

6/02

REPUBLIQUE ALGERIEENE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCH SCIENTIFIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
 BIBLIOTHEQUE — المكتبة
 Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Génie Civil
Laboratoire de Construction et Environnement

PROJET DE FIN D'ETUDE

Présenté par : M^R HADDI Amine
5^{ème} année Génie- Civil
Rapporteur : M^R R.BOUTEMEUR
Chargé de cours ENP

THEME

TRAITEMENT DE DECHET PAR LIANT
 HYDRAULIQUE ET HYDROCARBONE

Soutenu Juin 2002

Ecole Nationale Polytechnique
ENP 10, Avenue Hassen Badi ,EL HARRACH, Alger

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	8
CHAPITRE 1 : Généralités sur la stabilisation / solidification de déchets par des liants hydrauliques ou bitumineux	
1.1 INTRODUCTION.....	11
1.2 CADRE LEGAL ET REGLEMENTAIRE DE LA STABILISATION/ SOLIDIFICATION DES DECHETS.....	11
1.2.1 DECHETS A STABILISER/SOLIDIFIER.....	12
1.2.2 OBJECTIFS DE LA STABILISATION/SOLIDIFICATION DES DECHETS.....	12
1.2.3 CARACTERISATION DES DECHETS STABILISES/SOLIDIFIES.....	13
1.2.3.1 Tests réglementaires.....	14
1.2.3.2 Etude approfondie.....	14
1.2.4 CONCLUSION.....	14
1.3 STABILISATION/SOLIDIFICATION PAR DES LIANTS HYDRAULIQUES.....	14
1.3.1 LIANTS HYDRAULIQUES.....	15
1.3.1.1 Origine des ciments.....	15
1.3.2 BETONS.....	15
1.3.2.1 Fabrication.....	15
1.3.2.1.1 Recherche de la composition et du dosage.....	15
1.3.2.1.2 Mélange et mise en œuvre.....	16
1.3.2.2 Propriétés des bétons.....	17
1.3.3 DECHETS STABILISES/SOLIDIFIES PAR DES LIANTS HYDRAULIQUES.....	18
1.3.3.1 Traitement de stabilisation/solidification.....	18

1.3.3.2	Caractérisation des déchets stabilisés/solidifiés.....	18
1.3.4	CONCLUSION.....	18
1.4	PROCEDES DE STABILISATION/SOLIDIFICATION PAR DES LIANTS BITUMINEUX.....	18
1.4.1	LIANTS BITUMINEUX.....	19
1.4.1.1	Origine et composition.....	19
1.4.1.2	Propriétés.....	20
1.4.1.2.1	Propriétés physiques et rhéologiques.....	20
1.4.1.2.2	Réactivité et vieillissement.....	20
1.4.2	ENROBES BITUMINEUX.....	20
1.4.2.1	Fabrication.....	21
1.4.2.2	Caractéristiques.....	21
1.4.2.2.1	Liaison bitume – agrégat.....	21
1.4.2.2.2	Structure des enrobés bitumineux.....	21
1.4.2.2.3	Influence de l'eau sur les caractéristiques des enrobés bitumineux.....	22
1.4.3	DECHETS STABILISES/SOLIDIFIES PAR DES LIANTS BITUMINEUX.....	22
1.4.3.1	Traitement de stabilisation/solidification.....	22
1.4.3.2	Caractérisation des déchets stabilisés/solidifiés.....	22
1.4.4	CONCLUSION.....	22
1.5	CONCLUSION.....	23
CHAPITRE 2 : Caractérisation du déchet et des matériaux utilisés		
2.1	ECHANTILLONAGE.....	25

2.1.1 LES DEUX STADES DE L'ECHANTILLONNAGE.....	25
2.1.2 ECHANTILLONNAGE EN LABORATOIRE.....	25
2.2 CARACTERISTIQUE DES BOUES.....	25
2.2.1 DANGER PROVENANT DES BOUES.....	25
2.2.2 TRAITEMENT PRELIMINAIRE DE LA BOUE POUR EXTRAIRE LE LIQUIDE EN EXCES.....	26
2.2.3 TRAITEMENT DES BOUES POUR REDUIR LEUR TOXICITE.....	27
2.3 GRANULOMETRIE DE LA BOUE.....	27
2.4 SPECTRE DE DIFFRACTION DES RAYONS X DE LA BOUE.....	29
2.5 LES MATERIAUX UTILISES.....	30
2.5.1 ANALYSE GRANULOMETRIQUE.....	30
2.5.2 COEFFICIENT D'APLATISSEMENT.....	34
2.5.3 L'ESSAI D'ABRASION (LOS ANGELES).....	35
2.5.4 ESSAI D'USURE MICRO - DEVAL.....	35
2.5.5 ESSAI DE PROPETE DES GRAVIERS.....	36
2.5.6 MODULE DE FINESSE.....	36
2.5.7 EQUIVALENT DE SABLE.....	37
2.5.8 VALEUR AU BLEU.....	38
2.5.9 POIDS SPECIFIQUES AU PYCNOMETRE.....	39
2.6 CIMENT UTILISE.....	39
2.7 BITUME UTILISE.....	40
2.7.1 CLASSIFICATION ET UTILISATION DES BITUMES.....	40
2.7.2 BITUMES POUR TRAVEAU ROUTIER.....	40
2.8 CONCLUSION.....	41

Chapitre 3 : Traitement du déchet par liant hydraulique

3.1 METHODE DE FAURY.....	43
3.1.1 PARTICULARITE DE LA METHODE DE FAURY.....	43
3.1.2 COURBE OPTIMALE.....	43
3.2 APPLICATION DE LA METHODE DE FAURY POUR LES MATERIAUX CHOISIS... 43	
3.2.1 DETERMINATION DES DIFFERENTS COEFFICIENTS.....	43
3.2.1.1 Coefficient A.....	44
3.2.1.2 Valeur de D.....	44
3.2.1.3 Calcul de $B/(R/1.25D - 0.75)$	44
3.2.1.3 Calcul de $Y_{D/2}$	44
3.2.2 DETERMINATION DES POURCENTAGES DES AGREGATS.....	46
3.2.3 CALCUL DE LA DENSITE THEORIQUE.....	46
3.3 FABRICATION DES EPROUVETTES.....	46
3.3.1 INCORPORATION DU DECHET.....	47
3.4 ESSAIS SUR BETON FRAIS ET DURCI.....	47
3.4.1 CONSISTANCE DU BETON.....	47
3.4.2 ESSAI DE TRACTION PAR FLEXION.....	48
3.4.3 ESSAI DE COMPRESSION.....	49
3.5 CONCLUSION.....	50

Chapitre 4 : Traitement du déchet par liant bitumineux

4.1 METHODE DE FORMULATION DES ENROBES BITUMINEUX.....	53
4.1.1 COMPOSITION GRANULOMETRIQUE.....	53

4.1.2 TENEUR EN BITUME.....	56
4.2 ESSAI SUR ENROBES BITUMINEUX.....	57
4.2.1 ESSAI MARSHALL.....	57
4.2.1.1 Les critères de l'essai Marshall.....	58
4.2.1.2 Préparation des éprouvettes Marshall.....	58
4.2.1.3 La masse volumique des éprouvettes compactées.....	59
4.2.1.4 Résultats de l'essai Marshall.....	60
4.2.1.5 Tableau comparatif de ce que l'on obtient avec les teneurs optimales et les Critères de la méthode Marshall.....	65
4.2.1.6 Conclusion.....	66
4.2.2 ESSAI DURIEZ.....	66
4.2.2.1 Résultats de l'essai Duriez.....	67
4.2.2.2 Conclusion.....	69
4.3 ESSAI DE LIXIVICATION.....	69
CONCLUSION GENERALE.....	71
ANNEXE 1.....	72
ANNEXE 2.....	74
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	77

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des déchets industriels spéciaux ultimes à stabiliser/solidifier.....	12
Tableau 2 : Critères d'admission des déchets ultimes.....	13
Tableau 3 : Composition élémentaire de la boue.....	26
Tableau 4 : Granulométrie de la boue de stockage.....	28
Tableau 5 : Analyse granulométrique des agrégats.....	74
Tableau 6 : Coefficient d'aplatissement pour la grave 15/25.....	34
Tableau 7 : Coefficient d'aplatissement pour la grave 8/15.....	34
Tableau 8 : Coefficient d'aplatissement pour la grave 3/8.....	35
Tableau 9 : Propreté des graviers.....	36
Tableau 10 : Module de finesse des sables.....	37
Tableau 11 : Pourcentage de fines.....	38
Tableau 12 : Valeur de l'équivalent de sable.....	38
Tableau 13 : Valeur au bleu des différents sables.....	39
Tableau 14 : Poids spécifique au pycnomètre.....	39
Tableau 15 : Composition chimique du ciment CPJ 45.....	39
Tableau 16 : Bitumes routiers purs.....	41
Tableau 17 : Pourcentage des différentes fractions suivant la méthode de FAURY.....	46
Tableau 18 : Valeur de E/C.....	48
Tableau 19 : Résistance à la traction par flexion à 7 jours.....	48
Tableau 20 : Résistance à la compression à 7 jours.....	49
Tableau 21 : Résistance à la compression à 14 jours.....	50
Tableau 22 : Fuseau de spécification.....	53
Tableau 23 : Composition granulométrique à 0 % de boue.....	53
Tableau 24 : Composition granulométrique à 5 % de boue.....	54
Tableau 25 : Composition granulométrique à 10 % de boue.....	54
Tableau 26 : Composition granulométrique à 15 % de boue.....	55
Tableau 27 : Composition granulométrique à 20 % de boue.....	55
Tableau 28 : Pourcentage de liant pour chaque formulation granulométrique.....	56
Tableau 29 : Les critères de l'essai Marshall.....	58
Tableau 30 : Pesés des différents matériaux utilisés dans la confection d'une éprouvette Marshall.....	58
Tableau 31 : Valeurs de la stabilité Marshall et de la compacité.....	60
Tableau 32 : Valeur du fluage selon l'essai Marshall.....	61
Tableau 33 : Conformité des résultats avec les critères Marshall.....	65
Tableau 34 : Pesés des matériaux utilisés dans la confection d'une éprouvette Duriez.....	66
Tableau 35 : Résistance à la compression et compacité selon l'essai Duriez.....	68
Tableau 36 : Détermination de la masse volumique apparente par pesée hydrostatique en utilisant la paraffine.....	69
Tableau 37 : Fluorescence des rayons X du déchet traité solide.....	70
Tableau 38 : composition chimique du lexiviat.....	70

Liste des figures

Figure 1 : Aspect de la boue à l'état brute.....	27
Figure 2 : Particules de fer contenues dans la boue.....	28
Figure 3 : Boue après passage au concasseur.....	28
Figure 4 : Spectre de diffraction des rayons X de la boue.....	29
Figure 5 : Fluorescence des rayons X.....	30
Figure 6 : Courbes granulométriques des différents agrégats disponibles.....	31
Figure 7 : Courbe optimale et pourcentages des différentes fractions.....	45
Figure 8 : Synopsis du procédé de traitement des déchets par un liant hydraulique.....	47
Figure 9 : Résistance à la traction par flexion en fonction du pourcentage de déchet à 7 jours....	49
Figure 10 : Résistance à la compression à 7 et 14 jours.....	50
Figure 11 : Mise en place des éprouvettes Marshall.....	59
Figure 12 : Stabilité Marshall.....	61
Figure 13 : Résumé des résultats obtenus pour la stabilité Marshall.....	63
Figure 14 : Fluage.....	64
Figure 15 : Mise en place des éprouvettes Duriez.....	67

INTRODUCTION GENERALE

L'évolution des modes de production et de consommation a créé de nombreux problèmes de pollution qui menacent l'équilibre écologique de la planète. Devant ce fléau l'humanité a pris conscience de la nécessité de protéger son environnement, en préservant l'eau, l'air et le sol. Suivant cette politique les industriels sont contraints de gérer et de traiter tous types de déchets, selon leurs degrés de nocivité, en application des lois en vigueur.

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

Du point de vue de l'évaluation environnementale, il existe une hiérarchisation de ces stratégies, qui se traduit par une distinction entre les déchets. L'expression « déchet ultime » a ainsi été créée pour désigner les déchets inévitables dans la limite des solutions de traitement techniquement et économiquement acceptables. Les déchets ultimes massifs et stables, dont les éléments sont présents sous une forme peu ou pas toxique ou encore sous une forme difficilement mobilisable, sont stockés en l'état dans des centres réservés à cet effet (Centre de Stockage des Déchets Ultimes). Les déchets ne présentant pas initialement les caractères de massivité et de stabilité doivent subir un traitement dit de stabilisation/solidification, requérant généralement l'emploi de matériaux liants.

Il existe plusieurs grandes catégories de liants rassemblant chacune une vaste gamme de produits, présentant des propriétés spécifiques. L'efficacité d'un traitement de stabilisation/solidification est déterminée par l'adéquation entre les propriétés du liant et les caractéristiques du déchet considéré. Le choix du liant représente donc une phase préliminaire importante du traitement.

Le but de notre travail est de fournir des éléments d'aide au choix du liant, du traitement de stabilisation/solidification à adopter et de l'éventuelle valorisation du déchet traité.

Notre travail est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique où nous présentons le cadre légal et réglementaire de la stabilisation/solidification des déchets, et les deux traitements de stabilisation/solidification utilisant respectivement un liant hydraulique, et un liant hydrocarboné. Nous précisons également leurs technologies.

En deuxième chapitre, nous caractériserons notre déchet qui est une boue de bac de stockage, et les différents constituants rentrant dans les différentes formulations de béton hydraulique et d'enrobés bitumineux.

Dans le troisième et quatrième chapitre, nous aborderons respectivement le traitement par liant hydraulique et liant hydrocarboné, nous préciserons les formulations utilisées, les types d'essais effectués sur béton (frais et durci) et enrobés bitumineux, nous interpréterons les résultats obtenus et nous jugerons l'efficacité des traitements du point de vue résistance (solidité) et stabilité du déchet traité pour ensuite envisager une éventuelle valorisation.

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

Chapitre 1 :

Généralités sur la stabilisation / solidification de déchets par des liants hydrauliques ou bitumineux

1.1 INTRODUCTION

Nous allons nous intéresser au cadre législatif et réglementaire de la stabilisation/solidification de déchets. Il s'agira de porter notre regard sur les deux types de traitement de stabilisation/solidification appliqués, utilisant respectivement des liants hydrauliques ou bitumineux. Nous précisons leur technologie et leurs propriétés.

1.2 CADRE LEGAL ET REGLEMENTAIRE DE LA STABILISATION/ SOLIDIFICATION DES DECHETS

Le déchet est défini comme « Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance ,matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon » (loi du 15 juillet 1975)

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

Néanmoins, il existe toujours une fraction de déchet, éventuellement toxique, appelé déchet ultime. La loi du 15 juillet 1975 modifiée le 13 juillet 1992 a introduit la notion de « déchet ultime » : « Est ultime un déchet résultant, ou non, du traitement des déchets qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux . » Plus récemment, la loi du 13 juillet 1995 précise : « A compter du 1^{er} juillet 2002, les installations d'élimination des déchet par stockage ne seront autorisées à accueillir que des déchets ultimes. » On peut alors conclure que des déchet ultimes seuls pourraient être acceptés en centre de stockage .

En Algérie, il existe un certain nombre de lois et de décrets relatifs à la protection de l'environnement, dont la plus récente est la loi N° 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.

Au sens de la présente loi on entend par déchet:

« 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 ».

Dans ce qui suit, les déchets à stabiliser/solidifier sont définis avant de présenter les objectifs de leur traitement de stabilisation/solidification. Les différents niveaux de caractérisation des déchets et de leur traitement sont ensuite abordés.

1.2.1 DECHETS A STABILISER/SOLIDIFIER

Les déchets ultimes à stabiliser/solidifier sont classés par la législation en deux catégories (tableau 1). Les catégories A et B regroupent des déchets ultimes pour lesquels la stabilité constitue un critère d'acceptabilité en centre de stockage.

Tableau 1 : Liste des déchets industriels spéciaux ultimes à stabiliser/solidifier

Déchets de la catégorie A	<ul style="list-style-type: none">. Résidus de l'incinération (suies, cendres, déchets de l'épuration des fumées) ;. Résidus de la métallurgie (poussières, scories et crasses de seconde fusion, boues d'usinage) ;. Résidus de forage (suite à l'emploi de fluides de forage à base d'hydrocarbures) ;. Déchets minéraux de traitement chimique (oxydes et sels métalliques, sels minéraux et catalyseurs usés).
Déchets de la catégorie B	<ul style="list-style-type: none">. Résidus de traitement d'effluents et d'eaux industriels, de déchets ou de sols pollués (boues et résidus d'épuration d'effluents, résidus de traitement de sols pollués, résines échangeuses d'ions) ;. Résidus de l'incinération (mâchefers) ;. Résidus de peinture ;. Résidus de la métallurgie (scories, crasses, sables de fonderie) ;. Résidus d'amiante ;. Réfractaires et autres matériaux minéraux usés ;. Résidus de recyclage d'accumulateurs et de batteries.

1.2.2 OBJECTIFS DE LA STABILISATION/SOLIDIFICATION DES DECHETS

La législation fixe comme suit les critères d'admission des déchets ultimes en centre de stockage:
« Les déchets admissibles (...) sont essentiellement solides, minéraux, avec un potentiel polluant constitué de métaux lourds peu mobilisables. Ils sont très peu réactifs, très peu évolutifs, très peu solubles. De plus, ces déchets doivent être stabilisés à court terme. Un déchet est considéré comme stabilisé quand sa perméabilité à l'eau et sa fraction lixiviable ont été réduites et quand sa tenue mécanique a été améliorée de façon que ses caractéristiques satisfassent aux critères d'acceptation des déchets stabilisés fixés (...). »

Tableau 2 : Critères d'admission des déchets ultimes

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

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

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

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

Un matériau liant est utilisé pour atteindre les objectifs de stabilisation/solidification.

La matrice liante permet, outre la solidification, la réduction de la surface de contact entre le déchet et l'environnement. Elle agit ainsi comme élément de stabilisation du déchet dans la mesure où, en réduisant l'interface déchet – environnement, elle réduit la mobilité de ses contaminants.

Cependant le terme de stabilisation est plus souvent retenu pour les matrices qui interagissent chimiquement avec le déchet en immobilisant les polluants .

1.2.3 CARACTERISATION DES DECHETS STABILISES/SOLIDIFIES

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

1.2.3.1 TESTS REGLEMENTAIRES

Pour la plupart des déchets, le caractère toxique ou nuisible est lié à la composition chimique. Le traitement de stabilisation/solidification est destiné à mettre une barrière entre ces éléments toxiques et l'environnement. Les tests réglementaires visent alors à vérifier l'efficacité de cette barrière. Le principal agent susceptible de véhiculer les éléments toxiques du déchet traité vers l'environnement, autrement dit d'éprouver la barrière, est l'eau. La plupart des tests réglementaires consiste donc en la mesure d'une fraction lixiviable dans des conditions arbitraires de contact eau - déchet stabilisé/solidifié .

La durabilité de l'état physique solide massif du déchet traité est vérifiée pour éviter une désagrégation ultérieure importante et, par conséquent, une augmentation de la lixiviation des polluants au contact de l'eau. Un test de lixiviation est également effectué pour comparer les valeurs des fractions relarguées aux valeurs - seuils fixées par les textes législatifs (voir tableau 2). La procédure réglementaire est détaillée en annexe 1.

1.2.3.2 ETUDE APPROFONDIE

Il s'agit de :

- étudier les propriétés physiques et mécaniques du déchet traité ;
- déterminer les phénomènes de fixation des polluants et
- comprendre les mécanismes de leur relargage.

Selon les objectifs, les tests réalisés sont extrêmement divers.

Les mesures de la résistance mécanique, en compression ou en traction, du fluage, du module d'élasticité, de la ductilité, de la densité, de la tortuosité, de la perméabilité, de la porosité déterminent les caractéristiques physiques et mécaniques du déchet traité.

La diffraction des rayons X, la microscopie, optique ou électronique, la spectrométrie infrarouge, la spectroscopie de photo électrons permettent d'étudier les phénomènes de fixation des polluants.

1.2.4 CONCLUSION

La législation fixe les catégories de déchets ultimes concernées par l'élimination. Elle définit aussi les critères d'admissibilité en centre de stockage. Les caractéristiques des déchets déterminées par des tests réglementaires sont comparés à ces critères. En deçà des performances exigées, le déchet doit subir un traitement dit de stabilisation/solidification visant à le rendre massif et stable chimiquement. Au-delà de l'aspect strictement réglementaire, les procédés de ce type de traitement font l'objet d'une étude approfondie des phénomènes mis en jeu.

1.3 STABILISATION/SOLIDIFICATION PAR DES LIANTS HYDRAULIQUES

En premier lieu sont décrites l'origine et les propriétés des liants hydrauliques. Les méthodes de fabrication et les propriétés des bétons utilisant ces liants sont exposées ensuite.

L'ensemble de ces informations permet alors d'aborder les procédés de stabilisation/solidification par liant hydraulique calqués sur la fabrication des bétons. Nous présentons le domaine d'applicabilité, la technologie et les propriétés de ces procédés.

1.3.1 LIANTS HYDRAULIQUES

Il s'agit de poudres constituées de sels minéraux anhydres instables. En présence d'eau, ils s'hydratent, forment une pâte qui fait prise et qui durcit progressivement. Au sens strict du terme, les liants hydrauliques sont les ciments et la chaux. Les matériaux pouzzolaniques (cendres volantes, scories, ciment au laitier ...) sont souvent utilisés en tant qu'additifs à ces liants. Notre intérêt dans ce travail de recherche se focalise sur les ciments.

1.3.1.1 ORIGINE DES CIMENTS

Le terme générique ciment désigne en fait différentes catégories de produits. Une catégorie est définie par sa composition et des classes caractérisant les résistances mécaniques atteintes à des échéances données.

Le ciment dit Portland, du fait de l'analogie de sa composition avec celle de la pierre de Portland, est le plus courant. Il est constitué principalement de clinker, résultant de la cuisson jusqu'à fusion partielle (vers 1450°C) puis du broyage d'un mélange de roches calcaires et argileuses.

1.3.2 BETONS

Le ciment hydraté, éventuellement additionné de sable pour former un mortier, lie des pierres concassées, ou granulats, pour former un béton. Des adjuvants complètent souvent cette composition et permettent de modifier les propriétés du matériau obtenu.

1.3.2.1 FABRICATION

Elle comprend deux phases : la recherche de la composition et du dosage, le mélange et la mise en œuvre.

1.3.2.1.1 Recherche de la composition et du dosage

L'étude de la formulation d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un matériau dont les qualités soient celles recherchées.

Les méthodes proposées en ce qui concerne les bétons de construction sont nombreuses et reposent sur des dosages volumétriques ou pondéraux. Il existe des désaccords à propos des paramètres à prendre en compte et de leur appréciation. Ainsi par exemple les partisans de la granularité continue pour l'ensemble des constituants solides entrant dans la composition d'un béton s'opposent à ceux de la granularité discontinue, la courbe granulométrique présentant un palier. La diversité des méthodes et des paramètres à choisir a pour conséquence, de faire varier à l'infini les compositions utilisées.

Les résultats obtenus alimentent le cadre de réflexion mais ne permettent pas d'établir une théorie du béton qui réunirait, en un ensemble d'équations de comportement, les phénomènes physiques, chimiques, mécaniques et leurs couplages.

Par pragmatisme, dans les cas courants de fabrication de béton de construction, une méthode simple et pratique tenant compte de l'expérience acquise par les opérateurs est retenue.

Cette recherche pratique vise à atteindre conjointement les deux qualités essentielles d'un béton: l'ouvrabilité et la résistance.

L'ouvrabilité caractérise la possibilité d'ouvrer, de mettre en œuvre, de façonner, il s'agit d'une propriété du béton frais. La recherche de cette qualité conduit à augmenter la plasticité et l'écoulement au sein du mélange frais.

La résistance, propriété du béton durci, caractérise l'aptitude à s'opposer à une contrainte.

La recherche de la résistance conduit à augmenter la compacité du mélange.

Chacun des constituants du béton influe différemment sur ces deux qualités.

L'ouvrabilité est influencée:

- par le ciment en tant que fines de remplissage;
- par l'eau, élément plastique de mouillage des constituants solides et de remplissage des vides dans le mélange granulaire;
- par les dimensions relatives des granulats et
- éventuellement par les adjuvants retardateur ou accélérateur de prise ou les plastifiants réducteurs d'eau.

La résistance, par contre, est fonction :

- du ciment en tant que liant hydraulique;
- de l'eau d'hydratation permettant au ciment d'assurer son rôle de liant;
- des granulats en tant que squelette plus ou moins compact du béton et
- éventuellement des adjuvants entraîneurs d'air.

La recherche simultanée des deux qualités pose un problème dans la mesure où elles varient en sens inverse pour la plupart des facteurs cités précédemment. La solution réside dans un compromis.

Illustrons la nécessité de ce compromis pour ce qui concerne le dosage en eau d'un béton.

L'eau apportée au mélange est répartie en eau combinée (hydratation du ciment), eau adsorbée (mouillage des grains de ciment et des granulats) et eau libre (remplissage des interstices et plasticité du mélange). Lorsque le béton prend puis durcit, l'eau de mouillage et l'eau libre se « retirent », s'évaporent laissant un réseau poreux au sein de la matrice ciment. Ainsi pour un béton, à quantité et qualité de granulats et ciment données, une augmentation de la quantité d'eau permettant d'améliorer la plasticité, donc l'ouvrabilité du mélange, entraîne une diminution de la résistance par augmentation de la porosité. Le dosage en eau doit finalement assurer l'hydratation nécessaire du ciment et un mouillage suffisant des granulats.

1.3.2.1.2 Mélange et mise en œuvre

La détermination de la composition et du dosage d'un béton correspond à un travail de laboratoire. Il faut ensuite fabriquer le béton en respectant cette composition. Le processus de fabrication se résume comme suit :

- . stockage des constituants pour préserver leurs propriétés ;
- . dosage ;
- . mélange en respectant les règles de remplissage et le temps de malaxage.

L'ordre d'introduction des constituants ne fait pas l'unanimité, il est recommandé de le choisir en fonction de l'homogénéité et de la facilité d'entretien du matériel recherchées. La solution

généralement proposée consiste à introduire les gros granulats puis le ciment puis les granulats fins, en assurant un apport d'eau continu;

. transport du béton frais de l'engin malaxeur au lieu d'utilisation en évitant la dessiccation et la ségrégation ;

. mise en place pour obtenir une compacité maximale en évitant la ségrégation et la dessiccation, on parle aussi de coulée du béton. La vibration semble le moyen le plus courant pour donner au béton sa compacité maximale par élimination des vides d'air et parfait remplissage des moules.

1.3.2.2 PROPRIETES DES BETONS

Nous nous intéressons dans cette étude plus particulièrement aux propriétés du béton durci. Sa qualité essentielle réside dans sa résistance mécanique. Elle dépend de nombreux paramètres. Nous focalisons sur l'impact du rapport eau/ciment (E/C), l'influence du temps et le rôle de la liaison matrice ciment - granulat.

. L'influence du rapport E/C :

Pour des granulats donnés, la résistance d'un béton est une fonction croissante de la résistance de sa matrice ciment . Or cette matrice ciment est d'autant plus résistante et durable que sa porosité est faible. Celle-ci a pour origine les volumes d'air emprisonnés lors de la mise en place et les volumes d'eau (seule la fraction de l'eau introduite intégrée dans les hydrates est pérenne dans la structure du béton durci). Si on suppose que la mise en place est effectuée dans les meilleures conditions possibles, la réduction de la porosité signifie une minimisation de la quantité d'eau introduite dans le mélange. Ce raisonnement est toutefois sommaire. Expérimentalement, on montre qu'il existe un rapport E/C optimal, qui dépend non seulement des conditions de mise en œuvre mais aussi de la composition du squelette granulaire et de la richesse en ciment du mélange, pour lequel la porosité de la matrice est minimale donc la résistance du béton maximale.

. L'influence du temps :

Dans les premières heures qui suivent la fabrication du béton, la matrice ciment se raidit rapidement, il s'agit du phénomène de prise. La progression de l'hydratation avec le temps entraîne la multiplication et la croissance des hydrates. La surface spécifique des cristaux augmente, ainsi que les contacts entre grains de ciment. Les capillaires sont progressivement envahis ,leur volume diminue, la porosité décroît. Il en résulte une augmentation progressive de la résistance mécanique : le béton durcit .

. La liaison matrice ciment - granulat :

Pour déterminer les performances mécaniques d'un béton, il est aisément imaginable de s'attacher aux propriétés de résistance de sa matrice ciment et à la compacité des granulats entrant dans sa composition. Pourtant, malgré la qualité de dureté du silex bien supérieure à celle du calcaire, un béton de gravier calcaire peut s'avérer plus résistant que son homologue de gravier siliceux. En effet, une part importante de la résistance d'un béton est fonction de la plus ou moins bonne adhérence de la matrice ciment sur la surface des granulats .

Les premières recherches sur la liaison matrice ciment - granulat montraient l'effet de la nature des composés à cette interface et l'intimité de leur liaison sur la résistance mécanique des bétons. Par la suite, deux catégories de systèmes d'étude ont été distinguées : les bétons de granulats non poreux et les bétons de granulats poreux.

L'interface matrice ciment - granulats non poreux est constituée de deux couches de cristaux dont une poreuse, de faible cohésion avec une orientation préférentielle des cristaux qui constitue un point faible si le béton est soumis à des actions mécaniques. L'interface matrice ciment - granulats poreux ne présente ni zone de moindre cohésion, ni orientation préférentielle des cristaux .

1.3.3 DECHETS STABILISES/SOLIDIFIES PAR DES LIANTS HYDRAULIQUES

1.3.3.1 TRAITEMENT DE STABILISATION/SOLIDIFICATION

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 déchets à stabiliser/solidifier, pour lesquels les procédés de stabilisation/solidification utilisant des liants hydrauliques ont été pratiqués, comptent des cendres volantes, des résidus d'incinération d'ordures ménagères, des boues d'épuration d'effluents, des déchets solides ou des boues contenant des métaux lourds, des déchets minéraux de l'industrie chimique, des sols contaminés. De nombreuses études concernent la stabilisation/solidification de «déchets synthétiques», contenant essentiellement des métaux lourds .

1.3.3.2 CARACTERISATION DES DECHETS STABILISES/SOLIDIFIES

Les déchets stabilisés/solidifiés à caractériser sont analogues à des bétons « classiques » si le déchet initial est granulaire .

La caractérisation, au sens réglementaire, de ces matériaux s'effectue comme précisée dans le paragraphe 1.2.3. et dans l'annexe 1.

1.3.4 CONCLUSION

La stabilisation/solidification d'un déchet à l'aide d'un liant hydraulique consiste à fabriquer un matériau analogue à un béton hydraulique dans lequel des déchets se substituent aux granulats. Ce matériau est résistant; la matrice liante est caractérisée par une forte concentration en éléments alcalins et un pH élevé.

La caractérisation du déchet traité consiste à évaluer la résistance mécanique du matériau et sa résistance à l'action de l'eau notamment la solubilisation des polluants en fonction du contexte physico-chimique.

1.4 PROCEDES DE STABILISATION/SOLIDIFICATION PAR DES LIANTS BITUMINEUX

Ce paragraphe est articulé comme le précédent dans la mesure où on peut effectuer les transpositions suivantes :

Liants hydrauliques —————> Liants bitumineux ;

Bétons hydrauliques —————> Enrobés bitumineux.

Nous décrivons d'abord l'origine et les propriétés des liants bitumineux. Nous exposons la fabrication et les propriétés des enrobés formés par ces liants. Enfin, nous présentons le domaine d'applicabilité, la technologie et les propriétés des procédés de stabilisation/solidification des déchets ultimes utilisant des liants bitumineux.

1.4.1 LIANTS BITUMINEUX

Les liants bitumineux se présentent sous la forme de corps visqueux, plus ou moins viscoélastiques, dont la couleur varie du brun au noir. Ils contiennent essentiellement des éléments hydrocarbonés. Les liants bitumineux proviennent de gisements naturels ou de résidus de la distillation du pétrole. Dans cette étude, nous ne ferons référence qu'aux bitumes issus du pétrole.

1.4.1.1 ORIGINE ET COMPOSITION

Le pétrole brut est traité en raffinerie par distillation fractionnée pour en extraire des produits allant des fractions légères, les combustibles et carburants, aux éléments lourds, les fuels et bitumes. Il existe plusieurs procédés de fabrication des bitumes à partir des pétroles bruts. Les bitumes les plus courants comptent les bitumes de distillation et les bitumes soufflés ou oxydés.

. Les bitumes de distillation :

Ils sont issus directement de la distillation atmosphérique du pétrole brut ou, selon les bruts utilisés et les caractéristiques souhaitées du bitume, d'une distillation sous vide qui suit la distillation atmosphérique.

. Les bitumes soufflés ou oxydés :

Ils sont obtenus par oxydation d'une charge composée de distillats et de produits lourds issus de la distillation sous vide. L'oxydation résulte d'un soufflage d'air à contre-courant de la charge bitumineuse.

Il existe également des bitumes fluidifiés (par addition de solvants) et des bitumes fluxés (mélange de bitume avec des huiles de houille et des dérivés pétroliers).

Les différents procédés de fabrication, dont nous n'avons fait qu'une très sommaire présentation, permettent d'obtenir une gamme variée de produits tous désignés par l'appellation bitume. Le terme bitume recèle une complexité plus grande que celle liée au mode de fabrication, l'analyse même de la composition des produits ainsi désignés en révèle l'ampleur.

Compte tenu de cette diversité, il n'est pas réaliste de vouloir déterminer la composition exacte des bitumes. Par contre, des méthodes de séparations successives ont permis de regrouper les molécules en différentes familles, auxquelles les propriétés rhéologiques des bitumes ont été reliées. Les bitumes sont ainsi fractionnés en asphaltènes, résines, huiles, carboïdes et carbènes. Les deux derniers composés, présents en très faible quantité, sont définis par leur propriété d'insolubilité dans les premiers solvants de l'opération de séparation.

Ils peuvent être considérés comme des asphaltènes hautement polymérisés de masse moléculaire très élevée. Ensuite sont obtenus les asphaltènes puis les maltènes, séparés en huiles puis résines. Leurs proportions respectives dépendent du procédé de séparation (il n'y a pas réellement de discontinuité entre les maltènes et les asphaltènes car le fractionnement dépend des solvants

utilisés), de l'origine du brut et du procédé de fabrication (par exemple pour un bitume 80/100: asphaltènes 11%, huiles 55%, résines 34%).

1.4.1.2 PROPRIETES

Nous venons de définir les bitumes comme des substances colloïdales hydrocarbonées. Cette nature leur confère des propriétés physiques et rhéologiques et une réactivité particulières. Sans entrer dans le détail des variétés innombrables de bitumes, nous présentons de manière générale les propriétés des bitumes qui ont une influence sur les applications pratiques, et leur sensibilité vis-à-vis d'environnements donnés.

1.4.1.2.1 Propriétés physiques et rhéologiques

Les bitumes sont décrits comme des matériaux viscoélastiques qui présentent un fort pouvoir d'adhérence et une bonne imperméabilité.

Des méthodes de référence donnent une appréciation des propriétés physiques et rhéologiques présentées, à l'exclusion de la perméabilité et de l'absorption d'eau. Les caractéristiques correspondantes sont utilisées pour distinguer les nombreuses variétés de bitume.

Les spécifications officielles classent ainsi les bitumes en différentes catégories. Les caractéristiques et méthodes de référence comptent le point de ramollissement bille et anneau, la pénétrabilité à l'aiguille, la densité relative à 25°C, le point d'éclair, la teneur en paraffines, le point de fragilité FRAASS et le durcissement au RTFOT

1.4.1.2.2 Réactivité et vieillissement

D'une façon générale, le bitume fait preuve d'une grande inertie chimique. Toutefois, dans des conditions particulières, il peut réagir avec certains corps. L'action de ceux-ci modifie l'équilibre colloïdal du bitume, et donc ses propriétés. L'expression « vieillissement du bitume » est utilisée pour décrire ces phénomènes.

1.4.2 ENROBES BITUMINEUX

Le mélange de liant bitumineux à une charge minérale engendre des enrobés bitumineux correspondant à différents matériaux selon les proportions employées. Ainsi l'asphalte synthétique, agrégats enrobés à 40-50% en poids de ciment asphaltique (mélange bitume - filler), est distingué du béton bitumineux, agrégats enrobés à 10% de ciment asphaltique. Ces deux matériaux présentent des propriétés différentes dues, par exemple, à des variations importantes des distance entre les granulats, de la surface d'enrobage, du volume de vides .

Nous exposons sommairement dans un cas général la méthode de fabrication des enrobés bitumineux.

Nous décrivons ensuite leurs caractéristiques et notamment la liaison bitume – agrégat permettant d'expliquer leurs propriétés physiques et rhéologiques.

1.4.2.1 FABRICATION

A l'instar des bétons hydrauliques, la fabrication des enrobés bitumineux se déroule selon les étapes suivantes.

- stockage des constituants pour préserver leurs propriétés;
- dosage;
- chauffage du bitume pour atteindre sa température d'application dans un malaxeur ou un pétrin calorifugé et éventuellement séchage des agrégats dans un sécheur;
- mélange du bitume chaud et des granulats éventuellement préchauffés et séchés dans le malaxeur ou pétrin, ou coulée du bitume chaud sur les granulats mis en place, ou coulée des granulats sur le bitume chaud répandu, selon l'application (fabrication de chaussée, de matériaux d'étanchéité, ...);
- transport et mise en place ; les enrobés sont surtout fabriqués sur place. Ces deux étapes se résument donc souvent à une coulée de l'enrobé du malaxeur au lieu d'utilisation.

Un enrobé bitumineux « frais » acquiert ses propriétés physiques définitives dès qu'il a refroidi de sa température de fabrication (entre 130 et 230°C) à sa température d'utilisation.

1.4.2.2 CARACTERISTIQUES

Nous examinons les caractéristiques des enrobés bitumineux d'abord à l'échelle de la liaison bitume-agrégat, puis du point de vue de la structure entière. Dans la mesure où notre intérêt se porte sur les capacités d'un tel matériau à résister à l'action de l'eau, nous envisageons finalement son influence sur les propriétés physiques des enrobés.

1.4.2.2.1 Liaison bitume – agrégat

Dans un enrobé bitumineux, le bitume est utilisé pour enduire les granulats dans l'intention d'assurer une étanchéité ou une adhésion de l'ensemble. L'accrochage du liant aux granulats doit donc être aussi intense que possible. L'adhésion du bitume à un granulat est d'autant plus importante que le bitume le mouille parfaitement.

1.4.2.2.2 Structure des enrobés bitumineux

Les qualités d'adhésion et d'étanchéité au sein de l'enrobé bitumineux résulte du concours des propriétés de l'interface de chaque granulat avec le bitume mais aussi des caractéristiques de la structure de l'enrobé pris dans son ensemble. Ainsi, le bitume est généralement bien fixé et retenu par les agrégats dans des enrobés denses où le bitume a été mélangé aux agrégats secs à température élevée. L'enrobé doit donc idéalement consister en une structure homogène et compacte, dans laquelle les granulats sont fixés dans un continuum de bitume. En pratique, il existe toujours des hétérogénéités dues à la ségrégation, la sédimentation et le gonflement.

1.4.2.2.3 Influence de l'eau sur les caractéristiques des enrobés bitumineux

Le contact de l'eau avec un enrobé a lieu à la surface extérieure de l'enrobé ou en son sein, par :

- Diffusion dans le bitume
- Désenrobage

- Pénétration dans les fissures.

1.4.3 DECHETS SOLIDIFIES/STABILISES PAR DES LIANTS BITUMINEUX

1.4.3.1 TRAITEMENT DE SOLIDIFICATION/STABILISATION

Parmi les liants organiques, les liants bitumineux dont les propriétés permettent de fabriquer des enrobés bitumineux constituent des matrices de choix pour les procédés de stabilisation/solidification. Le traitement consiste alors à réaliser un matériau analogue à un enrobé bitumineux dans lequel les déchets se substituent aux agrégats de manière à respecter la granulométrie du mélange .

La littérature concernant les déchets stabilisés/solidifiés par des liants bitumineux est beaucoup moins abondante que celle consacrée aux déchets stabilisés/solidifiés par des liants hydrauliques. Des études ont été engagées sur les déchets nucléaires notamment ceux de faible et moyenne activité. Hormis cette catégorie particulière de déchets, des résidus d'incinération d'ordures ménagères et des déchets minéraux de l'industrie chimique sont mentionnés comme des déchets ayant été enrobés dans des liants bitumineux.

1.4.3.2 CARACTERISATION DES DECHETS STABILISES/SOLIDIFIES

La caractérisation, au sens réglementaire, de ces matériaux s'effectue comme précisée dans le paragraphe 1.1.3. et dans l'annexe 1. L'évaluation approfondie peut faire appel indifféremment aux techniques et méthodes exposées dans le même paragraphe, selon les objectifs fixés. L'évaluation approfondie des procédés utilisant des liants bitumineux ne fait cependant pas encore l'objet d'une procédure aboutie.

Après avoir pris connaissance du paragraphe 1.4.2.2. sur les caractéristiques des enrobés bitumineux, il est possible d'orienter a priori l'évaluation vers l'influence du choix du bitume, et de la granulométrie des déchets sur les propriétés physiques et mécaniques du déchet stabilisé/solidifié. L'observation de l'interface déchet - liant bitumineux et l'étude de l'interaction entre le déchet et le liant semblent susceptibles de renseigner sur le piégeage des polluants. L'évaluation de leur relargage, dans la mesure où l'eau paraît le vecteur le plus probable, peut consister à étudier la capacité du déchet traité à résister à son action. Les variables de cette étude comptent a priori la nature du bitume et des déchets, leur granulométrie, l'homogénéité du déchet traité et le rapport bitume/déchets. L'évaluation consiste aussi à simuler l'exposition du déchet stabilisé/solidifié à différents contextes environnementaux, par des lixiviations dans des lixiviants de différentes compositions.

1.4.4 CONCLUSION

La stabilisation/solidification d'un déchet à l'aide d'un liant bitumineux consiste à fabriquer un matériau analogue à un enrobé bitumineux dans lequel des déchets se substituent aux agrégats. Ce matériau est viscoélastique, faiblement perméable, la matrice liante est caractérisée par une faible réactivité chimique. La caractérisation du déchet traité se résume à évaluer la résistance mécanique du matériau et sa résistance à l'action de l'eau notamment la solubilisation des polluants en fonction du contexte physico-chimique.

1.5 CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à la présentation générale du procédé employé pour le traitement du déchet. Ainsi nous rappelons comment les bases législatives et réglementaires permettent de définir un déchet à stabiliser/solidifier. Enfin, les liants et les différents traitements de stabilisation / solidification employés sur le déchet à étudier sont définis. Le premier traitement requiert l'emploi de ciment, matériau qui durcit en présence d'eau et forme une matrice solide, poreuse, basique. Le second traitement utilise un bitume, liquide hydrocarboné, visqueux. Le traitement de déchet à base de ciment ou de bitume procède comme la fabrication respectivement d'un béton hydraulique ou d'un enrobé bitumineux dans lequel le déchet se substitue aux granulats.

Les bases bibliographiques étant posées, les chapitres suivants sont consacrés à l'étude expérimentale des caractéristiques du déchet, des matériaux utilisés (agrégats, sables), et des traitements de stabilisation/solidification qui lui sont appliqués, utilisant des liants hydrauliques ou bitumineux.

Caractéristiques du déchet et des matériaux utilisés

Chapitre 2 :

Caractérisation du déchet et des matériaux utilisés .

Nous allons aborder dans ce chapitre en premier lieu les différentes caractéristiques du déchet étudié, puis celles des matériaux utilisés à savoir, les gravier, les gravillons et les sables.

2.1 ECHANTILLONAGE

Les essais que nous ferons en laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux, des « échantillons ». Nous verrons, par exemple, que l'on prend 120g de sable pour un essai Equivalent de sable.

Mais il faut que les résultats obtenus à partir de ces quantités réduites représentent réellement les caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel on a fait le prélèvement. On dit qu'il faut que l'échantillon soit représentatif.

2.1.1 LES DEUX STADES DE L'ECHANTILLONNAGE

Le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps :

- 1- Prélever sur le chantier, à la carrière ou à la station de stockage, une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai proprement dit, quantité qui sera emportée au laboratoire.
- 2- Au laboratoire, prélever dans la quantité reçue la fraction qui correspond à l'essai à faire.

2.1.2 ECHANTILLONNAGE EN LABORATOIRE

Deux procédés de base sont utilisés :

- Par quartage : comme le nom l'indique, on divise l'échantillon en quarts sensiblement égaux, à l'aide d'une truelle, puis on réunit les fractions opposées, on a ainsi la moitié de l'échantillon primitif. Si cette quantité est trop importante, on peut la partager suivant le même processus.
- A l'aide d'échantillonneur: des cloisons transversales constituent une succession d'entonnoirs, dirigés alternativement d'un côté et de l'autre. Le matériau à étudier, versé sur l'échantillonneur à l'aide d'une pelle spéciale, est recueilli dans 2 petits bacs. Chaque moitié représentatif de l'ensemble, peut être encore partagée en deux, et ainsi de suite.

Ces deux procédés peuvent être utilisés séparément ou conjointement, en fonction des quantités à séparer et de la grosseur maximale des grains. D'une façon générale, la pratique dictera très rapidement la part à donner à chacun des procédés possibles, pour obtenir simultanément : rapidité d'exécution et qualité du résultat.

2.2 CARACTERISTIQUE DES BOUES

Les résidus restant dans les réservoirs de stockage d'essence (ou de mazout) après que toute l'essence (ou mazout) récupérable a été retirée se présentent sous des formes liquides et solides. Le liquide surnageant consiste en deux phases: de l'eau contenant des sels de plomb dissous et de la matière organique.

Les boues, formées principalement par la rouille du réservoir en acier, consistent en un mélange d'oxydes de fer, d'essence, de composés organiques et non organiques de plomb.

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

Tableau 3: Composition élémentaire de la boue

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

Les résultats du tableau confirme la définition de la boue, à savoir sa richesse en fer, qui est l'élément prédominant. Elle contient aussi d'autre métaux lourds tel que la manganèse en quantité considérable, le plomb, le chrome, le cuivre, le cadmium et le zinc.

Tous ces métaux sont nocifs et toxiques pour l'homme à des quantité et des degrés d'exposition différents. Pour cette raison les règlement préconisent la gestion et le traitement de ce type de déchets, pour éviter toute contamination par exposition direct ou indirecte.

2.2.1 DANGER PROVENANT DES BOUES

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

Le danger peut aussi provenir des vapeurs dégagées par les vêtement contaminés par la boue.

Une protection adéquate contre ces dangers sera obtenue par le port de vêtement de protection, de masques à cartouche et d'appareils respiratoires durant toutes les opérations de manipulations de boues en plein air.

Les nappes phréatiques peuvent aussi être contaminées, si la boue est en contacte avec de la pluie par exemple, ceci peut causer l'intoxication de tout être vivant .D'où la nécessité de traiter ce déchet, et d'éviter tout abondons et dépôts anarchique .

2.2.2 TRAITEMENT PRELIMINAIRE DE LA BOUE POUR EXTRAIRE LE LIQUIDE EN EXCES

Avant d'entreprendre tout traitement de la boue, le liquide en excès doit être éliminé par décantation .Le liquide ainsi séparé, flottant au-dessus de la boue, sera repris et dilué avec de l'eau claire avant d'être envoyé vers le système de drainage des effluents pétroliers.

Ce liquide ne doit pas être évacué dans les fosses ou avec les effluents agricoles ou vers les réserves d'eau à usage domestique.

Les boues qui ne se déposent qu'avec difficulté peuvent être mélangées avec une matière inerte, comme du sable, pour réduire leur fluidité.

2.2.3 TRAITEMENT DES BOUES POUR REDUIR LEUR TOXICITE

Le choix de la méthode pour réduire la toxicité de la boue et pour son élimination finale devra être fait en gardant à l'esprit les facteurs suivants:

- La nécessité de se conformer à toutes les règles de sécurité, locales et gouvernementales concernant le transport des déchets et leur destruction.
- La quantité de boue qu'il est nécessaire d'éliminer .
- L'emplacement de la raffinerie ou du parc de stockage par rapport aux installations permettant la décontamination et/ou l'élimination définitive.
- La compétence d'un entrepreneur pour transporter et éliminer la boue en toute sécurité.
- La possibilité de trouver de la main d'œuvre et des matériaux et les prix.
- La possibilité de fabrication et le coût d'une installation spéciale d'élimination des boues, par exemple par mélange avec une matière inerte.

Comme le principal danger d'intoxication par les boues provient de la présence de composés organiques du plomb, il est important de réduire la teneur en plomb organique à un niveau acceptable ou encore de rendre celui-ci inoffensif pour permettre une élimination finale sans danger. Les méthodes qui suivent:

- Mélange dans le béton .
- Fixation chimique et méthodes de solidification .
- Désagrégation atmosphérique .
- Incinération .

2.3 GRANULOMETRIE DE LA BOUE

Le déchet brut présente des particules dont la taille atteint quelque centimètre fig2, or le déchet substituera dans les différentes formulations, respectivement dans celle du béton et celle des enrobés bitumineux, un sable roulé 0/5 et un sable concassé 0/3. Il faut signaler aussi que les grandes particules du déchet sont essentiellement constituées de rouille provenant du bac .Pour homogénéiser la boue et pour obtenir une granulométrie proche de celle des sables cités ,nous avons procédé au concassage de celle ci après passage à l'étuve à une température de 50 °C avec aération.

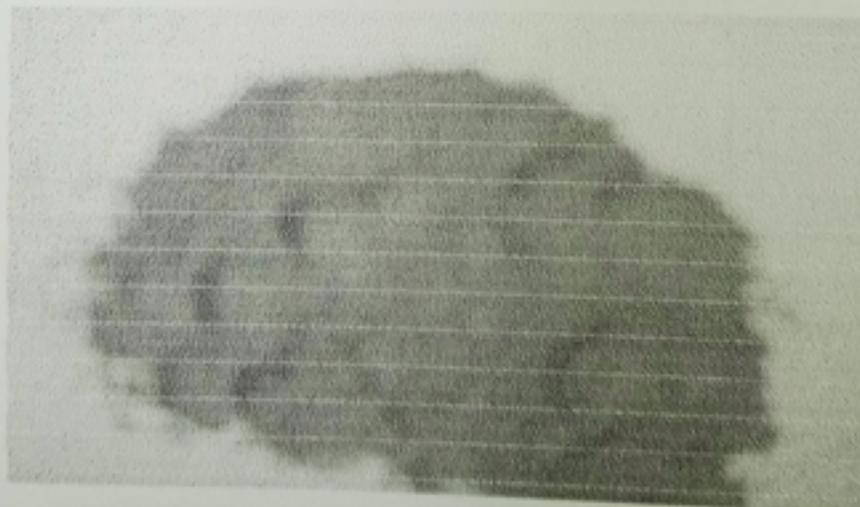


Figure 1 : Aspect de la boue à l'état brute

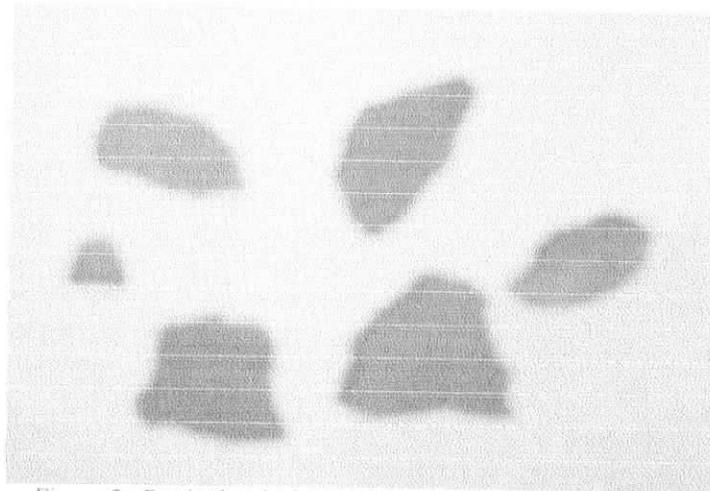


Figure 2 : Particules de fer contenues dans la boue

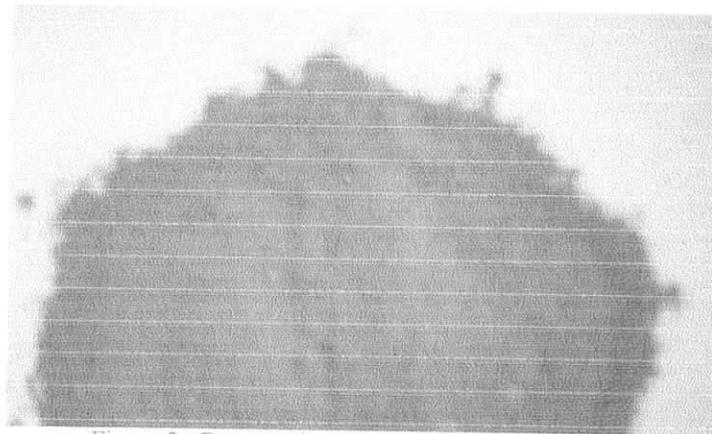


Figure 3 : Boue après passage au concasseur

La boue a été submergée 48 heures dans l'eau pour faire remonter les hydrocarbures contenues dans les particules fines, puis lavée au tamis 0.080mm, et enfin séchée à une température de 50°C avec aération. L'analyse granulométrique d'un poids initial de 690.0g nous a donné les résultats suivants:

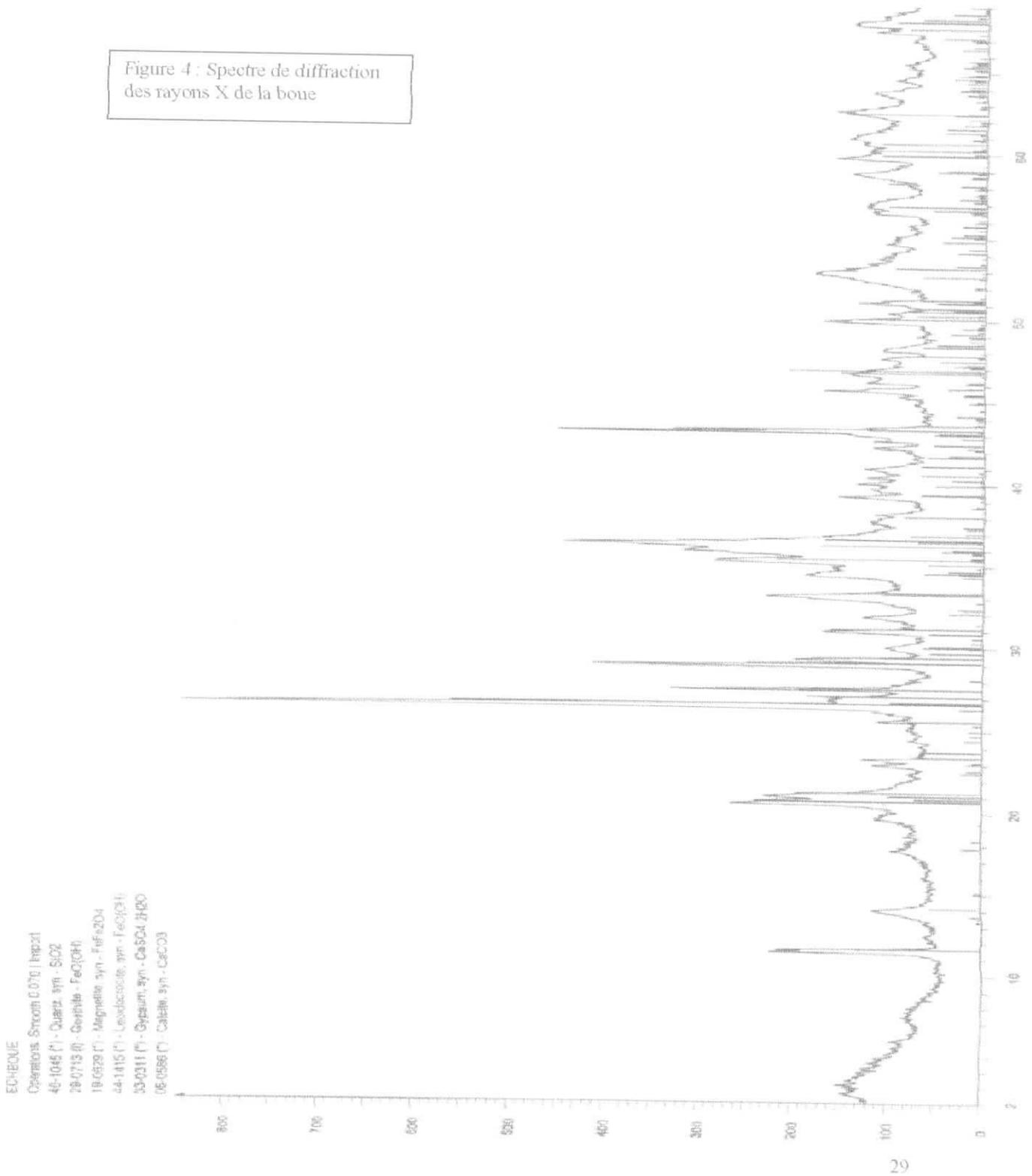
Tableau 4 : Granulométrie de la boue de stockage

Dimensions des tamis	Poids cumulés des refus	Refus cumulés en pourcentage	Tamisat en pourcentage
8 6.3			
6.3 5	45.1	6.53	93.47
5 3.15	96.6	14.00	86.00
3.15 2	148.0	21.45	78.55
2 1	233.6	33.85	66.55
1 0.500	321.9	46.65	53.35
0.500 0.315	380.3	55.11	44.89
0.315 0.200	437.3	63.37	36.63
0.200 0.100	512.7	74.30	25.70
0.100 0.080	525.5	76.16	23.84

Echantillon de boue

2.4 SPECTRE DE DIFFRACTION DES RAYONS X DE LA BOUE

L'analyse au rayons X nous a donné le graphique suivant :



%Eléments													
N°	Désignation	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	MnO	Na2O	K2O	P2O5	TiO2	Cr2O3	SO3
1	Echt-X	12,44	2,91	46,74	6,41	0,74	0,197	0,36	0,51	0,067	0,292	0,011	6,48
% Eléments													
ZrO2	SrO	Rb2O	PbO	ZnO	CuO	NiO	BaO	Cl	PAF	TOTAL			
0,0011	0,0230	0,0028	<0,001	0,0187	0,0069	0,0102	0,0098		24,40	100,53			

Figure 5 : Fluorescence des rayons X

Cette analyse poussée nous permet de confirmer les résultats de l'analyse chimique, à savoir la richesse de la boue en fer, et la présence d'autres métaux lourds.

2.5 LES MATERIAUX UTILISES

Le mélange dans le béton ou bien dans le bitume nécessite du sable, et des agrégats de différents calibres, les mêmes employés dans la fabrication de béton ou d'enrobés bitumineux de bonne qualité, dans cette partie nous allons caractériser ces différents matériaux.

Il y a différents types de béton et de béton bitumineux, cependant il est possible de formuler un concept d'un agrégat idéal pour la plupart des utilisations. Cet agrégat idéal aura une granulométrie voulu, sera dur et résistant, sera constitué des particules granulaires ayant une porosité modérément faible, et les surfaces seront propres.

Nous avons à notre disposition trois types de sables, deux sables concassés des carrières de CAP-DJENET et de KADARA, et un sable roulé de provenance inconnue. Par contre tous les graviers proviennent de la carrière de CAP-DJENET. Ce sont des graviers concassés dont la classe est 3/8, 8/15 et 15/25.

2.5.1 ANALYSE GRANULOMETRIQUE

L'analyse granulométrique nous permettra de sélectionner les différents pourcentages de matériaux pour chaque formulation celle du béton et celle du béton bitumineux.

Les résultats sont résumés dans des tableaux en annexe 2.

Nous présentons ci-dessous les courbes granulométriques des différents agrégats selon leur provenance.

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

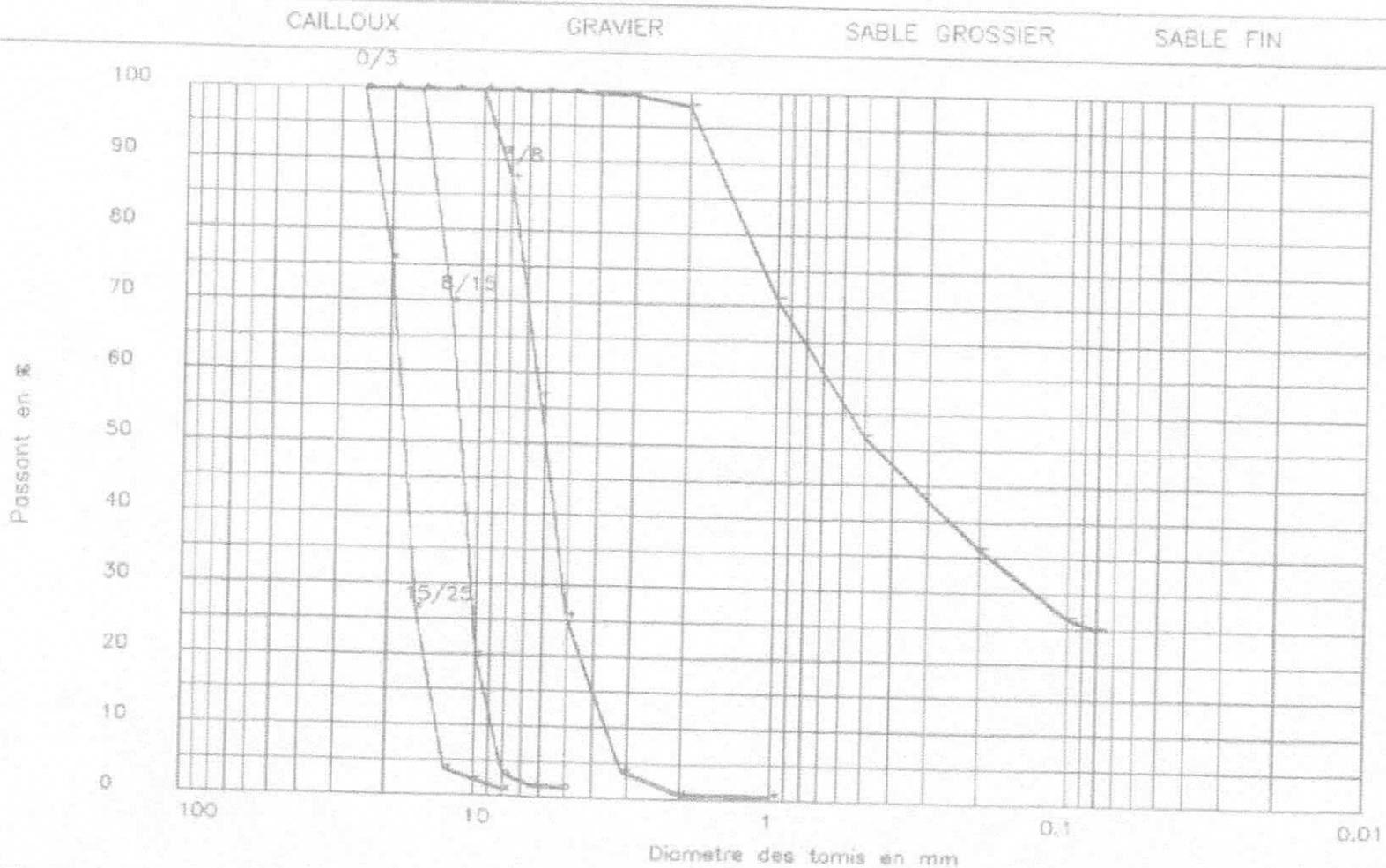
CAP-DJINET

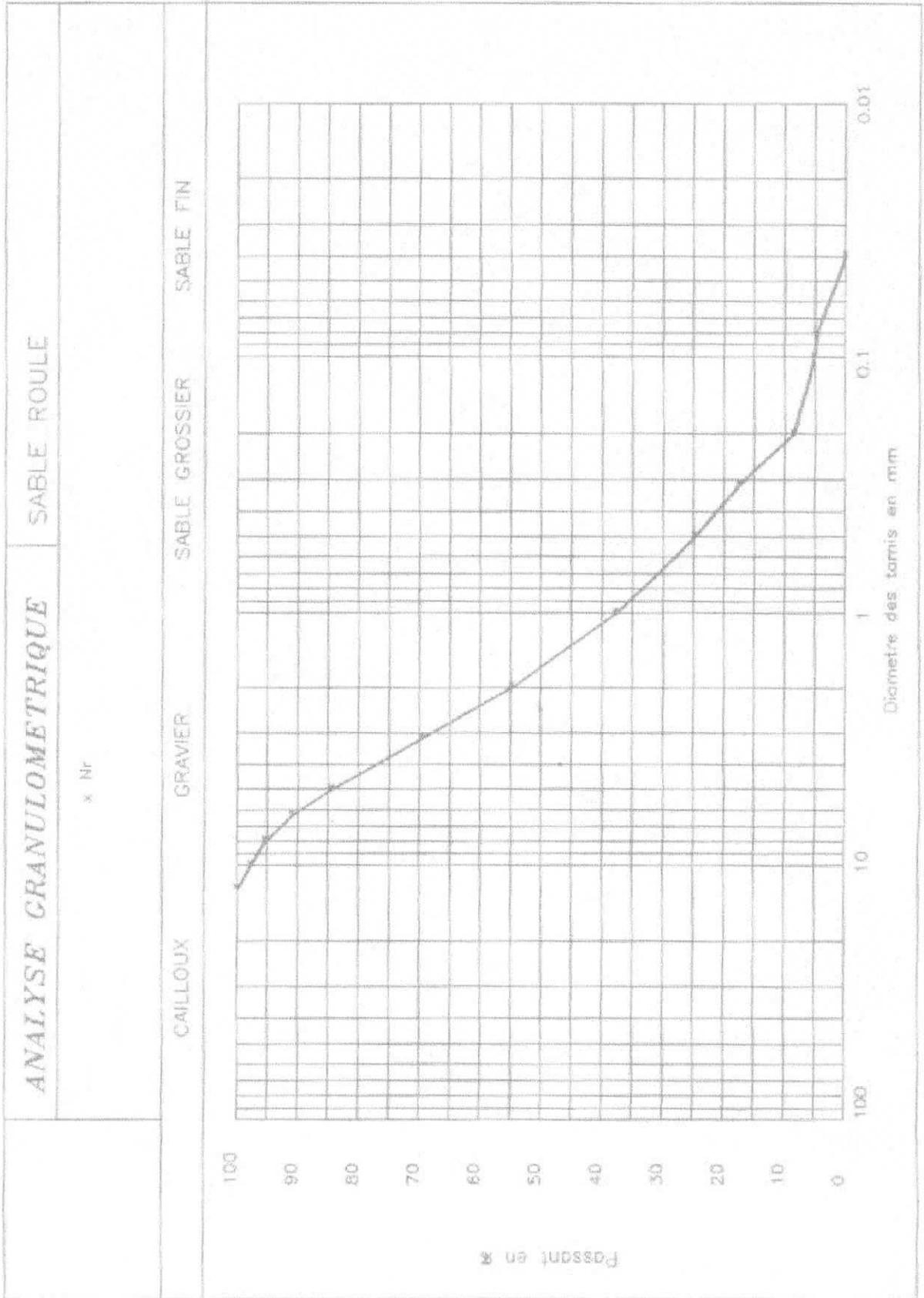
x Nr 15/25

- Nr 0/3

o Nr 8/15

+ Nr 3/8





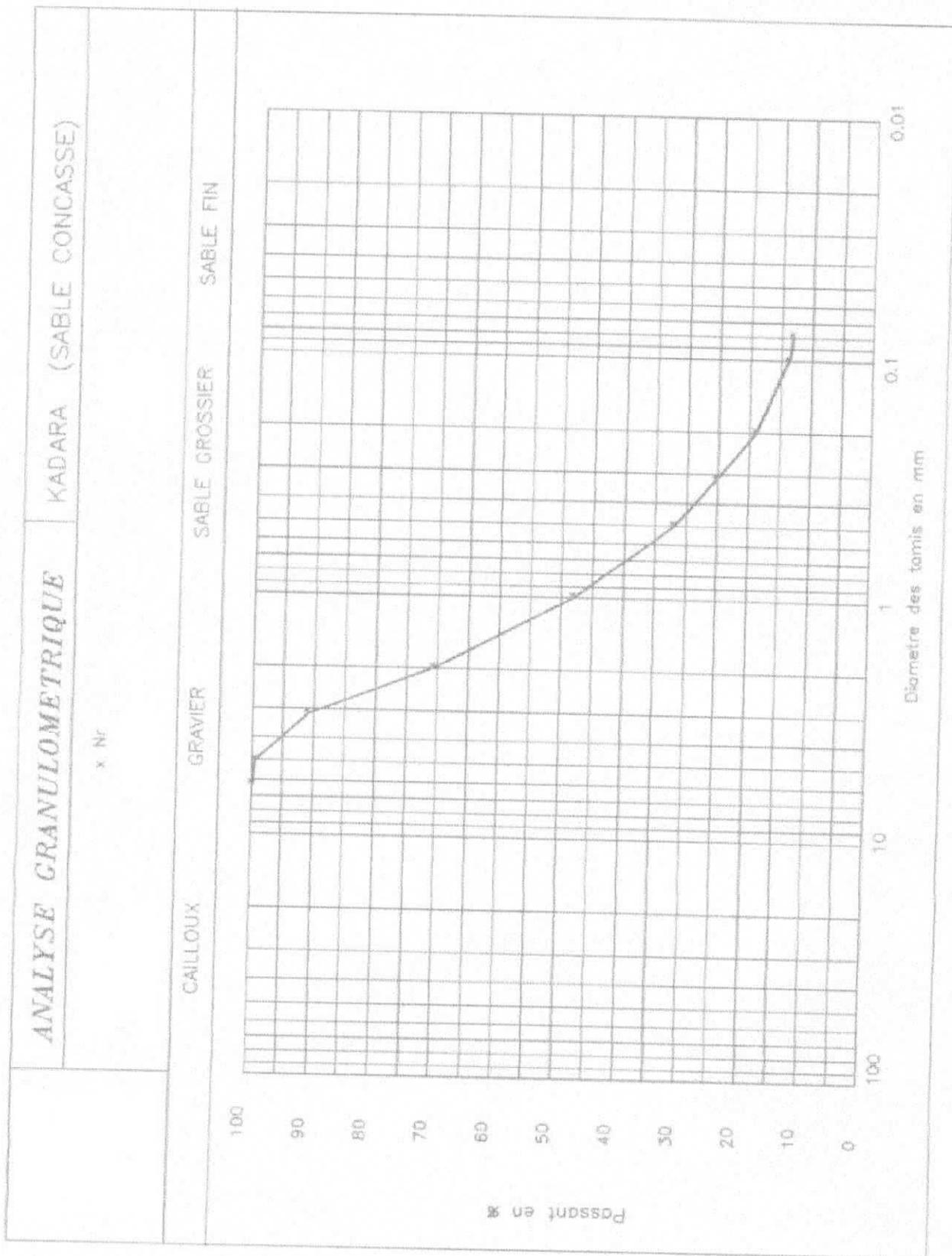


Figure 6 : Courbes granulométriques des différents agrégats disponibles

2.5.2 COEFFICIENT D'APLATISSEMENT

La détermination du coefficient d'aplatissement nous permet de caractériser la forme des granulats pour savoir s'ils ont une forme plate ou plus ou moins arrondis .Ce coefficient s'obtient ,on utilisant successivement ,et pour le même échantillon de granulats :

- une série de tamis normalisés à mailles carrés .
- une série de tamis à fentes de largeur normalisée .

Les valeurs trouvées sont résumées dans les tableaux suivants .

1- Gravier 15/25 provenance CAP – DJINET

Tableau 6 : Coefficient d'aplatissement pour la grave 15/25

Tamisage	Tamis	Tamisage sur grilles	
		Ecartement des grilles	Passants
25	20	508.2	12.5
20	16	1042.4	10
16	12.5	488.4	8
12.5	10	30.0	6.3
10	8	27.2	5
8	6.3		4
6.3	5		3.15
5	3.15		2.5
Σ		M=2096.2	Me=707.0

Coefficient d'aplatissement = $100 * Me/M = 33.72 \%$

2- Gravier 8/15 provenance CAP – DJINET

Tableau 7 : Coefficient d'aplatissement pour la grave 8/15

Tamisage	Tamis	Tamisage sur grilles	
		Ecartement des grilles	Passants
25	20		
20	16		
16	12.5	477.1	8
12.5	10	796.0	6.3
10	8	266.5	5
8	6.3	24.7	4
6.3	5	2.6	3.15
5	3.15		2.5
Σ		M=1566.9	Me=400.2

Coefficient d'aplatissement = $100 * Me/M = 25.5 \%$

3- Gravier 3/8 provenance CAP – DJINET

Tableau 8 : Coefficient d'aplatissement pour la grave 3/8

Tamisage	Tamis	Tamisage sur grilles	
		Ecartement des grilles	Passants
25	20	12.5	
20	16	10	
16	12.5	8	
12.5	10	6.3	
10	8	5	48.6
8	6.3	4	117.5
6.3	5	3.15	123.9
5	3.15	2.5	112.1
Σ	M=965.9		Me=402.1

Coefficient d'aplatissement = $100 * Me/M = 41.63\%$

2.5.3 L'ESSAI D'ABRASION (LOS ANGELES)

Cet essai est utilisé pour mesurer la résistance des agrégats à l'usure ou à l'abrasion. Le pourcentage d'usure mesuré n'aura pas nécessairement de relation avec le poli des agrégats causé par l'usure due à la circulation par exemple. On place l'agrégat dans le tambour avec des billes d'acier ayant une masse spécifiée qui agiront comme charge abrasive. On fait faire 500 r évolutions au tambour, puis le matériau est enlevé et passé au tamis de 1.7 mm. Le pourcentage passant ce tamis nous donne le pourcentage d'usure.

1- Gravier 15/25 provenance CAP – DJINET :

Préparation de l'essai : 5000g de passants entre les tamis 25 et 16 mm
12 boulets de fer

Poids obtenu après passage à l'appareil LOS ANGELS : 4186.9g
LA = $(5000 - 4186.9) / 5000 = 16.2\%$

2- Gravier 8/15 provenance CAP – DJINET :

Préparation de l'essai : 5000g de passants entre les tamis 14 et 10 mm
11 boulets de fer

Poids obtenu après passage à l'appareil LOS ANGELS : 4046.5g
LA = $(5000 - 4046.5) / 5000 = 19.07\%$

2.5.4 ESSAI D'USURE MICRO - DEVAL

Cet essai est réalisé sur les gravier 3/8 ,8/15 et 15/25 ,il nous permet d'estimer la résistance de ces fractions à la fragmentation par choc et à l'usure au contact de l'eau .

1- Gravier 15/25 provenance CAP – DJINET :

Préparation de l'essai : 500g de passants entre les tamis 25 et 16 mm
 5000g de bille de fer
 2.5 l d'eau

Poids obtenu après passage à l'appareil MICRO-DEVAL et séchage : 406.7 g
 $MD = (500 - 406.7)/500 = 18.66\%$

2- Gravier 8/15 provenance CAP – DJINET :

Préparation de l'essai : 500g de passants entre les tamis 14 et 10 mm
 4000g de bille de fer
 2.5 l d'eau

Poids obtenu après passage à l'appareil MICRO-DEVAL et séchage : 384.7g
 $MD = (500 - 384.7)/500 = 23.06\%$

3- Gravier 3/8 provenance CAP – DJINET :

Préparation de l'essai : 500g de passants entre les tamis 6.3 et 4 mm
 2000g de bille de fer
 2.5 l d'eau

Poids obtenu après passage à l'appareil MICRO-DEVAL et séchage : 366.1g
 $MD = (500 - 366.1)/500 = 26.78\%$

2.5.5 ESSAI DE PROPETE DES GRAVIERS :

Le pourcentage des impuretés d'après la norme NFP 18-301 ne doit pas dépasser 5% ,et selon Dreux elle ne doit pas dépasser 1.5% pour avoir des granulats propres pour la fabrication de béton ou d'enrobés de qualité .

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant .

Tableau 9 : Propreté des graviers

Type de gravier	Poids avant lavage	Poids après lavage	Propreté
15/25 CAP-DJINET	460.7	456.4	0.93%
8/15 CAP-DJINET	467.6	460.6	1.50%
3/8 CAP-DJINET	404.5	397.8	1.65%

2.5.6 MODULE DE FINESSE

Le module de finesse nous permettra de faire le choix parmi ces trois matériaux ,da manière à avoir un sables qui permet d'obtenir une résistance élevée pour le béton, une bonne ouvrabilité et une bonne résistance avec des risques limitées de ségrégation pour la réalisation des enrobés bitumineux .

C'est le centième de la somme des refus exprimés en pourcentages de poids aux tamis de : 0.16 , 0.315 ,0.5 ,1 ,2 ,5 ,10 ,20 ,40 ,80 mm .C'est un nombre sensiblement égal à celui qui mesure la surface comprise entre la courbe granulométrique et la parallèle d'ordonnée 100 à l'axe des abscisses .Du moins lorsque les abscisses représentant les différents tamis sont régulièrement espacées ,la graduation des ordonnées étant linéaire .Il apparaît nettement que le module de finesse sera d'autant plus petit que le granulats sera plus riche en éléments fins .

Tableau 10 : Module de finesse des sables

Sable	Module de finesse
Sable de CAP-DJENET	1.98
Sable de KADARA	3.72
Sable roulé	3.05

On choisira donc le sable roulé pour la formulation et la réalisation du béton ,et le sable de KADARA pour la formulation et la réalisation des enrobés bitumineux.

2.5.7 EQUIVALENT DE SABLE

Cet essai nous permet de déceler la présence d'éléments fins dans un sable ,et d'en caractériser l'importance par une valeur numérique .

Il faut plus d'eau pour mouiller des éléments fins que pour de gros éléments .Or on sait que ,toutes choses égales par ailleurs ,la résistance mécanique d'un béton ,varie dans le même sens que le rapport C/E des quantités de ciment et d'eau .Donc un sable contenant beaucoup d'éléments fins conduira à une faible valeur de C/E ,et à une faible valeur de la résistance .L'eau de gâchage ainsi mise en plus s'évaporera ,au cours du durcissement :d'où des vides ,et un béton poreux .Il y aura aussi un retrait plus important et risque de fissures .Les éléments fins et l'eau formeront une boue ,qui gênera l'adhérence du liant ,nouvelle source de mauvaise résistance mécanique .

Avant de débiter l'essai ,on lave un échantillon de 500g de chaque sable au tamis 2.0 mm .Après séchage à l'étuve à une température de 60°C ,on pèse les échantillons et on détermine le pourcentage de fines .

$$\%F = (500 - \text{poids après lavage}) / 500 \times 100$$

Si $\%F \leq 10\%$ l'essai se pratique sur un échantillon de 120g non lavé prélevé sur le matériau tel qu'il se présente initialement .

Si $\%F > 10\%$ l'essai se pratique sur un mélange de sable lavé et non lavé de manière à augmenter le pourcentage de la fraction sableuse 0.08/2.0 ,afin d'amener la teneur en fines du sable à 10% .

Le mélange se prépare de la manière suivante :

$$\text{Poids du sable lavé} = 1200 / \%F$$

$$\text{Poids du sable non lavé} = 120 - 1200 / \%F$$

Dans les deux cas l'essai est réalisé de la même manière :

- On agite l'échantillon durant 90 cycles puis on le lave avec une solution lavante contenant du chlorure de calcium ,de la glycérine et une solution aqueuse de formaldéhyde .

Les éléments fins remontent alors jusqu'au repère supérieur de l'éprouvette .

- Le mélange repose ensuite durant 20 min .

- On note la hauteur H du niveau supérieur ainsi que la hauteur h atteinte par les sédiments .
 - On enfonce le piston dans l'éprouvette jusqu'au niveau supérieur du sédiment .
- On note la hauteur h1 du sédiment , on a $ES = 100 h1 / H$

Pourcentage de fines

POURCENTAGE DE FINES = $(500G - XG \text{ APRES LAVAGE}) / 500G$

SABLE LAVE = $1200 / \%F$

SABLE NON LAVE = $120 - 1200 / \%F$

Tableau 11 : Pourcentage de fines

N° échantillon	Type de sable	Poids initial	Poids après lavage et séchage	Pourcentage de fines %F
1	Sable de CAP-DJINET	500	383.5	23.3%
2	Sable de KADARA	500	410	18.0%
3	Sable roulé	500	467	6.6%

Remarque : pour l'essai équivalent de sable ,les échantillons sont composés par les passants au tamis 2mm ,ils sont lavés sur le tamis 1.6mm

Pour les échantillon 1 et 2 on effectuera l'essai équivalent de sable à 10 % de fines ,pour l'échantillon 3 on se contentera d'un essai équivalent de sable classique ,puisque le pourcentage des fines ne dépasse pas les 10% .

Tableau 12 : Valeur de l'équivalent de sable

Type de sable	Composition de l'échantillon		N° tubes	Hauteur du flocculat H1	Hauteur du sable H2	ES=H2/H1
	Sable lavé	Sable non lavé				
Sable de CAP-DJINET	51.5	68.5	1	17	43-34.9=8.1	47.65%
			2	16	43-34.5=8.5	53.12%
			3	16.3	43-34.7=8.3	50.92%
Sable de KADARA	66.7	53.3	1	12.7	43-34.2=8.8	69.29%
			2	13.1	43-34.2=8.8	67.17%
			3	12.7	43-33.8=9.2	72.44%
Sable roulé	0	120	1	11.4	43-34.4=8.6	75.44%
			2	11.8	43-34.8=8.2	69.50%
			3	11.0	43-34.9=8.1	73.63%

Type de sable	Sable de CAP-DJINET	Sable de KADARA	Sable roulé
Moyenne ES	50.56%	69.63%	72.85%

2.5.8 VALEUR AU BLEU

Cet essai permet de détecter la nature argileuse des fines .
Un sable est propre si la valeur au bleu est inférieur à 0.80 .

Tableau 13 : Valeur au bleu des différents sables

Type de sable	Sable de CAP-DJINET	Sable de KADARA	Sable roulé
VB	0.45	0.40	0.35

2.5.9 POIDS SPECIFIQUES AU PYCNOMETRE

Cet essai permet de déterminer avec précision les poids spécifiques des différents matériaux. Ces valeurs sont très importantes pour les deux formulations celle du béton et celle des enrobés bitumineux.

Tableau 14 : Poids spécifique au pycnomètre

	CAP-DJINET				Sable KADA RA	Sable roulé	Boue
	3/8	8/15	15/25	Sable			
Poids pycnomètre vide P1	809.9	809.9	809.9	809.9	813.4	813.4	812.8
Poids pycnomètre + eau	2027.0	2027.0	2027.0	2027.0	2078.7	2078.7	2078.5
Poids eau	1262.1	1262.1	1262.1	1262.1	1265.3	1265.3	1265.7
Volume du pycnomètre A	1262.1	1262.1	1262.1	1262.1	1265.3	1265.3	1265.7
Poids pycnomètre + matériau P2	1209.9	1309.7	1308.8	1209.9	1113.4	1113.4	1112.8
Poids matériau P2 – P1	400.0	501.6	501.3	400.0	300.0	300.0	300.0
Poids pycnomètre + eau + matériau P3	2324.6	2383.8	2383.8	2315.3	2261.6	2265.3	2203.5
Poids de l'eau P3-P2	1114.7	1074.1	1075.0	1105.4	1148.2	1151.9	1090.7
Volume de l'eau B	1114.7	1074.1	1075.0	1105.4	1148.2	1151.9	1090.7
Volume matériau A-B	147.4	188.0	187.1	156.7	117.1	113.4	175.0
γ_s	2.71	2.66	2.68	2.55	2.56	2.64	1.71

2.6 CIMENT UTILISE

On utilisera un ciment CPJ 45, dont la composition chimique est la suivante :

Tableau 15 : Composition chimique du ciment CPJ 45

CIMENT CPJ 45	
ELEMENTS	%
SiO ₂	20.0
Al ₂ O ₃	5.5
Fe ₂ O ₃	3.0
Ca O	60.0
Mg O	1.0
SO ₃	2.0
P.A.F	3.5
Insolubles	0.6 à 0.8

Les bitumes sont de couleurs noire, solides ou semi-solides à température ambiante et entièrement solubles dans le sulfure de carbone.

On les caractérise par des nombres qui représentent soit :

- 1- Les limites de pénétration à 25°C, lorsqu'il s'agit des bitumes purs de distillation directe (180/220, 80/100 etc.)
- 2- Les limites de viscosité B.R.T.A. à 25°C dans le cas de mélange de bitumes avec du pétrole. Ces mélanges sont appelés bitumes fluxés ou cut backs (0/1, 10/15, 50/100, etc.)
- 3- Le point de ramollissement moyen (R et B) et la pénétration moyenne dans le cas de bitumes oxydés à usage industriel (85/25, 90/40, etc.). Le premier nombre indique le ramollissement et le second la pénétration à 25°C (100g, 5 s)

2.7.2 BITUMES POUR TRAVAUX ROUTIERS

Quelle que soit la technique d'utilisation du bitume pour la construction ou la réparation des routes, sa fonction est toujours de servir de liant entre les agrégats qui constituent la route.

Il est donc nécessaire, pour qu'il remplisse son rôle, qu'il adhère bien aux agrégats et par conséquent qu'il soit liquide au moment de son épandage. Par suite il devra redevenir solide ou semi-solide en toute saison pour maintenir en place les agrégats pendant l'utilisation de la route.

Il y a trois moyens usuels de liquéfier les bitumes avant leur épandage:

- 1- Le chauffage. C'est le procédé que l'on emploie avec les bitumes purs.
- 2- La dilution par un solvant qui est généralement le pétrole lampant. Les bitumes dilués de cette façon s'appellent les cut backs ou bitumes fluxés comme nous l'avons dit. Ils peuvent être utilisés à température modérée.
- 3- La mise en émulsion dans l'eau. Cette eau sera additionnée de réactifs, car les bitumes ne s'émulsionnent pas dans l'eau pure. Les émulsions s'emploient à la température ambiante.

Dans tous cas on part de bitumes purs dont les dénominations usuelles sont les suivantes:

- C1 180/220
- C2 80/100
- C3 60/70
- C4 40/50
- C5 20/30

Le bitume C1 peut être employé pour la fabrication d'enrobés à chaud qui portent le nom de bitume macadam, enrobés denses et bétons bitumineux. Les matériaux séchés et chauffés à environ 150°C sont malaxés avec une proportion convenable (5 à 10% par exemple) de bitume qui est lui-même chauffé entre 150°C et 170°C. Ce bitume peut être aussi employé à la fabrication d'émulsions alcalines ou acides.

Le bitume C2 est utilisé pour la fabrication des mêmes enrobés à chaud que le bitume C1. Il est d'autre part souvent employé pour la fabrication des cut backs.

Les bitumes C3, C4 et C5 sont utilisés dans les contrées chaudes dans les mêmes conditions que les précédents. Les caractéristiques des bitumes purs sont indiquées dans le tableau suivant:

Tableau 16 : Bitumes routiers purs

QUALITES	180/220	80/100	60/70	40/50	20/30
Point de ramollissement (méthode	34 à 43	41 à 51	43 à 56	47 à 60	52 à 65

bille et anneau A.S.T.M.)					
Pénétration (Essai DOW à 25°C, 100g, 5s méthode A.S.T.M.)	180 à 220	80 à 100	60 à 70	40 à 50	20 à 30
Densité à 25°C (méthode A.S.T.M.)	1.00 à 1.07	1.00 à 1.07	1.00 à 1.1	1.00 à 1.1	1.00 à 1.1
Perte à la chaleur 163°C pendant 5h (méthode A.S.T.M.)	<2%	<2%	<1%	<1%	<1%
Pourcentage de pénétration restante par rapport à la pénétration initiale après perte à la chaleur	>70%	>70%	>70%	>70%	>70%
Point d'inflammabilité Cleveland (coupe ouverte méthode A.S.T.M.)	>230°C	>230°C	>230°C	>250°C	>250°C
Ductilité à 25°C (méthode A.S.T.M.)	>100	>100	>80	>60	>25
Solubilité dans CS ₂ (méthode A.S.T.M.)	>99.5	>99.5	>99.5	>99.5	>99.5
Teneur en paraffine (méthode L.C.P.C.)	<4.5%	<4.5%	<4.5%	<4.5%	<4.5%

Dans notre travail nous utiliserons un bitume 40/50 en référence au tableau ci-dessus et au chapitre 1.4.1.2

2.8 CONCLUSION

Les matériaux choisis sont de très bonne qualité, les graves en provenance de la carrière de CAP-DJENET sont très résistants et propres ils conviennent parfaitement pour la réalisation de béton et d'enrobés bitumineux de bonne résistance. Le sable de KADARA est propre et a un module de finesse qui nous permet de prévoir une bonne résistance et ouvrabilité avec des risques limités de ségrégation pour la réalisation des enrobés bitumineux. Le sable roulé est lui aussi propre et peut servir à la fabrication d'un béton hydraulique de résistance élevée. Enfin, les deux matrices liantes choisis (ciment CPJ et bitume 40/50) sont de bonne qualité et devraient donner des résistances appréciables.

Chapitre 3 :

Traitement du déchet par liant hydraulique

Dans ce chapitre nous définirons et précisons la méthode de formulation utilisée, les pourcentages de déchet à incorporer, la mise en place des éprouvettes, et finalement les essais effectués sur béton frais et durcis.

Le but de ce chapitre est d'étudier la résistance du béton modifié par l'ajout du déchet, c'est l'estimation de la solidification.

3.1 METHODE DE FAURY

Nous avons choisi cette méthode en respectant les remarques du paragraphe 1.3.2.1.1 .

La méthode se réfère aux courbes granulométriques des constituants secs elle a pour principes:

- 1- déterminer la courbe optimale du mélange des éléments secs.
- 2- chercher les pourcentages de ces constituants qui permettent de faire un mélange sec dont la courbe soit aussi voisine que possible de la courbe optimale.
- 3- en déduire la composition d'un mètre cube de béton.

3.1.1 PARTICULARITE DE LA METHODE DE FAURY

- Applicable à tous les granulats, quelle qu'en soit la masse volumique
- Faury a étudié l'effet des vides, vides qui varient avec $\sqrt[5]{D}$, racine cinquième de la dimension des grains. Nous verrons donc apparaître, en cours d'étude, des termes contenant le facteur $\sqrt[5]{D}$

3.1.2 COURBE OPTIMALE

Axes : Abscisse : dimension des tamis .mais graduation proportionnelle à $\sqrt[5]{D}$.

Ordonnées : pourcentage de tamisat ,en fonction des masses volumiques absolues.

La courbe se compose de deux segments de droite formant une ligne brisée.

L'origine est le point d'abscisses correspondant au tamis de 0.08 mm

L'extrémité est le point d'abscisse D, où D est la dimension du tamis qui serait tout juste suffisant pour laisser passer la totalité du granulat et d'ordonnée 100.

Le point de brisure a pour abscisse D/2, et pour ordonnée $Y_{D/2}$ tel que:

$$Y_{D/2} = A + 17.8 \sqrt[5]{D} + B/(R/1.25D - 0.75)$$

A : constante, traduisant la maniabilité de béton

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

D : dimension du plus grand tamis laissant passer tout le matériau

R : rayon moyen du moule

3.2 APPLICATION DE LA METHODE DE FAURY POUR LES MATERIAUX CHOISIS

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

3.2.1 DETERMINATION DES DIFFERENTS COEFFICIENTS

3.2.1.1 Coefficient A :

Pour les bétons assez fermes contenant du sable roulé $A=26$, l'affaissement est entre 4 cm et 6 cm.

3.2.1.2 Valeur de D :

La dimension du tamis qui laisse passer la totalité du granulat est de 25 mm ($D=25\text{mm}$)

3.2.1.3 Calcul de $B/(R/1.25D - 0.75)$:

Cas extrêmes

- béton non serré (B grand), petit moule fortement ferrailé (R petit): alors, résultat de l'ordre de 7.

- béton soigneusement serré (B faible), en masse non définie non ferrailée (R grand): alors résultat voisin de zéro.

Nous nous situons dans le deuxième cas.

3.2.1.3 Calcul de $Y_{D/2}$:

$$Y_{D/2} = 26 + 17.8 \times 1.9 + 0 = 60$$

On peut maintenant tracer la courbe optimale .

COURBES GRANULOMÉTRIQUES selon M. FAURY

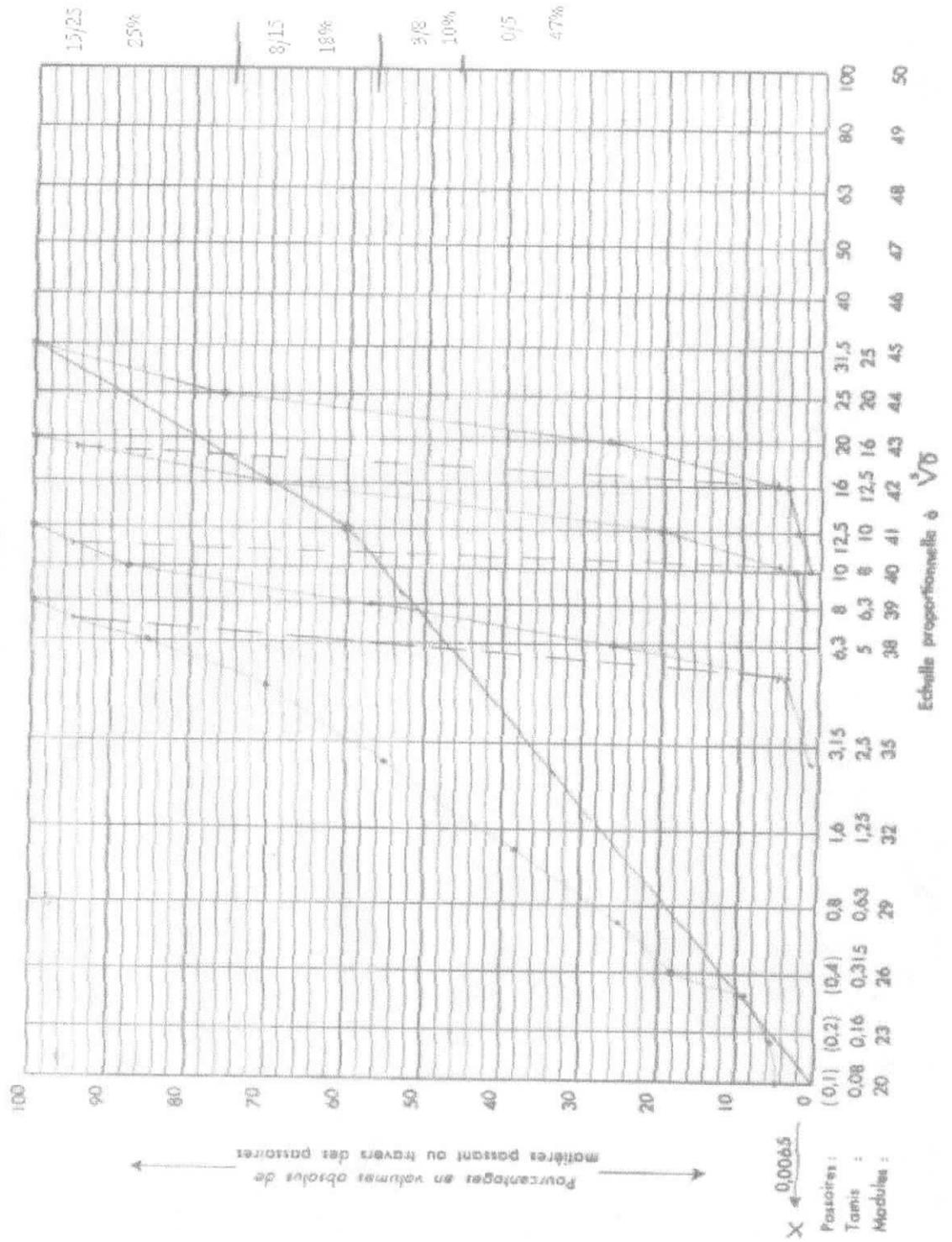


Figure 7 : Courbe optimale et pourcentages des différentes fractions

3.2.2 DETERMINATION DES POURCENTAGES DES AGREGATS

On trace trois droite verticales de manière à obtenir des surfaces égales de part et d'autre des extrémités des courbes granulométriques, les points d'intersection de ces droites avec la courbe optimale nous donnent, les pourcentages pour chaque fraction.

Les résultats sont:

Tableau 17: Pourcentage des différentes fractions suivant la méthode de FAURY

Fraction	Pourcentage
15/25	25%
8/15	18%
3/8	10%
0/5	47%

3.2.3 CALCUL DE LA DENSITE THEORIQUE

Le béton que nous allons fabriqué sera dosé a 350 kg .

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

On choisit un rapport quantité d'eau, quantité ciment égal à 0.55 (E/C=0.55) $\Rightarrow E=192.5L$

On estimera l'air occlus à 3L

Volume des agrégats = $1000 - (192.5+3+113)=691.5L$

15/25	$\Rightarrow 691.5L \times 0.25 = 172.8L \times 2.68 = 463.1 \text{ kg}$
8/15	$\Rightarrow 691.5L \times 0.18 = 124.5L \times 2.66 = 331.2 \text{ kg}$
3/8	$\Rightarrow 691.5L \times 0.10 = 69.2L \times 2.71 = 187.5 \text{ kg}$
0/5	$\Rightarrow 691.5L \times 0.47 = 325.0L \times 2.64 = 858.0 \text{ kg}$
Ciment	$\Rightarrow 113.0L \quad 350.0 \text{ kg}$
Eau	$\Rightarrow 192.5L \quad 192.5 \text{ kg}$
Air	$\Rightarrow 3.0L \quad 0.0 \text{ kg}$
	<hr/>
	1000L 2382.3kg

Densité théorique du béton = 2.38 kg/L

3.3 FABRICATION DES EPROUVETTES

Nous préparerons des éprouvettes prismatiques de dimension (7x7x28), que nous testerons a la flexion à 7 jours, puis nous en découperons des cubes de 7 cm de cubes que nous testerons à la compression simple à 7 et à 14 jours.

3.3.1 INCORPORATION DU DECHET

Nous préparons au départ des éprouvettes témoins à 0% de déchet ,puis successivement on fabriquera des éprouvettes à 5, 10, 15% de déchet (pourcentage de la masse totale)
La figure suivante nous montre l'ordre d'incorporation des différents matériaux .

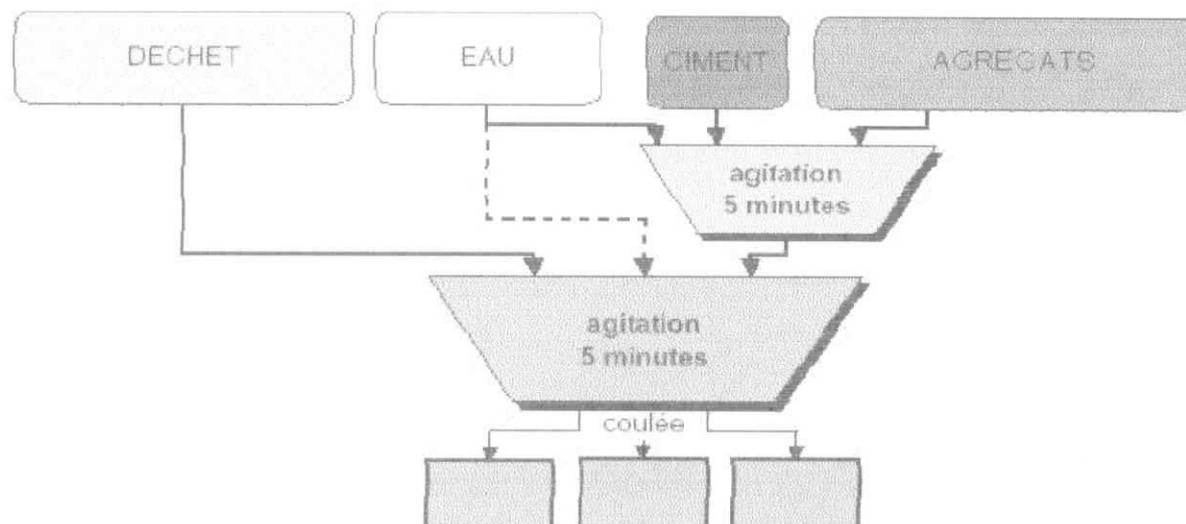


Figure 8 : Synopsis du procédé de traitement des déchets par un liant hydraulique

3.4 ESSAIS SUR BETON FRAIS ET DURCI

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

3.4.1 CONSISTANCE DU BETON

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

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

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

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

Le tableau suivant résume les différentes corrections apportées au rapport E/C .

La valeur d'eau calculée pour chaque gâchée est de 2.31 kg pour une quantité de ciment égal à 4.10 kg .

Tableau 18 : Valeur de E/C

Pourcentage de déchet	Quantité d'eau (g)	Affaissement(cm)	Valeur du rapport E/C
0%	2110	3.1	-
	2210	5.8	0.54
5%	2560	1.7	-
	3060	2.8	-
	3400	5.9	0.82
10%	2690	1.1	-
	3540	6.0	0.86
15%	3010	2.4	-
	3460	3.0	-
	3610	3.8	-
	3810	5.5	0.93

Nous remarquons l'augmentation du rapport E/C, avec l'augmentation du pourcentage de déchet incorporé, ceci est dû aux éléments fins contenus dans la boue .

3.4.2 ESSAI DE TRACTION PAR FLEXION

L'essai consiste à rompre en flexion une éprouvette prismatique de (7x7x28) .Pour une charge totale P la résistance à la traction par flexion se calcule par la formule suivante :

$$F_{Tj} = 1.8 P/a^2 \text{ (MPa)}$$

Où P est la charge de rupture et a le cote de l'éprouvette prismatique (a x a x 4a)

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 19 : Résistance à la traction par flexion à 7 jours

N° Eprouvette	Pourcentage déchet	Valeurs de la charge P (kg)	Valeurs de F_{Tj} (Mpa)	Moyenne de F_{Tj} (Mpa)
1	0%	720	2.59	3.04
2		820	2.95	
3		1000	3.60	
4	5%	380	1.37	1.41
5		420	1.51	
6		380	1.37	
7	10%	400	1.44	1.39
8		360	1.30	
9		400	1.44	
10	15%	340	1.22	1.21
11		350	1.26	
12		320	1.15	

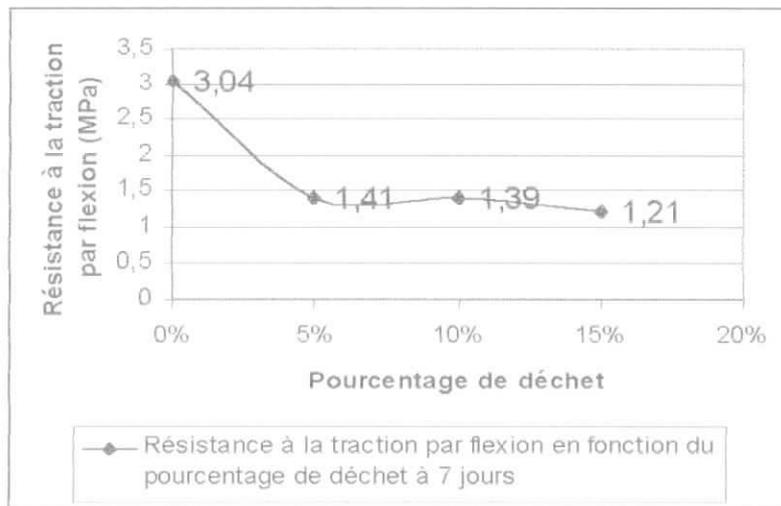


Figure 9 :

Nous remarquons la diminution de la contrainte de traction de moitié par rapport au témoin ,pour un ajout de 5% de déchet, puis une diminution très faible pour 10 et 15% de déchet .

3.4.3 ESSAI DE COMPRESSION

Cet essai est effectué sur des éprouvettes cubiques de 7 cm de coté .

La résistance à la compression correspond à la contrainte maximale donnée par la formule suivante :

$$\sigma_c = P/a^2$$

Où P est l'effort de rupture et a le coté de l'éprouvette cubique .

Les résultats sont resumés dans les tableaux suivant :

Tableau 20 : Résistance à la compression à 7 jours

N° Eprouvette	Pourcentage déchet	Valeurs de la charge P (kN)	Valeurs de σ_j (Mpa)	Moyenne de σ_j (Mpa)
1	0%	120	24.5	26.5
2		120	24.5	
3		150	30.6	
4	5%	70	14.3	13.6
5		70	14.3	
6		60	12.2	
7	10%	70	14.3	12.9
8		60	12.2	
9		60	12.2	
10	15%	60	12.2	12.9
11		70	14.3	
12		60	12.2	

Tableau 21 : Résistance à la compression à 14 jours

N° Eprouvette	Pourcentage déchet	Valeurs de la charge P (kN)	Valeurs de σ_j (Mpa)	Moyenne de σ_j (Mpa)
13	0%	170	34.7	34.6
14		180	36.7	
15		160	32.6	
16	5%	75	15.3	14.6
17		75	15.3	
18		65	13.3	
19	10%	70	14.3	13.6
20		60	12.2	
21		70	14.3	
22	15%	70	14.3	13.6
23		70	14.3	
24		60	12.2	

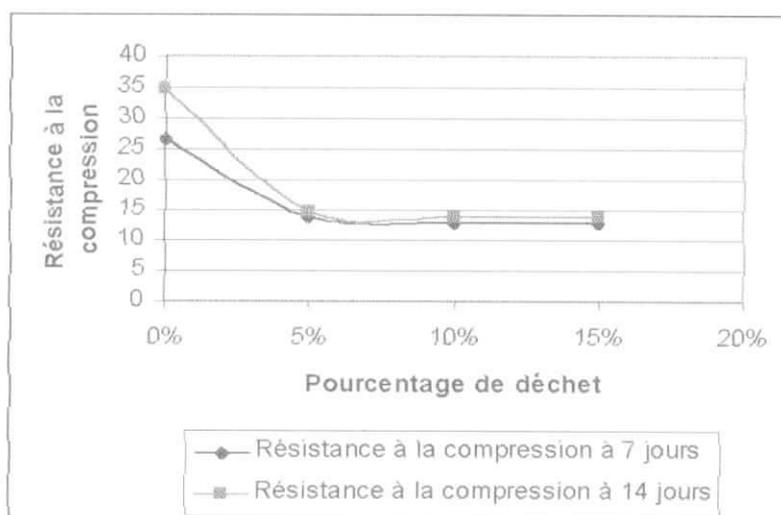


Figure 10 :

Nous remarquons que la résistance par rapport au témoin diminue de moitié pour un ajout de 5%, de boue soit 14% de la masse de sable utilisé dans la formulation, puis se stabilise jusqu'à un ajout de 15% soit 42% de la masse de sable. Aussi la variation entre la résistance à 7 jours et 14 jours est très faible.

3.6 CONCLUSION

La progression de la résistance du béton est relativement lente, compte tenu de la faible évolution de la résistance en compression entre sa valeur à 7 jours et celle de 14 jours.

Même si les résistances ont chuté de moitié par rapport au témoin, elles restent acceptables et nous pouvons dire que la solidification est satisfaisante, cela nous permet d'envisager l'utilisation de

cette formulation pour des bétons d'ouvrages secondaire tel que les bordures de trottoirs, si la stabilisation est vérifiée bien sûre.

Nous aurions aimé augmenter le pourcentage de déchet pour voir jusqu'à quelle valeur la résistance reste constante, et si elle chute jusqu'à quelle niveau.

Aussi nous aurions voulu garder le rapport E/C constant en augmentant la vibration ,pour comparer le niveau de la chute de la résistance.

Chapitre 4 :

Traitement du déchet par liant bitumineux

Dans ce chapitre nous définirons et préciserons la méthode de formulation utilisée, la mise en place des éprouvettes, les essais mécaniques et l'essai de lixiviation effectués sur les enrobés. Les premiers essais concernent la solidification, le second concerne la stabilisation. Les résultats de ces essais, conjugués, nous permettront de juger le traitement de stabilisation/solidification par liant bitumineux.

4.1 METHODE DE FORMULATION DES ENROBES BITUMINEUX

La formulation pour des enrobés bitumineux a pour but de rechercher les proportions des différents constituants solides et l'optimum de la quantité de liant pour obtenir les performances désirées en termes de compacité et stabilité mécanique.

4.1.1 COMPOSITION GRANULOMETRIQUE

La composition granulométrique consiste à déterminer les proportions de chaque fraction granulaire à incorporer au mélange de telle sorte que la courbe granulométrique de ce dernier soit comprise dans le fuseau de spécification SETREA-L.C.P.C.

Ce fuseau est défini comme suit :

Tableau 22 : Fuseau de spécification

Diamètre des tamis	Pourcentage des fractions
0.08	5 à 9 %
2	25 à 40 %
6.3	50 à 60 %

Nous utiliserons les fractions 0/3, 3/8 et 8/15 pour la préparation des enrobés, nous introduirons notre déchet de manière à respecter le fuseau de spécification.

Les tableaux suivants résument les différents mélanges d'agrégats - déchet, en fonction de plusieurs pourcentages de déchet.

Tableau 23 : Composition granulométrique à 0 % de boue

Tamis	8/15	8/15 x %	3/8	3/8 x %	0/3	0/3 x %	Boue	Boue x %	Mélange
20	100	35	100	20	100	45	100	0	100
16	100	35	100	20	100	45	100	0	100
12,5	70	24,50	100	20	100	45	100	0	89,50
10	20	7,00	100	20	100	45	100	0	72,00
8	3,23	1,13	87,55	17,51	100	45	100	0	63,64
6,3	1,67	0,58	56,98	11,39	100	45	100	0	56,98
5	1,52	0,53	25,75	5,15	99,06	44,57	93,47	0	50,25
3,15			3,91	0,78	91,12	41,00	86,00	0	41,78
2			0,81	0,16	70,79	31,85	78,55	0	32,01
1			0,68	0,13	48,18	21,68	66,55	0	21,81
0,5					32,12	14,45	53,35	0	14,45
0,315					25,3	11,38	44,89	0	11,38

0,2					19,09	8,59	36,63	0	8,59
0,1					13,94	6,27	25,7	0	6,27
0,08					13,30	5,98	23,84	0	5,98

Tableau 24 : Composition granulométrique à 5 % de boue

Tamis	8/15	8/15 x %	3/8	3/8 x %	0/3	0/3 x %	Boue	Boue x %	Mélange
20	100	40	100	10	100	45	100	5	100
16	100	40	100	10	100	45	100	5	100
12,5	70	28	100	10	100	45	100	5	88
10	20	8	100	10	100	45	100	5	68
8	3,23	1,29	87,55	8,75	100	45	100	5	60,05
6,3	1,67	0,66	56,98	5,69	100	45	100	5	56,36
5	1,52	0,60	25,75	2,57	99,06	44,57	93,47	4,67	52,43
3,15			3,91	0,39	91,12	41,00	86,00	4,30	45,69
2			0,81	0,08	70,79	31,85	78,55	3,92	35,86
1			0,68	0,07	48,18	21,68	66,55	3,32	25,07
0,5					32,12	14,45	53,35	2,66	17,12
0,315					25,30	11,38	44,89	2,24	13,63
0,2					19,09	8,59	36,63	1,83	10,42
0,1					13,94	6,27	25,70	1,28	7,56
0,08					13,3	5,98	23,84	1,192	7,17

Tableau 25 : Composition granulométrique à 10 % de boue

Tamis	8/15	8/15 x %	3/8	3/8 x %	0/3	0/3 x %	Boue	Boue x %	Mélange
20	100	35	100	20	100	35	100	10	100
16	100	35	100	20	100	35	100	10	100
12,5	70	24,50	100	20	100	35	100	10	89,50
10	20	7,00	100	20	100	35	100	10	72,00
8	3,23	1,13	87,55	17,51	100	35	100	10	63,64
6,3	1,67	0,58	56,98	11,39	100	35	100	10	56,98
5	1,52	0,53	25,75	5,15	99,06	34,67	93,47	9,35	49,70
3,15			3,91	0,782	91,12	31,89	86,00	8,60	41,27
2			0,81	0,16	70,79	24,77	78,55	7,85	32,79
1			0,68	0,13	48,18	16,86	66,55	6,65	23,65
0,5					32,12	11,24	53,35	5,33	16,57
0,315					25,30	8,85	44,89	4,49	13,34
0,2					19,09	6,68	36,63	3,66	10,34
0,1					13,94	4,88	25,70	2,57	7,45
0,08					13,30	4,65	23,84	2,38	7,04

Tableau 26 : Composition granulométrique à 15 % de boue

Tamis	8/15	8/15 x %	3/8	3/8 x %	0/3	0/3 x %	Boue	Boue x %	Mélange
20	100	35	100	25	100	25	100	15	100
16	100	35	100	25	100	25	100	15	100
12,5	70	24,50	100	25	100	25	100	15	89,50
10	20	7,00	100	25	100	25	100	15	72,00
8	3,23	1,13	87,55	21,88	100	25	100	15	63,02
6,3	1,67	0,58	56,98	14,24	100	25	100	15	54,83
5	1,52	0,53	25,75	6,43	99,06	24,76	93,47	14,02	45,75
3,15			3,91	0,97	91,12	22,78	86,00	12,90	36,65
2			0,81	0,20	70,79	17,69	78,55	11,78	29,68
1			0,68	0,17	48,18	12,04	66,55	9,98	22,19
0,5					32,12	8,03	53,35	8,01	16,03
0,315					25,3	6,32	44,89	6,73	13,06
0,2					19,09	4,77	36,63	5,49	10,26
0,1					13,94	3,48	25,70	3,85	7,34
0,08					13,3	3,32	23,84	3,57	6,90

Tableau 27 : Composition granulométrique à 20 % de boue

Tamis	8/15	8/15 x %	3/8	3/8 x %	0/3	0/3 x %	Boue	Boue x %	Mélange
20	100	35	100	25	100	20	100	20	100
16	100	35	100	25	100	20	100	20	100
12,5	70	24,5	100	25	100	20	100	20	89,50
10	20	7	100	25	100	20	100	20	72,00
8	3,23	1,13	87,55	21,88	100	20	100	20	63,02
6,3	1,67	0,58	56,98	14,24	100	20	100	20	54,83
5	1,52	0,53	25,75	6,43	99,06	19,81	93,47	18,69	45,47
3,15			3,91	0,97	91,12	18,22	86,00	17,20	36,40
2			0,81	0,20	70,79	14,16	78,55	15,71	30,07
1			0,68	0,17	48,18	9,63	66,55	13,31	23,12
0,5					32,12	6,42	53,35	10,67	17,09
0,315					25,30	5,06	44,89	8,98	14,04
0,2					19,09	3,82	36,63	7,32	11,14
0,1					13,94	2,78	25,7	5,14	7,93
0,08					13,3	2,66	23,84	4,768	7,43

4.1.2 TENEUR EN BITUME

Pour déterminer les teneurs en liants sur lesquelles portera l'étude, on utilisera la formule suivante:

$$\text{Teneur en liant} = K^3 \Sigma \alpha$$

où:

K : module de richesse, prenant les valeurs allant de 3.40 à 3.90

Σ : surface spécifique conventionnelle = $0.25 G + 2.3 S + 12 s + 135 f$, en m^2/kg

Avec les proportions pondérales :

G: des éléments supérieur à 6 mm

S : des éléments compris entre 6 et 0.315 mm

s : des éléments compris entre 0.315 et 0.08 mm

f : des éléments inférieurs à 0.08 mm

α : coefficient correcteur, destiné à tenir compte de la masse volumique des granulats .
si cette masse volumiques est égale à 2.65 g/cm^3 , $\alpha=1$.

Dans le cas contraire, $\alpha=2.65/\text{masse volumique du granulat}$.

L'étude portera sur trois teneurs en liant pour chaque formulation granulométrique, ainsi nous obtiendrons la teneur en liant optimale qui correspond à la meilleur résistance trouvée .

Les tableaux suivants résument les calculs pour chaque formulation granulométrique .

Tableau 28 : Pourcentage de liant pour chaque formulation granulométrique

Formulation 1 ,témoin							
G	S	s	f	Σ	$^3\Sigma$	$\gamma_{mélange}$	α
43.02	45.60	5.40	5.98	9.87	1.58	2.625	1.009
Modules de richesses	K ₁	K ₂	K ₃	Teneurs en liant %	L ₁	L ₂	L ₃
	3.75	3.85	3.90		6.00	6.13	6.21

Formulation 2 à 5% de déchet							
G	S	s	f	Σ	$^3\Sigma$	$\gamma_{mélange}$	α
44.00	42.38	6.45	7.17	11.54	1.63	2.572	1.030
Modules de richesses	K ₁	K ₂	K ₃	Teneurs en liant %	L ₁	L ₂	L ₃
	3.55	3.65	3.75		5.96	6.13	6.30

Formulation 3 à 10% de déchet							
G	S	s	f	Σ	$\sum U\Sigma$	$\gamma_{mélange}$	α
43.00	43.66	6.3	7.04	11.37	1.62	2.540	1.043
Modules de richesses	K ₁	K ₂	K ₃	Teneurs en liant %	L ₁	L ₂	L ₃
	3.55	3.65	3.75		6.00	6.16	6.33

Formulation 4 à 15% de déchet							
G	S	s	f	Σ	$\sum U\Sigma$	$\gamma_{mélange}$	α
45.17	41.77	6.16	6.90	11.12	1.62	2.500	1.060
Modules de richesses	K ₁	K ₂	K ₃	Teneurs en liant %	L ₁	L ₂	L ₃
	3.45	3.55	3.65		5.92	6.09	6.27

Formulation 5 à 20% de déchet							
G	S	s	f	Σ	$\sum U\Sigma$	$\gamma_{mélange}$	α
45.18	40.78	6.61	7.43	11.87	1.64	2.460	1.077
Modules de richesses	K ₁	K ₂	K ₃	Teneurs en liant %	L ₁	L ₂	L ₃
	3.40	3.50	3.60		6.00	6.18	6.36

4.2 ESSAI SUR ENROBES BITUMINEUX

Nous commencerons notre travail par l'essai Marshall qui nous permettra de trouver pour chaque formulation:

- les teneurs optimales en liant
- la stabilité
- le pourcentage de vides
- le fluage
- la compacité.

Les valeurs optimales trouvées seront adoptées pour effectuer l'essai Duriez afin d'estimer la résistance à la compression et la compacité pour un autre mode de compactage .

4.2.1 ESSAI MARSHALL

L'essai Marshall peut être utilisé pour les mélange contenant du bitume et des agrégats ne dépassant pas 25 mm de grosseur maximale.

Les éprouvettes auront une hauteur d'environ 6.4 cm et un diamètre de 10 cm, leurs poids est de 1100g. Elles seront préparées et compactées en suivant une procédure prescrite.

On détermine la densité et les vides pour l'éprouvette compactée et puis on la chauffe à 60°C pour les essais de stabilité et de fluage.

L'éprouvette est placée dans une machine.

On applique sur l'éprouvette une charge, à raison de 5cm/min. La charge maximale enregistrée durant l'essai, en newton (N), est désignée comme étant la stabilité Marshall.

Le mouvement ou la déformation qui a eu lieu durant l'application de la charge, de la charge nulle jusqu'à la charge maximale en unités de 0.25mm, est la valeur de fluage.

Les éprouvettes sont préparées selon des écarts de teneur en bitume, puis elles seront testées avec l'appareil Marshall.

Normalement les éprouvettes, pour chaque teneur en bitume, seront fabriquées en triples exemplaires.

4.2.1.1 Les critères de l'essai Marshall

Tableau 29 : Les critères de l'essai Marshall

Catégorie de circulation	Lourde		Moyenne		Légère	
	75		50		35	
Nombre de coups de compactage pour chaque face						
Propriété	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
Stabilité N	3336	-	2224	-	2224	-
Ib	750	-	500	-	500	-
Fluage en 0.25 mm	8	16	8	18	8	20
Pourcentage de vides d'air :						
Couche de surface ou de nivellement	3	5	3	5	3	5
Couche de fondation	3	8	3	8	3	8

4.2.1.2 Préparation des éprouvettes Marshall

Les éprouvettes que nous allons préparer sont pour la catégorie de circulation moyenne, donc qui nécessitent 50 coups de compactage pour chaque face. Le tableau suivant résume les pesés des différents matériaux utilisés dans la confection des éprouvettes Marshall, et le schéma qui suit montre la procédure de mise en place.

Tableau 30 : Pesés des différents matériaux utilisés dans la confection d'une éprouvette Marshall

	% de déchet	Boue	0/3	3/8	8/15	L ₁	L ₂	L ₃
Formulation 1	0%	0	495	220	385	66.0	67.5	68.4
Formulation 2	5%	55	495	110	440	65.6	67.4	69.3
Formulation 3	10%	110	385	220	385	66.0	68.0	70.0
Formulation 4	15%	165	275	275	385	65.1	67.0	69.0
Formulation 5	20%	220	220	275	385	66.0	68.0	70.0

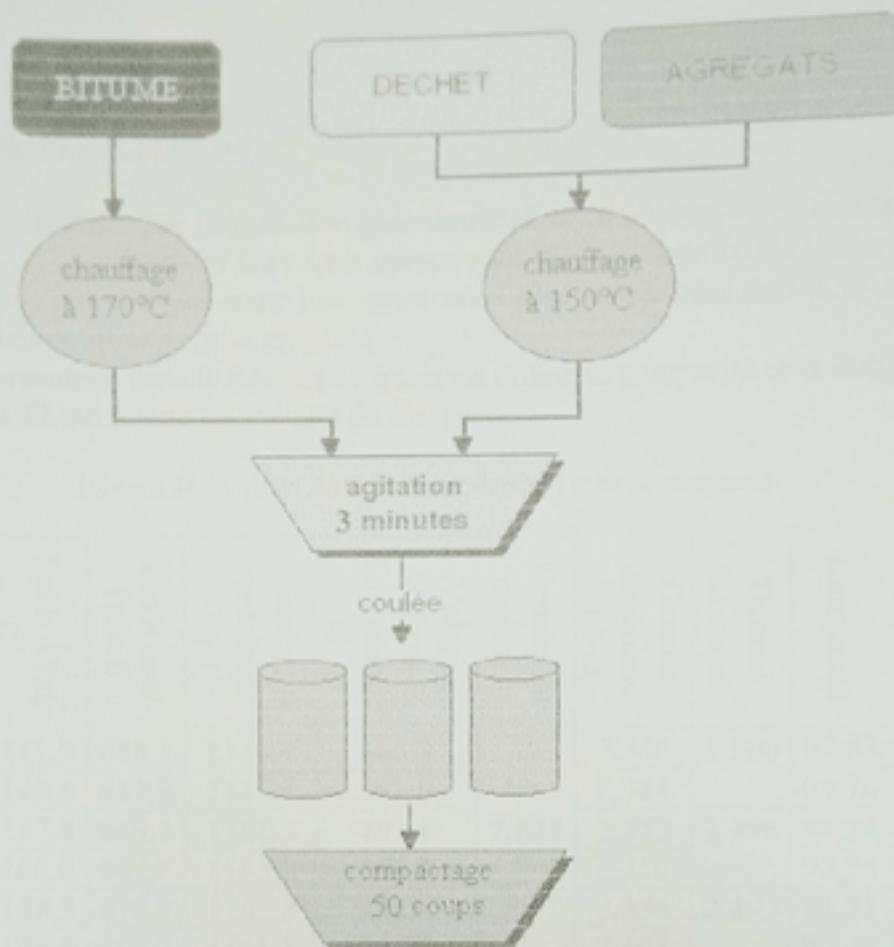


Figure 11 : Mise en place des éprouvettes Marshall

4.2.1.3 La masse volumique des éprouvettes compactées

Le but de l'essai :

- Pouvoir calculer le pourcentage des vides d'air et des vides dans l'agrégat minéral des mélanges compactés ; il s'agit d'une partie intégrale de quelques procédures de design des mélanges bitumineux de pavage .
- Obtenir une indication concernant la teneur en bitume optimale dans quelques procédures de design des mélanges .
- Etablir une base pour contrôler le compactage durant la construction d'un pavage en bitume .
- Etablir une base pour calculer le répandage requis pour une épaisseur donnée de pavage .

La procédure :

La procédure normale pour déterminer la densité relative est de peser l'échantillon ,de déterminer son volume et de calculer la masse volumique en kg/m³ .L'échantillon est d'abord pesé dans l'air ,puis dans l'eau ,et la différence entre deux masses nous donne la mesure du volume de l'échantillon .Cette procédure est satisfaisante si l'échantillon est pratiquement imperméable à l'eau .Cependant ,lorsque les échantillons sont perméables, ils seront d'abord enrobés de paraffine avant d'être immergés .Le calcul doit alors tenir compte de la masse et du volume de la paraffine

$$\text{Compacité} = (\text{Densité apparente} / \text{Densité théorique})$$

$$\text{Densité théorique} = (100 + \% \text{bitume}) / [(100 / \text{Densité du mélange} + \% \text{bitume}) / 1.04]$$

4.2.1.4 Résultats de l'essai Marshall

Nous avons six éprouvettes par formulation granulométrique, dont chaque paire à la même teneur en liant, on aurait du normalement faire trois éprouvettes par teneur en bitume mais faute de matériau nous avons préparé que deux. Les éprouvettes sont numérotées de 1 à 30, les essais ont été effectués 24 heures après la mise en place.

Les résultats sont résumés dans le tableau 31 qui nous donne la compacité et la stabilité Marshall, et dans le tableau 32 qui donne les valeurs du fluage.

Tableau 31 : Valeurs de la stabilité Marshall et de la compacité

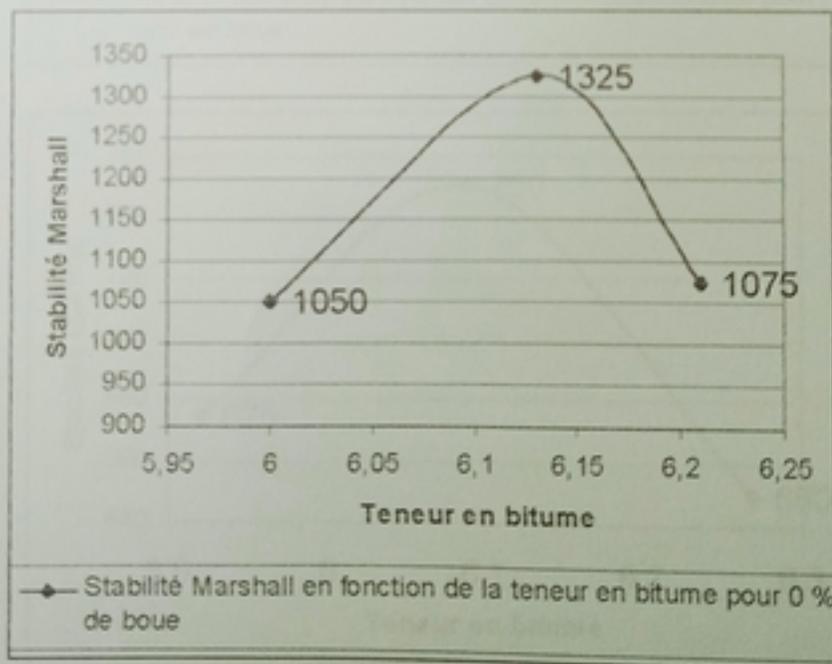
N°	Pourcentage de bitume	Module de richesse	Poids à l'air C	Poids dans l'eau B	Poids après immersion A	Volume A - Densité du mélange B	Densité du mélange	Densité apparente C/(A-B)	Densité théorique	Compacité	Hauteur	Diamètre	Charges
1	6,00	3,75	1141,9	658,1	1144,9	486,8	2,625	2,346	2,500	93,83	6,09	10,14	1150
2			1143,6	657,8	1145,7	487,9		2,344		93,76	6,14	10,20	950
3	6,13	3,85	1157,4	669,1	1161,2	492,1	2,625	2,352	2,496	94,24	6,20	10,12	1400
4			1160,0	662,8	1165,0	502,2		2,310		92,55	6,33	10,20	1250
5	6,21	3,90	1158,3	670,7	1162,3	491,6	2,625	2,356	2,493	94,51	6,17	10,15	1200
6			1156,0	660,2	1161,7	501,5		2,305		92,46	6,37	10,18	950
7	5,96	3,55	1155,7	670,8	1159,2	488,4	2,625	2,366	2,458	96,29	6,13	10,13	900
8			1149,9	670,2	1152,0	481,8		2,387		97,11	6,07	10,15	950
9	6,13	3,65	1153,3	672,3	1156,2	483,9	2,625	2,383	2,452	97,19	6,10	10,15	1100
10			1148,7	667,3	1150,6	483,3		2,377		96,92	6,05	10,06	1000
11	6,30	3,75	1160,7	675,5	1163,2	487,7	2,625	2,380	2,447	97,26	6,11	10,17	1050
12			1163,1	677,5	1164,6	487,1		2,388		97,58	6,13	10,15	1050
13	6,00	3,55	1152,2	670,5	1155,5	485,0	2,625	2,376	2,430	97,77	6,12	10,19	800
14			1149,1	666,5	1153,3	486,8		2,361		97,15	6,13	10,14	750
15	6,16	3,65	1156,1	672,7	1158,1	485,4	2,625	2,382	2,425	98,22	6,11	10,14	850
16			1149,7	671,2	1151,6	480,4		2,393		98,69	6,07	10,11	800
17	6,33	3,75	1157,3	674,2	1160,0	485,8	2,625	2,382	2,420	98,45	6,23	10,16	750
18			1156,4	671,4	1158,2	486,8		2,376		98,17	6,14	10,16	800
19	5,92	3,45	1156,8	671,2	1158,2	487,0	2,625	2,375	2,399	99,02	6,16	10,17	750
20			1143,3	661,7	1145,5	483,8		2,363		98,51	6,10	10,16	600
21	6,09	3,55	1153,0	669,5	1155,1	485,6	2,625	2,374	2,394	99,19	6,10	10,15	700
22			1148,4	666,9	1150,6	483,7		2,374		99,18	6,07	10,16	800
23	6,27	3,65	1159,0	673,2	1160,6	487,4	2,625	2,378	2,389	99,55	6,19	10,17	650
24			1151,0	669,3	1153,1	483,8		2,379		99,60	6,08	10,20	650
25	6,00	3,40	1145,6	659,4	1147,8	488,4	2,625	2,346	2,363	99,26	6,11	10,15	700
26			1142,0	661,1	1144,5	483,4		2,362		99,97	6,09	10,13	700
27	6,18	3,50	1138,8	658,7	1143,2	484,5	2,625	2,350	2,358	99,68	6,05	10,17	800
28			1137,5	659,6	1142,7	483,1		2,355		99,85	6,04	10,15	650
29	6,36	3,60	1139,0	658,9	1143,7	484,8	2,625	2,349	2,353	99,85	6,08	10,11	750
30			1133,3	654,1	1137,1	483,0		2,346		99,72	6,00	10,15	600

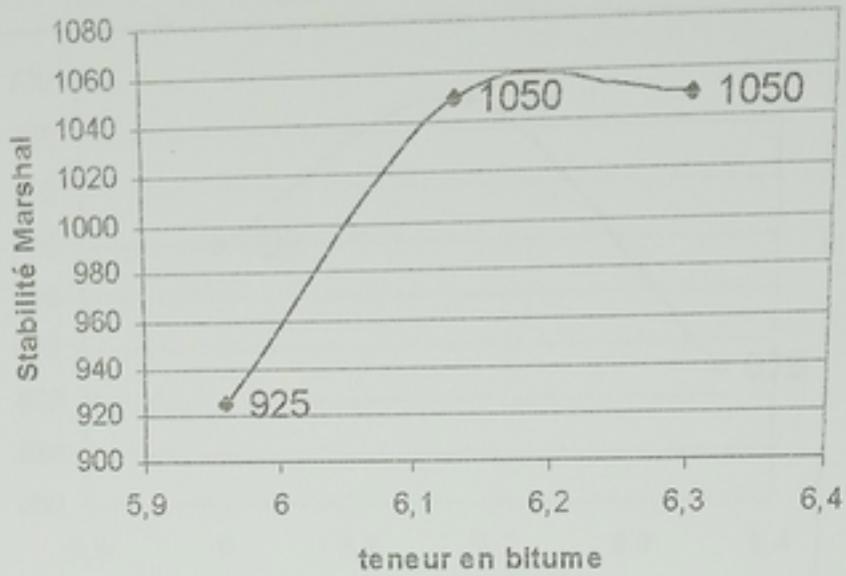
Tableau 32 : Valeur du fluage selon l'essai Marshall

Eprouvettes	Teneur en bitume	Fluage en 0,01 pouce	Fluage en mm
Témoin	6,00	21,0	5,334
	6,13	17,0	4,318
	6,21	21,0	5,334
à 5% de boue	5,96	18,0	4,572
	6,13	12,0	3,048
	6,30	23,0	5,842
à 10 % de boue	6,00	19,5	4,953
	6,16	17,5	4,445
	6,33	24,0	6,096
à 15% de boue	5,92	19,0	4,826
	6,09	16,5	4,191
	6,27	20,5	5,207
à 20% de boue	6,00	17,5	4,445
	6,18	17,5	4,445
	6,36	16,5	4,191

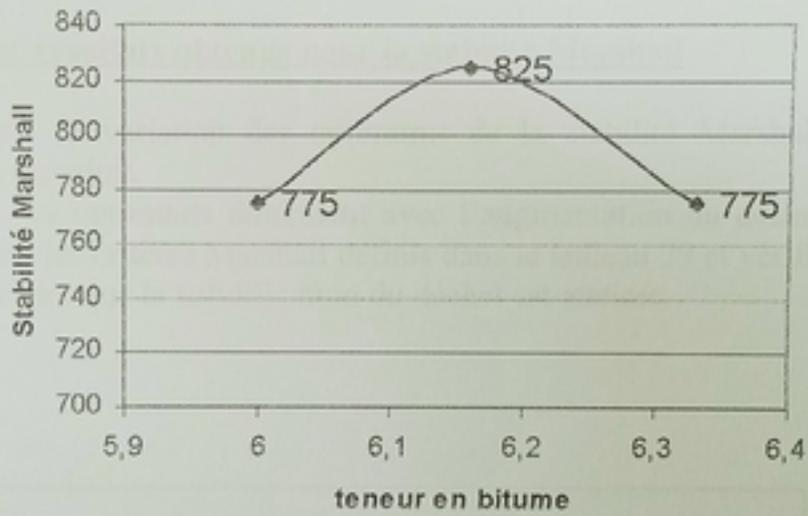
Les graphes suivant explicitent les résultats présentés précédemment .Nous pouvons ainsi constater que pour une stabilité maximale correspond une valeur de fluage minimale .C'est pour cela que nous avons fait varier la teneur en bitume pour chaque formulation ,pour déterminer les valeurs optimum pour la stabilité et au même temps du fluage .

Figure 12 : Stabilité Marshall

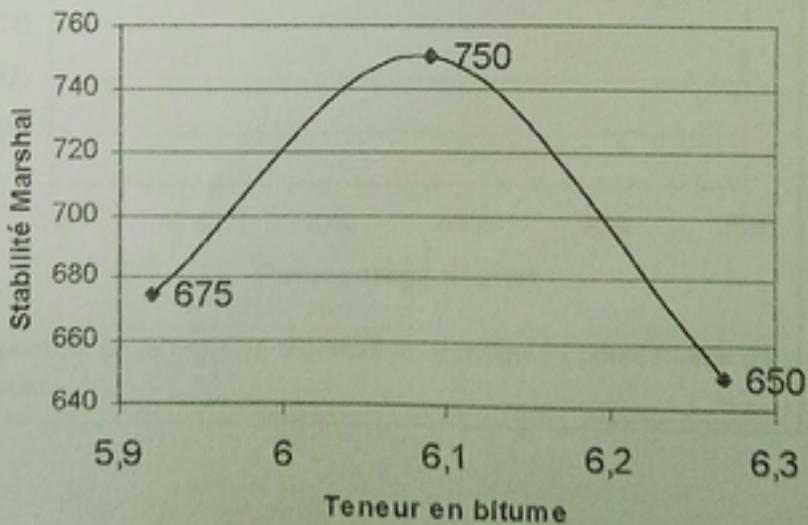




● Stabilité Marshall en fonction de la teneur en bitume pour 5% de boue



● Stabilité Marshall en fonction de la teneur en bitume pour 10% de boue



● Stabilité Marshall en fonction de la teneur en bitume pour 15% de boue

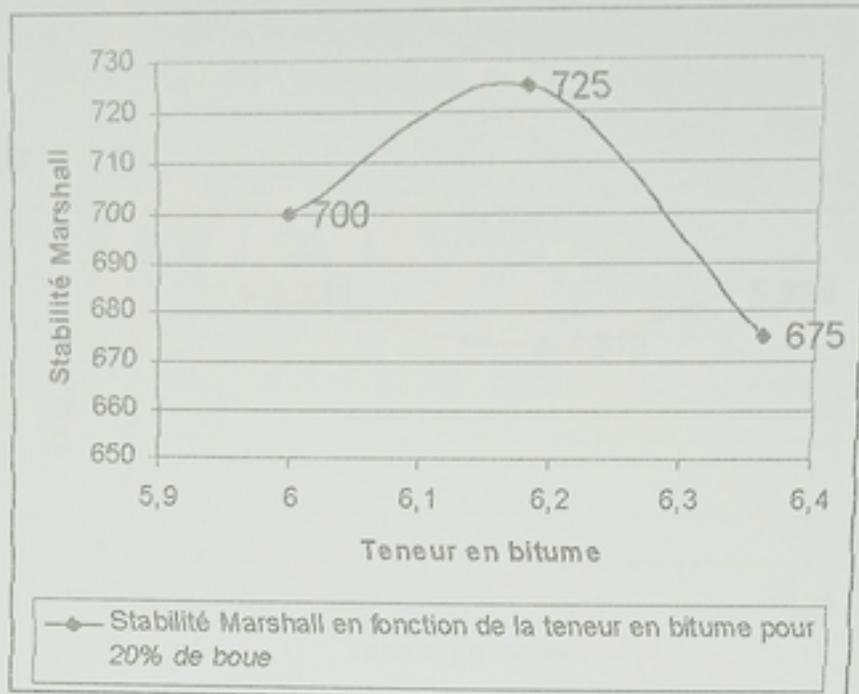


Figure 13 : Résumé des résultats obtenus pour la stabilité Marshall

Ce graphe nous montre la variation des optimums de la stabilité Marshall en fonction du pourcentage du déchet introduit.

Nous remarquons que ces optimums diminuent avec l'augmentation du déchet incorporé, mais restent acceptable. Selon les critères Marshall définis dans le tableau 29 et vérifiés dans le tableau 33, nous pouvons donc dire que la solidification du déchet est atteinte.

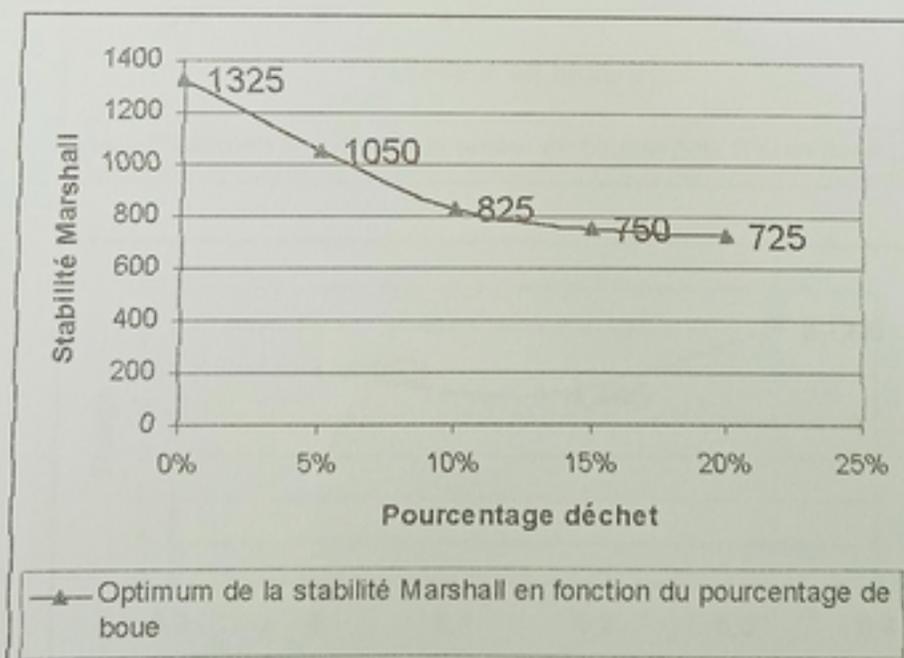
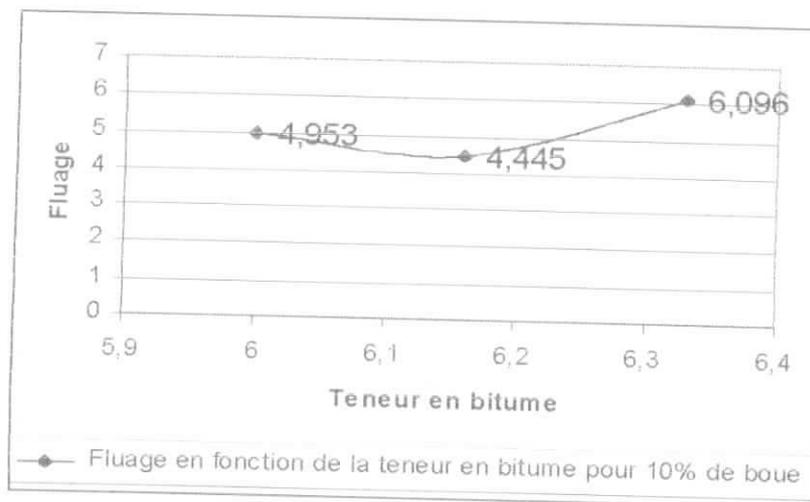
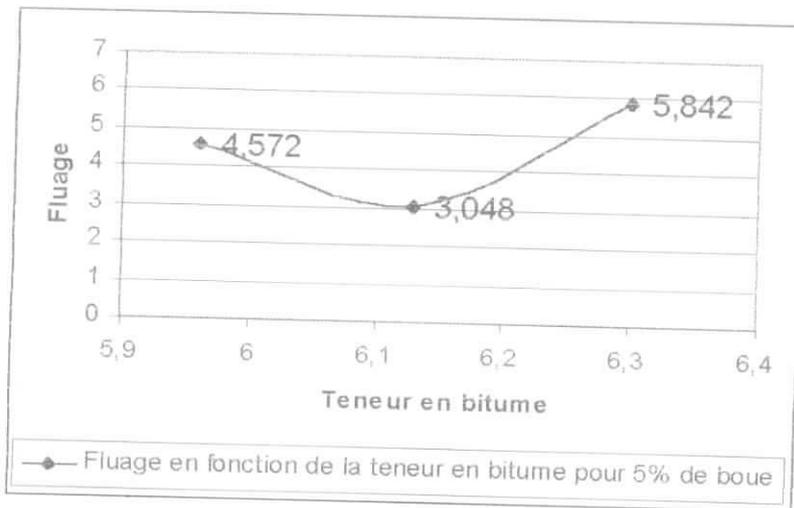
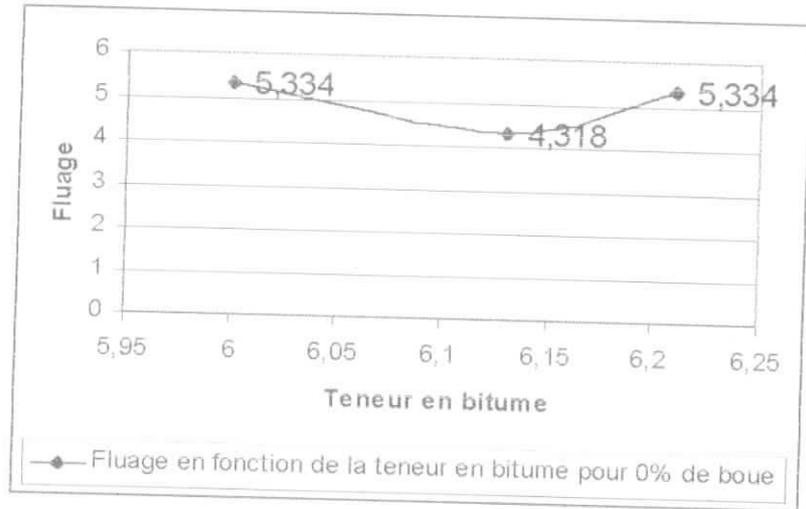
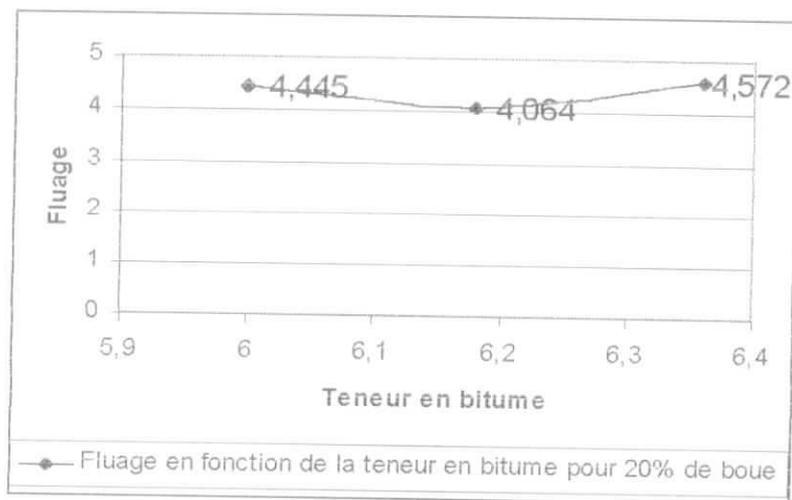
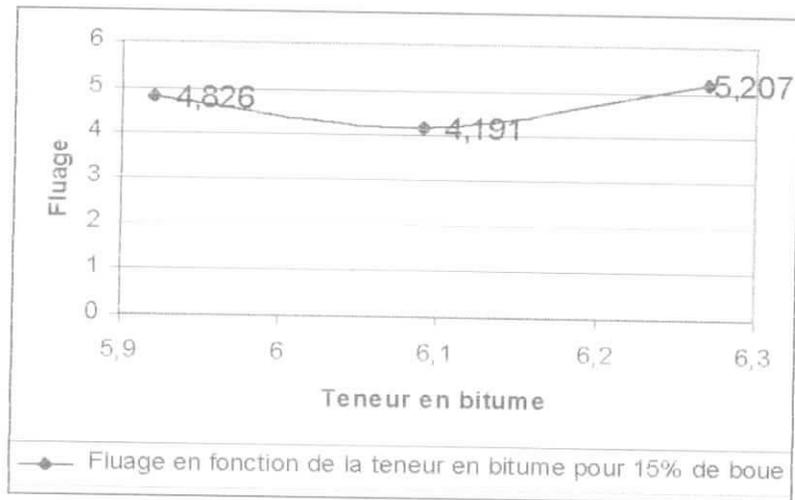


Figure 14 : Fluage





4.2.1.5 Tableau comparatif de ce que l'on obtient avec les teneurs optimales et les critères de la méthode Marshall

Tableau 33 : Conformité des résultats avec les critères Marshall

		Densité apparente	Stabilité	% De vides	Fluage
Formulation 1 à 0% déchet	Critère Marshall	--	2.224 KN	3 à 5	2 à 4.5 mm
	B% optimum 6.13	2.331	13.250	6.6	4.3
	Conformité		oui	non	oui
Formulation 2 à 5% déchet	B% optimum 6.13	2.380	10.500	2.9	3.0
	Conformité		oui	non	oui
Formulation 3 à 10% déchet	B% optimum 6.16	2.378	8.250	1.6	4.4
	Conformité		oui	non	oui
Formulation 4 à 15% déchet	B% optimum 6.09	2.374	7.500	0.8	4.2
	Conformité		oui	non	oui
Formulation 5 à 20% déchet	B% optimum 6.18	2.352	7.250	0.3	4.4
	Conformité		oui	non	oui

4.2.1.6 Conclusion

La stabilité et le fluage sont conformes aux critères de l'essai, seul le pourcentage des vides est hors des limites fixées. Une faible teneur en vides peut causer :

- 1- L'instabilité occasionnée par la réorientation des particules et le compactage additionnel une fois que le pavage a été exposé à la circulation pendant une période de temps donné .
- 2- Le manque d'espace vides pour la quantité de bitume requise pour une haute durabilité, même si la stabilité est satisfaisante.
- 3- La dégradation de l'agrégat sous l'action de la circulation, ce qui causera l'instabilité .

Nous pouvons dire que la solidification est acceptable vue les bonnes stabilités obtenues pour tous les pourcentages adoptés. Malgré les problèmes pouvant provenir du manque de vides, nous pouvons envisager un emploi dans des ouvrages routiers secondaires de faible ou moyenne circulation.

L'essai Duriez nous permettra de confirmer les résultats de l'essai Marshall, et l'essai de lixiviation donnera la réponse à la deuxième partie du procédé, qui est la stabilisation.

4.2.2 ESSAI DURIEZ

L'essai Duriez a pour objectif de déterminer ,pour une température et un compactage donné, la résistance à la compression d'une éprouvette d'enrobé de poids de 1000 g. Il permet également de définir la tenue à l'eau de l'enrobé par le rapport de résistance à la compression après et avant immersion de l'éprouvette pendant sept jours dans un bain d'eau thermométrique à 18°C. Cet essai est valable pour tous les mélanges hydrocarbonés à chaud contenant des granulats de dimensions inférieures à 31.5 mm .

L'essai est effectué avec un moule de 8 cm de diamètre (moule normale), destiné au matériau ne comportant pas d'éléments égaux ou supérieurs à 14 mm.

L'essai se portera sur des éprouvette contenant 5 et 15% de boue pour la confirmation des résultats de l'essai Marshall. On utilisera les teneurs en bitumes optimales trouvées par l'essai Marshall. Le tableau suivant donne les pesés des différents matériaux.

Tableau 34 : Pesés des différents matériaux utilisés dans la confection d'une éprouvette Duriez

	Boue	0/3	3/8	8/15	L ₁	L ₂	L ₃
Formulation 2 à 5% de déchet	50	450	100	400	59,6	61,3	63,0
Formulation 4 à 15% de déchet	150	250	250	350	59,2	60,9	62,7

Le schéma suivant montre la mise en place des éprouvettes Duriez

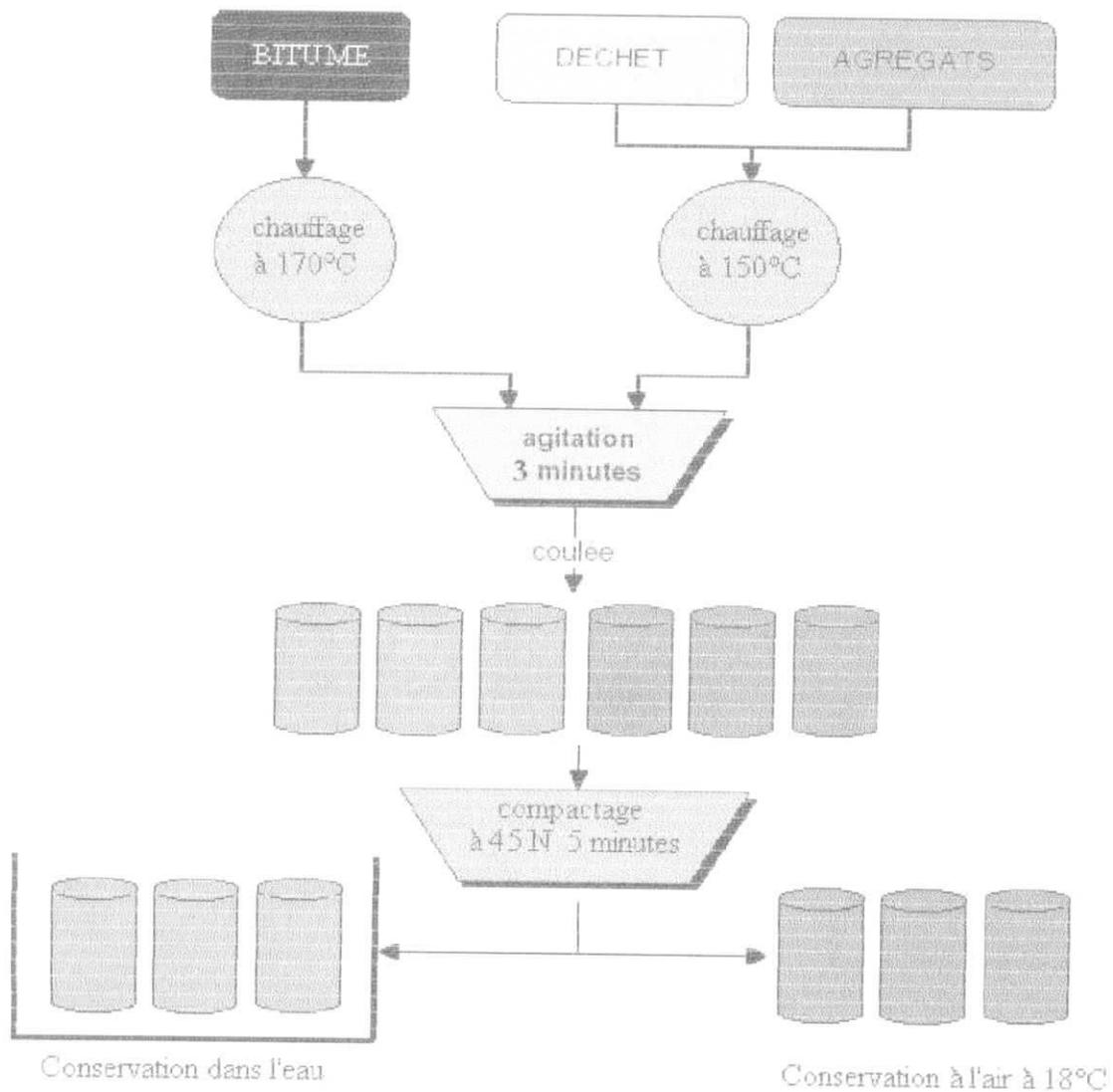


Figure 15: Mise en place des éprouvettes Duriez

4.2.2.1 Résultats de l'essai Duriez

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 35 : Résistance à la compression et compacité selon l'essai Duriez

N° Eprouvette	1	2	3	4	5	6	7
Pourcentage bitume	6,13	6,13	6,13	6,13	6,13	6,13	6,13
Module de richesse	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65
Poids à l'air	1048,9	1051,7	1047,8	1055,8	1058,2	1043,3	1053,9
Poids dans l'eau	592,5	592,0	591,1	596,6	597,7	590,3	591,6
Poids après immersion	1056,0	1057,8	1055,5	1062,9	1064,3	1049,0	1061,2
Volume	463,5	465,8	464,4	466,3	466,6	458,7	469,6
Densité du mélange	2,572	2,572	2,572	2,572	2,572	2,572	2,572
Densité apparente	2,263	2,258	2,256	2,264	2,268	2,274	2,244
Densité théorique	2,452	2,452	2,452	2,452	2,452	2,452	2,452
Compacité	92,28	92,07	92,01	92,33	92,48	92,75	91,52
Hauteur	9,42	9,38	9,39	9,39	9,40	9,27	9,49
Diamètre	8,00	8,00	8,01	8,00	8,00	8,01	8,00
Charges	1600	1400	1350	1050	1250	950	
Résistance à la compression en (bars)	28,84			21,55			
N° Eprouvette	8	9	10	11	12	13	14
Pourcentage bitume	6,09	6,09	6,09	6,09	6,09	6,09	6,09
Module de richesse	3,55	3,55	3,55	3,55	3,55	3,55	3,55
Poids à l'air	1047,4	1040,8	1043,3	1051,7	1042,3	1045,0	1045,6
Poids dans l'eau	586,2	585,0	585,4	592,1	587,6	588,2	586,1
Poids après immersion	1053,7	1048,1	1050,3	1057,5	1048,7	1050,5	1052,4
Volume	467,5	463,1	464,9	465,4	461,1	462,3	466,3
Densité du mélange	2,500	2,500	2,500	2,500	2,500	2,500	2,500
Densité apparente	2,240	2,247	2,244	2,260	2,260	2,260	2,242
Densité théorique	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394	2,394
Compacité	93,59	93,88	93,75	94,40	94,43	94,43	93,67
Hauteur	9,47	9,49	9,46	9,56	9,37	9,35	9,44
Diamètre	8,01	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Charge	550	450	600	200	150	175	
Résistance à la compression en (bars)	10,61			3,48			

Masse volumique apparente

Tableau 36 : Détermination de la masse volumique apparente par pesée hydrostatique en utilisant la paraffine

N° Eprouvette	7	14
Masse de l'éprouvette M1	1053,9	1045,6
Masse de l'éprouvette paraffinée M2	1086,2	1073,5
Masse de l'éprouvette immergée M3	588,8	585,0
Masse de la paraffine M2-M1	32,3	27,9
Volume de la paraffine $(M2-M1)/0,9=V1$	35,89	31,00
Volume brut $M2-M3=V2$	497,4	488,5
Volume net $V2-V1=V3$	461,51	457,50
Masse volumique apparente $=M1/V3$	2,28	2,29

4.2.2.2 Conclusion

Pour une couche de roulement les règlements exigent un rapport (r/R) supérieur ou égale à 0.75 ,pour l'éprouvette à 5% de déchet cette valeur est atteinte ,par contre pour celle à 15% ,la valeur du rapport est de 0.33 ,cette valeur est nettement inférieur à la valeur spécifiée .Nous remarquons aussi que la résistance de l'enrobé chute lorsque celui ci est immergé ,cela est dû aux éléments fins contenus dans le déchet .

Nous remarquons aussi que les valeurs de la compacité sont supérieurs à celles trouvées pour les l'essai Marshall ,c'est dû à la différence du mode de compactage .

Pour l'éprouvette à 5% de déchet nous pouvons dire que la solidification est acceptable .

4.3 ESSAI DE LIXIVIATION

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

L'éprouvette préparée est pesée et mise en contact sous agitation avec la solution de lessivage .

Le solide résiduel du déchet est séparé du lessivat, nous effectuerons sur ce dernier une analyse : chimique et écotoxicologique .

Ces mêmes essais sont effectués sur le déchet traité solide ,la comparaison des résultats nous permettra de se prononcer sur la stabilisation .

Les échantillons étudiés sont :
1- Enrobés à 5% de déchet ,teneur en bitume 5.96%
2- Enrobés à 10% de déchet ,teneur en bitume 6.00%
3- Enrobés à 15% de déchet ,teneur en bitume 6.09%

Tableau 37 :Fluorescence des rayons X du déchet traité solide

Eléments %												
N°	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	SO ₃
1	27.06	8.32	7.18	24.80	3.45	0.104	1.84	0.59	0.093	0.473	0.028	0.06
2	27.12	9.06	9.45	23.05	3.67	0.123	1.65	0.59	0.103	0.485	0.028	0.02
3	30.71	10.47	7.84	21.57	4.16	0.124	2.05	0.57	0.097	0.564	0.029	0.13
	ZrO ₂	SrO	Rb ₂ O	PbO	ZnO	CuO	NiO	BaO	Cl	PAF	TOTAL	
1	0.0067	0.0415	0.0058	<0.001	0.0045	0.0042	<0.001	0.25	0.018	25.40	99.69	
2	0.0068	0.0392	0.0046	<0.001	0.0065	0.0019	<0.001	0.18	0.024	24.20	99.77	
3	0.0070	0.0394	0.0062	<0.001	0.0097	0.0062	<0.001	0.17	0.017	21.10	99.69	

Tableau 38 :composition chimique du lexiviat

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

L'analyse du lexiviat nous montre que le pourcentage de fer est très faible ,lui qui est l'élément prédominant dans la composition du déchet brut .Les autres métaux lourds sont à l'état de trace . Nous pouvons donc affirmer que le déchet est stabilisé par cette méthode utilisant un liant hydrocarboné qui est le bitume 40/50.

CONCLUSION GENERALE

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

- Pour le béton élaboré, la résistance chute de moitié pour un ajout de 5% de déchet par rapport au témoin, puis se stabilise pour un ajout allant à 15%. Les résistances n'ont pas beaucoup évolué entre leurs valeurs à 7 jours et celles à 14 jours.
Concernant le rapport E/C, en gardant le dosage en ciment fixe, la quantité d'eau additionnée augmente avec le pourcentage de déchet incorporé, ceci est dû à la présence d'éléments fins dans la composition du déchet .
- Le traitement par liant hydraulique subit par le déchet le rend solide et résistant, le premier critère du procédé est donc vérifié . Nous pouvons envisager la valorisation de ce déchet en tant que matériaux de construction, en utilisant la formulation exposée. Il pourrait ainsi être employé dans la fabrication d'élément secondaire tel que les bordures de trottoirs .Mais la vérification à la stabilisation est impérative .
- Pour les enrobés bitumineux élaborés, la résistance décroît par rapport au témoin, avec l'augmentation du pourcentage de déchet, mais reste satisfaisante jusqu'à 20% d'ajout .le fluage est lui aussi satisfaisant .
- Les essais de lessivage ont montré clairement que le déchet est stabilisé, et qu'il n'y a pas de risque de relargage d'éléments toxiques .
- Les deux critères du procédé solidification/stabilisation sont vérifiés, pour le traitement par liant bitumineux, ceci nous permet d'envisager l'emploi de cette formulation pour la réalisation d'ouvrages routiers secondaires .

Comme il s'agit d'une première étude sur ce déchet, pour la suite des travaux nous formulerons les recommandations suivantes :

- Effectuer l'essai de lessivage sur le déchet solidifié par liant hydraulique .
- Garder un rapport E/C constant En augmentant la vibration .
- Etudier le comportement du béton, et des enrobés à long terme .
- Faire des ajouts de déchets supérieurs à 20% pour les deux formulations, hydraulique et hydrocarboné, pour voir jusqu'où nous pouvons aller dans la substitution du sable, en fonction de la résistance et de la stabilisation .
- Utiliser des ajouts pour diminuer la chute de résistance .
- Procéder à une étude technico-économique du projet dans le but de valider ce traitement .

ANNEXE 1

Les tests réglementaires d'admission d'un déchet ultime en centre de stockage sont désignés dans les annexes I des arrêtés du 18 avril 1994, relatifs au stockage de certains déchets industriels spéciaux ultimes et stabilisés pour les installations existantes et nouvelles, dans les termes suivants .

« ADMISSION DES DECHETS INDUSTRIELS SPECIAUX

Déchets admissibles - Test de potentiel polluant

Déchets solides initialement massifs ou générés par un procédé de solidification :

Dans le cas de déchets solides initialement massifs ou générés par un procédé de solidification, le test à appliquer, dans l'attente de la publication d'une ou de plusieurs normes spécifiques, est le protocole provisoire d'évaluation des déchets massifs et solidifiés disponible sur simple demande auprès du ministère de l'environnement (direction de la prévention des pollutions et des risques, service de l'environnement industriel). Ce test comprend, préalablement au test de potentiel polluant, un test préliminaire de présélection des déchets massifs ou solidifiés et des tests de vérification de l'intégrité et de la pérennité de la structure physique. Ces derniers comportent en particulier des essais de résistance mécanique dans le cas où le matériau peut être amené à l'état d'éprouvettes répondant aux spécifications des normes relatives à ce type d'essai. Dans le cas contraire, ils comportent des essais d'érosion sur les matériaux granulaires.

Lorsque le déchet a répondu aux critères de présélection, le test de potentiel polluant est réalisé sur un échantillon se présentant sous forme d'éprouvette unique ou sous forme d'un ensemble de fragments de granulométrie définie.

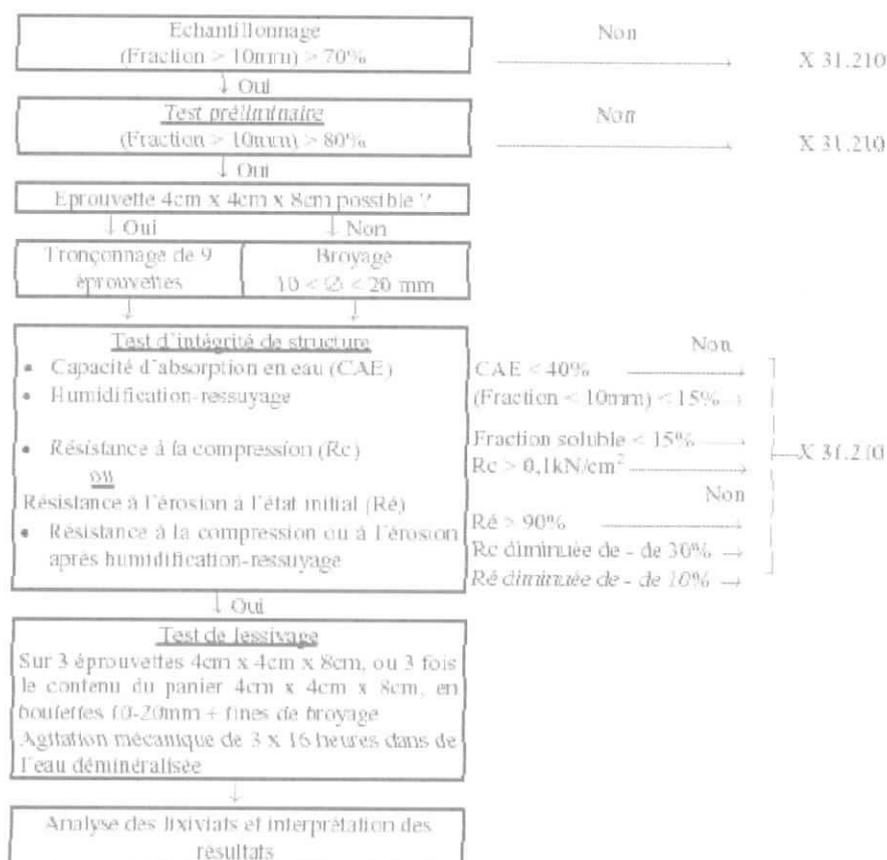
Il comporte trois lixiviations successives réalisées de manière similaire à celle définie dans la norme NF X 31.210.

Chaque lixiviat est analysé et le résultat global est exprimé en fonction des modalités de calcul proposées dans l'annexe de la norme précitée.

Les résultats obtenus sur chaque lixiviat sont consignés et conservés en mémoire, y compris pour la fraction soluble.

Les valeurs limites fixées au 1.2 de cette annexe s'appliquent au résultat global. »

Le protocole provisoire d'évaluation des déchets massifs et solidifiés comprend un schéma synoptique des tests qu'il décrit .



Les critères d'admission sur les lixiviats sont mentionnés au 2.1. des annexes I des arrêtés du 18 avril 1994 .

Les normes spécifiques citées dans les annexes I des arrêtés du 18 avril 1994 destinées à remplacer le protocole ci-dessus résumé sont maintenant publiées. Il s'agit des normes NF X 31.212 - Détermination du caractère solide massif et NF X 31.211 - Essai de lessivage d'un déchet solide initialement massif ou généré par un procédé de solidification .

Depuis la publication de ces normes, aucun texte réglementaire n'a paru pour imposer leur respect et notamment préciser les valeurs seuils correspondant aux nouveaux critères d'évaluation.

ANNEXE 2

1- Gravier 15/25 provenance CAP – DJINET Poids initial : 2119.4g

Tableau 5 : Analyse granulométrique du gravier 15/25 provenance CAP – DJINET

Dimensions des tamis		Poids cumulés des refus	Refus cumulés en pourcentage	Tamisat en pourcentage
25	20	508.2	24.00	76.00
20	16	1550.6	73.16	26.84
16	12.5	2039.0	96.20	3.80
12.5	10	2069.0	97.62	2.38
10	8	2096.2	98.90	1.10
8	6.3			
6.3	5			
5	3.15			
3.15	2			
2	1			
1	0.500			
0.500	0.315			
0.315	0.200			
0.200	0.100			
0.100	0.080			

2- Gravier 8/15 provenance CAP – DJINET Poids initial : 1591.0g

Tableau 6 : Analyse granulométrique du gravier 8/15 provenance CAP – DJINET

Dimensions des tamis		Poids cumulés des refus	Refus cumulés en pourcentage	Tamisat en pourcentage
20	16			
16	12.5	477.1	30.00	70.00
12.5	10	1273.1	80.00	20.00
10	8	1539.6	96.77	3.23
8	6.3	1564.3	98.33	1.67
6.3	5	1566.9	98.48	1.52
5	3.15			
3.15	2			
2	1			
1	0.500			
0.500	0.315			
0.315	0.200			
0.200	0.100			
0.100	0.080			

3- Gravier 3/8 provenance CAP – DJINET
Poids initial : 1005.2g

Tableau 7 : Analyse granulométrique du gravier 3/8 provenance CAP – DJINET

Dimensions des tamis		Poids cumulés des refus	Refus cumulés en pourcentage	Tamisé en pourcentage
25	20			
20	16			
16	12.5			
12.5	10			
10	8	125.2	12.45	87.55
8	6.3	433.1	43.02	56.98
6.3	5	746.4	74.25	25.75
5	3.15	965.9	96.09	3.91
3.15	2	997.1	99.19	0.81
2	1	998.4	99.32	0.68
1	0.500			
0.500	0.315			
0.315	0.200			
0.200	0.100			
0.100	0.080			

4- Sable provenance CAP – DJINET
Poids initial : 1084.4g

Tableau 8 : Analyse granulométrique du sable provenance CAP – DJINET

Dimensions des tamis		Poids cumulés des refus	Refus cumulés en pourcentage	Tamisé en pourcentage
25	20			
20	16			
16	12.5			
12.5	10			
10	8			
8	6.3			
6.3	5			
5	3.15	3.9	0.36	99.64
3.15	2	20.0	1.84	98.16
2	1	314.6	29.00	71.00
1	0.500	521.5	48.10	51.90
0.500	0.315	609.2	56.16	43.82
0.315	0.200	691.2	63.74	36.26
0.200	0.100	796.5	73.45	26.55
0.100	0.080	811.7	74.85	25.15

5- Sable roulé

Poids initial avant lavage au tamis 0.080mm : 1493.8g

Tableau 9 : Analyse granulométrique du sable roulé

Dimensions des tamis	Poids cumulés des refus	Refus cumulés en pourcentage	Tamisat en pourcentage
25 20			
20 16			
16 12.5			
12.5 10			
10 8			
8 6.3			
6.3 5	232.3	15.55	84.45
5 3.15	455.2	30.47	69.53
3.15 2	674.9	45.18	54.82
2 1	932.4	62.42	37.58
1 0.500	1121.8	75.10	24.90
0.500 0.315	1232.8	82.53	17.47
0.315 0.200	1365.4	91.40	8.60
0.200 0.100	1418.6	94.96	5.04
0.100 0.080	1422.8	95.25	4.75

6- Sable provenance KADARA

Poids initial : 1040.0g

Tableau 10 : Analyse granulométrique du sable provenance KADARA

Dimensions des tamis	Poids cumulés des refus	Refus cumulés en pourcentage	Tamisat en pourcentage
25 20			
20 16			
16 12.5			
12.5 10			
10 8			
8 6.3			
6.3 5	9.8	0.94	99.06
5 3.15	92.4	8.88	91.12
3.15 2	303.8	29.21	70.79
2 1	539.0	51.82	48.18
1 0.500	706.0	67.88	32.12
0.500 0.315	776.8	74.70	25.30
0.315 0.200	841.5	80.91	19.09
0.200 0.100	895.0	86.06	13.94
0.100 0.080	901.5	86.70	13.30

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **LONDON, C., NAVARRO, A.** *Les déchets*. Lamy environnement. Paris : Lamy S.A., 1997, pagination multiple.
2. **JEAN-GEORGES MALLOUK ,Ing** Les enrobés bitumineux Tome 1 et 2, Canada 1982.
3. **MEHU, J.** Evaluation environnementale des procédés de stabilisation des déchets : les interactions entre réglementation, normalisation et recherche. **In** : *Actes du congrès international sur les procédés de solidification et de stabilisation des déchets* ; Grenoble ; Société Alpine de Publications, 1997.
4. **MAYEUX, V.** Evaluation des procédés de stabilisation : la démarche française. **In** : *Actes du congrès international sur les procédés de solidification et de stabilisation des déchets* ; Grenoble ; Société Alpine de Publications, 1997.
5. **Agence Française de Normalisation.** Déchets - Détermination du caractère solide massif. *Normalisation Française*. N° X31-212. Paris : AFNOR, 1994.
6. **Agence Française de Normalisation.** Déchets - Essai de lessivage d'un déchet solide initialement massif ou généré par un procédé de solidification. *Normalisation Française*. N° X31-211. Paris : AFNOR, 1994.
7. **DREUX, G.** *Nouveau guide du béton*. Paris : Eyrolles, 1981.
8. **MALIER, Y.** *Les bétons à hautes performances : caractérisation, durabilité, applications*. 2^{ème} édition. Paris : Presse Nationale des Ponts et Chaussées, 1992.
9. **DIET, J.N.** *Stabilisation/Solidification des Déchets : Perturbation de l'hydratation du ciment Portland par les substances contenues dans les boues d'hydroxydes métalliques*. Thèse : Doctorat ès Sciences : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1996.
10. **BUIL, M., OLLIVIER, J.P.** Conception des bétons : la structure poreuse. **In** : *La durabilité des bétons*. Edited by J. BARON et J.P. OLLIVIER. Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1992.
11. **CHARONNAT, Y.** La fabrication et la mise en œuvre. Les contrôles. **In** : *Le béton hydraulique*. Edited by J. BARON et R. SAUTEREY. Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1982.
12. **CORMON, P.** *La fabrication du béton*. Paris : Eyrolles, 1977.
13. **SANCHEZ, F.** *Etude de la lixiviation de milieux poreux contenant des espèces solubles : application au cas des déchets solidifiés par liants hydrauliques*. Thèse : Doctorat ès Sciences : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1996.

14. **Ministère du Logement et de l'Équipement - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.** Constitution et propriétés physico-chimiques des bitumes. **In :** *Bitumes et Enrobés Bitumineux* ; Paris : Laboratoire central des ponts et chaussées, 1972.

15. **HERMENT, R.** Stabilisation au bitume de cendres volantes d'usines d'incinération d'ordures ménagères avant dépôt en décharges contrôlées. **In :** *Actes du congrès international sur les procédés de solidification et de stabilisation des déchets* ; Grenoble ; Société Alpine de Publications, 1997.

يتمحور بحثنا هذا حول امكانية تامين النفايات الصناعية الناجمة عن خزانات الرقود والأحصى خزانات المازوت المتواجدة بمحطة خزن الرقود لفضال بالحراش باستعمالنا للاسمنت (CPJ 45) درسنا تركيبات حيث تم تغيير المركبات الناعية و هذا يهدف البحث عن التجمد الامثل (خاصية ميكانيكية) اما باستعمالنا للاسمنت الزيتي فادخلنا عليه عدة نسب مئوية من النفاية و تمكنا من الحصول على نتائج مقبولة (مرضية) تجارب كيميائية قد اجرينا على النفاية المجمدة للتأكد من تبيتها

الكلمات المفتاحية : نفاية صلبة- التجمد - التثبيت - عرسانة زفتية - تامين

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 .