

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Génie Civil

Laboratoire de Construction et Environnement

MEMOIRE DE MAGISTER

Option : MATERIAU

Présentée par : M<sup>elle</sup> BENOUMECHIARA NAWEL  
Ingénieur d'Etat en Travaux Publics de l' ENTP

THEME

ELABORATION ET CARACTERISATION

D'UN MATERIAU A PARTIR D'UN

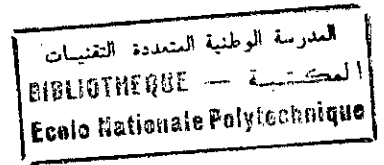
DECHET INDUSTRIEL

Soutenue le 12/05/2002 devant le jury composé de :

Président	: M <sup>R</sup> S. BELKACEMI	Maître de conférence ENP
Rapporteurs	: M <sup>R</sup> R. BOUTEMEUR	Chargé de cours ENP
	: M <sup>R</sup> A. BALI	Professeur ENP
Examineurs	: M <sup>R</sup> K. SILHADI	Maître de conférence ENP
	: M <sup>ME</sup> R. KETTAB	Chargée de cours ENP
	: M <sup>ME</sup> M. MORSLI	Chargée de cours ENP
Invité	: M <sup>R</sup> S. BENBATTA	Directeur Environnement C.R.D / SONATRACH

Ecole Nationale Polytechnique  
E.N.P 10, Avenue Hassen Badi, El-Harrach, Alger.

# REMERCIEMENTS



Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur le professeur **A. BALI** de m'avoir accueilli dans son laboratoire ; sa disponibilité et son assistance par des conseils toujours objectifs m'ont été grandement profitable. Bien au-delà de ses obligations de directeur de recherche, il a su, par ses qualités humaines, m'apporter le soutien moral en toute occasion.

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

J'adresse ici mes vifs remerciements à Monsieur **S. BELKACEMI**, Maître de conférence à l'ENP, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **K. SILHADI**, Maître de conférence, M<sup>ME</sup> **R. KETTAB**, chargée de cours à l'ENP et M<sup>ME</sup> **M. MORSLI**, chargée de cours à l'ENP pour l'intérêt qu'ils ont accordé à ce travail et je les remercie pour avoir accepté de l'examiner.

J'exprime également mes vifs remerciements à Madame **BOUTEMEUR** chef département au centre de recherche et développement de Sonatrach (C.R.D) et à Monsieur **M. ABADLIA** pour l'aide qu'ils ont apporté à la réalisation de ce travail

J'exprime ma profonde reconnaissance à Messieurs **Y. BERRICHE** directeur de l'ENTP, **B. REMKI**, sous directeur chargés des affaires pédagogiques de l'ENTP, **J. SIBACHIR**, **A. BOUHELAL**, **D. RAHMANI**, **A. ADEM**, **B. GUETTACHE**, **S. KASSIS**, **B. KARAA**, **O. KADRI** et **A. SIGHMI** enseignants de l'ENTP pour leur l'aide et leur soutien.

Mes vifs remerciements vont également à toute l'équipe du laboratoire du béton en particulier M<sup>ME</sup> **Z. KHAOUAS** et l'équipe du centre de calcul ainsi que les deux responsables de la bibliothèque

Je ne puis mentionner tous et toutes celle qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce travail. Que ceux qui m'ont aidé d'un simple encouragement trouvent ici l'expression de ma reconnaissance très sincères.

يتمحور بحثنا هذا حول إمكانية تجميع النفايات الصناعية الجامدة الناجمة عن حفر آبار البترول المتواجدة في حاسي مسعود و المترامية في أماكن تدعى بغيبي و هذا من أجل الحفاظ على البيئة و محاربة الضرر الناجمة عنها.  
باستعمالنا للإسمنت (CPJ 45) دراستنا عدة تركيبات حيث تم تغيير العوامل الداخلية و هذا بهدف البحث عن التجميد الأمثل (خصائص ميكانيكية) حيث أجريت تجارب كيميائية حول انحلال المواد الضارة المتواجدة في هذه النفاية الداخلة في تركيب الخرسانة و هذا لتأكد من ثابته.  
اماستعمالنا للإسمنت الزيتي، فلخرسانة الزيتية المكونة من 15% من هذه النفاية سمحت لنا بحصول على خصائص مقبول.  
النتائج المشجعة المحصل عليها سمحت لنا بتقييم المركبات المحصل عليها كعناصر ثانوية في البناء كحوائط الطرق و البلاطات الأرضية.

الكلمات المفتاحية: نفاية صلبة، نفاية صناعية، التجميد/التثبيت، خرسانة، خرسانة زفتية، بقايا الحفر، تجميع.

## Résumé

Notre projet consiste à étudier la possibilité de valoriser un déchet industriel solide qui provient d'un forage de puits pétrolier et plus précisément d'un borbier asséché qui se trouve au niveau des champs pétrolier de Hassi-Messaoud, et ceci dans un objectif de protéger l'environnement et lutter contre la pollution qui résulte de ce déchet.

Avec le liant hydraulique (CPJ45) 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). Des tests de lixiviation sont réalisés, sur les éprouvettes des bétons élaborés, pour vérifier la stabilité des éléments polluants, contenus dans le déchet.

Les résultats encourageants, obtenus ont permis d'envisager une valorisation du matériau élaboré en tant qu'élément de voirie (pavé, bordure de trottoir).

Avec le liant hydrocarboné, la formulation d'un béton bitumineux avec 15% de déchet incorporé, a donné des performances acceptables.

Mots clés : Déchet industriel, déchet solide, solidification/stabilisation, valorisation, déblais de forage béton, enrobé.

## Abstract

Our project consists in studying the possibility of developing a solid industrial waste which comes from a drilling mud, and more precisely of a drained mud pit which can be found in the oil fields of Hassi-Messaoud, and this in a objective to protect environment and to fight against the harmful effects which result from this waste.

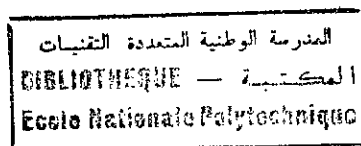
With the hydraulic binder (CPJ 45), several formulations were studied, while varying the parameters that are part of the composition of worked material, in the research for the better solidification (mechanical resistance). Test leaching is realized on the test-tubes of the worked out concretes to check the stability of the polluting elements, contained in waste.

The encouraging results made it possible to consider a valorisation out material worked out as an element of roadway system (paved, pavement borders).

With the bitumen binder, the formulation of a concrete bitumen with 15% of incorporation waste, has resulted in acceptable performances.

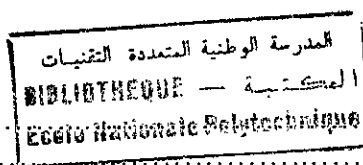
Key Words: Industrial waste, solid waste, solidification/stabilisation, valorisation, drilling mud, concrete, bituminous mix.

## SOMMAIRE



<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : LA POLLUTION ET LA GESTION DES DECHETS</b>	<b>4</b>
<b>I.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>4</b>
<b>I.2. DEFINITION DE LA POLLUTION.....</b>	<b>4</b>
<b>I.3. CARACTERISTIQUE DE LA POLLUTION.....</b>	<b>4</b>
<b>I.4. DIFFERENTS PARAMETRES INDICATEURS DE POLLUTION D'UNE ACTIVITE INDUSTRIELLE.....</b>	<b>5</b>
I.4.1. Les métaux lourds.....	5
I.4.1.1. Domaine d'utilisation des métaux lourds.....	5
I.4.1.2. La toxicité des métaux lourds vis à vis de l'homme.....	6
I.4.1.3. Les valeurs réglementaires admises.....	8
I.4.2. Les hydrocarbures.....	8
I.4.2.1. Définition d'un hydrocarbure.....	8
I.4.2.2. Classification des hydrocarbures.....	8
I.4.2.3. La toxicité des hydrocarbures vis à vis de l'homme.....	9
<b>I.5. NOTION DE DECHET.....</b>	<b>9</b>
<b>I.6. CADRE LEGAL ET REGLEMENTAIRE DES DECHETS.....</b>	<b>10</b>
<b>I.7. ASPECTS QUALITATIFS ET QUANTITATIFS.....</b>	<b>10</b>
I.7.1. Les déchets ménagers et assimilés.....	10
I.7.2. Les déchets de l'agriculture et des industries agroalimentaires.....	12
I.7.3. Les déchets industriels.....	12
I.7.4. Les déchets fermentescibles.....	12
I.7.5. Les principales catégories des déchets.....	12
<b>I.8. STRATEGIES DE TRAITEMENT DES DECHETS.....</b>	<b>13</b>
I.8.1. Arrêt de la production des déchets ou du produit générateur de déchet.....	13
I.8.2. Optimisation et innovation technologique.....	13
I.8.3. La mise en œuvre d'une politique de recyclage, de valorisation et de Réutilisation des déchets de la production et de la consommation.....	14
I.8.5. Stockage.....	14
<b>I.9. FILIERES DE TRAITEMENT DES DECHETS.....</b>	<b>16</b>
I.9.1. Valorisation énergétique.....	16
I.9.2. Valorisation sous forme de matière première.....	17
I.9.3. Valorisation en science des matériaux.....	18

I.9.3.1. Liant hydraulique et matériau de structure.....	18
I.9.3.2. Matériaux pour techniques routières et terrassements.....	19
I.9.4. Valorisation en agriculture .....	20
I.9.4.1. Valorisation de déchets inorganiques.....	20
I.9.4.2. Valorisation de déchets organiques.....	21
I.9.5. Valorisation en technique de l'environnement.....	21
I.9.5.1. Epuration des effluents liquides et gazeux.....	21
I.9.5.2. Conditionnement des déchets écotoxique par d'autres procédés.....	22
I.9.6. Filières d'élimination des déchets.....	22
<b>I.10. CONCLUSION.....</b>	<b>24</b>
<b>CHAPITRE II : ORIGINE DU DECHET ET GENERALITES SUR LE TRAITEMENT ADOPTE.....</b>	<b>25</b>
<b>II.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>25</b>
<b>II.2. DEFINITION DE FORAGE.....</b>	<b>25</b>
<b>II.3. PRESENTATION DE LA REGION DE HASSI MESSAOUD.....</b>	<b>26</b>
II.3.1. Les différentes nappes de la région de Hassi Messaoud.....	26
<b>II.4. LA BOUE DE FORAGE.....</b>	<b>28</b>
II.4.1. Fonction principales des boues de forage.....	28
II.4.2. Composition des boues de forage.....	28
II.4.2.1. Les boues dont la phase continue est l'eau.....	28
II.4.2.2. Les boues dont la phase continue est l'huile.....	29
II.4.3. Différentes types de boue.....	29
II.4.3.1. Les boues à base d'eau.....	29
II.4.3.2. Les boues à base d'huile.....	30
II.4.4. Traitement d'épuration mécanique des boues de forage.....	30
II.4.5. Source de pollution dans un chantier de forage.....	31
II.4.5.1. En surface.....	31
II.4.5.2. En sous sol.....	33
II.4.5.3. Nature des pollutions.....	33
<b>II.5. GENERALITE SUR LE PROCEDE DE STABILISATION/SOLIDIFICATION</b>	<b>34</b>
II.5.1. Solidification.....	35
II.5.2. Stabilisation.....	35
II.5.3. Objectif de la stabilisation/solidification des déchets.....	35
II.5.4. Procédé de stabilisation/solidification par des liants hydrauliques.....	35
II.5.4.1. Ciment portland.....	36
II.5.4.2. Ciment/cendre volante.....	37



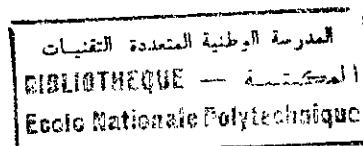
II.5.4.3. Chaux/ cendre volantes.....	37
II.5.4.4. Ciment/ silicates solubles.....	38
II.5.4.5. Argiles/carbonates.....	39
II.5.5. Procédé de stabilisation/solidification par des liants bitumineux.....	39
II.5.5.1. Liants bitumineux.....	40
II.5.5.2. Origine et composition.....	40
II.5.5.3. Traitement d'un sol contaminé par les hydrocarbures en utilisant le bitume.....	41
II.5.6. Le procédé de solidification/stabilisation par vérification.....	46
<b>II.6. ESSAI DE LIXIVIATION (AFNOR X31-210).....</b>	<b>46</b>
<b>II.7. CONCLUSION.....</b>	<b>45</b>
<b>CHAPITRE III: CARACTERISATION DES MATERIAUX ET METHODES D'ESSAIS.....</b>	<b>46</b>
<b>III.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>46</b>
<b>III.2. CARACTERISATION DU DECHET UTILISE.....</b>	<b>46</b>
<b>III.3. LE CIMENT PORTLAND ET COMPOSE DE MEFTAH.....</b>	<b>48</b>
III.3.1. Composition chimique et minéralogique du ciment.....	48
<b>III.4. GRANULATS.....</b>	<b>48</b>
III.4.1. Les sables.....	48
III.4.2. Les graviers.....	49
<b>III.5. LE LAITIER D'EL-HADJAR.....</b>	<b>49</b>
III.5.1. Composition chimique du laitier d'EL-HADJAR.....	49
III.5.2. Broyage du laitier granulé.....	50
<b>III.6. CARACTERISATION ET CHOIX DES GRANULATS.....</b>	<b>50</b>
<b>III.7. METHODE D'ANALYSE ET D'ESSAIS.....</b>	<b>56</b>
III.7.1. Formulation du mortier et bétons hydraulique.....	56
III.7.1.1. Confectionnement et malaxage.....	58
III.7.1.2. Malaxage du mortier.....	58
<b>III.8. ESSAI PYSICO-CHEMIQUE.....</b>	<b>62</b>
III.8.1. Classe des ciments.....	62
III.8.2. Surface spécifique de Blaine.....	62
III.8.4. Essais sur béton frais.....	62

III.8.4.1. Mesure de la masse volumique du béton frais.....	62
III.8.4.2. La consistance du béton.....	62
III.8.5. Essais sur béton durci.....	63
III.8.5.1. Détermination de la masse volumique du béton durci.....	63
III.8.6. Essais mécaniques.....	63
III.8.6. Essai de compression.....	63
III.8.6.2. Essai de traction par flexion.....	63
<b>III.9. FORMULATION DU BETON BITUMINEUX.....</b>	<b>64</b>
III.9.1. Composition granulométrique.....	64
III.9.2. Teneur en liant.....	64
III.9.3. Les essais de laboratoire.....	65
III.9.3.1. Essai Marshall.....	66
III.9.3.2. Essai Duriez.....	66
III.9.3.3. Compacité.....	66
III.9.4. Essais sur bitume.....	68
III.9.4.1. Pénétrabilité.....	68
III.9.4.2. Point de ramollissement bille et anneau.....	68
<b>III.10. ESSAI DE LIXIVIATION (Norme NFP X31-211).....</b>	<b>68</b>
<b>III.11. CONCLUSION.....</b>	<b>70</b>
<b>CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS .....</b>	<b>71</b>
<b>IV.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>71</b>
<b>IV.2. RECHERCHE DU POURCENTAGE DE DECHET A INCORPORER DANS     LE MORTIER.....</b>	<b>71</b>
IV.2.1. Discussion et interprétation.....	73
<b>IV.3. ANALYSE DU BETON .....</b>	<b>73</b>
<b>IV.4. ESSAI SUE BETON FRAIS.....</b>	<b>75</b>
IV.4.1. L'ouvrabilité.....	75
IV.4.2. La masse volumique.....	75
IV.4.3. Discussion et interprétation.....	76
<b>IV.5. ESSAI SUR BETON DURCI.....</b>	<b>76</b>
IV.5.1. La masse volumique du béton durci.....	76
IV.5.2. La résistance à la compression.....	77
IV.5.2.1. L'effet du rapport E/C sur la résistance à la compression.....	77
IV.5.2.2. L'effet du laitier sur la résistance à la compression.....	78

IV.5.2.3. Interprétation.....	78
IV.5.3. La résistance à la traction par flexion.....	82
IV.5.3.1. Interprétation.....	84
<b>IV.6. CONCLUSION.....</b>	84
<b>IV.7. RESULTATS DE L'ESSAI DE LIXIVIATION.....</b>	85
<b>IV.8. CONCLUSION.....</b>	86
<b>IV.9. ETUDE D'UN BETON DESTINE POUR LA REALISATION DES BORRDURES DE TROTTOIRS ET PAVES.....</b>	86
IV.9.1. Essai sur béton destiné à la bordure de trottoir type « T <sub>2</sub> ».....	87
IV.9.2. Essai béton de sur Pavé.....	87
<b>IV.10. ETUDE DE LA FORMULATION D'UN BETON BITUMINEUX.....</b>	90
IV.10.1. Teneur en liant.....	91
IV.10.2. Résistance à la stabilité Marshall.....	92
IV.10.2.1. Interprétation.....	93
IV.10.3. Le fluage.....	93
IV.10.3.1. Interprétation.....	94
IV.10.4. Densité apparente et absolue de l'enrobé contenant différents pourcentage de déchet.....	94
IV.10.4.1. Interprétation.....	95
IV.10.5. Résistance à la compression de l'enrobé.....	96
IV.10.5.1. Interprétation.....	97
<b>IV.11. CONCLUSION.....</b>	97
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	98
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	101
<b>ANNEXE 1.....</b>	104



## Liste des figures



<b>Figure 1.1 :</b> Relation producteurs- consommateurs.....	13
<b>Figure 1.2 :</b> Stratégies de traitement des déchets.....	14
<b>Figure 1.3 :</b> Cycle des déchets et sous-produits dans un processus de fabrication ou de traitement d'après Blanchad et al, 1977 .....	15
<b>Figure 1.4 :</b> Différents traitements possibles pour éliminer les déchets .....	23
<b>Figure 2.1:</b> Coupe hydrogéologique -Région Hassi-Messaoud (source PED/SH - Hassi-Messaoud) .....	27
<b>Figure 2.2 :</b> Le bourbier.....	33
<b>Figure 3.1 :</b> Analyse granulométrique des sables et graviers.....	51
<b>Figure 3.2 :</b> Composition granulaires obtenus par la méthode du « Dreux-Gorisse».....	60
<b>Figure 3.3 :</b> Granulométrie obtenue sur mélanges .....	65
<b>Figure 4.1:</b> L'effet du pourcentage du déchet sur la résistance à la compression du mortier.....	72
<b>Figure 4.2:</b> Evolution de la résistance à la compression du béton dosé à 300 kg/m <sup>3</sup> .....	80
<b>Figure 4.3:</b> Evolution de la résistance à la compression du béton dosé à 350 kg/m <sup>3</sup> .....	80
<b>Figure 4.4 :</b> Résistance à la compression du béton au laitier pour SSB = 744 cm <sup>2</sup> /g.....	81
<b>Figure 4.5:</b> Résistance à la compression du béton au laitier pour SSB = 3435 cm <sup>2</sup> /g .....	81
<b>Figure 4.6:</b> Evolution de la résistance à la traction par flexion du béton dosé à 300 kg/m <sup>3</sup> .....	83
<b>Figure 4.7:</b> Evolution de la résistance à la traction par flexion du béton dosé à 350 kg/m <sup>3</sup> .....	83
<b>Figure 4.8:</b> Evolution de la résistance à la traction par flexion d'un béton dosé à 350 kg/m <sup>3</sup> et une SSB = 740 g/m <sup>3</sup> .....	86
<b>Figure 4.9:</b> Résistance à la compression des bordures .....	88
<b>Figure 4.10:</b> Résistance à la traction par flexion des bordures .....	88
<b>Figure 4.11:</b> Résistance à la compression des pavés .....	89
<b>Figure 4.12:</b> Résistance à la traction par flexion des pavés .....	89
<b>Figure 4.13:</b> Evolution de la stabilité Marshall de l'enrobe à 30% de déchet .....	92
<b>Figure 4.14:</b> Evolution du fluage de l'enrobé à 30% de déchet.....	94
<b>Figure 4.15:</b> Compacité de l'enrobé à 30% de déchet. ....	95

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1</b> : Valeurs limites maximales des paramètres de rejets des installations de déversements industriels .....	8
<b>Tableau 1.2</b> : Différents types de déchets.....	12
<b>Tableau 1.3</b> : Amendements et engrais pour le sol .....	20
<b>Tableau 2.1</b> : Programme boue appliquée dans la région de Hassi- Messaoud .....	25
<b>Tableau 2.2</b> : Liste des déchets industriels spéciaux ultimes à stabiliser/ solidifier .....	34
<b>Tableau 2.3</b> : Proportion des principaux produits d'hydratation du ciment portland.....	37
<b>Tableau 2.4</b> : Les résultats obtenus par l'utilisation des deux absorbants .....	39
<b>Tableau 2.5</b> : Analyse des six échantillons .....	42
<b>Tableau 2.6</b> : Les rapports des résistances .....	42
<b>Tableau 2.7</b> : Critères d'admission des déchets ultimes .....	44
<b>Tableau 2.8</b> : Evolution de la fraction lixiviée en fonction du traitement utilisée .....	44
<b>Tableau 3.1</b> : Analyse chimique du déchet .....	46
<b>Tableau 3.2</b> : L'analyse physico-chimie .....	47
<b>Tableau 3.3</b> : Analyse granulométrique de déchet .....	47
<b>Tableau 3.4</b> : Composition chimique du ciment CPJ45 .....	48
<b>Tableau 3.5</b> : L'analyse chimique du laitier .....	49
<b>Tableau 3.6</b> : Analyse granulométrique des différents granulats .....	51
<b>Tableau 3.7</b> : donne un récapitulatif des résultats des essais effectués sur les granulats.....	55
<b>Tableau 3.8</b> : Résistance des ciments à 7 et 28 jours.....	61
<b>Tableau 3.9</b> : Les valeurs des compacités.....	68
<b>Tableau 3.10</b> : Caractéristiques des bitumes routiers.....	69
<b>Tableau 4.1</b> : Résistance à la compression, la masse volumique à 28 et 90 jours et Le rapport E/C.....	71
<b>Tableau 4.2</b> : Dosage des granulats en volume absolu exprimé en pourcentage.....	74
<b>Tableau 4.3</b> : Composition des bétons avec les deux dosages .....	74
<b>Tableau 4.4</b> : Evolution de l'ouvrabilité en fonction du dosage en ciment.....	75
<b>Tableau 4.5</b> : Evolution de l'ouvrabilité du béton au laitier dosé à 30% de déchet.....	75
<b>Tableau 4.6</b> : La masse volumique du béton frais .....	75

<b>Tableau 4.7 :</b> La masse volumique frais du béton au laitier dosé à 30% de déchet, C = 350kg/m <sup>3</sup> .....	76
<b>Tableau 4.8 :</b> Les masses volumiques du béton durci .....	77
<b>Tableau 4.9 :</b> Les masses volumiques du béton durci au laitier dosé à 30% de déchet, C= 350 kg/m <sup>3</sup> .....	77
<b>Tableau 4.10:</b> Evolution de la résistance à la compression en fonction du rapport E/C .....	78
<b>Tableau 4.11:</b> Evolution de la résistance à la compression du béton au laitier dosé à 30% de déchet .....	78
<b>Tableau 4.12 :</b> Evolution de la résistance à la traction par flexion du béton en fonction du Rapport E/C .....	82
<b>Tableau 4.13 :</b> Résistance à la traction par flexion du béton au laitier d'un béton dosé à 30% de déchet, C = 350 kg/m <sup>3</sup> .....	82
<b>Tableau 4.14 :</b> Pourcentage des métaux lourds dans le solidifiat .....	85
<b>Tableau 4.15 :</b> Concentration des hydrocarbures et métaux lourds .....	85
<b>Tableau 4.16 :</b> Concentration en (mg/l) des éléments lourds dans les eaux de lixiviation .....	85
<b>Tableau 4.17 :</b> La résistance à la traction par flexion et à la compression .....	87
<b>Tableau 4.18 :</b> La résistance à la traction par flexion et à la compression .....	87
<b>Tableau 4.19 :</b> Modules de richesses du béton bitumineux à différents pourcentages en déchet .....	91
<b>Tableau 4.20 :</b> Evolution de la stabilité Marshall .....	92
<b>Tableau 4.21 :</b> Evolution de fluage .....	93
<b>Tableau 4.22 :</b> Compacité de l'enrobé élaboré .....	95
<b>Tableau 4.23 :</b> Résultats de l'essai Duriez .....	96
<b>Tableau 4.24 :</b> Les valeurs de ΔV .....	96

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

---

# INTRODUCTION GENERALE

---

# INTRODUCTION GENERALE

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
المكتبة — المخطوطات  
Ecole Nationale Polytechnique

**D**e tout temps, l'homme s'est préoccupé de son environnement naturel. Toutes les civilisations anciennes, tous les humanistes ont pris conscience de la nécessité de faire corps avec l'environnement. L'entretien et la protection du milieu vital sont toujours apparus comme indispensables aux hommes d'esprit. Les préoccupations écologiques, la protection de l'environnement, notamment, l'air, l'eau et le sol sont devenues, en l'espace de quelques années, un puissant facteur de l'évolution de nos modes de production, de consommation et donc de nos modes de vie.

A l'heure actuelle, il n'est plus concevable de se débarrasser des déchets industriels liquide, pâteux ou solides sans prendre les précautions qui s'imposent à la protection de l'environnement. Il est donc nécessaire de traiter ces déchets avant de les rejeter dans le milieu naturel. Pour cela des techniques très spécialisées ont été développées (déchromatation, décyanuration, incinération, traitement physico-chimique,.....); et ceci dans un objectif de minimiser les risques de pollution du sol, des cours d'eau, des nappes phréatiques ou de la mer.

En effet, de même que les résidus gazeux se dispersent dans l'atmosphère, le cheminement des résidus liquides aboutit le plus souvent à la mer quel que soit le temps mis pour y parvenir, il n'en est habituellement pas de même pour les résidus solides qui, dans leur majeur parti, resteront à l'endroit où ils ont été déposés. Le risque de pollution est d'autant plus important que ces déchets solides soient mis en décharge plus ou moins contrôlée, renferment des éléments toxiques.

Notre pays, et depuis la 1<sup>ère</sup> conférence mondiale sur l'environnement organisée à Stockholm en 1972, a pris, progressivement, conscience de la nécessité d'intégrer la dimension environnementale dans la démarche de planification du développement et d'utilisation durable des ressources naturelles du pays, avec des quantités importantes de déchets atteignant

actuellement 4.892.000 tonnes/an dont 184.000 tonnes [1] sont considérées comme étant des déchets dangereux ou toxiques. A cela s'ajoute la non-disponibilité des lieux de stockage contrôlés pour les déchets ultimes. Il est prévu, par ailleurs, de renforcer le cadre d'organisation et juridique par des nouvelles lois qui viseront en priorité les déchets solides par la création prochaine de l'Observatoire national de l'environnement et du développement durable, du Conservatoire national des métiers de l'environnement, du Centre national des technologies de production plus propres, de l'Agence nationale des déchets et du Conservatoire national du littoral en plus de fonds importants à allouer aux communes.

Vu l'impérieuse nécessité de son développement, l'Algérie est contrainte à se pourvoir de moyens adéquats pour l'exploitation des richesses de son sol (les hydrocarbures notamment). La mise en valeur de cette manne pétrolière, et l'objectif de montée en production, va l'amener progressivement à forer de plus en plus de puits.

Le risque de pollution de l'environnement du puits, prend déjà naissance au stade de son forage. En effet, l'activité de forage fait appel à des moyens matériels lourds qui utilisent des sources d'énergie polluantes (gaz oil), des boues et liquides liant des particules parfois toxiques, rejetées et accumulées dans un emplacement appelé « Bourbier ». Le nombre de bourbiers en Algérie ne fait que croître puisque lié au nombre de forages.

Le bourbier contient généralement des mélanges de boue très peu volatiles, des eaux usées issues de lavage de matériels de forage posés sur un fond de sol plus ou moins perméable, soumis aux caprices météorologiques. L'infiltration ou la dissémination de ces déversements polluants, risquent d'entraîner la dégradation du milieu ou site originel.

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

Conscient de la réalité de cette menace, le centre de recherche et développement de Sonatrach (C.R.D) a initié un projet de recherche en collaboration avec le laboratoire de construction et environnement du département Génie civil de l'E.N.P. Le projet a pour objectifs d'étudier le traitement et la possibilité d'une valorisation ou réutilisation d'un déchet (déblais de forage) qui provient du borbier asséché du puits **OMN 223** qui se trouve au niveau des champs pétroliers de Hassi-Messaoud.

Ce travail qui entre dans le cadre de ce projet est organisé de la manière suivante :

Les premiers chapitres sont consacrés à une étude bibliographique où on présente dans un premier chapitre la diversité des déchets, notamment industriels, ainsi que leur impact néfaste sur l'environnement et par conséquent sur la santé humaine, tout en présentant les différents modes et techniques de leur traitement.

En deuxième chapitre, nous nous sommes intéressés à l'origine du déchet et à la présentation de quelques généralités sur le procédé de solidification / stabilisation adapté au traitement en vue d'atténuer le risque de pollution en utilisant des liants hydrauliques et hydrocarbonés.

Un troisième chapitre a été consacré à la caractérisation des constituants rentrant dans les différentes formulations ( mortier, béton et béton bitumineux) tels que les ciments, granulats, laitiers, qui sont utilisés comme ajout, et bitume. Les caractéristiques des constituants sont toujours comparées aux valeurs normalisées et aux recommandations.

Dans le quatrième chapitre, les résultats expérimentaux obtenus sur les produits élaborés avec ce déchet sont suivis des discussions et interprétations en montrant l'aptitude de ce déchet à être valorisé que ce soit en route ( traitement par bitume) ou en tant qu'élément secondaire de la construction (traitement par liant hydraulique). Cette valorisation est fonction de l'efficacité du traitement envisagé du point de vue résistance (solidité) et stabilité du déchet, vérifiée par le biais des tests de lixiviation.

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

---

## **CHAPITRE I**

# **LA POLLUTION ET LA GESTION**

## **DES DECHETS**

---



## I.1. INTRODUCTION

Toute vie biologique, toute activité de production ou de consommation a généré, génère et générera toujours des déchets. Ces déchets sont souvent associés à la détérioration de notre environnement et à de multiples risques pour la santé humaine. De ce fait, il est nécessaire d'envisager des solutions de gestion favorables au niveau des déchets potentiels, tant en ce qui concerne leur quantité et leur nature que leur devenir prévisible.

## I.2. DEFINITION DE LA POLLUTION

« La pollution consiste en l'introduction dans les milieux, de trop grandes quantités d'agents chimiques, physiques ou biologiques entraînant une altération de l'environnement, de nature à mettre en danger la santé humaine, à endommager les ressources alimentaires, biologiques et les écosystèmes ou encore à détériorer les biens matériels »[26].

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

« La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en presque totalité ou en partie comme le sous-produit de l'action humaine, au travers d'effet direct ou indirect altérant les modalités de répartitions des flux d'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes »[26].

## I.3. CARACTERISATION DE LA POLLUTION

La pollution est généralement caractérisée par :

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

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

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

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

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

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

#### **I.4. DIFFERENTS PARAMETRES INDICATEURS DE POLLUTION D'UNE ACTIVITE INDUSTRIELLE**

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

##### **I.4.1. Les métaux lourds**

###### **I.4.1.1. Domaine d'utilisation des métaux lourds**

Les métaux lourds trouvent de nombreuses applications dans l'industrie :

- Métallurgique : briquetage des hauts-fourneaux (exp : Cr).  
Revêtement de l'acier (exp : Zn, Mn, Cu, Cd).
- Electrique : fabrication des appareils téléphoniques et télégraphes (exp: Cd, Cu).
- Chimique : fabrication des piles (exp : Cu, Zn, Mn) et produits pharmaceutiques  
(exp : Mn).
- Radioactive : réacteurs nucléaires (exp. : Cd).

#### **I.4.1.2. La Toxicité des métaux lourds vis à vis de l'homme**

##### **a. Le chrome (Cr)**

L'ingestion du chrome trivalent ( $Cr^{3+}$ ) même en concentration relativement élevée a peu d'effet sur l'appareil digestif de l'homme, mais peut provoquer une accumulation significative de chrome dans les tissus. Par contre, l'ingestion de composés de chrome hexavalent ( $Cr^{6+}$ ) gastro-intestinale se traduit par de fortes douleurs épigastriques, des nausées, des vomissements et des hémorragies [2].

##### **b. Le fer (Fe)**

Le fer existe dans l'organisme des êtres vivants, par l'intermédiaire des aliments qu'ils absorbent à des quantités de l'ordre de 2 à 3 mg par jour. Chez l'homme dans ce cas, il n'est pas toxique [2].

##### **c. Le cuivre (Cu)**

L'accumulation du cuivre dans l'organisme entraîne des troubles au niveau du foie, du système nerveux central (désordres neurologiques), des reins et des yeux (dépôt du cuivre sur la cornée) [2].

##### **d. Le zinc (Zn)**

La présence de zinc dans l'eau de boisson ne semble pas présenter d'effets toxiques pour l'homme, même pour des concentrations élevées. Aucun trouble particulier n'a été en effet constaté chez des personnes ayant pris des quantités comprises entre 23 mg/l à 41mg/l.

Mais l'O.M.S (Organisation Mondiale de la Santé) recommande que les eaux destinées à la consommation humaine ne doivent pas contenir plus de 5 mg/l de zinc [2].

#### e. Le cadmium (Cd)

Des concentrations en cadmium dans l'eau potable, conduisent à des infections osseuses extrêmement douloureuses. Il est toxique surtout pour les reins [2].

#### f. Le plomb (Pb)

Le plomb n'est pas un élément essentiel à la vie il est au contraire considéré comme un poison. Il peut présenter des effets toxiques très sérieux pour la santé humaine quand il est absorbé en trop forte quantité. La concentration admissible maximale de plomb dans l'eau d'alimentation a été fixée par l'O.M.S à 0.05 mg/l. Il s'accumule dans l'organisme et entraîne le saturnisme chez les enfants [2].

#### g. Le manganèse (Mg)

Chez les poissons, les sels de manganèse agissent probablement comme toxiques des nerfs. Ils meurent lorsque la concentration du chlorure de manganèse atteint une valeur de 0.8 mg/l [2].

#### h. Le mercure (Hg)

Le Méthyl-mercure s'accumule principalement dans les tissus musculaires des poissons, dont ils représentent les parties comestibles.

L'homme qui consomme un poisson contaminé, absorbe presque la totalité du mercure qui y est contenu, même après cuisson.

Le Méthyl-mercure constitue un grave danger pour l'homme. En effet, les dommages qu'il inflige aux fonctions de ses nerfs, de son cerveau et de son système génétique constituent les menaces les plus sérieuses [2].

#### i. Le Nickel et ses sels (Ni)

En présence des sels de cobalt, il se produit normalement une addition des effets toxiques des deux métaux. S'il y a présence des sels de zinc en même temps, on constate que l'action toxique des deux métaux est multipliée plusieurs fois [2].

### I.4.1.3. Les valeurs réglementaires admises

En se référant aux normes algériennes réglementant les rejets d'effluents liquides industriels, les valeurs maximales admises sont représentées dans le tableau 1.1

Source: Journal officiel de RADP décret exécutif N° 93-160 du 10/07/1993 réglementant les rejets d'effluents liquides industriels.

**Tableau 1.1 : Valeurs limites maximales des paramètres de rejets des installations de déversements industriels**

Paramètres	Unité	Valeurs maximales
Température	°C	30
PH	-----	5.5 à 8.5
CYANURES	mg/l	0.1
CADMIUM	//	0.2
CHROME 3+	//	03
FER	//	05
MANGANESE	//	01
PLOMB	//	01
CUIVRE	//	03
NICKEL	//	05
Hydrocarbures	//	20

### I.4.2. Les hydrocarbures

#### I.4.2.1. Définition d'un hydrocarbure

Du point de vue chimique, l'hydrocarbure désigne un produit pur, bien défini, constitué de carbone et d'hydrogène. Au sens plus large, ce mot désigne un mélange hétérogène de composés chimiques contenant du carbone, de l'hydrogène avec, parfois, des atomes d'oxygène, d'azote et de soufre, et qui est synonyme dans ce dernier cas, d'huile et de produits pétroliers issus essentiellement des matières organiques (végétales et animales) ayant subi des transformations à des pressions et températures élevées, lors de leur enfouissement.

#### I.4.2.2. Classification des hydrocarbures

Compte tenu de la tétravalence de l'atome de carbone et de la monovalence de l'atome d'hydrogène, les hydrocarbures peuvent être classés en trois grandes familles[8]:

- Les hydrocarbures aliphatiques : ce sont les alcanes, les alcènes et alcynes qui ont respectivement les formules générales  $C_nH_{2n+1}$  ;  $C_nH_{2n}$  ;  $C_{2n}H_{2n-1}$ .
- Les hydrocarbures naphténiques : ce sont les cycloalcanes, les cyclènes et cyclanes.
- Les hydrocarbures aromatiques : de formule générale  $C_nH_{2n-6}$ .

#### I.4.2.3. La toxicité des hydrocarbures vis à vis de l'homme

- Les alcanes et les cyclanes ne sont généralement pas toxiques. Sous forme gazeuse, ils agissent de manière indirecte en diminuant la quantité d'oxygène nécessaire à l'hématose. A forte concentration ils agissent comme narcotiques, par suite de leur fixation dans les lipides du système nerveux. Après pénétration dans les poumons, ils exercent une action anesthésiante qui augmente avec le nombre de carbones de la chaîne. Ils donnent des sensations de crampes et une irritation de la muqueuse nasale.
- Le benzène et ses dérivés présentent à faible dose des effets neurotropes (ivresse puis narcose).
- Des doses plus élevées provoquent des tremblements musculaires, des convulsions et des dilatations de la pupille chez les animaux [18].

#### I.5. NOTION DE DECHET

On a coutume de définir le déchet comme « Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon » d'après la loi du 15 juillet 1975. Plus récemment, la loi française du 13 juillet 1992 a introduit la notion de «déchet ultime »[23,30] :

« Est ultime un déchet qui résulte ou non du traitement des déchets et qui n'est plus susceptible d'être traité dans des conditions techniques et économiques du moment notamment par l'extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux » [23,30].

Il apparaît clairement, à travers ces deux définitions, la voie à suivre pour assurer une bonne gestion des déchets :

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

## I.6. CADRE LEGAL ET REGLEMENTAIRE DES DECHETS

En Algérie, il existe un certain nombre de lois et décrets relatifs à la protection de l'environnement et qui sont [4]:

- Loi N° 83-03 du 05/02/1983, relative à la protection de l'environnement dont certains articles ont pour objet la protection des milieux récepteurs (Article, 47), la lutte contre la pollution des eaux (Article, 36) et la nécessité d'éliminer les déchets (Article, 90).
- Le décret exécutif N° 93-160 du 10/07/1993, réglementant les rejets d'effluents liquides industriels dans les cours d'eau.
- Le décret exécutif N° 93-161 du 10/07/1993, réglementant le déversement des huiles et lubrifiants dans le milieu naturel.
- Le décret exécutif N° 94-43 du 30/01/1994, fixant les règles de la conservation des gisements d'hydrocarbure et de la protection des aquifères associés (Article 185, 178).
- Le décret exécutif N° 84-378 du 15/12/1984, fixant les conditions de nettoyage, d'enlèvement et traitement des déchets solides urbains (Article 20,21).
- Loi N° 01-19 du 12/12/2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets

## I.7. ASPECTS QUALITATIFS ET QUANTITATIFS

Les déchets sont très divers. Aussi, on a coutume de les designer en classes tirées selon leur provenance, parmi les quelles on distingue :

### I.7.1. Les déchets ménagers et assimilés

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

La notion de résidu urbain recouvre tous ces déchets, plus ceux de la collectivité elle-même (les espaces verts, les boues de stations d'épuration...) [30];

### I.7.2. Les déchets de l'agriculture et des industries agroalimentaires

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

### I.7.3. Les déchets industriels

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

### I.7.4. Déchets fermentescibles

Déchets composés de matières organiques biodégradables, elles regroupent essentiellement les déchets susceptibles de pourrir (épluchures de légumes, déchets de viande, tonte de gazon,...), les papiers et les cartons, le bois, les textiles sanitaires non synthétiques, et les matières plastique en sont exclues[30].

### I.7.5. Les principales catégories des déchets

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

- **Les déchets inertes** : un déchet est réputé inerte dès lors que l'on considère que son potentiel polluant par rapport à l'environnement est à peu près nul. On regroupe dans cette catégorie certains déchets minéraux des activités extractives (mines, carrières) les déblais et les gravats, la fraction minérale des déchets de démolition, certains résidus de l'activité sidérurgique [23].
- **Déchets banals** : un déchet est réputé banal dès lors qu'il peut être traité par les mêmes procédés que ceux utilisés pour les ordures ménagères. Cette catégorie est celle des ordures ménagères et des résidus urbains, on y range également des déchets d'origine industrielle ou commerciale qualifiée «d'assimilables aux ordures ménagères» car elles contiennent les mêmes composants bien qu'en des proportions différentes (emballages et chutes en bois, plastique, papier, métaux...) [23].
- **Les déchets spéciaux** : sont considérés comme déchets spéciaux tous les déchets qui doivent être traités par d'autres procédés que ceux utilisés pour les ordures ménagères. Ils sont majoritairement d'origine industrielle mais également produit par les ménages (déchets



toxiques en quantité dispersée DTQD) ou l'activité agricole (les déchets phytosanitaires). Ils contiennent des substances nocives en quantité variable, certains d'entre eux, du fait de leur potentiel toxique est soumis à des contrôles et des réglementations spécifiques, ce sont les déchets toxiques et dangereux [23].

La majeure partie des déchets solides industriels algériens sont produits par les industries de transformation, notamment l'industrie chimique, l'industrie des minéraux et l'industrie mécanique et électrique. Le tableau 1.2 résume la nature de ces déchets ainsi que les quantités produites par an:

**Tableau 1.2:** Différents types de déchets [1]

<b>Nature des déchets industriels dangereux générés par l'industrie nationale</b>	<b>Quantité (tonnes/an)</b>
Déchets d'origine minérale	55.000
Boues minérales	18.000
Boues de zinc	25.000
Résidus de pétrochimie et cokéfaction	58.000
Solvants organiques et résidus de peinture acide	4.000
Acides	3.000
Boues métalliques et électriques	2.000
Résidus issus de la fabrication et du traitement du plastique	2.500

L'examen de la répartition des déchets industriels sur le territoire national permet de se rendre compte que plus de 82% de ces déchets sont générés par quatre wilayas, à savoir Annaba, Médéa, Tlemcen et Oran dont 38.024.000 tonnes de ces déchets sont actuellement stockés dans les entreprises, 37.680.400 tonnes sont des déchets pondéraux et 344.000 tonnes des déchets dangereux ou toxiques [1].

Une estimation des rejets polluants basée sur un échantillon d'environ 100 unités de production du secteur public, permet d'obtenir un ordre de grandeur significatif de la pollution générée par l'activité industrielle en Algérie. Les résultats de la simulation montrent qu'à l'échelle nationale, les entreprises industrielles génèrent par an [1]:

- Plus de 55.00 tonnes de DBO<sub>5</sub> ( demande biologique en oxygène au bout de 5 jours).
- Plus de 134.00 tonnes de matière en suspension.
- Plus de 8.000 tonnes de matière azotées.

La pollution de l'air en Algérie est générée par un certain nombre d'industries parmi les quelles nous citons : les cimenteries, le complexe électrolyse de zinc de Ghazaouet, le complexe sidérurgique de Annaba, le complexe d'engrais de Annaba[1].

## I.8. STRATEGIES DE TRAITEMENT DES DECHETS

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

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

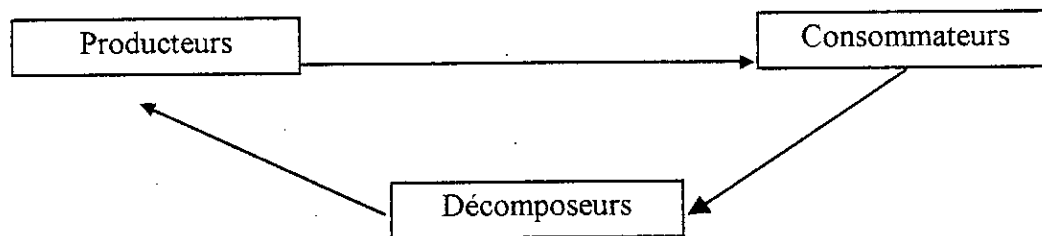


Figure 1.1 : Relation producteurs- consommateurs [30]

La gestion des déchets passe par cinq stratégies possibles :

### I.8.1. Arrêt de la production des déchets ou du produit générateur de déchet

Les problèmes, souvent liés à l'impact sur l'environnement ou à la santé humaine, peuvent conduire à la nécessité de cesser l'activité à l'origine de la production de tels déchets : le CFC, DDT, etc....

### I.8.2. Optimisation et innovation technologique

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

### I.8.3. La mise en œuvre d'une politique de recyclage, de valorisation et de réutilisation des déchets et de production et de la consommation

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

### I.8.4. Rejet «éco-compatible» des déchets

Il y a lieu d'assurer un retour «acceptable» des déchets produits dans le milieu naturel, l'éco-compatibilité peut être définie par le fait que ces déchets sont intégrés au cycle bio-géochimique sans entraîner des dysfonctionnements prévisibles ou identifiables. Cet objectif peut être atteint soit par des voies de valorisation (la réutilisation des déchets comme amendement en agriculture par exemple), soit après transformation chimique ou conditionnement [30].

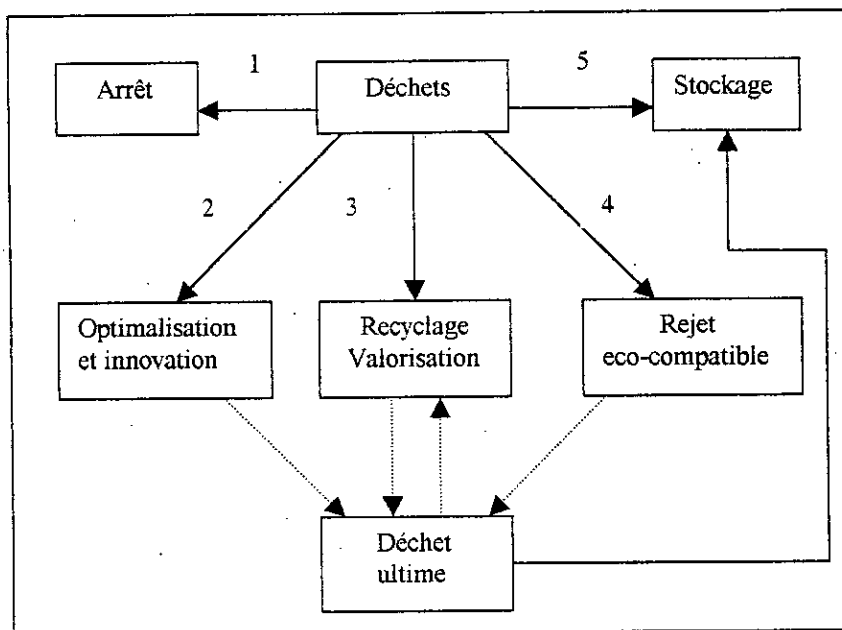


Figure 1.2 : Stratégies de traitement des déchets [30]

### I.8.5. Stockage

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

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

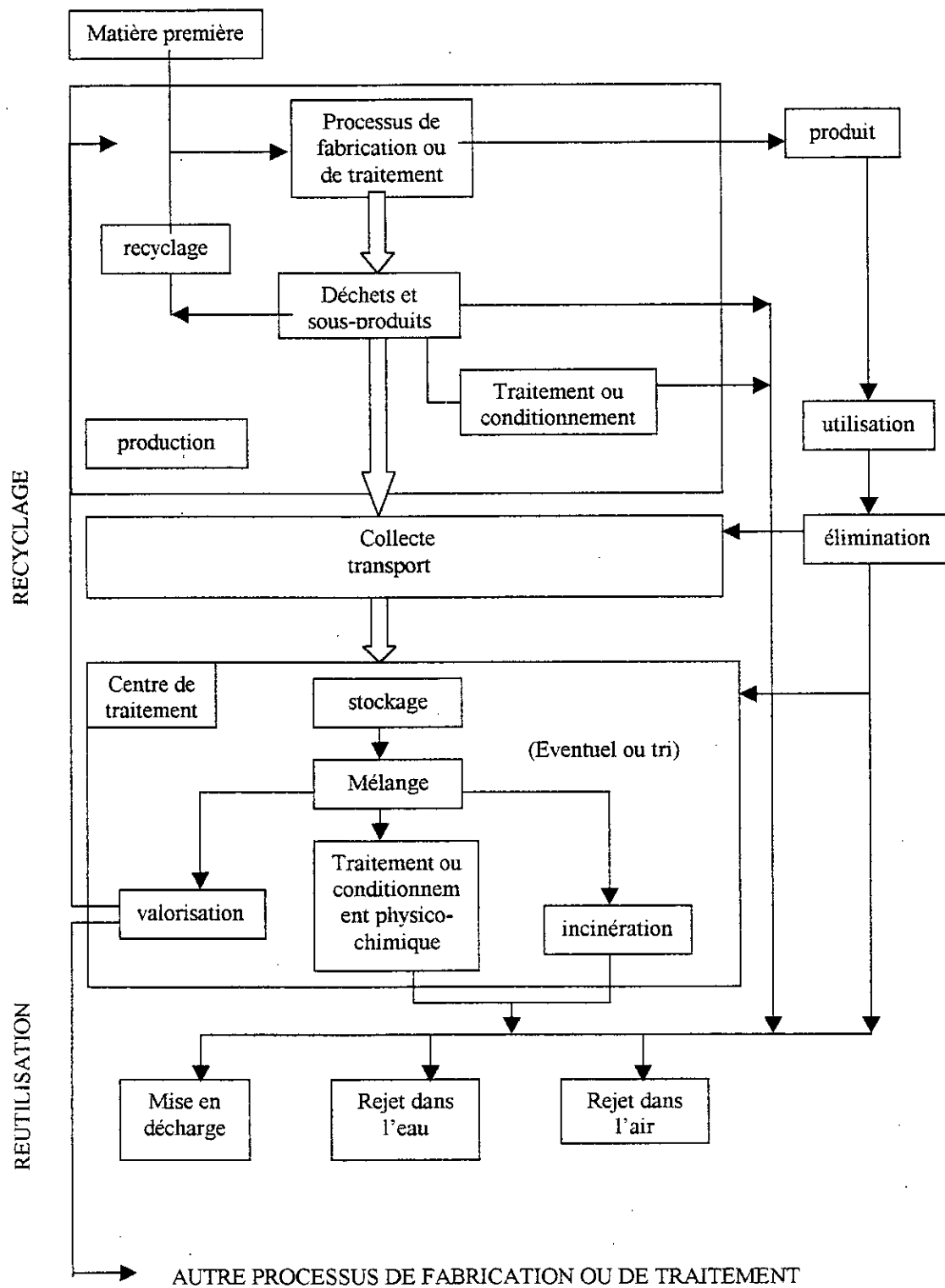


Figure 1.3 : Cycle des déchets et sous-produits dans un processus de fabrication ou de traitement d'après Blanchad et al, 1977. [23].

## I.9. FILIERES DE TRAITEMENT DES DECHETS

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

- Valorisation énergétique
- Valorisation en matière première organique et minérale
- Valorisation en science des matériaux
- Valorisation en agriculture
- Valorisation en technique de l'environnement
- Technique dite d'élimination.

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

Lorsqu'on souhaite inventorier toutes les possibilités de traitement qui peuvent être utilisées pour un déchet donné, on peut adopter la démarche suivante [30] :

- 1- Analyse physico-chimique du déchet
- 2- Evaluation qualitative
- 3- Analyse spatio-temporelle
- 4- Liste des filières scientifiques envisageables
- 5- Liste des filières techniques possibles
- 6- Etude de l'impact sur l'environnement de chacune des filières retenues
- 7- Etude technico-économique de ces filières
- 8- Choix de la (ou des) filières à mettre en œuvre.

### I.9.1. Valorisation énergétique

Cette filière a deux objectifs, assurer l'élimination des déchets et les récupérer en vue d'une valorisation sous différentes formes de l'énergie de cette réaction. Cette filière ne doit être envisagée que sous certaines conditions :

- Gisement de déchet suffisamment élevé
- Pouvoir calorifique du déchet suffisamment important

- Justification de cette solution par rapport à d'autres filières possibles (réutilisation directe, recyclage, régénération,...)
- Limiter les pollutions, nuisances et sous-produits associés à cette combustion (acides, poussière, gaz toxiques, mâchefers,...).

### **I.9.2. Valorisation sous forme de matières premières**

Cette filière s'articule sur trois points, selon la nature des matières:

#### **1. Matières premières organiques naturelles et synthétiques**

Une large gamme de déchets peut être utilisée comme source de matière première organique, il s'agit :

- De certains déchets de la consommation
- Des déchets de la chimie organique : ce produit de synthèse, solvants, huile, plastiques, caoutchouc
- Déchets végétaux et animaux, résidus de l'industrie agro-alimentaire, déchets de l'industrie des corps gras, de la papeterie.[23,30].

#### **2. Matière première minérales, métalliques et non métalliques**

Il s'agit de la récupération des métaux à partir de diverses sources de déchets ou sous-produits vus les facteurs d'ordre économique, géopolitique et écologique pour des raisons qui sont :

- L'impact toxique ou éco-toxique du rejet de certains métaux : les pilés au mercure, les effluents du traitement des unités de surface, ...ect.
- De la forte teneur de certains métaux dont des déchets ou sous-produits.
- Du manque de certains minerais sur le territoire et donc de la nécessité d'importer, c'est le cas par exemple du cuivre.
- Coût de l'élaboration et du traitement du métal :

C'est le cas, par exemple, de l'aluminium dont le recyclage par simple refusions nécessite beaucoup moins d'énergie que la fabrication à partir du minerai [23,30].

### 3. Matière première minérale à caractère non métallique

Les matières minérales non métalliques récupérables peuvent se classer en quatre grandes familles: les résidus halogénés, le soufre et ses dérivés, l'azote et ses dérivés, le phosphore et ses dérivés[30].

#### I.9.3. Valorisation en science des matériaux

Ce secteur est important dans la mesure où les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des critères de qualité trop rigoureux. Cela concerne des matériaux de grande diffusion à de forts tonnages et de prix assez modestes qui vont constituer un débouché tout à fait indiqué pour les déchets et sous produits.

##### I.9.3.1. Liant hydraulique et matériau de structure

La fabrication des liants hydrauliques et matériaux de structure met en œuvre un certain nombre d'opérations où peuvent intervenir les déchets comme matières premières de substitutions avec ou sans caractère énergétique. Parmi ces déchets nous pourrions citer [23,30] :

###### A) Ciment au laitier

Deux modes de fabrication des ciments au laitier (déchet de la métallurgie) sont utilisés :

- Addition de laitier, en remplacement des argiles, aux matières ou cru de cimenterie.
- Addition de laitier granulé (sable de laitier) au clinker et au gypse hors du broyage du ciment.

###### B) Ciment aux cendres volantes

Les cendres volantes peuvent être utilisées comme matière première en cimenterie lors de la fabrication de la pâte crue dans le procédé par voie humide. Le plus souvent, ces cendres sont utilisées sèches et ajoutées au broyeur avec les autres constituants (clinker, gypse, laitier).

**C) Les autres déchets utilisés en cimenteries**

Ce sont :

- Les déchets organiques: amines, butanol
- Les goudrons houille et de raffinage du pétrole.
- Le sel résiduaire et les boues rouges bayer.
- Les déchets des industriels extractifs (ardoise, kaolin, baryte.....).

**D) Béton et granulats**

L'utilisation de déchets en substitution aux granulats naturels est jugée positive dans le cadre des économies de matière et de la préservation des sites. Citons par exemple:

- laitier, mâchefers et cendre volante
- débris de verre et schistes houilles
- boues de déchets siliceux et boues de bayer ainsi que le sable récupéré

Notons également les bétons recyclés qui présentent une grande importance économique et un intérêt indéniable vis -à- vis de l'environnement.

**I.9.3.2. Matériau pour technique routière et terrassement**

La route est le domaine privilégié pour l'utilisation des déchets se présentant en grande quantité. Parmi ces déchets et sous-produits utilisés citons :

- Goudrons, brais et bitumes: ce sont les produits de base de la fabrication des liants routiers.
- Laitiers et scories qui peuvent être utilisés pour construire des couches de base ou de fondation.
- Cendres volantes de centrales thermiques elles sont employées comme liant hydraulique pour les remblais ou les couches d'assises.
- Caoutchoucs : Les pneus usés peuvent être utilisés entiers ou sous forme de poudrette ou de granulats dans les enrobés bitumineux et comme dispositifs de renforcement de remblai.
- Mâchefers d'incinération des ordures ménagées leur comportement géothermique permet de les assimiler à un grave de bonne qualité ils peuvent être utilisés en corps de remblai, couche de forme et couche de fondation [23].



### I.9.4. Valorisation en agriculture

Indépendamment des composts, fabriqués intentionnellement à partir de déchets (ordures ménagères, déchets végétaux) et qui sont destinés directement à une certaine culture, de très nombreux déchets, sous produits ou résidus de traitement des déchets eux-même ou des effluents trouvent des applications en agriculture, essentiellement comme amendement et engrais ou pour des traitements particuliers de certains sols. Cette utilisation est tributaire de la nature chimique et de la composition des déchets (présence de carbone, d'azote, d'alcalins dont le potassium, d'oligo-élément, zinc, manganèse, de phosphore, etc). Le tableau 1.3 donne les différents substances utilisées comme amendements et engrais pour le sol [30].

**Tableau 1.3 : Amendements et engrais pour le sol**

<b>Amendements</b>	<b>Engrais</b>
Substances plutôt destinées au sol dont elles améliorent les propriétés physiques, chimiques et biologiques	Substances qui complètent l'alimentation des plantes
<b>Amendements minéraux</b> Calcaire, magnésie, sable, argiles favorisent des colloïdales, allègent la texture des sols trop argileux ou enrichissent des sols trop sableux	<b>Engrais minéraux</b> Ils apportent, sous forme plus ou moins soluble, azote, phosphore, potassium....
<b>Amendements humidifères</b> Apport de matière organique (fumiers, lisiers...)	<b>Engrais organiques</b> D'origine végétale et animale, ils apportent azote, phosphore, calcium, magnésium...
<b>Autres produits utilisés :</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Supports de culture : matériaux organiques ou minéraux servant d'enracinement à certaines cultures ;</li> <li>- Mulchs, paillages : utilisés en arboriculture pour protéger le sol contre le ravinement et permettre une régulation hydrique et thermique du sol.</li> </ul>	

#### I.9.4.1. Valorisation de déchets inorganiques

Il s'agit essentiellement d'utilisation de certains déchets tels que :

- Cendres volantes de centrales thermiques : L'apport des cendres volantes en agriculture doit être considéré comme un traitement pour l'amélioration physique des sols. Elles améliorent la structure des sols surtout lorsqu'ils sont lourds, en régularisant l'humidité, ce qui modifie la perméabilité, la capillarité et la porosité.
- Fines calcaires : Résultant de la préparation de la roche dans la fabrication de la chaux, elles sont également commercialisées comme amendement calcaire.

- Mâchefers d'incinérations des ordures ménagères : Ils peuvent être utilisés comme amendement calcique ou comme adjuvant aux engrais (apport de phosphore et de quelques oligo-éléments utilisés) mais certains éléments, même à l'état de traces, compromettent la croissance de certains végétaux.
- Poussières de cimenteries : Les poussières de cimenteries (surtout les poussières de filtres) se caractérisent par une teneur non négligeable en alcalin ( $K_2O$ ) ce qui fait qu'elles peuvent trouver un débouché en agriculture car elles contiennent du sulfate de potassium [23].

#### **I.9.4.2. Valorisation de déchets organiques**

Les pailles, fumiers, lisiers et déjections animales de toutes sortes sont largement utilisées comme engrais en zone rurale. Il en est de même des cendres de combustion de déchets végétaux (pailler, balles de riz...) qui apportent aux sols un certain nombre d'éléments fertilisants. De même la fermentation in situ des déchets végétaux naturels (feuilles mortes) conduit à une sorte de régénération des sols par formation de terreaux et d'humus. Il existe d'autres types de déchets résultant de l'évolution du mode de vie et dont la valorisation en agriculture est solution aux problèmes de l'environnement. Il s'agit des résidus de traitement des effluents (eaux usées), résidus de fermentation méthanique (digestion des déchets urbains) et les boues des stations d'épuration des eaux [23].

#### **I.9.5. Valorisation en technique de l'environnement**

##### **I.9.5.1. Epuration des effluents liquides et gazeux**

Les effluents liquides ou gazeux font l'objet de techniques d'épuration bien identifiées: procédés mécaniques, physiques, chimiques, physico-chimiques et biologiques. Les procédés physico-chimique (floculation, précipitation, adsorption, neutralisation, oxydoréduction, ...ect), font le plus souvent appel à des réactifs industriels «noble». Par ailleurs, certains sous-produits ou déchets de traitement de ces sous-produits ont des propriétés chimiques qui les autorisent à se substituer à ces réactifs «noble» pour remplir la même fonction [30].

### **I.9.5.2. Conditionnement des déchets écotoxiques par d'autres procédés**

Le conditionnement actuel de déchets industriels se fait dans des centres de traitement, de détoxification ou de reconditionnement des résidus. Toutes ces filières font appel:

- Soit à des techniques très spécialisées (déchromation, décyanuration...), pour certains types de déchets extrêmement toxiques.
- Soit pour la grande majorité des déchets à des techniques très polyvalentes (incinération, traitement physico-chimique...), capables de faire face à des variations tant de la nature que de la quantité des déchets qu'elles ont à éliminer.

### **I.9.6. Filières d'élimination des déchets**

Longtemps réduite à la seule solution de l'abandon incontrôlé, l'activité «d'élimination» donne maintenant lieu au développement d'outils techniques qui utilisent les plus récents acquis scientifiques. L'objectif est d'aboutir à un «déchet ultime» le moins actif et dangereux possible, qui sera mis en décharge dans des sites rigoureusement contrôlés et spécialement agencés [30].

Les différentes filières possibles d'élimination sont représentées sur la figure 1.4.

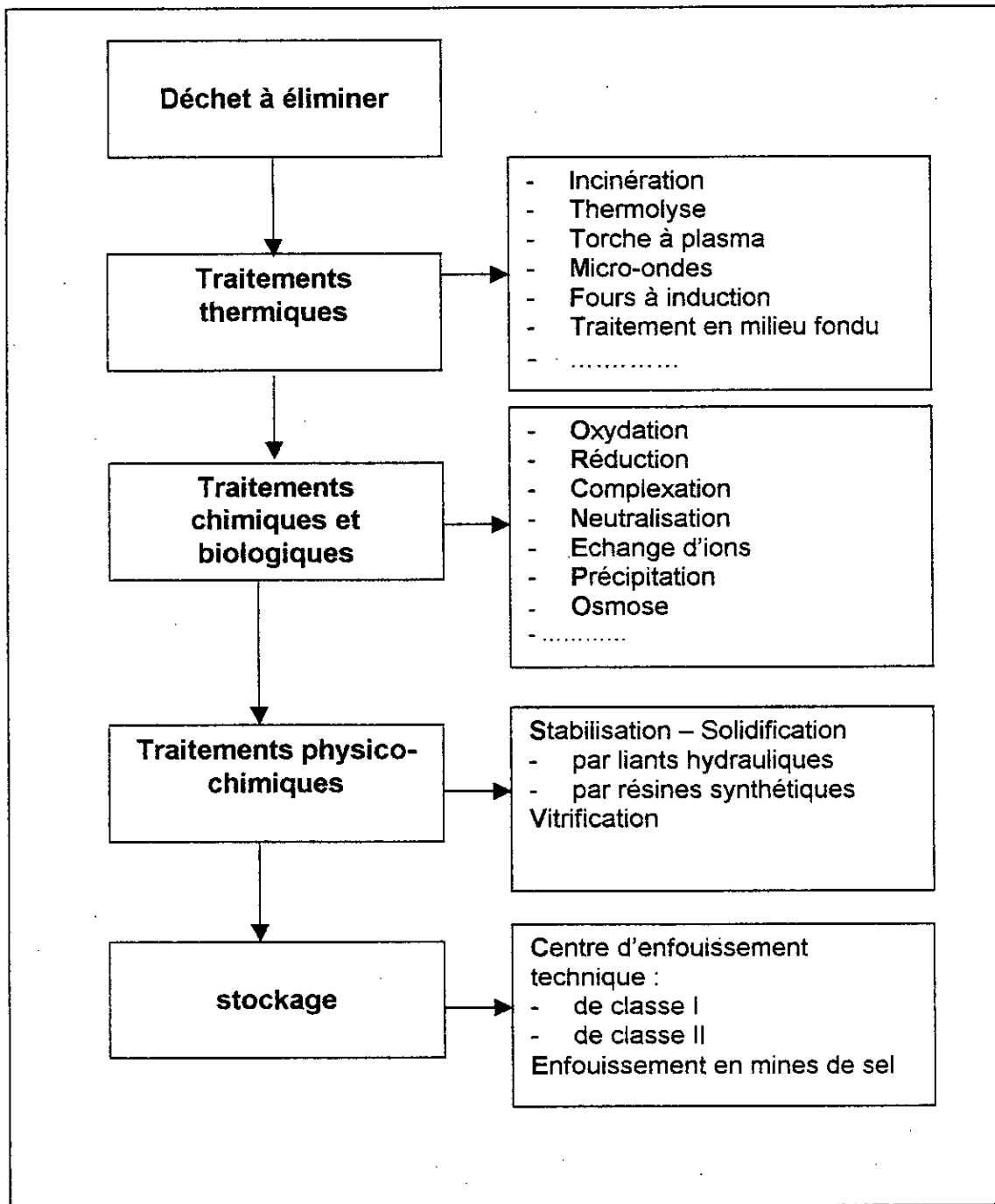


Figure 1.4 : Différents traitements possibles pour éliminer les déchets

### III.10. CONCLUSION

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

Notre étude porte sur un des déchets solides issus de l'activité industrielle, dont nous présentons l'origine dans le chapitre suivant, comme nous allons donner quelques généralités sur le procédé choisi pour traiter ce déchet.

---

## **CHAPITRE II**

**ORIGINE DU DECHET ET**

**GENERALITES SUR LE**

**TRAITEMENT ADOPTE**

---

## II.1. INTRODUCTION

La gestion des déchets solides et liquides, qui proviennent de l'industrie des forages, représente un des problèmes courants de l'industrie pétrolière. Dans l'environnement désertique, le problème est limité essentiellement à la pollution des aquifères souterrains potentiellement utilisables pour les activités humaines. Parmi les filières de traitement des déchets déjà cités au chapitre précédent, nous allons nous intéresser de plus près au procédé de solidification/stabilisation.

## II.2. DEFINITION DU FORAGE

Le forage est une opération de désagrégation mécanique des roches, en vue de pénétrer progressivement dans le sous-sol et d'atteindre le réservoir d'hydrocarbures, situé à une certaine profondeur. Le mode de forage le plus connu de nos jours est « le forage rotary » dont le principe consiste à fraiser la roche par l'effet combiné de la rotation de l'outil et de l'application d'une force, cette force est due au poids de l'outil, créé par les masses-tiges qui lui sont ajoutées au fur et à mesure pour assurer sa pénétration dans le puits de forage [13].

A la fin de chaque phase de forage, on procède à la descente d'un tubage suivie d'une cimentation.

En général à Hassi-Messaoud, on distingue quatre phases de forage qui sont représentés dans le tableau 2.1 :

**Tableau 2.1** : Programme boue appliquée dans la région de Hassi Messaoud [9].

Les phases de forage	Diamètre de l'outil (1pouce=1"=2.54cm)	Type de boue utilisée	Profondeur (m)
1 <sup>ère</sup>	17 "1/2	Boue douce bentonitique	0 - 400
2 <sup>ème</sup>	12 "1/4	Boue émulsion inverse	400 - 2250
3 <sup>ème</sup>	8 " 1/2	Boue salée saturée	2250 - 3500
4 <sup>ème</sup>	6"	Boue à l'huile	> 3500

### **II.3. PRESENTATION DE LA REGION DE HASSI MESSAOUD (HMD)**

La région de Hassi Messaoud est située à environ 900 km au Sud- Est d'Alger, à 90 km de l'Est de Ouargla, à 180 km au Sud de Touggourt et 300 km à l'Ouest de la frontière tunisienne. Le champ de Hassi- Messaoud est situé sur un plateau dont les hauteurs varient entre 90 et 180 m au dessus de niveau de la mer, avec un sec et désertique, la température monte jusqu'à 50°C, et elle décroît jusqu'à 0°C les nuits d'hiver [9].

#### **II.3.1. Les différentes nappes de la région de Hassi Messaoud**

Il existe dans la région de HMD quatre nappes, et sont de bas en haut comme suit ( voir figure 2.1) [9]:

##### **II.3.1.1. La nappe de l'Albien (captive)**

Cette nappe est formée essentiellement de grés avec quelques passages d'argile ; sa profondeur peut atteindre 1200 m.

##### **II.3.1.2. La nappe du Turonien ( captive)**

Cette nappe est formée essentiellement de calcaire fissuré et se trouve à une profondeur de 800 m.

La nappe de l'Albien et la nappe du turonien sont séparées par un horizon imperméable correspondant au cénomanien formé d'anhydrite et de marnes.

##### **II.3.1.3. La nappe du Sénono-Éocène (libre)**

Cette nappe est essentiellement carbonatée et se trouve à une profondeur de 300 m séparée de l'aquifère et du turonien par la série imperméable du sénonien salifère.

##### **II.3.1.4. La nappe du Moi-Pliocène (libre)**

Cette nappe est formée de gros graviers à moyens, de sables grossiers à fin, de lentilles argiles et de calcaires marneux, son épaisseur est de 200 m.

En raison de sa position stratigraphique (superficielle) et ses propriétés physiques (structure et texture), cette nappe risque d'être contaminée par infiltration des lixiviats provenant des bourbiers.



	Etages		P M	Lithologie	Comportement Hydrogéologique	
T E R T I A I R E	Quaternaire		0	Sable (dune, Erg..) Croûte calcaire de surface	AQUIFERE nappe du Mio-Pliocene	
	Mio-Pliocene		20 245	SABLE FIN à GROSSIERS Intercalation d'argiles et de calcaire marneux		
	Eocene		345	CARBONATE	AQUIFERE nappe du senono-eocene CARBONATE	
C R E T A C E	CARBONATE		460	Banc d'anhydrite CARBONATE		
	S E N O N I E N	L A G U N A I R E	A N H Y D R E	690	ANHYDRITE MASSIVE passage de dolomite, Argile et marne	IMPERMEABLE
					S E L	
	TURONIEN		930	CARBONATE Calcaire dolomitique et Calcaire crayeux	AQUIFERE Nappe du TURONIEN	
	CENOMANIEN		1075	Gros blanc d'anhydrite	IMPERMEABLE	
	ALBIEN		1450	Grès et Argiles sableux	AQUIFERE Nappe de l'ALBIEN	
	APCIEN		1480	DOLOMIE beige cristalline	IMPERMEABLE	

Figure 2.1: Coupe hydrogéologique -Région Hassi-Messaoud (source PED/SH - Hassi-Messaoud) [9].

## II.4. LA BOUE DE FORAGE

La tradition rapporte que c'est sur le champ de **SPINDLETOP** près de Beaumont (Texas), que la boue de forage fût utilisé pour la première fois par le capitaine LUCAS. Cependant, l'évolution s'est faite au fur et à mesure des problèmes rencontrés et des possibilités de la technique et, bien avant 1901 on utilisait déjà un mélange d'eau et d'argile [13].

### II.4.1. Fonctions principales des boues de forage

La boue de forage est un mélange plus ou moins complexe d'un liquide de base eau ou huile avec des produits divers (argile, produits chimiques) qui peuvent être ajoutés pour améliorer ses qualités initiales. Elle possède des propriétés de gonflement, de thixotropie et présente un seuil d'écoulement intéressant pour les opérations de forage et d'excavation. Ces principales fonctions sont [13] :

- Remonter les déblais appelés également « **cuttings** » à la surface.
- Refroidir et lubrifier l'outil.
- S'opposer aux venues d'eau, gaz ou l'huile grâce à la pression hydrostatique qui doit contrebalancer la pression exercée par les fluides ou gaz contenus dans les formations forées.
- Déposer sur les parois du trou un film protecteur, ce qui permet à la fois de les consolider et de les rendre étanches pendant la poursuite des travaux.
- Aider le trépan dans son travail de désagrégation de la roche en réduisant ainsi la friction sur le terrain de sonde.

### II.4.2. Composition des boues de forage

Les boues de forages peuvent être subdivisées en deux groupes [13] :

1. Les boues dont la phase continue est l'eau.
2. Les boues dont la phase continue est l'huile.

#### II.4.2.1. Les boues dont la phase continue est l'eau

Ces boues sont constituées par trois phases distinctes [13]:

- L'eau qui représente la phase la plus importante en volumes et qui peut contenir de l'huile en émulsion du type huile dans l'eau et les produits chimiques solubles.
- Les argiles ajoutées volontairement ou en provenance des formations forées donnent de la viscosité et réduisent le filtrat. Mises en suspension dans l'eau, elles gonflent en absorbant de grandes quantités de liquide et il en résulte, une viscosité du mélange. Les argiles les plus couramment employées sont du type Montmorillonite et sont plus connues des foreurs sous le nom de bentonite.
- Les solides inertes : ils sont constitués généralement partout parce qu'ils sont insolubles dans l'eau, ils réagissent que par «effet de masse» à savoir le sable, les calcaires, les dolomies... etc. Ces derniers chargent la boue mais sont chimiquement inertes.

#### II.4.2.2. Les boues dont la phase continue est l'huile

On distingue l'huile contenant 5 à 15 % d'eau au maximum et, les boues à émulsion inverse pouvant contenir jusqu'à 60% d'eau [13].

Elle est constituée aussi par trois phases distinctes :

- L'huile qui peut être une huile raffinée ou du brut et l'eau d'émulsion qui peut être douce ou salée saturée.
- Les argiles et savons qui confèrent de la viscosité et réduisent le filtrat.
- Les matériaux inertes : Sables, carbonate de calcium, barytine.

#### II.4.3. Différents types de boues

Il existe plusieurs types de boues de forage dont la distinction est basée sur les constituants de base et la phase continue de ces derniers.

On peut ainsi distinguer deux grandes familles [13] :

##### II.4.3.1. Les boues à base d'eau

Les principales boues à base d'eau sont :

###### A) Boue bentonitique

Composée de bentonite qui est le constituant de base auquel viennent s'ajouter l'eau (douce), ainsi que la sonde et/ou carbonate de sodium. Elle est utilisée comme boue de démarrage.

**B) Boue salée saturée**

Composée d'eau, de sel (KCL, NaCL), d'amidon, de chaux et d'attapulгите.

**II.4.3.2. Les boues à base d'huile****A) Boue à l'huile**

Le liquide de base est une huile. Elle est composée d'eau, de sel, d'huile ainsi, que de produits chimiques divers [13].

Elle est utilisée pour :

- Le forage de zones difficiles en présence d'un fluide à base d'eau ou d'argiles gonflantes.
- Le forage et le carottage des réservoirs.

**B) Boue à émulsion inverse**

Constituée d'une phase continue huileuse et d'une phase dispersée aqueuse d'au moins 50% du volume.

Elle est utilisée pour le forage salifère ou contenant de l'anhydrite.

**II.4.4. Traitement d'épuration mécanique des boues de forage**

Les appareils de traitement mécanique sont [4] :

**A) Tamis vibrant**

C'est la première ligne de défense contre l'excès de solides dans la boue. Tout ce qui est tamisé est séparé à 100% pour tous les solides supérieurs au diamètre de la maille et sont évacués vers le bournier.

**B) Les hydrocyclones**

Sous l'effet de l'accélération centrifuge, les solides les plus grossiers et les plus denses sont précipités sur les parois du cône et sont évacués par la buse de décharge (souverse), les solides les plus fins et moins denses sont évacués avec la majeure partie du fluide porteur, par le diaphragme de décharge de la partie supérieure (surverse).

Les principaux hydrocyclones sont :

### 1. Désableurs

Ces appareils tirent leur nom du fait que leur diamètre de coupure pour une suspension de sable dans une eau est de  $74\mu$ , ce qui correspond à la dénomination « sable » dans la classification granulométrique des solides dans les boues de forage.

Il ne faut pas nécessairement forer du sable pour les faire fonctionner, la qualité du terrain importe peu, tous les déblais d'un diamètre supérieur à  $74\mu$  seront évacués dans le bournier, que se soit du sable, de l'argile, ect.

### 2. Désilteur

Ces appareils tirent leur nom de la classification granulométrique des solides les boues de forage, car le diamètre de coupure est inférieur à  $74\mu$  ce qui correspond à la dénomination « silt ». En effet, ce diamètre est de l'ordre de  $30\mu$  pour une suspension de silt dans l'eau.

### 3. Désargileurs « Clayejector »

Cet appareil sépare les particules d'argile de  $15\mu$  et les particules de baryte de  $18\mu$ , ce qui signifie que toutes les particules d'argile inférieures à  $15\mu$  seront évacuées dans le bournier.

En d'autres termes, toutes les particules fines qui pourraient perturber les caractéristiques de la boue seront éliminées.

## II.4.5. Source de pollution dans un chantier de forage

D'un point de vue général, un chantier de forage est une source ponctuelle et potentielle de pollution ; mais, les activités, bien que se déroulant dans un périmètre défini, induisent des nuisances qui peuvent se propager en dehors des limites du site, aussi bien en surface qu'en sous-sol [4].

### II.4.5.1. En surface

Ces nuisances proviennent de la plate-forme, de la cave et surtout du bournier.

### A) Bourbier

C'est la source de pollution et de contamination la plus importante dont la figure est donnée ci-dessous. En effet lors du forage d'un puits pétrolier, le bourbier recevra toutes sortes d'effluents et de déchets. Les effluents sont constitués par différents types de boues et les divers produits ayant servi à modifier leurs paramètres rhéologiques, lorsque le forage de phases distinctes aura nécessité le changement de celles-ci. Les effluents rejetés comprennent :

- L'excédent de ciment lors d'une cimentation de tubage ou de bouchon de ciment
- Du gas-oil et des acides lors de l'acidification du réservoir
- De la soude caustique pour le réajustement du pH lors de l'utilisation d'additifs susceptibles de fermenter
- La boue en excédent pendant le déroulement de forage
- La boue retirée du puits en fin de forage quand celui-ci doit être bouché (forage sec) ou équipé pour produire (forage ayant rencontré les hydrocarbures en quantité suffisante pour être exploité [4].

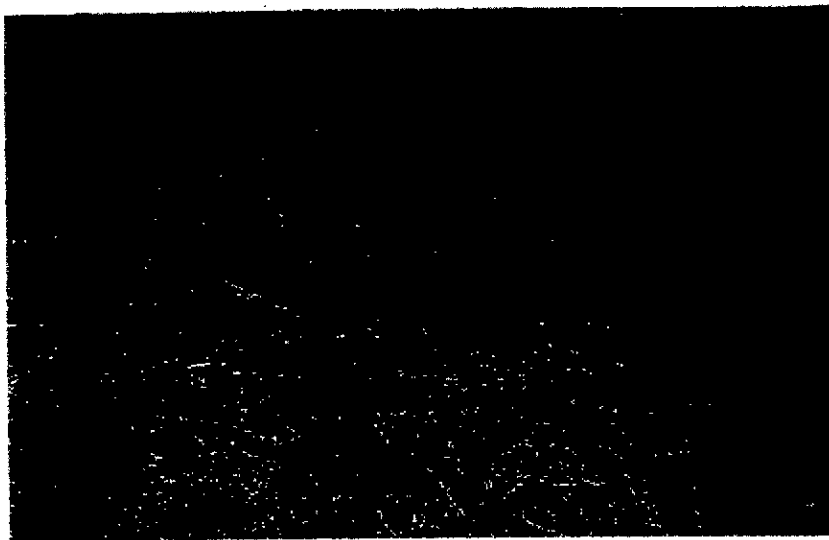


Figure 2.2 -Le bourbier

### B) La plate forme

C'est l'aire sur laquelle se déroulent les différentes activités liées aux forages, desquelles il résulte des déversements et des pertes de fluides polluants tels que : La boue, le ciment, les huiles de moteurs ; les eaux de lavage lors de l'entretien des différents appareils [4].

### C) La cave

Elle se situe en dessous du plancher. Elle subit les déversements de boue lors de la remontée du train de tiges, des eaux de nettoyage, etc.

L'évacuation de ces fluides évite leur accumulation à ce niveau, mais lorsque la cimentation du tube guide est mal réalisée, ces fluides peuvent s'infiltrer entre le tube et la cave et pénétrer de cette façon dans les formations souterraines [4].

#### II.4.5.2. En sous-sol

Ces nuisances peuvent provenir de la circulation de la boue et de la cimentation des tubages.

#### II.4.5.3. Nature des pollutions

On trouve deux types de polluants sur un chantier de forage :

##### 1. Les polluants actifs

Leur présence dans le milieu naturel induit des effets directement préjudiciables à l'environnement et par voie de conséquences à l'homme.

Ces produits comprennent:

- Les produits à boues
- Les produits à ciment
- Les huiles pour moteurs, les lubrifiants
- Les cuttings (les déblais recueillis en surface) imbibés de boue [18].

##### 2. Les polluants inertes

Par opposition aux précédents, ceux-ci ne présentent aucune activité. La pollution engendrée est principalement d'ordre esthétique car leur accumulation sur le site constitue un encombrement désagréable à regarder.

Ce sont généralement des produits à base de matières cellulosique, plastique, possédant un haut pouvoir calorifique donc facilement combustibles, ainsi que d'autres produits à base de matière métallique [4].

## II.5. GENERALITES SUR LE PROCÉDE DE STABILISATION/SOLIDIFICATION

L'historique du procédé de solidification/stabilisation date seulement de 1970, avec l'établissement de l'agence nationale de la protection de l'environnement (EPA) aux USA, dont les données ont fourni après l'agrément de l'acte de récupération et conservation des ressources (RCRA) en 1976, cependant l'implantation réelle n'était qu'en 1980 lorsque le système de management des déchets dangereux-toxiques était régularisé et promulgué sous le titre C de RCRA.

De 1990 jusqu'à présent, cette période est considérée comme une période de maturation pour ce procédé [16,17].

La législation française classe les déchets ultimes pour les quels la stabilité constitue un critère d'acceptabilité en centre de stockage respectivement à partir du 30 mars 1995 et du 30 mars 1998 en deux catégories A et B qui sont:

**Tableau 2.2** : Liste des déchets industriels spéciaux ultimes à stabiliser/ solidifier [29]

<b>Déchets de la catégorie A</b> ( 30 mars 1995)	* 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 usées).
<b>Déchets de la catégorie B</b> ( 30 mars 1998)	* Résidus de traitement d'effluents et d'eaux industrielles, de déchets ou de sols pollués ( boue 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 fonderies) ;
	* Résidus d'amiante ;
	* Réfractaires et autres matériaux minéraux usés ;
* Résidus de recyclage d'accumulateurs et de batteries.	



### **II.5.1. Solidification**

Ce sont des techniques qui permettent la transformation du déchet qui sera entouré d'une enveloppe imperméable et chimiquement inerte (ceci réduit la migration des éléments toxiques vers le milieu extérieur) en un solide compact. La solidification n'induit pas nécessairement une réaction chimique entre le déchet et l'agent de solidification [16,17].

### **II.5.2. Stabilisation**

Ce sont des techniques qui réduisent le potentiel toxique ou dangereux par transformation des espèces toxiques (cations métalliques, anions, sels) présentes dans le déchet en espèces insolubles [16,17].

### **II.5.3. Objectifs de la stabilisation/solidification des déchets**

Le procédé de solidification/stabilisation doit 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 en minimisant ainsi les risques de pollution des cours d'eau et des nappes phréatiques par des éléments toxiques.

Un matériau liant est utilisé pour atteindre les objectifs de solidification/stabilisation. La matrice liante permet, outre la solidification du déchet, 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 stabilisation est plus souvent retenu pour les matrices qui interagissent chimiquement avec le déchet en immobilisant les polluants [16,17,29].

### **II.5.4. Procédé de stabilisation/solidification par des liants hydrauliques**

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. Les liants hydrauliques sont constitués 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 chaux ; les matériaux pouzzolaniques (cendres volantes, scories, ciment au laitier...) sont souvent utilisés en tant qu'additifs à ces liants. 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 [16,17,29].

#### II.5.4.1. Ciment portland

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. C'est l'élément le plus utilisé dans le procédé de solidification/stabilisation car il permet de :

- Constituer une source d'élimination de certaines composantes contenu dans les déchets vus sa composition
- La prise et le durcissement permettent généralement la fixation des éléments réactifs des déchets.

Le ciment dit portland, du fait de l'analogie de sa composition avec celle de la pierre de portland, est 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 calcaire et argileuse. Le mélange du ciment portland et de l'eau s'apparente à un système dispersé constitué d'un réseau de particules dans une phase aqueuse. Les atomes de ces particules ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ ) présentent des liaisons insaturées qui, au contact de l'eau, sont le siège ou l'origine de nombreuses réactions d'absorption, d'hydrolyse, de dissolution, de solvation ou de cristallisation.

La pâte de ciment, mélange de ciment et d'eau initialement fluide, se structure au cours de l'hydratation pour devenir une pierre artificielle. La multiplication et la croissance des hydrates permettent de constituer un réseau solide poreux et résistant mécaniquement.

En résumé, l'hydratation du ciment portland conduit à l'obtention de trois types de produits dont les proportions sont rapportées dans le tableau 2.3 [16,17,29] :

**Tableau 2.3** : Proportion des principaux produits d'hydratation du ciment portland

Constituant	Sulfo-aluminates de calcium Ettringite et monosulfates	Tobermorite C-S-H	Portlandite Ca (OH) <sub>2</sub>
Proportion dans le ciment hydraté	20-30%	50-70%	5-15%

#### II.5.4.2. Ciment/cendre volante

Depuis très longtemps, les anciens utilisèrent avec succès des mélanges de chaux grasse et de terres ou de cendre volcanique pour la confection de mortiers ou de bétons. Les additions des cendres volantes au ciment lors de sa fabrication date de 1950. Cette idée suivie d'une application industrielle immédiate est due au français Pierre Fouilloux.

Les cendres volantes peuvent remplacer 25 à 30% le ciment portland et permettent d'obtenir une résistance remarquable au-delà de 15 jours tout en augmentant l'imperméabilité et par conséquent la durabilité.

Selon Cote, les cendres volantes contribuent à diminuer le pH des pores et relier l'eau en excès et agissent comme un absorbant pour les ions métalliques et interviennent aussi dans la stabilisation de quelques composants des déchets [16,17].

Le procédé commerciale Stablax qui date de 1973, présente une capacité de traitement de 70.000 tonnes/an et un coût de \$20 millions. Ce processus convient pour le traitement de différents types de déchets contenant les éléments suivants ; cadmium, zinc, nickel, magnésium, cuivre, sulfides et d'autres éléments tels qu'arsenic, chromium et les déchets acides en incorporant le carbone actif pour absorber les contaminants organiques[16,17].

#### II.5.4.3. Chaux/cendres volantes

La chaux grasse a sans doute été l'un des premiers liants utilisés un peu partout dans le monde. On distingue plusieurs catégories de chaux :

- La chaux vive ou éteinte
- Les chaux hydrauliques naturelles
- Les chaux hydrauliques artificielles.

Le traitement par chaux/cendres volantes est largement utilisé dans le traitement des déchets huileux, boues inorganiques et déchets de mines, stabilisation routière, boue usée. Les applications sont nombreuses dans le cas d'utilisation de la chaux seule[16,17,29].

#### II.5.4.4. Ciment/Silicates solubles

Les silicates solubles ont une fonction d'immobilisation des agents métalliques et des adaptations intéressantes comparant à utilisation 50% de chaux.

Le système est basé sur la réaction entre le ciment/silicates solubles pour produire un matériau solide et moins poreux. Le procédé le plus connu est celui de CHEMIFIX.

Le procédé CHEMIFIX fait parti des procédés de traitement des boues expérimentés depuis de nombreuses années. Il a été conçu aux U.S.A et utilisé en vraie grandeur dès 1971, comme tous les procédés CHEMIFIX qui sont pas universels (les cyanures, les chromes VI ne sont pas retenus par le matériau) mais 80 à 90% des déchets peuvent être ainsi traités. Le matériau CHEMIFIX, produit de durcissement obtenu par solidification, est pratiquement insoluble dans les conditions écologiques normales et peut être stocké sur un terrain géologiquement adapté ou être utilisé comme matériau de remblai ou matériau d'amélioration de décharge.

Le procédé de solidification/stabilisation fait appel à l'utilisation de certains additifs qui sont [16,17] :

- Carbone actif
- Carbonates
- Additifs de béton
- Le fer et aluminium
- Agents de neutralisation
- Agents d'oxydation
- Phosphates
- Agents réducteurs
- Fumée de silice, laitier
- Silicates solubles
- sulfide, organique et inorganique
- absorbant : cendre volantes, argile, minéral.

### II.5.4.5. Argiles / Carbonates

Il s'agit de l'utilisation du compactage comme traitement des déblais de forage produit par la société TOTAL<sub>s</sub> à Champs sur Marne. Ce procédé consiste à améliorer les propriétés du matériau mis en œuvre dont le principe est d'augmenter la compacité (caractérisée par le poids spécifique sec) par réarrangement de ses éléments. Le déblai de forage seul, sans ajout d'absorbant, n'est pas compactable et afin de pouvoir commencer les essais de compactage ce dernier était malaxé avec de l'argile locale (PN34) et carbonates Nautex (produit naturel d'origine planctonique) [8].

Soit, pour le mélange déblais + argile : 13% d'argile

pour le mélange déblais + Nautex : 27% de Nautex.

Les valeurs de la densité optimales et les teneurs en eau optimum pour les deux cas sont représentées dans le tableau 2.4 :

**Tableau 2.4 :** Les résultats obtenus par l'utilisation des deux absorbants

Type d'absorbant	Poids spécifique sec $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Teneur en eau optimum (%)	Résistance à la pénétration (bars)
Argile (PN34)	1.84	15.00	25.87
Nautex	1.89	10.26	14.50

Les caractéristiques de compactages sont fonction du traitement envisagé. Le traitement à l'argile a donné une meilleure résistance à la pénétration qu'en procédant avec le carbonate type Nautex, on trouve un poids spécifique de 1.89 g/cm<sup>3</sup>, ceci dépasse celui du premier traitement mais avec une résistance à la pénétration plus faible.

### II.5.5. Procédé de stabilisation/solidification par un liant bitumineux

Parmi les liants organiques, les liants bitumineux dont les propriétés permettent de fabriquer des enrobés bitumineux, constituent des matrices de choix pour le procédé de solidification/stabilisation. Le traitement consiste alors à réaliser un matériau analogue à un enrobé bitumineux dans lequel le déchet se substitue aux granulats.

Ce paragraphe est articulé comme le précédent (*cas de traitement par liant hydraulique*) dans la mesure où on peut effectuer les transpositions suivantes :

Liants hydrauliques —————> Liants bitumineux ou hydrocarbonés

Bétons hydrauliques —————> Enrobés bitumineux

### II.5.5.1. 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. Il contient essentiellement des éléments hydrocarbonés. Les liants bitumineux proviennent de gisements naturels ou de résidus de la distillation du pétrole [16,17].

### II.5.5.2. 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 fioules et bitume. Il existe plusieurs procédées de fabrications 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 sont décrits comme des mélanges des matériaux viscoélastiques, composés hydrocarbonés de masses molaires et de structures chimiques variées. Ils contiennent en moyenne 80 à 85% de carbone, 10 à 15% d'hydrogène, 2 à 3% d'oxygène et, en moindre quantité, du soufre et de l'azote ainsi que divers métaux (fer, vanadium, nickel, aluminium, silicium) à l'état de traces. 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 différent familles, auxquelles les propriétés rhéologiques des bitumes ont été reliées. Les bitumes sont ainsi fractionnés en asphaltènes et maltènes [29] :

#### 1) Les asphaltènes

Ils se présentent sous forme d'un solide dur, brun-noir, friable. Leur point de ramollissement est élevé. Un bitume est d'autant plus dur que le pourcentage d'asphaltènes est élevé. Ce sont des composés à structure condensée, cyclique et aromatique. Le rapport carbone/hydrogène (C/H) est souvent supérieur à 0.80.

#### 2) Les maltènes

Ils ont un aspect huileux et correspondent à l'association des huiles et des résines.

### 2.1) Les huiles

Il s'agit de liquides visqueux dont la couleur varie de l'incolore au brun sombre. Leur comportement est similaire à celui d'une graisse et le rapport C/H varie entre 0.5 et 0.7.

### 2.2) Les résines

Ce sont des solides noirs qui fondent par chauffage. Elles présentent une plus grande proportion de composés aromatiques que les huiles. Elles contribuent à augmenter la viscosité des maltènes.

Les bitumes aussi présentent un fort pouvoir d'adhérence et une bonne imperméabilité décrits ainsi comme des matériaux viscoélastiques. Les spécifications officielles classent ainsi les bitumes en différentes catégories ; les caractéristiques et méthodes de références comptent le point de ramollissement bille et anneau, la pénétrabilité à l'aiguille, la densité relative à 25°C, le point d'éclaire, la teneur en paraffines, le point de fragilité FRAASS et le durcissement au RTFOT.

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. Les procédés de solidification par bitume ont été étudiés il y a plus de quinze ans, pour le conditionnement des déchets radioactifs. Actuellement, beaucoup de déchets d'industries métallurgiques ou chimiques (industries d'extraction et de transformation des métaux, secteur de la galvanoplastique, industrie pharmaceutique, fabriquer de colorants minéraux, industries de la teinture, industrie pétrolière, pétrochimie ect...) sont susceptibles d'être enrobés par le bitume.

#### II.5.5.3. Traitement d'un sol contaminé par les hydrocarbures en utilisant le bitume

Il s'agit de l'utilisation d'un sol contaminé lors des infiltrations souterraines des réservoirs de stockage d'hydrocarbures aux Etats Unis, et qui est considéré comme première source de pollution souterraine des sols. Pour cela six échantillons contaminés provenant de New jersey ont été étudiés en laboratoire en vue d'élaborer un béton bitumineux [5].

La classification, la teneur en eau et le taux de contamination des échantillons sont représentés dans le tableau 2.5 :

Tableau 2.5 : Analyse des six échantillons [5]

	Type de sol					
	PCS1	PCS2	PCS3	PCS4	PCS5	PCS6
<b>Classification</b>	Sable bien gradué	Argile limoneuse	Sable limoneux	Sable mal gradué	Argile limoneuse	Sable et sable limoneux mal gradué
<b>Teneur en eau (%)</b>	7.3	14.3	24.7	14.4	19.6	10.1
<b>Niveau de contamination (%)</b>	0.11	0.12	24.7	14.4	19.6	10.1

Le sol contaminé est destiné à être utilisé en couche de surface dont l'enrobé témoin est constitué de 55% de gravier, 40% de sable et 5% de fines avec une teneur en bitume de 5.5%. Le sol contaminé est substitué au granulats naturels. L'essai Marshall réalisé sur les six PCS (Petroleum Contaminated Soil) a montré que les éprouvettes contenant le sol contaminé ont présenté une stabilité meilleure que celle de témoin qui atteint 1112 kg pour le sol 2 alors que la stabilité du témoin est de 812 kg.

Un enrobé bitumineux est destiné à être durable sur la route pour cela des études ont porté sur l'effet de gel/ dégel et le rapport immersion/sec sur l'enrobé contenant le sol, contaminé ont donné les résultats consignés dans le tableau suivant :

Tableau 2.6 : Les rapports des résistances [5]

HMA (Hot Mix Asphalt)	Immersion/sec (%)	Gel /dégel (%)
Témoin	91.7	82.3
HMA avec sol 1	98.0	89.0
HMA avec sol 2	89.3	102.0
HMA avec sol 3	87.2	93.9
HMA avec sol 4	83.8	97.0
HMA avec sol 5	93.4	98.4

Pour certains types de sols, on remarque que l'enrobé élaboré dépasse le témoin et par conséquent, même en terme de durabilité le produit est stable ( rapport immersion /sec et gel /dégel pour les sols 1 et 5 dépassent les valeurs de témoin ).



### II.5.6. Le procédé de stabilisation/solidification par vitrification

Seuls, à l'heure actuelle, les déchets radioactifs ont été traités par ce procédé fort coûteux. Le coût énergétique est élevé puisqu'il faut porter le déchet et le verre à des températures variant entre 1000 et 1400°C.

Au-delà du coût énergétique, cette contrainte de température va poser des problèmes lorsque le déchet contient des éléments volatils (mercure, plomb ou cadmium par exemple).

Une fraction importante de ces éléments va se retrouver dans les gaz issus du four, ce qui exige un traitement efficace de ces fumées. Peu d'études sont disponibles sur la vitrification des déchets industriels, mais aux contenant 20 à 30% de silice semblent bien adaptés à ce type de traitement, principalement grâce à leurs possibilités d'auto vérification. On observe en générale des pertes de masses importantes (15 à 20%) qui sont dues à des phénomènes de décomposition et/ou de volatilisation.

Afin de juger l'efficacité d'un traitement, on procède généralement à un test de lixiviation.

### II.6. ESSAI DE LIXIVIATION (AFNOR NFP X 31-210)

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

Ce phénomène, relativement simple quant à sa description, est appelé lixiviation.

Ces eaux de lixiviation arrivant au fond de la décharge, suivant le degré de perméabilité du sol récepteur, pénètrent dans la zone non saturée où leur caractère polluant peut être largement atténué avant de s'infiltrer dans la zone saturée ou les nappes aquifères. Cette dernière étape du cheminement des lixiviats constitue donc le danger potentiel d'une décharge de déchets industriels

Le test de lixiviation consiste à extraire des substances solubles contenues dans le déchet ayant subi un traitement de type consolidation (compactage après malaxage avec un absorbant) ou solidification (mélange avec un liant hydraulique ou organique).

La législation française fixe comme suit le critère d'admission des déchets ultimes au 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(...)"[16,17,29]. Les critères d'acceptation des déchets ultimes au centre de stockages ont donné au tableau 2.7 :

**Tableau 2.7 :** Critères d'admission des déchets ultimes [29]

Caractéristique	Critère d'acceptation
pH	Compris entre 4 et 13
Siccité	> 35%
Fraction soluble	< 10%
DCO ( demande chimique en oxygène )	< 2000 mg/kg
Phénols	< 100 mg/kg
Cr <sup>6+</sup>	< 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

Le tableau 2.8 donne la lixiviation de certains métaux lourds en utilisant différents traitements :

**Tableau 2.8 :** Evolution de la fraction lixiviée en fonction du traitement utilisée [16,17]

Procédé	Fraction cumulative lixiviée (%)			
	Arsenic	cadmium	Chromium	cuivre
Ciment/cendre volante	3.97	0.02	0.19	0.11
Chaux/cendre volante	4.82	0.03	0.18	0.85
Ciment/argile	3.42	0.04	0.11	0.68
Ciment /silicates	15.16	0.14	0.19	0.42

Les fractions cumulatives lixivées des métaux lourds sont bien fonction de la capacité du procédé utilisé. On trouve que le taux de lixiviation de cuivre par exemple est de 0.11% en procédant par ciment/cendres volantes alors qu'il est d'ordre de 0.85 en utilisant la chaux/cendres volantes.

## II.7. CONCLUSION

Il ressort de ce chapitre, la nécessité de connaître parfaitement le déchet (son origine et sa complexité) avant de procéder à des essais de solidification/stabilisation et ceci dans le but d'envisager correctement le procédé adéquat et que ce soit par utilisation des liants hydrauliques ou bitumineux ou par vitrification. L'efficacité d'un tel traitement reste généralement fonction de l'aptitude du déchet à être solide et stable en terme de retenir (piéger) les éléments toxiques à l'intérieur de la matrice liante et ceci fait l'objet de l'essai de lessivage.

---

**CHAPITRE III**

**CARACTERISATION DES**

**MATERIAUX ET METHODES**

**D'ESSAIS**

---

### III.1. INTRODUCTION

Le présent chapitre traite d'une part, de la détermination des caractéristiques de déchet à traiter (déblai de forage de puits pétroliers) des différents constituants entrant dans la confection d'un mélange du béton et mortier hydraulique (granulats, ciment et laitier) ainsi que le bitume qui rentre dans la formulation du béton bitumineux, et d'autre part de la présentation des modes de confection de ces derniers en indiquant les différents essais réalisés sur chaque béton dans la partie expérimentale.

Ces formulations font appel à une normalisation des modes d'essais afin de réunir au laboratoire de recherche des conditions nécessaires pour obtenir des mélanges qui peuvent satisfaire aux normes internationales et pour pouvoir comparer les qualités et caractéristiques aux résultats obtenus ailleurs.

Cependant, la normalisation rend l'essai de recherche normalisé, par la première phase qui est le choix des matériaux, à la dernière étape qui est l'écrasement des éprouvettes.

### III.2. CARACTERISTIQUES DU DECHET UTILISE

Les déblais de forage représentant notre déchet pétrolier proviennent du borbier asséché du puits **OMN 223** qui se trouve au niveau de Hassi-Messaoud. Ils présentent les caractéristiques suivantes :

- Masse volumique absolue  $\rho = 2.40 \text{ g/cm}^3$

La composition chimique sommaire du déchet est donnée au tableau 3.1 :

**Tableau 3.1** : Analyse chimique du déchet

Elément	Insolubles	R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	NaCL	CaCO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	pH	H <sub>2</sub> O
%	52.21	6.95	17.90	3.80	15.18	6.65	11.44	4.79

Une analyse minéralogique par diffraction des rayons X effectuée sur une fraction de ce matériau montre la présence des éléments suivants :

- Halite NaCl
- Quartz SiO<sub>2</sub>
- Anhydrite CaSO<sub>4</sub>
- Dolomite Ferro an Ca (Mg.Fe)(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>
- Calcite CaCO<sub>3</sub>
- Baryte BaSO<sub>4</sub>
- Illite K(ALFe)<sub>2</sub>AlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O
- Kaolinite AL<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>

Les résultats de l'analyse physico-chimique met en évidence l'existence d'éléments polluants dans notre déchet qui sont représentés dans le tableau 3.2 :

**Tableau 3.2 : L'analyse physico-chimique**

Paramètres	Résultats
<b>Taux d'hydrocarbures</b>	03 %
<b>C.O.T</b>	4.16 %
<b>Fe</b>	1.75 %
<b>Cu</b>	0 mg/l
<b>Mn</b>	250 //
<b>Pb</b>	200 //
<b>Cr</b>	200 //
<b>Zn</b>	550 //
<b>Co</b>	1050 //
<b>Ni</b>	600 //

L'analyse granulométrique à l'état naturel et après lavage est donnée au tableau 3.3.

**Tableau 3.3 : Analyse granulométrique de déchet**

Dimension des tamis( mm)	Tamisat à l'état naturel (%)	Tamisat après lavage (%)
8.0	100	100
6.3	99.88	100
5.0	99.32	99.76
4.0	98.16	99.42
2.0	82.41	94.02
1.0	70.97	82.14
0.5	59.27	63.26
0.4	36.49	60.02
0.3	25.39	51.58
0.2	10.04	46.86
0.1	5.18	40.76
0.08	4.47	40.08

Le pourcentage des fines est estimé à 40% pour l'échantillon avant lavage .

### III.3. LE CIMENT PORTLAND ET COMPOSE DE MEFTAH

Le ciment portland CPA 325 et le ciment composé CPJ 45 ont été fournis par la cimenterie de MEFTAH.

#### III.3.1. Composition chimique et minéralogique du ciment

L'analyse chimique du ciment a été effectuée au laboratoire de contrôle de qualité de la cimenterie de MEFTAH et nous avons également effectué une vérification au laboratoire centrale des travaux publics «LCTP» de Hussein-Dey. Les résultats obtenus sont illustrés au tableau 3.4 :

Tableau 3.4 : Composition chimique du ciment CPJ45

CPJ 45	Elément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	P.A.F.	Insolubles
	%	20.71	5.52	3.04	61.45	0.90	2.01	3.45	0.80

Le teneur de 3.45% en PAF montre que ce ciment contient déjà un ajout minéral.

La composition minéralogique du clinker est déduite des équations de Bogue, selon la fiche technique la composition du ciment CPJ45 est :

$$\% C_3S = 4.07 \text{ CaO} - 7.6 \text{ SiO}_2 - 1.43 \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 6.72 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 2.55 \text{ SO}_3$$

$$\% C_2S = 2.87 \text{ SiO}_2 - 0.75 \cdot C_3S$$

$$\% C_3A = 2.65 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1.69 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

$$\% C_4AF = 3.04 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

soit :

$$\% C_3S = 46.13 \%$$

$$\% C_2S = 24.84 \%$$

$$\% C_3A = 9.49 \%$$

$$\% C_4AF = 9.24 \%$$

Où :

$C_3S$  = silicate tricalcique, (SiO<sub>2</sub>, 3CaO)

$C_2S$  = silicate bicalcique, (SiO<sub>2</sub>, 2CaO)

$C_3A$  = aluminate tricalcique, (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3CaO)

$C_4AF$  = alumino-ferrite tétracalcique, (4CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

### III.4. GRANULATS

#### III.4.1. Les sables

Durant la phase de recherche du pourcentage de déchet à incorporer, le sable utilisé présente un module de finesse de 2.65, cette valeur correspondant à un sable qui convient bien à l'obtention d'une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.

Dans la deuxième phase qui concerne la formulation du béton hydraulique, Le sable roulé de module finesse de 3.20 est utilisé ceci convient pour la recherche d'une résistance élevée, tout en présentant un manque de fines.

L'analyse granulométrique des deux sables est présentée au tableau 3.6.

### III.4.2. Les graviers

Les graviers utilisés ont été fournis par la carrière «C.P.V.A d'Alger ex :carrière jobert ». Ce sont des graviers concassés de haute qualité d'origine silico-calcaire, dont la classe granulaire est : 3/8 et 8/15. L'analyse granulométrique des deux classes de gravier est présentée au tableau 3.5 :

## III.5. LE LAITIER D'EL-HADJAR

Le laitier du haut fourneau est un sous produit de l'élaboration de la fonte. Il est obtenu par la fusion de la gangue du minerai de fer, de combustible (coke) et de fondants (calcaire).

Il s'agit d'un ajout hydrauliquement actif, grâce à l'hydroxyde de calcium ( $\text{CaOH}_2$ ) produit par l'hydratation du clinker. Pour notre étude il nous a été fourni par le complexe sidérurgique d'EL-HADJAR (ANNABA). Il a la forme d'un sable de granulométrie 0/3mm, de couleur claire, de masse volumique apparente  $1.2 \text{ g/cm}^3$  et de masse volumique absolue  $2.80 \text{ g/cm}^3$ .

### III.5.1. Composition chimique du laitier d'EL-HADJAR

L'analyse chimique du laitier a été effectuée au laboratoire central des travaux publics de Hussein-Dey. L'analyse chimique obtenue est donnée dans le tableau suivant:

Tableau 3.5 : L'analyse chimique du laitier

Elément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	P.A.F	Insoluble
%	38.00	6.96	4.42	39.40	3.71	0.07	0.72	/

Selon la définition de « Keil », l'indice d'hydraulicité «  $I_H$  » du laitier est donné par l'équation suivante :

$$I_H = \frac{\text{CaO} + \text{CaS} + 1/2\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \text{MnO}} \quad (3.1)$$

Soit  $I_H = 1.27$  ; Le laitier utilisé est satisfaisant [19].



D'autre part et selon la définition donnée par la norme (BS 6699,1986) le module chimique du laitier est donné par :

$$M_D = \frac{CaO + CaS + Al_2O_3}{SiO_2} \quad (3.2)$$

Soit égale à  $1.22 > 1$ .

La valeur du rapport  $CaO/SiO_2$  égale à  $1.04 < 1.40$  suppose que le laitier d'EL-HADJAR est conforme aux spécifications.

### III.5.2. Broyage du laitier granulé

Le laitier a subi avant son broyage et pendant quelques heures un séchage, le broyage est réalisé dans un broyeur industriel de capacité de 7 kg Afin d'obtenir la finesse voulue qui dépend de la dureté du laitier, il a fallu deux heures pour atteindre  $3435 \text{ cm}^2/\text{g}$  alors que pour atteindre  $SSB = 740 \text{ cm}^2/\text{g}$  une demi-heure était suffisante.

### III.6. CARACTERISATION ET CHOIX DES GRANULATS

Les caractéristiques physiques et mécaniques du béton hydraulique frais et durcis, ainsi que celles des bétons hydrocarbonés sont directement liées aux granulats (sable et gravier), il est donc nécessaire de caractériser et optimiser au maximum les matériaux utilisés.

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

Tableau 3.6 : Analyse granulométrique des différents granulats

Dimension(mm)	Tamisats cumules (%)			
	sable roulé	sable concassé	gravier (3/8)	gravier(8/15)
0.008	0.60	13.12	/	/
0.100	/	14.50	/	/
0.160	2.10	/	/	/
0.200	/	19.25	/	/
0.315	7.00	24.37	2.13	/
0.400	/	27.48	2.16	/
0.500	/	30.44	2.19	/
0.630	28.40	/	/	/
1.000	/	48.18	2.33	/
1.250	63.90	/	/	/
2.500	78.80	76.48	4.10	/
3.150	/	/	/	/
4.000	/	/	/	0.54
5.000	/	99.96	35.38	0.88
6.300	100	100	64.77	2.12
8.000	/	/	84.13	14.33
10.00	/	/	97.38	35.69
12.50	/	/	100	71.79
16.50	/	/	100	96.79

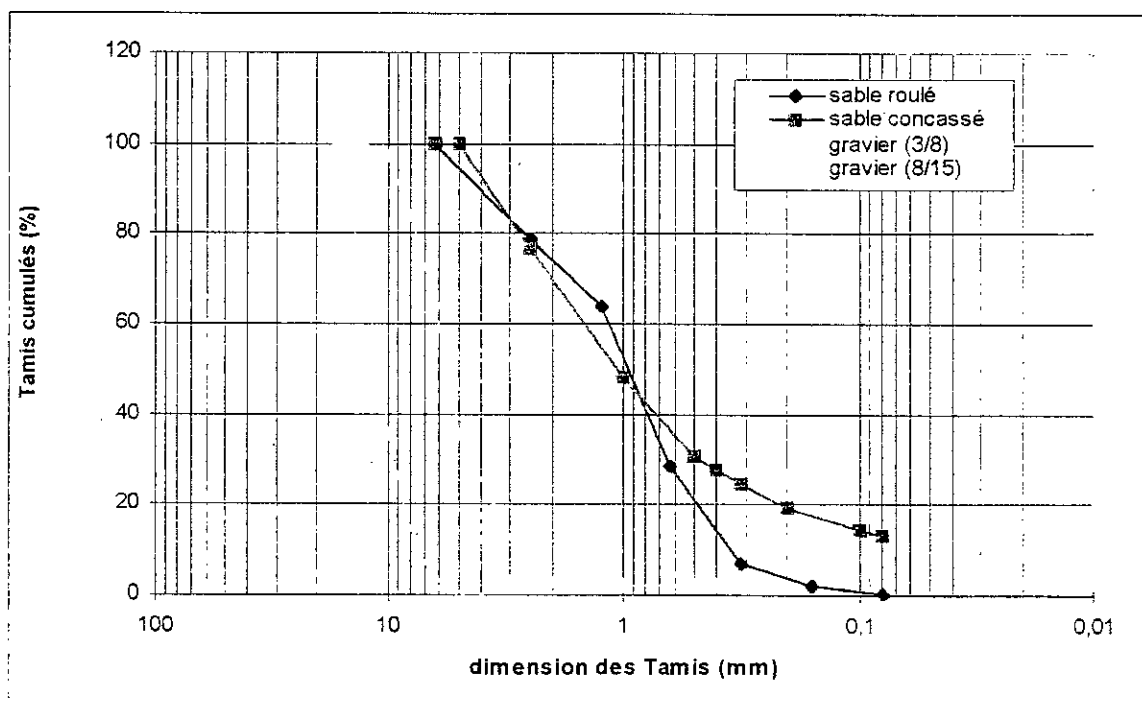


Figure 3.1 : Analyse granulométrique des sables et graviers

Dans ce qui suit, nous allons citer quelques essais de caractérisations

### III.6.1. Essais d'équivalent de sable (Norme NFP 15-589)

Cet essai, utilisé de manière courante pour évaluer la propreté de sable entrant dans la composition des bétons, l'est aussi pour les sols. L'essai consiste à séparer les particules fines d'un poids défini de sable par une solution flocculante, dont on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, après agitation on mesure une hauteur ( $H_1$ ) qui correspond au sédiment et ( $H_2$ ) au sédiment + flocculat.

L'équivalent de sable est donné par :

$$ES = (H_1 / H_2) * 100 \quad (3.3)$$

Le sable pour mortier présente un ES à vue de 94% et 90% au piston. Ce sable est jugé propre et convient aux bétons de qualité.

Le sable roulé présente un ES à vue de 82% et 80% au piston. Ce sable est jugé propre, à faible pourcentage de fines argileuses, convenant parfaitement pour les bétons de qualité.

### III.6.2. Essai d'équivalent de sable à dix pour-cent de fines (Norme NFP 18-597)

Cet essai, permet de mesurer la propreté d'un sable dans un état standard de 10% de fines maximum. Il réalise de façon classique, après avoir réduit la teneur en fines du sable à la valeur de 10% lorsque celle-ci, à l'état naturel, est supérieure à 10%. Ce matériau est sélectionné par échantillonnage, dans un état légèrement humide afin de ne pas perdre de fines. Il est tamisé sur un tamis de 2 mm d'ouverture, le tamisat et le refus étant lavé afin de récupérer toutes les fines.

- Si le pourcentage de filler est inférieur ou égal à 10%, on exécute directement l'essai d'équivalent de sable de manière classique.
- Si le pourcentage de filler est supérieur à 10 %, on procède à une augmentation du pourcentage de la fraction sableuse 0.08/2 mm, afin de ramener la teneur en filler du sable à 10%.

Le sable concassé 0/3 mm provenant de la carrière "C.P.V.A d'Alger ex : carrière jobert" présente un ES à dix pour-cent de fines de:  $ES = 58\%$ . Ce sable est jugé propre.

### III.6.3. Masse volumique absolue des sables et graviers

La formulation d'un béton hydraulique ou bitumineux passe obligatoirement par la connaissance de la masse volumique des grains d'un granulat qui n'est autre que la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

- $\rho = 2.69 \text{ g/cm}^3$  ( pour le gravier 3/8 et 8/15)
- $\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$  ( sable roulé)
- $\rho = 2.67 \text{ g/cm}^3$  ( sable concassé).

### III.6.4. Module de finesse (Norme NFP 18-304)

Le module de finesse d'un sable correspond à la somme des refus exprimés en pourcentage des refus cumulés, ramenés à 1/100 pour les tamis d'ouverture (mm) :

0.16 - 0.315 - 1.25 - 2.50 - 5.

- $M_F = 2.65$  (pour le sable pour mortier)
- $M_F = 3.19$  (pour le sable roulé).

### III.6.5. Coefficient d'aplatissement (Norme NFP 18-561)

La détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats dont le pourcentage pondéral des éléments vérifie la relation :  $G/E > 1.58$  ( la grosseur excède 1.58 fois l'épaisseur).

Le coefficient s'obtient, en utilisant successivement, et pour le même échantillon de granulats :

- une série de tamis normalisés à mailles carrées
- une série de tamis à fentes de largeur normalisée

La norme préconise un coefficient inférieur à 30%, pour les deux classes granulaires on trouve:

$$A = 17.80\%$$

### III.6.6. Essai Los Angeles (Norme NFP 18-573)

L'essai consiste à estimer la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques.

Il est réalisé sur les classes granulaires 4/6.3, 6.3/10 et 10/14. On place 5 kg de granulats et des boules en acier (7 à 11 de 417 g) dans un tambour muni d'une plaque intérieure suivant la génératrice.

Après un nombre normalisé de tours, on récupère le passant P au tamis de 1.6 mm. Le coefficient Los Angeles est :

$$LA = 100 P / 5000 \quad (3.4)$$

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

Pour nos graviers on trouve :

- LA (4/6.3) = 24.80%
- LA (6.3/10) = 25.80%
- LA (10/14) = 24.24%.

### III.6.7. Essai d'usure Micro - Deval (Norme NFP 18-572)

L'essai micro - deval est réalisé sur les mêmes classes granulaires 4/6.3, 6.3/10 et 10/14 utilisé pour Los Angles. Il estime la résistance à la fragmentation par choc et à l'usure au contact par l'eau, 500 g de gravillons sont placés avec une charge abrasive de 2 à 5 kg d'acier de 10mm de diamètre. Le cylindre tourne à 100 tr /mn pendant 2 heures, si P est la fraction passant au tamis de 2 mm le coefficient micro-deval est égale à :

$$MD = 100 P / 500 \quad (3.5)$$

La norme NFP 18-572 préconise un coefficient mico-deval inférieur à 35%, cette valeur est d'autant plus élevée que le granulat est moins bon.

Les valeurs trouvées sont :

- MD(4/6.3) = 20.21%
- MD(6.3/10) = 19.40%
- MD(10/14) = 20.04%.

### III.6.8. Essai de propreté (Norme NFP 18-301)

La norme NFP 18-301 prescrit que dans les granulats le pourcentage des impuretés (vase, limon, argile et matière solubles) susceptibles d'être éliminées par le lavage et décantation

successive, ne doit pas dépasser 5%, cette valeur est selon Dreux trop élevée et il prescrit de ne pas dépasser 1.5% pour avoir des granulats pour bétons de qualité.

On trouve :

- Gravier (3/8) = 1.20%
- Gravier (8/15) = 0.44%.

Le tableau 3.7 donne un récapitulatif des résultats des essais effectués sur les granulats

ESSAI	RESULTATS	REMARQUE ET OBSERVATION
Equivalent de sable (NFP 18-598)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sable pour mortier ES(à vue) = 94% ES(à piston) = 90%</li> <li>• Sable roulé ES(à vue) = 82% ES(à piston) = 80%</li> </ul>	<p>Sable jugé propre et convient aux bétons de qualité et haute résistance, ainsi aux bétons exceptionnels.</p> <p>Sable propre à faible pourcentage de fines argileuse convient parfaitement pour les bétons de haute qualité.</p>
Equivalent de sable à 10% de fines (NFP 18-597)	Sable concassé ES = 58%	Sable jugé propre pour formulation de béton bitumineux
Module de finesse (NFP 18-304)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sable pour mortier <math>M_F = 2.65</math></li> <li>• Sable roulé <math>M_F = 3.19</math></li> </ul>	<p>Sable convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une résistance avec risque de ségrégation limitée</p> <p>Sable à utiliser pour la recherche de résistances élevées, mais on aura en général une moins bonne ouvrabilité et un risque de ségrégation.</p>
Coefficient d'aplatissement (NFP 18-561)	A = 17.80%	Satisfaisant aux normes
Essai Micro – Deval (NFP 18-572)	MD(4/6.3) = 20.21% MD(6.3/10) = 19.40% MD(10/14) = 20.04%	Selon les normes ce gravier est de bonne qualité
Essai Los Angeles (NFP 18-573)	LA(4/3.6) = 25.80% LA(6.3/10) = 24.24% LA(10/14) = 24.80%	Les valeurs de Los Angeles sont satisfaisantes aux normes
Essai de propreté (NFP 18-301)	Gravier (3/8) = 1.20% Gravier (8/15) = 0.44%	Gravier de propreté acceptable

### III.7. METHODE D'ANALYSE ET D'ESSAIS

#### III.7.1. Formulation du mortier et bétons hydrauliques

##### A) Formulation du mortier

Comme il est toujours, intéressant, en première phase d'éliminer le paramètre gravier, les essais sur le pourcentage de déchet à incorporer sont réalisés sur mortier.

La composition des mortiers, identique à celle du mortier normal ( NFP 15-403) est la suivante :

- Ciment CPA 325 : 1350 g.
- Sable : 450 g.

##### B) Formulation du béton

La formulation d'un béton qui consiste à sélectionner de bons constituants, puis à optimiser leurs proportions afin d'obtenir, un mélange possédant deux qualités essentielles à savoir : la résistance et l'ouvrabilité or ces deux qualités sont étroitement liées l'une à l'autre mais varient en sens inverse. La recherche simultanée de ces deux qualités pose un éternel dilemme dont on ne peut sortir que par des solutions de compromis. De plus, il convient de rechercher d'autres qualités( résistance au gel, étanchéité.....).

La formulation du béton par la méthode de « Dreux-Gorisse » présente l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantier et ayant donné satisfaction. Elle est d'autre part très simple d'utilisation puisqu'elle demande que la connaissance les courbes granulométriques des granulats utilisés dans les méthodes de Bolomy, d'Abrams, de Caquot, de Joisel et Fraury, et après avoir réalisé une composition à partir de cette méthode il est toujours possible de procéder à quelques essais en faisant varier les proportions des différents granulats pour vérifier si une amélioration des qualités du mélange paraît réalisable.

Dans cette phase, le béton témoin formulé servira comme référence par rapport au béton contenant 30% du déchet.

##### B.1. Détermination de la composition du béton binaire par la méthode « Dreux-Gorisse »

La composition granulométrique optimale tracée sur un graphique à échelle semi-logarithmique est représentée par une ligne brisée OAB : le point B(à l'ordonnée 100%) est

confondu avec le point d'ordonnée 100% de la courbe granulométrique du plus gros granulat ; le point de brisure A à des coordonnées ainsi définies.

- En abscisse

si  $D \geq 25\text{mm}$  l'abscisse est  $D/2$

si  $D < 25\text{mm}$  l'abscisse est située au milieu du segment gravier limité par le module 38 (tamis de 5mm) et le module correspondant à  $D$ .

- En ordonnée :

$$Y_D = 50 - \sqrt{D} - K \quad (D \text{ en mm}) \quad (3.6)$$

Le terme correcteur  $K$  dépend du dosage de ciment, de l'efficacité de serrage, de la forme des granulats du module de finesse du sable voir tableau -A- annexe 1.

Pour le dosage de  $350 \text{ kg/m}^3$  le  $K$  choisi est de 4.2 alors que pour le dosage de  $300 \text{ kg/m}^3$  le  $K$  est égal à 6.2.

Sur la courbe granulométrique des granulats composants, on trace la courbe de référence OAB et on porte des lignes de partage entre chacun des granulats en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier, au point de 5% de la courbe du granulat suivant, et ainsi de suite (Figure 3.2).

Au point de croisement de la ou les droites de partage et la courbe de référence, on lira le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats.

Pour un dosage  $C$  en ciment, le volume absolu des grains de ciment est :  $V_C = C / \rho_C$

Où  $\rho_C$  est la masse spécifique des grains de ciment la valeur du coefficient de compacité  $\gamma$  choisit dans le tableau -B- annexe 1 est fonction de  $D$ , de la consistance et de l'efficacité du serrage.

Le volume absolu de l'ensemble des granulats est :

$$V = 1000 \gamma - V_C$$

Si  $P_1, P_2$  sont les pourcentages en volume absolu des granulats déterminés à partir de graphique. Les volumes absolus de chacun des granulats sont :

$$V_1 = P_1 * V_G$$

$$V_2 = P_2 * V_G$$

pour les masses spécifiques  $\rho_1, \rho_2$  des granulats, les masses de chacun d'eux sont :

$$P_1 = V_1 * \rho_1$$

$$P_2 = V_2 * \rho_2$$



Des corrections et ajustements du dosage seront effectués suivant l'ouvrabilité et la résistance mécanique trouvées.

Pour le même coefficient de compacité  $\gamma = 0.810$  et les deux dosages en ciment  $C = 300\text{kg/m}^3$  et  $C = 350\text{kg/m}^3$ , les compositions des bétons sont les suivantes :

$$M_{\text{CIMENT}} = 300 \text{ kg}$$

$$M_{\text{SABLE}} = 945 \text{ kg/m}^3$$

$$M_{\text{G1}(8/15)} = 959 \text{ kg/m}^3$$

$$E / C = 0.65 \text{ soit } V_E = 194 \text{ litres.}$$

$$M_{\text{CIMENT}} = 350 \text{ kg/m}^3$$

$$M_{\text{SABLE}} = 887 \text{ kg/m}^3$$

$$M_{\text{G}(8/15)} = 975 \text{ kg/m}^3$$

$$E / C = 0.55 \text{ soit } V_E = 192 \text{ litres.}$$

## B.2. Incorporation de laitier broyé

En considérant la formulation témoin, cette phase consiste à incorporer 30% de déchet et un ajout ( il s'agit d'un laitier broyé) dont sa surface spécifique est de  $3435 \text{ cm}^2/\text{g}$  ou  $740 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

### III.7.1.1. Confectionnement et malaxage

Selon les règles B.S 4550 partie 3, le malaxage du béton se fait comme suit :

- Placer le sable, le liant ( éventuellement l'ajout) et le gravier dans le malaxeur.
- Malaxer à sec pendant 15 secondes.
- Ajouter l'eau d'une façon uniforme pendant les 15 secondes qui suivent. Continuer le malaxage durant 180 secondes.
- Remuer le béton à l'aide d'une truelle pour éviter le phénomène de ségrégation.
- Directement après malaxage on passe aux essais sur béton frais, puis on remplit les moules à raison de deux couches, la vibration du béton moulé a été effectué sur une table vibrante à raison de 30 secondes la couche.
- En fin, araser et lisser la surface du béton à l'aide d'une truelle.
- Les éprouvettes, sont en suite laissées dans le laboratoire pendant 24 heures, après démoulage, elles sont conservées à l'air libre jusqu'à la date de l'essai.

Nous rappelons que pour 30% de déchet l'ajout de laitier suivant la surface spécifique était répartie comme suit :

Pour  $SSB_1 = 3435 \text{ cm}^2/\text{g}$  le pourcentage incorporé varie de : 25, 20 et 10%.

Pour  $SSB_2 = 740 \text{ cm}^2/\text{g}$  le pourcentage incorporé varie de : 20, 15, 10 et 5%.

### III.7.1.2. Malaxage du mortier

Le mélange doit être effectué au moyen du malaxeur spécifique par la norme (NFP 15-411), le malaxeur étant en position de formulation l'opération consiste à :

- Verser l'eau dans le récipient, lui ajouter le liant (ciment).
- Mettre le malaxeur en marche à la vitesse lente pendant une minute : dans les 30 dernières secondes, introduire le sable.
- Mettre le malaxeur à la vitesse rapide pendant 2 minutes.
- Arrêter le mouvement, avec le batteur démonté de son axe, racler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune partie du mortier n'échappe au malaxage.
- Après remontage du batteur, reprendre le malaxage pendant 2 minutes à vitesse rapide.
- En fin, on remplit les moules. La vibration s'effectue à la table à choc à raison de 60 coups/seconde.
- Araser et lisser les éprouvettes et après 24 heures, elles sont conservées à l'air libre jusqu'à la date de l'essai.

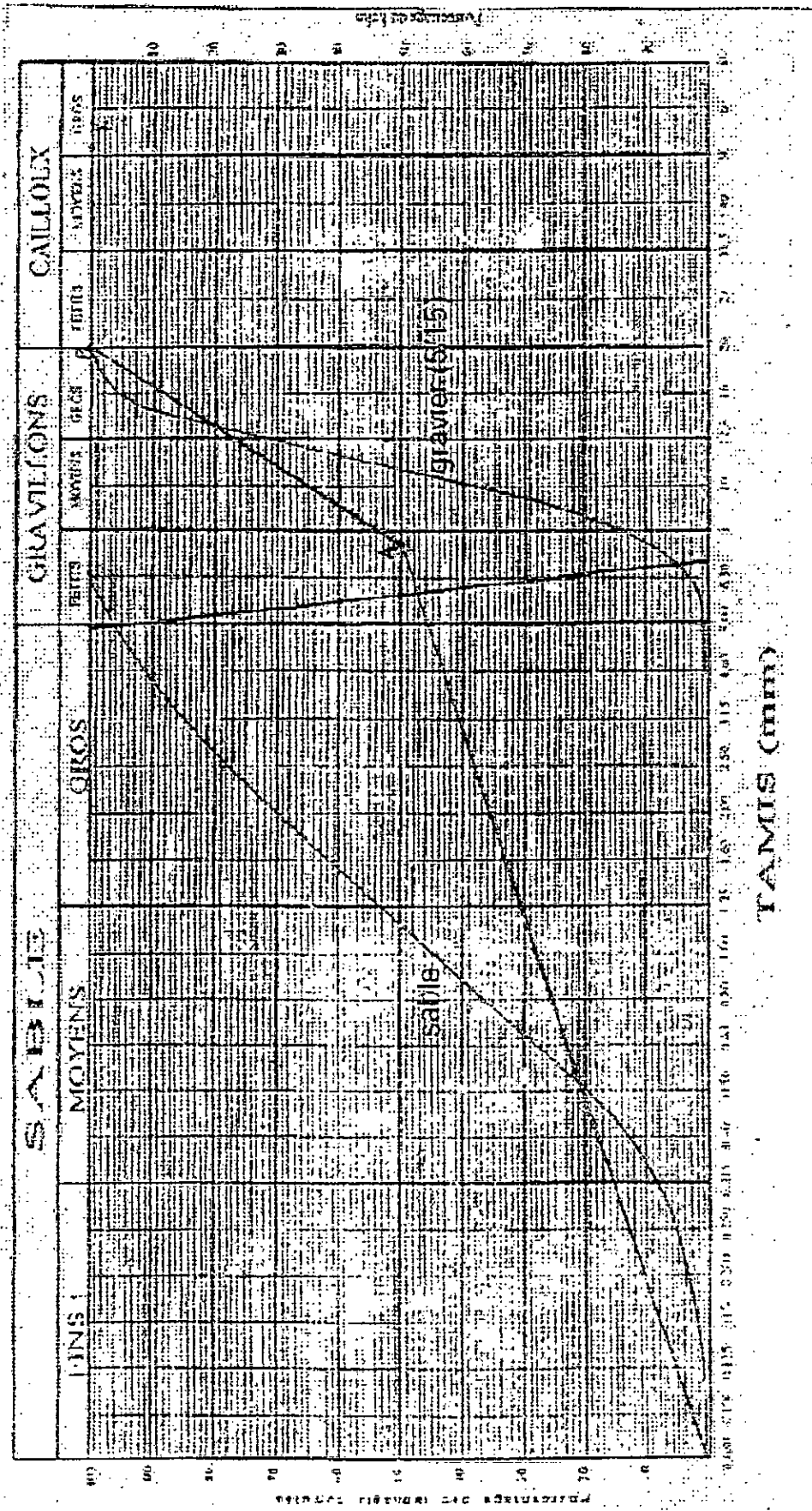


Figure 3.2: Détermination des proportions granulaires par la méthode de Dreux

### III.8. ESSAI PYSICO-CHIMIQUE

#### III.8.1. Classe des ciments

La classe des ciments a fait l'objet d'une vérification en laboratoire sur des éprouvettes (4\*4\*16 cm) d'un mortier normalisé dont la composition est la suivante :

- Sable normalisé : 1350g ( 3 parties )
- Ciment CPA 325 : 450g ( 1 partie )
- Eau : 225g ( 0.5 partie).

Les résultats des essais de compression et de traction par flexion effectués à l'âge de 7 et 28 jours sont présentés dans le tableau 3.8 :

**Tableau 3.8 : Résistance des ciments à 7 et 28 jours**

Type du ciment	Age (jours)	R <sub>T</sub> ( MPa)	R <sub>C</sub> ( MPa)
CPA 325	07	5.30	26.70
	28	7.21	46.00
CPJ 45	07	5.69	25.40
	28	7.50	40.10

#### III.8.2. Surface de Blaine SSB (Norme NFP 15-442)

La surface spécifique exprimée en cm<sup>2</sup>/g qui caractérise la surface de Blaine, peut être déterminée à l'aide du perméabilimètre de Blaine qui consiste à mesurer le temps de passage de l'air à travers un lit d'échantillon compacté dont la formule est :

$$SSB = \frac{K\sqrt{e^3}\sqrt{t}}{\rho(1-e)\sqrt{\eta}} \quad (3.7)$$

Où :

K : Constante de l'appareil déterminé par étalonnage( K = 23.65).

η : Viscosité de l'air à la température de l'essai en poise.

ρ : Masse volumique absolue en g/cm<sup>3</sup>.

t : Temps de passage de l'air dans la couche.

e : porosité de la poudre en secondes.

### III.8.3. Teneur en eau

C'est la différence entre deux poids dont :

- Un poids ( $P_1$ ) de l'échantillon
- Un poids ( $P_2$ ) après passage à l'étuve à 150°C

La teneur en eau est :

$$W = \frac{P_1 - P_2}{P_1} * 100(\%) \quad (3.8)$$

### III.8.4. Essais sur béton frais

#### III.8.4.1. Mesure de la masse volumique du béton frais

La mesure consiste à :

- Remplir un récipient d'un échantillon de volume ( $V$ ) et poids  $M_1$  (kg) connu par un échantillon du béton frais, qui a subi vibration.
- Araser et lisser les surfaces et prendre le poids du ce récipient du béton, soit  $M_R$  en (kg).

La masse volumique du béton frais est :

$$\rho_{MF} = \frac{M_R - M_1}{V} (kg/l) \quad (3.9)$$

#### III.8.4.2. La consistance du béton (Norme NFP 18-451)

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

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

### III.8.5. Essais sur béton durci

#### III.8.5.1. Détermination de la masse volumique du béton durci

Avant de procéder aux essais mécaniques, une mesure de la masse volumique consiste à :

- Mesurer le poids de l'éprouvette bien nettoyée soit M cette masse
- Mesurer les dimensions pour avoir le volume soit V (m<sup>3</sup>) alors la masse volumique est donnée par :

$$\rho_{BD} = \frac{M}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3.10)$$

### III.8.6. Essais mécaniques

#### III.8.6.1. Essai de compression

C'est l'essai mécanique le plus couramment utilisé, il est effectué sur des éprouvettes de 10 cm de côté; la presse utilisée est de type « TONI - TECHNIC » à vitesse réglable.

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

$$\sigma_c = \frac{P}{a^2} \text{ (MPa)} \quad (3.11)$$

Où :

P : l'effort appliqué

a : le côté de l'éprouvette cubique (a\*a\*a cm).

#### III.8.6.2. Essai de traction par flexion

L'essai consiste à rompre en flexion une éprouvette prismatique ( 7\*7\*28 cm) Pour une charge totale P la résistance à la traction par flexion se calcule par la formule :

$$F_{TJ} = 1.8 \frac{P}{a^2} \text{ (MPa)} \quad (3.12)$$

Où :

P : charge de rupture

a : le côté de l'éprouvette prismatique (a\*a\*4a).

### III.9. FORMULATION DU BETON BITUMINEUX

La formulation d'un béton bitumineux a pour objectif de rechercher les proportions des différents constituants (liant, granulat), conduisant à obtenir, en final, les performances désirées : Imperméabilité, compacité, et stabilité mécanique.

La méthode à suivre pour faire une formulation est la suivante :

- Composition granulométrique
- Teneur en liant
- Essais de laboratoire

#### III.9.1. Composition granulométrique

La composition granulométrique consiste à déterminer les proportions de chaque fraction granulaire à incorporer au mélange de telle sorte que la courbe granulométrique de celui-ci soit la plus proche de la moyenne du fuseau de spécification SETREA-LCPC.

Il est à noter que les fractions granulaires employées en Algérie sont : 0/3 ; 3/8 ; 8/15 ; 15/25.

Dans notre étude, le fuseau de spécification pour formulation est de type (0/14) et les différents pourcentages granulaires utilisés sont : 0/3 ; 3/8 ; 8/15.

Le pourcentage de déchet varie donc de 65, 30, 20 et 15% par rapport à la masse de sable, et la granulométrie obtenue sur les différents mélanges est représentée sur la figure 3.3.

#### III.9.2. Teneur en liant

Dans une formulation, la teneur en liant est le quotient de la masse de liant, sur la masse des granulats secs, exprimée en pourcentage.

Le liant est généralement un bitume de pénétration bien déterminée. Pour chaque teneur en fines retenue, l'étude portera sur au moins trois teneurs en liant. Pour évaluer ces teneurs, On utilisera la formule de Duriez suivante :

$$\text{Teneur en bitume} = K \Sigma^{1/5} \alpha \quad (3.13)$$

où :

$\Sigma$  : Surface spécifique conventionnelle =  $0.25 G + 2.3 S + 12 s + 135 F$  en  $m^2/Kg$

Avec les proportions pondérales :

$G$  : des éléments supérieurs à 6.3 mm.

S : des éléments compris entre 3.6 et 0.315 mm.

s : des éléments compris entre 0.315 et 0.080mm.

F : des éléments inférieurs à 0.080mm.

K : Module de richesse, un coefficient proportionnel à l'épaisseur conventionnelle du film de liant enrobant le granulat, la teneur à prendre en compte est fonction du type d'enrobé retenu :

Pour un enrobé bitumineux  $K = 3.45- 3.60- 3.75- 3.90$ .

Pour une grave bitume  $K = 2.15- 2.30- 2.45- 2.60$ .

$\alpha$  : Coefficient de correction destiné à tenir compte de la masse des granulats.

Si cette masse volumique est égale à  $2.65 \text{ g/cm}^3$ ,  $\alpha = 1$ .

Dans le cas contraire,  $\alpha = 2.65 /$  la masse volumique des granulats.

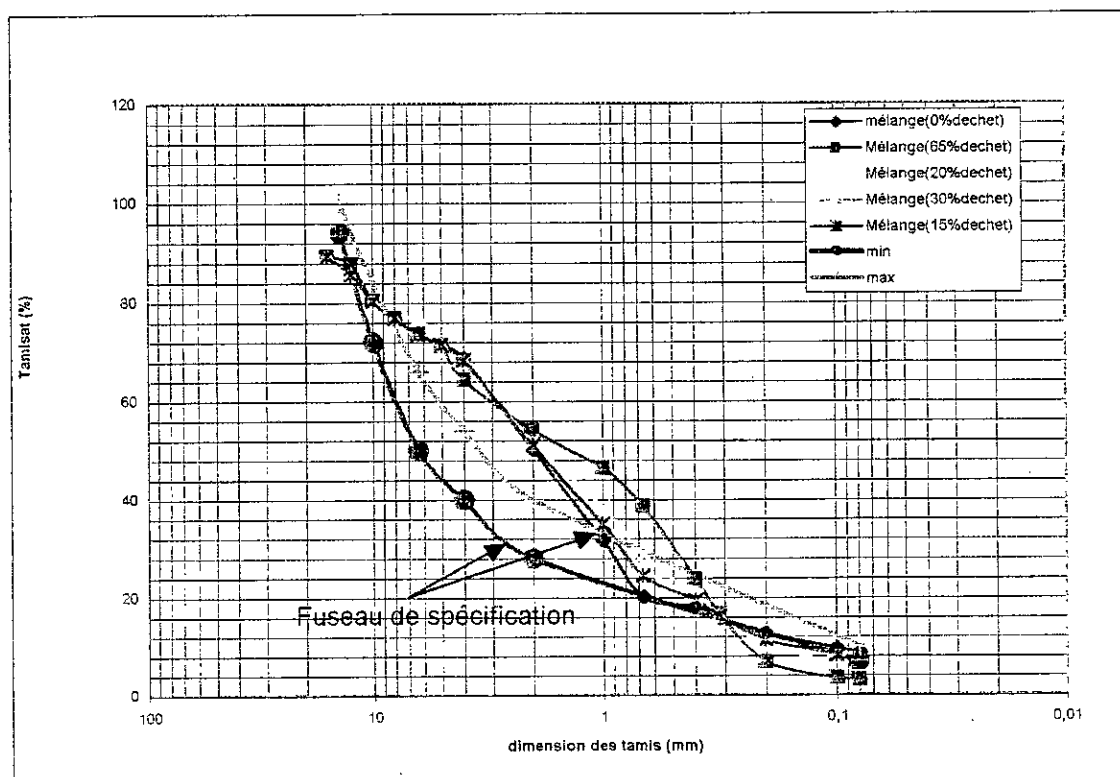


Figure 3.3 : Granulométrie obtenue sur mélanges

### III.9.3. Les essais de laboratoire

Lorsque la composition granulométrique et la teneur en liant sont déterminées, on procède à des essais mécaniques afin de vérifier les performances de l'enrobé (stabilité, compacité, etc...). Les essais les plus utilisés sont le Marshall et le Duriez.



### III.9.3.1. Essai Marshall ( NFP 98-251-2 )

L'essai Marshall a pour objet de déterminer, pour une température et une énergie de compactage donnée, la stabilité et le fluage, d'une éprouvette cylindrique de dimensions bien déterminées.

L'essai est valable pour le mélange hydrocarboné à chaud contenant des granulats de dimensions inférieures ou égales à 20 mm. L'essai consiste à compacter les éprouvettes par damage selon un processus normalisé, les conserver dans un bain-marie à une température de 60°C, pendant 30 mn, puis à les soumettre à un essai de compression suivant une génératrice. La charge maximale atteinte au moment de la rupture par la compression est la stabilité Marshall, l'affaissement (déformation cylindrique) de l'éprouvette au moment de la rupture par compression au 1/10 de mm est appelée le fluage Marshall.

### III.9.3.2. Essai Duriez ( NFP 98-251-1 )

L'essai Duriez a pour objet de déterminer, pour une température et un compactage donné, la résistance à la compression d'une éprouvette d'enrobé de poids et de section déterminée. 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 :

- Soit avec un moule de 8 cm de diamètre (dit moule normal), destiné au matériau ne comportant pas d'éléments égaux ou supérieurs à 14 mm.
- Soit avec un moule de 12 cm de diamètre (dit moule dilaté), destiné aux matériaux comportant des éléments égaux ou supérieurs à 14 mm et inférieurs à 31.5 mm.

### III.9.3.3. Compacité

La compacité d'un enrobé bitumineux est le résultat de la formulation et du mode de compactage. En général une bonne compacité signifie une bonne propriété mécanique.

Une compacité élevée conduit à des enrobés bitumineux de haute performances: La résistance à la rupture ; le module complexe ; le comportement à la fatigue et la tenue à l'eau.

La compacité d'un enrobé bitumineux est déterminée en utilisant la formule suivante :

$$\text{Compacité} = (MVA/MAR) \cdot 100 \quad (3.14)$$

$$\text{Compacité} = 100\% - \text{pourcentage de vide} \quad (3.15)$$

Avec :

**MVA** : Masse volumique apparente (bitume + vides + granulat), elle se mesure par pesée hydrostatique (NF 98-50-6) qui fait appel à l'application de la loi d'Archimède dont la procédure consiste à :

- Détermination de la masse de l'éprouvette avant et après paraffinage soit  $m_1$  sa masse initiale et  $m_2$  la masse après paraffinage.
- Déterminer la masse de l'éprouvette dans l'eau soit  $m_3$  cette masse alors la masse volumique apparente en grammes par centimètre cube d'une éprouvette est calculée suivant l'expression :

$$MVA = m_1 / [(m_2 - m_3)/\rho_E - (m_2 - m_1)/\rho_P] \quad (3.16)$$

Où :

$\rho_E$  : La masse volumique de la paraffine (en  $g/cm^3$ ) à  $20^\circ C \pm 5^\circ C$

$\rho_P$  : La masse volumique de l'eau est considérée constant et égale à 0.998 entre 18 et 25 °C.

**MVR** : Masse volumique réelle (bitume + granulat), elle se calcule à partir des mesures volumétriques réelles de chaque constituant.

$$MVR = (100 + PL) / [(100/MVA_g + PL) / MVR1] \quad (3.17)$$

Tel que :

**PL** : Pourcentage en poids du liant

**MVR1** : Masse volumique réelle du liant ( $=1.02 g/cm^3$ )

**MVR<sub>g</sub>** : Masse volumique réelle de l'ensemble des granulats.

Avec :

$$MVR_g = 100 / [\sum (p_{gi} / MVR_{gi})] \quad (3.18)$$

Où :

**P<sub>gi</sub>** : Pourcentage en poids des différents granulats

**MVR<sub>gi</sub>** : Masse volumique réelle correspondante ( $2.65$  à  $2.95 g/cm^3$ ).

Les performances exigées en terme de compacité sont représentées dans le Tableau 3.9:

Tableau 3.9 : Les valeurs des compacités [28]

ESSAI	PERFORMANCES EXIGÉES	
	Couche de roulement (BB)	Couche de base (GB)
<b>DURIEZ</b> <b>Compacité LCPC</b>	91 à 95% (0/10) 92 à 96% (0/14)	88 à 96%
<b>Résistance à la compression</b> <b>à 18°C en bars</b> <b>80/100</b> <b>60/70</b> <b>40/50</b> <b>Rapport (r/R)</b> <b>r : Résistance après</b> <b>immersion</b> <b>R : Résistance à sec</b>	> 50 > 60 >70 >0.75	> 40 >50 >65 >0.65
<b>MARSHALL</b> <b>Compacité (%)</b> <b>Stabilité en (kg)</b> <b>60/70</b> <b>40/50</b> <b>Fluage en 1/10 de mm</b>	≤ 97 > 600 >700 < 40	

### III.9.4. Essais sur bitume

#### III.9.4.1. Pénétrabilité ( NF T 66-004)

C'est la profondeur d'enfoncement, exprimée au dixième de millimètre, d'une aiguille normalisée, de 1 mm de diamètre, sous une charge de 100 g, appliquée pendant 5 secondes à 25°C. La pénétrabilité à 25°C est l'une des bases de la classification des bitumes routiers. Les spécifications correspondantes se traduisent par deux nombres correspondant aux seuils supérieur et inférieur de la classe considérée.

En Algérie, deux classes de bitumes routiers sont utilisées : 80/100 et 40/50.

#### III.9.4.2. Point de ramollissement bille et anneau (NF T 66-008)

L'essai est réalisé au moyen d'une bille d'acier de 3.5 g placée sur un disque de bitume coulé dans un anneau de 15.9 mm.

L'ensemble est placé dans un bain chauffé à vitesse constante, sous l'effet du poids de la bille et de la température, le bitume flue, quand la poche ainsi créée touche le plateau

inférieur de l'équipage, on note la température correspondant au changement de la consistance qui caractérise le point de ramollissement **TBA**.

Comme pour la pénétrabilité, on donne pour chaque classe de bitume les limites inférieures et supérieures entre lesquelles doivent se situer les valeurs de TBA. Le bitume utilisé est de classe 40/50 provenant de SONATRACH dont les caractéristiques sont :

- Pénétrabilité : 38
- Point de ramollissement TBA : 52°C.

En comparant aux valeurs spécifiées par le tableau 3.10, les valeurs trouvées sont conformes aux caractéristiques du bitume de classe 40/50.

**Tableau 3.10:** Caractéristiques des bitumes routiers [28]

Caractéristiques	Méthode normalisée	180/220	80/100	60/70	40/50
Pénétrabilité à 25°C, 100g, 5s	NF T 66-004	180 à 220	70 à 100	50 à 70	35 à 50
Point de ramollissements bille et anneau	NF T 66-008	34 à 43	42 à 48	45 à 51	50 à 56
Densité relative à 25 ° C (au pycnomètre)	NF T 66-007	1.00 à 1.07	1.00 à 1.07	1.00 à 1.07	1.00 à 1.10

### III.10. ESSAI DE LIXIVIATION ( NORME NFP X31-211)

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

Le lessivat représente une solution, obtenue à l'issue du lessivage, sur laquelle seront effectuées les caractérisations analytiques (par exemple : analyse physico-chimique, essais écotoxicologiques). L'éprouvette préparée et pesée est mise en contact sous agitation (agitateur magnétique ou à pales hélicoïdales avec vitesse de 120tr/min  $\pm$  20tr/min dans les conditions définies ci-après :

- Mise en contact solution de lessivage/éprouvette dans un rapport massique L/S = 10 (3.7)
- Séparation du déchet solide résiduel et du lessivat.

Les lessivats obtenus étant soumis à analyse et mesure, le résultat sur chaque paramètre recherché est exprimé en concentration du paramètre dans le lessivat ( exemples : milligrammes par litre, unités toxiques par mètre cube, etc.....).

### III.11. CONCLUSION

Les essais effectués sur les granulats ont confirmé la bonne qualité de ces derniers, et leur conformité à l'élaboration du béton hydraulique et bitumineux.

L'analyse chimique du laitier et ciments a montré leurs caractéristiques satisfaisantes et le broyage du laitier a permis d'atteindre une SSB d'environ 3435 cm<sup>2</sup>/g, cette finesse est relativement égale à celle des ciments utilisé comme ajout pour améliorer la résistance mécanique du béton élaboré.

Les essais effectués sur le bitume ont confirmé qu'il s'agit bien d'un bitume dur de classe 40/50.

L'objectif du prochain chapitre est d'exposer les résultats des essais relatifs au mortier, béton hydraulique frais et durci, ainsi que ceux effectués sur le béton bitumineux, suivis de quelques discussions et interprétations, en essayant de trouver une destination possible pour les produits élaborés.

---

**CHAPITRE IV**

**RESULTATS ET**

**INTERPRETATIONS**

---

## IV.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents résultats expérimentaux des essais effectués, en utilisant comme traitement de notre déchet le procédé de solidification/stabilisation par deux types de liants:

### 1. Liant hydraulique

- La première partie concerne la recherche sur mortier du pourcentage de déchet à incorporer
- Dans la deuxième partie et dont le but d'optimiser la formulation d'un béton contenant un pourcentage de déchet bien défini nous avons testé l'influence de certains paramètres sur la résistance mécanique
- La troisième partie se rapporte à la possibilité de la valorisation du déchet traité c'est-à-dire sa réutilisation en tant qu'élément secondaire.

### 2. Liant hydrocarboné

Cette partie est consacrée à une optimisation de la formulation d'un béton bitumineux (BB) contenant différents pourcentages de déchets dans le but est d'atteindre la stabilité et le fluage conformes aux valeurs normalisées, pouvant permettre la valorisation du déchet, ainsi traité, en tant qu'assise de chaussée.

## IV.2. RECHERCHE DU POURCENTAGE DU DECHET A INCORPORER DANS LE MORTIER

Dans cette phase, afin de fixer le pourcentage de déchet à utiliser par la suite, nous allons incorporer différents pourcentages tout en éliminant le paramètre gravier. Le mortier réalisé est identique au mortier normalisé.

Pour le mortier témoin la composition est la suivante :

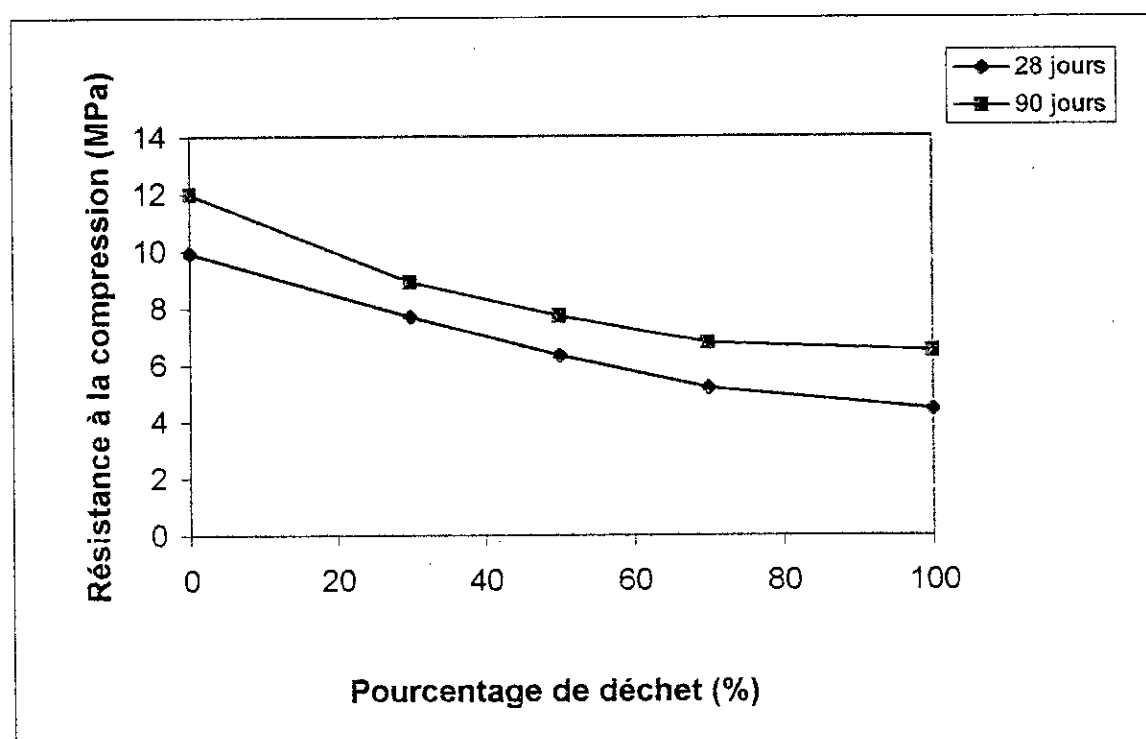
- Sable : 1350 g
- Ciment CPA 325 : 450 g
- Eau : 225 g.

Il s'agit d'une substitution par rapport à la masse du sable, du fait de sa granulométrie, de différents pourcentages en déchet qui varient respectivement de 100, 70, 50 et 30%. Pour cela nous avons déterminé le rapport E/C et la résistance à la compression à l'âge de 28 et 90

jours sur 100 éprouvettes cylindriques de (3\*6 cm) (cette taille permet d'économiser le déchet utilisé qui provient du sud) ainsi que la masse volumique en ( $\text{kg/m}^3$ ). Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 4.1 :

**Tableau 4.1 : Résistance à la compression, la masse volumique à 28 et 90 jours et le rapport E/C**

Pourcentage de déchet (%)	100	70	50	30	Témoin
E / C	1.17	0.89	0.80	0.76	0.72
Masse volumique ( $\text{kg/m}^3$ ) à 28 jours	1.52	1.62	1.68	1.70	1.78
Masse volumique ( $\text{Kg/m}^3$ ) à 90 jours	1.59	1.73	1.77	1.80	2.07
Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	4.43	5.20	6.33	7.69	9.93
Résistance à la compression à 90 jours (MPa)	6.50	6.78	7.73	8.91	12.00



**Figure 4.1- L'effet du pourcentage du déchet sur la résistance à la compression du mortier**



### IV.2.1. Discussion et interprétation

A partir des résultats obtenus nous pouvons établir déjà ces quelques constatations :

- Tout d'abord, en ce qui concerne le rapport E/C, celui-ci croît avec le pourcentage de déchet incorporé. Le dosage en ciment étant gardé fixe, la quantité d'eau additionnée augmente avec le pourcentage incorporé. Ceci est dû à la présence d'éléments argileux dans la composition de déchet. Il est à noter que le rapport E/C obtenu avec un pourcentage de 30% de déchet (soit 0.76) est assez proche de celui obtenu pour le témoin sans déchet (0.72).
- La masse volumique du mortier avec déchet est d'autant plus faible que le pourcentage de déchet incorporé est grand. Ceci est dû à une valeur relativement faible de la masse volumique du déchet ( $2.4 \text{ g/cm}^3$ ). Toutefois, pour 30% de déchet incorporé, la masse volumique obtenue (aux deux âges) est assez proche de celle du témoin.
- Enfin, en ce qui concerne la résistance à compression des mortiers élaborés nous pouvons dire que : d'une part, comme pour un mortier ordinaire, la résistance croît avec l'âge du mortier, d'autre part, la résistance du mortier élaboré, augmente avec la diminution du pourcentage de déchet incorporé.

On notera, ici aussi, que pour le pourcentage de 30% de déchet incorporé, nous obtenons un taux de résistance par rapport au témoin de l'ordre de 77% à 28 jours et de 74% à 90 jours.

Sur la base de ces constatations, et s'agissant d'un traitement par solidification, nous pouvons ainsi retenir, comme pourcentage d'incorporation de déchet au mélange, la valeur de 30% par rapport à la quantité de sable entrant dans la composition.

### IV.3. ANALYSE DU BETON

Dans cette étape, et après avoir fixé le pourcentage du déchet à 30%, nous avons procédé à l'étude de l'effet de certains paramètres sur la résistance mécanique du béton élaboré, il s'agit essentiellement de l'effet de :

- La variation du dosage en ciment qui passe de  $300$  à  $350 \text{ kg/m}^3$  et du rapport E/C
- L'ajout de laitier d'EL-HADJAR à différentes teneurs et deux finesses ( $SSB_1 = 740 \text{ cm}^2/\text{g}$  et  $SSB_2 = 3435 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) qui a pour objectif le choix d'un pourcentage optimal

d'incorporation et l'amélioration des performances mécaniques du béton élaboré avec 30% de déchet.

Pour la réalisation de cette étape des éprouvettes cubiques de dimension (10\*10\*10 cm) et prismatiques de (7\*7\*28 cm) ont été confectionnées et destinées respectivement aux essais de compression et traction par flexion pour deux âges ; 28 et 90 jours, à raison de 3 éprouvettes par âge conservées à l'air libre.

Il est utile de rappeler que l'incorporation du laitier a été faite en fonction du poids de ciment. Pour les deux dosages en ciment utilisés nous avons effectué, sur les compositions de béton, deux essais qui sont :

1. L'ouvrabilité (l'affaissement au cône d'Abrams en cm)
2. La Masse volumique ( $\text{kg/m}^3$ ).

En variant le dosage en ciment de 300 à 350  $\text{kg/m}^3$ , et en procédant par la méthode dite de « Dreux-Gorisse » (chapitre troisième section III.7.1), nous avons abouti à la composition granulaire représentée dans le tableau 4.2 alors que la composition des bétons est donnée au tableau 4.3 :

Tableau 4.2 : Dosage des granulats en volume absolu exprimé en pourcentage

Dosage en ciment ( $\text{kg/m}^3$ )	Composant	Gravier	Sable roulé
C = 300	%(en volume absolu)	50	50
C = 350	%(en volume absolu)	52	48

Tableau 4.3 : Composition des bétons avec les deux dosages

Composants	Dosage en ciment ( $\text{kg/m}^3$ )	
	300	350
Ciment	300.00	350.00
Sable	945.00	887.00
Gravier (5/ 15)	959.00	975.00
Eau	194.00	192.00

## IV.4. ESSAIS SUR BETON FRAIS

### IV.4.1. L'ouvrabilité

Pour chaque composition nous avons mesuré l'affaissement au cône d'Abrams dont les résultats sont récapitulés dans le tableau 4.4 et 4.5 :

**Tableau 4.4 :** Evolution de l'ouvrabilité en fonction du dosage en ciment

Dosage en ciment (kg/m <sup>3</sup> )	% du déchet	E/C	Ouvrabilité (cm)
300	Témoin	0.70	5.5
	30	0.62	1
		0.77	4.5
		0.92	Liquide
350	Témoin	0.60	6.0
	30	0.55	1
		0.65	5
		0.80	Liquide

**Tableau 4.5 :** Evolution de l'ouvrabilité du béton frais au laitier dosé à 30% de déchet

L'ouvrabilité du béton au laitier (cm), C=350 kg/m <sup>3</sup> E / C = 0.65						
Finesse du laitier SSB (cm <sup>2</sup> /g)	Teneur en laitier (%)					
	0	25	20	15	10	5
SSB = 740	5	/	5.5	5.5	5.3	5
SSB = 3435	5	6.0	6.0	/	5.8	/

### IV.4.2. La masse volumique

Les masses volumiques des bétons à différents dosages en ciment, rapport E/C et teneur en laitier sont représentés dans les tableaux suivants :

**Tableau 4.6 :** La masse volumique du béton frais

Dosage en ciment (kg/m <sup>3</sup> )	% du déchet	E/C	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
300	Témoin	0.70	2400
	30	0.62	2385
		0.77	2360
		0.92	2260
350	Témoin	0.60	2425
	30	0.55	2390
		0.65	2380
		0.80	2275

**Tableau 4.7 :** La masse volumique du béton frais au laitier dosé à 30% de déchet,  
 $C = 350\text{kg/m}^3$

Masse volumique en ( $\text{kg/m}^3$ )						
Finesse du laitier SSB ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	Teneur en laitier (%)					
	E/C = 0.65					
	0	25	20	15	10	5
SSB = 740	2380	/	2390	2385	2385	2383
SSB = 3435	2380	2398	2395	/	2389	/

#### IV.4.3. Discussion et interprétation

Les résultats du tableau 4.4, montrent l'effet notable du rapport E/C sur l'ouvrabilité du béton frais élaboré. La quantité d'eau ajoutée, pour chacun des deux dosages en ciment choisis, agit directement sur la plasticité du béton élaboré avec 30% de déchet. Comparativement au béton témoin, un écart de 1 cm seulement est obtenu.

L'ajout du laitier, à différentes teneurs, pour les deux SSB étudiées, aboutit à un gain d'ouvrabilité qui varie de 0.5 à 1 cm, comme le montre le tableau 4.5.

Concernant la masse volumique du béton frais élaboré avec 30% de déchet, on constate que celle-ci est légèrement inférieure à celle du témoin. Cet écart est encore plus faible lorsqu'on ajoute le laitier. Ce qui peut s'expliquer par le rôle que joue la finesse ( les éléments fins) dans le remplissage et la diminution de la porosité du squelette du béton (tableau 4.7).

#### IV.5. ESSAIS SUR BETON DURCI

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats des essais effectués sur béton durci pour chaque dosage et finesse de laitier, Ils concernent :

- La masse volumique en ( $\text{kg/m}^3$ )
- La résistance mécanique(à la compression et à la traction par flexion).

##### IV.5.1. La masse volumique du béton durci

En suivant le mode opératoire décrit au paragraphe III.8.5.1 nous avons déterminé à l'âge de 28 et 90 jours les masses volumiques du béton durci dont les résultats sont rapportés dans les tableaux suivants :

**Tableau 4.8 : Les masses volumiques du béton durci**

Dosage en ciment (kg/m <sup>3</sup> )	% de déchet	E/C	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> ) à 28j	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> ) à 90j
300	Témoin	0.70	2415	2420
	30	0.62	2399	2410
		0.77	2370	2380
		0.92	2270	2280
350	Témoin	0.60	2440	2450
	30	0.55	2400	2420
		0.65	2390	2400
		0.80	2298	2300

**Tableau 4.9 : Les masses volumiques du béton durci au laitier dosé à 30% de déchet, C = 350 kg/m<sup>3</sup>**

Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )							
Finesses du laitier SSB (cm <sup>2</sup> /g)	L'âge (jours)	Teneur en laitier (%) E/C = 0.65					
		0	25	20	15	10	5
		740	28	2390	/	2400	2395
90	2400		/	2410	2410	2400	2395
3435	28	2390	2415	2413	/	2410	/
	90	2400	2420	2420	/	2415	/

#### IV.5.2. La résistance à la compression

Sur les éprouvettes cubiques de 10 cm de côté conservées à une température ambiante du laboratoire ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ) jusqu'à la date de l'essai, nous avons examiné l'effet du dosage en ciment, l'effet du rapport E/C et le pourcentage du laitier et sa finesse sur la résistance à la compression, comparé toujours au béton témoin de référence (0% d'ajout).

Nous avons choisi deux âges d'écrasement ; 28 et 90 jours pour toutes les compositions, dont l'objectif visé par cette étape, est de suivre l'évolution de la résistance à la compression et le comportement du béton contenant le déchet, sans et avec laitier à long terme.

##### IV.5.2.1. L'effet du rapport E/C sur la résistance à la compression

Afin de connaître l'effet du rapport E/C sur la résistance à la compression du béton, nous avons mesuré sur les trois éprouvettes (10\*10\*10 cm) dosées à 300 et 350 Kg/m<sup>3</sup>, les

résistances à l'âge de 28 et 90 jours. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 4.10 :

**Tableau 4.10:** Evolution de la résistance à la compression en fonction du rapport E/C

Résistance à la compression (MPa)				
Dosage en ciment (kg/m <sup>3</sup> )	% de déchet	E/C	Age de l'écrasement (jours)	
			28	90
300	Témoin	0.70	17	18.30
	30	0.62	13	14.50
		0.77	12	12.90
		0.92	7.5	8.50
350	Témoin	0.60	21	22.67
	30	0.55	15.5	16.50
		0.65	13.70	14.50
		0.80	9.33	10.50

#### IV.5.2.2. L'effet de l'ajout de laitier sur la résistance à la compression

Dans le but d'améliorer la résistance à la compression du béton à 30% de déchet dont le dosage en ciment est de 350 kg/m<sup>3</sup>, nous avons incorporé différents pourcentages de laitier en adoptant deux valeurs de finesse. Les résultats trouvés sont les suivants :

**Tableau 4.11:** Evolution de la résistance à la compression du béton au laitier dosé à 30% de déchet

Finesses du laitier SSB (cm <sup>2</sup> /g)	L'âge (jours)	Teneur en laitier (%) E / C = 0.65					
		0	25	20	15	10	5
740	28	13.70	/	14.20	12.66	12.50	10.50
	90	14.50	/	15.00	13.90	13.60	11.30
3435	28	13.00	15.50	14.95	/	13.00	/
	90	14.25	16.90	15.60	/	14.70	/

#### IV.5.2.3. Interprétation

Comme, pour le béton frais, le béton durci, élaboré avec 30% de déchet et un dosage de 350 kg/m<sup>3</sup>, possède une masse volumique légèrement inférieure à celle du témoin, de l'ordre de 2%.

Cet écart devient plus faible avec l'incorporation du laitier, et il est d'autant plus faible que la finesse (SSB = 3435 cm<sup>2</sup>/g) est grande. En effet avec 20% de laitier, l'ajout, dans la composition du béton élaboré à 30% de déchet, avec un dosage en ciment de 350 kg/m<sup>3</sup>, et à l'âge de 90 jours l'écart de la masse volumique observé, relativement au témoin est de 20 kg/m<sup>3</sup> soit un taux assez faible de 1%.

Ainsi les éléments fins, du laitier broyé, ont permis de remplir les vides intergranulaire et d'obtenir ainsi un matériau presque aussi compact que le béton témoin.

Du point de vue de la résistance à la compression, comme pour le béton ordinaire, celle-ci augmente avec l'âge et le dosage en ciment. Pour l'effet du rapport E/C, et avec un rapport E/C légèrement inférieur à celui adopté pour le témoin, la résistance mécanique à la compression du béton dosé à 30% de déchet atteint des taux de résistance, par rapport au témoin de l'ordre de 65% à 28 jours et 64% à 90 jours, pour le dosage en ciment à 350 kg/m<sup>3</sup>. Ces taux relativement élevés indiquent une bonne solidification du déchet par le liant hydraulique utilisé.

Concernant l'ajout du laitier, dans la composition du béton à 30% de déchet, contrairement aux résultats espérés, les résistances mécaniques obtenues avec une teneur en laitier de 20%, par exemple, subissent une légère amélioration à 90 jours (un gain de l'ordre de 3.33% avec une SSB de 740 cm<sup>2</sup>/g et de 7% avec une SSB de 3435 cm<sup>2</sup>/g) qui nous paraît peu significative.

Ces résultats qui restent à confirmer, peuvent s'expliquer par le fait que le laitier étant lui-même un déchet industriel, se conjugue au déchet initial qui contient des hydrocarbures (déblais) pour freiner les phénomènes physico-chimiques de prise et de durcissement.

Aussi pour améliorer la résistance, cet ajout (laitier) ne pourrait pas remplacer, ceux que l'on a relevés dans la bibliographique, et qui sont la fumée de silice (trop coûteuse) et les cendres volantes (qui ne sont pas disponibles)

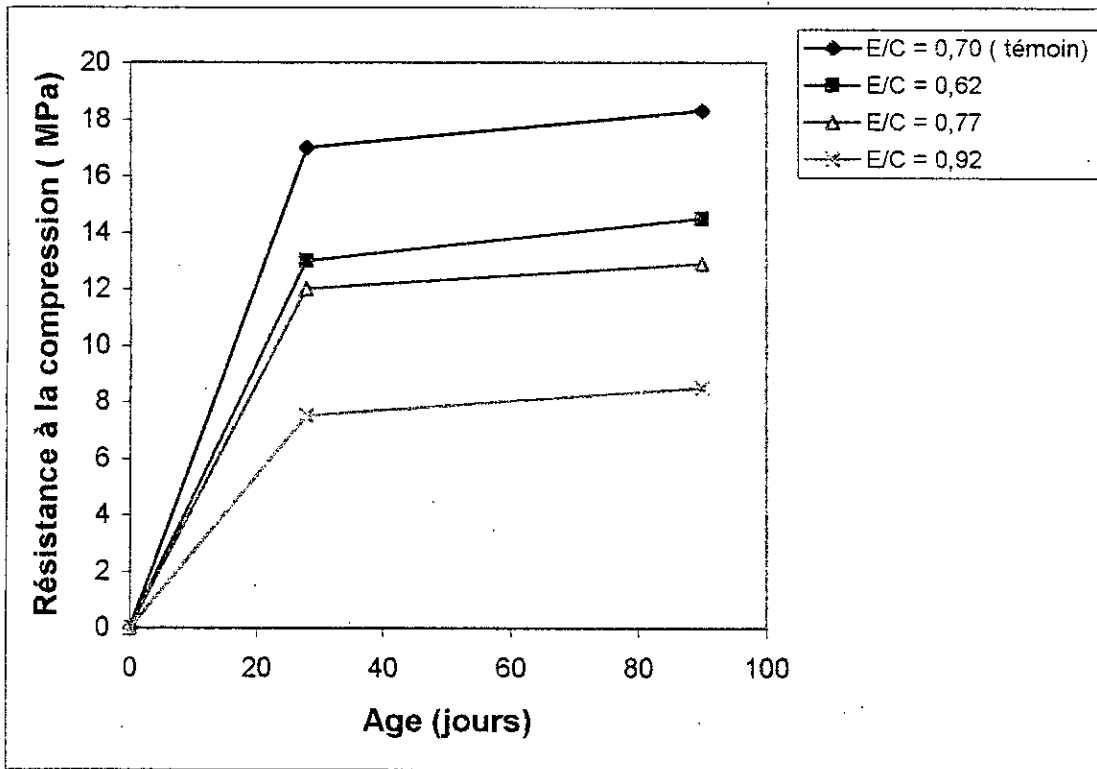


Figure 4.2 Evolution de la résistance à la compression du béton contenant 30% de déchet pour un dosage en ciment de 300 kg/m<sup>3</sup> en fonction de l'âge et rapport E/C

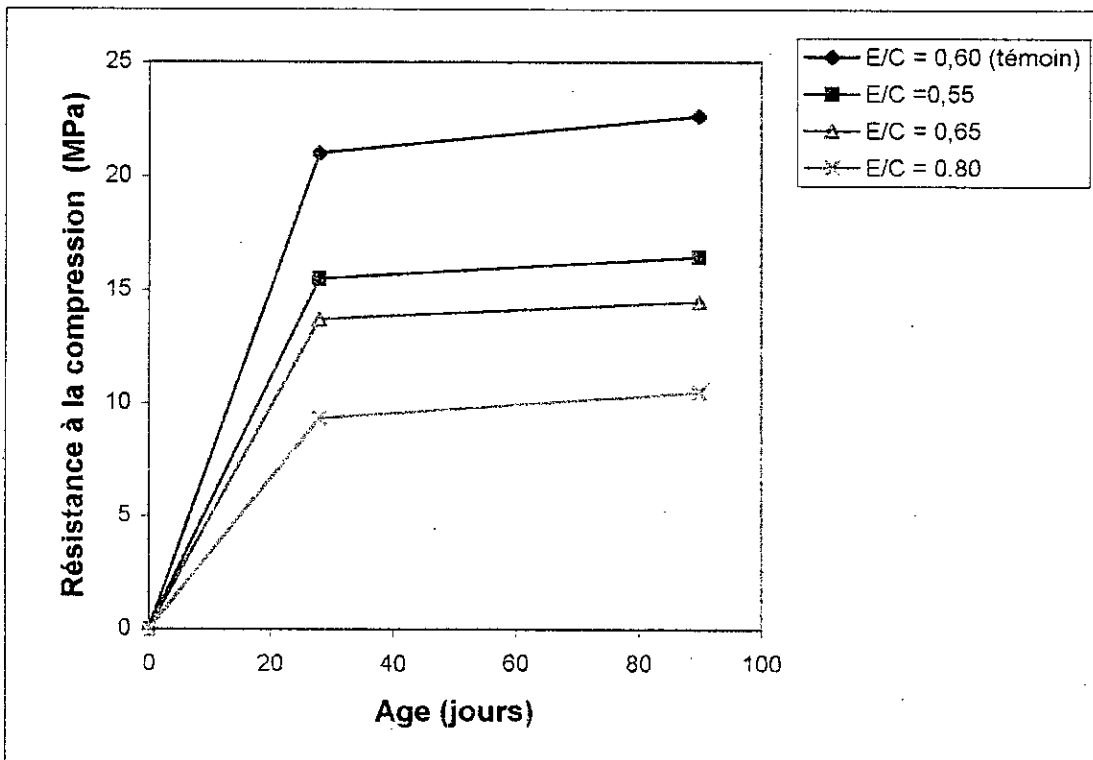


Figure 4.3- Evolution de la résistance à la compression du béton contenant 30% et un dosage en ciment 350 kg/m<sup>3</sup> en fonction de l'âge et rapport E/C



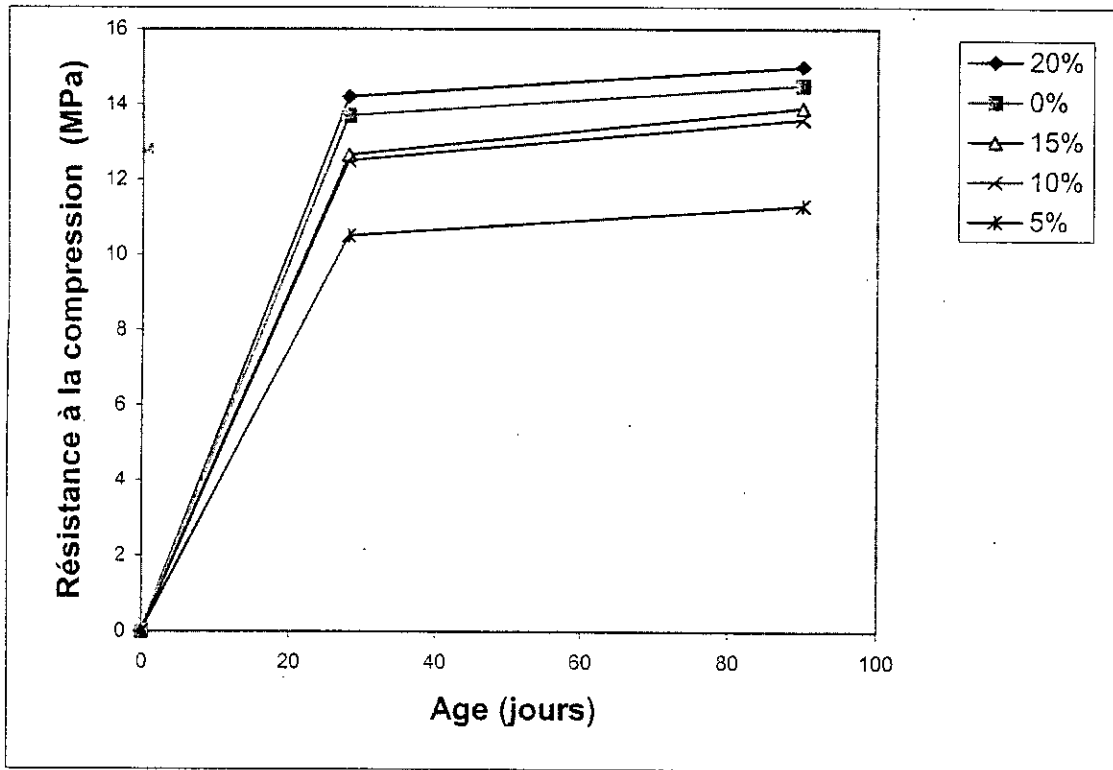


Figure 4.4- L'influence de l'ajout de laitier sur la résistance à la compression du béton dosé à 350 Kg/m<sup>3</sup> en ciment et à 30% de déchet (E/C = 0.65 et SSB = 740 cm<sup>2</sup>/g)

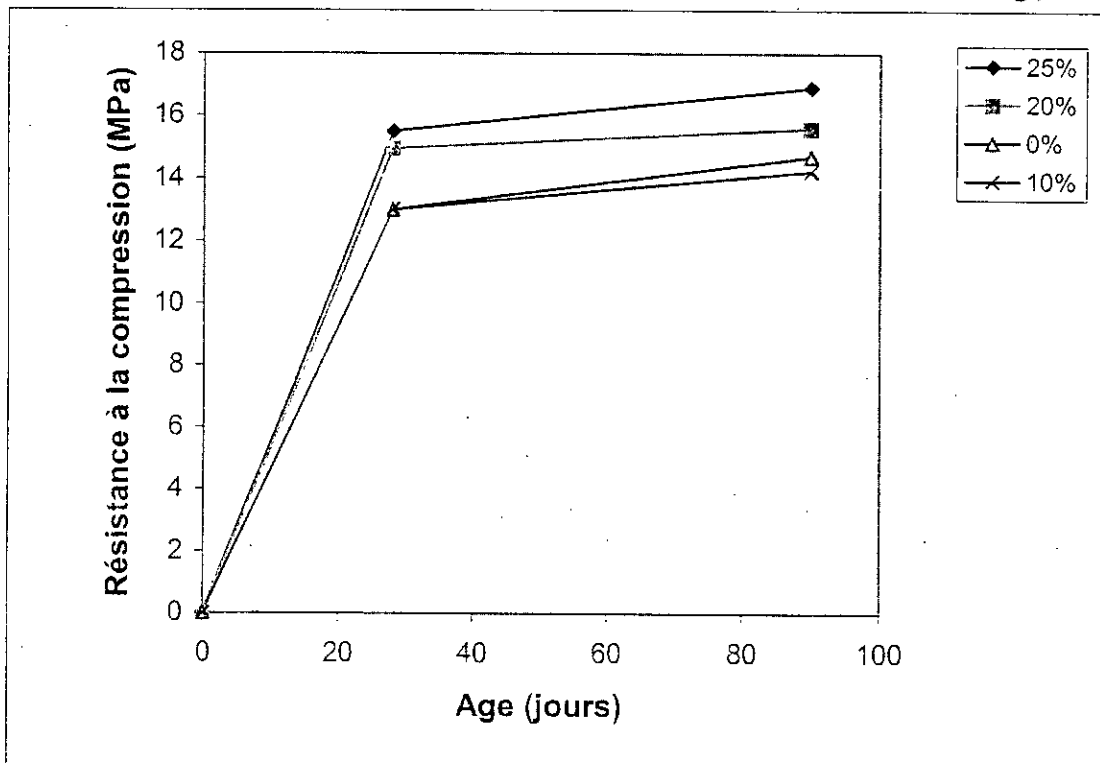


Figure 4.5- L'influence de l'ajout de laitier sur la résistance à la compression du béton dosé à 350 Kg/m<sup>3</sup> en ciment et à 30% de déchet (E/C = 0.65 et SSB = 3435 cm<sup>2</sup>/g)

### IV.5.3. La résistance à la traction

La résistance à la traction par flexion est mesurée sur éprouvettes prismatiques (7\*7\*28 cm) conservées, à l'air libre, à la température ambiante de laboratoire ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ) jusqu'à la date de l'écrasement.

Les résultats obtenus sur béton avec et sans laitier sont présentés respectivement dans les tableaux 4.12 et 4.13:

**Tableau 4.12 :** Evolution de la résistance à la traction par flexion du béton en fonction du rapport E/C

Résistance à la traction par flexion (MPa)				
E/C=0.65				
Dosage en ciment ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	% de déchet	E/C	Age de l'écrasement (jours)	
			28	90
300	Témoin	0.70	2.20	2.50
	30	0.62	2.00	2.30
		0.77	1.80	2.10
		0.92	1.30	1.60
350	Témoin	0.60	2.60	2.90
	30	0.55	2.40	2.55
		0.65	2.00	2.20
		0.80	1.70	1.90

**Tableau 4.13 :** Résistance à la traction par flexion du béton au laitier d'un béton dosé à 30% de déchet, C = 350  $\text{kg}/\text{m}^3$

Résistance à la traction par flexion (Mpa)						
E/C=0.65						
Finesse de laitier SSB ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	Age (jours)	Teneur en laitier (%)				
		0	20	15	10	5
740	28	2.00	2.10	2.05	2.00	1.90
	90	2.20	2.30	2.20	2.10	2.08

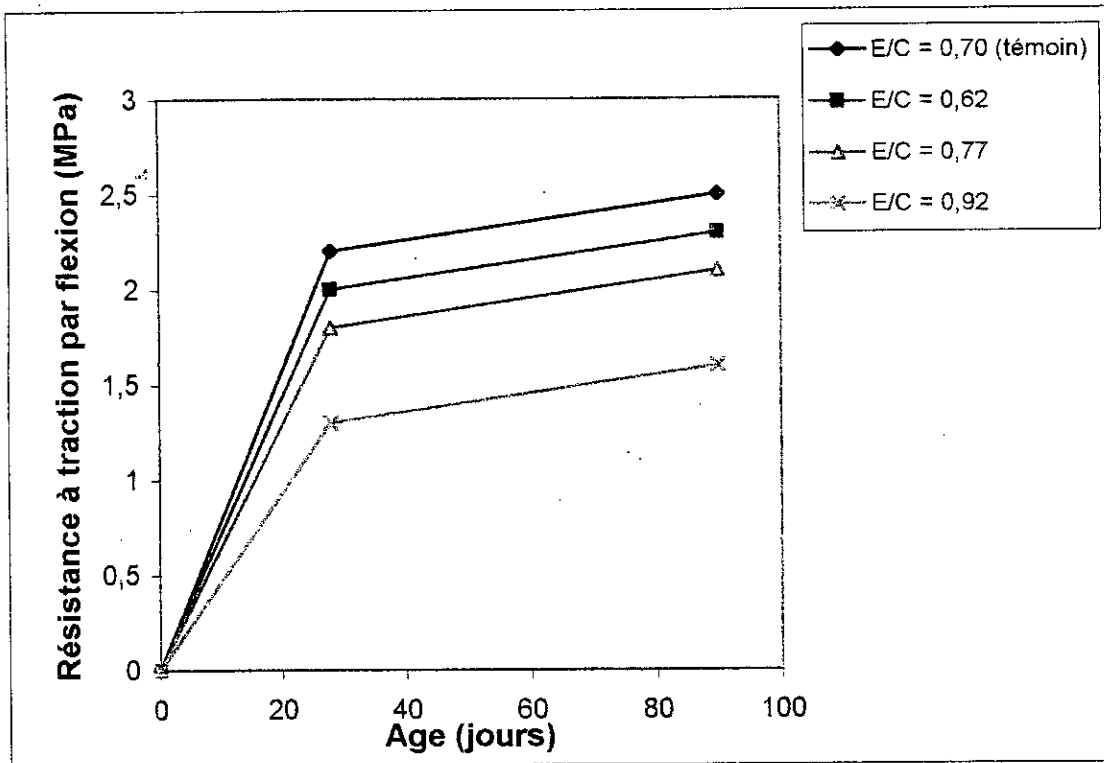


Figure 4.6- Evolution de la résistance à la traction par flexion du béton contenant 30% de déchet et un dosage en ciment de 300 kg/m<sup>3</sup> en fonction de l'âge et rapport E/C

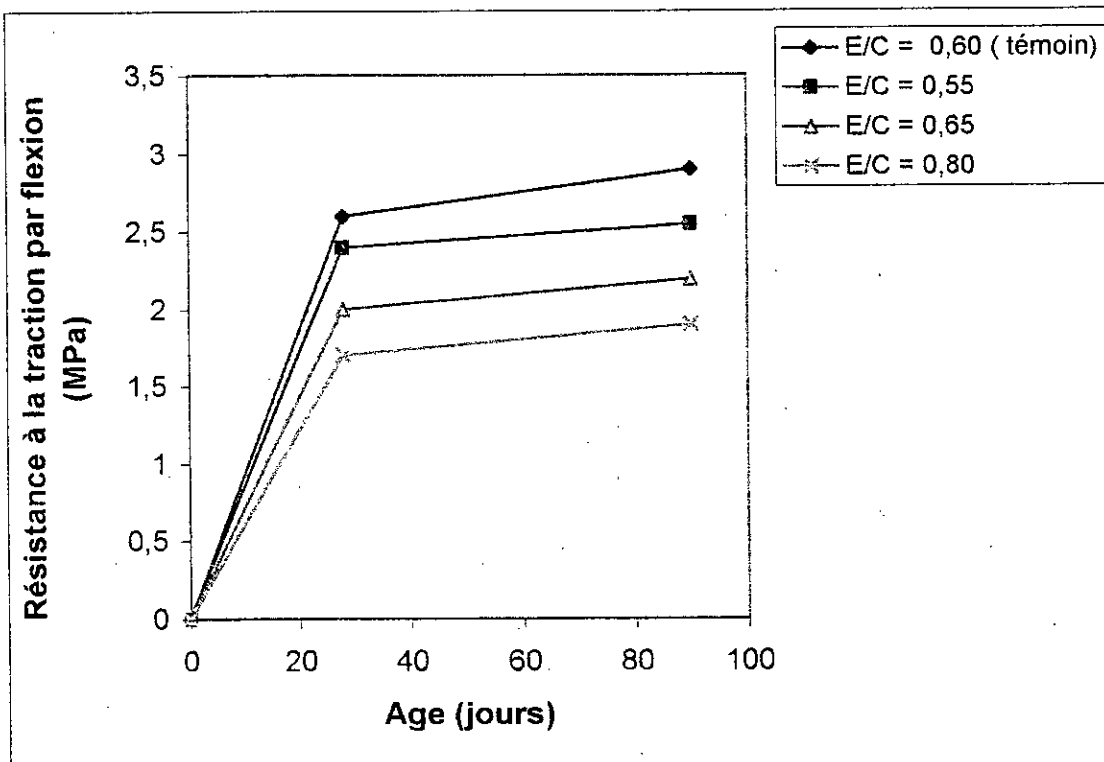
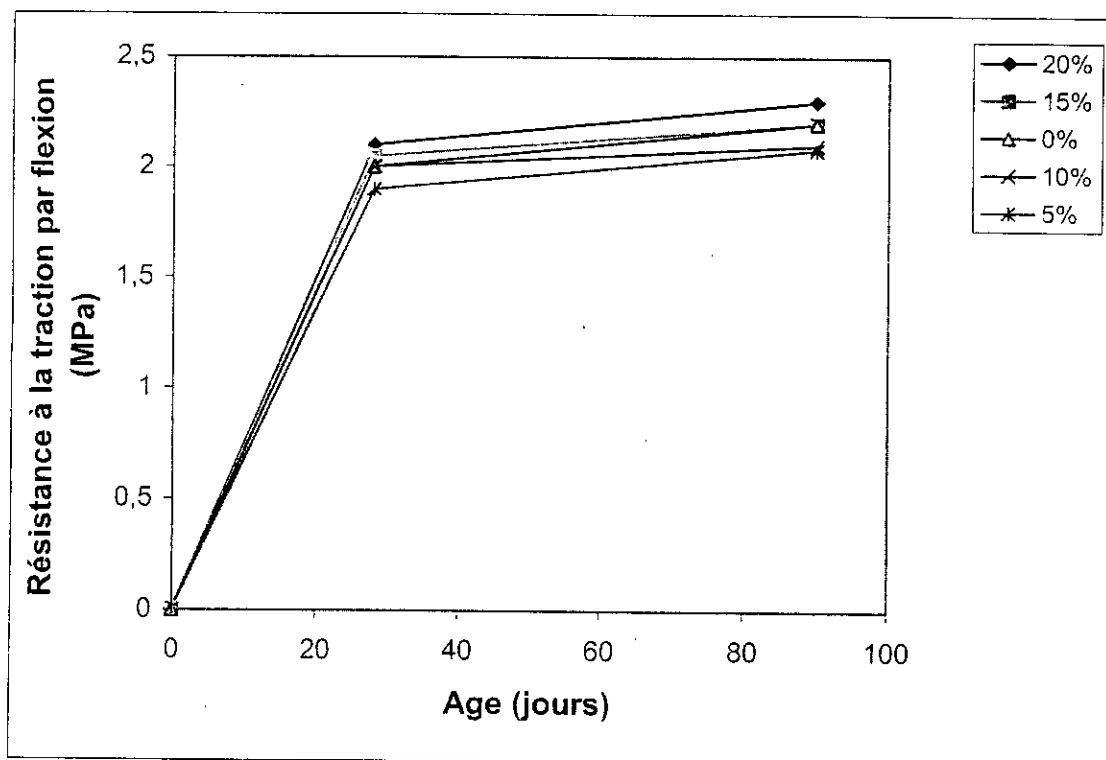


Figure 4.7- Evolution de la résistance à la traction par flexion du béton contenant 30% de déchet et un dosage en ciment de 350 kg/m<sup>3</sup> en fonction de l'âge et rapport E/C



**Figure 4.8-** L'influence de l'ajout de laitier sur la résistance à la traction par flexion du béton contenant 30% de déchet et un dosage en ciment de 350 Kg/m<sup>3</sup> (E/C = 0.65 et SSB = 740 cm<sup>2</sup>/g)

#### IV.5.3.1. Interprétation

La résistance à la traction par flexion du matériau élaboré avec 30% de déchet est très proche de celle du témoin. Ce matériau atteint un taux de résistance, avec un dosage en ciment de 350 kg/m<sup>3</sup>, de l'ordre de 77% à 28 jours et 76% à 90 jours. Les résultats présentés dans les tableaux précédents ( 4.12, 4.13, 4.13), indiquent les mêmes tendances observées, pour la résistance à la compression, concernant les effets des différents facteurs entrant dans la composition du mélange ( dosage en ciment, rapport E/C et ajout du laitier). Concernant l'ajout du laitier par exemple sur le béton dosé à 30% de déchet, contrairement aux résultats espérés, la résistance à la traction par flexion obtenue avec une teneur en laitier de 20%, présente seulement un gain de l'ordre de 4 % à 28 jours et 5% à 90 jours.

#### IV.6. CONCLUSION

Les résultats des différents essais effectués ont montré que la première partie du traitement, de notre déchet ( déblais de forage), à savoir la solidification, à l'aide d'un liant hydraulique est satisfaisante.

En effet, si on mélange 30% de déblais de forage dans une composition du béton dosé à 350 kg/m<sup>3</sup> de ciment avec un E/C = 0.65 on obtient un matériau solide et résistant, puisque sa résistance, par rapport celle de témoin (sans déchet) atteint un taux de résistance 65% à 28 jours par exemple.

Il reste alors à satisfaire la deuxième partie du traitement qui est la stabilisation des éléments polluants, contenus dans le déchet.

#### IV.7. RESULTATS DE L'ESSAI DE LIXIVIATION

Sur l'échantillon du béton dosé à 30% de déchet, et afin de vérifier la stabilisation de ce matériau vis-à-vis de l'environnement, des essais de lessivage réalisés par le centre de développement et recherche de SONATRACH (C.R.D) ont donné les résultats suivant :

**Tableau 4.14 :** Concentrations en (mg/kg) des métaux lourds dans le solidifiat

Matière Mg/kg	Fe	Zn	Cd	Co	Cu	Ni	Cr	Pb	Mn
Béton à 30% de déchet	12839	53.75	2.98	234.40	76.14	253.80	22.39	86.59	98.58

Alors que les concentrations des hydrocarbures et carbone organique total dans les solidifiats sont les suivants :

**Tableau 4.15 :** Concentration des hydrocarbures et métaux lourds

Echantillon	Béton à 30% de déchet
HYD (%)	1.77
COT (%)	2.28

Les eaux de lixiviation sont de nature basique de pH = 9. Les concentrations en éléments lourds sont représentées dans le tableau 4.16 :

**Tableau 4.16 :** Concentration en (mg/l) des éléments lourds dans les eaux de lixiviation

Echantillon	Temps(heures)	DCO	COT	HYD	Fe	Zn	Cd	Co	Cu	Ni	Cr	Pb	Mn
Béton à 30% de déchet	24	9	1.03	0	0.05	0.02	0	/	/	/	/	/	/
	328	39	16.3	0.05	0.51	0.17	0.02	/	/	/	/	/	/

On constate, d'une part, que les concentrations des éléments lourds dans les eaux de lixiviation sont fonction de la durée de l'essai et d'autre part qu'elles sont inférieures aux valeurs admises par les règles (Tableau 1.1 du chapitre 1), et on note l'absence de certains éléments lourds après traitement. On peut dire alors que ce matériau élaboré est stable.

#### IV.8. CONCLUSION

Le traitement de notre déchet avec un liant hydraulique (CPJ 45) a permis d'obtenir un matériau solide et assez résistant et dont les éléments polluants ont été stabilisés dans la matrice ciment.

Aussi pouvons nous envisager une valorisation du produit obtenu (béton ou mortier) en tant qu'élément de construction.

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

#### IV.9. FORMULATION DU BETON DESTINE AUX BORDURES DE TROTTOIR ET PAVES

Dans cette étape d'analyse, nous avons adopté les mêmes formulations (mortier et béton) d'une entreprise Algérienne de fabrication des bordures de trottoirs et pavés.

La bordure type « T<sub>2</sub> » présente les dimensions suivantes :

Largueur = 15 cm  
Hauteur = 25 cm  
Longueur = 100 cm.

A partir de la formulation de bordure (il s'agit de mortier) de cette entreprise nous avons réalisé sur des éprouvettes cubiques (10\*10\*10 cm) et prismatiques (4\*4\*16 cm) des échantillons destinés à être testés par compression et traction par flexion.

Alors que le pavé type « T » a les dimensions suivantes:

Largueur = 150 mm  
Longueur = 200 mm  
Epaisseur = 55 mm

La formulation pavée adoptée (sable concassé 0/3 + fraction granulaire 3/8 + ciment) est réalisée sur les mêmes dimensions d'éprouvettes déjà citées.

#### IV.9.1. Essai sur mortier destiné au bordure de trottoir type "T<sub>2</sub>"

L'essai le plus couramment utilisé sur le mortier pour bordures de trottoirs est l'essai de traction par flexion auquel nous avons ajouté l'essai de compression. Pour cela, les éprouvettes précédemment définies sont écrasées à l'âge de 28 et 90 jours, les résultats sont présentés dans le tableau 4.17 :

Tableau 4.17 : La résistance à la traction par flexion et à la compression

Type de bordure	Age de l'écrasement			
	28 jours		90 jours	
	Résistance à la compression ( MPa)	Résistance à la traction par flexion ( MPa)	Résistance à la compression ( MPa)	Résistance à la traction par flexion ( MPa)
Bordure témoin ( 0%)	12.00	2.60	13.20	3.10
Bordure 30 % déchet	8.50	2.00	10.00	2.40

#### IV.9.2. Essai sur béton destiné pour pavé

Les échantillons de pavé réalisés sur éprouvettes cubiques et prismatiques de dimensions citées ci-dessus ont été testés à l'âge de 28 et 90 jours, les résultats obtenus sont rapportés dans le tableau 4.18:

Tableau 4.18 : La résistance à la traction par flexion et à la compression

Type de pavé	Age de l'écrasement			
	28 jours		90 jours	
	Résistance à la compression ( MPa)	Résistance à la traction par flexion ( MPa)	Résistance à la compression ( MPa)	Résistance à la traction par flexion ( MPa)
Pavé témoin ( 0%)	13.00	2.20	14.05	2.80
Pavé 30 % déchet	10.00	1.90	11.50	2.20

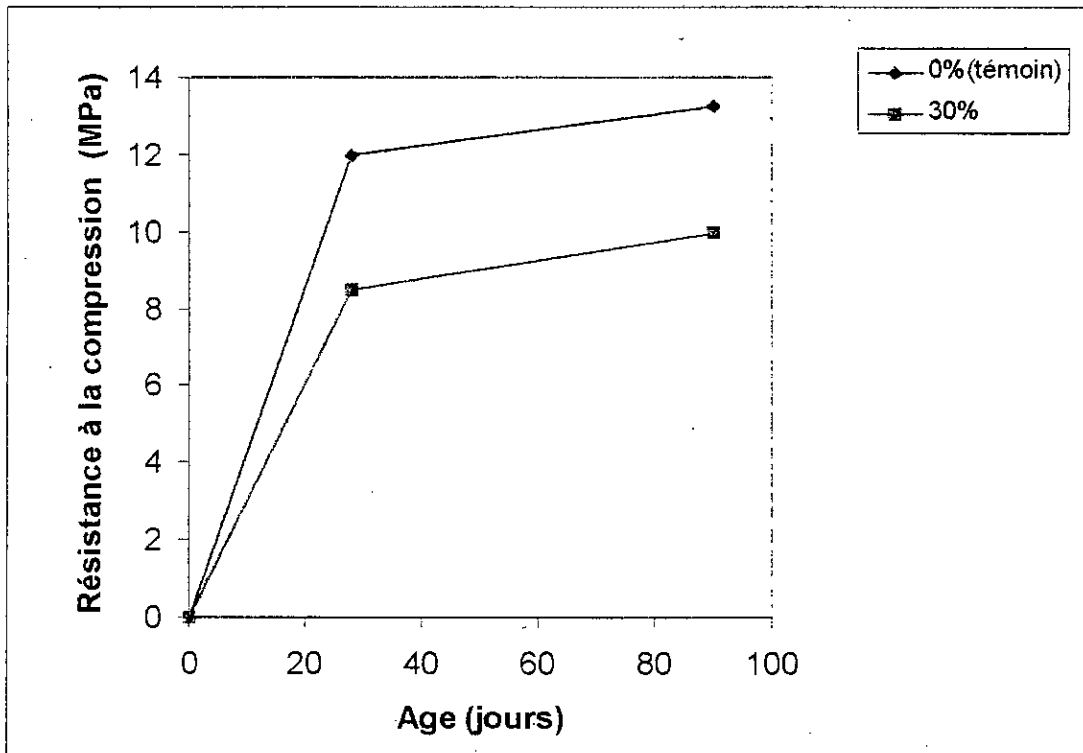


Figure 4.9- Résistance à la compression des bordures

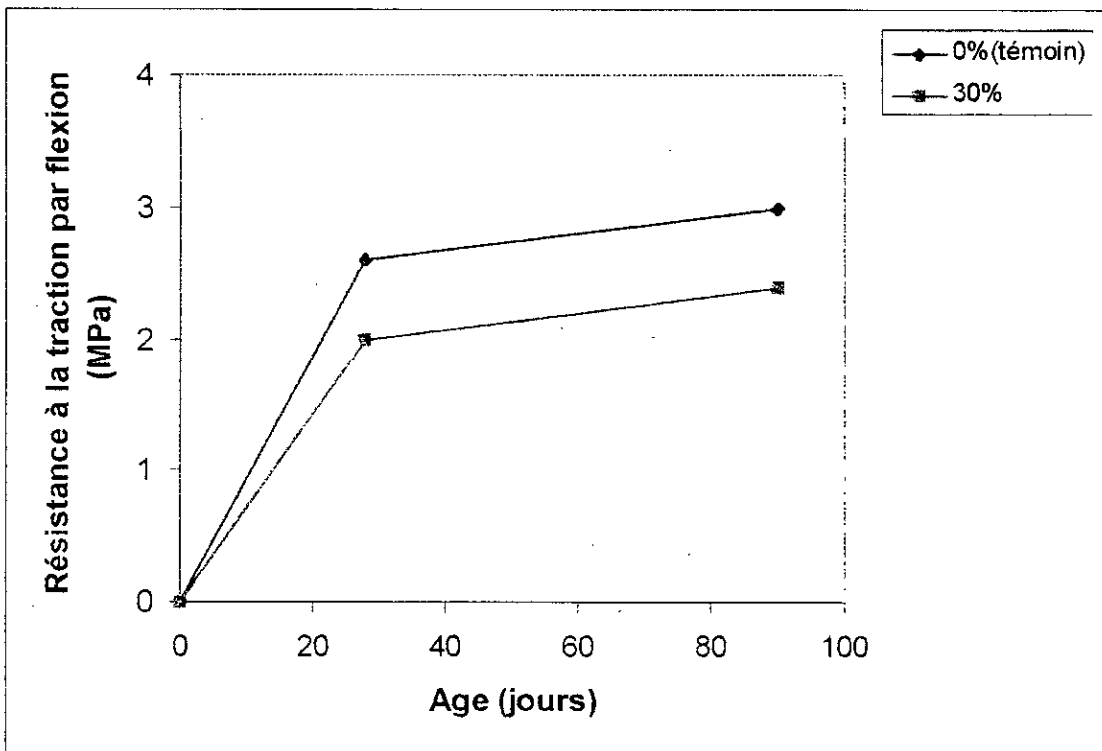


Figure 4.10- Résistance à la traction par flexion des bordures



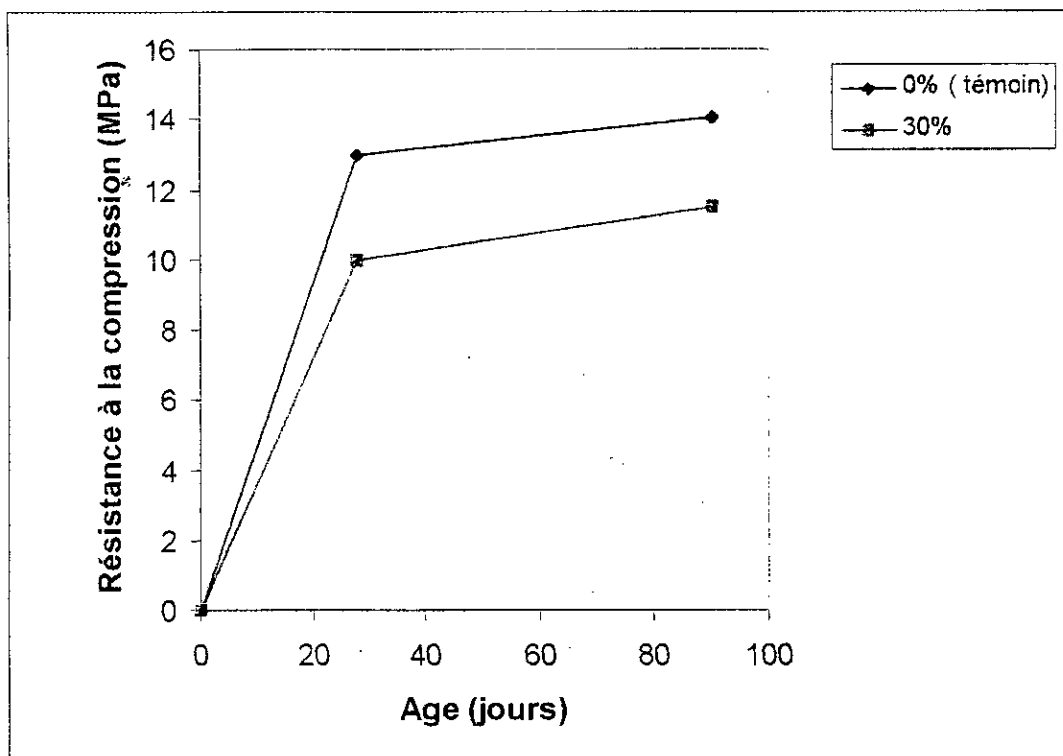


Figure 4.11- Résistance à la compression des pavés

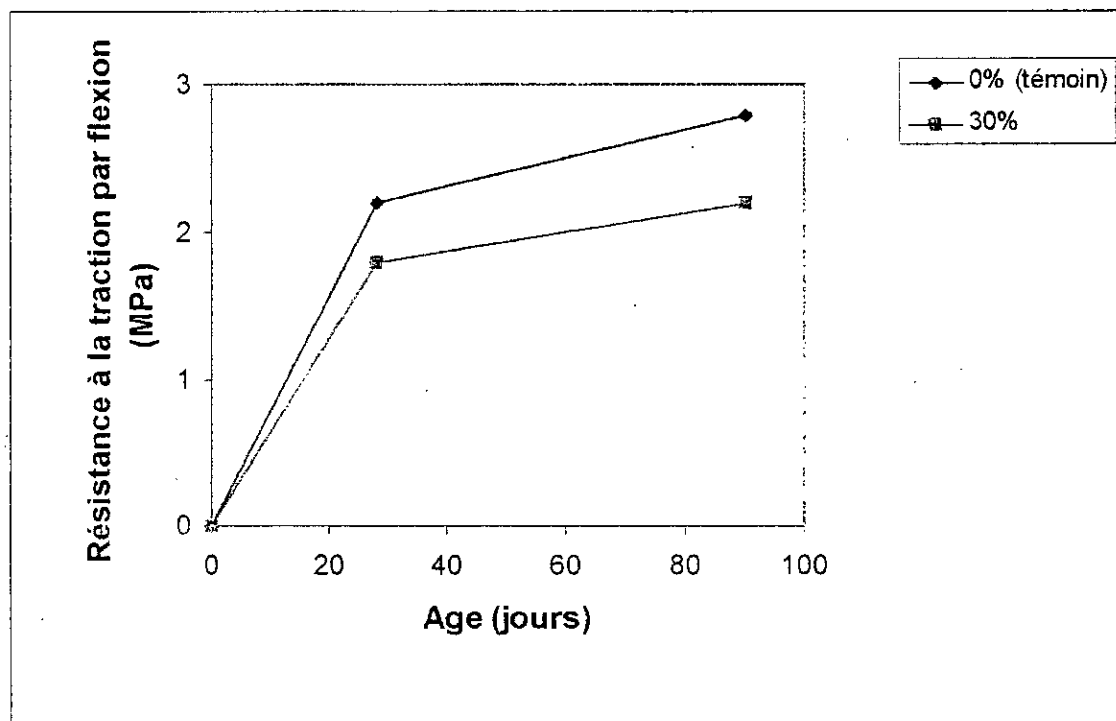


Figure 4.12- Résistance à la traction par flexion des pavés

### IV.9.3 Discussion et interprétation

Les taux des résistances à la traction obtenus pour les bordures ou les pavés, par rapport au témoin, sont acceptables. Pour la bordures par exemple, ce taux de résistance obtenu est de l'ordre de 71% à 28 jours et de 76% à 90 jours.

Ces taux sont encore meilleurs, pour ce qui est de la traction par flexion, aboutit à un taux de résistance de l'ordre de 77% aux deux âges.

Ces derniers résultats sont plus qu'encourageants, puisque ces éléments de voirie (bordures et pavés) sont classés (selon les normes françaises) en fonction de la résistance à traction par flexion du mortier ou béton constitutif.

Il est à noter qu'en Algérie, ces éléments n'obéissent pas encore à des règles stricts.

### IV.10. ETUDE DE LA FORMULATION D'UN BETON BITUMINEUX

Dans ce qui suit, et vu les résultats obtenus lors du traitement du déchet avec le ciment, nous avons procédé à la solidification en utilisant le deuxième liant qui est le bitume routier.

La formulation du béton bitumineux (0/14) a été réalisée, en utilisant un bitume dur de classe 40/50. Les fractions granulaires ayant servi à cette étude sont celles utilisées dans la formulation du béton hydraulique : 3/8, 8/15 tout en utilisant le sable concassé 0/3 provenant de la carrière « C.P.V.A d'Alger : ex carrière jobert ». Les proportions déterminées par la formulation sont les suivantes :

- 0/3 : 65%
- 3/8 : 10%
- 8/15 : 25%.

Notons que la courbe des mélanges pour les différents pourcentages en déchet substitués par rapport à la masse du sable ne rentre pas dans le fuseau proposé par SETRA-LCPC pour un béton bitumineux (0/14), ceci est dû à la granulométrie du déchet.

L'analyse granulométrique des différentes fractions est donnée au tableau 3.4 du troisième chapitre.

#### IV.10.1. Teneur en liant

La teneur en liant à été déterminé par la formule suivante (détail dans la section III.9.2 du troisième chapitre):

$$P = K \alpha (\Sigma)^{1/5}$$

Avec:

**K** : module de richesse

**$\alpha$**  : coefficient correcteur

**$\Sigma$**  : surface spécifique calculée.

Les différentes valeurs des surfaces spécifiques et teneur en liant en fonction des pourcentages de déchets sont récapitulées dans le tableau 4.19 :

**Tableau 4.19** : Modules de richesses du béton bitumineux à différents pourcentages en déchet

Pourcentage de déchet (%)	Module de richesse	Teneur en liant (%)	Surface spécifique (m <sup>2</sup> /kg)
Témoin (0%)	3.68	5.62	14.06
15	3.10	5.42	12.61
	3.25	5.16	
20	3.10	5.17	12.23
	3.25	5.42	
	3.60	6.00	
30	3.10	5.12	11.158
	3.25	5.37	
	3.60	5.94	
	3.90	6.44	
65	3.10	4.90	7.34

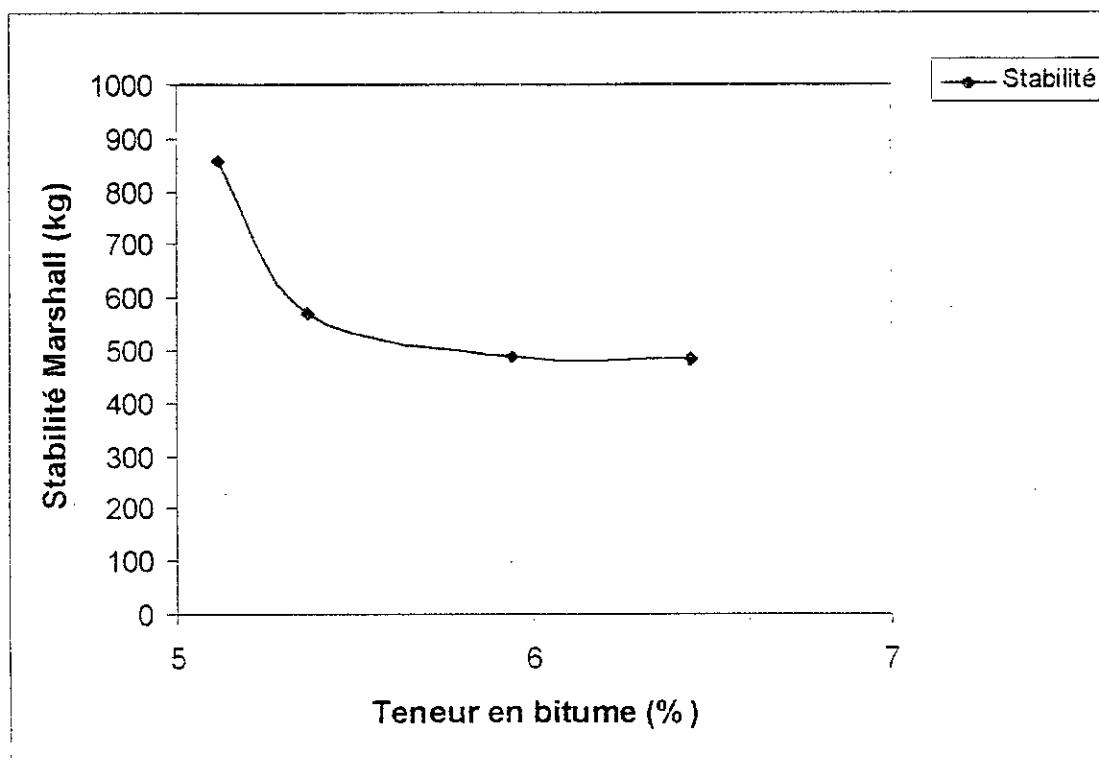
Vu l'effet important de la teneur en bitume sur les performances d'un enrobé bitumineux, nous avons constaté que les deux valeurs du module de richesse de 3.90 et 3.60 donnent un enrobé très riche en bitume (déchet contenant déjà des hydrocarbures). Ceci nous a conduit à diminuer les modules de richesse à 3.25 et 3.10 qui n'appartiennent pas à la fourchette acceptable pour un béton bitumineux qui varie généralement de : 3.45 - 3.60 - 3.75 - 3.90. Toutefois les teneurs obtenues sont celles d'un béton bitumineux ordinaire.

**IV.10.2. Résistance à la stabilité Marshall**

En suivant la procédure décrite dans la section III.9.3.1 du troisième chapitre, la stabilité Marshall obtenue sur des éprouvettes cylindriques est donnée dans le tableau 4.20. La figure 4.13 représente l'évolution de la stabilité Marshall pour 30% de déchet:

**Tableau 4.20 : Evolution de la stabilité Marshall**

Pourcentage de déchet (%)	Module de richesse	Teneur en liant (%)	Stabilité Marshall (kg)
<b>Témoin ( 0%)</b>	3.68	5.62	900
<b>15</b>	3.10	5.42	783.33
	3.25	5.16	1100
<b>20</b>	3.10	5.17	975
	3.25	5.42	676
	3.60	6.00	573
<b>30</b>	3.10	5.12	858
	3.25	5.37	572
	3.60	5.94	490
	3.90	6.44	484
<b>65</b>	3.10	4.90	303



**Figure 4.13-Evolution de la stabilité Marshall de l'enrobe à 30% de déchet en fonction de la teneur en bitume**

### IV.10.2.1. Interprétation

Avec un béton bitumineux ordinaire, la stabilité Marshall, c'est-à-dire la résistance, augmente avec la teneur en bitume jusqu'à une valeur optimale, au-delà de celle-ci la résistance diminue si on l'augmente d'avantage.

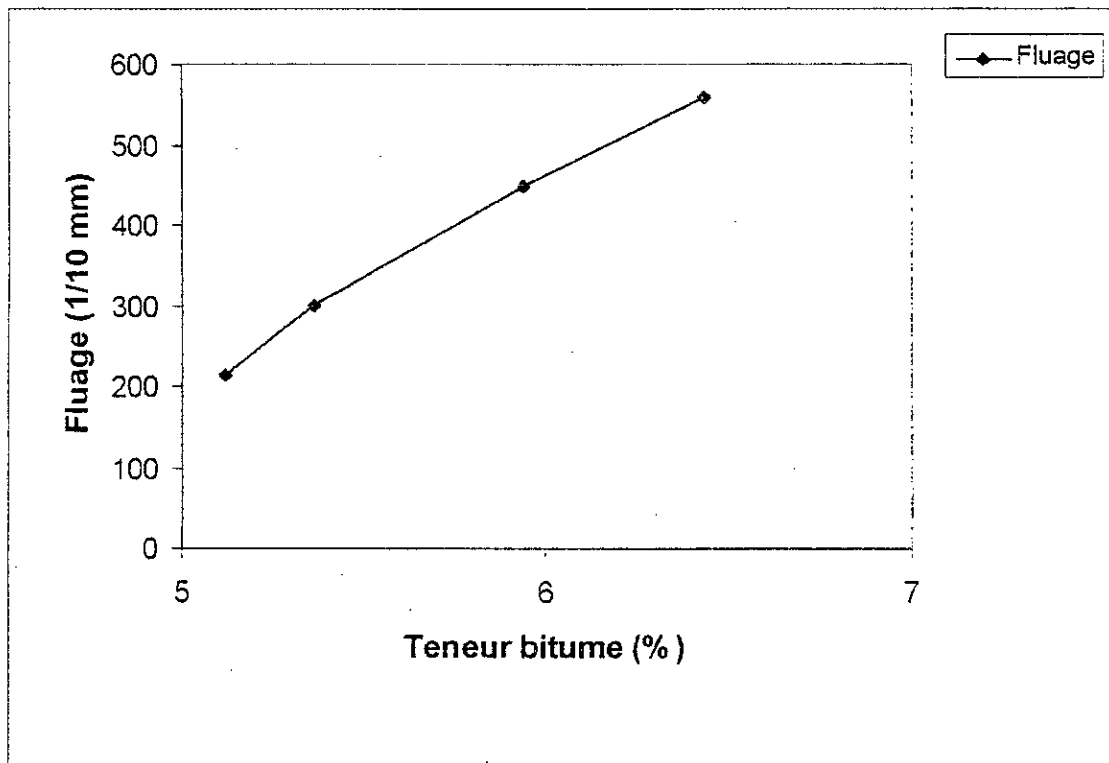
Pour l'enrobé bitumineux élaboré, on remarque que la stabilité est d'autant meilleure pour une faible valeur du pourcentage de déchet et teneur en bitume. Avec une teneur en bitume de 5.16 % pour 15 % ( pourcentage optimal ) de déchet la stabilité, atteint une valeur qui dépasse même celle du témoin sans déchet. Ceci peut s'expliquer par le fait que le déchet contient dans sa composition des hydrocarbures qui agissent comme un bitume résiduel en augmentant ainsi la stabilité de l'enrobé élaboré.

### IV.10.3. Le fluage

Les valeurs du fluage des éprouvettes cylindriques au moment de l'écrasement diamétral sont représentées dans le tableau 4.21. La Figure 4.14 représente l'évolution du fluage pour 30% de déchet :

Tableau 4.21 : Evolution de fluage

Pourcentage de déchet (%)	Module de richesse	Teneur en liant (%)	Fluage 1/10mm
<b>Témoin</b>	3.68	5.62	158
<b>15</b>	3.10	5.42	190
	3.25	5.16	150
<b>20</b>	3.10	5.17	202
	3.25	5.42	330
	3.60	6.00	350
<b>30</b>	3.10	5.12	260
	3.25	5.37	300
	3.60	5.94	450
	3.90	6.44	560
<b>65</b>	3.10	4.90	600



**Figure 4.14-** Evolution du fluage de l'enrobé à 30% de déchet en fonction de la teneur en bitume

#### IV.10.3.1. Interprétation

Généralement un enrobé stable présente un fluage très faible. Ce fluage et pour un béton bitumineux ordinaire, est proportionnel aux teneurs en bitume. C'est à dire plus on augmente la teneur en bitume plus le fluage augmente car c'est le bitume qui donne au mélange sa plasticité.

Pour le béton bitumineux élaboré, on confirme bien ce phénomène, la stabilité Marshall est faible pour un pourcentage de déchet élevé (voir tableau 4.14) et par conséquent le fluage sera important. Nous constatons qu'avec 15% de déchet et une stabilité de 1100 kg le fluage est de l'ordre de 158/10 mm.

#### IV.10.4. Densités apparente et absolue de l'enrobé contenant différents pourcentages de déchet

Les masses volumiques apparentes, obtenues par pesée hydrostatique conformément à la norme (NF 98-50-6) ainsi que celles établies par la formule théorique (formule 3.17) du troisième chapitre sont représentées dans le tableau 4.22. La figure 4.15 représente l'évolution de la compacité en fonction de la teneur en bitume pour un enrobé contenant 30% de déchet :

Tableau 4.22 : Compacité de l'enrobé élaboré

Pourcentage de déchet (%)	Teneur en bitume (%)	Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )	Densité absolue (g/cm <sup>3</sup> )	Compacité (%)
Témoin	5.62	2.34	2.46	95.00
15	5.42	2.38	2.43	97.12
	5.16	2.36	2.44	97.54
20	5.17	2.36	2.43	97.12
	5.42	2.39	2.42	98.76
	6.00	2.39	2.41	99.59
30	5.12	2.39	2.41	97.93
	5.37	2.39	2.40	98.45
	5.94	2.35	2.38	99.16
	6.44	2.35	2.37	100
65	4.90	2.14	2.34	91.45

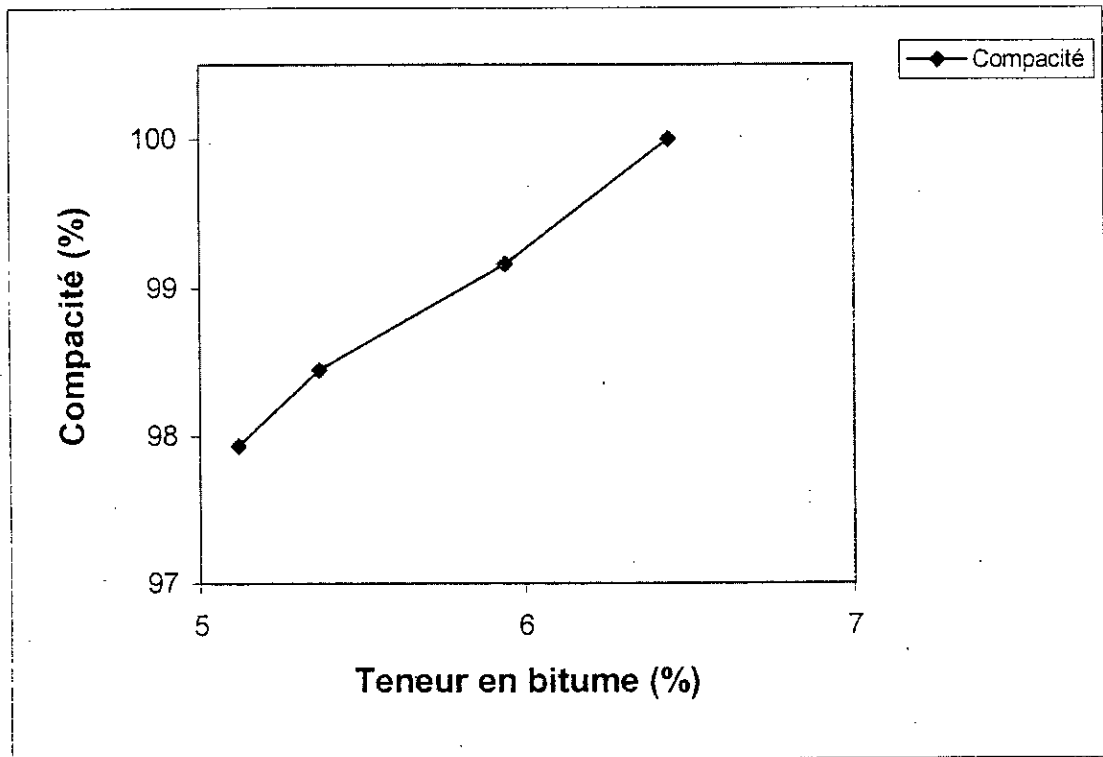


Figure 4.15- Compacité de l'enrobé à 30% de déchet en fonction de la teneur en bitume

IV.10.4 . Interprétation

Les résultats du tableau 4.22 montrent que l'enrobé élaboré pour tous les pourcentages utilisés est très compact. Les compacités obtenues sont supérieures à celle du témoin ainsi qu'aux valeurs spécifiées par les recommandations qui doivent être ≤ 97 %. Ceci peut s'expliquer par le fait que la granulométrie de déchet présente un excès de fines qui remplissent

parfaitement les vides intergranulaires et par conséquent, on aboutit à des mélanges à compacité élevée.

#### IV.10.5. Résistance à la compression de l'enrobé

Selon le mode opératoire décrit dans le paragraphe III.9.3.2 du quatrième chapitre, l'enrobé contenant 15% de déchet et une teneur en bitume ( $T_B$ ) de 5.16% a présenté une stabilité et un fluage conformes aux valeurs exigées pour un béton bitumineux en couche de roulement. Les résultats obtenus en conservant 3 éprouvettes dans l'eau et 3 à sec à une température de 18°C pendant 7 jours sont représentés dans le tableau 4.23 :

**Tableau 4.23** : Résultats de l'essai Duriez

Type de la cure	Résistance à 7 jours en (bars)	
	Enrobé à 15% de déchet, $T_B = 5.17\%$	Enrobé 0% de déchet (témoin), $T_B = 5.62\%$
Sec ( r )	40.00	69.00
Immergé ( R )	12.00	49.64

Le rapport  $r/R$  est de l'ordre de 0.73 pour l'enrobé témoin alors que celle contenant 15% de déchet est de 0.30.

En mesurant la variation volumique après quelques heures d'immersion et à 7 jours sur l'enrobé contenant 15% de déchet on trouve les résultats cosignés dans le tableau 4.24 :

**Tableau 4.24** : Les valeurs de  $\Delta V$

La variation volumique (%)	Durée d'immersion		
	2 heures	2 jours	7 jours
$\Delta V$ ( 30% de déchet)	0.59	0.82	2.05
$\Delta V$ ( témoin sans déchet)	0.00	0.55	0.75

Les résultats du tableau ci-dessus montrent clairement que l'enrobé a subi un gonflement lors de son immersion.



#### IV.10.5.1. Interprétation

Les performances exigent pour une couche de roulement une valeur du rapport ( $r/R$ ) supérieur à 0.75 et une résistance à la compression de 70 bars à 18°C. Pour l'enrobé étudié on trouve une résistance de 40 bars à sec et 12 bars après immersion ; et par conséquent, la valeur du rapport ( $r/R$ ) est de 0.30. Cette valeur est nettement inférieure à la valeur spécifiée par les normes. En effet, l'enrobé contenant 15% de déchet est influencé par l'eau qui a provoqué une chute remarquable de la résistance de l'enrobé immergé, ceci est dû aux éléments argileux qui se trouvent dans le déchet et les variations volumiques confirment bien cette constatation.

#### IV.11. CONCLUSION

Il apparaît clairement que l'enrobé contenant 15 % de déchet a présenté un comportement acceptable vis à vis de la stabilité et le fluage, donc le traitement par un liant hydrocarboné (bitume 40/50) a permis d'obtenir un matériau solide et résistant. Toutefois, on note l'effet négatif de l'eau sur le comportement de ce dernier. Il est à rappeler que le déchet se trouve en zone désertique et par conséquent le risque d'infiltration des eaux serait limitée.

---

# **CONCLUSION GENERALE**

---

## CONCLUSION GENERALE

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

- Pour le mortier élaboré, la résistance à la compression, augmente d'une part avec l'âge et d'autre part avec la diminution de pourcentage de déchet incorporé. Avec 30% (valeur optimale ) de déchet, nous obtenons un taux de résistance par rapport au témoin de l'ordre de 72% à 28 jours et 74% à 90 jours. Concernant le rapport E/C, et en gardant fixe le dosage en ciment, la quantité d'eau additionnée augmente avec le pourcentage de déchet, ceci est dû à la présence des éléments argileux dans la composition du déchet. Avec 30% de déchet le rapport E/ C est de 0.76 soit proche de celui obtenu pour le témoin sans déchet (0.72). Ces constatations restent valables pour la variation de la masse volumique qui est fonction du pourcentage de déchet et de la masse volumique de déchet ( $2.4 \text{ g/m}^2$ ).
- Avec le pourcentage optimal déjà fixé à 30%, le béton frais élaboré est très influencé par la quantité d'eau ajoutée et cela pour les deux dosages en ciments 300 et 350  $\text{kg/m}^3$ . Toutefois, l'ajout de laitier avec une SSB élevée a permis d'améliorer la masse volumique du produit élaboré par rapport au témoin (sans déchet). Pour le béton durci, la résistance mécanique à la compression, et comme pour un béton ordinaire, augmente avec l'âge et le dosage en ciment. Par rapport au témoin, on atteint pour le dosage de 350  $\text{kg/m}^3$  des taux de résistance de l'ordre de 65% à 28 jours et 64% à 90 jours. Concernant, l'ajout du laitier avec une finesse élevée, celle-ci a permis de bien remplir les vides intergranulaires sans autant augmenter la résistance mécanique (à la compression et à la traction par flexion). Pour le dosage de 350  $\text{kg/m}^3$  et 20% de laitier incorporé, la résistance à la compression présente seulement un gain de 3% à 28 jours et 3% à 90 jours, de même en traction par flexion ce taux est de 4% à 28 jours et 5% à 90 jours.

- Le traitement de notre déchet (déblais de forage) avec un liant hydraulique (CPJ 45) à permis d'obtenir un matériau solide et assez résistant, dont les éléments polluants ont été stabilisés dans la matrice ciment. Pour cela nous avons envisagé une valorisation du produit obtenu (béton et mortier). En tant qu'élément de la construction. Les taux de résistance à la compression pour la bordure par exemple sont de l'ordre de 71% à 28 jours et 76% à 90 jours. Ces tendances sont encore meilleures pour la résistance à la traction par flexion, où le taux est d'ordre 77% aux deux âges. Cet essai est d'ailleurs celui qui est régulièrement appliqué.
- Pour le béton bitumineux élaboré, la stabilité et le fluage sont remarquablement influencée par le pourcentage de déchet et la teneur en bitume, ils sont d'autant meilleurs que ces taux seront faibles. Avec 15% de déchet, et une teneur en bitume de 5.16%, l'enrobé élaboré présente des performances meilleures en terme de stabilité Marshall et fluage que celles du témoin. On note que les enrobés élaborés sont très compacts, ceci est dû à un excès de fins dans la granulométrie de déchet. Toutefois, on obtient avec l'enrobé de 15% de déchet une chute de résistance Duriez (à la compression), c'est-à-dire ce dernier a est très influencé par l'eau dont la chute du rapport  $r/R$  par rapport au témoin est de l'ordre de 0.42, ceci est dû à la présence des éléments argileux dans le déchet. Ce phénomène pourrait être négligé, si l'enrobé est placé en couche de base et de plus dans une région très sèche (Sahara). On note que le traitement par liant hydrocarboné permet aussi d'obtenir un matériau solide et résistant.
- En terme d'économie et dans la mesure où on n'a pas à payer le savoir-faire des entreprises étrangères en devises, l'étude qui consiste à utiliser des matériaux sans valeurs économiques (déchets) et des méthodes de traitement qui font appel soit à l'utilisation des liants hydrauliques ou hydrocarbonés disponibles, et en exploitant des connaissances Algériennes, pour apporter des solutions nécessaires aux problèmes de l'environnement. L'étude dans ce sens est économique. Toutefois, et vu le manque des données nécessaires pour procéder à une étude technico-économique nous envisagions sa réalisation en perspective.

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

- Utiliser d'autres ajouts tels que la fumée de silice et les cendres volantes et les pouzzolanes, dans la composition des produits élaborés afin d'améliorer les performances à long terme.
- Etudier le comportement à long terme du béton élaboré en réalisant des essais de fluage, retrait, mesure du module d'élasticité, ... etc.
- Réaliser des éléments de bordures de trottoir et pavés en vraie grandeur et étudier leur comportement.
- Etudier la durabilité des bétons élaborés.
- Procéder à une étude technico-économique du projet dans le but de valider ce traitement par rapport au traitement qui se font par les entreprises étrangères.
- Traiter les déchets avant de procéder à leur utilisation par élimination ou en diminuant la présence des éléments polluants (organiques et minérales) dans ce dernier.

---

**REFERENCES**

**BIBLIOGRAPHIQUES**

---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] AKLLA « Intégration des préoccupations environnementales dans le développement industriel ». La revue de l'environnement symbiose. N°8, Jan-Fév, pp 15-18, (2000).
- [2] Association Française pour l'étude des eaux. « Les micro polluants minéraux dans les eaux superficielles continentales », édition (1978).
- [3] BARON.J et OLLIVIER.J.P. « Les bétons, bases et données pour leur formulation ».Ed, Eyrolles, Paris, (1999).
- [4] BELHAMRI.R et BEN MESSOUDE.K. « Contribution a l'étude de la pollution du site de forage Hassi-Messaoud ».Mémoire de fin d'étude, L'institut de Chimie Industrielle, USTHB,(1998).
- [5] BONAZOUNTAS.M, PAUL.T KOSTRCKI et EDWARD J. CALABRESE « Hydrocarbon contaminated soils ». Volume II. Ed, Lewis Publishers, pp 529-548, London,(1992).
- [6] CABANES.A. « L'incinération des déchets entre horreur et vertu ». Annales des ponts et chaussées, N°97, pp 54-59, Jan-Mars,(2001).
- [7] CHEVALIER.J.L, RUBAND.M et VHEVALIER.J. « Déchets de BTP et opportunités et vigilance ». Annales des ponts et chaussées, N°97, pp 29-37, Jan- Mars, (2001).
- [8] CHGNIOT.V et VALERY.L. « Etude du traitement de déchet industriels », Mémoire de fin d'étude de laboratoire de Génie-civil et urbanisme de Lyon, (1987).
- [9] Documents de cours de forages de formations, session.- FC 2- Sonatrach division forage (Hassi Messaoud).
- [10] DREUX.G. « Nouveau guide du béton », Ed, Eyrolles, Paris, (1985), pp 409.
- [11] DUGONON.P, PANTET.A et MONNET.PH . « De l'intérêt de caractériser les boues de bentonite ».Tunnels et ouvrages souterrains, pp 33-38, Jan-Fév, N°151, (1999).
- [12] FRALNB.S « Etude et gestion des ressources en eau du Sahara septentrionale » .Volume I.préparé pour l'UNESCO, France, (1972).
- [13] GARCIA.C et PARIGOT. P. « Boue de forage»,Ed, Technip, paris, (1968).
- [14] GORISSE.F . « Essais et contrôle des bétons ».Ed ,Eyrolles, paris,(1998), pp 200.

- [15] JEAN-GEORGES MALLOUK. « Les enrobés bitumineux », Ed, Modulo, tome I et II, Canada, (1982).
- [16] JESSE.R CONNER.R et STEVE.L.HOEFFER. « The history of stabilisation/solidification technology », critical reviews in environmental science and technology, pp 325-396.(1998).
- [17] JESSE R.CONNER et STEVE.L.HOEFFNER. « A critical review of stabilisation/solidification technology », critical reviews in environmental science and technology, pp 397-462 , (1998).
- [18] LEFEBVRE.G « Notions des chimie des hydrocarbures », Ed, Technip, Paris, (1986).
- [19] LESSAGE.R. « Les granulats », Le béton hydraulique, pp .39-58, presses de L'ENPC, Paris,(1982).
- [20] LOGBLA. « Effet de l'incorporation des ajouts minéraux sur les propriétés physico-mécaniques du béton », thèse de magister, en Génie-civil, E.N.P, (1999).
- [21] MARTIN. M. « Caractéristiques physico-chimiques des boues de forage »,Ed, Technip, paris, (1968).
- [22] MICHEL VEVUAT. « La pratique des ciments et mortiers et bétons »,Ed, Moniteur, tome I, Paris, (1989), pp 284.
- [23] MICHEL.M, « Valorisations des déchets et des sous-produits industriels »,Ed, Masson, Paris, (1981).
- [24] Norme AFNOR ; NFP 98-302. « Pavés et bordures de trottoirs », (1938).
- [25] Norme AFNOR X 31-211. « Déchet : essai de lessivage d'un déchet solide initialement massif ou généré par un procédé de solidification », Août (1994).
- [26] POULENC.R, « Manuel à l'usage des industriels », Ed, AFNOR, ouvrage collectif rédigé sous la direction de Serge Lamert, juin (1995).
- [27] Recommandation « Réalisation des couches de surface en béton bitumineux semi- grenu pour chaussées dimensionnées suivant le catalogue des structures », Nov (1985).
- [28] Shell bitume, « Bitumes techniques et utilisations », Ed, Société des pétroles.(1991).
- [29] SING.LENIERE, CHIRSTELLE. « Etude des procédés de solidification/stabilisation des déchets poreux à base de liant hydraulique ou de liant bitumineux »,Thèse de doctorat de l'institut des sciences appliquées de Lyon,(1998).
- [30] Technique de l'ingénieur, traité généralités et construction C9,A8660,C4260, (2000).
- [31] Technique de l'ingénieur, Composants préfabriqué pour le Génie Civil. C 2261, (2000).



---

# **ANNEXE 1**

---

## ANNEXE 1

La détermination de la valeur de **K** qui est un terme correcteur dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés le tableau ci après donne les valeur de **K** [ **Bibliographie 7** ]:

Tableau A : Les valeurs du coefficient correcteur **K**

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment	400	-2	0	-4	-4	-6	-4
	400	0	+2	-2	-2	-4	-2
	350	+2	+4	0	0	-2	0
	300	+4	+6	+2	+2	0	+2
	250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

Le tableau ci dessous donne les valeurs du coefficient **X** [ **Bibliographie 7** ] :

Tableau B : Les valeurs de coefficient de compacité **X**

Consistance	Serrage	X coefficient de compacité						
		D = 5	D = 10	D = 16	D = 25	D = 40	D = 63	D = 100
Molle	Piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.810	0.815	0.820
	Vibration faible	0.755	0.785	0.800	0.810	0.815	0.820	0.825
	Vibration normale	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
Plastique	Piquage	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
	Vibration faible	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825	0.830	0.835
	Vibration normale	0.770	0.800	0.815	0.825	0.830	0.835	0.840
	Vibration puissante	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
Ferme	Vibration faible	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
	Vibration normale	0.870	0.810	0.825	0.835	0.840	0.845	0.850
	Vibration puissante	0.785	0.815	0.830	0.840	0.845	0.850	0.855

Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulé sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

- Sable roulé et gravier concassé = -0.01
- Sable et gravier concassé = -0.03.