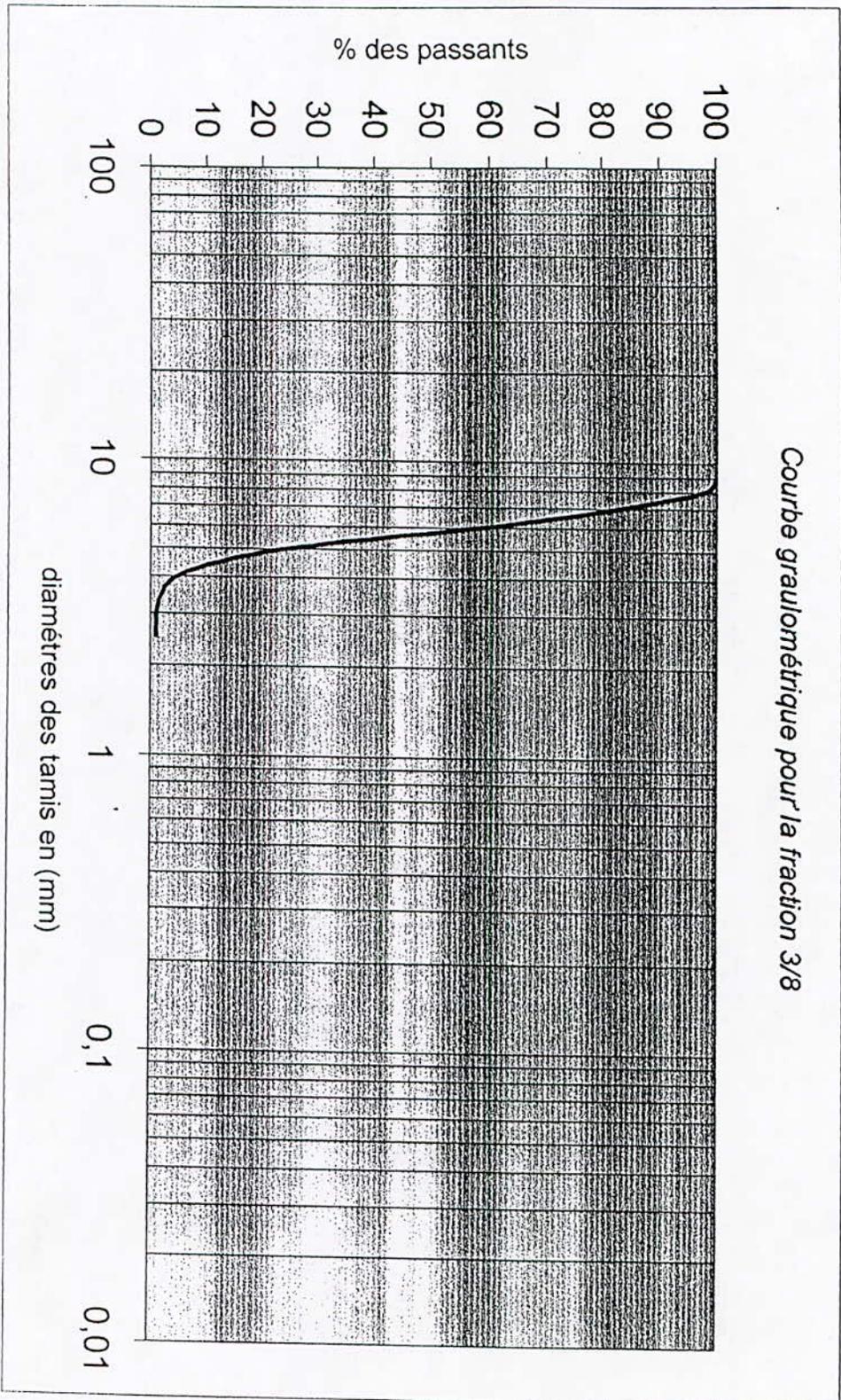


Figure 4.4 : courbe granulométrique de la fraction 3/8

Courbe granulométrique pour la fraction 8/15

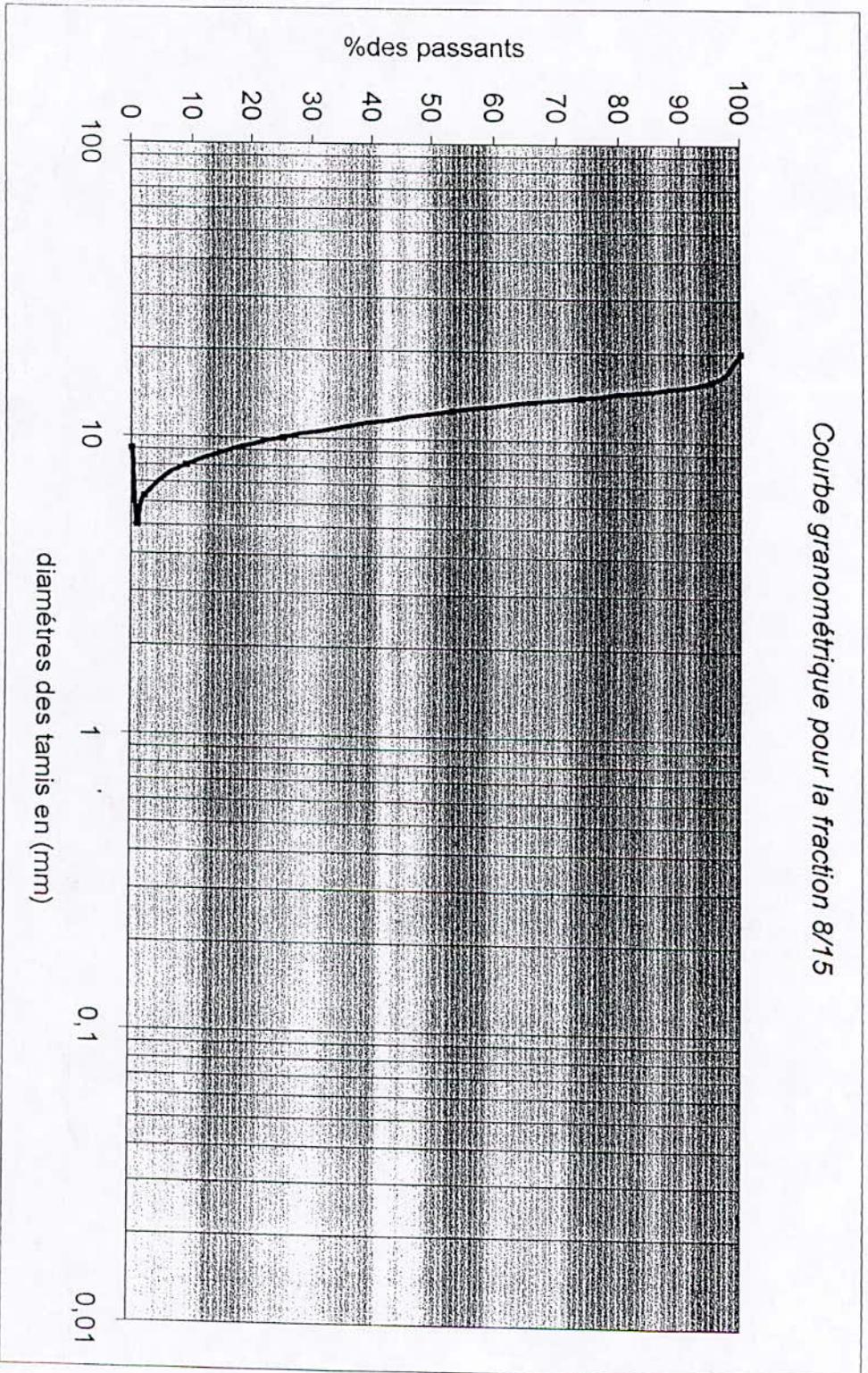


Figure 4.5 : courbe granulométrique de la fraction 8/15

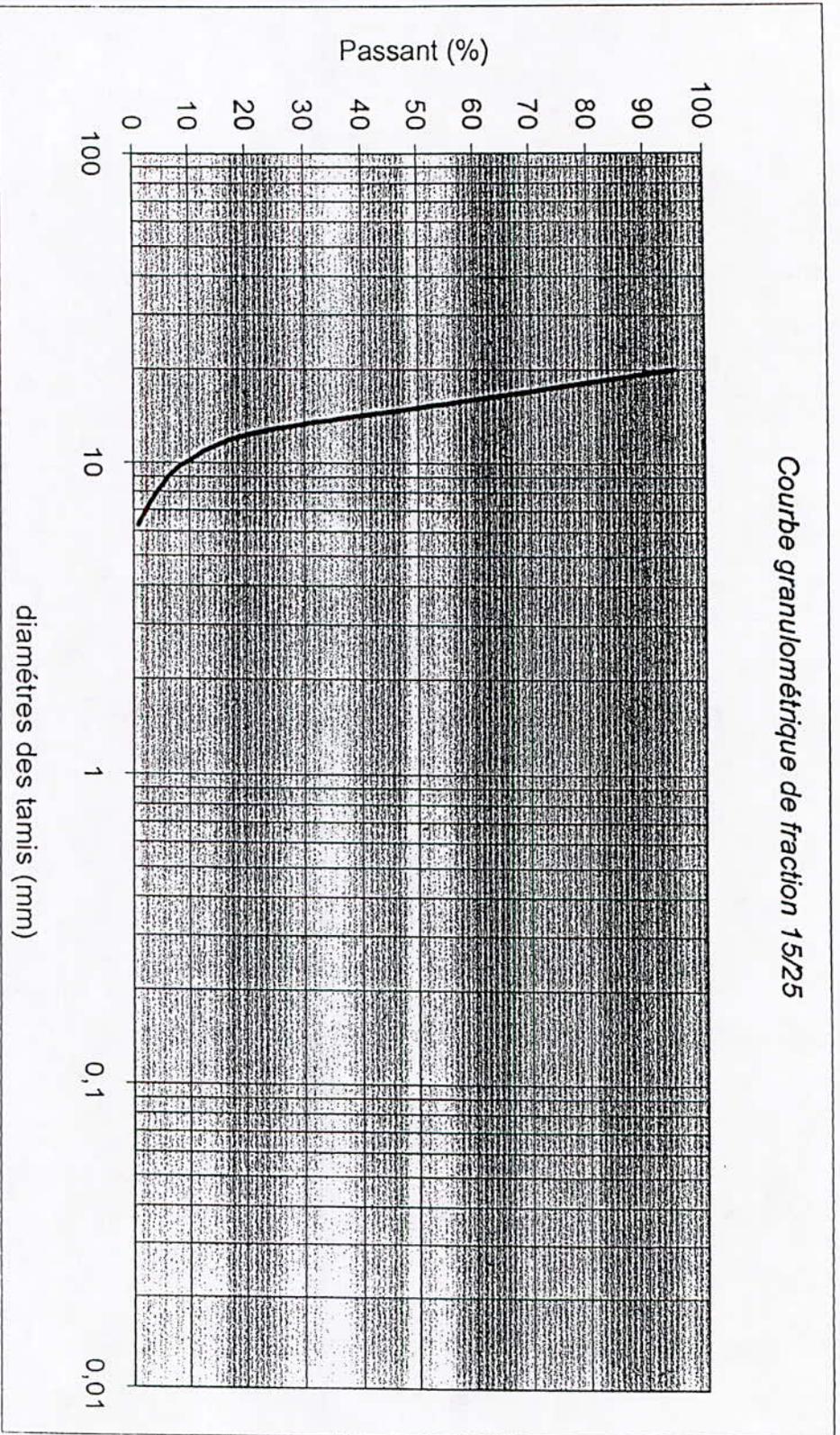


Figure 4.6 : courbe granulométrique de la fraction 15/25

➤ Poids volumiques :

On détermine les différentes pesées qui sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 4.7 : densité des agrégats.

N°	Température de l'essai	22°C	
	Classe granulaire	15/25	
	Echantillon (grs)	1	2
1	Masse du pycnomètre	603.5	604
2	Masse du pycnomètre + Eau distillée	1908	1894,5
3	Masse du pycnomètre + Echantillon	1158.0	1066.5
4	Masse du pycnomètre + Echantillon + Eau distillée	2254.5	2188
5	Masse de l'échantillon (3 - 1)	554.5	462.5
6	Volume du pycnomètre (2 - 1)	1304.5	1290.5
7	Volume de l'eau distillée qui occupe la partie supérieure du pycnomètre (4 - 3)	1096.5	1118
8	Volume de l'échantillon (6 - 7)	208	172,5
9	Densité de l'échantillon (5 / 8)	2.66	2,68
Moyenne		2,67	

Les résultats des poids volumiques obtenus pour les différentes fractions sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 4.8 : Les résultats des poids spécifiques

Fraction	15/25	8 /15	3/8	0/3
Poids spécifique	2,69	2,65	2,66	2,64

➤ Les résultats des essais de propreté superficielle :

Tableau 4.9 : Les résultats des essais de propreté superficielle.

Classe Granulaire (mm)		Provenance des matériaux	Poid initial (grs) [M]	Poids final (grs) [m]	Pourcentage d'impureté (grs)
15/25	10-14	EVSM	2000	1986	0.55
8/15	10-14			1989	0.70
3/8	4-6.3			1987	0.65

➤ Les résultats de l'essai de l'équivalent de sable :

Les résultats sont donnés dans le tableau suivant

Tableau 4.10 : Equivalent de sable.

Hauteur de sable (H1)	Hauteur de sable H2 (a vue)	Hauteur de sable H'2 (a piston)	$E.S = \frac{H2}{H1} \times 100$	Equivalent de sable moyen (%)
15.1	43	9.6	63.6	64.3
14.9	43	9.8	67.6	
15.2	43	9.4	61.8	

La valeur de l'équivalent de sable ES est égale à 64.3%, se qui montre que notre sable est propre.

➤ Les résultats des essais Los-Angeles :

Les résultats des essais réalisés sur les trois fractions 15/25, 8/15, 3/8 sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 4.11 : résultats de Los Angeles

Fraction	15/25	8 /15	3/8
Los Angeles (%)	17	19	23

Les valeurs obtenues sont satisfaisantes.

➤ Les résultats d'essai MICRO-DEVAL :

Les résultats des essais sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4.12 : Les résultats des essais MICRO-DEVAL

Classe granulaire (mm)		Provenance des matériaux	Poid initial (grs) [M]	Poids des billes	Poids final (grs) [m]	Coefficient Micro-deval (%)
15/25	10-14	EVSM	500	5000	403	19
8/15	10-14			5000	397	21
3/8	4-6.3			2000	381	24

Conclusion :

Les agrégats choisis peuvent être utilisés dans l'enrobé en couche de base.

IV.5. Etude des bitumes :

IV.5.1. Types des liants utilisés :

Les différentes classes de bitumes utilisés dans les routes Algériennes 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 classes 150/250 et 15% pour les classes 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.5.2. Essais sur le bitume :

On peut classer les essais sur les bitumes en deux catégories principales : les essais standards de caractérisation (mis au point dans les années 1920) et les essais mécaniques (apparus dans les années 1940).

IV.5.2.1. L'essai de pénétration (NF T 66.004) :

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

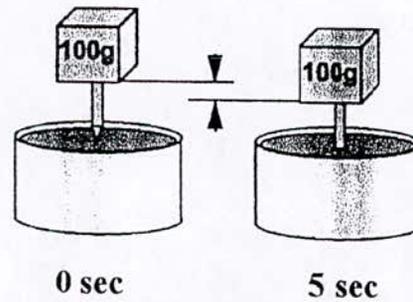


Figure 4-7 : principe d'essai de pénétration pour le bitume

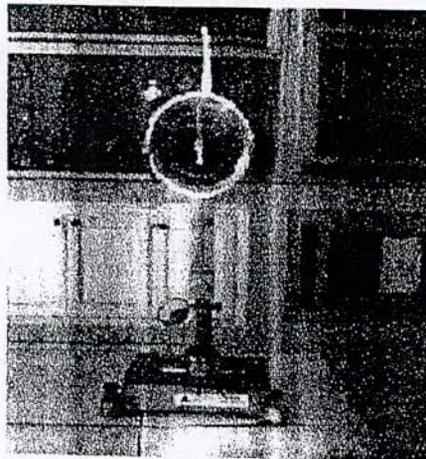


Figure 4-8 : Appareil d'Essai de pénétrabilité.

IV.5.2.2. L'essai ramollissement, (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.



Figure 4-9 : Essai de ramollissement.

But de l'essai :

L'essai consiste à déterminer la température pour laquelle une bille d'acier normalisée traverse un échantillon de bitume maintenu dans un anneau métallique. Il caractérise la consistance du matériau : plus la température bille et anneau est faible, plus le bitume est susceptible.

IV.5.2.3. 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.5.3. les résultats des essais effectués en laboratoire :

Les résultats des essais étudiés en laboratoire concernant la caractérisation du bitume (40/50) utilisé dans notre recherche sont donnés sur les tableaux ci-dessous :

➤ **Essai de pénétrabilité (NFT 66 004) :**

Tableau 4.13 : L'essai de pénétrabilité

Essai	Résultats obtenus			Spécifications
Pénétrabilité à 25°C en I /10 mm	45	44	44	40 à 50

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

Tableau 4.14 : Essai de point de ramollissement

Essai	Résultats obtenus			Spécifications
Bille Anneau en °C	49	55	52	47 à 60

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

Tableau 4.15 : Essai point d'éclair « vase ouvert »

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

IV.2.4. Conclusion

Les résultats obtenus montrent que Le bitume vérifie le classement 40/50, alors qu'on peut l'utiliser dans l'enrobé en couche de base.

IV.6. Identification du déchet :

IV.6.1. Propriétés du déchet :

Notre déchet est un résidu de mazout restant dans les bacs de stockage sous forme de boues, ces boues sont constituées par l'oxyde de fer provient de l'oxydation du réservoir et d'autre composés organiques et non organiques.

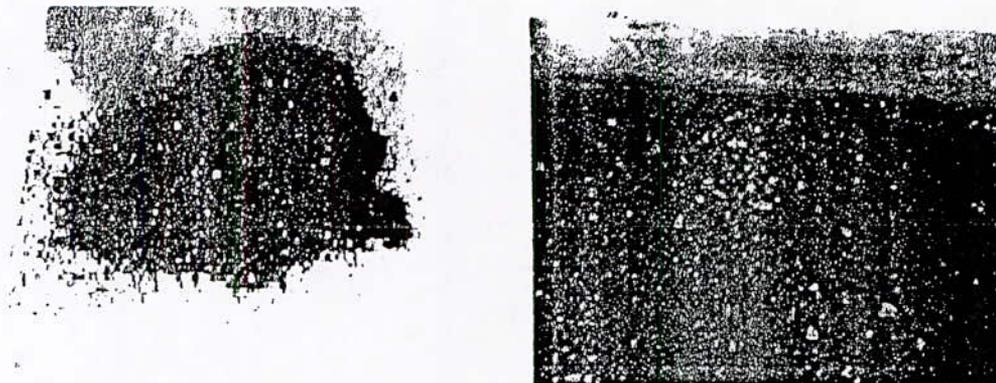


Figure 4.10 : déchet de mazout

➤ Humidité du matériau :

L'humidité du matériau doit être déterminée car elle permet de calculer la masse sèche des échantillons. On pourra ainsi supprimer l'étape de séchage des échantillons soumis-aux tests, ce qui est préférable puisque cette étape peut induire des transformations physico-chimiques comme la carbonatation des matériaux.

Le principe de la détermination de l'humidité consiste à sécher en parallèle à l'étuve (103°C) plusieurs échantillons d'une masse connue de matériau humide (m_0) jusqu'à stabilisation de la masse (m_{0s}). L'évolution de la masse est suivie par pesée pendant plusieurs jours. On considère que le matériau est sec si la variation de masse des différentes éprouvettes est inférieure à un seuil (par exemple moins de 0.1 % de la masse) entre 2 pesées successives.

L'humidité est déterminée par l'équation suivante :

$$\text{Humidité (en \%)} = [(m_0 - m_{0s}) / m_0] \times 100$$

Tableau 4-16 : Humidité de matériau

Masse humide m_0 (grs)	Masse a sèche m_{0s} (grs)	Humidité (en %)
386,5	356,5	7,79

IV.6.2. Spectre de diffraction des rayons X de la boue :

La diffraction des rayons X, la microscopie, optique ou électronique, la spectrométrie infrarouge, la spectroscopie de photoélectrons permettent d'étudier les phénomènes de fixation des polluants [12]. Et permet d'identifier des phases cristallisées ainsi que de caractériser l'arrangement des réseaux cristallins. Seule l'interprétation qualitative est utilisée ; on ne peut identifier que les phases cristallisées majoritaires [14].

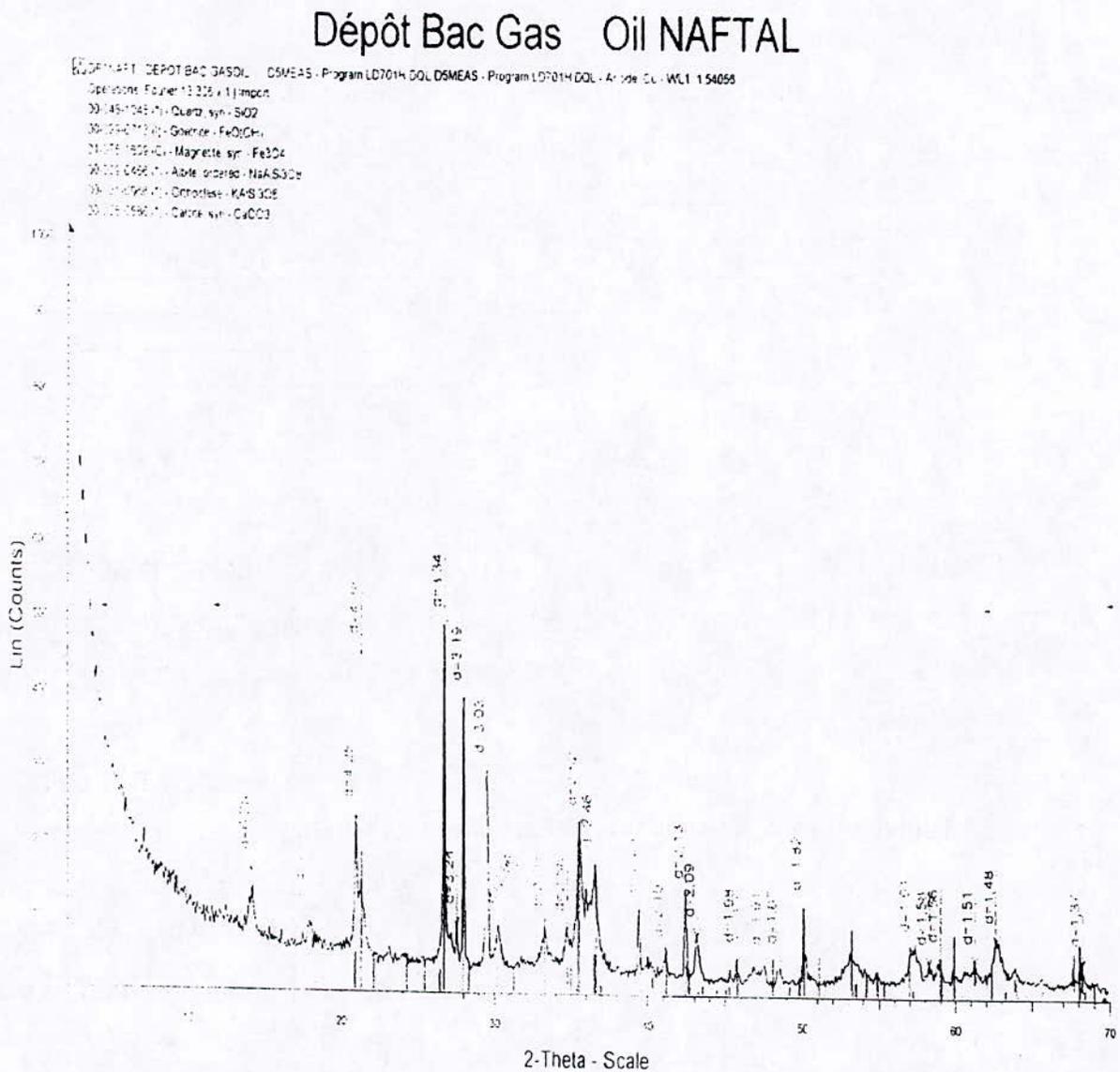


Figure 4-11 : spectre de diffraction des rayons X de notre déchet.

Les études faites par diffraction des rayons X sur notre déchet ont été effectuées au Centre de Recherche et de Développement (CRD).

Les résultats d'analyse montrent la présence importante du fer (métaux lourds) dans notre déchet (les éléments FeO(OH), Fe₃O₄).

➤ Résultats d'analyses chimiques d'un déchet pétroliers (essence) faites en CRD :

Les constituants chimiques trouvés dans la boue d'essence sont représentés avec leurs concentrations dans le tableau suivant.

Tableau 4.17 : L'analyse chimique de déchet d'essence

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 x 10 ³
Cd	0.28	70.0

Ce déchet contient des métaux lourds avec une présence importante de fer tels que le manganèse en quantité considérable, le plomb, le chrome, le cuivre, le cadmium et le zinc. L'essai de diffraction des rayons X sur ce déchet (essence) confirme les résultats de l'analyse chimique qui montre la richesse de la boue en fer.

Tableau 4.18 : Des éléments constituant du déchet .

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	

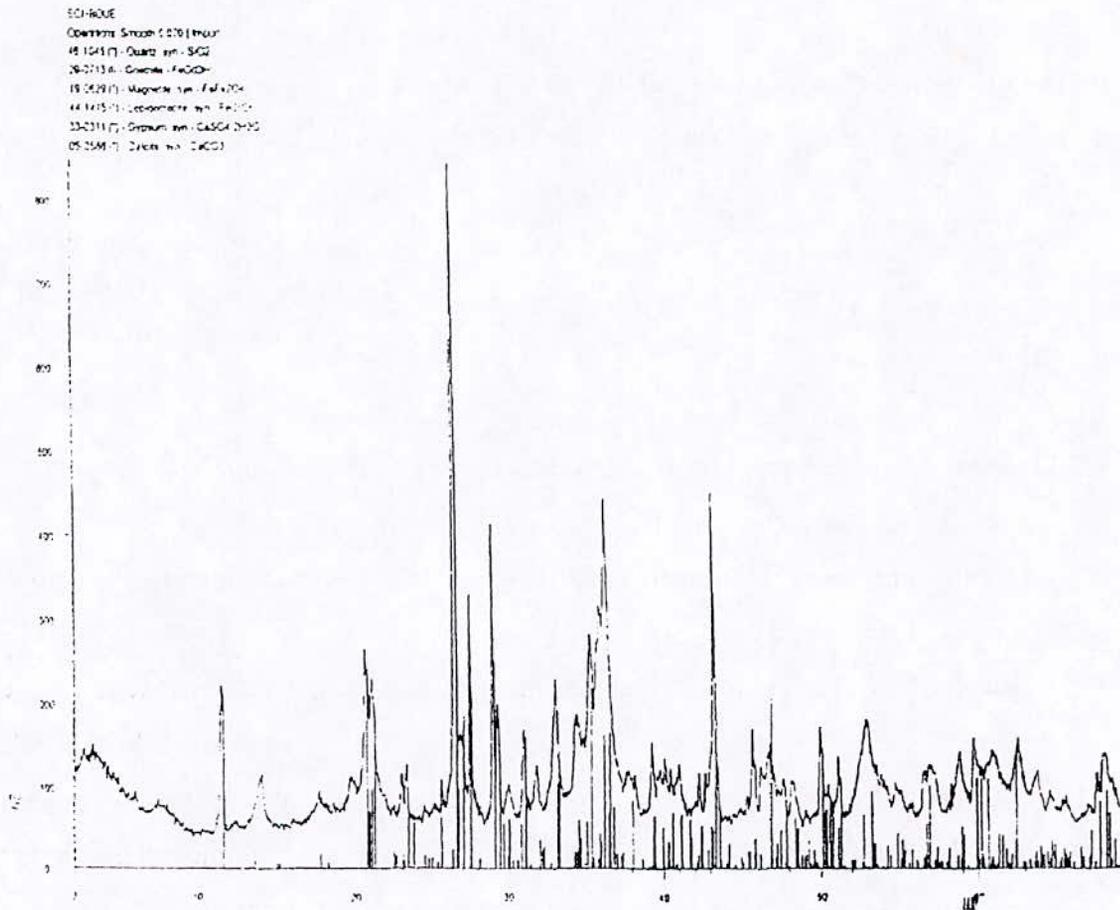


Figure 4-12: spectre de diffraction des rayons X de déchet d'essence.

➤ **La toxicité des métaux lourds et d'autres produits chimiques [28] :**

Un produit toxique est un composé chimique ordinaire qui peut nuire à la santé ou à l'environnement. Sa toxicité n'apparaît le plus souvent qu'à partir d'une certaine concentration. Les toxiques sont classés selon :

- Le temps nécessaire au déclenchement des effets et leur évolution (toxicité aiguë, subaiguë ou chronique).
- La capacité de s'accumuler dans les êtres vivants jusqu'à atteindre une concentration toxique (c'est le cas des intoxications aux métaux lourds).
- La nature du risque, selon qu'il touche la santé ou l'environnement.

Le terme usuel « métaux lourds » désigne des éléments présents, à l'état naturel, à des concentrations inférieures à un pour mille dans le sol. Le terme réglementaire est éléments-traces car il peut s'agir de métaux (cadmium, cuivre, mercure, plomb, etc.) ou d'éléments non métalliques (arsenic, fluor, etc.).

Tous les métaux lourds sont toxiques à forte concentration

➤ **Que deviennent les métaux lourds dans la nature ?**

Le devenir des métaux lourds dépend de nombreux facteurs parmi lesquels la nature du sol et son acidité :

- Dans les sols acides et pauvres en humus, les métaux lourds ne s'accumulent pas. Ils sont transférés vers les nappes phréatiques ou absorbés par les plantes et présentent alors un risque pour la santé.
- Les sols basiques riches en humus piègent les métaux lourds, il n'y a donc pas de risque immédiat pour la santé. Mais le sol est contaminé durablement et la concentration en métaux lourds augmente avec les années. Ces derniers sont susceptibles d'être libérés quand l'environnement est modifié (acidification du sol sous l'effet des changements de température, d'humidité, etc.).

La pollution des sols agricoles par les métaux lourds est actuellement rare et très localisée. Elle résulte principalement du traitement des vignes et des arbres par des sels de cuivre (bouillie bordelaise, etc.). Si d'autres problèmes surgissent, ils apparaîtront probablement dans les régions d'élevage intensif de porcs où la concentration de cuivre et de zinc atteint environ le tiers de la concentration toxique pour les plantes. En effet, la plupart des porcs sont élevés en porcherie et non en liberté, et, pour leur santé, ils consomment des aliments enrichis en cuivre et en zinc, qui se retrouvent ensuite dans le lisier.

IV.6.3. L'analyse granulométrique du déchet :

L'analyse granulométrique faite sur notre déchet donne les valeurs représentées sur le tableau suivant :

Tableau 4.19 : Granulométrie du déchet.

Les tamis		Refus cumules de déchet utilise	Complément a 100 de refus cumules
En (mm)	10	0,00	100
	8	0,00	100
	6,3	0,00	100
	5	2,00	99.8
	4	59.5	94.1
	3.15	99	90.1
	2	174.5	82.55
	1	285.5	71.45
	0,5	473	52.7
	0,315	838.5	16.15
	0,2	953.5	4.65
0,08	976	2.4	
Poids Total		1000	
Poids Spécifique		1,62	

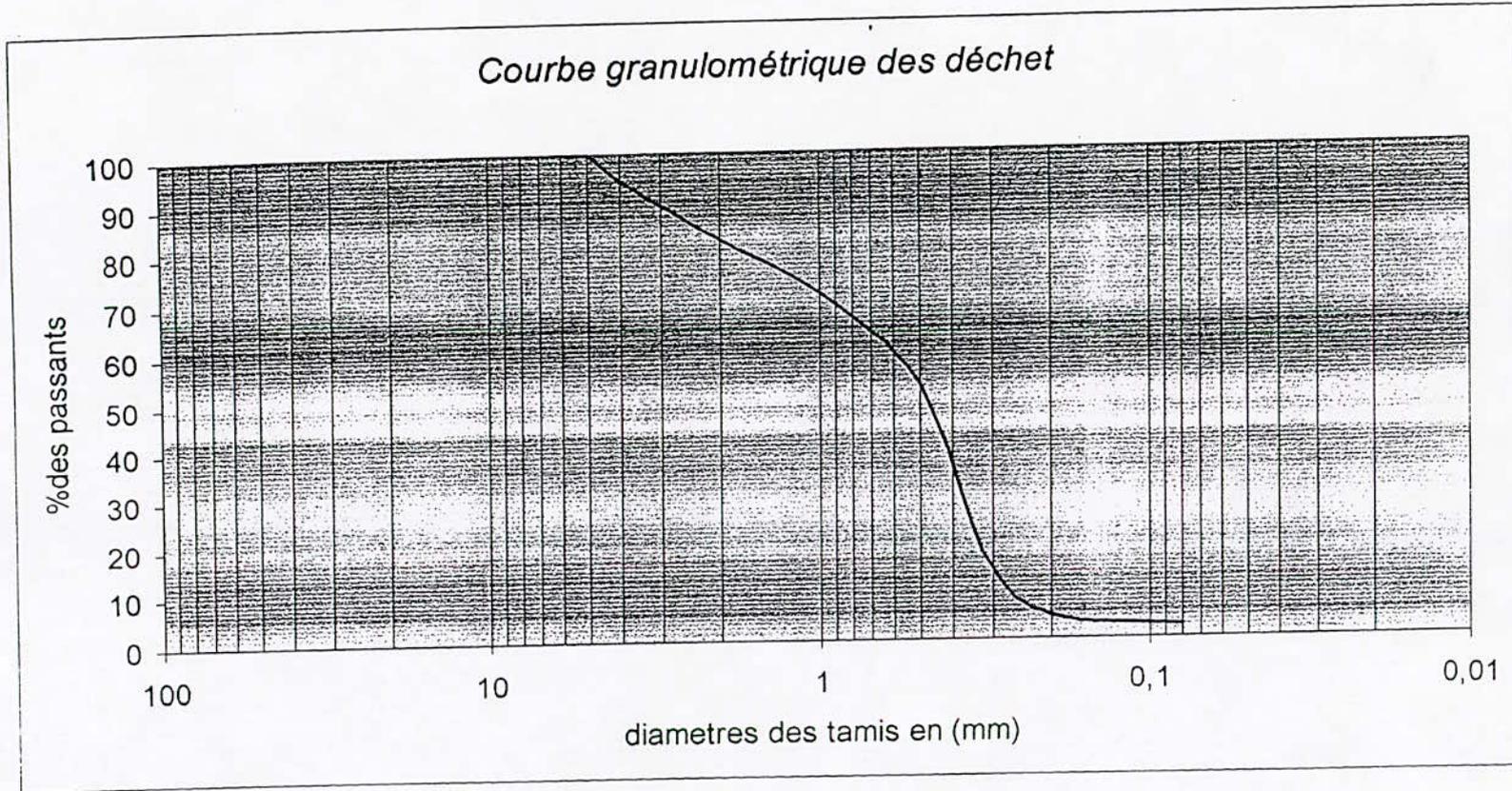


Figure 4.13 : Courbe granulométrique de la déchets

La granulométrie du déchets est presque équivalente à celle du sable, pour cela nous avons remplacé des quantités de sable par des quantités de déchets tel que les pourcentages de déchets pris dans notre étude sont 10% et 20%.

IV.7. Etude de l'enrobe :

IV.7.1. Principe :

La formulation des enrobés bitumineux est basée sur la méthode suivante :

- Choix de la qualité et de la nature des constituants de l'enrobé :
 - Les granulats
 - Le bitume
- L'Adaptation des types d'enrobé bitumineux qui dépend de la couche de chaussée.

IV.7.2. 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.7.3. La détermination de la surface spécifique et la teneur en liant :

IV.7.3.1. 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 :

Tableau 4.20 : les valeurs de module de richesse

Module de richesse	Béton bitumineux (BB)	Grave bitume (GB)
K ₁	3,45	2.45
K ₂	3,60	2.60
K ₃	3,75	2.75

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

IV.7 .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.7.4. les essais sur les enrobés 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.7.4.1. Mode opératoire de l'essai d'adhésivité TWIT (NF 66 008) : [27]

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.7.4. 2. L'essai duriez de compression simple (dilata) : « NFP 98-251-1 » [7]

IV.7.4.2.1. 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.7.4.2.2. 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/cm^2 (360 kg/cm^2) 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).

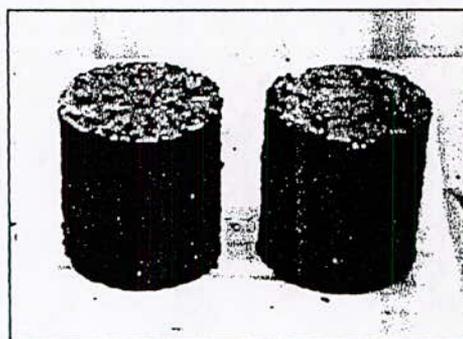


Figure 4-14 : l'éprouvette de DURIEZ

- 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 a courbe atteint

son maximum. Ce maximum correspond à la résistance à la compression.

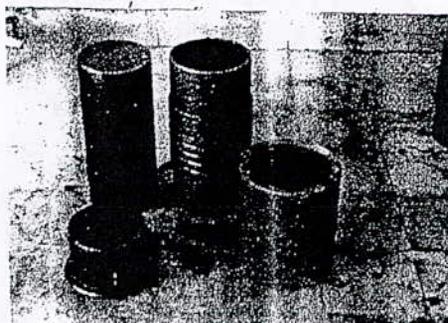


Figure 4.15 : moule de l'essai duriez simple

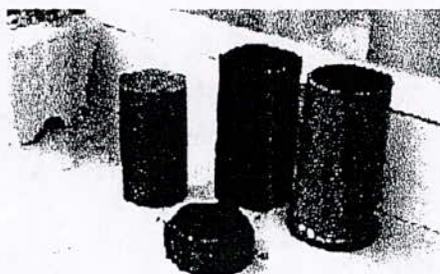


Figure 4.16: Moule de l'essai duriez dilate

IV.7.4.3. l'essai Marshall : « NFP 98-251-2 »

IV.7.4.3.1. 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.7.4.3.2. Principe :

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.

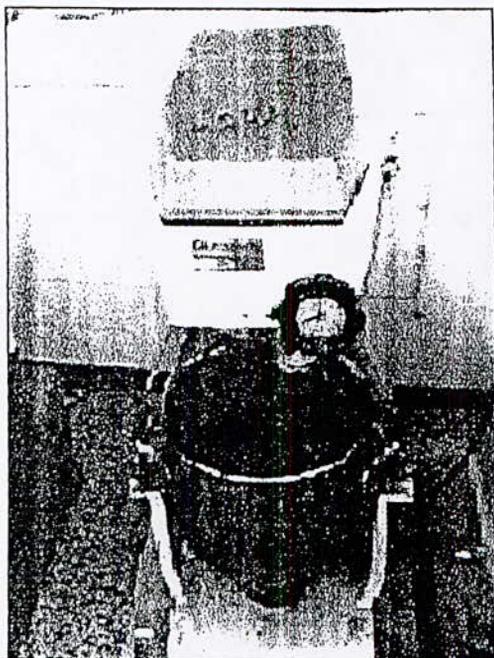


Figure 4.17 : Malaxeur

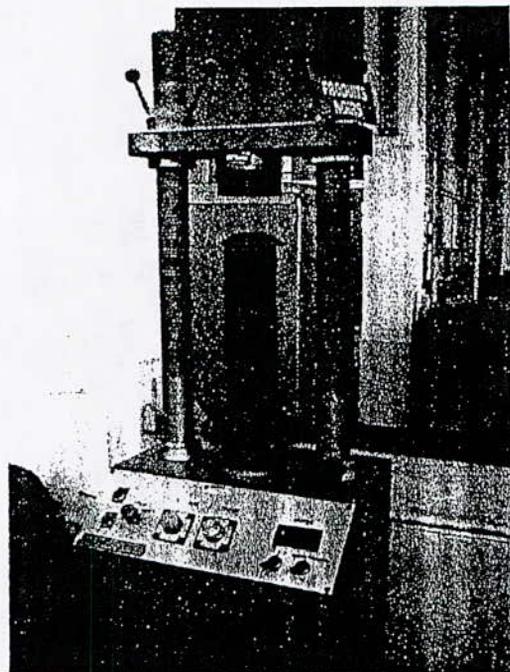


Figure 4.18 : Presse universelle

Remarque :

Nous avons choisi d'utiliser notre déchet en couche de base (grauv-bitume) et non pas en couche de fondation (béton bitumineux) par ce que :

- la couche de base est plus épaisse que la couche de fondation, ce qui nous permet de traiter des quantités considérables de déchets.
- Les sollicitations, les chocs, les frottements et les effets climatiques s'appliquent directement sur la couche de fondation, par contre la couche de base est protégée.

Chapitre V :

Lixiviation

V.1. Essai de lixiviation :

V.1.1. Norme de lixiviation

V.1.1.a. Norme AFNOR X31-210 :

Les déchets industriels déposés dans un milieu naturel sont soumis aux agents atmosphériques, notamment aux infiltrations d'eau qui imprègnent tout d'abord les déchets, puis percolent à travers la masse en dissolvant ou entraînant les éléments qui peuvent être dangereux ou toxiques.

Ce phénomène, relativement simple quant à sa description, est appelé lixiviation. Ces eaux de lixiviation arrivant au fond de la décharge, suivant le degré de la perméabilité du sol récepteur, pénètrent dans la zone non saturée où leur caractère polluant peut être largement atténué avant de s'infiltrer dans la zone saturée ou nappe aquifère. Cette dernière étape du cheminement du lixiviat constitue dans le danger potentiel d'une décharge de déchets industriels. [6]

V.1.1.b. Norme X31-211 :

L'essai de lixiviation est une extraction liquide-solide d'un déchet solide initialement massif ou généré par un procédé de solidification, dans des conditions définies par la norme, d'un échantillon de déchet par une solution aqueuse.

Le lessivat représente une solution, obtenue à l'issu de lessivage, sur laquelle seront effectuées les caractéristiques analytiques (par exemple : analyse physico-chimique, essai écotoxicologiques). L'éprouvette préparée et pesée est mise en contact sous agitation (agitateur magnétique) dans les conditions définies ci-après :

- mise en contact solution de (lessivage /éprouvette) dans un rapport massique L/S =10.
- séparation du déchet solide résiduel et du lessivat.

Les lessivats obtenus étant soumis à analyse et mesure, les résultats sur chaque paramètre recherché et exprimé en concentration du paramètre dans le lessivat (exemple milligrammes par litre, unité toxique par mètre cube, etc....)[6].

V.1.2. Tests de lixiviation et d'extraction : Critère de choix

Le test de lixiviation du déchet est considéré actuellement comme un outil indispensable pour la prédiction du comportement à long terme des déchets stockés et/ou valorisés. Il permet de caractériser des déchets granulaires ou des blocs de déchets stabilisés/solidifiés et d'identifier les paramètres essentiels contrôlant le relargage. Certains tests sont employés pour simuler le

comportement à la lixiviation de matériaux en conditions réelles d'utilisation. Il consiste à extraire des substances solubles contenues dans le déchet ayant subi un traitement de type consolidation (compactage après malaxage avec un absorbant) ou solidification (mélange avec un liant hydraulique ou organique).

Les tests présentent chacun un domaine d'application et un choix plus ou moins arbitraire des paramètres de lixiviation (durée de lixiviation, composition du lixiviant, pH, rapport L/S, agitation, dimension de l'échantillon, etc.), leurs résultats donnent lieu à différentes présentations et interprétations. La question qui se pose est quel(s) test(s) est (sont) adéquat(s) pour le but recherché. A cet égard, il est important de distinguer entre les tests réglementaires, l'estimation de l'impact, l'évaluation scientifique de la lixiviation et un outil quotidien d'évaluation des déchets. []

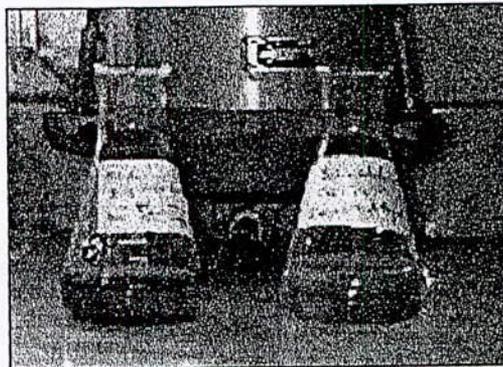


Figure 5-1 : détermination du PH.

Protocole expérimental :

Les éprouvettes soumises à la lixiviation sont obtenues par tronçonnage à sec du matériau non séché, dépoussiérées à l'air comprimé, mesurées et pesées. Elles sont de taille $3,14 \times 6 \times (H_1 + H_2) \text{ cm}^2$.

Le lixiviant (de l'eau déminéralisée) est introduit dans un rapport volume de Liquide/Surface des éprouvettes (L/S) de $10 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ suffisant pour assurer un comportement dynamique, c'est à des que les conditions stationnaires ne sont pas atteintes avant le renouvellement de la solution. Pour chaque matériau nous avons effectué le test en parallèle sur (2 éprouvettes).

Les éprouvettes sont introduites dans un bac et posées sur une grille à 2 cm du fond pour permettre au lixiviant de circuler et donc au transfert de matière de s'effectuer par toutes les faces des éprouvettes. Le bac est soigneusement fermé pour éviter au maximum l'admission d'air (et donc la carbonatation) et l'évaporation de la solution.

Le rythme de changement de la solution est imposé par les temps de contact éprouvettes/solution qui sont successivement 6 heures, 18 heures, 1 jour, 2 jours, 5 jours, 7 jours, 20 jours, 28 jours

et 6 mois. On obtient ainsi 9 solutions dont il faut mesurer les paramètres physico-chimiques et déterminer la composition.

A chaque renouvellement de solution on veille à ce que le temps passé par les éprouvettes hors du lixiviant soit réduit au maximum. On prévoit également les étapes suivantes :

- La solution de lixiviation est récupérée, après agitation du flacon et filtrée à 0.45 μm . Le précipité obtenu sur le papier filtre est réintroduit dans le récipient pour la poursuite de la lixiviation.
- l'éprouvette est soigneusement égouttée et pesée avant d'être réintroduite dans le flacon;
- Le nouveau volume de lixiviant est ajouté, le récipient fermé et la nouvelle séquence de lixiviation commence.

Dans un premier temps, on analyse les paramètres physico-chimiques des éluats : le pH, le potentiel redox, la conductivité et la température. La solution est ensuite séparée en deux parties :

- La première est acidifiée à $\text{pH} < 2$ à l'acide nitrique 65% pour l'analyse des cations. Les flacons sont gardés à température ambiante à l'abri de l'air et de la lumière.
- La seconde est utilisée pour le dosage des anions et la détermination de la fraction soluble.

La fraction soluble représente la masse des solides dissous dans la solution. Un volume connu de solution de lixiviation est séché dans une étuve à température $103 \pm 2^\circ\text{C}$. Le résidu sec est pesé après être refroidi dans un dessiccateur. La représentation de la fraction soluble est en masse (mg) par volume (L) de lixiviat.

V.1.3. Méthode d'analyse :

La méthode d'analyse utilisée par le laboratoire doit être spécifiée dans le rapport d'essai :

Il existe une norme intitulée "**Analyse des éluats** " (XP ENV 12506 de Mai 2000), préconisant des méthodes d'analyses pour quelques uns des paramètres ci-dessous.

- Si la mesure du pH est requise, elle doit être réalisée immédiatement après filtration. L'étalonnage à pH basique est conseillé, ainsi qu'un électrode à haute alcalinité.
- Pour la mesure du plomb et du cadmium, la méthode de l'absorption atomique flamme (NFT 90-112) préconisée dans la circulaire Mâchefers du 09/05/94 n'est pas assez sensible quand les éluats contiennent peu de plomb ou de cadmium. De même, la méthode de l'absorption atomique four (NFT 90-119) est déconseillée, car elle présente beaucoup d'interférences.

. Le calcul des concentrations en mg/kg de mâchefer sec se fait selon les préconisations de la norme XP X 31-210 version de mai 1998 " Modes d'expression des résultats d'essai "

Le laboratoire donnera, dans le rapport final, au moins les résultats suivants :

- ms (g) : la masse de mâchefer sec mis en lixiviation ;
- C1, C2, C3 (mg/l) : les concentrations en un élément, mesurées sur les éluats après chacune des trois lixiviations successives ;
- R (mg/kg) : le résultat de la fraction soluble globale, selon la norme XP X 31-210 version de mai 1998.

V.2. Travail fait en laboratoire :

En premier temps il faut préparer les deux éprouvettes avec les quantités nécessaires des agrégats, on prend comme pourcentage de déchets 20% par rapport à la quantité du sable puis on suit les normes pour déterminer le volume de l'eau.

Tableau 5-1 : Caractéristique des deux éprouvette de lixiviation

Epreuve	20% déchet		
	Masse (grs)	Hauteur (mm)	Diamètre (mm)
1	3490,5	135,48	120
2	3495,5	135,96	120

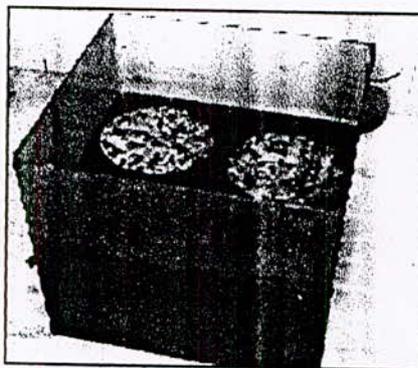


Figure 6-2 : Deux éprouvettes de lixiviation

Calcul de la concentration :

Les normes AFNOR X31-211 donnent comme relation $L/S=10$.

S : la surface des 2 éprouvettes.

L : volume de l'eau

$$\begin{aligned} S &= 2 \times \pi \times (R_1 \times H_1 + R_2 \times H_2) + 2 \times \pi \times (R_1^2 + R_2^2) \\ &= 2 \times 3,14 \times 6 \times (13,54 + 13,59) + 2 \times 3,14 \times (6^2 + 6^2) \\ &= 1474,94 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$S=1474,94 \text{ cm}^2$

$$\frac{\text{liquide}}{\text{surface}} = 10 \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^2} \Rightarrow L(\text{eau}) = S \times 10$$

$$L(\text{eau}) = 1474,94 \times 10 = 1475 \text{ cm}^3 = 14,75 \text{ l}$$

La quantité de déchet dans les deux éprouvettes :

$$- M(\text{mélange}) = 3500 \times 2 = 7000(\text{grs})$$

$$- M(\text{sable}) = \frac{45 \times 7000}{100} = 3150(\text{grs}) .$$

$$- M(\text{déchet}) = \frac{20 \times 3150}{100} = 630(\text{grs}) .$$

Concentration de déchet :

$$C(\text{déchet}) = \frac{630}{14,75} = 42,71 \left(\frac{\text{grs}}{\text{l}} \right) = 0,0427 \left(\frac{\text{kg}}{\text{l}} \right) .$$

Chapitre VI :

Résultats et interprétations

IV.1. Introduction :

La grave bitume sera utilisée en couche de base en section routière neuve, en renforcement de l'ancienne chaussée, ainsi que pour le déblanchage éventuel de l'ancienne chaussée avant la mise en œuvre du revêtement.

IV.2. Formulation sans déchet :

Pour trouver la teneur en liant qui donne de bonnes caractéristiques mécaniques on varie la teneur pour plusieurs formulations jusqu'à obtenir la valeur optimum qui représente une solution économique.

La même teneur en liant trouvée sera utilisée pour la formulation avec déchet.

IV.2.1. Courbe granulométrique du mélange :

Il faut déterminer la courbe granulométrique qui s'insère dans le fuseau de référence du mélange à partir de la variation des pourcentages pondéraux des agrégats utilisés dans la formulation.

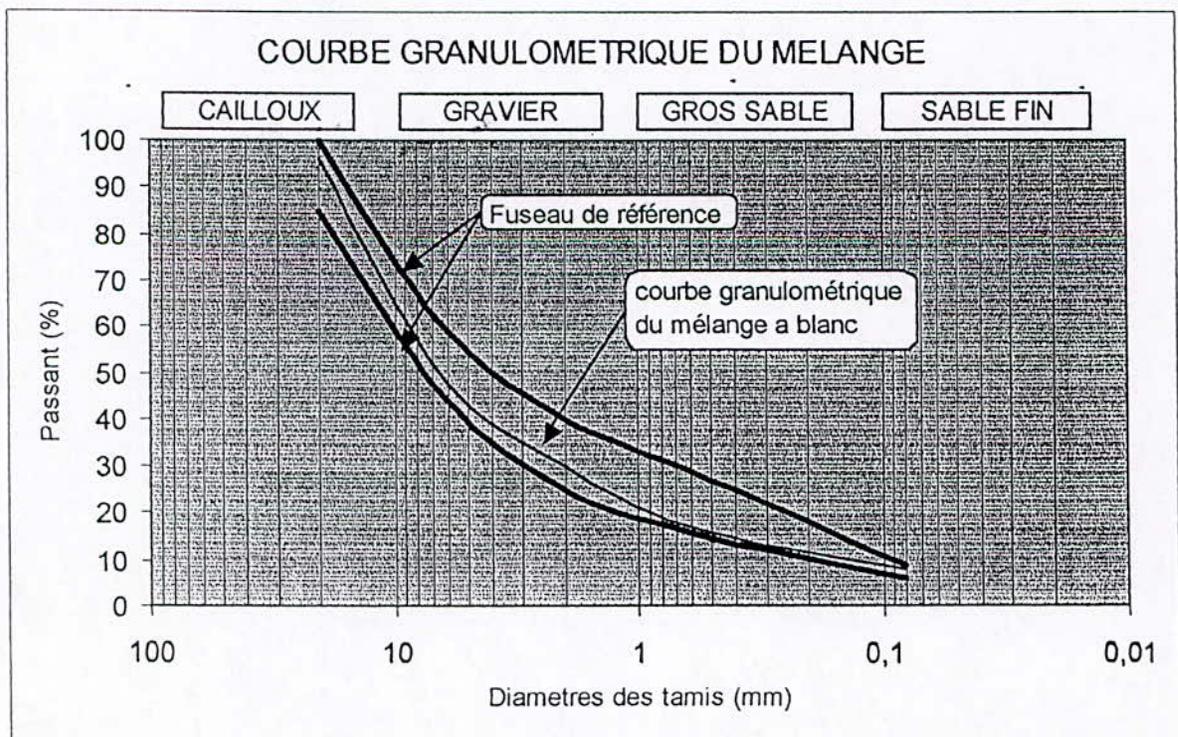


Figure 6.1 : La courbe granulométrique du mélange

Les pourcentages des fractions trouvés sont :

- ❖ La fraction $15/25$: 20 %
- ❖ La fraction $8/15$: 20 %
- ❖ La fraction $3/8$: 15 %
- ❖ La fraction $0/3$: 45 %

IV.2.2. Etude de formulation :

Les résultats de l'essai **DURIEZ** dilaté pour les trois gâchées sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 6.1 Résultats de formulation

GACHET		A	B	C
Teneur en liant en %		4,00	4,15	4,40
Surface spécifique en m ² /Kg		11,09		
Module de richesse (k)		2,45	2,60	2,75
Résistance à la compression simple à 18 °C en bars de 1mm/Seconde	r'	63,54	59,47	68,01
	R	66,50	76,15	77,83
Rapport immersion compression (r'/R)		0,96	0,78	0,87
Densité vraie de l'éprouvette		2,53	2,52	2,52
Densité apparente		2,30	2,31	2,31
Compacité en %		90,92	91,50	91,81
Pourcentage d'affaissement de l'éprouvette		3,10	3,55	4,30
Pourcentage de vide occupé par le bitume		35,56	51,48	53,75
Pourcentage d'imbibition		0,69	0,86	0,51
Pourcentage de gonflement		0,23	0,47	0,33

Remarque :

Ce tableau représente les paramètres déterminés pour la formulation de l'essai **DURIEZ**.

La formulation est donnée en détails dans l'annexe 1.

VI.2.2.1. Variation de la résistance mécanique en fonction de la teneur en liant :

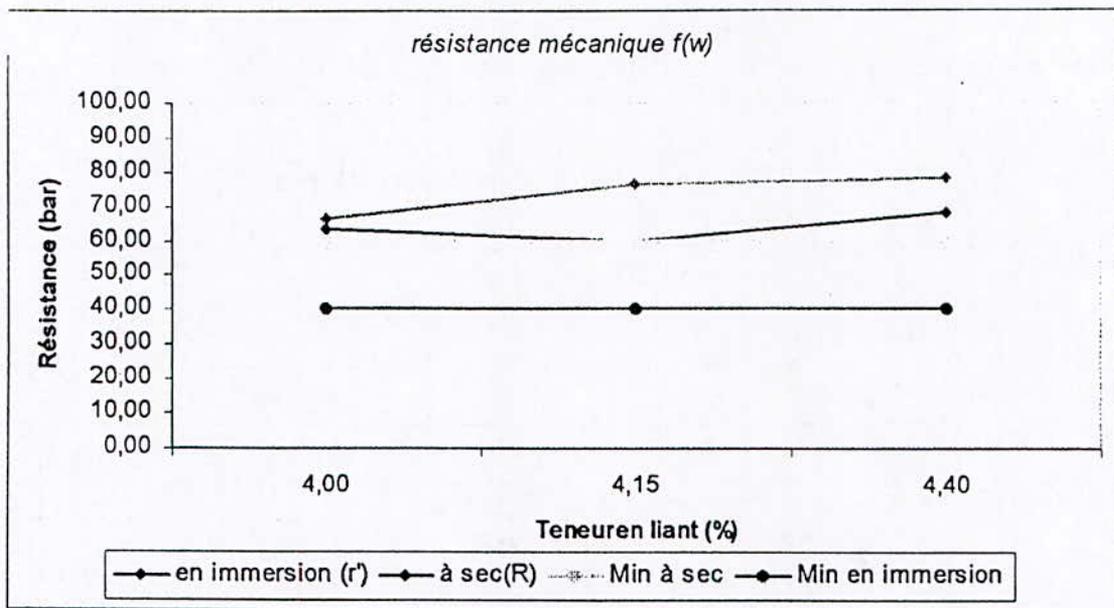


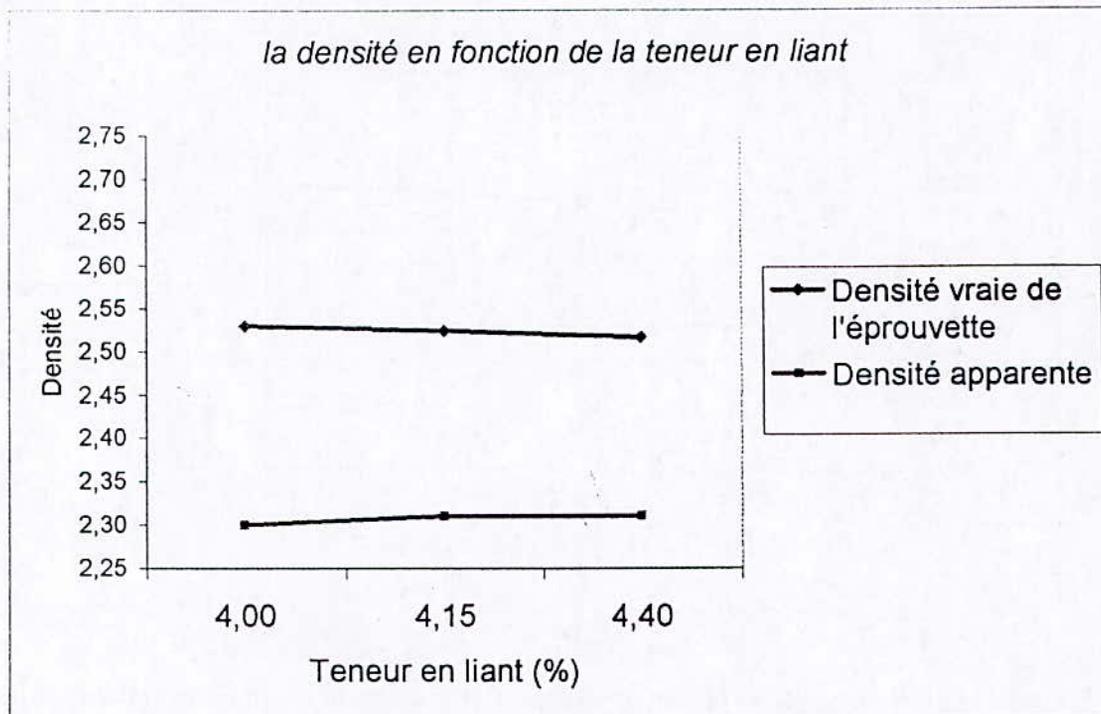
Figure 6.2 La résistance mécanique obtenue en fonction de la teneur en liant

On remarque que L'augmentation de la teneur en liant donne des résistances mécaniques élevées. La résistance maximale à sec à 22°C pour 7 jours est atteinte à partir de 4,40% de bitume, cette valeur correspond à la dernière formule avec une résistance de compression de 77,83 bars.

La résistance de compression obtenue est bonne car elle est supérieure au seuil minimal (60 bars pour les exigences de la couche de base).

Pour le cas "immersion", on remarque que la résistance diminue dans l'intervalle [4 - 4,15]% et augmente pour la troisième teneur mais elle reste toujours supérieure a la valeur minimale (40 bars) .

VI.2.2.2. La densité en fonction de la teneur en liant :

**Figure 6.3** La densité en fonction de la teneur en liant

L'augmentation de la teneur en liant augmente à chaque fois la densité apparente, par contre, la densité vraie se diminue.

Cela s'explique du fait que la densité du bitume (égale à 1,02) est inférieure à celle des agrégats qui sont de l'ordre de 2,68.

VI.2.2.3. La compacité et le pourcentage des vides en fonction de la teneur en liant

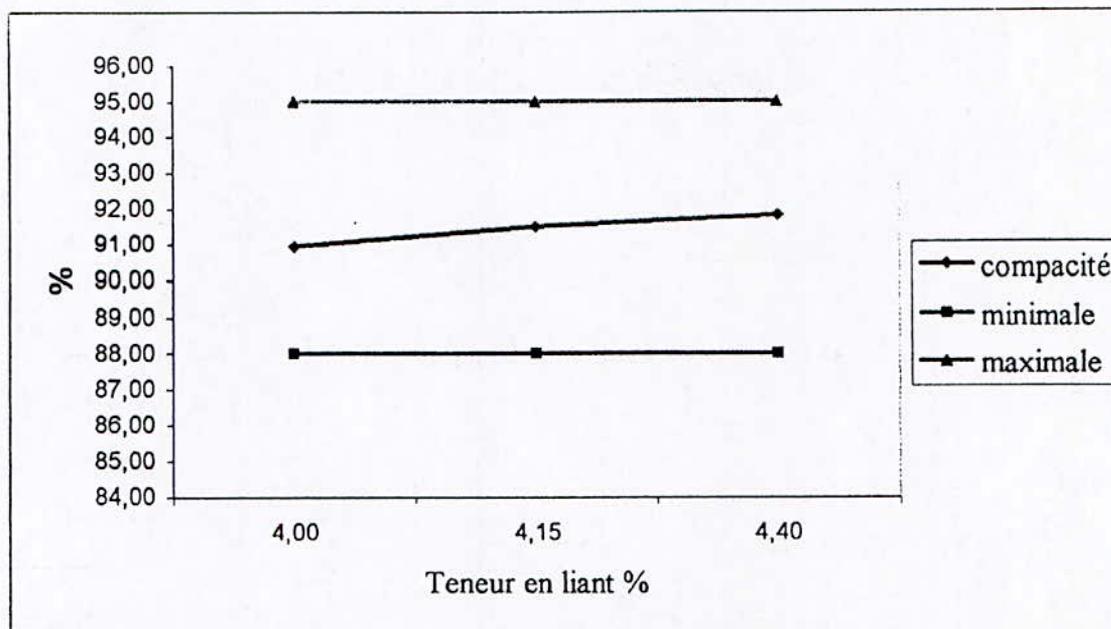


Figure 6.4 La compacité et le pourcentage des vides en fonction de la teneur en liant

On constate que la compacité augmente avec l'augmentation de la teneur en liant par ce que le vide est occupé par le bitume tel que la compacité soit suffisante quand le pourcentage des vides est faible.

La compacité varie entre 88 et 96% selon les spécifications de la route concernant la couche de base.

VI.2.2.4. Pourcentage de gonflement et d'imbibition en fonction de la teneur en liant

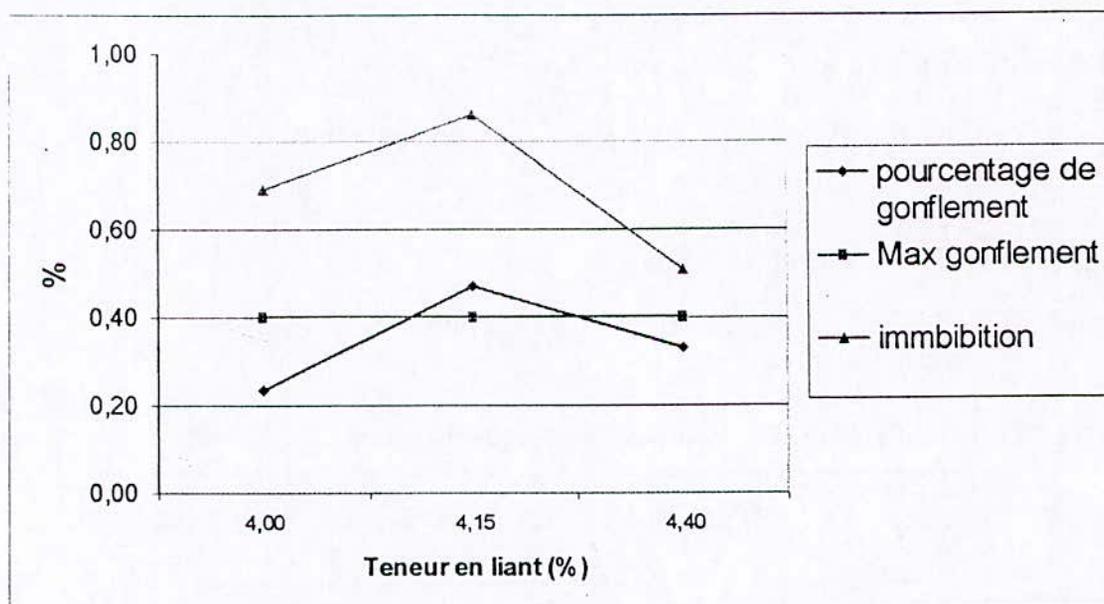


Figure 6.5 Pourcentage de gonflement et d'imbibition en fonction de la teneur en liant

Le graphe montre que le pourcentage de gonflement a dépassé la limite admissible pour la deuxième teneur (4,15%) et que la troisième teneur donne un gonflement négligeable par rapport aux spécification qui sont de 4%.

VI.2.3. Conclusion :

Dés qu'on augmente la teneur en liant les résultats obtenues 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 exigées.

Notre travail sera fait avec la troisième formule car elle donne de bonnes performances mécaniques.

VI.3. Formulation avec déchet :

Les quantités de déchet sont relatifs à la fraction 0 / 3.

On ajoute 10% et 20% de déchets par rapport à la quantité du sable.

VI.3.1. granulométrie de Mélange :

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

Tableau 6.2 : Composition granulométrique de Mélange

% DE DECHET	0% DE DECHET	10% DE DECHET	20% DE DECHET
Tamis (mm)			
5	0	0	0
4	1	4,5	10
3,15	52	47	108
2,50	149,2	164,5	206
2,00	246	282	303,5
1,60	327	349,5	381
1,25	408	417	459
1,00	489	484,5	536,5
0,800	543,5	543,5	598
0,630	598	602,5	639,5
0,500	652	661,5	722
0,400	683,2	714	766,5
0,315	714	766	811
0,250	752	809	865,5
0,200	790	852,5	920
0,160	800	879,5	936
0,125	810	907	952
0,100	820	934	967,5
0,080	825	982	980
p. spécifique	2,70	2,67	2,58

VI.3.2. Les résultats d'étude de formulation avec déchet :

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

Les résultats de l'essai DURIEZ avec différents pourcentages de déchets sont donnés dans le tableau 6.3.

Tableau 6.3 résultats de l'essai DURIEZ avec différent pourcentage de déchets

Déchet (%)		0	10	20
Surface spécifique en m ² /Kg		11,09	11,00	10,98
Module de richesse		2,75	2,75	2,75
Résistance à la compression	r'	68,01	29,20	26,33
	R	77,83	40,04	39,38
Rapport immersion compression r'/R		0,87	0,73	0,67
Densité vraie de l'éprouvette		2,52	2,50	2,47
Densité apparente		2,31	2,34	2,37
Compacité en %		91,81	93,25	95,82
Pourcentage d'affaissement de l'éprouvette soumise à C S		4,30	3,62	2,65
Pourcentage de vide occupé par le bitume		53,75	50,55	70,11
Pourcentage d'imbibition		1,04	0,92	0,93
Pourcentage de gonflement		0,53	0,29	0,27

VI.3.2.1. La résistance en fonction du pourcentage du déchet :

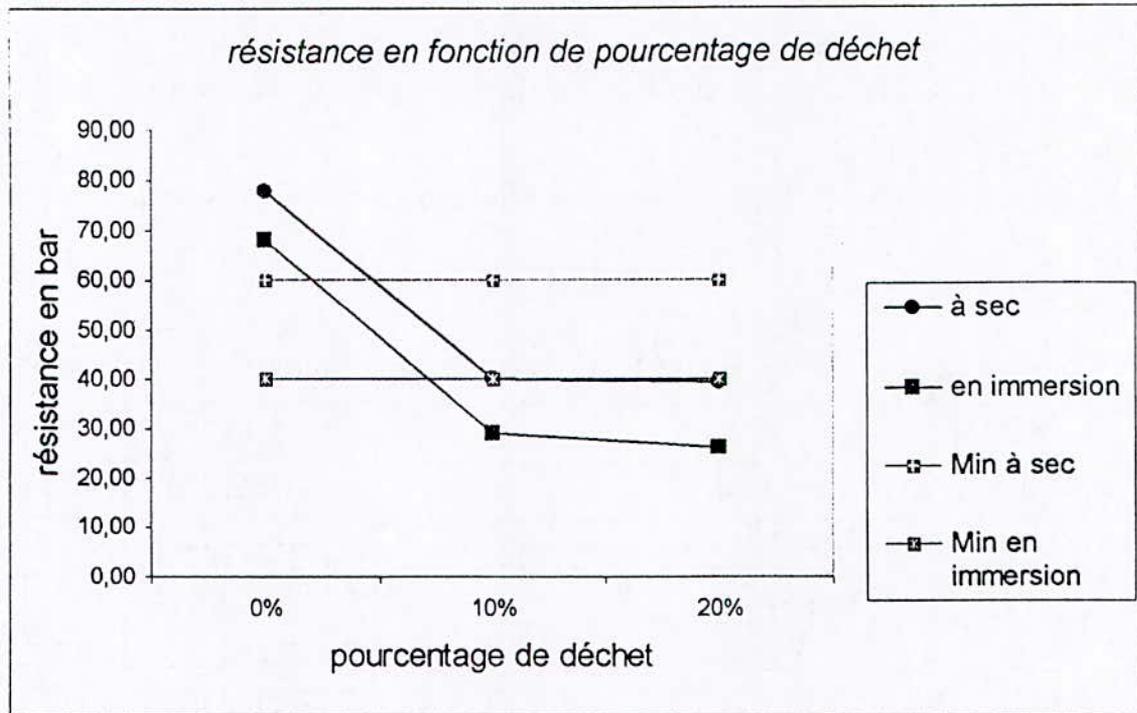
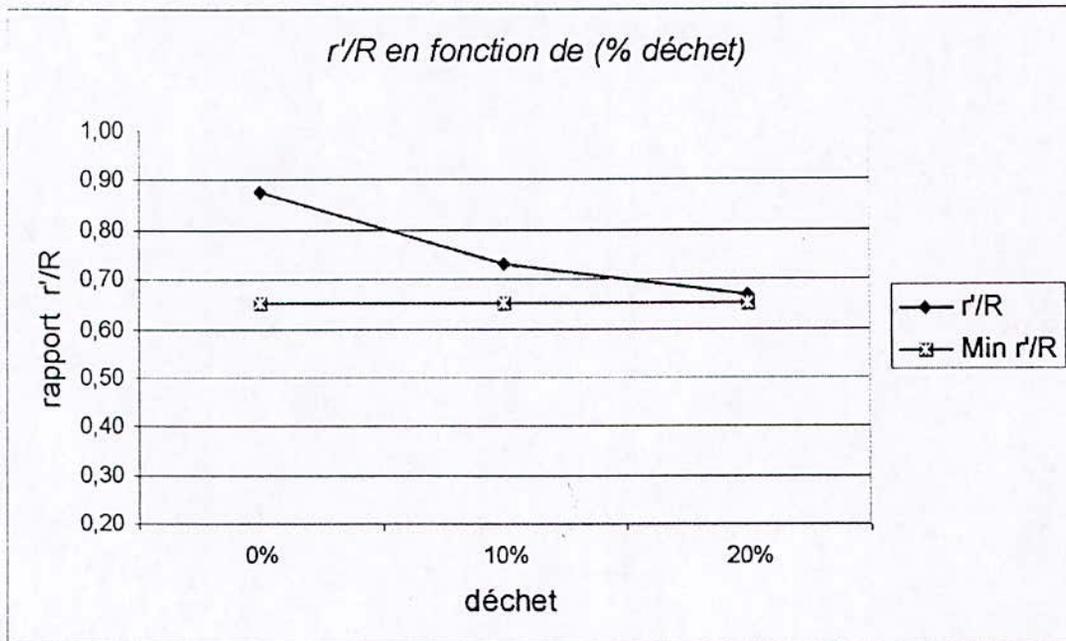


Figure 6.6 La résistance en fonction du pourcentage du déchet

Les résultats de résistance sur les éprouvettes d'enrobés présentées sur la figure 6.6 montrent que l'introduction du déchet à différents pourcentages (10% et 20%) a fortement diminué la résistance mécanique à sec et en présence d'eau. On constate également que les seuils de spécifications admissibles ne sont pas respectés.

Pour le premier cas (à sec) la résistance mécanique diminue de 80 bars (0% de déchets) à 40 bars (10% de déchets). A partir de ce pourcentage la résistance continue à stabiliser jusqu'à 20 %.

VI.3.2.2. Le rapport r'/R en fonction du pourcentage du déchet :Figure 6.7 Le rapport r'/R en fonction du pourcentage du déchet

Le rapport r'/R diminue lorsque en augmente le pourcentage de déchets mais il reste toujours supérieure à la valeur minimale (65%) tel que :

Le rapport r'/R pour 10% de déchet est égale à 0,73, et pour 20% de déchet sa valeur est de 0,67.

La chute de résistance est expliquée, du fait que la présence d'eau influe négativement sur le comportement mécanique de l'enrobé qui contient un certain pourcentage de déchet.

VI.3.2.3. La densité vraie et apparente en fonction du pourcentage de déchet :

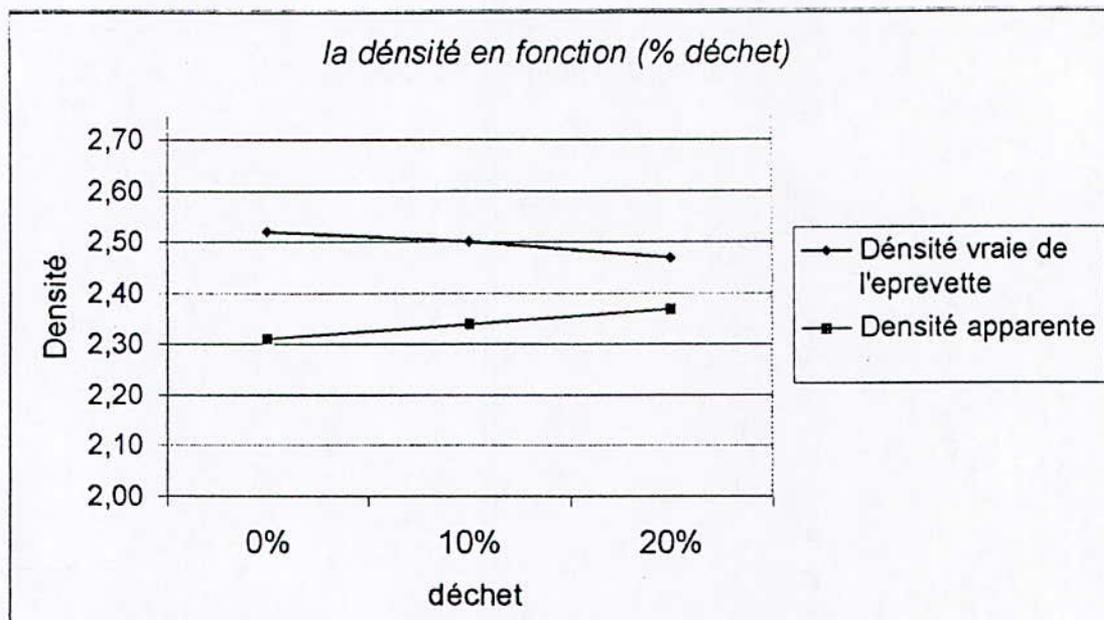


Figure 6.8 La densité vraie et apparente en fonction du pourcentage de déchet.

La densité vraie de l'éprouvette en fonction du pourcentage de déchet est une droite décroissante, due au poids spécifique de déchet (1.62) qui est inférieure au poids spécifique des granulats qui est au tour de (2.68).

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

VI.3.2.4. Pourcentage de gonflement en fonction du pourcentage du déchet :

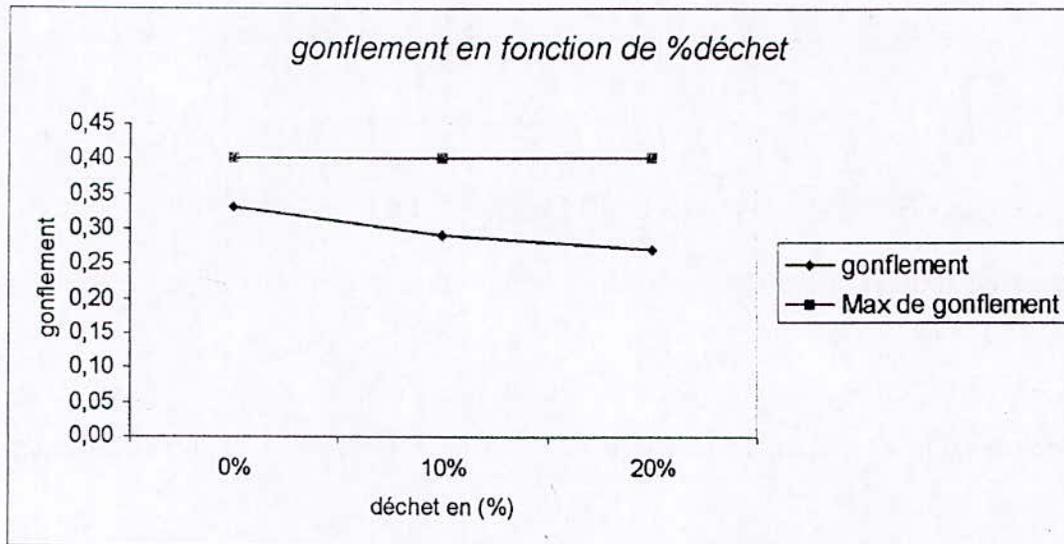


Figure 6.9 Pourcentage de gonflement en fonction du pourcentage du déchet

D'après le graphe on remarque que le pourcentage de gonflement diminue lorsque en augmente le pourcentage de déchets.

Ce gonflement est négligeable devant les spécifications qui sont de 4%.

VI.3.2.6 La compacité en fonction du pourcentage du déchet :

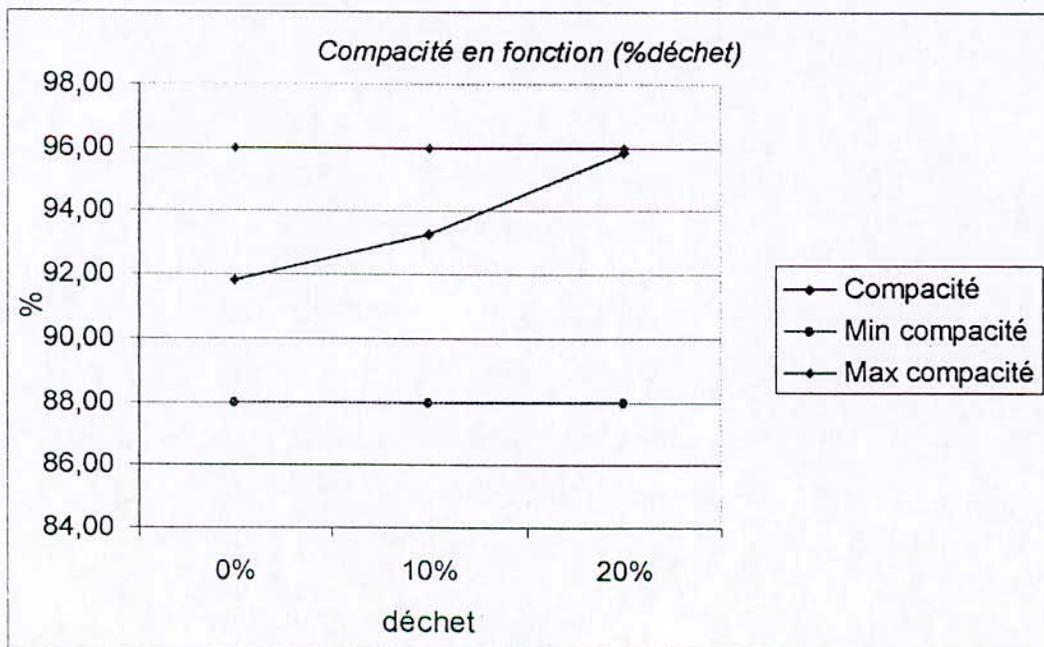


Figure 6.10 la compacité en fonction du pourcentage du déchet

La compacité augmente lorsque en augmente le pourcentage de déchets.

Les éprouvettes se saturent de plus en plus de l'augmentation de déchet qui occupe les vides.

Le pourcentage de compacité vérifie toujours les conditions de limite (Min et Max).

VI.4. Résultat de lixiviation (après les analyses)

L'essai de lixiviation est une extraction liquide provenant d'un solide (enrobé) soumis à l'action de l'eau.

Les résultats d'analyses chimiques des métaux lourds pour les différents échantillons ont été effectués au niveau de C.N.R.A (Centre Nucléaire de Recherche d'Alger) à l'aide de l'A.D.E (Algérienne Des Eaux).

Tableau 6.4 Résultats d'analyse

LIEU DE PRELEVEMENT	PARAMETRES DES METAUX LOURDS						
	Fe ($\mu\text{g/l}$)	Mn ($\mu\text{g/l}$)	Cd ($\mu\text{g/l}$)	Cu ($\mu\text{g/l}$)	Cr ($\mu\text{g/l}$)	Zn ($\mu\text{g/l}$)	Co ($\mu\text{g/l}$)
1 Témoin après (2 heures)	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Après 4 jours	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Après 6 jours	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Après 12 jours	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Après 26 jours	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2

Remarque :

Les valeurs des métaux lourds sont inférieures à 2 ci à dire que les métaux ne sont pas détectés.

Conclusion :

Les essais de lixiviation ont montré que le déchet est stabilisé, et qu'il n'y a pas de risque de relargages des éléments toxiques (les métaux lourds non détectés).

VI.5. Influence de déchets sur le bitume :

Afin d'expliquer la chute de résistance mécanique de l'enrobé, on a été amené à étudier le comportement rhéologique du mastic (filler de sable + bitume) et de son substituant (filler de déchet + bitume). Telle que :

Le mastic est un mélange de bitume avec le déchet et les fillers de sable

$L/d = 1$ (le rapport de la masse teneur en liant, masse de déchet égale à 1)

$L/S = 1$ (le rapport de la masse teneur en liant, masse du filler de sable égale à 1).

Les essais rhéologiques pratiques sur les mastics sont :

- Essai de pénétrabilité effectué par la norme (NF T 66-004)
- Point de ramollissement bille anneau (NF T 66-008)

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant;

Tableau 6.5 : Essai de pénétrabilité et pont de ramollissement avec mastic

L/S et $L/d = 1$.

	Mastic filler de sable+bitume avec $L/S=1$	Mastic déchet+bitume $L/d=1$
pénétrabilité	20	49
Essai de bille-anneau (T°C)	65	55

On représenté les graphes suivants pour faire une comparaison entre L/S et L/d .

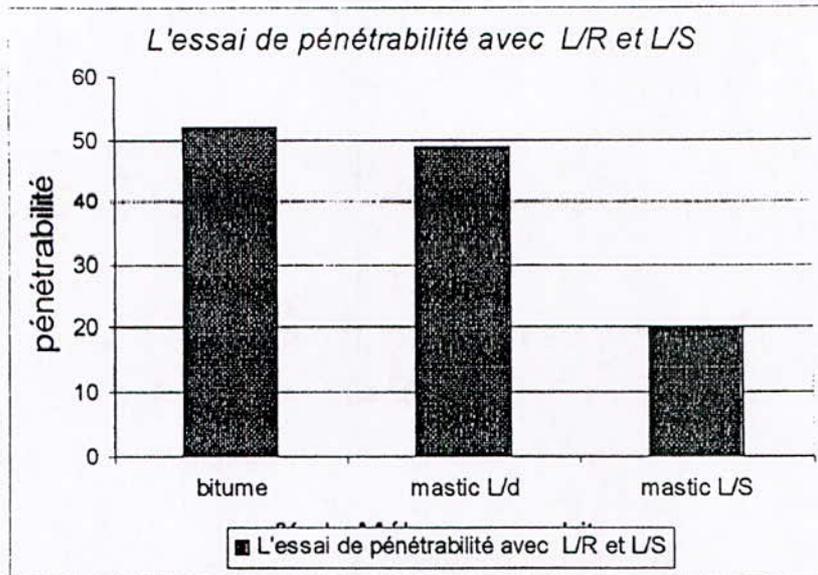


Figure 6-11 : Essai de pénétrabilité avec L/S et L/d .

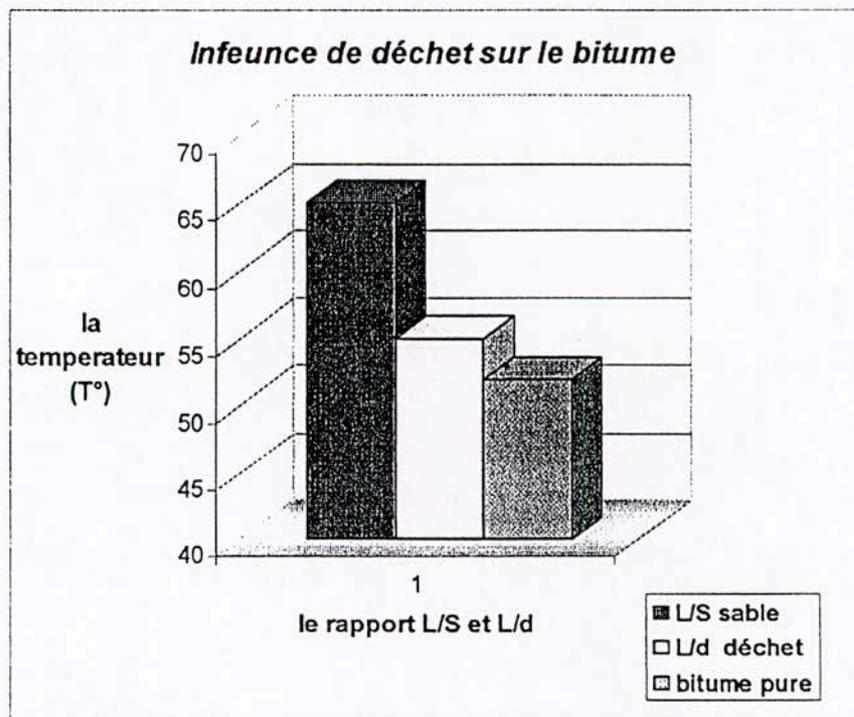
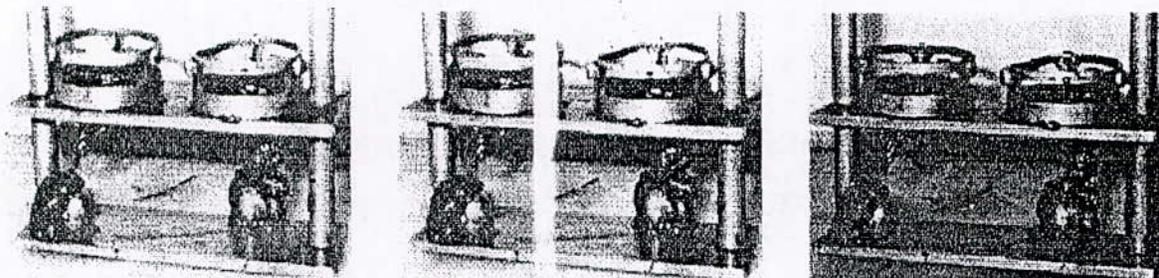


Figure 6-12 Essai de point de ramollissement avec L/S et L/d .

Figure 6.12 : photon de mastic L/S



Figure 6.13 : photon de mastic L/d

**Remarque :**

On remarque que l'introduction de déchet a **diminué la rigidité** du mastic qui se traduit par une pénétrabilité élevée et un point de ramollissement faible.

Autre remarque, c'est que le **mastic L/d (déchet et bitume)** n'est pas couvert la bille (fig 6.13), par contre dans le cas de mastic (**filler de sable et bitume**) (fig 6.12) , ce qui traduit par:

L'introduction de déchet influe sur les propriétés de collage de bitume, et pour cela il y'aura une chute de la résistance mécanique de l'enrobé bitumineux.

Conclusion générale :

A partir des résultats expérimentaux de notre travail on tire les conclusions suivantes :

L'essai de lixiviation a montré clairement que notre déchet est stabilisé, donc il n'y a pas un risque de relargage des éléments toxiques et dangereux qui sont retenus dans la matrice solide.

On ce qu'il concerne la stabilisation du point de vue la résistance mécanique, elle n'est pas améliorée nous avons remarqué que l'introduction de déchet a diminué la rigidité de la matrice solide, mais l'emploi de cette formulation dans des éléments secondaires qui nécessitent de faibles résistances par exemples, dans des places réservées pour les piétons (les trottoirs), est une solution qui pourrait être envisagée après l'établissement d'une étude technique et économique par les entreprises préoccupées de l'élimination des déchets, et de la protection de l'environnement.

Nous recommandons de faire d'autres études pour améliorer la résistance mécanique de la matrice solide, par exemple;

- par l'utilisation des ajouts.
- faire des traitements chimiques.
- étudier le comportement de l'enrobé après le traitement pour un long terme.

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)
3506	3545,5	39,5	43,89	1969	1576,5	2,30	1532,61

Essai statique sur mélanges hydrocarbonés

Echantillon	Formule En %	P. Spécifique D	Composition centismale P	Rapport P/D	Densité apparente dm	par balance hydrostatique	
15\25	20 %	2,66	19,23	7,23	Densité vraie	$Dm=100/S2$	2,3
8\15	20 %	2,7	19,23	7,123	Compacité en %	$C=(Dm/dm)*100$	2,53
3\8	15 %	2,68	14,42	5,382	Desité apparente agrégats	$dA=((100-P)*dm)/100$	90,92
0\3	45 %	2,7	43,27	16,03	Densité vraie agrégats	$DA=(100-P)/S1$	2,31
			Somme S1=	35,76	% Vide occupé par bitume+Eau	$VA=((DA-dA)*100)/DA$	2,69
Bitume en%	4%	1,02	3,85	3,771	Vide résiduel	$Vm=100-Compacité$	14,09
			Somme S2=	39,53	% Vide occupé par bitume	$VB=((VA-Vm)*100)/VA$	9,08
			100-P =	96,15			35,56

Annexe 1 : Les résultats détaillés d'étude de formulation sans déchet

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
3505	3546,5	41,5	46,11	1985,5	1561	1514,89	2,31

Essai statique sur mélanges hydrocarbonés

Echantillon	Formule En %	P.Spécifique D	Composition centisimale P		Rapport P/D	Densité apparente dm	par balance hydrostatique	
15\25	20 %	2,66	19,20		7,219	Densité vraie	$Dm=100/S2$	2,52
8\15	20 %	2,7	19,20		7,113	Compacité en %	$C=(Dm/dm)*100$	91,50
3\8	15 %	2,68	14,40		5,374	Desité apparente agrégats	$dA=((100-P)*dm)/100$	2,22
0\3	45 %	2,7	43,21		16,00	Densité vraie agrégats	$DA=(100-P)/S1$	2,69
				Somme S1=	35,71	% Vide occupé par bitume+Eau	$VA=((DA-dA)*100)/DA$	17,51
Bitume en%	4,15%	1,02	3,98		3,903	Vide résiduel	$Vm=100-Compacité$	8,50
				Somme S2=	39,61	% Vide occupé par bitume	$VB=((VA-Vm)*100)/VA$	51,48
			100-P =	96,02				

Annexe 1 : Les résultats détaillés d'étude de formulation sans déchet

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
3507	3549	42	46,67	1976	1573	1526,33	2,31

Essai statique sur mélanges hydrocarbonés

Echantillon	Formule En %	P.Spécifique D	Composition centesimale P	Rapport P/D	Densité apparente dm	par balance hydrostatique	
15\25	20 %	2,66	19,16	7,203	Densité vraie	$Dm=100/S2$	2,31
8\15	20 %	2,7	19,16	7,096	Compacité en %	$C=(Dm/dm)*100$	2,52
3\8	15 %	2,68	14,37	5,362	Desité apparente agrégats	$dA=((100-P)*dm)/100$	91,81
0\3	45 %	2,7	43,11	15,97	Densité vraie agrégats	$DA=(100-P)/S1$	2,21
			Somme S1=	35,63	% Vide occupé par bitume+Eau	$VA=((DA-dA)*100)/DA$	2,69
Bitume en%	4,39 %	1,02	4,20	4,118	Vide résiduel	$Vm=100-Compacité$	17,70
			Somme S2=	39,75	% Vide occupé par bitume	$VB=((VA-Vm)*100)/VA$	8,19
			100-P =	95,80			53,75

Annexe 1 : Les résultats détaillés d'étude de formulation sans déchet

ESAAI		A SEC						APRES IMMERSION								
		07 Jours à l'air libre			0 Heure			02 Heure			02 Jours			07 Jours		
EPROVETTE N°		1	2	3	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6
Hauteur de l'éprouvette en (mm)	H	136,5	136,8	136,4	137,3	138,8	137,4	137,3	138,9	137,5	137,4	138,9	137,6	137,9	139,3	137,7
	H'	136,5	136,8	136,4	137,3	138,8	137,5	137,4	138,9	137,6	137,4	139,0	137,8	138,0	139,5	137,8
	H''	136,5	136,8	136,5	137,3	138,8	137,6	137,4	138,8	137,6	137,4	138,9	137,6	138,0	139,7	137,7
	H'''	136,5	136,8	136,6	137,3	138,8	137,5	137,3	138,8	137,6	137,3	138,9	137,8	137,9	139,5	138,0
Diamètre en (mm)	D	119,4	119,4	119,4	119,4	119,4	119,4	119,4	119,5	119,6	119,4	119,4	119,8	119,4	119,4	120,0
	D'	119,4	119,4	119,4	119,4	119,4	119,6	119,4	119,4	119,6	119,4	119,4	119,8	119,4	119,4	120,1
	D''	119,4	119,4	119,5	119,4	119,4	119,4	119,5	119,4	119,8	119,4	119,4	119,9	119,4	119,4	120,0
Poids	P	3408	3508	3507	3505	3506	3505	3509	3510	3511	3534	3524	3526	3554	3538	3541
Résistance à la compression à 18 °C (KG/mm ²)																
		9440	8150	9120										7320	8050	7920
	Corrigée	83,54	72,1	77,8										64,8	71,24	68
Hauteur après écrasement en (mm)	HP	131,2	130,9	130,2												
	HP'	131,2	130,9	130,1												
	HP''	131,2	130,9	130,4												

Annexe 2 : 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	
ÉPROUVETTE N°		1	2	4	5	4	5	4	5	4	5
Hauteur moyenne en (mm)	Hm	133,78	133,55	133,23	134,48	136,88	137,10	137,25	137,60	137,85	138,28
Diamètre moyen en (mm)	D	120	120	119,93	119,93	119,93	119,97	120,00	120,00	120,07	120,10
Surface = $3,14 * D^2 / 4 \text{ mm}^2$	S	11304,0	11304,0	11291,44	11291,44	11291,44	11297,72	11304,00	11304,00	11316,56	11322,85
Volume = $3,14 * D^2 * Hm / 4 \text{ mm}^3$	V	15121,9	15096,5	15446,69	15469,28	15455,16	15489,18	15514,74	15554,30	15599,88	15656,67
Densité apparente par les mesures	P/V	2,31	2,32	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	130,1	130,1
% d'affaissement $(HP - Hm) * 100 / Hm$	%	2,747	2,6
Moyenne		2,65	

N° d'éprouvette	4	5	4	5	4	5
Imbibition = $Ph - P_0$	23,5	23,5	40,5	43,5	51,5	53,5
% D'imbibition = $100 * (Ph - P_0) / P_0$	0,67	0,67	1,16	1,24	1,47	1,53
Moyenne	0,67		0,62		1,50	
Gonflement = $Vh - V_0$	10,5	8,5	70,7	26,5	81,8	66,6
% Gonflement = $100 * (Vh - V_0) / V_0$	0,07	0,06	0,47	0,17	0,54	0,44
Moyenne	0,06		0,32		0,49	

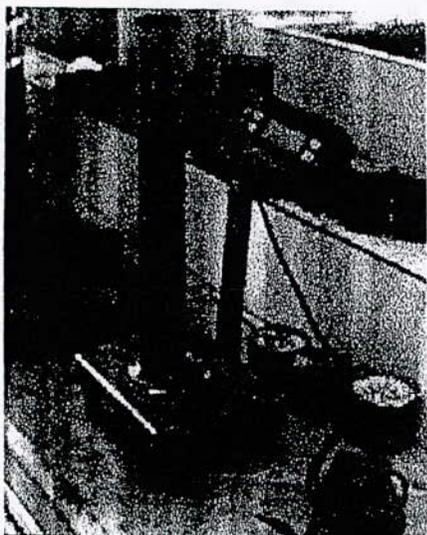
Annexe 2 : Les résultats détaillés d'étude de formulation avec déchet

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	135,08	134,73	135,78	134,57	135,75	134,675	135,945	134,55	136,05	134,665
Diamètre moyen en (mm)	D	119,97	119,97	119,97	119,97	120	119,967	120,033	120	120,07	120,033
Surface = $3,14 \cdot D^2/4$ mm ²	S	11297,7	11297,7	11297,7	11297,7	11304,0	11297,7	11310,3	11304,0	11316,6	11310,3
Volume = $3,14 \cdot D^2 \cdot Hm/4$ mm ³	V	15261,0	15221,4	15339,5	15202,8	15345,2	15215,2	15375,8	15209,5	15396,2	15231,0
Densité apparente par les mesures	P/V	2,30	2,30	2,29	2,31	2,30	2,32	2,31	2,33	2,31	2,34

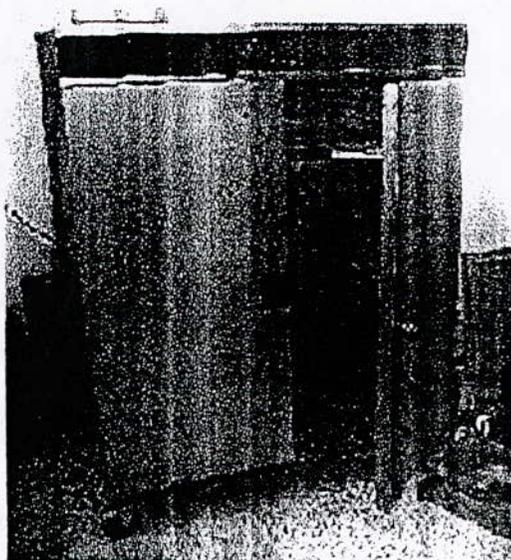
N° d'éprouvette		1	2
Hm après écrasement	HP	129	127
% d'affaissement $(HP-Hm) \cdot 100/Hm$	%	4,8	6,1
Moyenne		3,62	

N° d'éprouvette	4	5	4	5	4	5
Imbibition = Ph-P0	25,5	18,5	47,5	39,5	58,5	52,5
% D'imbibition = $100 \cdot (Ph-P0)/P0$	0,73	0,53	1,36	1,13	1,67	1,5
Moyenne	0,63		0,56		1,58	
Gonflement = Vh-V0	5,7	12,4	36,3	6,8	56,7	28,2
% Gonflement = $100 \cdot (Vh-V0)/V0$	0,17	0,21	0,25	0,28	0,46	0,39
Moyenne	0,19		0,26		0,42	

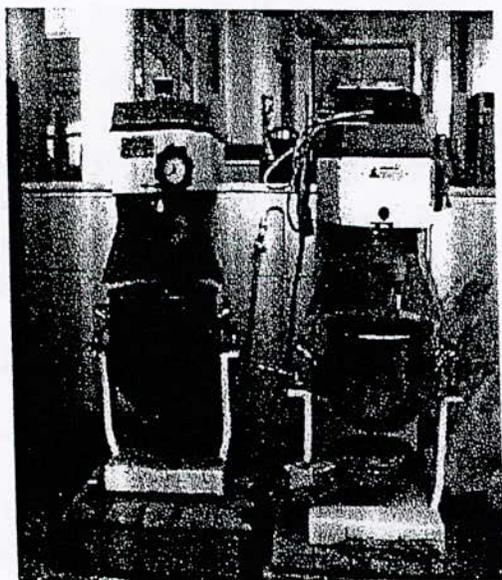
Annexes photos



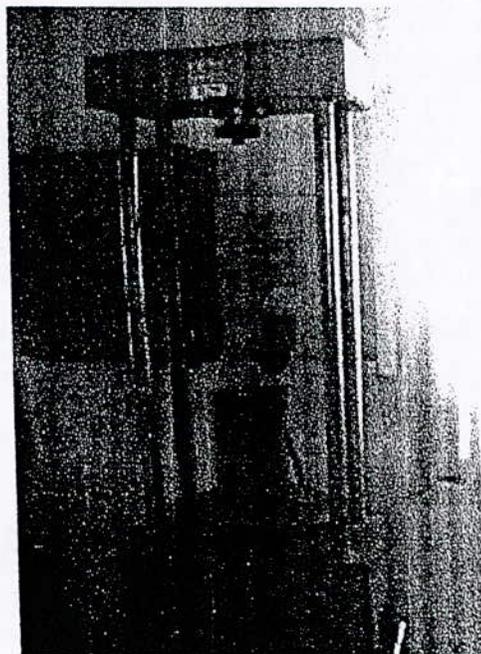
Balance



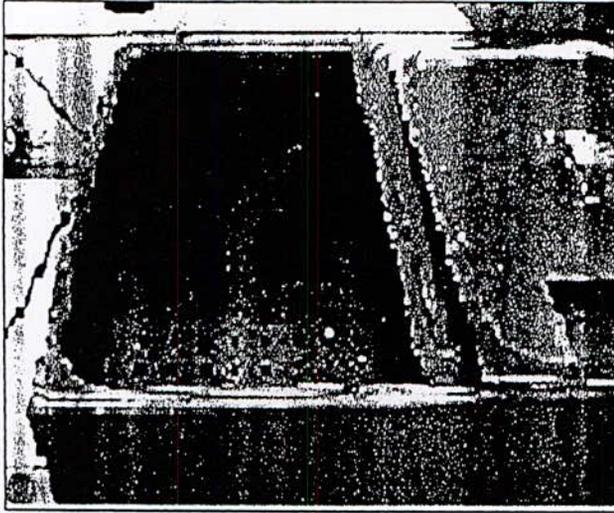
Etuve



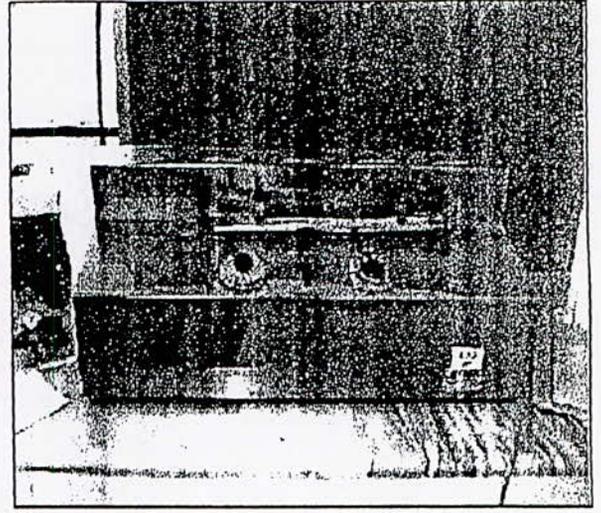
**Malaxage de grave bitume
et béton bitumé.**



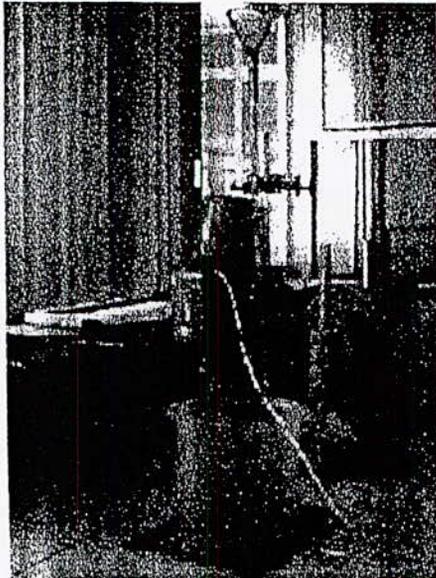
Démoulage



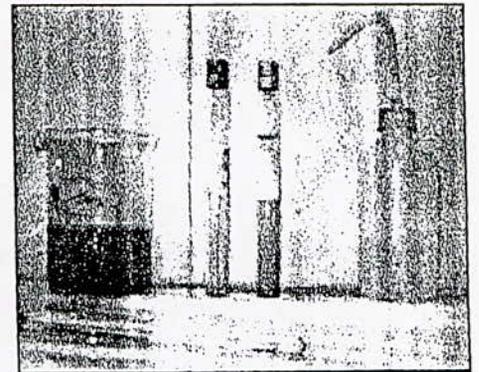
bassin des éprouvette en immersion.



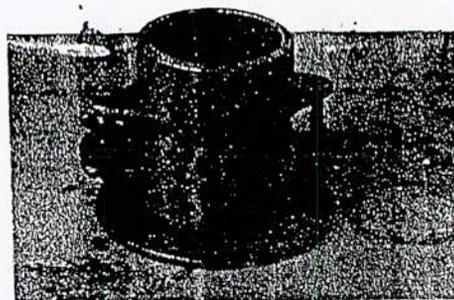
vibration automatique



Essai bleu méthylène



Tubes d'essais



Moule de l'essai MARSHALL

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Technique de l'ingénieur, traité Environnement C9, A8660, .
- [2] **MICHEL.M.** " Valorisations des déchets et des sous-produits industriels ", Ed, Massion, Paris, (1981).
- [3] Technique de l'ingénieur, traité généralités et construction C9, A8660, C4260.
- [4] **DRIRE Nord - Pas-de-Calais** — IRE 2003 — déchet- "L'industrie au regard de l'environnement".
- [5] **O. SOFIANE** et **S. ABDERRZAK.** Séminaire sur "la gestion intégrée des déchets solides".
- [6] **BOUCHELAGHEM A.** Stabilisation et solidification des déchets industriels spéciaux. Technique, Science et Méthode. n°4, 1994.
- [7] **CHERIFI TOUFIK** "Contribution a l'étude de traitement et de la valorisation en génie civil d'un déchet pétrolier".
- [8] **HADDI, A** "Traitement de déchet par liant hydraulique et hydrocarboné". Projet de Fin d'Etudes. Département de Génie Civil. E.N.P. Juin 2002.
- [9] **Norme Française** " Granulats. Equivalent de sable", AFNOR, Paris, septembre 1998.
- [10] **OLARD.F**"comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures, relation entre des liants et des enrobés"(2003).
- [11] **DI BENEDETO.H** "Modélisation : écart entre état de connaissances et d'applications" Journée LAVOC, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, (1998).
- [12] **CHRISTELLE SING-TENIERE** "Etude des procédés de stabilisation/solidification (des déchets solides poreux) à base de liants hydrauliques ou de liants bitumineux".
- [13] **ALIN.DAMIEN** "Guide de traitement des déchets" Dunod, Paris, 2002, 2004 ISBN21000074857.
- [14] **APICHAT .IMYIM** "Thèse en Sciences et Techniques du déchet" / 2000 Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [15] **Akli.A** " Intégration des préoccupation environnementales dans le développement industriel " .La revue de L'environnement symbiose.N°8, Jan-Fév, pp 15-18, (2000).
- [16] **JESSE.R CONNER.R** et **STEVE.L.HOEFFER.** "The history of stabilisation/solidification technology ", critical reviews in environmental science and technology, pp 325-396. (1998).

[17] **JESSE R.CONNER** et **STEVE.L.HOEFFNER**. "A critical review of stabilisation/solidification technology ", critical reviews in environmental science and technology, pp 397-462, (1998).

[18] **LEFEBVRE.G** " Notions des chimie des hydrocarbures ", Ed, Technique, Paris, (1986).

[19] Technique de l'ingénieur, traité généralités et construction C9, A8660, C 12.60.

[20] **POULENC.R** " Manuel a l'usage des industriels ", Ed, AFNOR, ouvrage collectif rédigé sous la direction de Serge Lamert, juin (1995).

[21] **Daniel Tyteca**, «On the measurement of environmental performance in firms - Literature review and productive efficiency approach", Resources for the future, Washington, DC, 1994.

[22] **D. Gaujous**, La pollution des milieux aquatiques, Paris : Technique & Documentation, 1993.

[23] **AGENCE FRANÇAISE DE NORMALISATION**. " Liants hydrauliques, définition, classification et spécification des ciments". *Normalisation Française*. Paris : AFNOR, 1994.

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

[25] **Marot.F**. "Caractérisation et traitement de sédiment de dragage contenant des polluants métalliques". (Edition du BRGM. 1998).

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

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

[28] Site internet, <http://corail.sudoc.abes.fr/>.

[29] Catalogue sur les constituants d'enrobé (fiche de CTPP)